



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
المدرسة الوطنية العليا للفلاحة  
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE  
EL-HARRACH  
(ALGER)



## THESE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DOCTORAT ES SCIENCE EN SCIENCES  
AGRONOMIQUES

Spécialité : Sciences du sol  
(Pédologie)

### Sujet

**Géochimie et modélisation de la composition  
ionique des sols salés du Chelif**

Présenté par :

Mr. AIT MECHEDAL Mouloud

Devant le jury composé de :

Président du jury :	Mr. DAOUD Y.	Professeur	ENSA, ALGER
Directeur de thèse :	Mr. DJILI K.	Professeur	ENSA, ALGER
Examineurs :	Mr. HARTANI T.	Professeur	Centre universitaire, TIPAZA
	Mr. TOUMI M.	Professeur	université Alger 1, ALGER

## *Dédicaces*

*A mes parents, à qui je dois tous*

*A mon épouse*

*A ma fille*

*A mon frère et ma sœur*

*A toute ma famille.*

*A tous mes amis.*

*A mes collègues de l'université de Bordj Bou Arreridj*

*A tous ceux qui m'ont aidé à élaborer  
ce travail.*

*Je dédie ce modeste travail*

*Mouloud*

## **Remerciements**

Je remercie Dieu de m'avoir donné la force et la patience pour la réalisation de ce travail.

Je remercie **Mr. DAOUD Y.**, professeur au département de science du sol à l'ENSA d'El – Harrach, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury. Aussi, je lui suis très reconnaissant pour l'aide précieuse qu'il m'a prodiguée tout au long de ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude et mes vifs remerciements.

Je remercie **Mr. DJILI K.**, professeur au département science du sol à l'ENSA d'El – Harrach, à qui j'adresse mes remerciements, pour avoir accepté de diriger ce travail, pour son aide, sa disponibilité, ses conseils très utiles, sa patience et ses directives qui m'ont permis de mener à terme ce travail.

Je remercie aussi **Mr. HARTANI T.**, professeur au centre universitaire de Tipaza , et **Mr. TOUMI M.**, professeur à l'université de ALGER 1, je les remercie pour avoir accepté de juger ce travail.

Mes plus profonds remerciements vont également à :

A l'ensemble des enseignants (es) du département de science du sol, qui ont contribué à ma formation.

Sans oublier tous les techniciens et le personnel du département.

## TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
1. LA SALINITE ET LA SODICITE.....	3
2. LES EFFETS DE LA SALINITE ET DE LA SODICITE SUR LE SOL .....	4
2.1. Effets de la salinité et de la sodicité sur la qualité des sols.....	4
2.2. Effets de la salinité sur la biosphère.....	5
3. LA CLASSIFICATION DES SOLS SALES.....	6
3.1. La WRB (2014) .....	6
3.2. LA CPCS (1967).....	6
4. LES PROFILS SALINS.....	7
5. LE BILAN SALIN .....	8
6. LA SALINITE DES SOLS DU BAS-CHELIF.....	10
7. LES MODELES DE CONTROLE DE LA SALINITE DES SOLS.....	11
8. LE SELENIUM DANS LES SOLS SALES .....	13
Conclusion .....	14
CHAPITRE II. MATERIELS ET METHODES .....	15
1. MATERIEL D'ETUDE.....	15
1.1. La zone d'étude .....	15
1.2. Les profils étudiés.....	17
2. METHODES D'ETUDE.....	19
2.1. Approches géochimiques .....	20
2.1.1. Les faciès chimiques .....	20

2.1.2.	Les indices de saturation .....	20
2.1.3.	Simulation de l'évolution de la concentration de la solution du sol .....	21
CHAPITRE III.	RESULTATS ET DISCUSSION .....	23
1.	CARACTERISATION ANALYTIQUE DE LA SOLUTION DES SOLS .....	23
1.1.	La conductivité électrique .....	23
1.2.	Effet de la concentration ionique de la solution du sol sur CE.....	26
1.2.1.	Relation entre CE et la concentration en électrolytes .....	26
1.2.2.	Relation entre CE et $\text{Ca}^{2+}$ .....	28
1.2.3.	Relation entre CE et $\text{Mg}^{2+}$ .....	29
1.2.4.	Relation entre CE et $\text{Na}^{+}$ .....	30
1.2.5.	Relation entre CE et $\text{K}^{+}$ .....	31
1.2.6.	Relation entre CE et $\text{Cl}^{-}$ .....	31
1.2.7.	Relation entre la CE et la concentration en $\text{SO}_4^{2-}$ .....	32
1.2.8.	Relation entre la CE et la concentration en $\text{HCO}_3^{-}$ .....	33
1.2.9.	Relation entre les composantes de la solution du sol .....	34
1.2.10.	La régression multiple entre CE et Les électrolytes .....	34
1.2.11.	Relation entre CE et le SAR et L'ESP .....	35
1.3.	Discussion .....	38
2.	LE FACIES CHIMIQUE.....	39
2.1.	Les résultats du logiciel Diagramme.....	39
2.2.	Synthèse et discussion.....	39
3.	ETAT DE SATURATION DES SOLUTIONS VIS-A-VIS DES MINERAUX .....	41
3.1.	Résultats du test de saturation .....	43
3.2.	Effet de CE sur les indices de saturation (IS) .....	43
3.2.1.	Effet de CE sur IS vis-à-vis de l'aragonite ( $\text{IS}_{\text{aragonite}}$ ) .....	43
3.2.2.	Effet de CE sur IS vis-à-vis de la calcite ( $\text{IS}_{\text{calcite}}$ ) .....	45

3.2.3.	Effet de la CE sur IS vis-à-vis de la dolomite ( $IS_{\text{dolomite}}$ ).....	46
3.3.	Synthèse et discussion.....	47
4.	SIMULATION DES CHANGEMENTS DE LA CONCENTRATION DE LA SOLUTION DU SOL...	48
4.1.	Prédiction de l'évolution de la solution du sol.....	50
4.1.1.	La conductivité électrique.....	50
4.1.2.	La concentration en $Ca^{2+}$ .....	50
4.1.3.	La concentration en $Mg^{2+}$ .....	51
4.1.4.	La concentration en $Na^{+}$ .....	52
4.1.5.	La concentration en $K^{+}$ .....	53
4.1.6.	La concentration en $Cl^{-}$ .....	54
4.1.7.	La concentration en $SO_4^{2-}$ .....	55
4.1.8.	La concentration en $HCO_3^{-}$ .....	56
4.2.	L'écart de prédiction du model.....	57
4.2.1.	Relation entre CEo et les écarts absolus des paramètres étudiés.....	59
4.2.1.1.	Relation entre CEo et $CE_o-CE_c$ .....	59
4.2.1.2.	Relation entre CEo et $Mg^{2+}_o-Mg^{2+}_c$ .....	60
4.2.1.3.	Relation entre CEo et $Na^{+}_o-Na^{+}_c$ .....	61
4.2.1.4.	Relation entre CEo et $SO_4^{2-}_o-SO_4^{2-}_c$ .....	62
4.2.2.	Analyse statistique des écarts de prédiction du model.....	63
4.2.3.	Les classes de prédiction.....	65
4.3.	Discussion.....	66
5.	LE SELENIUM DANS LE SOL.....	69
5.1.	Les teneurs totales en sélénium.....	69
5.2.	Distribution de la salinité et du sélénium dans les profils.....	69
5.3.	Analyse statistique.....	71
5.3.1.	Statistiques descriptives.....	71

