

***FORMES ET DISTRIBUTION DES OLIGO-
ELEMENTS DANS LES SOLS SALES DU
BAS-CHELIFF***

présenté par : DEKKI Nouara

DAOUD Y. –Professeur : Directeur de thèse
11-06-2012

Devant le jury composé de DJILI K. - Professeur : Président DRIDI B. – Maître de Conférences A :
Examineur ZERROUK F. – Maître-assistante A : Examinatrice

Table des matières

Dédicace . . .	5
Remerciements . . .	6
Résumé . . .	7
Summary . . .	8
ص غ ل م ل ا . . .	9
INTRODUCTION . . .	10
CHAPITRE I - SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE . . .	12
1- LES oligo-éléments dans le sol . . .	12
1-1- Les origines des oligo-éléments dans le sol . . .	12
1-2- Les teneurs et les formes des oligo-éléments . . .	13
1-3- La localisation dans le profil pédologique . . .	14
1-4- La localisation des oligo-éléments dans les constituants des sols . . .	15
1-5- Les réactions d'équilibre des différentes formes des oligo-éléments . . .	16
1-6- La mobilité des oligo-éléments dans le sol . . .	17
2- La spéciation des oligo-éléments EN SOLUTION . . .	19
2-1- La spéciation du fer . . .	20
2-2- La spéciation du manganèse . . .	21
2-3- La spéciation du zinc . . .	22
2-4- La spéciation du bore . . .	23
3- Les méthodes d'extraction des oligo-éléments . . .	24
3-1- Les méthodes chimiques . . .	24
3-2- Les méthodes physiques . . .	25
4- Les oligo-éléments dans la nutrition des plantes . . .	25
4-1- Rôle physiologiques des oligo-éléments . . .	26
4-2- La biodisponibilité des oligo-éléments dans le sol . . .	26
4-3- La déficience en oligo-éléments . . .	27
5- Les oligo-éléments dans les sols salés . . .	28
6- LES OLIGO-ELEMENTS DANS LES SOLS D'ALGERIE . . .	28
CHAPITRE II - MATÉRIELS ET MÉTHODES . . .	31
1- MATÉRIEL D'ÉTUDE . . .	31
1-1- Les sols . . .	31
1-2- Les oligo-éléments . . .	32
2- MÉTHODES D'ÉTUDE . . .	33
2-1- Les caractéristiques des échantillons . . .	33
2-2- Les différentes formes des oligo-éléments . . .	33
CHAPITRE III - RESULTATS ET DISCUSSIONS . . .	35
1- LE FER . . .	36
1-1- Les différentes formes du fer . . .	36
1-2- Relation entre les différentes formes du fer . . .	44
1-3- Relation entre les différentes formes du fer et les caractéristiques des sols . . .	44

1-4- Conclusion . . .	46
2- LE MANGANESE . . .	47
2-1- Les différentes formes du manganèse . . .	47
2-2- Relation entre les formes du manganèse . . .	53
2-3- Influence des caractéristiques du sol sur les différentes formes du manganèse . . .	54
2-4- Conclusion . . .	55
3- LE ZINC . . .	56
3-1- Les différentes formes du zinc . . .	56
3-2- Relation entre les différentes formes du zinc . . .	62
3-3- Relation entre les différentes formes du zinc et les caractéristiques des sols . . .	63
3-4- Conclusion . . .	64
4- LE BORE . . .	65
4-1- Les différentes formes du bore . . .	65
4-2- Relation entre les formes du bore . . .	68
4-3- Influence des caractéristiques du sol sur les différentes formes du bore . . .	68
4-4- Conclusion . . .	68
5- DISCUSSION GENERALE . . .	68
5-1- Les teneurs en oligo-éléments . . .	68
5-2- Les profils de distribution . . .	69
5-3- Les corrélations entre les formes des oligo-éléments . . .	70
5-4- Les corrélations entre les formes des oligo-éléments et les caractéristiques des sols . . .	70
5-5- Influence de la salinisation et de la sodisation sur le comportement des oligo-éléments . . .	71
CONCLUSION . . .	73
REFERENCES . . .	75
A N N E X E S . . .	79
Annexe I -Les différentes formes du fer (mg/kg). . .	79
Annexe II -Les différentes formes du manganèse (mg/kg). . .	79
Annexe III -Les différentes formes du zinc (mg/kg). . .	80
Annexe IV -Les différentes formes du bore (mg/kg). . .	81

Dédicace

A mes très chers parents A mes sœurs et à mon frère A ma famille et à mes amis A tous ceux qui me sont chers.

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier monsieur DAOUD Y. professeur à l'école nationale supérieure agronomique qui a dirigé ce travail.

J'adresse également mes profonds remerciements à mon président de jury, le professeur DJILI K.

Je remercie par ailleurs monsieur DRIDI B. maître de conférences à l'ENSA et madame ZERROUK F. Maître-assistante à l'ENSA de m'avoir fait l'honneur de juger mon travail et d'assister à la soutenance.

En outre, la réalisation de ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien moral et effectif de mes parents.

Je remercie ainsi tous mes amis qui ont su me comprendre dans les moments les plus difficiles, en particulier la famille Mehenni et la famille Fellah.

Je tiens à remercier aussi tout le personnel du département de sciences du sol.

Finalement, j'exprime mes remerciements à tous mes amis, en particulier Mahdjouba, Nawel, Fouzia, Faiza et son mari Khaled, Amina, Malika, Abdellah, Mohammed et tous ceux et celles que j'ai omis de citer.

Résumé

Ce travail porte sur l'étude des formes, de la distribution, et des relations de 4 oligo-éléments avec les autres compartiments des Solonchaks du Bas Cheliff.

La méthode de fractionnement chimique est utilisée pour l'extraction des différentes formes de trois cations (fer, manganèse, zinc), il s'agit de la forme totale, la forme assimilable, la forme liée aux oxydes, la forme liée à la matière organique et la forme liée aux carbonates. Pour le bore, la forme totale a été extraite par une solution de carbonate de sodium et la forme soluble est extraite par l'eau chaude.

Les Solonchaks du Bas Cheliff présentent des teneurs élevées des oligo-éléments de type cationique (Fe, Mn, Zn) et une faible teneur en bore total. Les teneurs assimilables sont faibles pour tous les oligo-éléments.

Les seules formes du fer qui seraient dépendantes sont le fer assimilable et le fer lié à la matière organique. Le fer total est localisé préférentiellement dans la fraction grossière, il est inversement influencé par la sodisation des sols. Le fer lié à la matière organique est inversement influencé par la gamme de pH observée (7.49 -8.76).

Le manganèse se présente principalement sous forme d'oxydes, cette forme est inversement influencée par le pH, la conductivité électrique et le taux de sodium échangeable.

Le zinc assimilable augmente avec l'augmentation de la teneur en zinc lié aux oxydes. Le zinc total diminue avec l'augmentation du zinc lié aux carbonates. Le zinc lié à la matière organique est favorisé par la sodicité du sol.

Le bore ne présente aucune corrélation significative avec les caractéristiques des sols.

Mots clés : salinité, sodicité, oligo-élément, fer, manganèse, zinc, bore.

Summary

This work includes the study of the shape, distribution and relationships of micronutrients with the other compartments of the Solonchaks of Lower Cheliff.

The method of chemical fractionation is used for the extraction of different forms of three cations (iron, manganese, zinc); it comes to the total form, the available form, the oxides bound form, the organic matter bound form and carbonates bound form. For boron, the total form was extracted with a solution of sodium carbonate and the soluble form is extracted with hot water.

Solonchaks of Lower Cheliff contain high levels of micronutrients in cationic (Fe, Mn, Zn) and low in total boron. Low levels of available form are observed for all micronutrients.

The only forms of iron that would be dependent are the available iron and iron bound to organic matter. The total iron is preferably located in the coarse fraction; it is inversely influenced by the sodicity of the soil. The iron bound to organic matter is inversely influenced by the pH range observed (7.49 -8.76).

Manganese occurs mainly as oxides, this form is inversely influenced by pH, electrical conductivity and exchangeable sodium.

The available zinc increases with the increase of the content of related zinc to oxide. The total zinc decreases with increasing of zinc bound to carbonates. The zinc bound to organic matter is favored by sodicity.

Boron shows no significant correlation with soil characteristics.

Keywords: salinity, sodicity, micronutrient, iron, manganese, zinc, boron.

ص ٤٤

يشتمل هذا البحث على دراسة التوزيع، الشكل والعلاقات بين العناصر النذرة مع الخصائص الأخرى للتربة المالحة لسلف السفلى

لقد استخدمنا طريقة التجزئة الكيميائية لاستخراج أشكال مختلفة من ثلاثة كاتيونات (الحديد، المنغنيز، الزنك)، وفي ذلك في: الشكل الإجمالي، الشكل القابل للذوبان، الشكل المتصل مع الأكاسيد، الشكل المتصل بالمادة العضوية والشكل المتصل بالكربونات، بالنسبة للبور، فقد تم استخراج الشكل الاجمالي بمحلول كربونات الصوديوم وتم استخراج الشكل القابل للذوبان مع الماء الساخن.

التربة المالحة لمنطقة سلف السفلى تحتوي على مستويات عالية من العناصر النذرة فيما يخص العناصر الموجبة (الحديد، المنغنيز، الزنك)، وانخفاض في مجموع البور. مستويات منخفضة سجلت بالنسبة لجميع العناصر النذرة القابلة للذوبان،

أشكال الحديد التي لها علاقة فيما بينها هي الحديد القابل للذوبان والحديد المتصل بالمواد العضوية. يتمركز الحديد الإجمالي بصفة أفضل في الجزء الخشن، ويتأثر عكسيا من قبل صودية التربة. يتأثر الحديد المتصل بالمواد العضوية عكسيا من قبل درجة الحموضة الملاحظة (7.49- 8.76)

يتواجد المنغنيز بشكل رئيسي في صورة أكاسيد، ويتأثر عكسيا هذا الشكل من قبل درجة الحموضة، التوصيل الكهربائي والصوديوم.

الزنك القابل للذوبان يزيد مع زيادة عدد محتويات التربة من الزنك المتصل بالأكاسيد. يتناقص مجموع الزنك مع زيادة الزنك المتصل بالكربونات، ويتزايد الزنك المتصل بالمواد العضوية مع زيادة صودية التربة.

البور لا يظهر أي ارتباط كبير مع خصائص التربة.

كلمات مفاتيح: الملوحة، صودية، العناصر النذرة، الحديد، المنغنيز، الزنك، البور.

INTRODUCTION

Les oligo-éléments sont des éléments nutritifs indispensables, en faible quantité, pour la nutrition des plantes (Loué, 1993). Leur comportement spécifique conduit souvent à un état déficient de leur forme biodisponible dans les sols cultivés (Lebourg *et al.*, 1996).

La nature du sol joue un rôle essentiel dans la spéciation des oligo-éléments dans le sol, et dans leur biodisponibilité pour les cultures (Kabata-Pendias, 2004)

Le matériau parental détermine la richesse du sol en oligo-éléments, qui sont généralement localisés dans la fraction fine. En effet, Bur (2008) a constaté que les oligo-éléments ont une association privilégiée avec les argiles, les oxydes et les hydroxydes du sol.

Les sols riches en argile et en matière organique retiennent plus d'oligo-éléments que les sols sableux à cause de leur grande surface spécifique (Kabata-Pendias, 2004).

Selon Peronno (1999), les sols alcalins sont plus riches en oligo-éléments que les sols acides, mais leur pH élevé limite la mobilité de ces oligo-éléments. Dans les sols acides, le cuivre et le zinc sont facilement mobiles et disponibles pour les plantes ; alors que dans les sols neutres ou alcalins, ces oligo-éléments sont immobilisés et ne sont donc plus biodisponibles (Kabata-Pendias, 2004)

Les processus de sorption et de désorption, de dissolution et de précipitation des oligo-éléments dans le sol sont affectés par les caractéristiques du sol tels que le pH, la capacité d'échange cationique, la matière organique, le potentiel redox et le contenu en ions chlorure (Acosta *et al.*, 2011 ; Du laing *et al.*, 2008).

Selon la FAO (2006), la salinisation entraîne un accroissement de la pression osmotique et rend l'eau plus difficilement mobilisable par les plantes. Elle augmente la toxicité de certains ions pour les végétaux (Na^+ , Cl^-), et elle engendre la dégradation physique du sol par la modification de l'état structural qui diminue la conductivité hydraulique.

Le phénomène de salinisation est l'un des problèmes les plus connus dans les régions arides et semi-arides (FAO, 2006). Ce phénomène affecte la qualité du sol et limite le développement des cultures.

Les sels solubles peuvent empêcher les racines d'adsorber l'eau et les éléments nutritifs et, ainsi, restreindre la croissance des plantes cultivées et limiter leur rendement (Wiebe *et al.*, 2001). Les sels solubles peuvent également limiter l'absorption de nombreux éléments nutritifs (Rahman *et al.*, 1993).

La présence des sels solubles dans la solution du sol affecte la biodisponibilité des oligo-éléments pour les plantes, cette biodisponibilité diminue avec l'augmentation de la salinité (Subbaiah *et al.*, 1995).

La salinité du sol influence la mobilité des oligo-éléments par le mécanisme de complexation et par le mécanisme d'échange ionique (Acosta *et al.*, 2011). L'augmentation de la salinité réduit l'accumulation des oligo-éléments dans les sédiments et peut avoir un grand impact sur leur biodisponibilité (Du Laing *et al.*, 2008)

En Algérie, les travaux sur les oligo-éléments dans les sols salés sont peu nombreux (Bensaid, 1981). Il semblerait que les teneurs en oligo-éléments dans les sols salés des plaines du Cheliff sont moyennes, et que le bore ne présente pas une accumulation notable dans ces sols. Par ailleurs, les teneurs en oligo-éléments dans ces sols salés seraient corrélées avec le taux de la matière organique, la capacité d'échange cationique et le taux de calcaire.

L'objectif du présent travail est de caractériser les formes, la distribution, et la relation des oligo-éléments avec les autres compartiments des sols salés du Bas-Cheliff.

Ce document sera présenté en trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les origines, les formes et la distribution des oligo-éléments dans le sol. Un état des connaissances sur les oligo-éléments dans les sols d'Algérie est présenté à la fin de ce chapitre.
- Dans le deuxième chapitre, le matériel et les méthodes utilisés sont présentés.
- Le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus.

CHAPITRE I - SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1- LES oligo-éléments dans le sol

1-1- Les origines des oligo-éléments dans le sol

Selon Trolard *et al.* (2002), les oligo-éléments dans le sol résultent d'une part des phénomènes naturels géologiques et pédogénétiques qui sont à l'origine du fond pédogéochimique local, et d'autre part de l'influence des contaminants liés aux activités humaines.

Tyler et Zohlen (1998) constatent que la nature des minéraux conditionne la richesse du sol en oligo-éléments, notamment si les sols sont de nature calcaire ou non calcaire .

Les origines des oligo-éléments du sol sont très variées (figure 1) (Bourrelier et Berthelin, 1998 ; Peronno, 1999 ; Bril *et al.*, 2007 ; Pereira *et al.*, 2007 ; Chassin *et al.*, 1996) :

- ***L'héritage du matériau parental*** : il est plus ou moins modifié par l'évolution pédogénétique, et il constitue le fond géochimique du sol. En effet, les teneurs des oligo-éléments dans les sols résultent d'abord de processus naturels, la composition chimique initiale d'un sol est héritée initialement du matériau géologique. Elle est ensuite plus ou moins modifiée par l'évolution pédogénétique en absence de tout apport d'origine humaine (Baize *et al.*, 2005).
- ***Les apports atmosphériques*** : ils sont d'origine naturelle ou anthropique comme les poussières industrielles.
- ***Les apports anthropiques*** : ils proviennent de la fertilisation chimique, des apports organiques (boues d'épuration, composts, fumiers). L'agriculture serait la source principale d'apport au sol en zinc et en cuivre (Pereira et Sonnet , 2007).

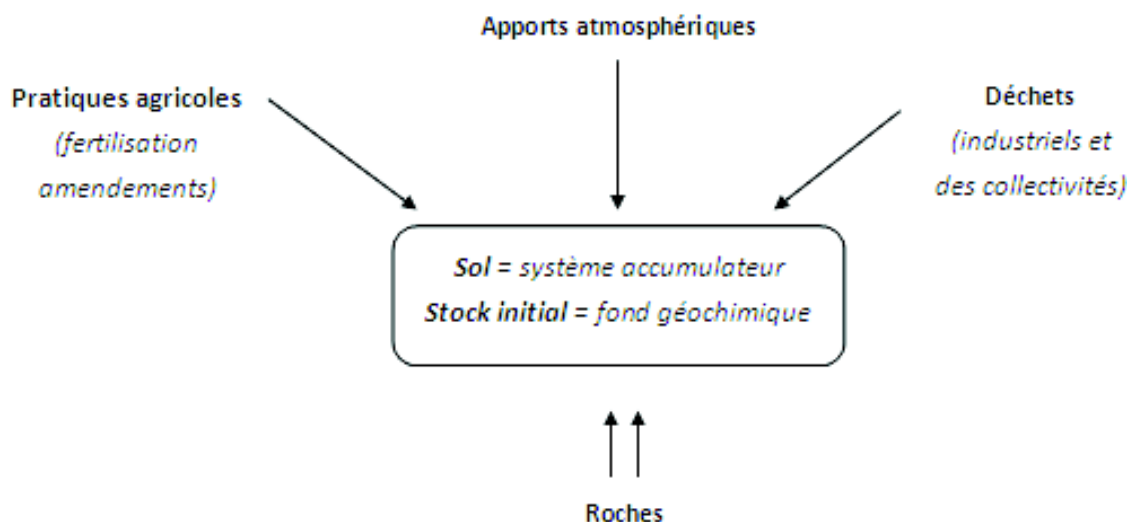


figure 1 – Origine des oligo-éléments dans le sol (Robert et Juste, 1999; in Albain, 2000),

1-2- Les teneurs et les formes des oligo-éléments

La teneur totale des sols en oligo-éléments dépend de leur nature pédologique, des décompositions subies par la roche mère, et des conditions climatiques de la formation des sols (Giroux *et al.*, 1992 ; Loué, 1993). Robert *et al.* (2011) notent que le matériel parental et l’histoire géochimique d’un sol peuvent provoquer des concentrations élevées en oligo-éléments.

Les fortes teneurs totales en oligo-éléments dans le sol n’engendrent pas forcément une toxicité pour les végétaux, car c’est la teneur assimilable qui est biodisponible et qui peut conditionner la nutrition du végétal. La spéciation des oligo-éléments du sol est donc une opération nécessaire pour évaluer leur comportement.

Les sols à texture argileuse dérivent de minéraux facilement décomposables qui sont les principales sources des oligo-éléments, la texture grossière dérive des minéraux résistants qui sont pauvres en oligo-éléments (Sillanpaa, 1972 ; in Loué, 1993) (tableau I).

Tableau I - Les teneurs en oligo-éléments dans les roches et le sol (Krauskopf, 1972 ; in Loué, 1993) (teneurs en mg/kg de terre).

Oligo-élément	Granites	Basaltes	Calcaire	Grès	Schistes	Sols
Fe	27000	86000	3800	9800	47000	10 ⁴ à 10 ⁵
Mn	400	1500	1100	10 à 100	850	30 à 3000
Zn	40	100	20	16	95	10 à 300
Cu	10	100	4	30	45	10 à 80
B	15	5	20	35	100	7 à 80
Mo	2	1	0.4	0,2	2,6	0,2 à 10

Les oligo-éléments peuvent se présenter sous 5 principaux états (Tessier *et al.*, 1979 ; Sposito, 1989 ; Baize *et al.*, 2005) :

- La forme soluble qui se trouve 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 et aux minéraux secondaires insolubles,
- La forme intégrée dans les réseaux silicatés des minéraux primaires.

Les formes soluble et échangeable représentent la forme assimilable ou biodisponible.

Coïc et Coppenet (1989) considèrent que parmi les principaux oligo-éléments dans le sol :

- le fer est le plus abondant, il se trouve sous forme soluble dans la solution du sol (Fe^{2+} et Fe^{3+} , représentant 10 % du fer total), chélatée, ou insoluble (oxydes, hydroxydes, représentant jusqu'à 90 % du fer total),
- le manganèse se trouve dans le sol sous plusieurs états d'oxydation, les plus connus sont Mn^{2+} , Mn^{3+} et Mn^{4+} .
- le cuivre est représenté particulièrement par la forme Cu^{2+} fixée sur le complexe adsorbant. Cette fixation diminue sa mobilité et donc sa disponibilité pour la plante.
- le zinc se trouve dans la nature sous forme sulfide, il se présente comme une espèce divalente (Zn^{2+}) ou complexée par la matière organique (Zn-chélaté), mais peu d'informations sont disponibles en ce qui concerne la spéciation du zinc dans les solutions salines (Amir *et al.*, 2006).
- le bore prend trois électrons de valence pour former un lien covalent, c'est un élément électronégatif, son hydrolyse donne de l'acide borique, ou du borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) (Larry et Shuman, 2005).
- le molybdène est sous forme de molybdate (MoO_4^{2-}) associé à d'autres cations du sol.

1-3- La localisation dans le profil pédologique

La concentration des oligo-éléments dans le sol varie avec la profondeur en raison de leur forte liaison avec les différents constituants solides.

Les oligo-éléments qui sont issus d'apports extérieurs vont s'accumuler en surface, leur concentration va diminuer avec la profondeur (Juste, 1995).

Dans les sols qui sont formés à partir des roches riches en oligo-éléments, il y a accroissement de la teneur en ces éléments avec la profondeur (Peronno, 1999).

Bril *et al.* (2007) ont montré que des évolutions verticales des teneurs et des taux d'enrichissement en oligo-éléments par rapport à la roche parentale varient en fonction des principales propriétés pédologiques.

Cependant, de grandes variations de distributions des oligo-éléments en fonction de la profondeur ont été observées. En effet, lorsque le sol est saturé en bases échangeables, les oligo-éléments sont conservés dans le profil, et lorsque le sol est acide des pertes en masse de tous les éléments ont été observées.

1-4- La localisation des oligo-éléments dans les constituants des sols

Les oligo-éléments se répartissent entre la phase liquide du sol et la phase solide, la phase liquide ne contient qu'une infime partie de la totalité des oligo-éléments. Les oligo-éléments se concentrent donc dans la fraction solide du sol, et ils se répartissent entre les fractions organiques et minérales.

Le réseau cristallin des minéraux primaires (directement hérités du matériau parental), contient une fraction variable d'oligo-éléments, d'origine lithologique, inclus au sein des minéraux lors de leur formation. Dans ce cas, leur présence ne sera véritablement perceptible qu'au fur et à mesure de l'altération des minéraux de la roche-mère.

Certains oligo-éléments peuvent également être adsorbés par les minéraux présents dans le sol et diffuser vers l'intérieur du cristal afin de rejoindre des cavités au sein du réseau cristallin. Il s'agit alors d'un phénomène d'absorption, et l'extraction de ces oligo-éléments des réseaux silicatés ne se fera que progressivement sous l'influence des facteurs physico-chimiques de dégradation (Pedro et Delmas, 1970).

En ce qui concerne les hydroxydes de fer, certains oligo-éléments tels que le cuivre, le zinc et le molybdène ont la capacité de se substituer au fer dans le réseau cristallin lors de sa formation, par un phénomène de co-précipitation (Gavalda, 2001 ; in Bur, 2008).

Dans le cas de minéraux secondaires, la plupart des oligo-éléments sont en mesure de se substituer aux éléments majeurs constitutifs des argiles et sont donc emprisonnés au sein même du réseau cristallin de ces silicates. Bur (2008) a montré qu'un ion quelconque pouvait être remplacé, pour un minéral donné, par un ion de même taille, sans que cela entraîne une modification notable du réseau cristallin et donc du type minéralogique.

La substitution est seulement possible si le rayon de l'élément ne diffère pas de plus de 15% à 30% de celui de l'élément majeur et si la charge ne diffère pas de plus d'une unité. Elle est d'autant plus facilitée que l'ion sera petit et fortement chargé. Ces règles ont donné lieu à la définition de 3 types de substitutions basées sur le rapport de la valence entre l'oligo-élément et l'élément majeur qu'il remplace (Bur, 2008) :

- *Le camouflage* a lieu lorsque l'oligo-élément remplace un élément majeur avec une force de liaison identique (même charge et rayon atomique proche).
- *La capture* a lieu lorsque l'oligo-élément possède une force de liaison supérieure à celle de l'élément majeur (rayon ionique proche et charge supérieure, ou même charge et rayon inférieur).
- *L'admission* a lieu lorsque l'oligo-élément possède une force de liaison inférieure à celle de l'élément majeur (même charge et rayon atomique supérieur, ou même rayon et charge inférieure).

Baize *et al.* (2005) ont résumé ainsi la localisation des éléments dans le sol (figure 2) :

- *Les argiles* : une partie importante des oligo-éléments du sol se trouve dans la phase argileuse. Ils sont inclus dans les réseaux silicatés sous une forme très peu disponible, ou encore adsorbés à la périphérie des argiles. M'leyeh *et al.* (2002) ont trouvé que la capacité de rétention des métaux par les argiles dépend du pH, elle est importante à pH=5.
- *Le carbonate de calcium* : le carbonate de calcium intervient dans la fixation des oligo-éléments, soit par adsorption, soit par précipitation d'hydroxydes ou de carbonates, ou encore par insertion dans le réseau de CaCO_3 (Peronno, 1999). Dans les sols calcaires, la solubilité des oligo-éléments est faible et l'absorption par les plantes

est insuffisante, l'excès de Ca^{++} provoque une carence relative du fer, du zinc et du manganèse à cause de l'enrobage des agrégats par le calcaire qui réduit la disponibilité de ces oligo-éléments.

- *Les oxydes* : dans la majorité des sols, certains oligo-éléments sont majoritairement présents sous forme d'oxydes de fer et de manganèse.
- *La matière organique* : elle participe à la fixation des oligo-éléments qui peuvent être retenus sous forme échangeable ou à l'état de complexes dans lesquels ils sont plus énergiquement fixés.

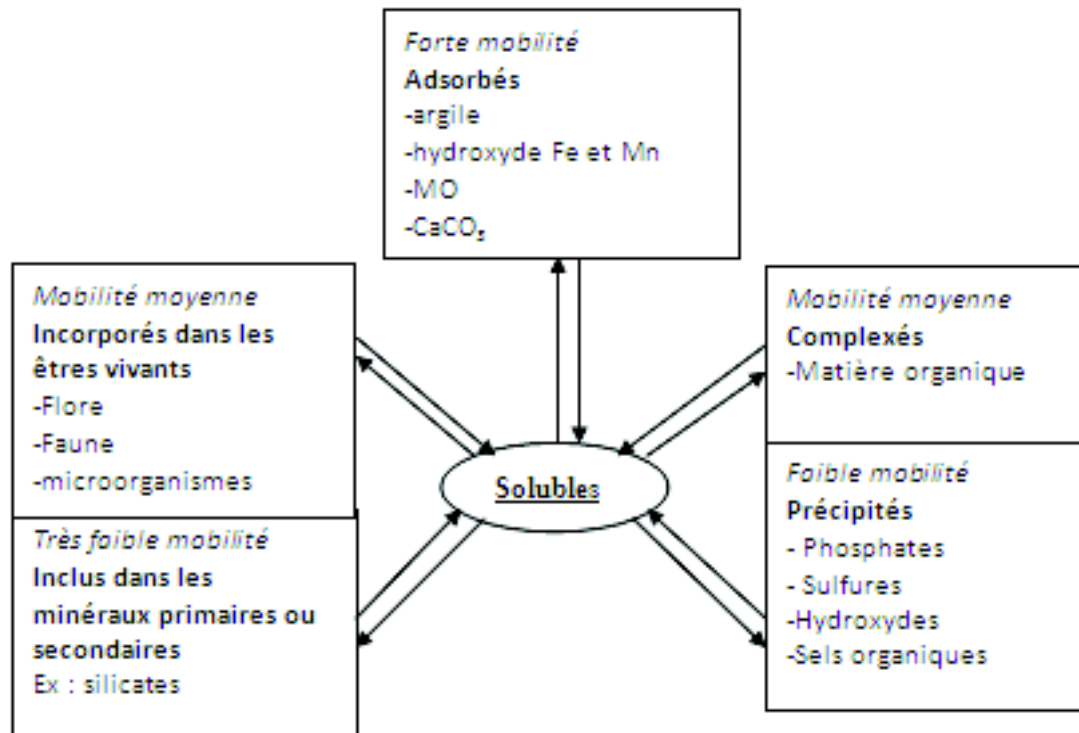


Figure 2 - La localisation et la mobilité des oligo-éléments dans le sol (Baize et al., 2005).