5.3.2. Relation CE – Se.....	73
5.3.3. L’ajustement curvilinéaire.....	73
5.4. Discussion .....	74
CONCLUSION .....	76
REFERENCES .....	78

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Évolution des profils salins en fonction du temps (Daoud, 1990). .....	9
Figure 2 : Evolution de la composition chimique de la solution du sol en fonction de sa concentration (Daoud, 1990). .....	9
Figure 3 : Carte des sols d'Algérie (extrait de la carte des sols du monde au 1/5.000.000 de FAO, 2005) .....	10
Figure 4 : Présentation de la station d'El Hamadna .....	15
Figure 5 : Carte des sols de la station d'El Hamadna (Durand, 1956) .....	16
Figure 6 : Carte actualisée de localisation des profils de la station d'El Hamadna .....	18
Figure 7 : Histogramme des fréquences des classes de CE .....	24
Figure 8 : Effet de l'augmentation de la somme des cations sur la CE .....	27
Figure 9 : Effet de l'augmentation de la somme des anions sur la CE .....	28
Figure 10 : Effet de l'augmentation de la concentration du $\text{Ca}^{2+}$ sur la CE .....	29
Figure 11 : Effet de l'augmentation de la concentration du $\text{Mg}^{2+}$ sur la CE .....	30
Figure 12 : Effet de l'augmentation de la concentration du $\text{Na}^+$ sur la CE .....	31
Figure 13 : Effet de l'augmentation de la concentration de $\text{Cl}^-$ sur la CE .....	32
Figure 14 : Effet de l'augmentation de la concentration de $\text{SO}_4^{2-}$ sur la CE .....	33
Figure 15 : Relation entre le SAR et la CE .....	35
Figure 16 : Histogramme des fréquences des classes de sodicité .....	36
Figure 17 : Faciès chimiques des solutions dont $\text{CE} \leq 14$ dS/m .....	40
Figure 18 : Faciès chimiques des solutions dont $\text{CE} > 14$ dS/m .....	41
Figure 19 : Effet de CE sur $\text{IS}_{\text{aragonite}}$ .....	45
Figure 20 : Effet de CE sur $\text{IS}_{\text{calcite}}$ .....	46
Figure 21 : Effet de CE sur $\text{IS}_{\text{dolomite}}$ .....	46
Figure 22 : Relation entre $\text{CE}_o$ et $\text{CE}_c$ .....	50
Figure 23 : Relation entre $\text{Ca}^{2+c}$ et $\text{Ca}^{2+o}$ .....	51
Figure 24 : Relation entre $\text{Mg}^{2+c}$ et $\text{Mg}^{2+o}$ .....	52
Figure 25 : Relation entre $\text{Na}^{+o}$ et $\text{Na}^+c$ .....	53
Figure 26 : Relation entre $\text{K}^{+o}$ et $\text{K}^+c$ .....	54
Figure 27 : Relation entre $\text{Cl}^{-o}$ et $\text{Cl}^-c$ .....	55
Figure 28 : Relation entre $\text{SO}_4^{2-o}$ et $\text{SO}_4^{2-c}$ .....	56

Figure 29 : Relation entre $\text{HCO}_3^- \text{o}$ $\text{HCO}_3^- \text{c}$ .....	56
Figure 30 : Variation des écarts de prédiction du model.....	59
Figure 31 : Relation entre la $\text{CEo}$ (dS/m ) et $\text{CEo}-\text{CEc}$ (ds/m).....	60
Figure 32 : Relation entre la $\text{CEo}$ (dS/m ) et $\text{Mg}^{2+} \text{o}-\text{Mg}^{2+} \text{c}$ (meq/l) .....	61
Figure 33 : Relation entre la $\text{CEo}$ (dS/m ) et $\text{Na}^+ \text{o} -\text{Na}^+ \text{c}$ (meq/l) .....	62
Figure 34: Relation entre la $\text{CEo}$ (dS/m ) et $\text{SO}_4^{2-} \text{o}- \text{SO}_4^{2-} \text{c}$ (meq/l).....	63
Figure 35: L'histogramme des fréquences des classes des teneurs en Se total .....	71
Figure 36 : Distribution de CE et Se dans les profils.....	72
Figure 37 : Relation entre Se et CE.....	74

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Evolution du niveau de salinité des sols entre 1956 et 2012 (Ait Mechedal, 2014) .....	11
Tableau II : Moyennes des températures et des précipitations de la station de El Hamadna pour la période 1985-2004.....	17
Tableau III : Caractéristiques de la solution des sols.....	25
Tableau IV : Matrice de corrélation entre les composantes de la solution du sol .....	34
Tableau V : Valeurs du SAR et de l'ESP des échantillons .....	37
Tableau VI : Indices de saturation vis-à-vis des minéraux .....	44
Tableau VII : Résultats du logiciel ExtractChem .....	49
Tableau VIII : L'écart de prédiction du model pour les différents paramètres.....	58
Tableau IX : Statistiques descriptives des écarts absolus de prédiction du model .....	63
Tableau X : Classes de prédiction du model.....	65
Tableau XI: Les teneurs totales en Se.....	70
Tableau XII : Statistiques descriptives des teneurs de sélénium total.....	71
Tableau XIII : Coefficient de corrélation entre la CE et Se .....	73

### INTRODUCTION

L'histoire a enregistré plusieurs occurrences majeures de salinité et de ses effets néfastes sur les sociétés humaines, mais la plus ancienne et peut-être la plus grave, est survenue durant la période 2400-1700 av. J.-C. dans la Mésopotamie (Jacobsen et Adams 1958). L'étendue mondiale des terres affectées par les sels solubles serait de 1128 Mha. Les sols légèrement salés en représentent 65%, ils sont suivis par 20% de sols modérément salés, et 15% de sols fortement à extrêmement salés (Wicke *et al.* 2011).

Les sols d'Algérie couvrent une large gamme de salinité qui varie entre 0,1 et 99 dS/m (Touaf, 2002) dans le nord et entre 0,3 et 195 dS/m dans la zone saharienne (Berkal, 2006). Le taux de sodium échangeable dans les sols du nord de l'Algérie varie entre 0,2 et 57,81% (Touaf, 2002). La sodicité aurait un caractère azonal bien que l'isohyète 450 mm constitue la limite supérieure des fortes accumulations du sodium sur le complexe adsorbant (Djili, 2000). La solution des sols est caractérisée par un faciès chimique chloruré-sodique. Les sols sont saturés vis-à-vis de la calcite comme le montrent les travaux de Djamai (2007) sur les sols salés du lac Fetzara en zone humide et ceux de Daoud (1993) et Hadj Miloud *et al.* (2018) sur les sols salés du Bas-Chelif en zone semi-aride.

Des concentrations élevées d'éléments traces dans les sols et les eaux souterraines dans les zones irriguées peuvent se produire simultanément au processus de salinisation (Deverel *et al.*, 2012). Le sélénium fait partie des éléments désignés par Environmental Protection Agency (1986) in Deverel *et al.* (2012) en tant que polluant prioritaire associé à l'agriculture. Les plantes sont la principale source de sélénium alimentaire, mais son essentialité pour les plantes est encore controversée (Gupta *et Gupta*, 2017).

Les sols du Bas-Chelif couvrent une large gamme de salinité qui s'étale de la classe des sols non salés jusqu'à la classe des sols très salés. Ces derniers présentent un caractère de sodicité dominant (Daoud, 1993 ; Ait Mechedal, 2014 ; Saoud, 2014). Les eaux souterraines de la plaine du Bas-Chelif ont une salinité élevée (INSID, 2008). La nappe est profonde avec un niveau piézométrique à plus de 7 m dans la majeure partie de la plaine (Daoud, 1993).

Le bassin de l'oued Cheliff (Algérie) a été évalué au moyen de séries temporelles annuelles de précipitations observé sur 150 pluviomètres sur la période 1970-2018. Les résultats sont témoin d'une forte variabilité typique du bassin méditerranéen, avec une

tendance générale négative mise en évidence pour les précipitations annuelles (Achite et al., 2021).

L'irrigation provoque une augmentation de la salinité et de l'alcalinité du sol (Daoud, 1993). De même, l'évaporation engendre une augmentation de la salinité par concentration de la solution du sol (Daoud, 1993 ; Ait Mechedal, 2014) ce qui provoque une modification de la composition chimique des solutions du sol (Gouaidia et al., 2012).

Les travaux de Abdelkrim et al., (2021) sont basés sur un modèle de simulation de la salinité du sol SALTIRSOIL dans la plaine de Bas-Chelif. Les travaux ont pour but de rechercher en premier une reprogrammation des irrigations pour éviter le stress hydrique, et deuxièmement, simuler les effets sur le déficit hydrique et la salinité du sol en utilisant des taux d'irrigation plus élevés. D'après Abdelkrim et al., (2021) la modélisation par le logiciel SALTIRSOIL peut être d'une utilité remarquable pour économiser l'eau et contrôler la salinité des sols de la plaine du Bas Chelif.

C'est dans ce sens que l'objectif de cette étude est de tester la fiabilité de la simulation des changements des concentrations des ions dans les sols du Bas-Chelif sans recours à des analyses pour faciliter le suivi. Cette évolution chimique a fait l'objet de plusieurs modélisations mathématiques par la mise en œuvre de l'approche géochimique (Parkhurst et Appelo, 2013) ou physico-chimique (Suarez et Taber, 2007). Il s'agit également de déterminer en milieu salé les teneurs en sélénium qui est un micronutriment essentiel pour les humains et les animaux, mais qui entraîne une toxicité lorsqu'il se trouve en quantités excessives dans les plantes (Gupta et Gupta, 2017).

Ainsi, le présent travail porte sur :

- La caractérisation géochimique de l'état de salinité des sols du périmètre d'El Hamadna situé dans le Bas-Chelif.
- L'évaluation de la fiabilité de la simulation des changements des concentrations des ions dans les sols du périmètre d'El Hamadna.
- La détermination de la teneur totale du sélénium et sa relation avec la salinité dans ces sols.

Le présent document est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre porte sur une étude bibliographique. Le second chapitre présente le matériel et les méthodes d'étude utilisés. Les résultats obtenus sont présentés et discutés dans le troisième chapitre.

## CHAPITRE I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

La salinité est la quantité de sels dans l'eau ou le sol. La sodicité est la quantité de sodium échangeable dans un sol (Chesworth, 2007). Selon Webb (2011), la salinité primaire est la salinité qui se produit naturellement dans les sols. La salinité secondaire fait référence à la salinité qui résulte des activités humaines.

Les zones où la salinité est clairement influencée par les activités humaines (salinité secondaire) sont souvent associées à des changements assez rapides dans leur environnement.

La salinité et la sodicité des sols ouvriront ce chapitre. La salinité des sols du Bas-Chelif sera ensuite présentée. Enfin, la dernière partie portera sur le sélénium dans le sol.

### 1. LA SALINITE ET LA SODICITE

La salinisation est le processus par lequel un sol s'enrichit en sels solubles, l'étape essentielle étant l'évaporation de l'eau salée. La salinité est la quantité de sels dans l'eau ou le sol. Elle peut être estimée en termes de conductivité électrique (CE) et exprimée en dS/m (Chesworth, 2007).

Les principaux cations présents dans les solutions salines du sol sont  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{K}^+$ , et les principaux anions sont  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  et  $\text{NO}_3^-$ . Les autres constituants contribuant à la salinité dans les sols et les eaux sont notamment B,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{SiO}_2$ , Mo,  $\text{Ba}^{2+}$ , et  $\text{Al}^{3+}$ . Ces constituants sont exprimés en mmol / L, meq / L ou en mg / L (Tanji, 2002).

Les sels solubles sont les sels plus solubles dans l'eau que le gypse ( $2,5\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ). Les sels les plus fréquents dans les sols des régions arides et semi- arides sont les chlorures et les sulfates de sodium ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), les sulfates de magnésium ( $\text{MgSO}_4$ ), et à un moindre degré les carbonates de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) (Halitim, 1988).

La sodicité est la quantité de Na échangeable dans un sol. Un excès de la quantité de Na provoque des problèmes physiques dans le sol. Deux indices sont utilisés pour indiquer la sodicité du sol, le pourcentage de sodium échangeable (ESP) et le sodium adsorption ratio (SAR) (Chesworth, 2007).

L'ESP est calculé par la formule suivante (USSL, 1954) :

$$\text{ESP \%} = (\text{Na}/\text{CEC}) * 100$$

CEC : Capacité d'échanges cationiques

Na<sup>+</sup> et CEC sont exprimés en Cmol(+) /Kg de terre.

Ce paramètre caractérise l'état de sodicité du complexe adsorbant du sol.

Les sols sont considérés sodiques quand le taux de sodium échangeable est supérieur à 15 % (USSL, 1954).

Le SAR est une caractéristique de la solution du sol. Il se calcule selon la formule suivante :

$$\text{SAR} = \text{Na} / \sqrt{(\text{Ca} + \text{Mg})/2}$$

Na<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup> et Mg<sup>++</sup> sont les concentrations de la solution du sol exprimées en meq/l.

Il existe une relation entre ESP et le SAR (USSL, 1954) :

$$\text{ESP} = 100 (-0,0126 + 0,01475 \times \text{SAR}) / 1 + (-0,0126 + 0,01475 \times \text{SAR})$$

Cette relation permet d'estimer le taux de sodium échangeable à partir du SAR de la solution du sol.

## **2. LES EFFETS DE LA SALINITEET ET DE LA SODICITE SUR LE SOL**

Les effets de la salinité sont multiples et agissent à différents niveaux sur la dégradation des qualités physico-chimique et biologique du sol.

### **2.1. Effets de la salinité et de la sodicité sur la qualité des sols**

La dégradation des sols par la salinité et la sodicité affecte profondément la qualité de l'environnement. Par exemple, le comportement dispersif des sols sodiques favorise la formation des croûtes à la surface, ce qui conduit à l'engorgement, au ruissellement et à l'érosion (Sumner *et al.*, 1998 ; in Sparks, 2003).

La salinité a un impact sérieux sur les fonctions du sol, comme sa capacité à agir en tant que tampon et filtre contre les polluants, sa participation aux cycles de l'eau et de l'azote et ses services écosystémiques pour soutenir la santé de l'environnement et la biodiversité (Vargas et al., 2018).