1-5- Les réactions d'équilibre des différentes formes des oligo-éléments

La dynamique des oligo-éléments entre la phase solide et la solution du sol peut avoir lieu par les réactions d'adsorption-désorption qui sont plus rapides que celles des précipitations-dissolutions. Les ions sont principalement portés sur les surfaces des colloïdes des argiles et de la matière organique par les sites d'échange et par les sites d'adsorption spécifique (Tabatabai et Sparks, 2005).

Pour le fer et le manganèse, l'adsorption joue un rôle mineur. Les réactions qui contrôlent ces ions sont principalement les précipitations-dissolutions qui sont conditionnées par le pH et le potentiel d'oxydo-réduction (Eh).

Le zinc et le cuivre sont adsorbés sous forme de divalents à $\text{pH} \leq 6$, à des pH élevés ils s'hydrolysent en ZnOH^+ et $\text{Cu}(\text{OH})_2$.

L'adsorption des ions se fait dans la plus part du temps par échange. L'adsorption spécifique est importante pour ceux qui sont adsorbés sur les oxydes et les surfaces organiques. Les sols argileux ont une grande capacité d'adsorption du zinc et du cuivre qui dépend de leur capacité d'échange cationique.

L'adsorption du zinc et du cuivre par les oxydes de fer est dépendante du pH et de la cristallisation de ces oxydes. Les oxydes de fer amorphes ont une surface cristalline 10 fois plus élevée que celle des oxydes de fer cristallisés.

Le bore se trouve sous forme $B(OH)_4^-$, et le molybdène se trouve sous forme MoO_4^{2-} , leur adsorption sur des sites chargés positivement est très dépendante du pH, l'adsorption est maximale à pH compris entre 6 et 8 pour le bore, et à pH inférieur à 5 pour le molybdène.

La matière organique adsorbe plus le cuivre que le zinc pour former des complexes ou des chélates. Ses groupes fonctionnels sont le COOH, phénol-OH, et les groupes C=O (Bur, 2008). L'adsorption dépend du pH. L'adsorption du cuivre et du zinc est influencée par la présence du calcium et du magnésium dans la solution du sol. Le zinc et le cuivre sont spécialement des sujets de complexation par des composés organiques, ce processus les maintient en solution, il facilite leur assimilation par les végétaux.

1-6- La mobilité des oligo-éléments dans le sol

La mobilité des oligo-éléments est définie comme étant leur aptitude à être transférés vers des compartiments où ils sont de moins en moins énergiquement retenus, le compartiment ultime est représenté par la solution du sol (Juste, 1995 ; Mc Laughlin *et al.*, 2000).

Les oligo-éléments, à l'exception du bore, sont considérés non mobiles, mais ils ont un mouvement faible par diffusion. Le molybdène est mobile dans des conditions neutres ou alcalines .

Le mouvement du zinc est assuré par la diffusion, il est influencé par le pH, l'humidité, la porosité, et la teneur en matière organique. C'est un cation fortement hydraté, et il est considéré échangeable. Aux faibles pH, la mobilité du zinc augmente.

Les oligo-éléments qui sont complexés dans la matière organique circulent par suspension avec l'eau, c'est le phénomène de chéluviation.

D'après Bourrellet et Berthelin (1998), Peronno (1999) , Baize *et al.* (2005), Pereira et Sonnet (2007), la mobilité des oligo-éléments est conditionnée par un certain nombre de facteurs :

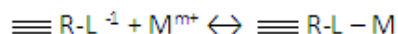
- *Le pH du sol* : la variation de pH est le facteur dont l'action sur la mobilité et la spéciation des oligo-éléments est la plus déterminante. Le pH joue un rôle primordial dans le phénomène de dissolution, l'acidification et la mobilité des oligo-éléments par mise en solution des sels métalliques ou par la destruction de la phase de rétention. Inversement, l'augmentation du pH provoque l'immobilisation par la formation de composés insolubles. Le molybdène présente un comportement opposé car sa mobilité augmente avec le pH surtout en sol calcaire.
- *Le potentiel d'oxydo-réduction*: les facteurs qui favorisent l'anoxie modifient la mobilité de certains oligo- éléments comme le manganèse et le fer dont les formes réduites sont plus mobiles dans le sol que les formes oxydées. Ce facteur intervient également sur les constituants du sol qui fixent les oligo-éléments. Ainsi en conditions d'aération satisfaisantes du sol, les composés ferriques et manganiques sont très

peu solubles et immobilisent donc les métaux qui leur sont associés. A l'inverse, en conditions d'aération limitantes, les composés du fer et du manganèse sont réduits et solubilisés ; ils libèrent donc les éléments qui leur étaient associés. Le cuivre et le zinc sont indirectement affectés quand les surfaces d'adsorption des oxydes de fer et de manganèse sont altérés par les conditions d'oxydo-réduction. La forme oxydée du zinc ne change pas dans le sol, mais l'oxydo-réduction affecte indirectement la présence et la solubilité du zinc à travers les effets des oxydes du fer et du manganèse qui adsorbent fortement le zinc. La solubilité du manganèse est largement déterminée par l'état d'oxydation du sol, le manganèse est plus facilement réduit que le fer car dans des conditions de réduction, le pH diminue et rend le manganèse soluble (Larry et Shuman, 2005).

- *La température et l'humidité du sol* : elles jouent un rôle indirect en favorisant l'activité biologique du sol par la production des substances acides ou complexantes issues de la biodégradation de matières organiques. L'augmentation de la température agit sur la dissolution des composés. L'humidité agit également directement dans les processus de précipitation et de solubilisation. Par ailleurs, un excès d'humidité peut conduire à un défaut d'aération du sol.
- *La matière organique* : Les ions métalliques se complexent avec la matière organique dans le sol par association avec les groupes fonctionnels des substances humiques. Ces groupes se comportent comme des ligands organiques complexants. Les ligands sont généralement des molécules organiques qui contiennent des ions électronégatifs donneurs d'électrons comme l'oxygène, l'azote et le soufre . Ils sont contenus dans :
 - *Les groupements de surfaces basiques* : $-NH_2$ (amine), $=O$ (carbonyle), OH (alcool) et $-S-$ (thioether)
 - *Les groupements acides* : $-COOH$ (carboxyle), $-OH$ (enolique) et $-SH$ (thiole).

Les groupes carboxyles jouent un rôle prédominant dans les liaisons métal-acide humique ou fulvique. La complexation d'un ion métallique (M^{m+}) en solution avec un ligand anionique ($R-L^{1-}$) contenu dans un matériau humique se présente ainsi :

La complexation d'un ion métallique (M^{m+}) en solution avec un ligand anionique ($\equiv R-L^{1-}$) contenu dans un matériau humique se présente ainsi :



Cette liaison est covalente coordinante car les ligands fournissent les électrons de liaison, le composé est nommé composé cordinant. La complexation par les ligands possédant plusieurs charges (complexation multidentate) est appelée chélation et ces complexes sont plus stables que ceux qui sont issus de la complexation par des ligands possédant une seule charge (complexation monodentate).

La plupart des ligands organiques contiennent plus d'un donneur d'électrons et donc ils possèdent plusieurs charges, des complexes chélatés sont donc formés avec les ions métalliques.

L'EDTA est une molécule organique fréquente dans les sols (Delmas-Gadras, 2000). Il s'agit d'un complexant puissant selon sa constante de dissociation (K_c). Les complexes organo-métalliques formés entre l'EDTA est les oligo-éléments sont très stables, la valeur de leur pK_c à pH7 est la suivante (Delmas-Gadras, 2000) :

Complexes organo-métalliques pKc

EDTA – Fe⁺⁺⁺ 21.6

EDTA – Fe⁺⁺ 10.9

EDTA – Mn⁺⁺ 10.6

EDTA – Zn⁺⁺ 12.9

En tenant compte de la valeur du pKc, la stabilité de ces complexes diminue ainsi :

EDTA – Fe⁺⁺⁺ > EDTA – Zn⁺⁺ > EDTA – Fe⁺⁺ > EDTA – Mn⁺⁺

2- La spéciation des oligo-éléments EN SOLUTION

La spéciation d'un élément est définie comme la répartition et la quantification des différentes formes chimiques d'un élément dans le sol et dont la somme donne sa concentration totale (Bur, 2008). Elle définit la distribution des espèces chimiques d'un oligo-élément dans le système solide-liquide (Cornu et Clozel, 2000). L'analyse de la spéciation consiste à mesurer la quantité des différentes espèces chimiques individuelles d'un ou plusieurs éléments dans un échantillon.

Selon Robert et al. (2011), la spéciation est l'identification des phases solides des différents métaux dans le sol avec la connaissance de leur dissolution et leur précipitation, ce qui donne des prédictions sur leur activité dans la solution du sol. Elle conditionne la mobilité des éléments et elle permet d'établir des perspectives de comportement et d'évolution de ces éléments en fonction des conditions du milieu (Bourrelier et Berthelin, 1998).

La spéciation des éléments dans le sol contrôle leur migration, leur biodisponibilité et donc leur toxicité. Leur disponibilité est essentiellement commandée par des processus d'adsorption à la surface des particules ou d'incorporation à l'intérieur des phases solides (Bur, 2008).

La part des oligo-éléments présents en solution ne représente qu'une fraction faible de la quantité totale. Les solutions du sol jouent un rôle fondamental dans la distribution des éléments car la plupart des réactions mises en jeu dans les processus pédologiques se produisent en phase aqueuse.

De plus, la part d'oligo-éléments présents dans les solutions du sol est considérée comme la plus facilement biodisponible. En solution, les éléments métalliques sont présents sous formes de cations, d'hydroxydes ou d'oxyanions selon le rayon ionique, leur charge et leur électronégativité (Pedro et Delmas, 1970).

Les ions se trouvant en solution aqueuse sont toujours entourés par des molécules d'eau, le plus fréquemment de quatre à six molécules pour les cations. L'intensité de la liaison entre l'ion métallique et les molécules d'eau dépend aussi de la charge et du rayon de l'ion.

L'affinité d'un cation métallique pour la phase aqueuse est traduite par son caractère labile, qui va généralement de pair avec une mobilité importante au sein du profil de sol et une toxicité élevée. Deux conditions physicochimiques du sol conditionnent la spéciation

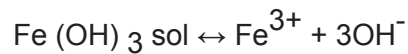
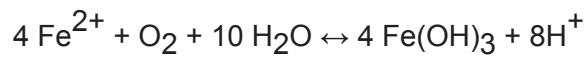
des oligo-éléments dans la solution du sol, il s'agit du pH et du potentiel d'oxydo-réduction du sol.

2-1- La spéciation du fer

Les minéraux secondaires en équilibre avec la solution du sol sont généralement :

- des oxydes ou des hydroxydes, dont les principaux la forme amorphe (Fe(OH)_3), la goethite (FeOOH), l'hématite (Fe_2O_3), et la magnétite (Fe_3O_4). La solubilité des minéraux de fer diminue dans l'ordre : Forme amorphe > hématite > goethite,
- de carbonates comme la sédirite (FeCO_3).

Les réactions d'équilibre de ces minéraux secondaires avec la solution du sol se présente selon les exemples suivants :



Ces réactions engendrent la formation de certaines espèces complexes en fonction du pH de la solution du sol :

- le Fe(OH)_3^0 se forme de façon indépendante du pH,
- Et le Fe(OH)^{2+} et Fe(OH)_2^+ se forment essentiellement en conditions acides (figure 3).

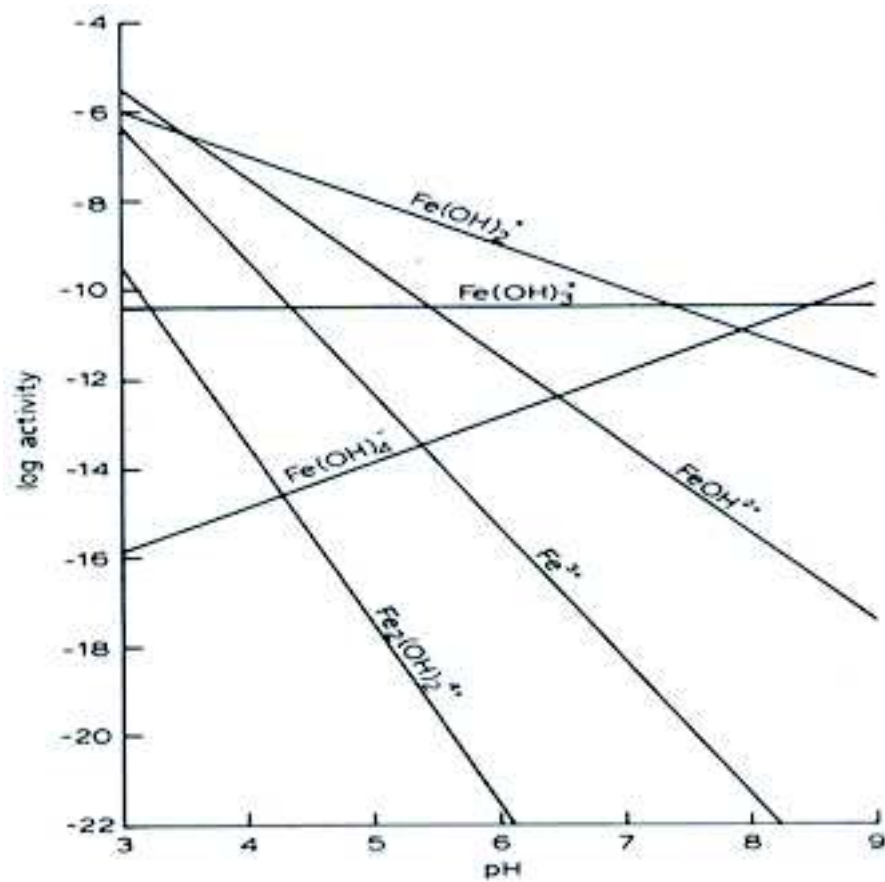


Figure 3 - Les espèces hydrolysées du fer dans la solution (Lindsay, 1979).

2-2- La spéciation du manganèse

Les minéraux du manganèse sont surtout les oxydes tels que la pyrolusite (MnO_2), la manganite ($MnOOH$), et l'hausmanite (Mn_3O_4). La pyrolusite est plus stable sous conditions d'oxydation. Le manganèse peut être aussi lié aux carbonates ($MnCO_3$) et aux silicates ($MnSiO_3$).

Dans la solution du sol, le Mn^{++} est l'ion prédominant. Le niveau d'oxydation du manganèse en solution augmente avec l'acidité du sol, le Mn^{++++} ne peut exister en solution que lorsque le pH est inférieur à 6.2 (figure 4).

La biodisponibilité du manganèse est dépendante du pH. En effet, la solubilité est importante en conditions acides, elle est donnée par la réaction suivante :



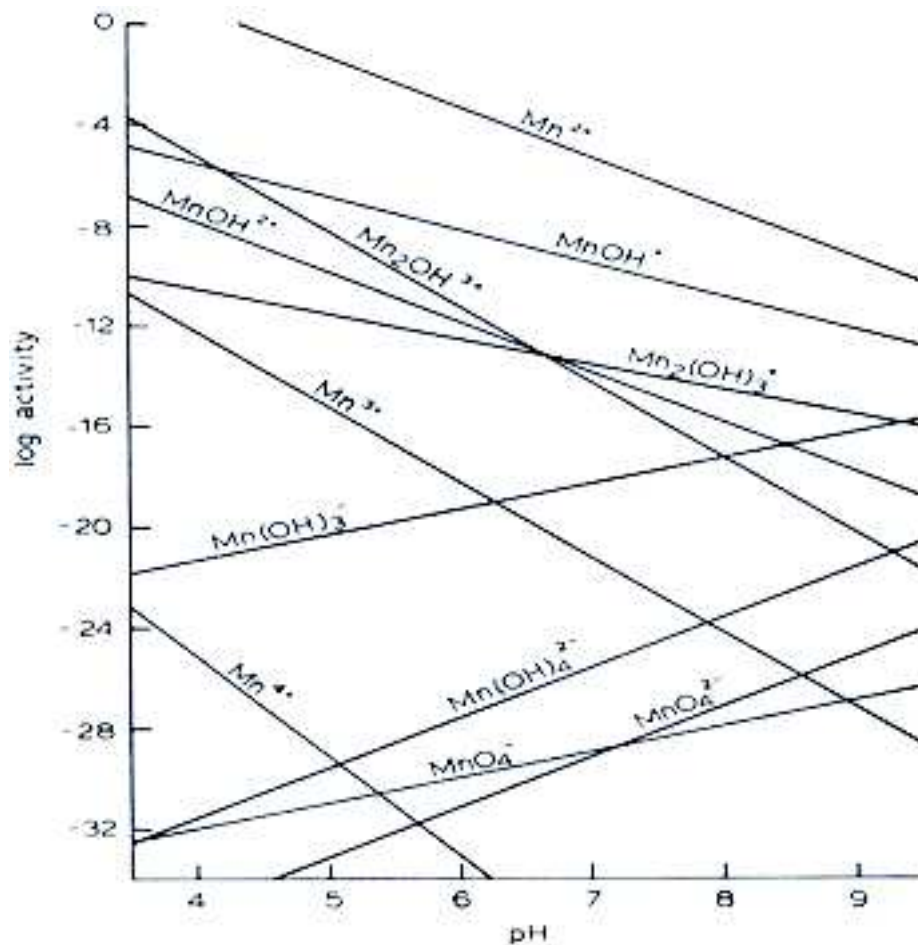
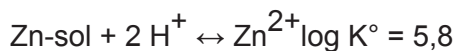


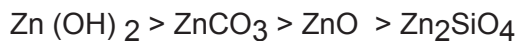
Figure 4 - Les espèces de manganèse dans la solution à $pe + pH = 16,62$ (Lindsay, 1979) (pe = potentiel d'oxydoréduction du sol).

2-3- La spéciation du zinc

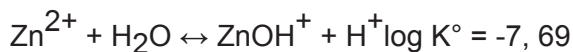
La solubilité du zinc dans le sol est donnée par la réaction suivante :



Les minéraux secondaires du zinc présentent une solubilité qui diminue dans l'ordre suivant :



Un exemple d'espèce hydrolysée du zinc dans la solution est donné par la réaction suivante :



L'espèce de zinc prédominante dans la solution à pH inférieur à 7.7 est Zn^{2+} , l'espèce $ZnOH^+$ est prévalente à pH supérieur à 7.7, l'espèce neutre $Zn(OH)_2^0$ est majoritaire à pH supérieur à 9.11 (figure 5)

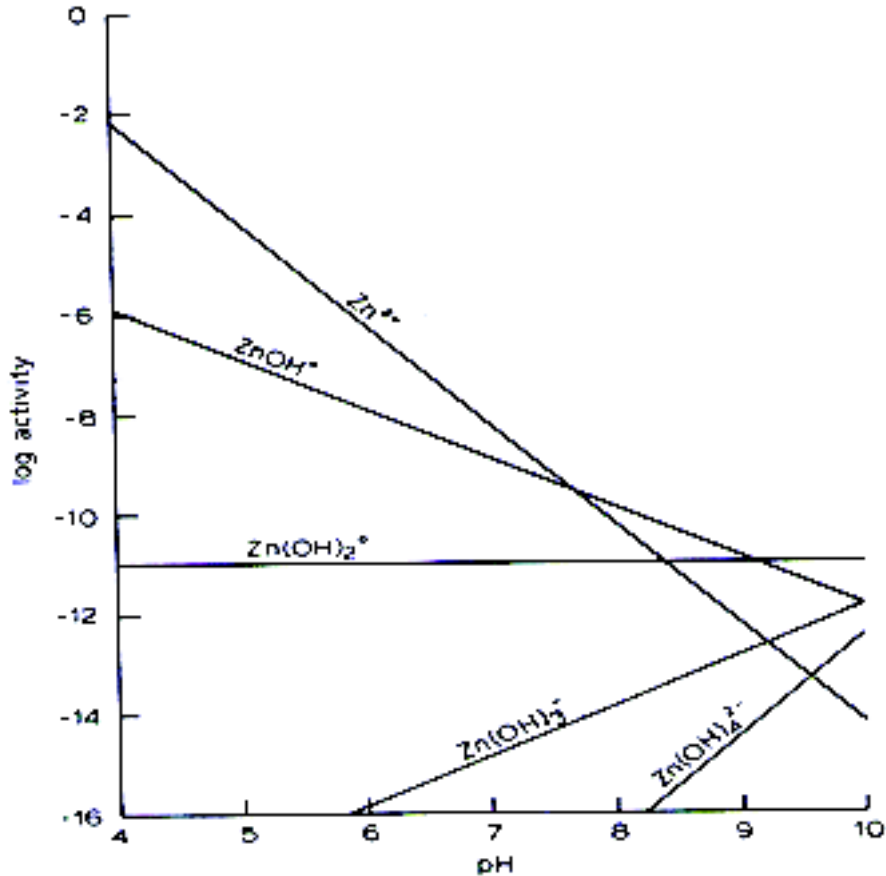


Figure 5 - Les espèces hydrolysés du zinc dans la solution (Lindsay, 1979).

2-4- La spéciation du bore

Dans la solution, il se trouve sous forme non dissocié d'acide borique H_3BO_3 ou d'anion borate $B(OH)_4^-$. La formation de $B(OH)_4^-$ par hydrolyse de $B(OH)_3$ se produit selon la réaction suivante :



Dans les sols à pH inférieur à 9.24, l'espèce dominante en solution est H_3BO_3 . Au-delà de cette valeur de pH, c'est l'espèce $B(OH)_4^-$ qui prédomine (figure 6).

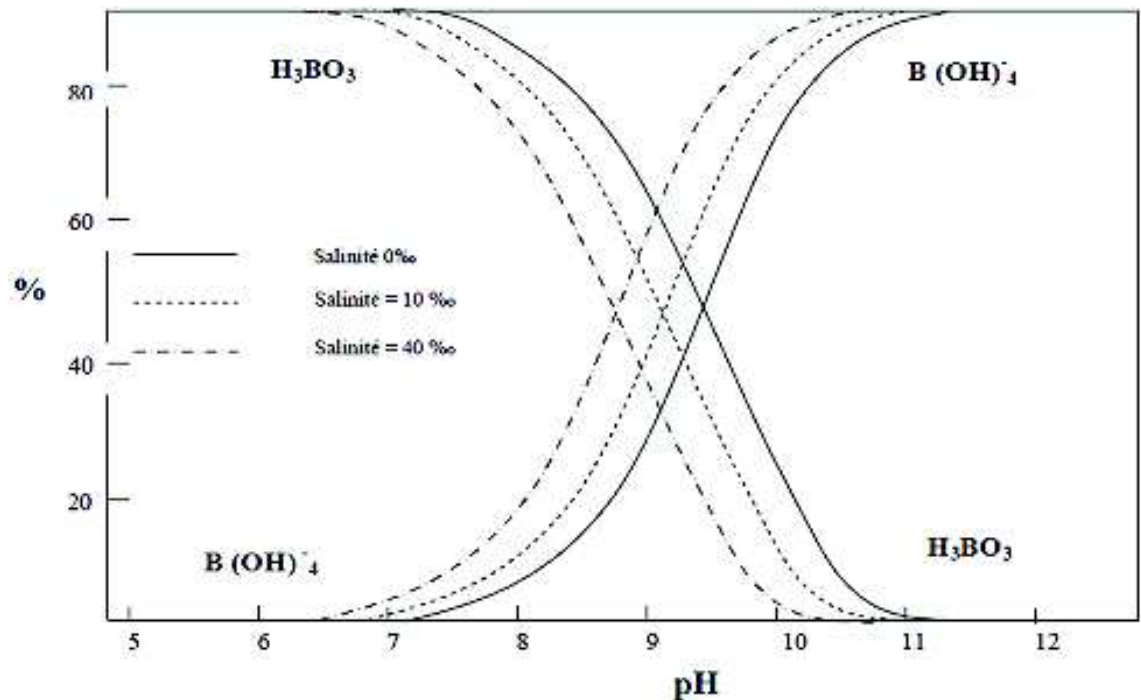


Figure 6 - Distribution des espèces H_3BO_3 et $B(OH)_4^-$ en fonction du pH et de la salinité (Bououden, 2007).

3- Les méthodes d'extraction des oligo-éléments

Les méthodes d'extraction des oligo-éléments sont de nature diverse. Elles mettent en oeuvre des approches chimiques et des approches physiques.

Sur le plan des méthodes chimiques, les acides dilués, les complexants organiques de synthèse et les solutions salines non tamponnées sont les réactifs les plus employés pour réaliser la spéciation des oligo-éléments dans des conditions définies de concentration et de pH (Lebourg *et al.*, 1996).

Cependant, dans une moindre mesure, l'acétate de sodium, les pyrophosphates de potassium ou de sodium, l'oxalate d'ammonium, l'hydrochlorure d'hydroxylamine, la dithionite de sodium sont aussi parfois utilisés pour extraire des formes des oligo-éléments du sol.

3-1- Les méthodes chimiques

Ces méthodes permettent de spécifier des compartiments en fonction du réactif utilisé et de la procédure d'extraction. Les oligo-éléments d'un sol sont alors fractionnés au moyen de réactifs chimiques désignés pour extraire les éléments liés ou associés à une phase ou à un composant particulier. Cinq compartiments sont généralement étudiés (Lebourg *et al.*, 1996):

- *La fraction échangeable* correspond à la quantité de métal qui peut être extraite du sol par échange cationique en utilisant l'acétate d'ammonium, c'est-à-dire les métaux adsorbés sur les sites d'échanges des argiles, de la matière organique, des oxydes.
- *La fraction liée aux carbonates* correspond aux constituants solubles en milieu acide par l'ajout des acides dilués. Il s'agit essentiellement des carbonates. Les éléments présents dans le sol précipitent avec les carbonates et sont susceptibles d'être relargués lorsque les conditions physico-chimiques évoluent par acidification.
- *La fraction réductible* correspond aux métaux associés aux oxydes et hydroxydes de fer et de manganèse, elle est extraite par l'oxalate d'acide d'ammonium.
- *La fraction oxydable* qui est extraite par les complexants organiques tel que l'EDTA et le DTPA, elle correspond aux éléments liés à la matière organique et aux sulfures.
- *La fraction résiduelle* correspond aux métaux incorporés dans les minéraux du sol, elle est extraite par les acides forts concentrés.

Les formes chimiques les plus mobiles sont la fraction échangeable et la fraction liée à la matière organique.

Lorsqu'une seule extraction est pratiquée sur un échantillon, il s'agit d'une extraction simple. Mais si plusieurs extractifs sont utilisés successivement sur un même aliquote de sol, il s'agit d'une extraction séquentielle. L'extraction est suivie par le dosage de l'élément passé en solution.

3-2- Les méthodes physiques

Plus récemment, des techniques de fractionnement physique ont été utilisées pour étudier la dynamique des éléments métalliques. Des classes de particules peuvent être séparées en fonction de leur granulométrie, leur densimétrie ou leurs propriétés magnétiques. Le fractionnement granulo-densimétrique s'intéresse plus particulièrement aux relations des métaux avec la matière organique particulaire.

Le fractionnement granulo-magnétique s'applique aux particules plus denses telles que les phases minérales. Il contribue à l'identification des phases porteuses des métaux et à l'estimation de leur stabilité, suivant la répartition des métaux en fonction des classes de taille des particules et de leurs propriétés magnétiques (Albain, 2002).

4- Les oligo-éléments dans la nutrition des plantes

Les teneurs totales moyennes des oligo-éléments dans le sol, les teneurs moyennes des tissus végétaux, et les exportations moyennes annuelles des cultures sont résumées dans le tableau II (Loue, 1993).

Tableau II - Les teneurs en oligo-éléments dans le sol, les besoins des plantes et leurs exportations annuelles (Loue, 1993).

Oligo-éléments	Teneurs totales dans le sol (mg/kg)	Besoins des plantes (mg/kg MS)	Exportations annuelles (g/ha/an)
Fe	10000 à 100000	50 à 2000	40 à 1500
Mn	30 à 3000	20 à 500	200 à 8000
Cu	10 à 300	5 à 20	30 à 100
Zn	10 à 80	-	200
B	7 à 80	1	-
Mo	0,2 à 10	0.2 à 10	5 à 50

4-1- Rôle physiologiques des oligo-éléments

Les oligo-éléments jouent un rôle essentiel dans le cycle physiologique des plantes. Plusieurs auteurs ont résumé leur rôle (Loué, 1993 ; Kabata-Pendias, 2001).

Le fer joue un rôle majeur dans la synthèse de la chlorophylle et des protéines, dans le transport de l'oxygène, dans le métabolisme des nitrates, et dans des fonctions enzymatiques.

Le manganèse est lié au fer dans son action sur la formation de la chlorophylle et dans le métabolisme des nitrates. Il participe à la photosynthèse, aux processus enzymatique et au métabolisme des protéines.

Le cuivre rentre dans la composition de nombreux enzymes d'oxydation, c'est un activateur d'enzymes. Il participe à la synthèse de la lignine. Grâce à cet élément, les plantes gardent plus longtemps un aspect vert et juvénile, il est nécessaire durant toute la période de végétation.

Le zinc participe au métabolisme des auxines, à la synthèse des acides nucléiques et des protéines.

Le bore est indispensable au fonctionnement du méristème. Il participe généralement à la synthèse des protéines, à la résistance à la sécheresse et à la synthèse des hormones de croissance. Il est nécessaire durant toute la période de végétation.

Le molybdène est nécessaire à la fixation du N₂, il est indispensable durant toute la période de végétation.

4-2- La biodisponibilité des oligo-éléments dans le sol

Les oligo-éléments ont un comportement différent dans le sol selon leur origine. En effet, Chassin *et al.* (1996) a constaté que les métaux issus des apports anthropiques sont sous des formes chimiques réactives. Lors de l'introduction des métaux dans le sol, ils vont s'associer avec les différents constituants du sol sous des formes chimiques variées.

Cette répartition dépend essentiellement des caractéristiques intrinsèques à l'élément (forme chimique initiale, valence, réactivité,) et des caractéristiques du milieu (du pH, potentiel d'oxydoréduction, CEC, température, travail du sol) (Lebourg *et al.*, 1996).

Généralement, les oligo-éléments s'associent à la matrice solide et s'accumulent dans le sol (Bourrelier et Berthelin, 1998). Le mode de fixation par le sol dépend de la forme chimique de l'oligo-élément et du constituant auquel il est associé. Cette fixation influencera la mobilité et la biodisponibilité de l'oligo-élément.

La biodisponibilité des oligo-éléments pour les végétaux est influencée par des facteurs intrinsèques aux sols et par des facteurs anthropiques, notamment par les pratiques agricoles de fertilisation (Giroux *et al.*, 2005 ; Giroux *et al.*, 1992).

La biodisponibilité des oligo-éléments dépend aussi des caractéristiques physico-chimiques du sol. Pour Kabata-Pendias (2001), les facteurs les plus importants sont la texture, la teneur en matière organique, l'humidité du sol, le potentiel d'oxydo-réduction, le pH, et la présence du CaCO₃.

Lorsque le pH augmente au-delà de la neutralité, la disponibilité des oligo-éléments diminue, à l'exception du molybdène.

Le bore a un comportement particulier vis-à-vis du pH. Si le pH augmente, la forme H₃BO₃ augmente, si le pH diminue, il se produit une adsorption sur les oxydes et sur les minéraux argileux.

4-3- La déficience en oligo-éléments

La conséquence d'une carence en un oligo-élément est en relation avec son rôle nutritif dans la plante. Parfois la relation entre la carence en un élément et les symptômes occasionnés par cette carence est moins directe. Ainsi les symptômes d'une carence en un élément dépendent de sa mobilité dans la plante (Coïc et Coppenet, 1989).

La carence en oligo-éléments est très répandue en sol calcaire, car leur pH alcalin provoque l'insolubilisation des oligo-éléments.

Les sols qui présentent des risques de carence en oligo-éléments sont généralement :

- Les sols pauvres en oligo-éléments
- Les sols sableux aérés (Eh élevé).
- Les sols calcaires à pH élevé.

Les carences en oligo-éléments ont tendance à augmenter avec les rendements, avec l'utilisation d'engrais plus concentrés et la diminution de l'utilisation de la fumure organique. Les symptômes de carence sont résumés dans le tableau III (Coïc et Coppenet, 1989).

Tableau III - Les symptômes de carence en oligo-éléments (Coïc et Coppenet, 1989).

Oligo-éléments	Les symptômes de carence
Fer	Jaunissement internervaire, croissance ralentie, briment de la feuille
Manganèse	Chlorose internervaire, mauvais remplissage des épis
Cuivre	Chlorose des jeunes feuilles, stérilité des épis
Zinc	Chlorose et réduction de la croissance, blanchissement des jeunes feuilles
Bore	Jaunissement des feuilles, tâches sur les feuilles, mauvaise pollinisation
Molybdène	Rétrécissement du limbe, absence de nodosité

Les cultures les plus sensibles à la déficience en oligo-éléments sont présentées dans le tableau IV (Coïc et Coppenet, 1989).

Tableau IV - Les cultures les plus sensibles à la déficience en oligo-éléments (Coïc et Coppenet, 1989).

Oligo-éléments	Les cultures les plus sensibles
Fer	Vignes, agrumes, maïs, soja, fruitiers
Manganèse	Blé, avoine, sorgho, pois, haricot, soja...
Cuivre	Céréales, épinard, luzerne, carotte, laitue...
Zinc	Maïs, haricot, soja, lin, pomme de terre, cultures fruitières
Bore	Betteraves, tournesol, colza, choux, vigne, coton
Molybdène	Choux, légumineuses, trèfle, luzerne, épinard, tomate, colza, laitue.

5- Les oligo-éléments dans les sols salés

La disponibilité des oligo-éléments dans les sols salés diminue progressivement et les plantes peuvent avoir des déficiences dans des conditions salines. En effet, plusieurs auteurs ont suggéré que le magnésium, le calcium et le sodium ont des antagonismes avec les oligo-éléments dans les sols salés (Hu et Schimdhalt, 2001 ; Behera *et al.*, 2011).

L'évolution de la concentration en manganèse, en zinc, en fer et en bore dans les sols salés dépend du niveau de la salinité.

Les sels solubles peuvent favoriser la mobilité des oligo-éléments dans le sol par deux principaux mécanismes (Backstrom *et al.*, 2004) :

- La complexation des oligo-éléments par les anions dérivés des sels. Il s'agit de la chlorocomplexation pour la complexation par les anions chlorures,
- L
- a compétition pour les sites de sorption entre les espèces des oligo-éléments et les cations provenant des sels solubles. Cette compétition maintient les oligo-éléments en solution, mais elle les expose à d'autres phénomènes chimiques.

Cette mobilisation dépend du type de métal, de la teneur totale du métal et du type de sol (Qusheng *et al.*, 2010).

La disponibilité des oligo-éléments pour les plantes dans les sols salés est réduite à cause de la faible teneur en matière organique (Seilsepour, 2006 ; Nuria *et al.*, 2007) ont montré que la matière organique est le facteur le plus déterminant de la présence et de la distribution des oligo-éléments assimilables dans ces sols. Selon ces auteurs, le zinc est le seul élément qui présente des déficiences à cause de la salinité du sol.

6- LES OLIGO-ELEMENTS DANS LES SOLS D'ALGERIE

Bensaid (1981) a réalisé une recherche sur les oligo-éléments dans les sols des plaines de Cheliff. Les analyses ont porté sur 3 profils (15 échantillons) localisés à El Khemis dans le Haut-Cheliff, et sur 4 profils (15 échantillons) localisés dans la station de H'madna dans le Bas-Cheliff.

Un complexant organique (DTPA) est utilisé pour extraire la forme assimilable de 4 oligo-éléments (fer, cuivre, zinc, et le manganèse). Un acide concentré (HNO₃) est utilisé pour extraire pour la forme totale des 4 oligo-éléments. Pour le bore soluble, il a utilisé la méthode au curcumin.

Les résultats obtenus montrent que les teneurs totales et les teneurs assimilables en oligo-éléments sont faibles (tableau V).

Dans les sols du Haut-Cheliff qui sont peu salés, les teneurs assimilables sont corrélées avec la capacité d'échange cationique et avec la matière organique, les horizons supérieurs riches en matière organique sont relativement mieux pourvus en oligo-élément assimilable que les horizons profonds qui sont pauvres en matières organiques.

Dans les sols salés du Bas-Cheliff, les teneurs totales présentent une forte corrélation avec la teneur en calcaire total.

Tableau V - Les teneurs moyennes en oligo-éléments dans les sols des plaines du Cheliff (Bensaid, 1981) (mg / kg de terre).

	Bas – Cheliff (H'madna)		Haut-Cheliff (El Khemis)	
	Teneur totale	Teneur assimilable	Teneur totale	Teneur assimilable
Fe	160 à 762,5	6,2 à 23	660 à 1035	4,6 à 24,6
Cu	3,2 à 6,4	2 à 7,5	4,5 à 13,7	0,6 à 7,6
Zn	7 à 21,5	3,6 à 16,8	38 à 60	2,8 à 21
Mn	4,2 à 9,1	2,8 à 7,3	5,6 à 8,4	traces
B	1,26 à 7,12	0,45 à 2,74	0,06 à 4,13	0,04 à 1,08

Pour les sols calcaires des régions arides, le travail de Djili (1979) a porté sur 4 oligo-éléments (cuivre, zinc, manganèse et le bore) qui ont été extraits en utilisant la méthode à l'acétate d'ammonium + EDTA pour le cuivre, le manganèse et le zinc ; pour le bore la méthode Berger-Truog à l'eau bouillante a été utilisée.

Les résultats obtenus montrent que les sols sont pauvres en oligo-éléments assimilables (tableau VI).

Tableau VI - Les teneurs moyennes des oligo-éléments dans les sols de Ksar Chellala (Djili, 1979).

	Mn (ppm)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	B (ppm)
Teneur moyenne des échantillons	2,6 à 7,9	0,62 à 2,68	0,5 à 1,6	0,22 à 0,56

Par ailleurs, Labri (2009) a étudié la distribution spatiale de la teneur totale des oligo-éléments (fer, manganèse, plomb, aluminium) dans la station expérimentale de l'ENSA. Les résultats obtenus montrent que les sols sont bien pourvus en fer total, en manganèse total, et ils sont mal pourvus en aluminium total et en plomb total (tableau VII).

Tableau VII - Les teneurs moyennes en oligo-éléments dans les sols de la ferme expérimentale de l'ENSA (Labri, 2009).

	Fe	Mn	Pb	Al
La teneur totale (ppm)	102 à 339	0 à 102	0 à 26,15	0 à 13,55

Dans les sols de la Mitidja, Benabdelhakem (1978) a étudié 19 échantillons répartis sur 5 types de sols (les sols calcimagnésiens, les sols peu évolués, les vertisols, les sols

rouges et les sols hydromorphes). Les analyses ont été effectuées sur 4 oligo-éléments (fer, cuivre, manganèse et le zinc). Il a utilisé la méthode à l'EDTA pour la forme assimilable et la méthode Baron pour la forme totale.

Les résultats obtenus montrent que les teneurs totales et les teneurs assimilables sont faibles (tableau VIII).

Tableau VIII - Les teneurs moyennes en oligo-éléments dans les sols de la Mitidja (Benabdelhakem, 1978) (mg/kg de terre).

La forme totale		La forme assimilable	
Méthode Baron		Méthode à l'EDTA	
Fer	160 à 762,5	4,6 à 24,6	
Cuivre	3,2 à 6,4	0,6 à 7,6	
Zinc	7 à 21,5	2,8 à 21	
Manganèse	4,2 à 9,1	Faible	

Dekki (2009) a étudié la distribution spatiale du bore soluble et du zinc total dans les sols de la ferme expérimentale d'El Alia. Les résultats obtenus montrent que les sols sont pauvres en zinc total (0 à 20 mg.kg⁻¹) et en bore soluble (0,52 à 1,2 mg.kg⁻¹).

Conclusion

Les oligo-éléments jouent un rôle fondamental dans le métabolisme végétal. Ils ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche relatifs à leur comportement dans le sol et dans le végétal, et à la définition de leurs seuils de carence et de toxicité.

Les oligo-éléments dans le sol sont hérités du matériau parental, issus d'apports atmosphériques ou anthropiques. Ils présentent généralement une réserve totale élevée dans les sols riches en argile et en matière organique.

Les teneurs en oligo-éléments dans le sol dépendent de la nature du sol et des conditions climatiques de sa formation.

La teneur assimilable représente la forme biodisponible, elle conditionne la nutrition minérale des végétaux.

L'étude de la spéciation des oligo-éléments donne une idée sur leur biodisponibilité pour la plante et leur comportement dans le sol en fonction des conditions de milieu. En effet leur mobilisation est surtout conditionnée par le pH, le Eh, et la matière organique.

Les méthodes de fractionnement par des réactifs chimiques sont utilisées pour extraire les formes liées ou associées à une phase ou un composant particulier. En effet, cinq formes sont généralement étudiées (résiduel, assimilable, liée aux oxydes, liée aux carbonates et liée à la matière organique).

La disponibilité des oligo-éléments dans les sols salés diminue à cause des interactions ioniques. La matière organique serait le facteur le plus déterminant de leur forme et de leur distribution dans les sols salés.

Les oligo-éléments ont fait l'objet de peu de travaux dans les sols d'Algérie.

CHAPITRE II - MATERIELS ET METHODES

1- MATERIEL D'ETUDE

1-1- Les sols

Les sols étudiés se situent dans les plaines du Bas-Cheliff dans la région de Relizane qui se situe à environ 300 km à l'Ouest d'Alger.

Le climat de cette région se caractérise par des précipitations annuelles moyennes de l'ordre de 250 mm, une évapotranspiration potentielle moyenne annuelle de 1500 mm, et un déficit hydrique climatique pendant la majeure partie de l'année (Hadj Miloud, 2010).

La région de Relizane est connue par ses deux grands périmètres irrigués, le périmètre de la Mina et celui du Bas-Chélif. Ces périmètres sont des plaines alluviales où les sols sont confrontés aujourd'hui à un problème de salinisation secondaire qui s'ajoute à la salinisation primaire.

Cette salinisation secondaire est provoquée par des irrigations avec des eaux de mauvaise qualité, elle est favorisée par la remontée capillaire en raison de la défaillance du réseau de drainage (Hadj Miloud, 2010).

Ce travail porte sur 3 profils situés dans cette région (figure 7) :

- *Le profil P1* se localise dans la plaine de la Mina qui constitue la limite Ouest du Bas-Chélif. Les coordonnées géographiques de ce profil sont les suivantes :

Longitude 0° 29' 31.2" E Latitude 35° 44' 17.0" N

Ce profil est constitué par 5 horizons.

- *Le profil P2* se trouve à Gaâ qui est une dépression fermée qui se trouve sur la rive droite de l'oued Mina. Les coordonnées géographiques de ce profil sont les suivantes :

Longitude 0° 33' 22.0" E Latitude 35° 47' 44.33" N

Ce profil est constitué par 8 horizons.

- *Le profil P3* est localisé dans la station de L'INRA de Hmadna dans la partie Est du Bas-Chélif (figure 7). Les coordonnées géographiques de ce profil sont les suivantes :

Longitude 0° 44' 59,6" Latitude 35° 57' 47,5" N

Ce profil est constitué par 5 horizons.

Ce travail porte donc sur 18 échantillons provenant de 3 profils de solonchaks références de la région de Relizane (Hadj Miloud, 2010).

Un solonchak se caractérise par la présence d'un horizon salique qui présente les caractéristiques suivantes :

- Une conductivité électrique (CE) de l'extrait de pâte saturée supérieure à 15dS /m à 25°C à un moment de l'année ; ou une CE de plus de 8 dS/m à 25°C si le pH (H₂O) de l'extrait de pâte saturée est supérieur à 8.5 (pour les sols carbonatés alcalins) ou inférieur à 3.5 (pour les sols sulfatés acides),
- Une épaisseur d'au moins 15 cm.
- Un produit de l'épaisseur en (cm) et de la CE (dS/m) supérieur ou égal à 450 ou plus,
- Une absence d'un horizon sulfurique (thionic).

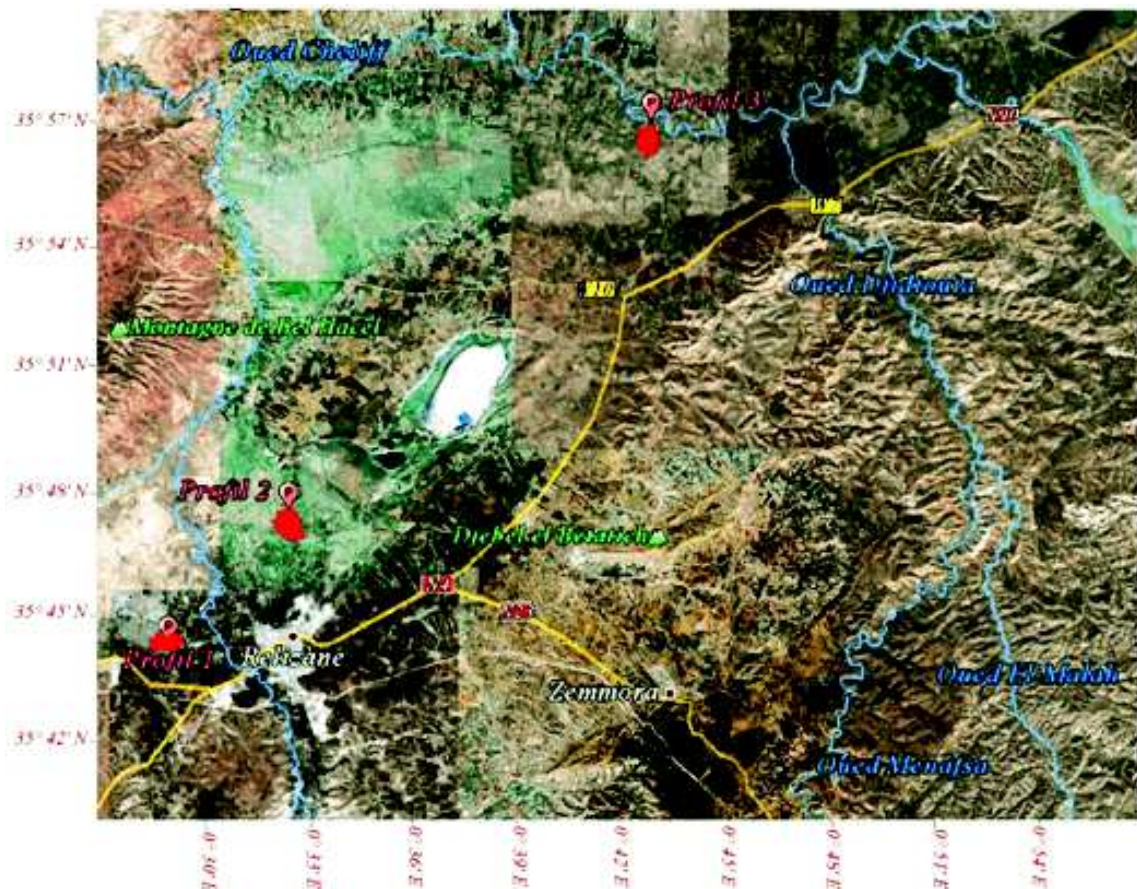


Figure 7 - Localisation des profils (Hadj Miloud, 2010).

1-2- Les oligo-éléments

Les 6 principaux oligo-éléments sont représentés par 4 cations (Fer, cuivre, zinc, manganèse) et 2 anions (Molybdène, bore). Ce travail porte sur 3 cations (fer, manganèse, zinc) et un anion (bore) dont le comportement serait représentatif des oligo-éléments dans le sol.

Ces 4 oligo-éléments font l'objet d'une spéciation de leur forme dans le sol. En effet, la forme totale, la forme assimilable, la forme liée à la matière organique, la forme liée aux oxydes et la forme liée aux carbonates ont été extraites.

2- METHODES D'ETUDE

2-1- Les caractéristiques des échantillons

La caractérisation des échantillons a été réalisée par Hadj-Miloud (2010) sur la base des méthodes d'analyse suivantes :

- L'analyse granulométrique : méthode internationale à la pipette de Robinson.
- La conductivité électrique (pâte saturée) : méthode électrique.
- Le pH : le rapport (1/2.5) méthode potentiométrique
- Calcaire total : méthode volumétrique au calcimètre de Bernard (Dupuis, 1969).
- La capacité d'échange cationique (CEC) : méthode Bower, saturation à l'acétate de sodium à pH= 8.2.
- Les bases échangeables : déplacement des cations par une solution de chlorure de Baryum. Dosage des bivalents (Ca^{++} , Mg^{++}) par spectrophotométrie à absorption atomique, les monovalents (K^+ , Na^+) par spectrophotométrie à flamme.
- Le carbone organique : méthode Anne.
- Le gypse : dosage gravimétrique par attaque puis précipitation par le chlorure de baryum.
- La conductivité électrique : méthode électrique sur un extrait de pâte saturée.

2-2- Les différentes formes des oligo-éléments

Pour le fer, le manganèse, et le zinc, les méthodes utilisées sont les suivantes :

- Pour la forme totale, l'attaque triacide (AF, HClO_4 , HCl) est utilisée. 0,250 g de sol tamisé à 250 μm + 5 ml d'acide fluorhydrique + 1,5 ml d'acide perchlorique ont été chauffés sur bain sable (160° C) jusqu'à l'obtention d'un résidu sec, 1 ml d'acide chlorhydrique et quelques gouttes d'eau distillée ont été ajoutés, le contenu a été versé dans une fiole de 50 ml et ajusté par l'eau distillée puis filtré. Les oligo-éléments sont dosés par spectrophotomètre d'absorption atomique (Mathieu, 2003).
- La forme assimilable a été extraite par l'acétate d'ammonium en présence d'EDTA. 50 ml de solution EDTA et 77g d'acétate d'ammonium ont été ajoutés à 5 g de sol, le mélange a été agité pendant 2 heures puis centrifugé pendant 10 min (Mathieu et Pieltain, 2003).
- La forme liée à la matière organique a été extraite par le pyrophosphate de sodium à pH = 10 - 300 mg de terre tamisée à 100 μm + 30 ml de solution d'extraction ont été agités pendant 16 heures puis centrifugés pendant 15 min.
- La forme liée aux oxydes a été extraite par l'oxalate acide d'ammonium. 0,5 g de sol + 40 ml de la solution d'extraction ont été agités pendant 4 heures puis centrifugés pendant 10 min (Mathieu et Pieltain, 2003).
- La forme liée aux carbonates a été extraite par 35ml du mélange de CH_3COOH (1M) et de $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (0,6M) sur 1g de sol qui ont été agités pendant 5 heures.

Pour le bore, la forme totale a été extraite par Na_2CO_3 (6g) et 10 ml de H_2SO_4 (Jackson, 1965) et la forme soluble par la méthode à l'eau chaude à partir de la solution du sol

(méthode carmin), le dosage soit du bore total ou du bore soluble a été fait par l'ajout de 0,1 ml d'HCl et 10 ml de la solution carmine (0,05%) dont les mesures ont été faites par colorimètre à 585 nm.

CHAPITRE III - RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les 18 échantillons analysés proviennent de 3 profils de sols salés du Bas-Cheliff.

Les 3 profils étudiés correspondent à des Solonchaks (Hadj Miloud, 2010). Ils sont caractérisés par une large gamme de salinité ($3,5 \text{ dS/m} < \text{CE} < 143 \text{ dS/m}$), et une large gamme de sodicité ($8 \% < \text{ESP} < 56 \%$). Le faciès chimique des solutions du sol est généralement chloruré-sodique. La composition granulométrique présente une large gamme de variation du taux d'argile (8 à 58 %), et une large gamme de variation du taux de limons (13 à 63 %).

Les différentes caractéristiques analytiques sont représentées dans le tableau IX.

Les oligo-éléments analysés sont le fer, le manganèse, le zinc, et le bore. Les formes analysées concernant les 3 cations (fer, manganèse et zinc) portent sur la forme totale, la forme assimilable, la forme liée aux oxydes, la forme liée à la matière organique, la forme liée aux carbonates. Pour le bore, qui se présente à l'état anionique en solution, les formes analysées sont la forme totale et la forme soluble.

Le fer, le manganèse et le zinc sont dosés par absorption atomique. Le bore est dosé par colorimétrie.

Les résultats obtenus sont présentés en annexes (Annexes I, II, III, IV).

Les résultats obtenus ont fait l'objet de traitement statistique descriptif (calcul de la moyenne et de l'intervalle de confiance), de représentation graphique (distribution des résultats en fonction des échantillons, distribution des résultats dans le profil), de recherche de corrélation entre les différentes formes de chaque oligo-élément et entre des caractéristiques du sol et les formes des oligo-éléments.

Tableau IX - Les principales caractéristiques analytiques des Solonchaks du Bas- Cheliff (Hadj Miloud, 2010).

Horizons	Profondeurs (m)	Mo %	CaCO3 %	pH	Argiles %	Limons %	Sables %	CEC cmol(+)/kg	CE ds/m	ESP %
P1H1	0-17	1.3	18.5	8.17	52.1	42.4	1.3	17.83	43.8	25.85
P1H2	17-33	0.3	19.4	8.44	57.9	35.3	1.7	22.13	61.6	31.04
P1H3	33-45	0.2	19.4	8.17	48.1	42.3	5.4	17.65	57.5	21.92
P1H4	45-110	0.03	20.2	8.25	30.6	58.4	5.9	16.96	69.2	22.56
P1H5	110-150	0.03	20	8.41	22.4	51.5	21	12.35	86.2	36.62
<hr/>										
P2H1	0-10	1.5	18.9	7.87	38.8	42	13.5	17.74	143	22.55
P2H2	10-19	1.3	18.8	8.01	42	51.2	2.7	16.48	32	22.69
P2H3	19-28	0.4	18.8	8.22	30	63.2	3.7	15.57	75.1	15.92
P2H4	28-38	0.1	19.2	8.32	32.9	54.6	8.3	16.30	72	20.55
P2H5	38-60	0	19.3	8.62	23.4	57.2	15.2	12.09	94.2	33.45
P2H6	60-82	0	22.2	8.56	34.3	58.9	2.7	17.87	76.6	25.30
P2H7	82-103	0	21.8	8.03	34.3	59.7	2.9	15.13	80	34.20
P2H8	103-150	0	21.6	8.76	8	12.9	76.7	7.52	100	56.65
<hr/>										
P3H1	0-17	1.8	17	8.31	47.7	47.5	<1	21	3.65	8
P3H2-1	17-50	1.5	17.2	7.67	54	46.5	<1	19	45.3	16
P3H2-2	50-82	1.3	15.9	7.84	55.8	41	<1	18	50.3	26
P3H2-3	82-115	0.1	17.9	7.49	55.5	40	<1	17	42.2	18
P3H3	115-150	0.2	14.4	7.5	57.6	39.2	<1	24	44.7	16

1- LE FER

1-1- Les différentes formes du fer

1-1-1- Le fer total

La teneur en fer total varie de 3217,92 à 3558,74 mg/kg. L'intervalle de confiance calculé est très variable, il est compris entre 3,30 et 204,21 mg/kg de terre (figure 8).