L'augmentation du taux de sodium échangeable en présence d'un faible niveau de salinité entraîne une dégradation de la structure par une dispersion physico-chimique des agrégats (Chesworth, 2007). Les principaux processus responsables de la dégradation physique sont le gonflement des argiles à des niveaux relativement élevés et leur dispersion sur toute la plage de ESP. Lorsque la concentration totale des électrolytes est inférieure à la concentration critique de floculation, les argiles se dispersent spontanément à certaines valeurs d'ESP. La concentration totale en électrolytes de la solution favorise la floculation des minéraux argileux (Sumner, 1993).

### **2.2. Effets de la salinité sur la biosphère**

La salinité des sols a un impact sur la productivité agricole en perturbant les processus d'absorption de l'azote, le développement et la croissance des plantes (Vargas et al., 2018). La présence de Na affecte négativement d'une manière significative le rendement, par la diminution du poids des fruits (Semiz et Suarez, 2015).

L'augmentation de la concentration en sels induit un stress osmotique chez les microorganismes. Les microorganismes se dessèchent et meurent, les spores ne seraient pas tuées, mais ne seraient pas capables de germer (Meyer et al., 2004). Pour résister au stress salin, la plupart des organismes vivants, dont les bactéries, produisent les osmolytes comme étant un moyen de lutte contre les différents stress de l'environnement comme la salinité (Yancey, 2005). Plusieurs travaux montrent l'effet négatif de la salinité sur l'activité microbienne du sol (Iwai et al., 2012 ; Baumann et Marschner, 2013). La tolérance des bactéries à la salinité est variable. Selon Rousk et al. (2011), Il n'y pas de relation entre la salinité du sol in situ et la tolérance au sel des communautés bactériennes du sol.

L'augmentation de la salinité entraîne une diminution du stock du carbone organique (Setia et al., 2013). La perte de la matière organique est moins importante dans les sols salés-sodiques que dans les sols sodiques à cause d'une accumulation de la matière organique moins dégradée (Mavi et al., 2012). Mallouhi (1989) montre que l'augmentation de la salinité augmente le rapport acides fulviques/acides humiques. Donc, l'augmentation

de la salinité diminue les phénomènes de polycondensation et favorise la formation des molécules à poids faible et mobile. Ces particules migrent en profondeur en période humide et en période sèche l'évaporation provoque la remontée de ces produits et leur polymérisation physicochimique.

### 3. LA CLASSIFICATION DES SOLS SALES

En générale, la classification des sols est un regroupement des sols ayant des propriétés morphologiques et analytiques similaires. Les critères de classification des sols salés varient en fonction des systèmes de classification. Parmi ces classifications, nous évoquerons la World Reference Basis (WRB) qui est une classification internationale de FAO basée sur des critères morpho-analytiques et la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols (CPCS) qui est une classification française basée sur des critères morpho-pédogénétiques.

#### 3.1. La WRB (2014)

Ce système international répertorie les sols salés dans deux groupes de sols de référence :

*Les Solonchaks* sont développés dans les régions arides et semi-arides, notamment dans les régions où les eaux souterraines atteignent le solum, avec une végétation d'herbes et / ou d'herbes halophytes, et dans les zones d'irrigation mal gérées. Les Solonchaks sont tous les sols ayant un horizon salique débutant dans les 50 cm de la surface du sol.

-*Les Solonetz* sont généralement associés à des terrains plats dans un climat chaud, avec des étés secs, ou avec des anciens dépôts côtiers contenant une forte proportion de sodium. Les Solonetz sont tous les sols ayant un horizon natrique débutant dans les 100 cm de la surface du sol.

#### 3.2. La CPCS (1967)

Cette classification regroupe les sols salés dans la classe des sols sodiques. Les sols sodiques sont des sols dont l'évolution est dominée :

- Soit par la présence de sels solubles (chlorures, sulfates, carbonates, bicarbonates ... de sodium et/ ou de magnésium) dont la teneur élevée peut les rendre apparents à l'examen visuel et provoque une modification importante de la végétation. La conductivité électrique de leur extrait de pâte saturée est supérieure à 7 dS/m à 25°C. Ce chiffre doit intéresser l'ensemble du profil pendant une partie de l'année.

- Soit par la présence de sodium échangeable (et/ou de magnésium) avec apparition d'une structure massive, diffuse, et une compacité élevée. Le sodium occupe plus de 10 % de la capacité d'échange cationique.

Cette classe est subdivisée en deux sous-classes :

*-Sous-classe des sols sodiques à structure non dégradée* : sol riche en sels solubles de sodium (et/ou de magnésium) où cations et anions s'équilibrent. La structure du sol n'est pas dégradée.

*-Sous-classe des sols sodiques à structure dégradée, profil A (B) C ou A B C* : la présence de sodium échangeable (et/ou de magnésium) entraîne la modification des propriétés physiques des minéraux argileux.

#### 4. LES PROFILS SALINS

Selon Hanson et al. (2006), comme les sels solubles dans le sol se déplacent avec l'eau, la répartition du sel soluble dans le sol est déterminée par le flux d'eau à travers le sol. Par exemple, le déplacement de l'eau vers le bas dans un sol par infiltration transporte les sels solubles à partir des horizons de surface vers les horizons de profondeur. Selon Servant (1976), les principaux types de profils salins sont les suivants :

*-Le profil de type A* : Le gradient de salinité est orienté vers la surface où le maximum de salinité s'observe. Ce type de profil de distribution ascendant s'observe à la suite d'une saison sèche qui provoque une évaporation et une concentration des sels dans la partie supérieure du sol. Il peut être favorisé également par la présence d'une nappe salée peu profonde.

*-Le profil de type B* : Le maximum de salinité est localisé au niveau de la partie médiane du profil. Ce profil convexe résulte d'une phase de désalinisation des profils de type A.

-Le profil de type C : Le maximum de salinité se localise au niveau de la partie supérieure et au niveau de la base du profil. Ce type de profil caractérise une phase de resalinisation des profils.

-Le profil de type D : Le gradient de salinité est descendant. Le maximum de salinité se situe à la base du profil. Ce type de distribution est observé dans les sols qui présentent une bonne lixiviation des sels et une nappe profonde.

## 5. LE BILAN SALIN

Le bilan salin est la somme de tous les intrants et produits du sel pour un volume de sol défini pendant une période donnée (équation 01). Si les sels sont conservés, la différence entre les entrées et les sorties totales doit être égale à la variation de la teneur en sel de la zone de sol surveillée (Hillel, 2000).

$$\Delta Ms = \Delta w(VCr + ViC + VgCg - VdCd) + Ma - Mc \quad (01)$$

$\Delta Ms$  : est le changement de masse de sel dans le sol

$\Delta w$  : la densité d'eau

$V_r, V_i, V_g, V_d$  : le volume des précipitations, d'irrigation, de nappe, et de drainage

$C_r, C_i, C_g, C_d$  : les concentrations de sel (précipitations, d'irrigation, de nappe, et de drainage)

$Ma, Mc$  : les masses de sels ajoutés en agriculture et éliminés par les cultures,

L'intensité de la salinisation varie au cours du temps. Daoud (1990) a montré que la salinité augmente avec l'irrigation dans les sols du Haut-Chelif, en particulier au niveau de la base du profil. Le profil s'est "salinisé" beaucoup plus en surface (environ 2 dSm) qu'en profondeur (moins de 1 dSm environ), après des irrigations successives (figure 1). Cette évolution de la salinité serait due à une irrigation sans drainage qui engendre un bilan salin positif dans le profil.