La teneur moyenne est de 3394,95 mg/kg. La médiane est de 3379,226 mg/kg. Ces teneurs sont élevées par rapport aux normes de Loué (1993) qui considère qu'une teneur en fer total supérieure à 200 mg/kg est élevée.

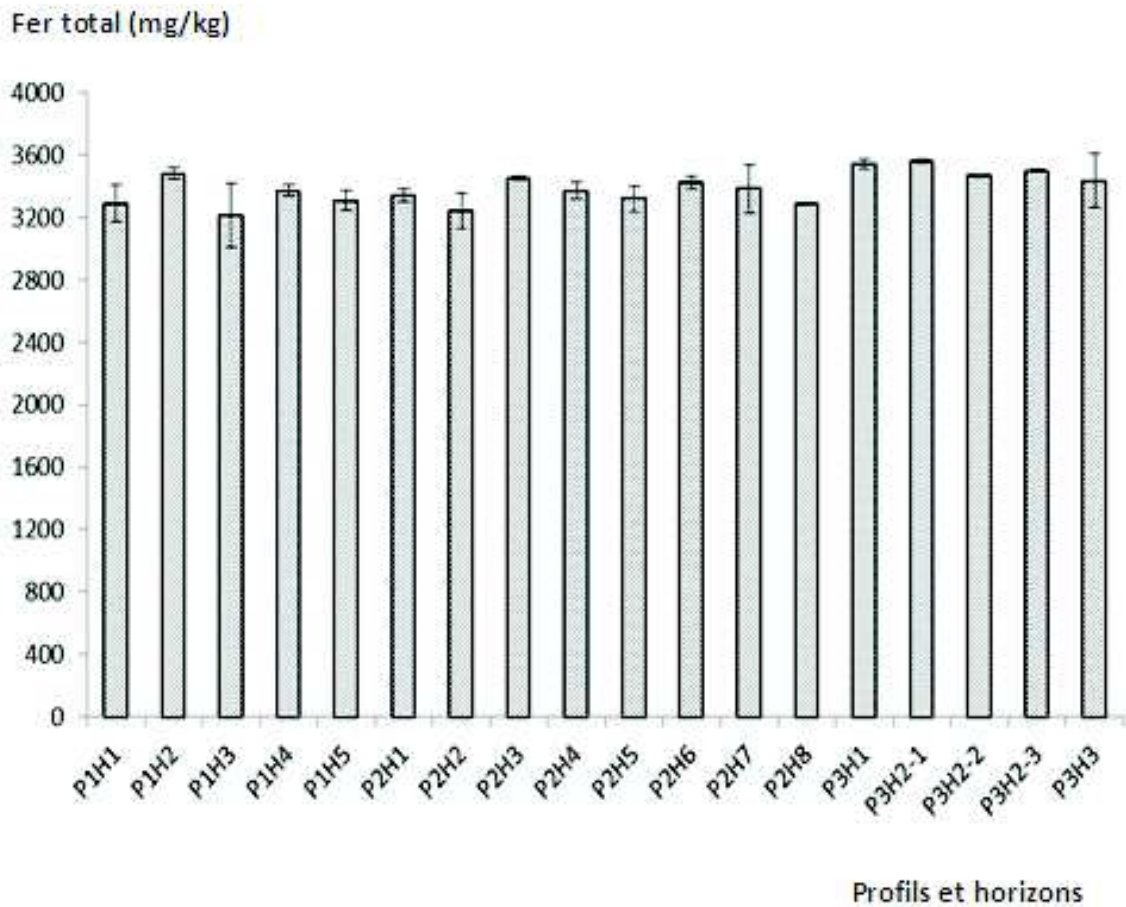


Figure 8 - Teneurs en fer total des échantillons.

Le profil de distribution du fer total dans le sol est irrégulier pour le profil 1 et pour le profil 2, il est ascendant pour le profil 3 (figure 9). Les teneurs les plus élevées en fer total sont observées dans le profil 3.

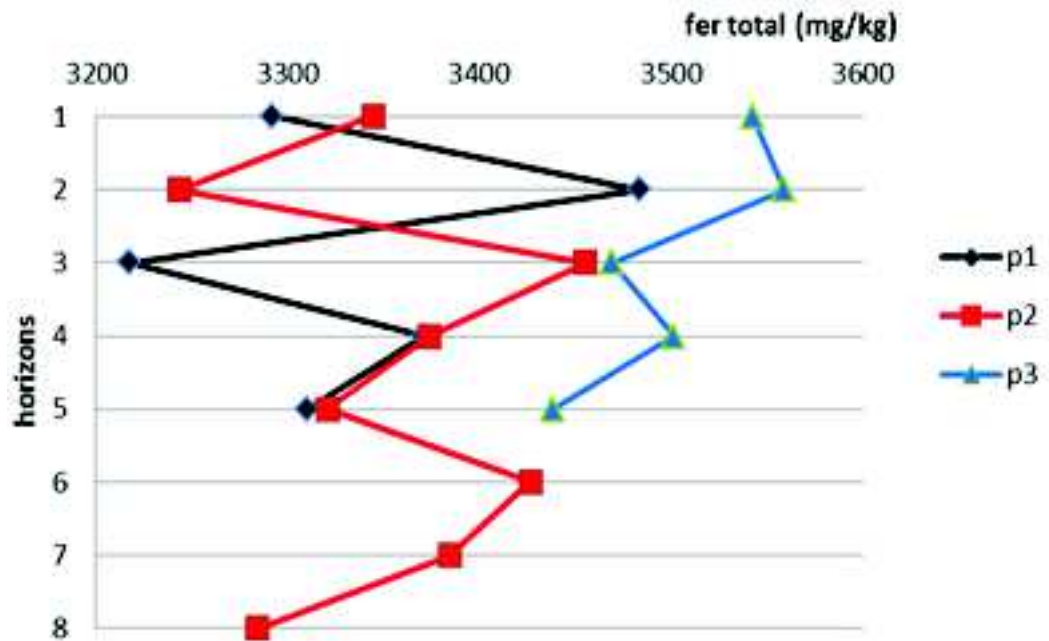


Figure 9 - Les profils de distribution du fer total.

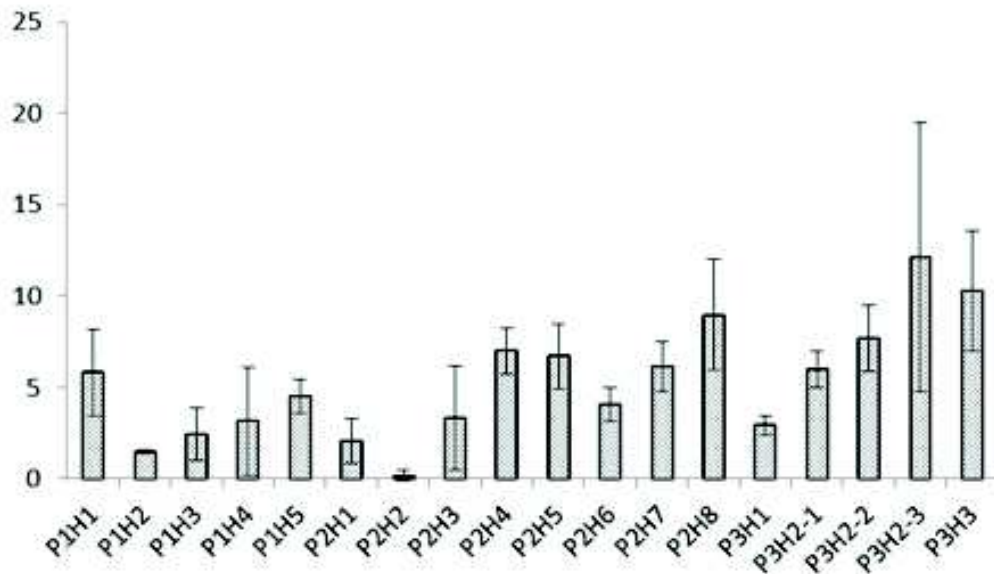
1-1-2- Le fer assimilable

La teneur en fer assimilable varie de 0,15 à 12,11 mg/kg, l'intervalle de confiance est compris entre 0,104 et 7,36 mg/kg de terre (figure 10). La teneur moyenne est de 5,16 mg/kg. La médiane est de 5,16 mg/kg.

Ces teneurs seraient faibles par rapport aux normes de Loué (1993) qui considère qu'une teneur en fer assimilable inférieure à 10 mg/kg présente un risque élevé de déficience et une teneur inférieure à 20 mg/kg présente un risque moyen à faible de déficience.

Le profil de distribution du fer assimilable dans le sol est concave pour le profil 1, et il est descendant pour le profil 2 et le profil 3 (figure 11).

Fer assimilable (mg/kg)



Profils et horizons

Figure 10 - Teneurs en fer assimilable des échantillons.

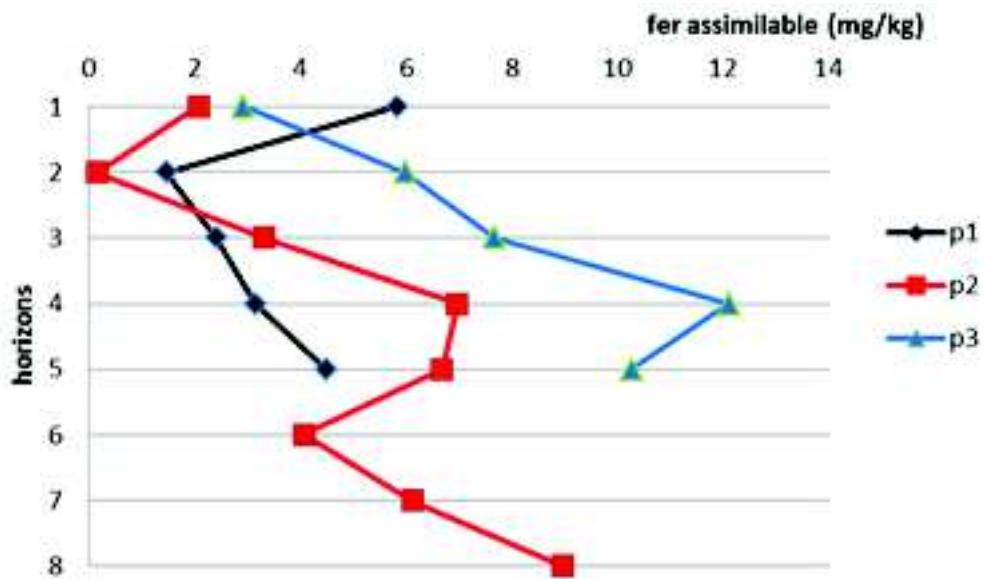
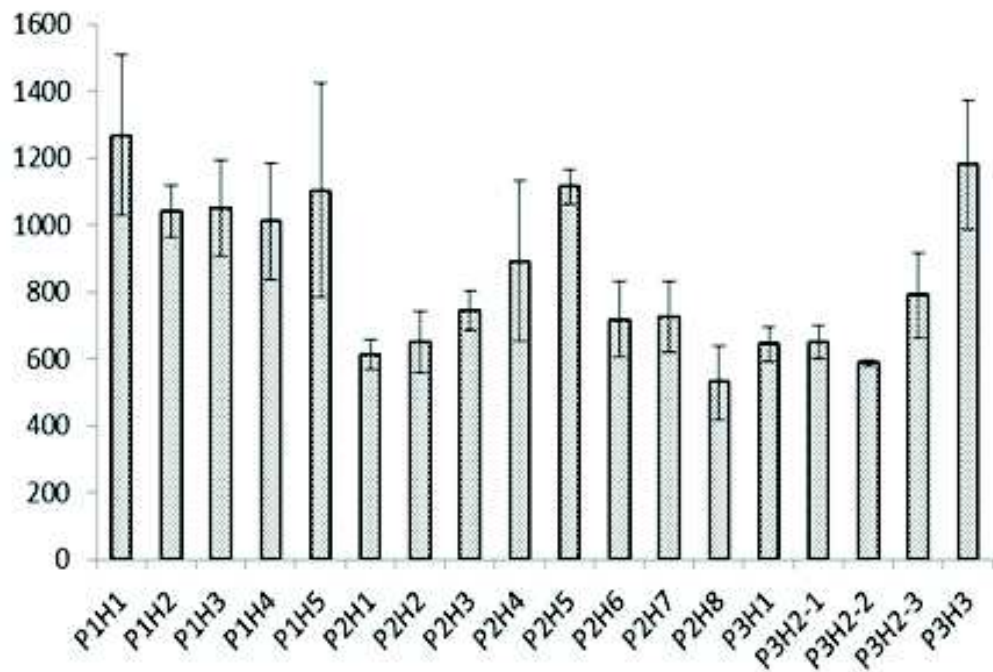


Figure 11 - Les profils de distribution du fer assimilable.

1-1-3- Le fer lié aux oxydes

La teneur en fer lié aux oxydes varie de 529,69 à 1268,11 mg/kg, l'intervalle de confiance est compris entre 10,59 et 320,25 mg/kg (figure 12). La teneur moyenne est de 813,19mg/kg. La médiane est de 767,505 mg/kg.

Fer lié aux oxydes (mg/kg)



Profils et horizons

Figure 12 - Teneurs en fer lié aux oxydes des échantillons.

Le profil de distribution du fer lié aux oxydes dans le sol est concave pour le profil 1, il est convexe pour le profil 2, et il est descendant pour le profil 3 (figure 13).

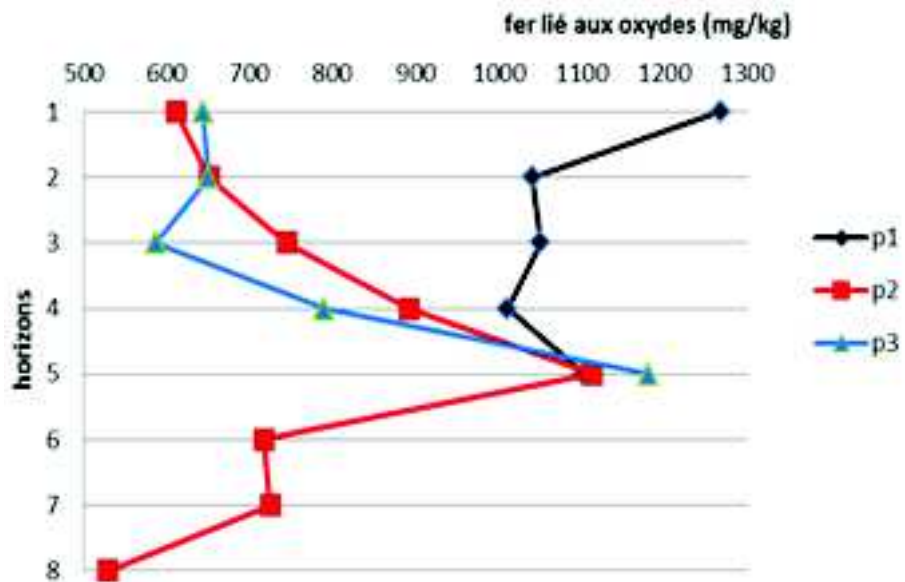
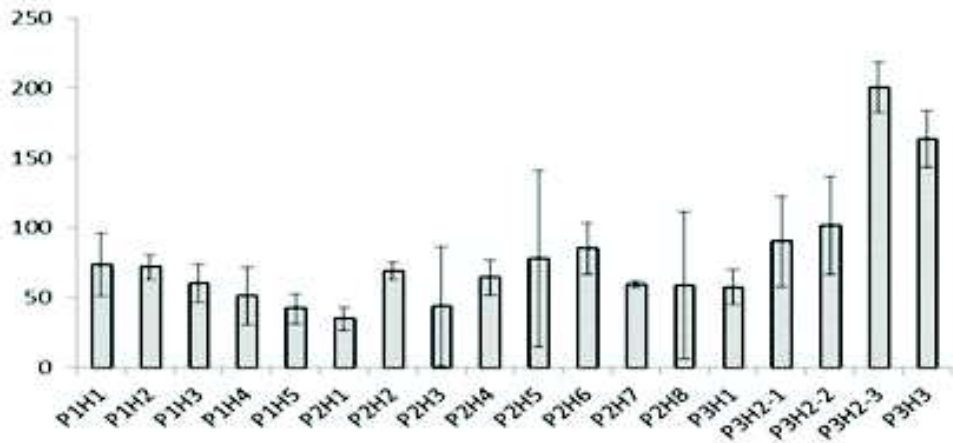


Figure 13 - Les profils de distribution du fer lié aux oxydes.

1-1-4- Le fer lié à la matière organique

La teneur en fer lié à la matière organique varie de 34, 67 à 200,37 mg/kg, l'intervalle de confiance calculé est compris entre 2,78 et 53,08 mg/kg de terre (figure 14). La teneur moyenne est de 78, 11 mg/kg. La médiane est de 66,84 mg/kg.

Fer lié à la matière organique (mg/kg)



Profils et horizons

Figure 14 - Teneurs en fer lié à la matière organique des échantillons.

Le profil de distribution du fer lié à la matière organique dans le sol est ascendant pour le profil 1, il est irrégulier pour le profil 2, et il est descendant pour le profil 3 (figure 15).

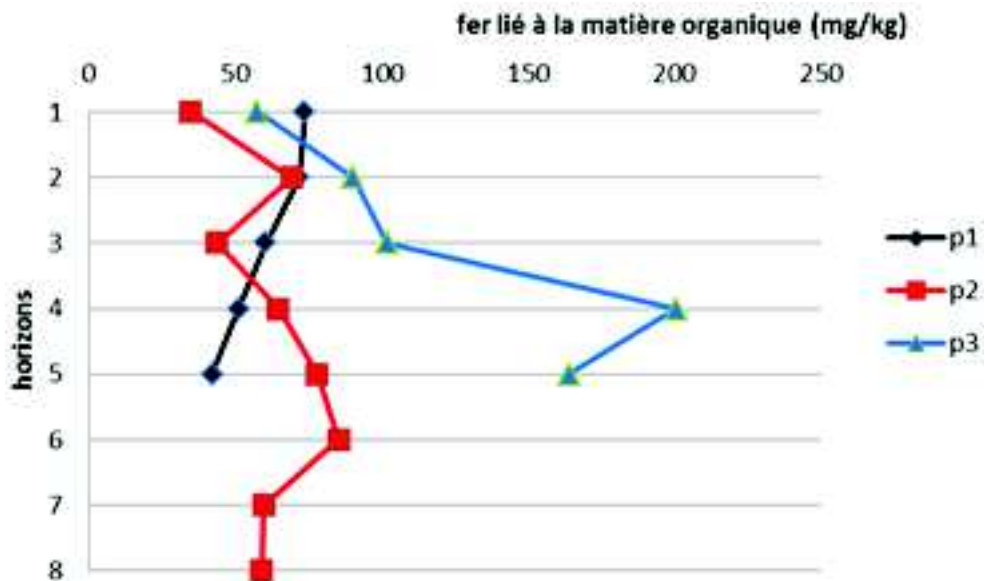


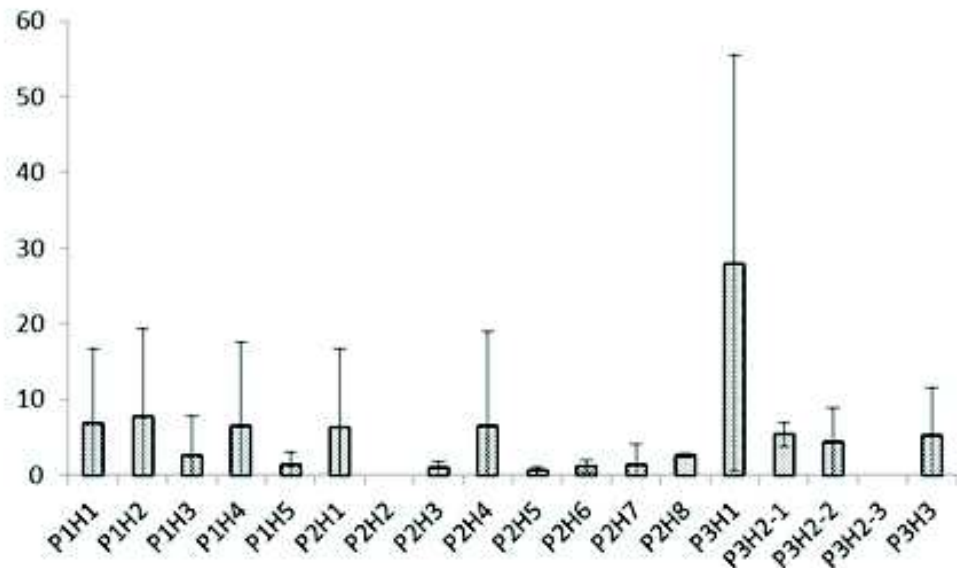
Figure 15 - Les profils de distribution du fer lié à la matière organique.

1-1-5- Le fer lié aux carbonates

La teneur en fer lié aux carbonates varie de 0 à 27,99 mg/kg, l'intervalle de confiance est compris entre 0 et 27,43 mg/kg de terre (figure 16). La teneur moyenne est de 4,86 mg/kg. La médiane est de 3,49 mg/kg.

Le profil de distribution du fer lié aux carbonates dans le sol est irrégulier pour les profils 1 et 2, il est concave pour le profil 3 (figure 17).

Fer lié aux carbonates (mg/kg)



Profils et horizons

Figure 16 - Teneurs en fer lié aux carbonates des échantillons.

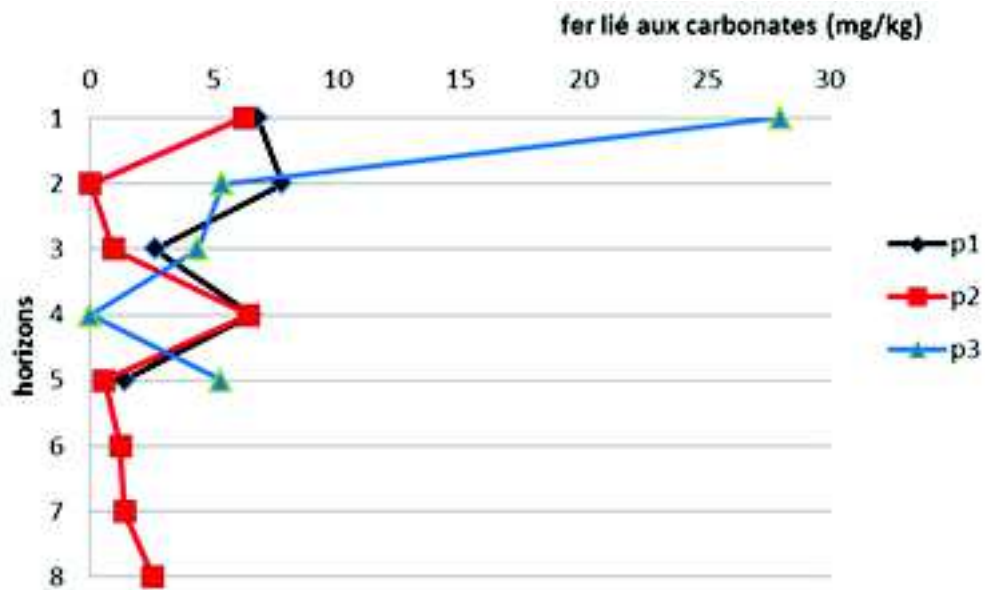


Figure 17 - Les profils de distribution du fer lié aux carbonates.

Synthèse et discussion

Les résultats obtenus sur les différentes formes du fer dans les sols salés du Bas-Cheliff sont résumés dans le tableau X.

Tableau X - Les teneurs du fer dans les sols salés du Bas- Cheliff (mg/kg de terre).

Forme du fer	La teneur minimale	La teneur maximale	La teneur moyenne
Le fer total	3217,92	3558,74	3394,95
Le fer assimilable	0,15	12,11	5,16
Le fer lié aux oxydes	529,69	1268,11	813,19
Le fer lié à la matière organique	34,67	200,37	78,11
Le fer lié aux carbonates	0	27,99	4,86

Par rapport à la teneur en fer total :

- le fer assimilable ne représente que 0.15 %
- le fer lié aux oxydes représente 23.95 %
- le fer lié à la matière organique représente 2.30 %
- le fer lié aux carbonates représente 0.14 %
- et le reste, soit le fer résiduel, représente 73.60 %

Ce résultat montre que le fer est immobilisé dans le sol sous forme d'oxydes et sous forme résiduelle. Le fer résiduel représente la majeure partie du fer dans ces sols. Il concerne le fer incorporé dans la structure des minéraux du sol, il est inclus dans la matrice du solide minéral, et il n'est pas extrait par les méthodes chimiques sélectives (Bur, 2008).

Les teneurs en fer total obtenues (3217.92 – 3558.74 mg/kg) se situent dans la moyenne par rapport aux teneurs enregistrées dans le monde (1000 – 5000 mg/kg).

Ces teneurs en fer total sont élevées par rapport aux teneurs rapportées par Bensaid (1981) sur les sols salés du Bas-Cheliff (160 à 762,5 mg/kg)

Les teneurs assimilables (0.15 – 12.11 mg/kg) sont faibles par rapport aux normes de Loué (1993). Elles sont également plus faibles que celles rapportées par Bensaid (1981) sur les sols salés du Bas-Cheliff (6,2 à 23 mg/kg).

Les types de profils de distribution des différentes formes du fer dans les sols présentent une diversité remarquable (tableau XI). En effet, 5 profils sont irréguliers, 4 profils sont descendants, 3 profils sont concaves, 2 profils sont ascendants, 1 profil est convexe.

Tableau XI - Les types de profils de distribution des différentes formes du fer dans les sols.

Formes du fer	Profil 1	Profil 2	Profil 3
Total	<i>irrégulier</i>	<i>irrégulier</i>	ascendant
Assimilable	concave	descendant	descendant
Lié aux oxydes	concave	convexe	descendant
Lié à la matière organique	Ascendant	<i>irrégulier</i>	descendant
Lié aux carbonates	<i>irrégulier</i>	<i>irrégulier</i>	concave

Conclusion

Les échantillons analysés présentent des teneurs appréciables en fer total et de faibles teneurs en fer assimilable.

Les réseaux cristallographiques des minéraux primaires et secondaires contiennent la forme dominante du fer dans ces sols. Les oxydes de fer constituent la seconde forme du fer dans les sols. La forme liée à la matière organique et la forme liée aux carbonates sont faiblement représentées.

La teneur en fer assimilable est relativement faible, elle ne représente, en moyenne, que 0.15 % de la réserve totale en fer dans ces sols.

Les profils de distribution diffèrent d'une forme à une autre.

1-2- Relation entre les différentes formes du fer

La matrice des corrélations présentée dans le tableau XII montre qu'il existe une corrélation très hautement significative et positive entre le fer assimilable et le fer lié à la matière organique (r (observé) = 0.735 ; r (critique pour $\alpha = 0.001$ et $ddl = 16$) = 0.7084). Les autres formes du fer ne présentent pas de corrélation significative entre elles, leur comportement dans le sol serait indépendant les unes des autres.

Tableau XI - Matrice de corrélations entre les différentes formes du fer dans le sol.