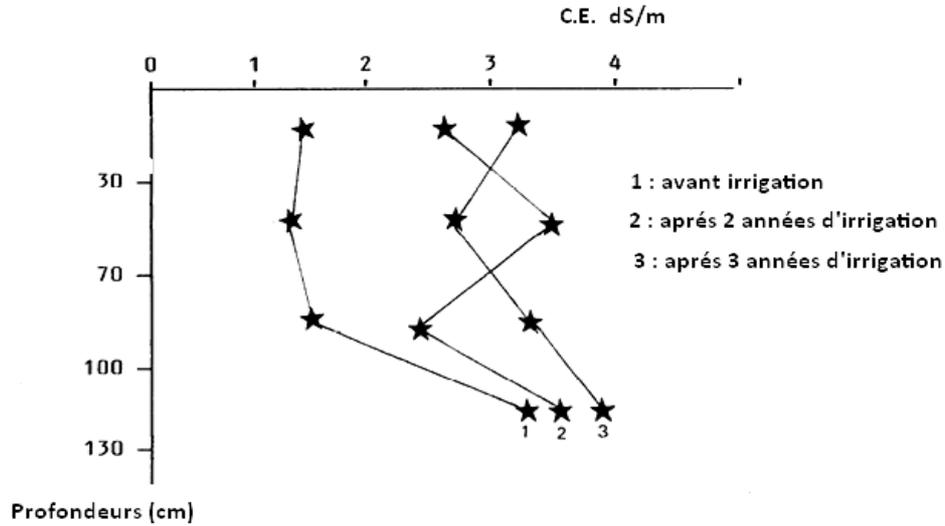


Figure 1 : Évolution des profils salins en fonction du temps (Daoud, 1990).

L'évolution de la salinité entraîne une variation de la composition chimique de la solution du sol qui varie en fonction de la concentration. Par ailleurs, l'augmentation de CE engendre généralement une augmentation de la concentration en  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  (Daoud, 1990). Pour les autres ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ), l'évolution n'est pas toujours proportionnelle à CE (figure2) (Daoud, 1990). Le comportement du potassium est indépendant de la salinité (Ait Mechedal et al., 2017).

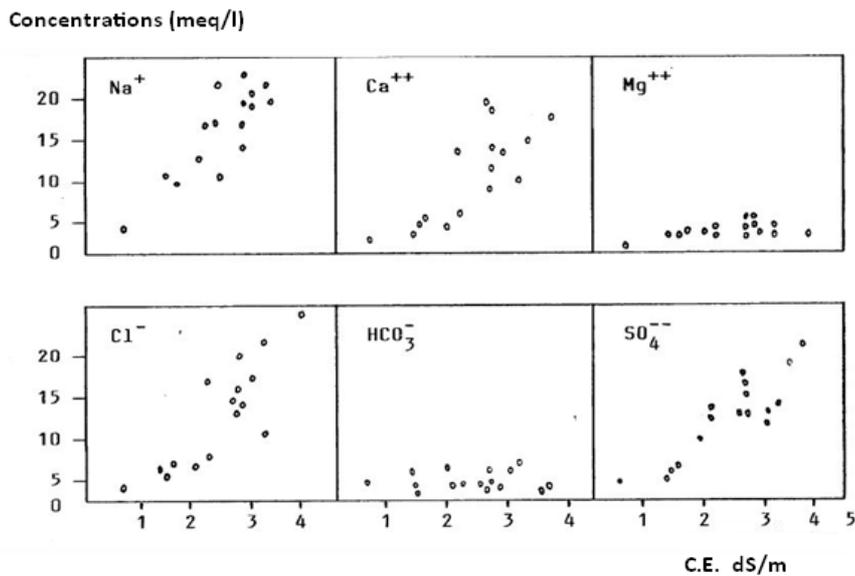


Figure 2 : Evolution de la composition chimique de la solution du sol en fonction de sa concentration (Daoud, 1990).

6. LA SALINITE DES SOLS DU BAS-CHELIF

Selon la carte des sols de FAO (2005), les sols salés d’Algérie sont essentiellement des Solonchaks et ils sont préférentiellement localisés dans les bioclimats arides et semi- arides (figure 3). Les eaux d’irrigation en régions arides du Maghreb sont de qualité médiocre, riches en chlorures mais aussi en sulfates (Halitim, 2011).

Les eaux souterraines de la plaine du Bas-Chelif ont une salinité élevée. Elles sont classées dans le diagramme de l’USSL (1954) en C3S1 (18,4 %), C5S3 (12,2 %) et C5S4 (12,2 %) qui indiquent des risques élevés de salinisation et de sodisation des sols. Les niveaux de salinité rencontrés dans les nappes sont souvent supérieurs à 5 dS/m (INSID, 2008).

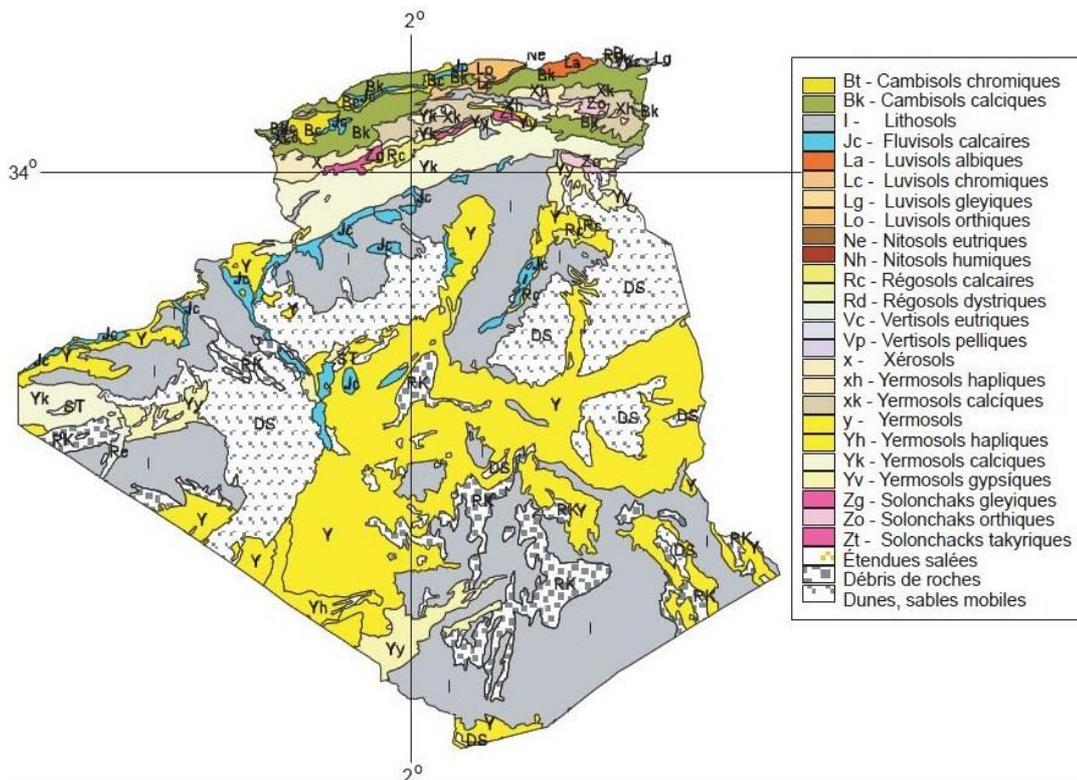


Figure 3 : Carte des sols d’Algérie (extrait de la carte des sols du monde au 1/5.000.000 de FAO, 2005)

Les sols de Bas-Chelif couvrent une large gamme de salinité, ils s’étalent de la classe non salée jusqu’à la classe très salée. Ces derniers présentent un caractère de sodicité dominant (Ait Mechedal 2014 ; Saoud, 2014). D’après Laoufi (2010) et Ait Mechedal (2014), le faciès chimique dominant dans les sols salés des plaines du Chelif est de type chloruré

sodique, et à un degré moindre, de faciès chloruré calcique et sulfaté sodique. Les tests de saturation vis-à-vis des minéraux montrent que les solutions sont sursaturées vis-à-vis de l'hydromagnésite, la dolomite, la calcite et la magnésite.