Forme du fer	Fer total	Fer assimilable	Fer-Oxydes	Fer-matière organique
Fer total	1,000			
Fer assimilable	0,246	1,000		
Fer-Oxydes	-0,285	0,051	1,000	
Fer-matière organique	0,397	0,735***	0,115	1,000
Fer-Carbonates	0,419	-0,212	-0,093	-0,169

***: Signification au seuil de 0.001

La matière organique jouerait un rôle fondamental dans la formation et la préservation du fer assimilable dans ces sols. En effet, La chélation semble être le principal mécanisme de conservation d'une certaine biodisponibilité du fer dans ces sols diversement salés et calcaires.

Conclusion

Les seules formes du fer qui seraient dépendantes dans les échantillons étudiés sont le fer assimilable et le fer lié à la matière organique.

La complexion du fer par des molécules organiques constituera le principal mécanisme de conservation du fer assimilable dans ces sols salés et calcaires.

1-3- Relation entre les différentes formes du fer et les caractéristiques des sols

Les caractéristiques des sols utilisées sont variables selon la forme de l'oligo-élément considéré. Les paramètres retenus sont ceux qui seraient les plus discriminants dans le comportement de chaque forme des oligo-éléments dans les sols (Loué, 1993 ; Kabata-Pendis, 2004). Les paramètres caractéristiques de l'état de sodicité des sols (ESP) et de l'état de salinité des sols (CE) sont utilisés pour tester leur influence sur les différentes formes du fer dans ces solontchaks.

1-3-1- Le fer total

Le fer total est corrélé significativement et positivement avec le sable (r (observé) = 0.583; r (critique pour $\alpha = 0.05$ et $ddl = 16$) = 0.486). Ce résultat montre que la quantité en fer total augmente avec l'augmentation du taux de sable dans le sol (tableau XIII).

Par ailleurs, Le fer total est lié négativement et significativement avec le taux de sodium échangeable (ESP) (r (observé) = -0.497 ; r (critique pour $\alpha = 0.05$ et $ddl = 16$) = 0.486). Ce résultat suggère que la teneur en fer total dans le sol diminue quand le taux de sodium échangeable augmente (tableau XIII).

Tableau XIII - Le coefficient de corrélation entre le fer total et les caractéristiques des sols.

Caractéristiques du sol	Fer total
CaCO ₃ %	-0,429
MO %	0,246
Argiles %	0,472
Limons %	0,086
Sables%	0,583*
ESP %	-0,497*
CE dS/m	-0,372

* : Corrélation signification au seuil de $\alpha = 0.05$

1-3-2- Le fer lié à la matière organique

Les caractéristiques utilisées sont le taux de matière organique, le taux de sodium échangeable, la réaction du sol, et le niveau de salinité (tableau XIV).

Le pH est en corrélation hautement significative et négative avec le fer lié à la matière organique (r (observé) = - 0.632; r (critique pour $\alpha = 0.01$ et $ddl = 16$) = 0.589). Ce résultat signifie que la tendance générale serait à une diminution de la quantité en fer lié à la matière organique quand le pH augmente dans le sol.

Tableau XIV - Le coefficient de corrélation entre les caractéristiques du sol et le fer lié à la matière organique.

Caractéristiques du sol	Fe-Matière organique
MO %	-0,135
ESP %	-0,259
pH	-0,632**
CE dS/m	-0,405

** : Signification au seuil $\alpha = 0.01$

1-3-3- Le fer assimilable, le fer lié aux oxydes et le fer lié aux carbonates

D'après le tableau XV, les autres formes du fer (assimilable, liée aux oxydes et liée aux carbonates) ne présentent pas de corrélation significative avec le taux de calcaire total, le pH, la sodicité du sol, et la salinité du sol.

Tableau XV - Le coefficient de corrélation entre les caractéristiques du sol et les autres formes du fer (assimilable, lié aux oxydes et lié aux carbonates).

Caractéristiques du sol	Fer assimilable	Fe-Oxydes	Fe-Carbonates
CaCO ₃ %	-0,281	-0.023	-0,332
ESP %	0,157	-0,032	-0,425
pH	-0,338	0,071	0,061
CE dS/m	-0,051	-0,079	-0,448

(r (critique pour $\alpha = 0.05$ et ddl = 16) = 0.486)

Conclusion

La corrélation significative et positive de la teneur en fer total avec le taux de sables suggère une localisation préférentielle du fer dans les fractions grossières du sol.

La sodisation du sol provoquerait une diminution de la teneur en fer total du sol, tandis que la salinisation n'affecterait pas la teneur en fer total.

La corrélation significative et négative entre la teneur en fer lié à la matière organique et le pH signifierait que l'augmentation du pH dans la gamme présente dans ces sols (7.49 -8.76) constituerait une contrainte à la complexation du fer par la matière organique.

Le fer assimilable, le fer lié aux oxydes, et le fer lié aux carbonates auraient un comportement indépendant des caractéristiques des sols testées dans ces calculs.

1-4- Conclusion

Les échantillons analysés présentent des teneurs appréciables en fer total et de faibles teneurs en fer assimilable.

Les réseaux cristallographiques des minéraux primaires et secondaires contiennent la forme dominante du fer dans ces sols. Les oxydes de fer constituent la seconde forme du fer dans les sols. La forme liée à la matière organique et la forme liée aux carbonates sont faiblement représentées.

La teneur en fer assimilable est relativement faible, elle ne représente, en moyenne, que 0.15 % de la réserve totale en fer dans ces sols.

Les profils de distribution diffèrent d'une forme à une autre.

Les seules formes du fer qui seraient dépendantes dans les échantillons étudiés sont le fer assimilable et le fer lié à la matière organique. La complexion du fer par des molécules organiques constituera le principal mécanisme de conservation du fer assimilable dans ces sols salés et calcaires.

La corrélation significative et positive de la teneur en fer total avec le taux de sables suggère une localisation préférentielle du fer dans les fractions grossières du sol.

La sodisation du sol provoquerait une diminution de la teneur en fer total du sol, tandis que la salinisation n'affecterait pas la teneur en fer total.

La corrélation significative et négative entre la teneur en fer lié à la matière organique et le pH signifierait que l'augmentation du pH dans la gamme présente dans ces sols (7.49 -8.76) constituerait une contrainte à la complexation du fer par la matière organique.

Le fer assimilable, le fer lié aux oxydes, et le fer lié aux carbonates auraient un comportement indépendant des caractéristiques des sols testées dans ces calculs.

2- LE MANGANESE

2-1- Les différentes formes du manganèse

2-1-1- Le manganèse total

La teneur en manganèse total varie de 170,44 à 307,59 mg/kg avec une moyenne de 244,58 mg/kg (figure 18). La médiane est de 244,88 mg/kg. Ces teneurs se situent dans la gamme de Loué (1993) qui considère que les teneurs totales en manganèse dans le sol sont comprises entre 20 à 6000 mg/kg. L'intervalle de confiance calculé est compris entre 3,30 et 89,12 mg/kg de terre.

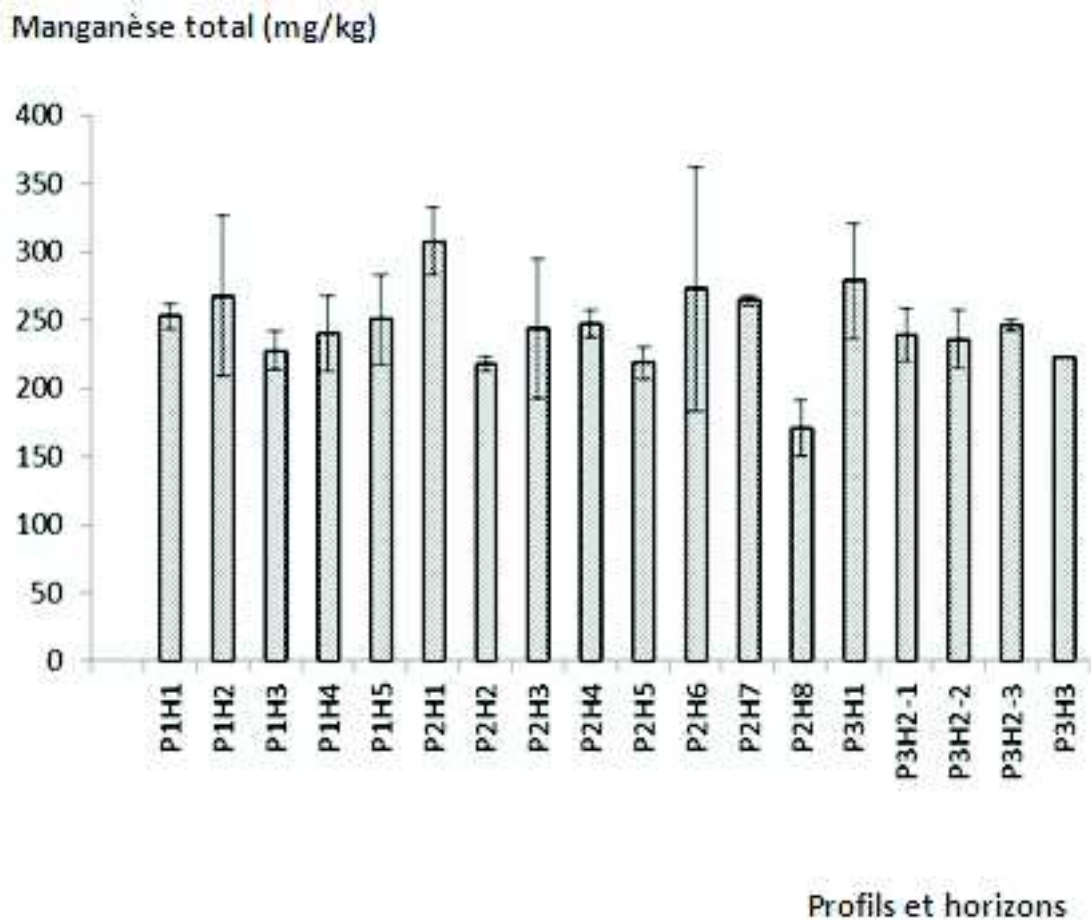


Figure 18 - Teneurs en manganèse total des échantillons.

Le profil de distribution du manganèse total dans le sol est concave pour le profil 3, il est irrégulier pour le profil 1 et le profil 2 (figure 19).

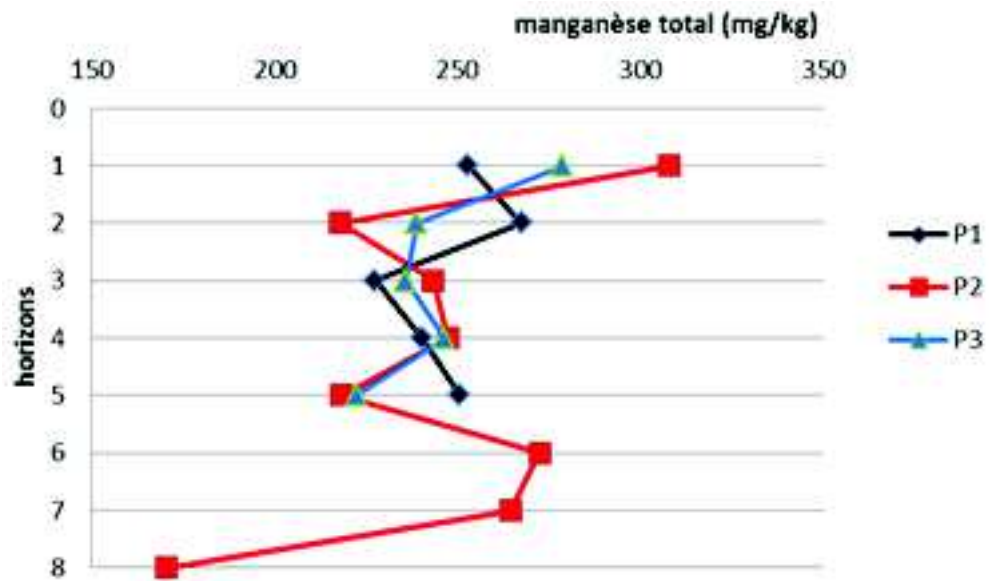


Figure 19 - Les profils de distribution du manganèse total.

2-1-2- Le manganèse assimilable

La teneur en manganèse assimilable varie de 2,73 à 12,67 mg/kg avec une moyenne de 7,50 mg/kg (figure 20). La médiane est de 7,27 mg/kg. Ces valeurs sont faibles à moyennes par rapport aux normes de Loué (1993) qui considère que des teneurs comprises entre 4 et 8 mg/kg présentent un risque moyen à faible de déficience, tandis que des teneurs supérieures à 10 mg/kg seraient suffisantes pour répondre aux besoins des cultures en manganèse assimilable.

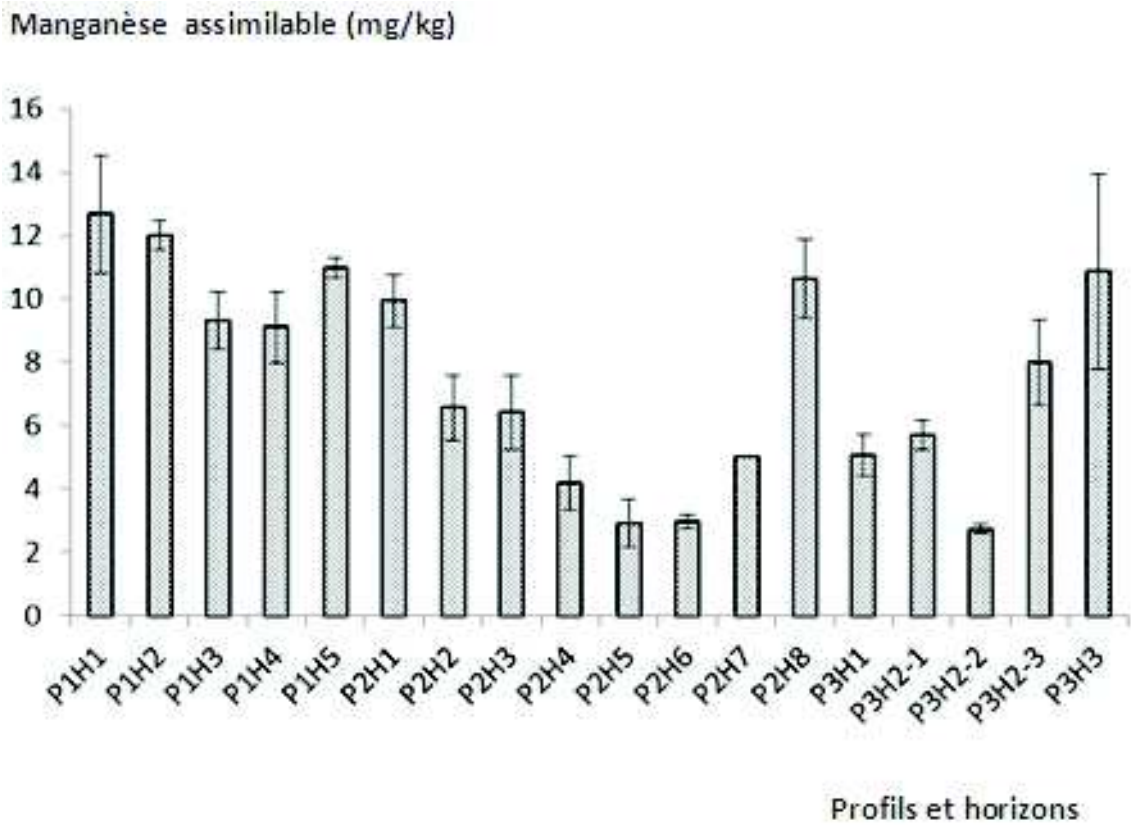


Figure 20 - Teneurs en manganèse assimilable des échantillons.

Le profil de distribution du manganèse assimilable est concave pour le profil 1 et le profil 2, et il est irrégulier le profil 3 (figure 21). Le profil 1 présenterait les teneurs les plus élevées en manganèse assimilable.

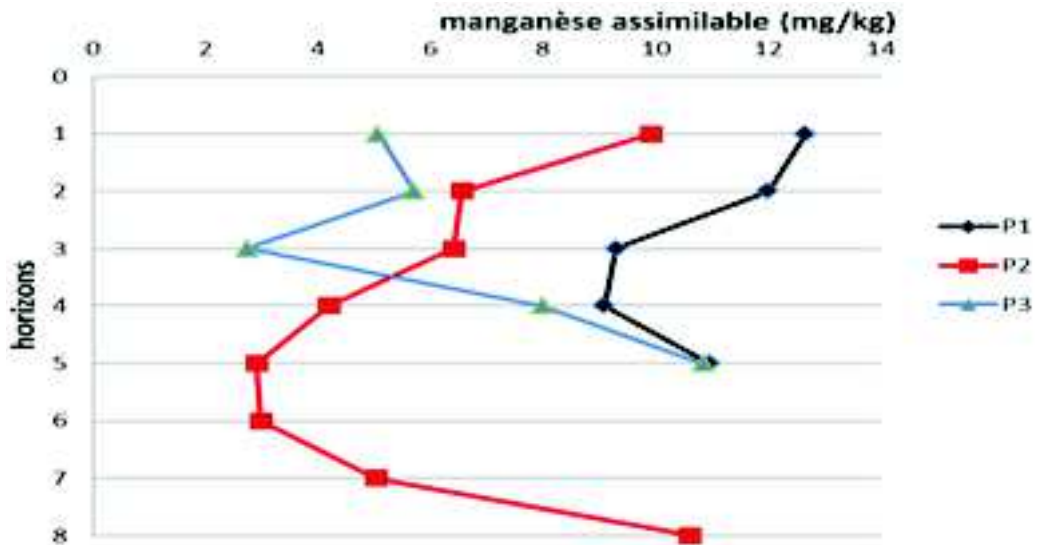
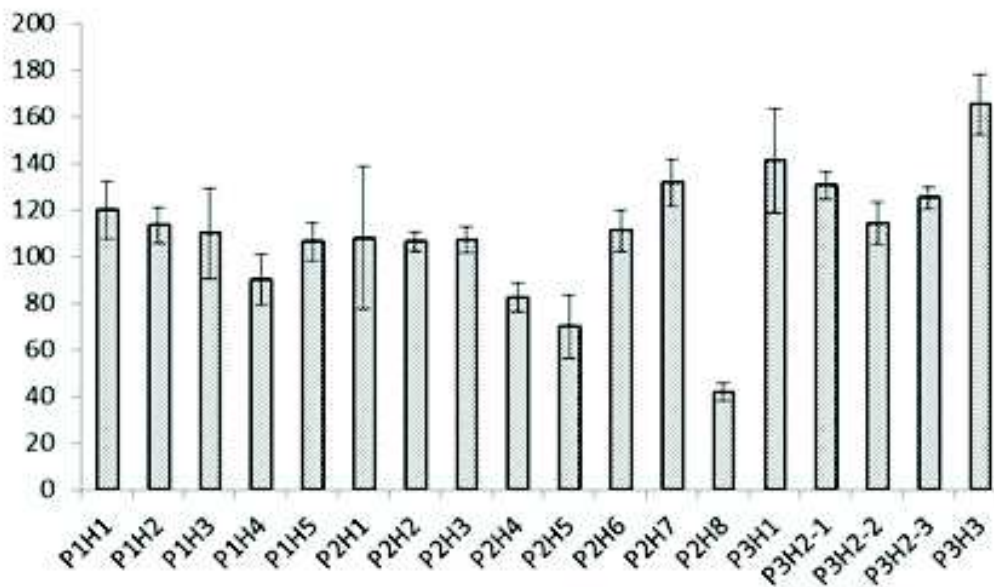


Figure 21 - Les profils de distribution du manganèse assimilable.

2-1-3- Le manganèse lié aux oxydes

La teneur en manganèse lié aux oxydes varie de 41,98 à 165,07 mg/kg avec une moyenne de 112,66 mg/kg (figure 22). La médiane est de 110, 33 mg/kg.

Manganèse lié aux oxydes (mg/kg)



Profils et horizons

Figure 22 - Teneurs en manganèse lié aux oxydes des échantillons.

Le profil de distribution est concave pour les profils 1 et 3, il est irrégulier pour le profil 2 (figure 23).

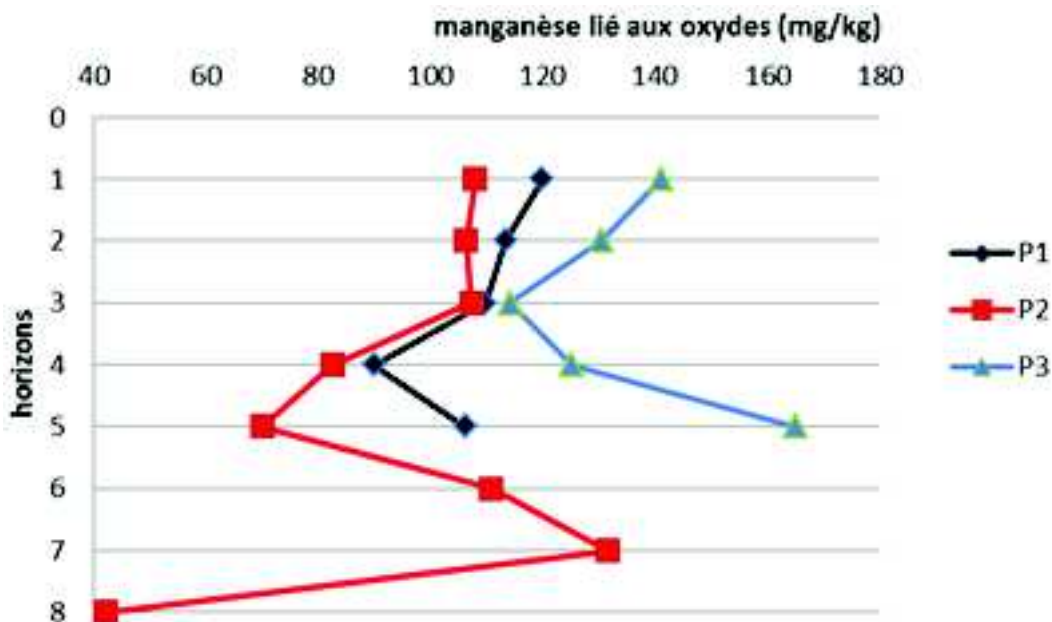
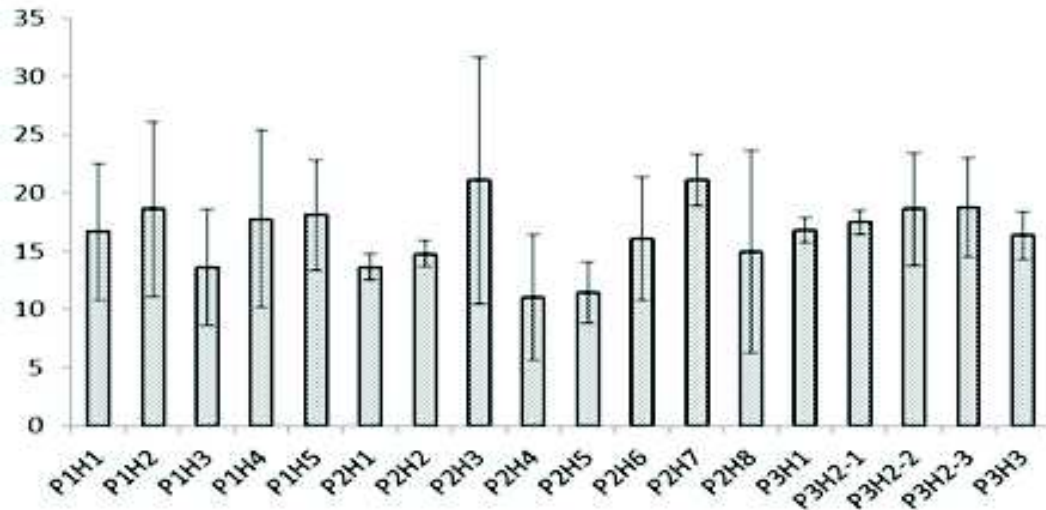


Figure 23 - Les profils de distribution du manganèse lié aux oxydes.

2-1-4- Le manganèse lié à la matière organique

La teneur en manganèse lié à la matière organique varie de 11,02 à 21,10 mg/kg avec une moyenne de 16,48mg/kg (figure 24). La médiane est de 16,71 mg/kg.

Manganèse lié à la matière organique (mg/kg)



Profils et horizons

Figure 24 - Teneurs en manganèse lié à la matière organique des échantillons.

Le profil de distribution du manganèse lié à la matière organique est convexe pour le profil 3, il est irrégulier pour les profils 1 et 2 (figure 25).

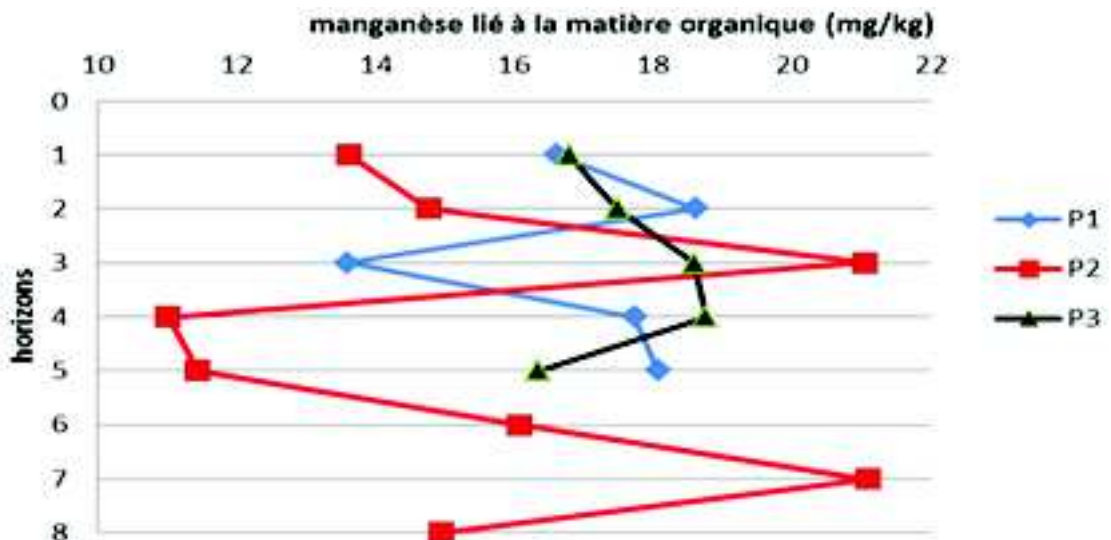
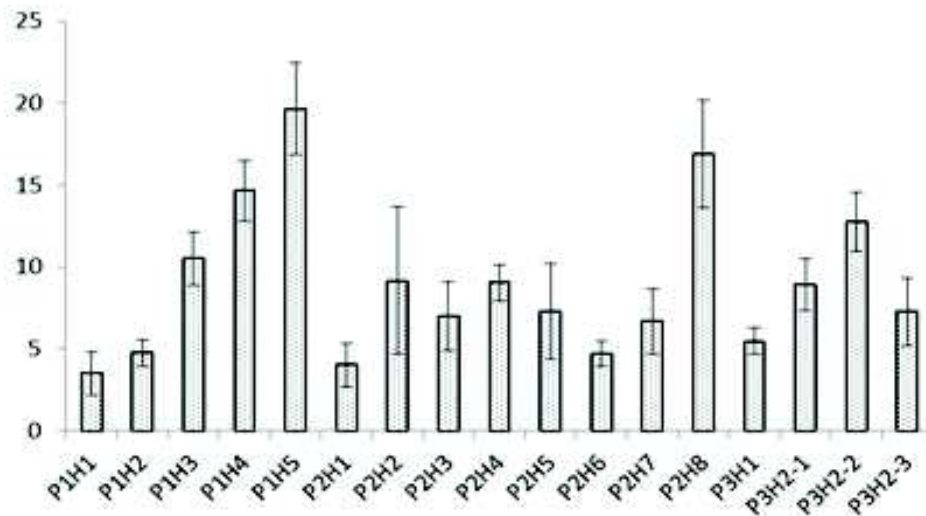


Figure 25 - Les profils de distribution du manganèse lié à la matière organique.

2-1-5- Le manganèse lié aux carbonates

Les teneurs en manganèse lié aux carbonates varient de 3,47 à 19,63mg/kg avec une moyenne de 9,07mg/kg (figure 26). La médiane est de 1,60 mg/kg.

Manganèse lié aux carbonates (mg/kg)



Profils et horizons

Figure 26 - Teneurs en manganèse lié aux carbonates des échantillons.

Le profil de distribution du manganèse lié aux carbonates dans le sol est descendant pour le profil 1, il est convexe pour le profil 3, et il est irrégulier pour le profil 2 (figure 27).

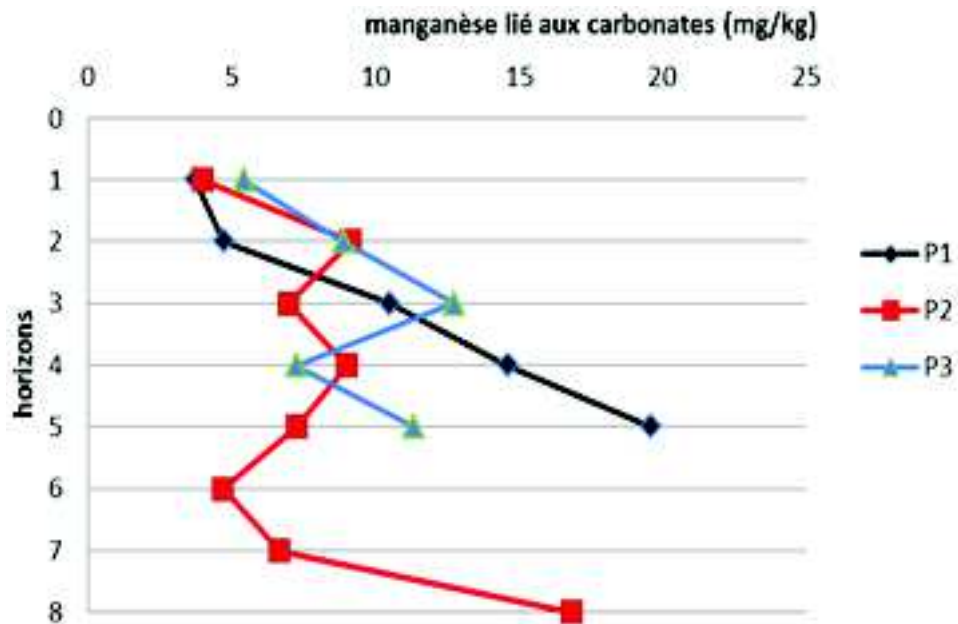


Figure 27 - Les profils de distribution du manganèse lié aux carbonates.

Synthèse et Discussion

Les résultats des différentes formes du manganèse dans les sols étudiés sont résumés dans le tableau XVI.

Tableau XVI - Les teneurs du manganèse dans les sols étudiés (mg/kg de terre).

Formes du manganèse	La teneur minimale	La teneur maximale	La teneur moyenne
Le manganèse total	170,44	307,59	244,58
Le manganèse assimilable	2,73	12,67	7,50
Le manganèse lié aux oxydes	41,98	165,07	112,66
Le manganèse lié à la matière organique	11,02	21,10	16,48
Le manganèse lié aux carbonates	3,47	19,63	9,07

Par rapport à la teneur en manganèse total :

- le manganèse assimilable ne représente que 3.06 %
- le manganèse lié aux oxydes représente 46.06 %
- le manganèse lié à la matière organique représente 6.73 %
- le manganèse lié aux carbonates représente 3.70 %
- et le reste, soit le manganèse résiduel, représente 40.45 %

Les teneurs en manganèse total dans le sol (170.44 – 307.59 mg/kg) sont comparables aux teneurs signalées dans les solonchaks du monde (265 – 1100 mg/kg) par Kabata-Pendias (2001). Ces teneurs en manganèse total sont élevées par rapport à celles rapportées par Bensaïd (1981) dans les sols salés du Bas- Cheliff (4,2 à 9,1 mg/kg).

Le manganèse assimilable présente des faibles teneurs (2,73 – 12,67 mg/kg) par rapport aux normes de Loue (1993). Les teneurs assimilables sont élevées par rapport aux résultats de Bensaïd (1981) obtenus sur les sols du Bas-Cheliff (2,8 – 7,3 mg/kg)

Conclusion

Le manganèse est présent principalement sous forme d'oxydes, et secondairement sous la forme incluse dans la structure des minéraux.

Le manganèse présente des teneurs totales relativement élevées et des teneurs assimilables faibles dans les sols étudiés.

La teneur en manganèse assimilable est relativement faible, elle représente, en moyenne, 3.06 % de la réserve totale en manganèse dans ces sols.

Les profils de distribution diffèrent selon les formes du manganèse.

2-2- Relation entre les formes du manganèse

Le manganèse total est en corrélation hautement significative et négative avec le manganèse lié aux carbonates (r (observé) = - 0.600 ; r (critique pour $\alpha = 0.01$ et ddl = 16) = 0.589). (tableau XVII).

Tableau XVII - La matrice de corrélations entre les différentes formes du manganèse.

Formes du manganèse	Mn-total	Mn-assimilable	Mn-Oxydes	Mn-matière organique
Mn- total	1,000			
Mn-assimilable	-0,055	1,000		
Mn-Oxydes	0,466	0,057	1,000	
Mn-matière organique	0,188	0,108	0,453	1,000
Mn-Carbonates	-0,600**	0,189	-0,343	0,020

** : Corrélation signification au seuil de $\alpha = 0.01$

2-3- Influence des caractéristiques du sol sur les différentes formes du manganèse

2-3-1- Le manganèse total

Les teneurs en manganèse en total varient de façon indépendante des caractéristiques des sols testées dans ce calcul. En effet, il faut noter une absence de signification statistique entre le manganèse total et les paramètres caractéristiques du sol (tableau XVIII).

Tableau XVII - Le coefficient de corrélation entre le manganèse total et les caractéristiques du sol.

Caractéristiques du sol	Manganèse total
CaCO ₃ %	0,012
MO %	0,333
Argiles %	0,332
Limons %	0,404
Sables%	-0,230
ESP %	-0,473
CE dS/m	0,105

2-3-2- Le manganèse lié aux oxydes

Le pH présente une corrélation hautement significative et négative avec le manganèse lié aux oxydes (r (observé) = - 0.707; r (critique pour $\alpha = 0.01$ et ddl = 16) = 0.589). Ce résultat signifie que la liaison du manganèse aux oxydes diminuerait quand le pH augmente dans les sols dans la gamme des pH observée (7.49 – 8.76) (Tableau XIX)

Le manganèse lié aux oxydes est corrélé significativement et négativement avec la CE (r (observé) = - 0.540; r (critique pour $\alpha = 0.05$ et ddl = 16) = 0.486). Ce résultat montre que la salinisation limiterait la liaison du manganèse aux oxydes.

Le manganèse lié aux oxydes présente également une corrélation négative et hautement significative avec le taux de sodium échangeable (r (observé) = - 0.684 ; r (critique pour $\alpha = 0.01$ et ddl = 16) = 0.589). La sodisation du complexe adsorbant limiterait également la liaison du manganèse aux oxydes (Tableau XIX).

Tableau XIX - Le coefficient de corrélation entre le manganèse lié aux oxydes et les caractéristiques du sol.

Caractéristiques du sol	Manganèse-Oxydes
ESP %	-0,684**
pH	-0,707**
CE dS/m	-0,540*

* : Signification au seuil $\alpha = 0.05$

** : Signification au seuil $\alpha = 0.01$

2-3-3- Le manganèse assimilable, lié à la matière organique et lié aux carbonates

Le tableau XX montre une absence de corrélation significative entre le manganèse assimilable, le manganèse lié à la matière organique, et le manganèse lié aux carbonates avec les caractéristiques du sol.

Tableau XX - Le coefficient de corrélation entre les caractéristiques du sol et le manganèse assimilable, le manganèse lié à la matière organique, et le manganèse lié aux carbonates.

Caractéristiques du sol	Manganèse assimilable	Manganèse-Matière organique	Manganèse-Carbonates
CaCO ₃ %	-0,026	0,01	0,041
MO %	-0,062	0,004	-0,358
ESP %	0,230	-0,086	0,452
pH	-0,051	-0,281	0,131
CE dS/m	0,110	-0,243	0,103

(r (critique pour $\alpha = 0.05$ et ddl = 16) = 0.486)

Conclusion

Le manganèse lié aux oxydes est corrélé significativement et négativement avec le pH, la conductivité électrique et le taux de sodium échangeable.

Les autres formes de manganèse ne présentent pas de corrélation significative avec les caractéristiques des sols étudiées.

2-4- Conclusion

Le manganèse présente des teneurs totales relativement élevées. Il est présent principalement sous forme d'oxydes, et secondairement sous la forme incluse dans la structure des minéraux.

La teneur en manganèse assimilable est relativement faible, elle représente, en moyenne, 3.06 % de la réserve totale en manganèse dans ces sols.

Les profils de distribution diffèrent selon les formes du manganèse.

Le manganèse total est corrélé significativement et négativement avec le manganèse lié aux carbonates .

Le manganèse lié aux oxydes est corrélé significativement et négativement avec le pH, la conductivité électrique et le taux de sodium échangeable.

3- LE ZINC

3-1- Les différentes formes du zinc

3-1-1- Le zinc total

La teneur en zinc total varie de 24,217 à 110,171 mg/kg avec un intervalle de confiance calculé est compris entre 3,11 et 30,21 mg/kg de terre (figure 28). La valeur moyenne est de 59,390 mg/kg. La médiane est de 46,88 mg/kg. Ces teneurs se situent dans l'intervalle des valeurs proposées par Loué (1993) qui considère que les teneurs totales en zinc dans le sol sont comprises entre 10 et 300 mg/kg.

Zinc total (mg/kg)

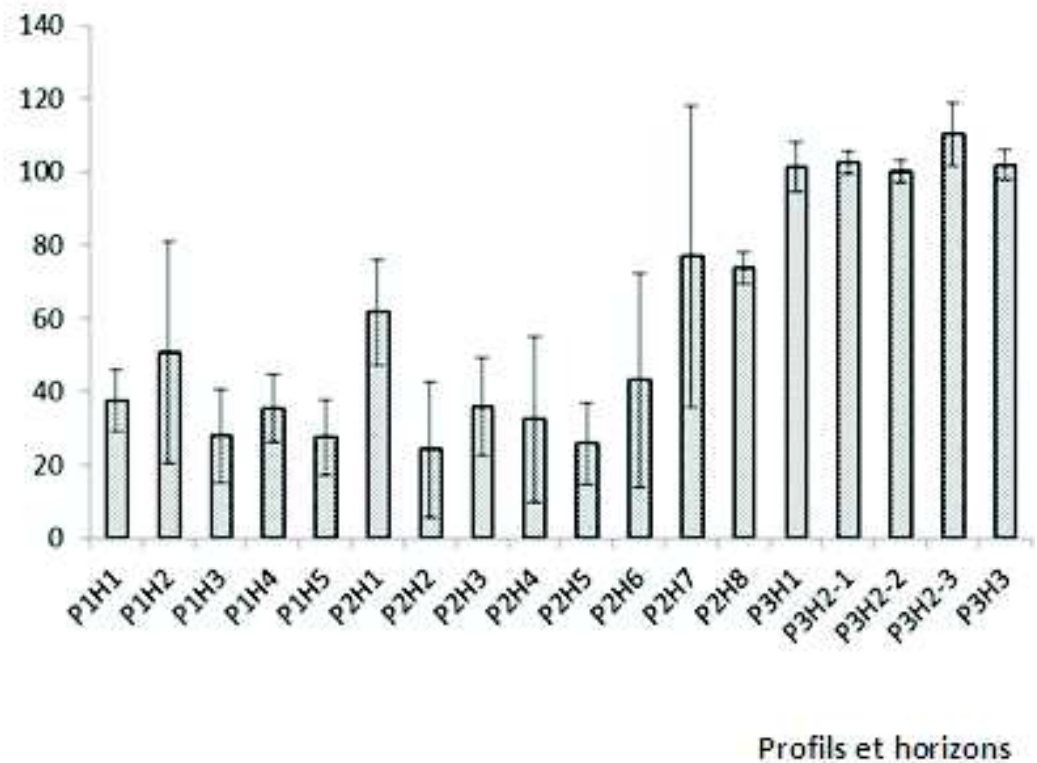


Figure 28 - Teneurs en zinc total des échantillons.

Le profil de distribution du zinc total dans le sol est relativement uniforme pour le profil 3, il est irrégulier pour les profils 1 et 2 (figure 29).

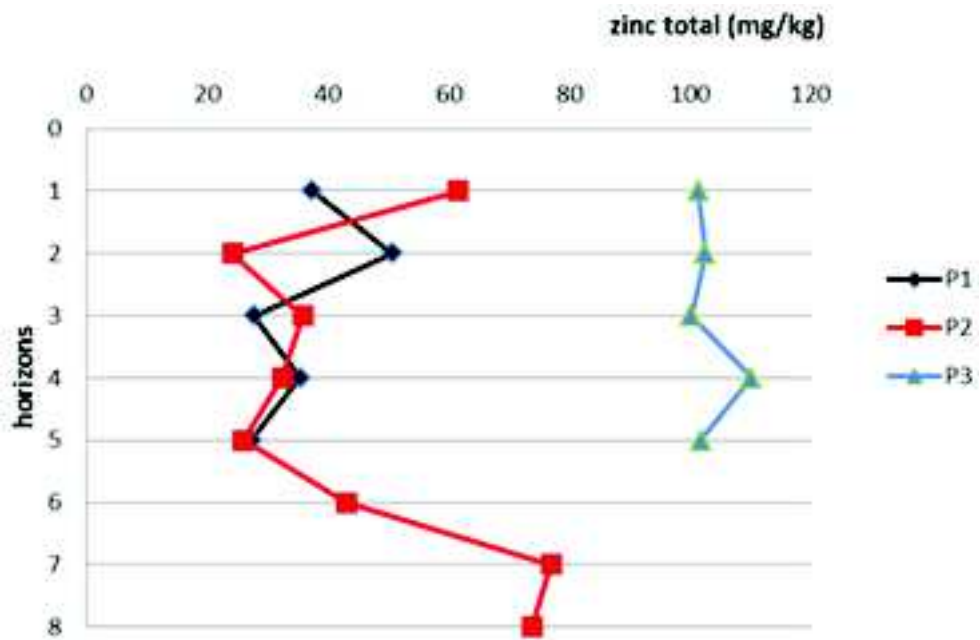
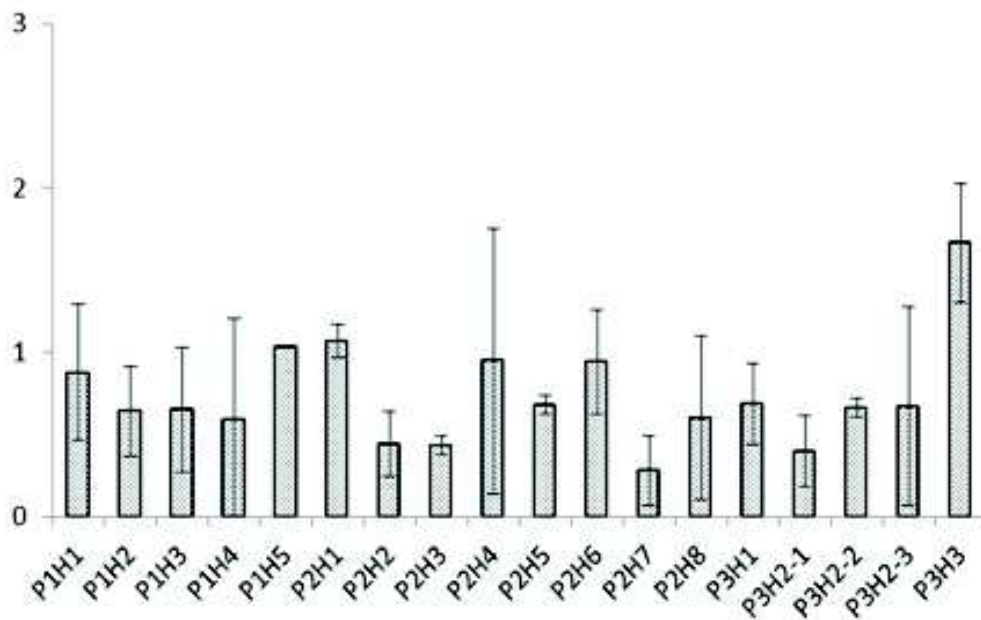


Figure 29 - Les profils de distribution du zinc total.

3-1-2- Le zinc assimilable

La teneur en zinc assimilable varie de 0,279 à 1,667 mg/kg avec un intervalle de confiance calculé compris entre 0 et 0,61 mg/kg de terre (figure 30). La valeur moyenne est de 0,74 mg/kg. La médiane est de 0,66 mg/kg. Ces valeurs sont comparables à celles de loué (1993) qui considère que les teneurs en zinc assimilable varient entre 0,5 et 1 mg/kg.

Zinc assimilable (mg/kg)



Profils et horizons

Figure 30 - Teneurs en zinc assimilable des échantillons.

Le profil de distribution du zinc assimilable dans le sol est concave pour le profil 1, et il est irrégulier pour les profils 2 et 3 (figure 31).

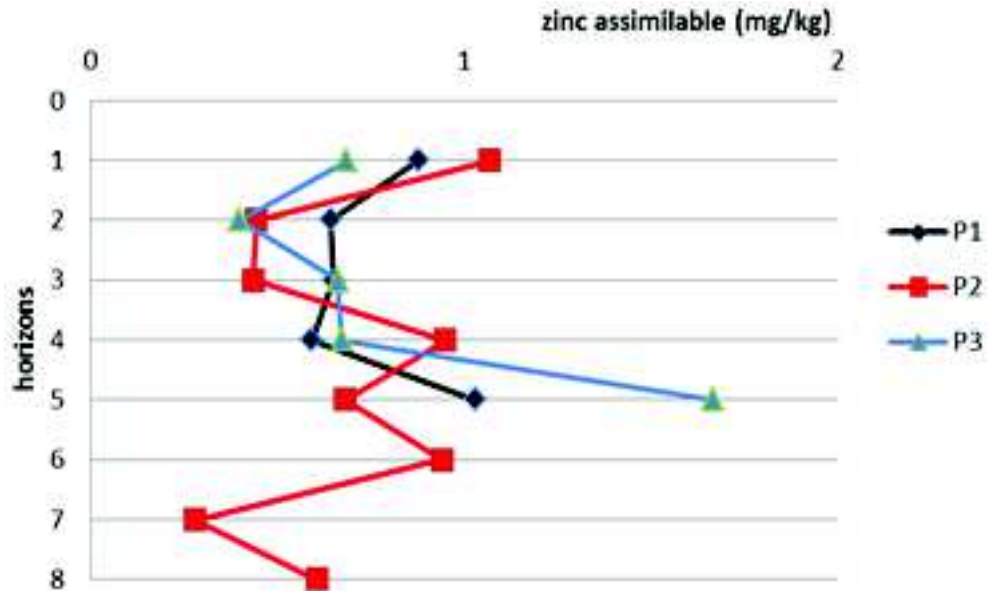
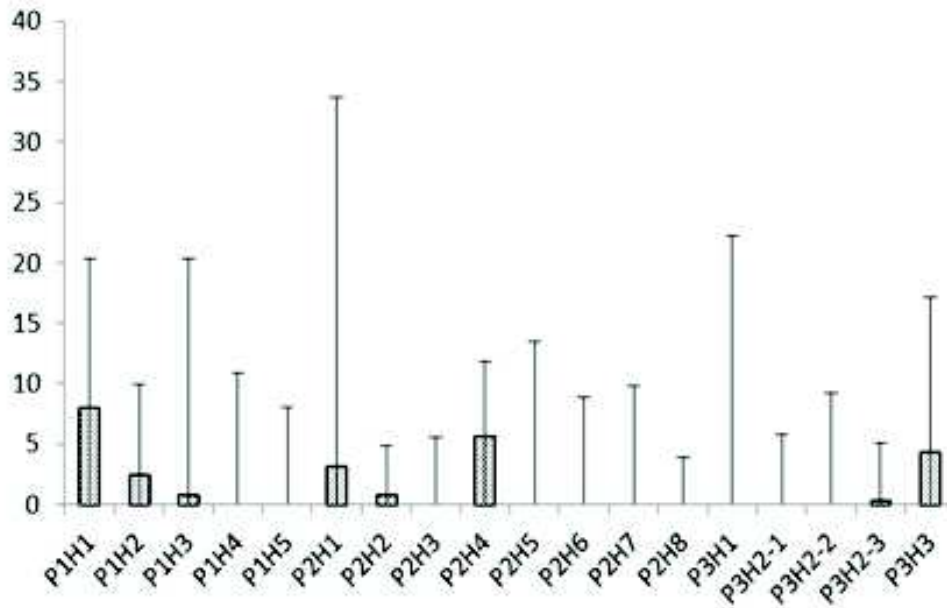


Figure 31 - Les profils de distribution du zinc assimilable.

3-1-3- Le zinc lié aux oxydes

La teneur en zinc lié aux oxydes varie de 0 à 7,982 mg/kg avec un intervalle de confiance calculé compris entre 0 et 11,035 mg/kg de terre (figure 32). La valeur moyenne est de 1,399 mg/kg.

Zinc lié aux oxydes (mg/kg)



Profils et horizons

Figure 32 - Teneurs en zinc lié aux oxydes des échantillons.

Le profil de distribution du zinc lié aux oxydes est ascendant pour le profil 1, il est irrégulier pour le profil 2, et il est descendant pour le profil 3 (figure 33).

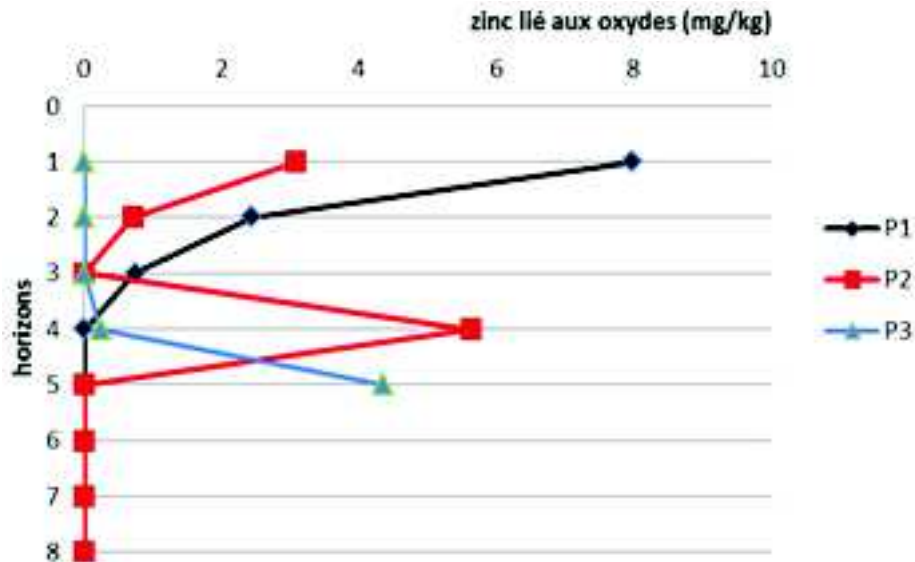
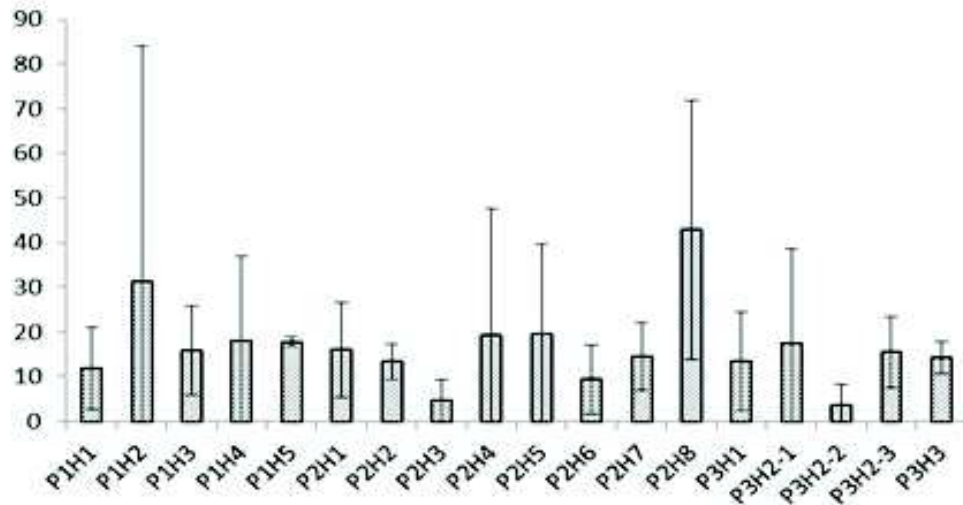


Figure 33 - Les profils de distribution du zinc lié aux oxydes.

3-1-4- Le zinc lié à la matière organique

La teneur en zinc lié à la matière organique varie de 3,60 à 42,930 mg/kg, l'intervalle de confiance calculé est compris entre 1,06 et 28,99 mg/kg de terre (figure 34). La teneur moyenne est de 16,572 mg/kg. La médiane est de 15.60 mg/kg.

Zinc lié à la matière organique (mg/kg)



Profils et horizons

Figure 34 - Teneurs en zinc lié à la matière organique des échantillons.

Le profil de distribution du zinc lié à la matière organique est convexe pour le profil 1, il irrégulier pour les profils 2 et 3 (figure 35).

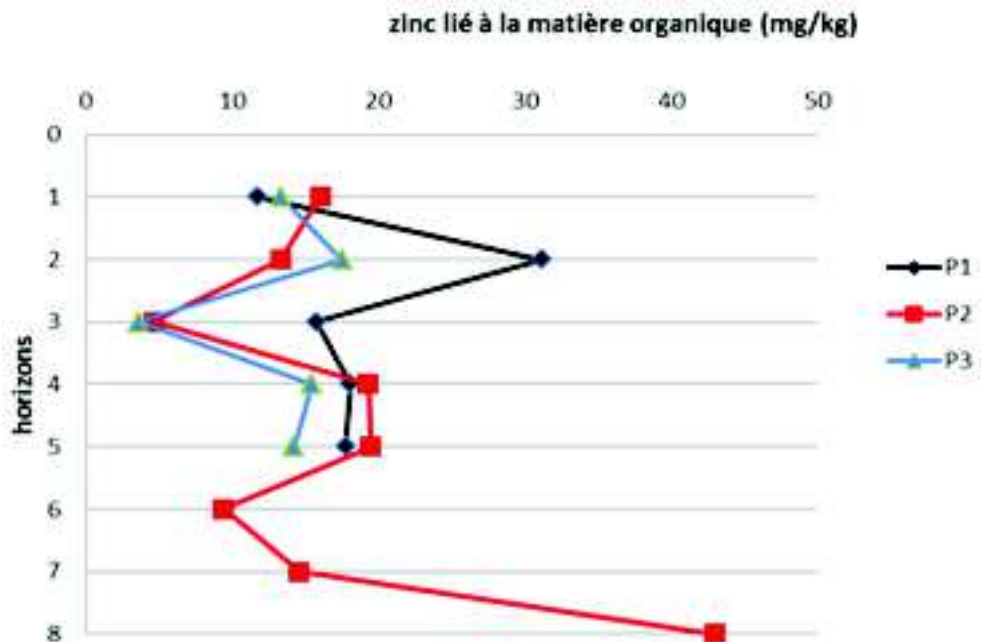


Figure 35 - Les profils de distribution du zinc lié à la matière organique.