L'évolution temporelle de la salinité des sols entre 1956 et 2012 dans la station de El Hamadna située dans le Bas-Chelif est variable selon les profils et les horizons. La comparaison des profils salins révèle la présence de trois situations :

- La salinité a augmenté dans certains profils par rapport à 1956.
- La salinité a diminué en surface et elle a augmenté en profondeur en 2012 par rapport à 1956.
- La salinité a diminué dans tout le profil en 2012 par rapport à 1956.

Cette évolution de la salinité des sols sur un épisode de 57 ans est liée à l'efficacité du réseau de drainage et à la topographie (Ait Mechedal, 2014).

Selon Ait Mechedal (2014), trois profils présentent une désalinisation qui se produit à une vitesse comprise entre 0,13 et 0,27 dS/m par année. Deux profils ont enregistré une salinisation entre 1956 et 2012, cette augmentation de la salinité s'est produite à une vitesse de 0,06 dS/m par année (tableau I).

Tableau I. Evolution du niveau de salinité des sols entre 1956 et 2012 (Ait Mechedal, 2014)

Profils	CE moyenne du profil (dS/m) (1956)	CE moyenne du profil (dS/m) (2012)	L'écart de CE entre les deux périodes CE (dS/m)	Variation de CE (dS/m/année)
B163	26,75	11,43	-15,32	-0,27
A495	30,10	20,07	-10,04	-0,18
B217	13,35	5,86	-7,49	-0,13
A567	10,30	13,74	3,44	0,06
A503	13,46	16,99	3,53	0,06

## **7. LES MODELES DE CONTROLE DE LA SALINITE DES SOLS**

Selon Kanzari et al. (2016), « Le recours aux modèles mathématiques pour décrire les processus étudiés en sciences du sol est devenu courant. Le but essentiel du modèle est la prévision à travers la multiplication des scénarii simulés. C'est d'ailleurs, à travers la précision de la prévision qu'on peut juger la validité du modèle. Quand les prévisions sont

confirmées par l'expérimentation, le modèle est considéré représentatif. Cela ne signifie pas forcément que les lois mathématiques utilisées reflètent les processus impliqués dans le phénomène étudié mais seulement que le modèle est capable de fournir, avec la précision souhaitée, des résultats conformes aux valeurs observées ».

Plusieurs modèles ont été proposés pour le suivi de la salinité du sol, parmi eux :

**-SMSS2** (Lahlou et al., 1998) : C'est un modèle de simulation du mouvement des solutés dans le sol pour des différentes doses d'eau d'irrigation et pour chaque horizon. Le modèle prend en considération les équilibres physico-chimiques et les échanges ioniques entre la solution du sol et le complexe adsorbant. Il est basé sur le modèle d'équilibration chimique présenté par Laudelout et al. (1994), Laudelout et Chiang (1995) in Lahlou et al. (1998).

**-SaltMod** ( Oosterbaan et al., 2002) : C'est un programme pour la prédiction des aspects hydrologiques et de salinités dans les terres irriguées, sous différentes conditions géohydrologiques, et de gestion de l'eau. Selon les données entrées, la prédiction se fait pour chaque saison de n'importe quelle année pendant n'importe quel nombre d'années. Le model utilise les bilans salin et hydrique du sol.

**-UNSATCHEM-2D** (Simunek and Suarez, 1993) : C'est un programme pour la modélisation de l'équilibre chimique des ions majeurs. Le modèle est destiné à la prévision de la chimie des ions majeurs et des flux d'eau et de soluté pour les sols dans des conditions transitoires. Étant donné que la chimie de la solution dans la zone non saturée est considérablement influencée par les variations de la teneur en eau, de la température et des concentrations de CO<sub>2</sub> dans le gaz du sol, toutes ces variables sont également calculées par le modèle. Le modèle tient compte des réactions chimiques à l'équilibre entre ces composants telles que la complexation, l'échange de cations et la précipitation-dissolution.

**-ExtractChem** : D'après Suarez et Taber (2007), le logiciel ExtractChem est conçu pour prédire l'évolution de la conductivité électrique (CE), les concentrations ioniques et la pression osmotique (PO) d'une solution de sol à une teneur en eau souhaitée en fonction d'une composition ionique connue. D'après les travaux de Callaghan et al. (2016), dans l'évaluation de quelques paramètres du logiciel Excractchem, ce model présente des incertitudes de simulation. L'incertitude dans le calcul de la CEC est égale  $\pm 7,2\%$ , , et pour le SAR elle est de  $\pm 3,2\%$ .

## 8. LE SELENIUM DANS LES SOLS SALES

Du point de vue géochimique, les oligoéléments sont des métaux dont la teneur totale dans les sols n'excède pas 0,1% (Zovko et Romić, 2011). Le sélénium est un élément non-métallique. Il se présente dans le sol sous formes de séléniure ( $\text{Se}^{2-}$ ), de sélénite ( $\text{Se}^{4+}$ ), de sélénate ( $\text{Se}^{6+}$ ), et de sélénium organique. La spéciation du sélénium dans les sols est régie par les conditions d'oxydoréduction et le pH (Elrashidi et al., 1987). Le sélénium est nutritionnellement essentiel en petites quantités, mais à des doses plus élevées, il provoque des maladies et des effets indésirables potentiels chez les humains (Santos et al., 2015).

La concentration maximale admissible dans les sols utilisés en agriculture est de l'ordre de 5 mg de Se / kg (EPA (1995) in Hazelton et Murphy (2007)). Sa teneur totale moyenne dans les sols est de l'ordre de 0,44 mg / kg.

Le sélénium du sol peut être hérité du matériel parental, il peut provenir des dépôts atmosphériques et des sources anthropiques comme les pulvérisations foliaires, le traitement des semences et des engrais (Kabata-Pendias, 2011).

Les teneurs en sélénium des sols d'Algérie sont variables, ils sont de l'ordre de 2,21 mg / kg dans la région de Tiaret et de 6,23 mg / kg dans la région du Khroub (Beladel et al., 2013). Dans les sols salés, l'évolution de l'état de la salinité du sol affecterait la concentration totale en sélénium, les sols les plus salés présentent les plus fortes teneurs en sélénium (Bañuelos et al., 2013). Par ailleurs, l'irrigation avec une eau saline engendre une augmentation de la teneur en sélénium du sol (Centofanti et Banuelos, 2015).

Le sélénium a un impact sur l'absorption du soufre par l'interférence avec les mécanismes de régulation intrinsèques. À l'intérieur des cellules, le sélénate peut accéder à la voie d'assimilation du sulfate et influencer la production de composés organiques qui sont d'une importance vitale dans les réponses des plantes aux conditions de stress biotiques et abiotiques.