3-1-5- Le zinc lié aux carbonates

La teneur en zinc lié aux carbonates varie de 0 à 3,561 mg/kg avec un intervalle de confiance compris entre 0 et 4,94 mg/kg de terre (figure 36).

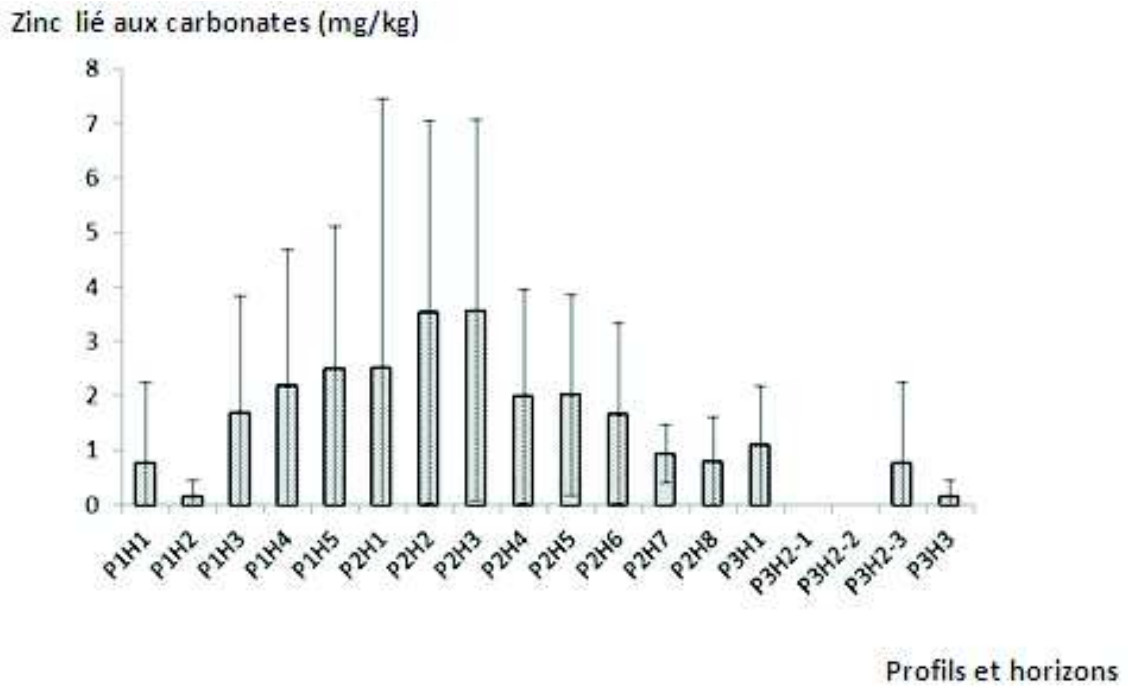


Figure 36 - Teneurs en zinc lié aux carbonates des échantillons.

Le profil de distribution du zinc lié aux carbonates est irrégulier pour le profil 1 et le profil 3, il est convexe pour le profil 2 (figure 37).

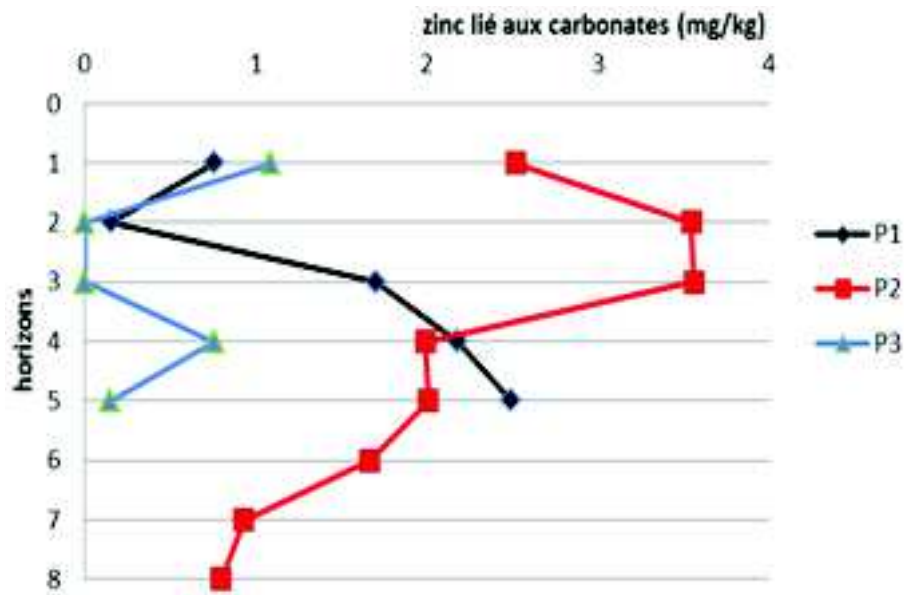


Figure 37 - Les profils de distribution du zinc lié aux carbonates.

Synthèse et discussion

Les résultats des différentes formes du zinc dans les sols étudiés sont résumés dans le tableau XXI.

Tableau XXI - Les teneurs du zinc dans les sols étudiés (mg/kg de terre).

Formes du zinc	La teneur minimale	La teneur maximale	La teneur moyenne
Zinc total	24,217	110,71	59,390
Zinc assimilable	0,279	1,667	0,74
Zinc lié aux oxydes	0	7,982	1,399
Zinc lié à la matière organique	3,60	42,930	16,572
Zinc lié aux carbonates	0	3,561	1,461

Par rapport à la teneur en zinc total :

- le zinc assimilable ne représente que 1.24 %
- le zinc lié aux oxydes représente 2.35 %
- le zinc lié à la matière organique représente 27.90 %
- le zinc lié aux carbonates représente 2.46 %
- et le reste, soit le zinc résiduel, représente 66.08 %

Le zinc est donc majoritairement sous forme incluse dans les minéraux. Ce résultat est comparable à ceux de Chaabani et *al.* (2005) qui montrent, à travers les extractions séquentielles, que le zinc est associé préférentiellement à la fraction résiduelle avec un pourcentage de 54 %.

La forme liée à la matière organique représente 27.90 % du zinc total. Les formes liées aux oxydes et liées aux carbonates sont comparables et représentent, 2,35 % et 2,46 %. La forme assimilable ne représente qu'une très faible proportion du zinc total, soit 1,24 %

Les teneurs en zinc total se situent dans la gamme des valeurs rapportées par Loue (1993) (10 - 300 mg/kg). Elles sont comparables aux teneurs rapportées pour les solonchaks du monde (25 - 155 mg/kg) par Kabatas-Pendias (2001). Les teneurs en zinc total sont également comparables aux valeurs obtenues par Bensaïd (1981) dans les sols salés du Bas-Cheliff (50 à 100 mg/kg).

Les teneurs en zinc assimilable seraient faibles à moyennes par rapport aux normes de Loué (1993) (les teneurs en zinc assimilable sont de 0,5 à 1 mg/kg). Elles sont plus faibles que les teneurs rapportées pour les sols salés du Bas-Cheliff par Bensaïd (1981) (3,6 à 16,8 mg/kg).

Conclusion

Le zinc présente des teneurs totales moyennes. Il est majoritairement présent sous forme incluse dans la structure des minéraux et secondairement sous forme liée à la matière organique.

La teneur en zinc assimilable est relativement faible, elle ne représente, que 1,24 % de la teneur totale en zinc dans ces sols.

Les profils de distribution diffèrent selon les formes du zinc étudiées.

3-2- Relation entre les différentes formes du zinc

Une corrélation très hautement significative et négative est observée entre la teneur en zinc total et la teneur en zinc lié aux carbonates (r (observé) = -0.713; r (critique pour $\alpha = 0.001$ et $ddl = 16$) = 0.708) (tableau XXII).

Le zinc assimilable est corrélé significativement et positivement avec le zinc lié aux oxydes (r (observé) = 0.531; r (critique pour $\alpha = 0.05$ et $ddl = 16$) = 0.486).

Tableau XXII - Matrice de corrélations entre les différentes formes du zinc.

Formes du zinc	Zn total	Zn assimilable	Zn-oxydes	Zn-matière organique
Zn total	1.00			
Zn assimilable	0.069	1.00		
Zn-oxydes	0.149	0.531*	1.00	
Zn-matière organique	-0.034	-0.048	-0.006	1.00
Zn-carbonates	-0.713***	-0.129	-0.149	-0.225

*: Signification au seuil $\alpha = 0.05$

*** : Signification au seuil $\alpha = 0.001$

Conclusion

Le zinc total est corrélé négativement avec le zinc lié aux carbonates, tandis que le zinc assimilable est corrélé positivement avec le zinc lié aux oxydes.

3-3- Relation entre les différentes formes du zinc et les caractéristiques des sols

3-3-1- Le zinc total

La corrélation entre le zinc total et le sable est positive et elle est très hautement significative (r (observé) = 0.892; r (critique pour $\alpha = 0.001$ et ddl = 16) = 0.708) (tableau XXIII). Ce résultat signifie que la réserve principale en zinc est localisée dans des particules grossières de la taille des sables.

Le carbonate de calcium est corrélé significativement et négativement avec le zinc total (r (observé) = -0.534; r (critique pour $\alpha = 0.05$ et ddl = 16) = 0.486). Les fortes teneurs en calcaire total correspondent aux faibles teneurs en zinc total dans ces sols (tableau XXIII).

Tableau XXIII - Le coefficient de corrélation entre le zinc total et les caractéristiques des sols.

Caractéristiques du sol	Zinc total
CaCO ₃ %	-0,534*
MO %	0,315
Argiles %	0,471
Limons %	-0,395
Sables%	0,892***
ESP %	-0,232
CE dS/m	-0,336

* : Signification au seuil $\alpha = 0.05$

*** : Signification au seuil $\alpha = 0.001$

3-3-2- Le zinc lié à la matière organique

La corrélation entre le zinc lié à la matière organique et le taux de sodium échangeable (ESP) est hautement significative et positive (r (observé) = 0.679; r (critique pour $\alpha = 0.01$ et

ddl = 16) = 0.589). Cette corrélation signifie que la sodisation du complexe adsorbant des sols favoriserait la formation de complexes organo-métalliques entre le zinc et la matière organique dans le sol (tableau XXIV)

Tableau XXIV - Matrice de corrélations entre les caractéristiques du sol et le zinc lié à la matière organique

Caractéristiques du sol	Zinc-Matière organique
MO %	-0,331
ESP %	0,679**
pH	0,450
CE dS/m	0,299

** : Signification au seuil $\alpha = 0.01$

3-3-3- Le zinc assimilable, le zinc lié aux oxydes et le zinc lié aux carbonates

D'après le tableau XXV, aucune corrélation statistiquement significative n'est enregistrée entre les caractéristiques du sol et le zinc assimilable, le zinc lié aux oxydes, et le zinc lié aux carbonates.

Tableau XXV - Le coefficient de corrélation entre le zinc assimilable, le zinc lié aux carbonates, le zinc lié aux oxydes et les caractéristiques des sols.

Caractéristiques du sol	Zinc assimilable	Zinc-Carbonates	Zinc-oxydes
CaCO ₃ %	-0,383	0,348	- 0,252
MO %	-0,102	- 0,087	0,155
CEC Cmol(+)/kg	0,343	- 0,358	0,329
ESP %	-0,131	-0,070	-0,139
pH	-0,178	0,286	-0,137
CE dS/m	0,121	0,312	-0,024

(r (critique pour $\alpha = 0.05$ et ddl = 16) = 0.486)

Conclusion

Le zinc total est corrélé significativement et positivement avec le sable. Il est corrélé négativement avec le carbonate de calcium.

Le zinc lié à la matière organique est corrélé positivement et significativement avec le taux de sodium échangeable.

3-4- Conclusion

Le zinc est majoritairement présent sous forme incluse dans la structure des minéraux et secondairement sous forme liée à la matière organique.

La teneur en zinc assimilable est relativement faible, elle ne représente, que 1,24 % de la teneur totale en zinc dans ces sols.

Le zinc présente des teneurs totales moyennes et des teneurs assimilables faibles dans les sols étudiés.

Les profils de distribution diffèrent selon les formes du zinc étudiées.

Le zinc total est corrélé négativement avec le zinc lié aux carbonates, tandis que le zinc assimilable est corrélé positivement avec le zinc lié aux oxydes.

Le zinc total est corrélé significativement et positivement avec le sable. Il est corrélé négativement avec le carbonate de calcium.

Le zinc lié à la matière organique est corrélé positivement et significativement avec le taux de sodium échangeable

4- LE BORE

4-1- Les différentes formes du bore

4-1-1 Le bore total

La teneur en bore total varie de 1,446 à 2,193 mg/kg avec un intervalle de confiance calculé compris entre 0,001 et 0,008 mg/kg de terre (figure 38). La moyenne est de 1,952 mg/kg. La médiane est de 1,978 mg/kg. Ces teneurs sont faibles par rapport aux normes de Balanos Benavides et Garcia Alzate (2000) qui considèrent que les teneurs en bore total dans le sol sont comprises entre 2 et 200 mg/kg.

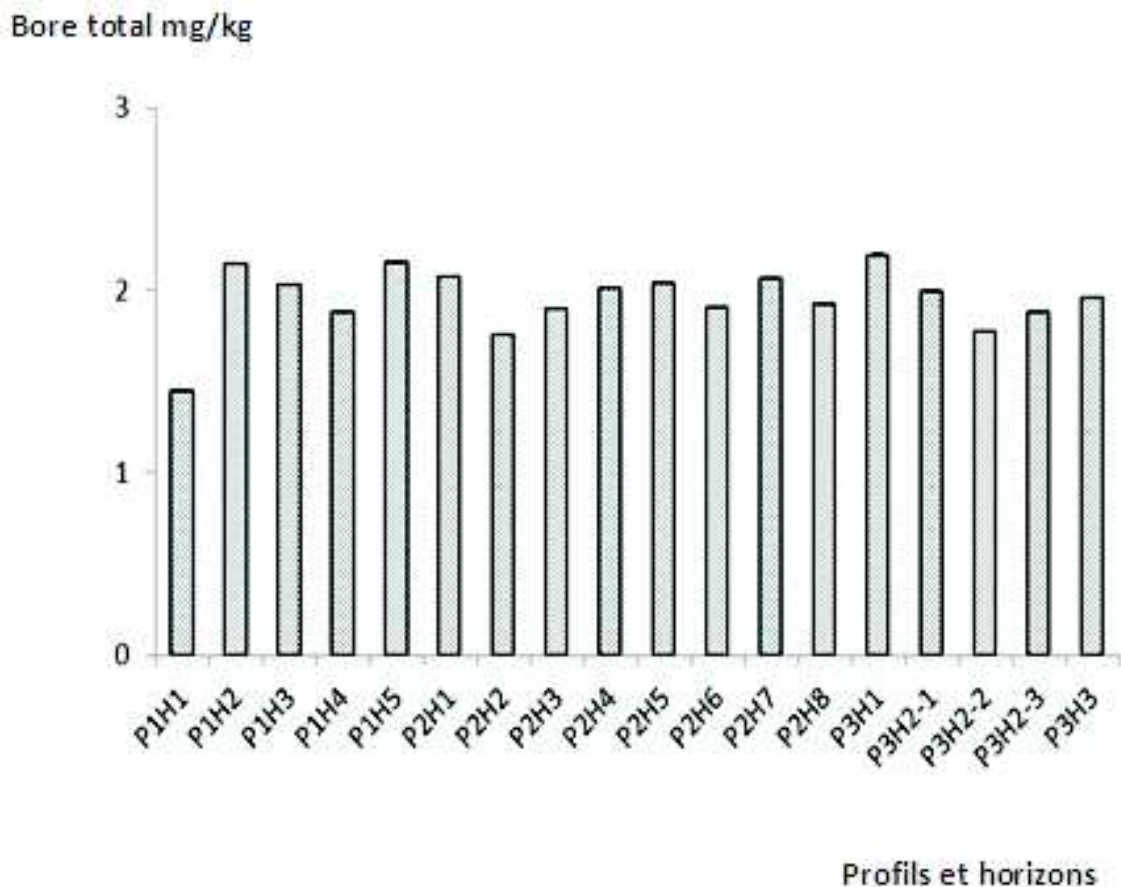


Figure 38 - Teneurs en bore total des échantillons.

Le profil de distribution du bore total dans le sol est irrégulier pour le profil 1, il est relativement uniforme pour le profil 2, et il est concave pour le profil 3 (figure 39).

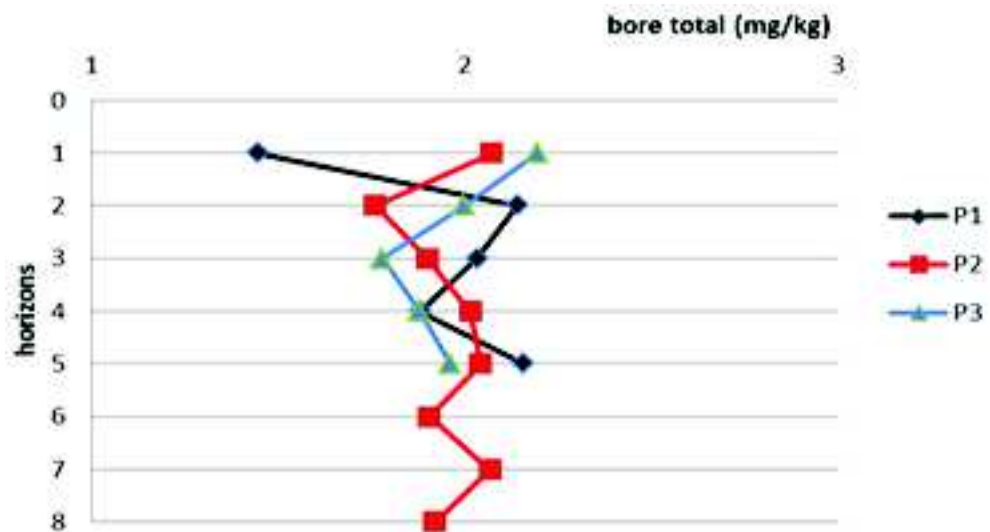


Figure 39 - Les profils de distribution du bore total.

4-1-2- Le bore soluble

La teneur en bore soluble varie de 0,594 à 0,739 mg/kg, l'intervalle de confiance calculé est compris entre 0 et 0,038 mg/kg de terre (figure 40). La moyenne est de 0,654 mg/kg. La médiane est de 0,642 mg/kg. Ces teneurs se situent dans la gamme des valeurs proposées par Ryan *et al.*(1998) (0,5 à 5 mg/kg).

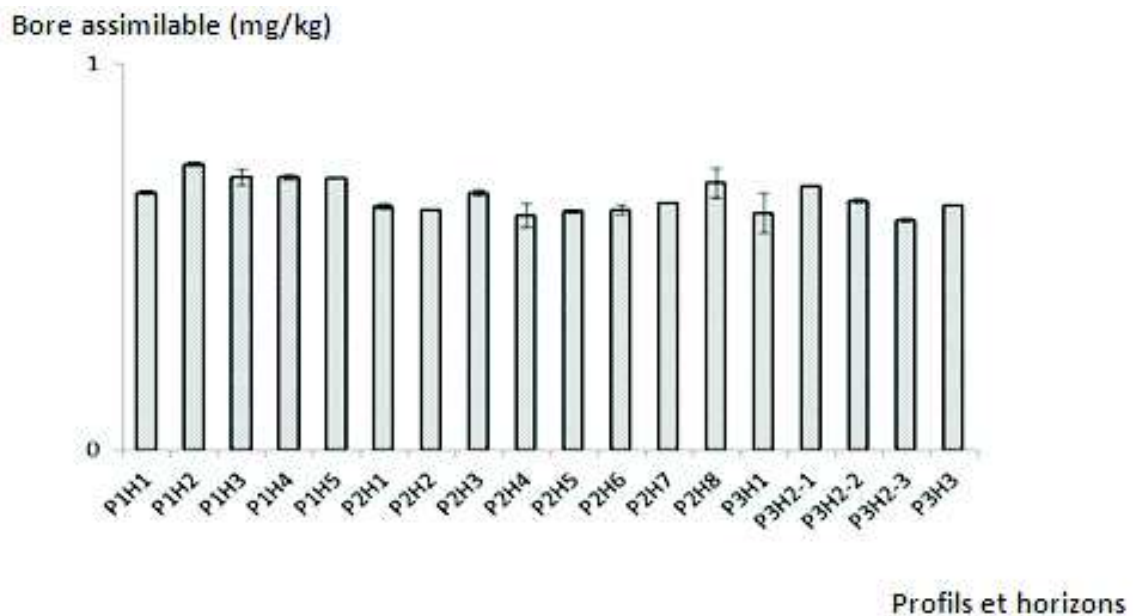


Figure 40 - Teneurs en bore soluble des échantillons.

Les profils de distribution du bore soluble dans le sol sont relativement uniformes pour les 3 profils (figure 41).

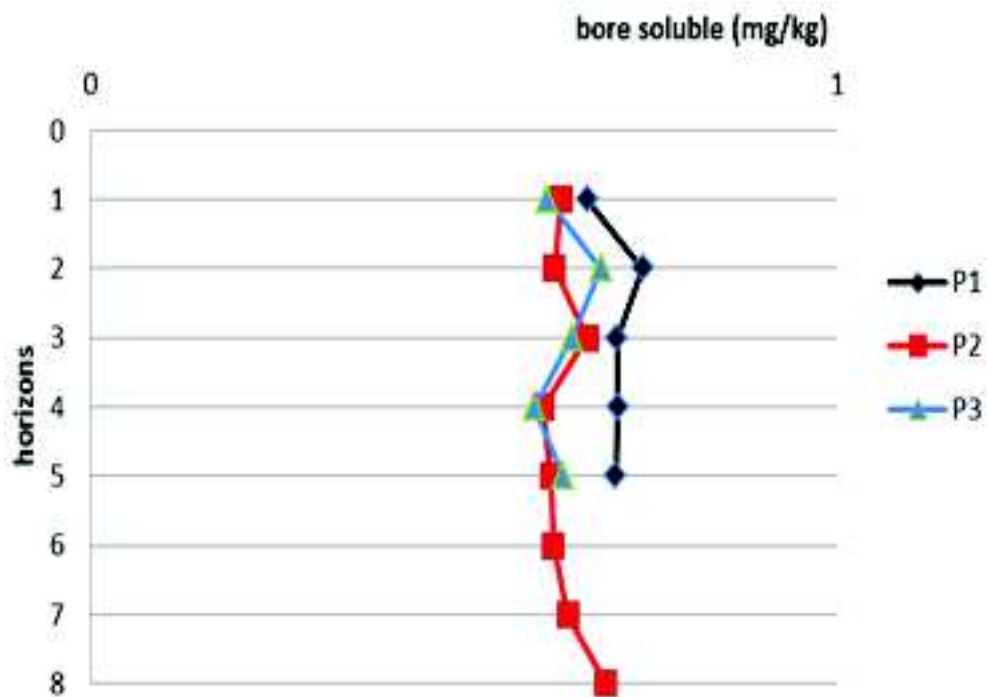


Figure 41 - Les profils de distribution du bore assimilable.

Synthèse et discussion

Les résultats pour les différentes formes du bore dans les sols salés du Bas-Cheliff sont résumés dans le tableau XXVI (mg/kg).

Tableau XXVI - Les teneurs du bore dans les sols salés du Bas- Cheliff (mg/kg de terre).

Forme du bore	La teneur minimale	La teneur maximale	La teneur moyenne
Le bore total	1,446	2,193	1,952
Le bore soluble	0,594	0,739	0,654

Par rapport au bore total, le bore soluble représente 33,50 % et le bore résiduel représente 66,50 %

La proportion du bore soluble est élevée par rapport à la valeur rapportée par Kabata-Pendias (2001) qui la situe entre 3,2 et 5,3% du bore total.

Les teneurs en bore total sont faibles par rapport aux valeurs obtenues par Kabata-Pendias (2001) qui considère que les teneurs en bore total dans les sols salés du monde sont comprises entre 12 et 105 mg/kg. Les valeurs obtenues sont également faibles par rapport à celles rapportées par Bensaid (1981) pour les sols salés du Bas-Cheliff (1,26 à 7,12 mg/kg).

Les teneurs obtenues en bore soluble sont faibles par rapport aux normes de Peyve *et al.* (1959 ; in Bensaid, 1981) (3 à 37 mg/kg). Ces teneurs sont inférieures à celles rapportées par Bensaid (1981) dans les sols salés du Bas-Cheliff (0,68 à 2,74 mg/kg).

Les profils de distribution sont relativement uniformes, ils sont comparables à ceux obtenus par Kabata-Pendias (2001) dans des sols limoneux et salés.

Conclusion

Le bore résiduel représente la majeure partie du bore total de ces sols (66,50 %). Le bore soluble représente 33,50 % du bore total.

Les teneurs obtenues en bore total et en bore soluble sont faibles par rapport à celles rapportées dans la bibliographie.

4-2- Relation entre les formes du bore

La corrélation entre le bore total et le bore soluble ($r = 0,104$) est statistiquement non significative.

4-3- Influence des caractéristiques du sol sur les différentes formes du bore

Aucune corrélation significative n'est enregistrée entre les différentes formes du bore et les caractéristiques des sols (tableau XXVII).

Tableau XXVII - Le coefficient de corrélation entre les formes du bore et les caractéristiques des sols.

Caractéristiques du sol	Bore total	Bore soluble
Gypse %	0,006	0,390
CaCO ₃ %	0,111	0,219
MO %	-0,200	-0,167
Argiles %	-0,176	-0,069
Limons %	0,071	-0,269
Sables%	0,068	-0,234
ESP %	-0,002	0,363
pH	0,180	0,289
CE dS/m	0,221	0,125

(r (critique pour $\alpha = 0.05$ et $ddl = 16$) = 0.486)

4-4- Conclusion

Le bore résiduel représente la majeure partie du bore total de ces sols (66,50 %). Le bore soluble représente 33,50 % du bore total.

Les teneurs obtenues en bore total et en bore soluble sont faibles par rapport à celles rapportées dans la bibliographie.

La corrélation entre le bore total et le bore soluble est statistiquement non significative

Aucune corrélation significative n'est enregistrée entre les différentes formes du bore et les caractéristiques des sols.

5- DISCUSSION GENERALE

5-1- Les teneurs en oligo-éléments

Par rapport aux valeurs rapportées par la bibliographie (Loué, 1993 ; Kabata- Pendias, 2001), les teneurs totales obtenues sont généralement faibles pour le bore, moyennes pour le zinc et le manganèse, et élevées pour le fer (tableau XXVIII).

Selon les normes de Loué (1993) et Kabata- Pendias (2001), les teneurs assimilables sont généralement moyennes à élevées pour le zinc, elles sont moyennes pour le bore, elles sont faibles à moyennes pour le manganèse, et elles sont faibles pour le fer (tableau XXVIII).

Tableau XXVIII - La gamme de variations des teneurs des formes totales et assimilables des oligo-éléments dans les sols salés du Bas Cheliff.

oligo-éléments Formes	Le fer (mg/kg)	Le manganèse (mg/kg)	Le zinc (mg/kg)	Le bore (mg/kg)
Totale	3217,92 - 3558,74	170,44 – 307,59	24,217 – 110,171	1,446 – 2,193
Appréciation	Elevée	Moyenne	Moyenne	Faible
Assimilable	0,15 – 12,11	2,73 – 12,67	0,279 – 1,667	0,594 – 0,739
Appréciation	Faible	Faible à moyenne	Moyenne à élevée	Moyenne

Les teneurs totales en fer, en manganèse et en zinc obtenues sont élevées, et les teneurs en bore sont faibles par rapport à celles rapportées pour les sols salés de H'madna par Bensaid (1981).

Les teneurs assimilables obtenues en fer, en zinc et en bore sont faibles, et les teneurs en manganèse assimilable sont élevées par rapport aux teneurs rapportées par Bensaid (1981) pour les sols salés de H'madna.

5-2- Les profils de distribution

Les profils de distribution diffèrent d'une forme à une autre des oligo-éléments. Les types de profil de distribution qui auraient une signification sont, selon Chassin et al. (1996), les suivants :

- Le type de profil ascendant correspond à une origine anthropique des oligo-éléments observés dans la partie supérieure du sol,
- Le type de profil descendant correspond à une origine géologique des oligo-éléments observés dans la partie inférieure du sol,

Les résultats obtenus dans ce travail sont les suivants :

- Les profils ascendants : zinc-oxydes (p1) – fer total (p3) : une origine anthropique est observée concernant le zinc lié aux oxydes dans le profil 1, et le fer total dans le profil 3,
- Les profils descendants : zinc-oxydes (p3) – fer assimilable (p2 et p3) – fer lié aux oxydes (p3) – fer lié à la MO (p3) – manganèse lié aux carbonates (p1) = une origine géologique est observée concernant le zinc lié aux oxydes dans le profil 3, le fer assimilable dans le profil 2 et le profil 3, le fer lié aux oxydes dans le profil 3, le fer lié à la matière organique dans le profil 3, et le manganèse lié aux carbonates dans le profil 1.

Plus généralement, Les apports anthropiques semblent limités dans ces sols. L'origine géologique semble donc plus fréquente. Mais la majorité des profils n'ont pas une signification relative aux origines des oligo-éléments dans ces sols salés.

La nature alluviale des sédiments serait à l'origine de l'hétérogénéité des profils de distribution des oligo-éléments dans ces sols.

5-3- Les corrélations entre les formes des oligo-éléments

Le fer assimilable est en corrélation positive avec le fer lié à la matière organique. La matière organique conserverait le fer assimilable sous forme de chélates dans les sols salés. Les constantes de stabilité (log K) du fer avec les acides humiques et les acides fulviques sont les suivantes (Kabata- Pendias, 2001) :

Complexes organo-métalliques log K

Fe⁺⁺⁺ - acides fulviques 6.6

Fe⁺⁺⁺ - acides humiques 8.5

Fe⁺⁺ - acides fulviques 4.8

Fe⁺⁺ - acides fulviques 6.4

Selon les valeurs des constantes de stabilité, le fer oxydé formerait davantage de complexes avec les acides humiques.

Le manganèse total présente une corrélation négative avec le manganèse lié aux carbonates. L'accumulation du carbonate de calcium dans ces sols s'accompagne donc d'une diminution de la teneur en manganèse total.

Le zinc total présente une corrélation négative avec le zinc lié aux carbonates. L'accumulation du carbonate de calcium, qui est un sel peu soluble et non ferrifère, dans ces sols s'accompagne donc d'une diminution de la teneur en zinc total du sol.

Le zinc assimilable est en corrélation positive avec le zinc lié aux oxydes. Le zinc assimilable serait conservé sous forme liée à des oxydes peu cristallisés et suffisamment solubles dans ces sols salés (Behera *et al.*, 2011).

Le bore soluble ne présente pas de corrélation significative avec le bore total. La mise en solution du bore dans ces sols est donc indépendante de sa réserve totale, elle dépendrait des autres caractéristiques des sols (Bououden, 2007).

5-4- Les corrélations entre les formes des oligo-éléments et les caractéristiques des sols

Le fer total est en corrélation positive avec les sables. Le fer total serait localisé principalement dans la fraction grossière de ces sols. L'héritage sédimentaire serait prédominant dans ces sols qui se forment sur des alluvions.

Le fer total est corrélé négativement avec le taux de sodium échangeable. La sodisation de ces sols provoquerait une diminution de la réserve totale en fer.

Le fer lié à la matière organique présente une corrélation négative avec le pH. La gamme de pH (7.49 -8.76) présente une contrainte à la complexation du fer par la matière

organique dans ces sols. Une diminution de l'activité de Fe^{3+} et de Fe^{2+} est signalée dans cette gamme de pH, et les espèces $Fe(OH)_2^+$ et $Fe(OH)^{2+}$ se forment (Lindsay, 1979).

Le manganèse lié aux oxydes présente une corrélation négative avec le taux de sodium échangeable, le pH, et la conductivité électrique. La sodisation du complexe adsorbant, la salinité et la gamme de pH observée (7.49 -8.76) limitent la teneur en oxydes de manganèse soit en défavorisant la précipitation des oxydes, soit en favorisant leur solubilisation (Bromfield et David., 1978).

Le zinc lié à la matière organique est corrélé positivement avec l'ESP. La sodisation du complexe adsorbant favorise la chélation du zinc par la matière organique. Le remplacement du zinc par le sodium dans les sites d'échange permet sa libération dans la solution du sol et sa complexation par la matière organique.

Le zinc total présente une corrélation positive avec les sables. Ce type de corrélation avec les sables est également obtenu avec le fer total. Le zinc total et le fer total sont donc préférentiellement localisés dans la fraction sableuse de ces sols.

Le zinc total est corrélé négativement avec le carbonate de calcium, l'augmentation de la teneur en carbonate de calcium réduit la réserve en zinc total dans ces sols.

Le comportement du bore soluble et du bore total semble indépendant des caractéristiques de ces sols.

5-5- Influence de la salinisation et de la sodisation sur le comportement des oligo-éléments

Les corrélations significatives qui étaient enregistrées entre la salinisation et la sodisation des sols et les différentes formes des oligo-éléments sont présentées dans le tableau XXIX

Tableau XXIX - Les corrélations significatives entre les formes des oligo-éléments, la salinisation et la sodisation des sols.

formes de l'oligo-élément	ESP (%)	CE (dS/m)
Fer total	- 0.497*	-0.372
Manganèse lié aux oxydes	-0.684**	-0.540*
Zinc lié à la matière organique	0.679**	0.299

* = signification au seuil $\alpha= 0.05$

** = signification au seuil $\alpha= 0.01$

Le fer total est corrélé négativement avec le taux de sodium échangeable.

Le manganèse lié aux oxydes présente une corrélation négative avec la salinité et la sodicité. La salinisation et la sodisation limiteraient la précipitation du manganèse sous forme d'oxydes.

Le zinc lié à la matière organique est corrélé positivement avec le taux de sodium échangeable. La sodisation favoriserait la libération du zinc en solution et sa complexation.

Pour Acosta et al. (2001), la salinité augmente la mobilité des oligo-éléments dans les sols salés. Cette mobilité dépend du type d'oligo-élément, de sa teneur totale, et de la nature des sels solubles. Or, nos résultats ne montrent pas d'augmentation de la mobilité des oligo-éléments avec la salinité.

Par ailleurs, Amir et al. (2006) montrent que la teneur en zinc soluble diminue avec la salinité. Les résultats obtenus ne montrent pas de relation entre la teneur en zinc soluble et la salinité des sols étudiés.

Les teneurs en bore assimilable n'augmentent pas avec la salinité du sol, contrairement aux observations généralement rapportées dans la bibliographie (**FAO, 2006**) .

CONCLUSION

Ce travail a pour but de caractériser les formes, la distribution, et les relations des oligo-éléments avec les autres compartiments des Solonchaks du Bas-Cheliff. Pour répondre à cet objectif, 18 échantillons provenant de trois profils sont analysés.

La méthode de fractionnement chimique est utilisée pour l'extraction des différentes formes pour les trois cations (le fer, le manganèse et le zinc), il s'agit de la forme totale, la forme assimilable, la forme liée aux oxydes, la forme liée à la matière organique et la forme liée aux carbonates. Pour le bore, la forme totale a été extraite par une solution de carbonate de sodium, et la forme soluble est extraite par l'eau chaude.

Les échantillons analysés présentent des teneurs appréciables en fer total et de faibles teneurs en fer assimilable. Les réseaux cristallographiques des minéraux primaires et secondaires contiennent la forme dominante du fer dans ces sols. Les oxydes de fer constituent la seconde forme du fer dans les sols.

La forme liée à la matière organique et la forme liée aux carbonates sont faiblement représentées. La teneur en fer assimilable est relativement faible, elle ne représente, en moyenne, que 0.15 % de la réserve totale en fer dans ces sols. Les profils de distribution diffèrent d'une forme à une autre.

Les seules formes du fer qui seraient dépendantes sont le fer assimilable et le fer lié à la matière organique, la complexion du fer par des molécules organiques constituera le principal mécanisme de conservation du fer assimilable dans ces sols salés et calcaires. La corrélation significative et positive de la teneur en fer total avec le taux de sables suggère une localisation préférentielle du fer dans les fractions grossières du sol.

La sodisation du sol provoquerait une diminution de la teneur en fer total du sol, tandis que la salinisation n'affecterait pas la teneur en fer total. La teneur en fer lié à la matière organique diminue avec l'augmentation du pH dans la gamme présente dans ces sols (7.49 -8.76). Le fer assimilable, le fer lié aux oxydes, et le fer lié aux carbonates auraient des comportements indépendants des caractéristiques des sols.

Le manganèse présente des teneurs totales relativement élevées. Il est présent principalement sous forme d'oxydes, et secondairement sous la forme incluse dans la structure des minéraux. La teneur en manganèse assimilable est relativement faible, elle représente, en moyenne, 3.06 % de la réserve totale en manganèse dans ces sols.

Les profils de distribution diffèrent selon les formes du manganèse. La teneur en manganèse total diminue avec l'augmentation de la teneur en manganèse lié aux carbonates. Le manganèse lié aux oxydes est corrélé significativement et négativement avec le pH, la conductivité électrique et le taux de sodium échangeable.

Le zinc présente des teneurs totales moyennes et des teneurs assimilables faibles dans les sols étudiés. Le zinc est majoritairement présent sous forme incluse dans la structure des minéraux et secondairement sous forme liée à la matière organique. La teneur en zinc assimilable est relativement faible, elle ne représente que 1,24 % de la teneur totale en zinc dans ces sols.

Les profils de distribution diffèrent selon les formes du zinc étudiées. Le zinc lié aux carbonates diminue lorsque la teneur en zinc total augmente. La teneur en zinc assimilable augmente avec la teneur en zinc lié aux oxydes. La teneur en zinc total augmente avec le taux de sables, elle diminue avec le taux de carbonate de calcium. La teneur en zinc lié à la matière organique augmente avec la sodicité.

Le bore résiduel représente la majeure partie du bore total de ces sols (66,50 %). Le bore soluble représente 33,50 % du bore total. Les teneurs obtenues en bore total et en bore soluble sont faibles par rapport à celles rapportées dans la bibliographie. La corrélation entre le bore total et le bore soluble est statistiquement non significative. Aucune corrélation significative n'est enregistrée entre les différentes formes du bore et les caractéristiques des sols.

Concernant l'influence de la salinité et de la sodicité sur le comportement de ces oligo-éléments dans ces solonchaks, il s'avère que :

- La teneur en fer total diminuerait lorsque le taux de sodium échangeable augmente.
- La teneur en manganèse lié aux oxydes diminuerait lors de la salinisation de la solution des sols et lors de la sodisation de leur complexe adsorbant.
- La teneur en zinc lié à la matière organique augmenterait avec la sodisation du complexe adsorbant des sols.

Plus généralement, les principaux résultats obtenus montrent que les solonchaks du Bas Cheliff présentent des teneurs totales élevées en oligo-éléments de type cationique (fer, manganèse, zinc), et une faible teneur en bore total. Les teneurs assimilables sont faibles pour tous les oligo-éléments étudiés. La salinité et la sodicité des sols n'affectent pas de façon notable le comportement des oligo-éléments étudiés dans ces solonchaks.

REFERENCES

- Acosta J., Jansen B., Kalbitz K., Faz A., Martinez-martinez S. (2011).** Salinity increases mobility of heavy metals in soils. *Chemosphere*. N° 85 : 1318-1324.
- Albain F. (2002).** Rôle des activités lombriciennes sur la redistribution des éléments traces métalliques issus de boue de station d'épuration dans un sol agricole. Thèse doctorat. Université de Pérennes. 148p.
- Amir H., Shariatmadari H., Karimian N., Kalbasi M., Van der Zees S. (2006).** Cadmium and Zinc in saline soil solutions and their concentrations in wheat. *Soil Science Society of America Journal*. N° 70: 582-589
- Backstrom M., Karlsson S., Backman L., Folkesson L., Lind B. (2004).** Mobilization of heavy metals by deicing salts in a roadside environment. *Water Research*. N° 38: 720- 732.
- 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.
- Balanos benavides M., Garcia alzate A. (2000).** Dynamique du bore dans le sol d'une plantation de bananiers. *Infomusa*. Volume 11. N° 1: 30-33.
- Basta N., Ryan J., Chaney N. (2005).** Trace element chemistry in residual-treated soil. Key concepts and metal bioavailability. *Journal Environment Qual.* Vol 34. pp. 49-63.
- Behera S., Singh M., Singh K., Sandeep T. (2011).** Distribution variability of total and extractible zinc in cultivated acid soils of India and their relationship with some selected soil properties. *Geoderma* N° 162: 242-250.
- Benabdelhakem M. (1978).** Teneur et distribution de quelques oligo-éléments (Fe- Mn- Zn- Cu) dans les sols de la Mitidja et leurs relations avec les propriétés des sols. Mémoire d'ingénieur. INA, EL Harrach, Alger. 53p.
- Bensaid R. (1981).** Forme et répartition des oligo-éléments (Fe, Cu, Zn, Mn et B) dans le haut Cheliff. Mémoire d'ingénieur. INA, El Harrach, Alger. 43p.
- Bououden Z. (2007).** Adsorption du bore en solution aqueuse par le charbon actif et l'alumine. Mémoire de Magister. Université de Constantine. 83p.
- Bourelle P., Berthelin J. (1998)** .Contamination des sols par les éléments en traces, les risques et leur gestion. Rapport de l'Académie des sciences n°42. Techniques et documentation, Paris. 440 p.
- Bril H., Neel C., Soubrand. (2007).** Répartition, spéciation et biodisponibilité des métaux dans les sols d'Auvergne et de Corrèze, pour définir une stratégie d'épandage de boues de station d'épuration. Faculté de sciences et techniques, Limoges. 27p.
- Bromfield S., David D. (1978).** Properties of biologically formed manganese oxide in relation to soil manganese. *Australian Journal of Soil Research*. Volume 16. N° 1 : 79-89.

- Bur T. (2008)** . Impact anthropique sur les éléments traces métalliques dans les sols agricoles de midi-pyrenees , Implications en termes de limites et de charges critiques. Thèse doctorat. Institut national polytechnique, Toulouse. 372p.
- C haabani F., Sebei A., Duerfelli M. (2005)** . Impacts des rejets miniers sur le sol et les plantes de la région de Boujaber (No. Tunisie) fractionnement chimique des métaux lourds dans les sols. *Geo-Eco-Trop*. N° 29 : 37 – 50.
- C hassin P., Baize D., Cambier P., Sterckeman T. (1996)**. Les éléments traces métalliques et la qualité des sols, impact à moyen et à long terme. *Etude et Gestion des sols* 3,4 : 297-306.
- Coïc Y., Coppenet M. (1989)**. Les oligo-éléments en agriculture et élevage. INRA Paris. 114p.
- Cornu S., Clozel B. (2000)** . Extraction séquentielle et spéciation des éléments traces métalliques dans les sols naturelles. *Analyse critique. Etude et gestion des sols*, France. Volume 3, N°7 : 179- 189.
- D ekki N. (2009)**. Distribution spatiale du Zn, du Cd et du B dans la ferme expérimentale de l'ENSA. Mémoire d'ingénieur. ENSA, El Harrach, Alger. 48p.
- Delmas -gadras C. (2000)**. Influence des conditions du plomb et du zinc dans un sol et un sédiment en domaine routier. Thèse doctorat. Université de PAU et des pays de l'Adour, UFR Sciences. 191p.
- Djili K. (1979)**. Contribution à la cartographie et à l'étude de la fertilité chimique des sols de Ksar Chellala (W.Tiaret). Mémoire d'ingénieur. INA, El Harrach, Alger. 66p.
- Du laing G., De vos R., Vandecasteele B., Lesage E., Tack F., Verloo M. (2008)**. Effect of salinity on heavy metal mobility and availability in intertidal sediments of the Scheldt estuary. *Estuarine, Coastal Shelf Science*. N° 77 : 589-602.
- Dupuis M. (1969)**. Dosage des carbonates dans les fractions granulométriques de quelques sols calcaires et dolomitiques. *Ann. Agron, Paris*. Volume 20. N° 1 : 61 – 88.
- FAO . (2006)**. Conférence électronique sur la salinisation: Extension de la salinisation et stratégies de prévention et réhabilitation. IPTRID, projet CISEAU, 2 p.
- G iroux M., Chasse R., Deschenes L., Cote D. (2005)**. Étude sur les teneurs, la distribution et la mobilité du cuivre et du zinc dans un sol fertilisé à long terme avec des lisiers de porcs. *Agrosol*. Volume 16. N° 1: 23-32.
- Giroux M., Rompre M., Carrier D., Audesse P., Lemieux M. (1992)**. Caractérisation de la teneur en métaux lourds totaux et disponibles des sols du Québec. *Agrosol*. Volume 5. N° 2 : 46 - 55.
- H adj miloud S. (2010)**. Morphologie et propriétés des solonchaks références de la mina. Mémoire magister. ENSA, El Harrach, Alger. 110p.
- Hu Y., Schimdhalter U. (2001)**. Effects of salinity and macronutrients levels on micronutrients in wheat. *Journal of plant nutrition*. Germany. Volume 24. N° 2 : 273-281.
- J ackson M. (1965)**. Soil chemical analysis. New Delhi. 498 p.

-
- Juste C. (1995).** Les micropolluants métalliques dans les boues résiduelles des stations d'épuration urbaines. Convention ADEME-INRA. ADEME éd. 209p.
- K abata-pendias A. (2001).** Traces elements in soils and plants. CRC press LLC. 403p.
- Kabata-pendias A. (2004).** Soil-plant transfer of traces elements in environmental issue. Geoderma. N° 122 : 143-149.
- L abri F. (2009).** Distribution spatiale des oligo-éléments (Fe, Mn, Al, Pb) dans la ferme expérimentale de l'ENSA. Mémoire d'ingénieur. INA, El Harrach, Alger. 56p
- Larry M., Shuman G.E. (2005).** Chemistry of micronutrients in soils. Soil Science of Society of America. Madison, Wisconsin. N°8: 293- 307
- Lebourg A., Sterckeman T., Ciesielski H., Proix N. (1996)** . Intérêt de différents réactifs d'extraction chimique pour l'évaluation de la biodisponibilité des métaux en traces du sol. Agronomie, INRA France. N°16 : 201-215.
- Lindsay. (1979).** Chemical equilibria in soils. John Wiley and Sons, Inc.449p.
- Loue A. (1993).** Les oligo-éléments en agriculture, SCPA. 577p.
- M athieu C., Pieltain F. (2003).** Analyse chimique des sols, méthodes choisies. Tec & doc, Lavoisier. 382p.
- Mc lauglin M., Zarcinas B., Stevens D., Kook N. (2000).** Soil testing for heavy metals. International Symposium on Soil and Plant Analysis N°6. Brisbane, Queensland, Australie. Volume 31. N° 11-14: 1661-1700
- M'leyeh A., Srasra E., Cheref A. (2002).** Fixation des métaux lourds par les argiles de la décharge municipale de BorjChekir (SW de Tunis. Institut National de Recherche Scientifique et Technique, B.P. 95- Hammam- Lif 2050, Tunisie. pp. 533-546.
- Nuria R., Mabel S., Jaime B. (2007).** Disponibilidad de cobre, hierro, manganeso, zinc en suelos delno argentine, Ci Suelo (Argentina). Volume 25. N° 1 : 31-42.
- P edro G., Delmas A.B. (1970).** Les principes géochimiques de la distribution des éléments traces dans les sols. Annales Agronomiques 21 : 483-518.
- Pereira B., Sonnet P. (2007).** La contamination diffuse des sols par les ETM en région Wallone, Faculté d'ingénierie agronomique, biologique et environnementale, université catholique de Louvain, 27p.
- Perrono P. (1999).** Les micropolluants métalliques des boues de stations d'épuration urbaine et l'épandage agricole. Mém. D.U.E.S.S., D.E.P, Univ. Picardie, Amiens.
- Q usheng L., Shasha C., Cehui M., Lihua P., Fangjing Y. (2010).** Toxic effects of heavy metals and their accumulation in vegetables grown in a saline soil. Ecotoxicology and Environmental Safety. N° 73: 84-88.
- R ahman S., Vance G., Munn L. (1993).**Salinity induced effects on the nutrient status of soil, corn leaves and kernels. Soil Science and Plant Analysis. Volume 24. N° 17, 18 : 2251-2269.
- Robert N., Dauguest S., Denaix L., Nguyen C., Royer E., Levasseur L., Potin-gautier M., Lespes G., Parat G., Heroult J., Coudure R., Chery P., Devert M., Pouech P. (2011).** Mesure des flux d'éléments traces (Pb, Cd, As, Cu, Zn) dans les sols, végétaux, porcs et lisiers des exploitations porcines du Sud Ouest. Innovations Agronomiques. Volume 17 : 175-190.
-

- Ryan J., Singh M., Yau S. (1998).** Spatial variability of soluble boron in Syrian soils. Soil & Tillage Research. N° 45: 407-417.
- S eilsepour M. (2006).** Study of zinc effects on quantitative and qualitative traits of winter wheat in saline soil conditions. Biaban (Desert journal). Volume 11. N° 2 : 17-23.
- Sposito G. (1989).** The chemistry of soils. Oxford University Press, New York. 277p.
- Subbaiah G., Soma sekhara R., Srini vasa R. (1995).** Micronutrient uptake of cotton genotypes in relation to soil salinity. Journal of Indian Society of Soil Science. Volume 43. N° 4: 645-649.
- T abatabai M., Sparks D. (2005).** Chemical processes in soils, Soil Science of Society of America. Madison, Wisconsin. N°8. 723p.
- Tessier A., Campbell P., Bisson M. (1979).** Sequential extraction procedure for the speciation of particulate traces metal. Analytical Chemistry. N° 51 : 844 – 851.
- Trolard F., Bourrie G., Jaffrezic A. (2002).** Distribution spatiale et mobilité des éléments traces métalliques en région d'élevage intensif. C.R. Acad. Agr. Fr. N° 3, 4, 5: 183 - 199.
- Tyler G., Zohlen A. (1998).** Plants seeds as mineral nutrient resource for seedlings, a comparison of plants from calcareous and silicate soils. Annals of Botany 81 : 445-459.
- W iebe B., Eilers R., Eilers W., Brierley J. (2001).** Salinité du sol, risque de salinisation. L'agriculture écologique durable du Canada, Série indicateurs agro-environnementaux. Rapport N° 2 : 121-126.

ANNEXES

Annexe I - Les différentes formes du fer (mg/kg).

Horizons	Fer total	Fer assimilable	Fe-Oxydes	Fe-MO	Fe-Carbonates
P1H1	3291,805	5,835	1268,107	73,467	6,803
P1H2	3483,853	1,466	1040,332	71,753	7,786
P1H3	3217,926	2,410	1050,569	60,255	2,627
P1H4	3371,117	3,144	1011,086	51,059	6,538
P1H5	3310,523	4,488	1102,801	42,075	1,403
P2H1	3344,418	2,074	611,158	34,671	6,223
P2H2	3243,351	0,148	651,387	69,108	0,000
P2H3	3455,261	3,313	744,686	43,663	0,929
P2H4	3373,956	6,977	891,562	64,566	6,426
P2H5	3321,003	6,682	1113,600	77,952	0,572
P2H6	3426,453	4,065	717,080	85,237	1,213
P2H7	3384,495	6,114	724,939	59,584	1,397
P2H8	3284,304	8,968	529,693	58,830	2,544
P3H1	3542,290	2,923	643,646	57,535	27,990
P3H2-1	3558,744	5,987	650,594	90,258	5,373
P3H2-2	3469,200	7,680	586,800	101,700	4,350
P3H2-3	3501,248	12,107	790,323	200,365	0,000
P3H3	3438,444	10,272	1179,761	163,923	5,303

Annexe II - Les différentes formes du manganèse (mg/kg).

Horizons	Mn total	Mn assimilable	Mn-Oxydes	Mn-MO	Mn-Carbonates
P1H1	252,751	12,668	119,966	16,628	3,740
P1H2	267,472	12,000	113,340	18,625	4,730
P1H3	227,424	9,301	109,757	13,596	10,500
P1H4	240,349	9,091	89,913	17,746	14,630
P1H5	250,580	10,971	106,216	18,077	19,630
P2H1	307,594	9,927	107,865	13,631	4,000
P2H2	217,956	6,556	106,320	14,767	9,150
P2H3	243,398	6,410	107,269	21,057	6,970
P2H4	247,248	4,192	82,498	11,016	9,020
P2H5	218,389	2,908	70,033	11,445	7,270
P2H6	272,393	2,973	110,899	16,077	4,700
P2H7	264,404	5,027	131,581	21,103	6,670
P2H8	170,448	10,621	41,976	14,946	16,860
P3H1	278,656	5,069	141,070	16,794	5,440
P3H2-1	238,846	5,710	130,414	17,499	8,900
P3H2-2	235,800	2,730	114,240	18,600	12,750
P3H2-3	246,371	7,990	125,183	18,765	7,260
P3H3	222,402	10,847	165,074	16,362	11,360

Annexe III - Les différentes formes du zinc (mg/kg).

Horizons	Zn total	Zn assimilable	Zn-Oxydes	Zn-MO	Zn-Carbonates
P1H1	37,489	0,877	7,982	11,791	0,756
P1H2	50,685	0,641	2,443	31,144	0,153
P1H3	27,810	0,649	0,742	15,759	1,700
P1H4	35,492	0,592	0,000	18,057	2,179
P1H5	27,427	1,029	0,000	17,765	2,493
P2H1	61,637	1,067	3,082	16,002	2,519
P2H2	24,217	0,443	0,709	13,290	3,544
P2H3	35,921	0,434	0,000	4,645	3,561
P2H4	32,436	0,949	5,630	19,278	1,989
P2H5	25,984	0,681	0,000	19,488	2,011
P2H6	43,073	0,940	0,000	9,403	1,668
P2H7	76,963	0,279	0,000	14,586	0,931
P2H8	73,776	0,604	0,000	42,930	0,795
P3H1	101,386	0,684	0,000	13,373	1,089
P3H2-1	102,538	0,399	0,000	17,499	0,000
P3H2-2	100,200	0,660	0,000	3,600	0,000
P3H2-3	110,171	0,672	0,236	15,436	0,757
P3H3	101,808	1,667	4,363	14,241	0,152

Annexe IV - Les différentes formes du bore (mg/kg).

Horizons	Bore total	Bore soluble
P1H1	1,446	0,665
P1H2	2,141	0,739
P1H3	2,033	0,705
P1H4	1,879	0,705
P1H5	2,156	0,703
P2H1	2,072	0,629
P2H2	1,760	0,621
P2H3	1,898	0,665
P2H4	2,013	0,606
P2H5	2,043	0,616
P2H6	1,905	0,620
P2H7	2,065	0,639
P2H8	1,919	0,690
P3H1	2,193	0,612
P3H2-1	1,997	0,683
P3H2-2	1,778	0,644
P3H2-3	1,878	0,594
P3H3	1,960	0,633