Le sélénium peut également modifier l'absorption de certains micro-éléments comme le molybdène, qui fonctionne comme un cofacteur de l'enzyme nitrate réductase. Par conséquent, le sélénium à des doses élevées peut interférer avec l'assimilation de l'azote, provoquant une diminution du niveau de N-composés ayant des fonctions structurelles et / ou régulatrices (Schiavon et al., 2017).

### **Conclusion**

L'accumulation des sels solubles entraîne une salinisation du sol. La salinisation provoque des effets négatifs sur l'environnement, la biosphère du sol et l'agriculture.

Les sols salés du Bas-Chelif couvrent une large gamme de salinité engendrant une sodisation du complexe adsorbant. La salinité évolue dans l'espace et dans le temps, cette évolution entraîne une évolution de la composition de la solution du sol qui nécessite un suivi continu.

CHAPITRE II. MATERIELS ET METHODES

1. MATERIEL D'ETUDE

1.1. La zone d'étude

Ce travail est réalisé sur des échantillons provenant des sols du périmètre d'El Hamadna situé dans la plaine du Bas Chelif (figure 4). Cette plaine fait partie de la vallée de l'oued Chelif qui est située dans la partie Nord-Ouest de l'Algérie. Son extension couvre environ 50 km de longueur sur une largeur variant de 6 km à l'Est à plus de 20 km à l'Ouest. Cette plaine se trouve à une altitude moyenne de 70 m, et elle couvre une superficie de l'ordre de 65 000 ha (Douaoui , 2005).

La parcelle étudiée est localisée dans le périmètre d'El Hamadna qui est situé dans la partie occidentale de la plaine. Ce périmètre a une superficie d'environ de 250 ha, et pour l'essentiel, il fait partie de la station de recherche de l'INRA (Douaoui, 2005).

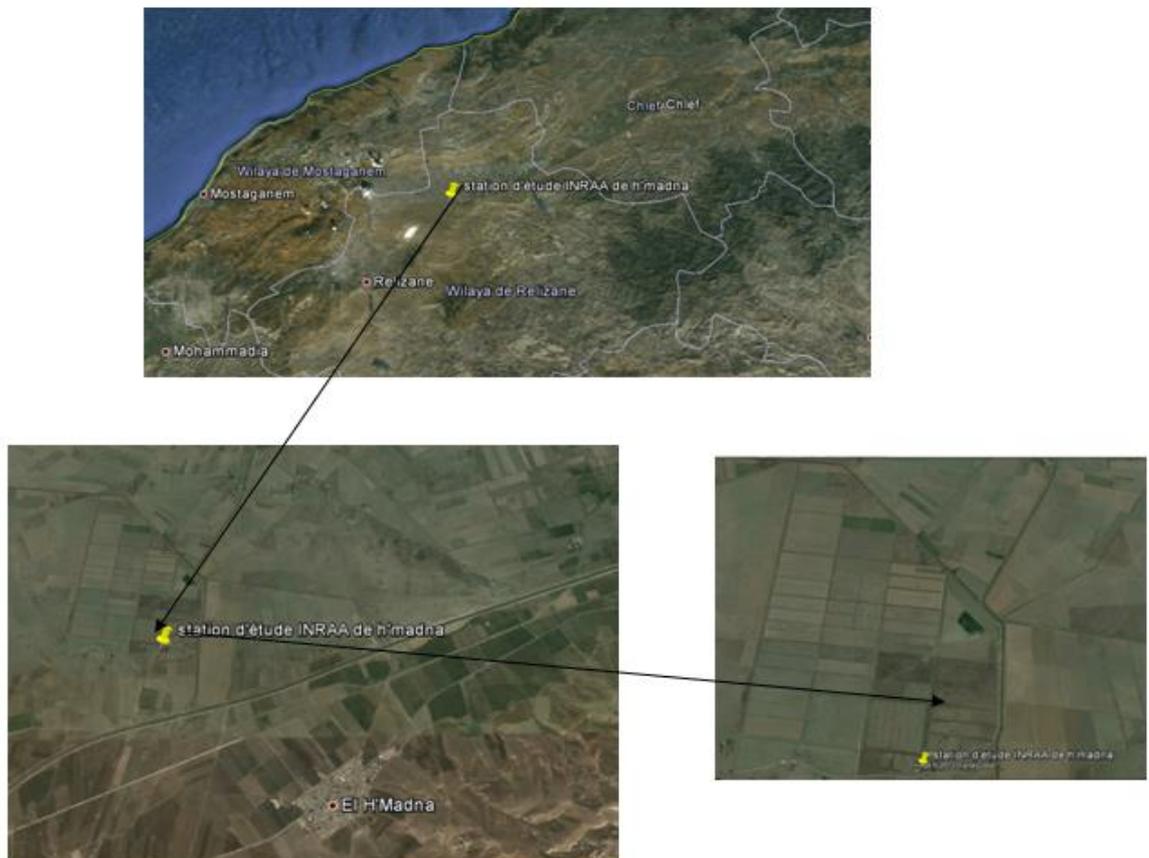


Figure 4 : Présentation de la station d'El Hamadna

La parcelle est caractérisée par une texture à prédominance argileuse à argilo-limoneuse. Les classes texturales dominantes selon le triangle des textures de soil taxonomy (USDA, 2006), sont dans l'ordre Clay > Silty Clay > Clay loam > Loam, et les fractions sableuses sont très peu représentées. Les sols sont généralement peu humides ( $H\% < 30\%$ ), modérément calcaires (Calcaire total  $< 18\%$ ) et peu pourvus en gypse (gypse  $< 5\%$ ) (Saoud, 2014).

Les sols de la station d'El Hamadna sont considérés comme des sols salés, ils sont classés comme des Solontchaks et des Solonetz selon Durand (1956) (figure5).

Le régime thermique de la région est caractérisé par des températures élevées en été et relativement basses en hiver. Le tableau II montre que Les températures les plus élevées sont enregistrées en juillet et août ( $29,10^{\circ}\text{C}$  et  $29,94^{\circ}\text{C}$ ). Les basses températures se manifestent en janvier ( $10,56^{\circ}\text{C}$ ). Les précipitations mensuelles montrent que novembre est le mois le plus pluvieux  $51,03\text{mm}$ . La plus faible pluviosité est enregistrée en juillet ( $1,33\text{mm}$ ).

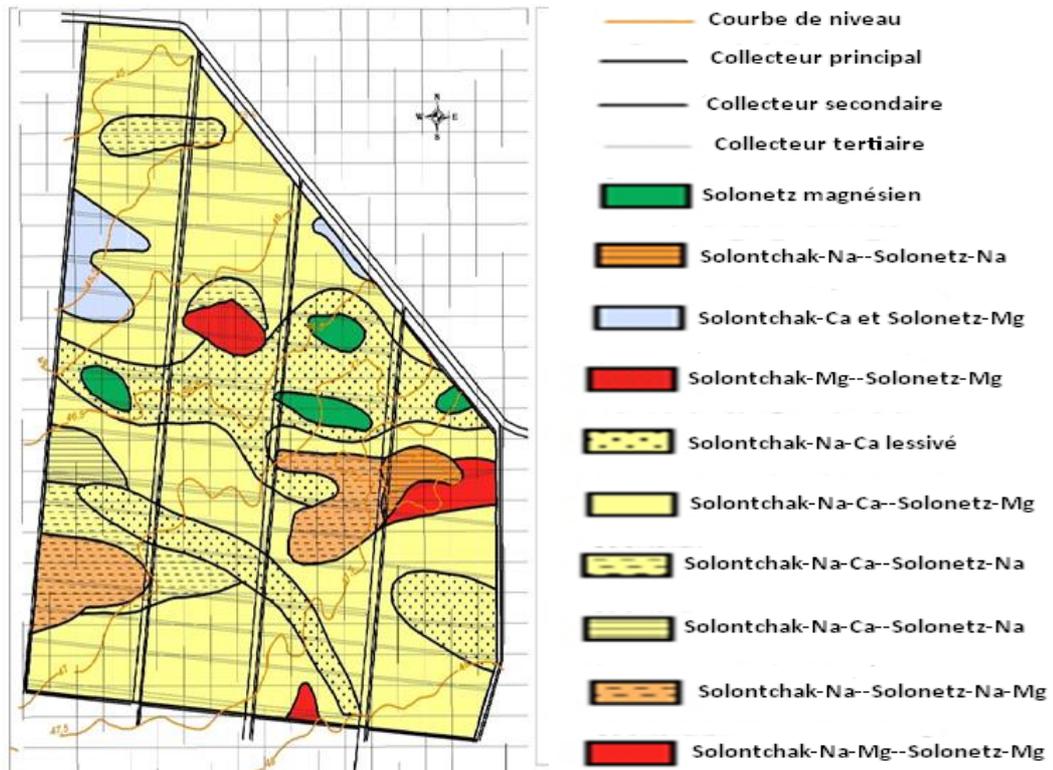


Figure 5 : Carte des sols de la station d'El Hamadna (Durand, 1956)

Tableau II : Moyennes des températures et des précipitations de la station de El Hamadna pour la période 1985-2004

Mois	Valeurs moyennes de la période 1985/2004	
	Températures moyennes (°C)	Précipitations (mm)
Janvier	10.56	39.45
Février	11.69	32.58
Mars	14.48	27.92
Avril	16.66	29.12
Mai	21.20	21.53
Juin	25.78	5.15
Juillet	29.10	1.33
Août	29.94	2.89
Septembre	25.28	16.11
Octobre	20.68	31.26
Novembre	14.57	51.03
Décembre	11.65	29.77

Le pédoclimat, selon USDA (2006), est caractérisé par un régime d'humidité xérique et un régime de température thermique. Ce régime correspond à un climat semi-aride méditerranéen à hivers frais et humides et étés secs et chauds.

## **1.2. Les profils étudiés**

La présente recherche a été réalisée sur l'étude de 11 profils (figure 6). Les profils A503, A507, A573, A570, A567, A557, B217 sont localisés dans une zone cultivée en orge. Les profils A495, A922, A923, B163 sont localisés dans une zone mise en jachère.

Le réseau d'irrigation se compose d'un canal adducteur qui prend naissance à partir du barrage Boukadir dans la wilaya de Chlef. Il se divise en deux canaux principaux, le premier (CPRG) dessert la rive gauche de l'oued Chelif et le deuxième (CPRD) la rive droite de l'oued Chelif.

## CHAPITRE II. MATERIELS ET METHODES

Le réseau de drainage est composé de 2 types de systèmes. Un premier système de drainage à ciel ouvert installé durant les années 1950 (figure 7), et un second système de drainage souterrrain installé en 2001 (INRA, 2011).

Sur les 11 profils étudiés, 53 échantillons ont été prélevés en avril 2012 avec une tarière selon les profondeurs citées par Durand (1956).

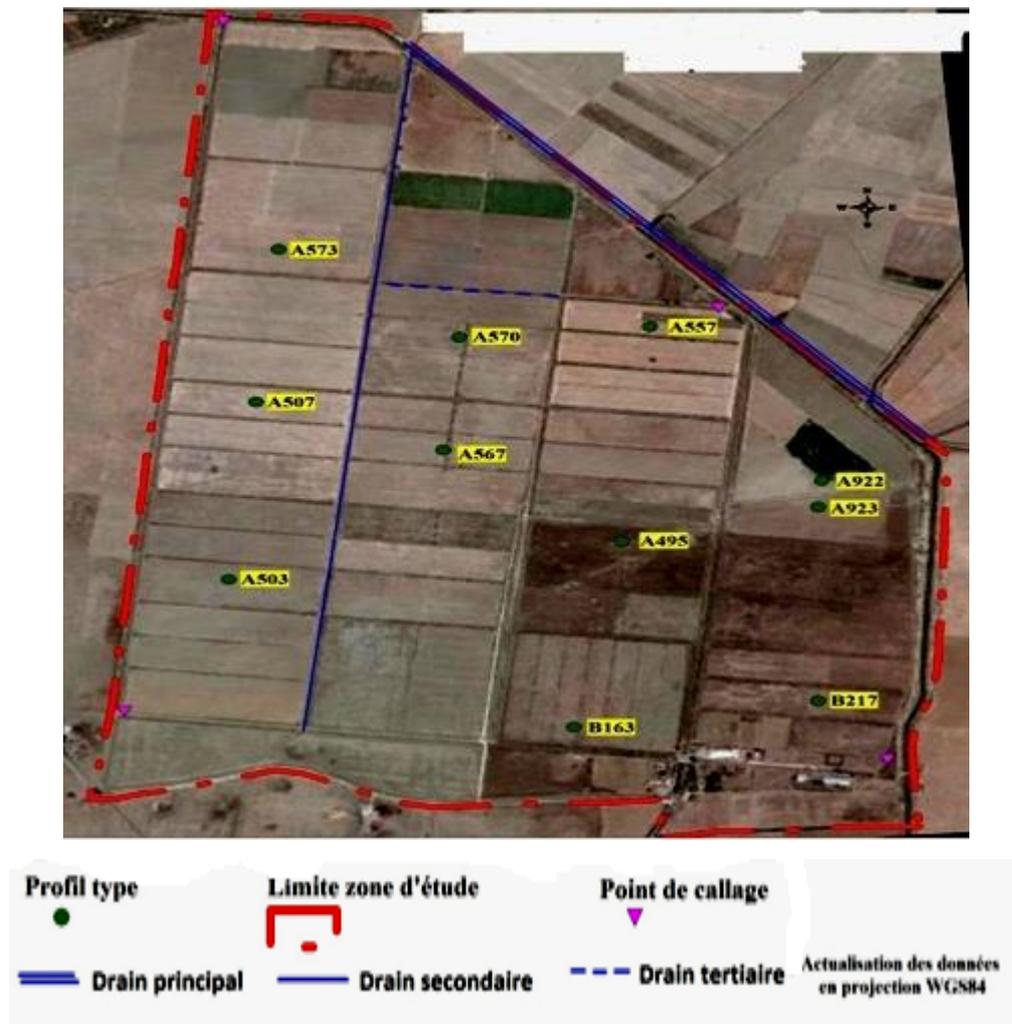


Figure 6 : Carte actualisée de localisation des profils de la station d'El Hamadna

### 2. METHODES D'ETUDE

La démarche globale d'étude est réalisée en deux grandes étapes. La première étape consiste à analyser au laboratoire la totalité des échantillons prélevés. La deuxième étape, qui constitue le cœur de cette recherche, est réalisée par des traitements géochimiques des résultats des analyses.

Les échantillons de sol prélevés sont d'abord séchés à l'air libre puis tamisés à 2 mm. Pour l'obtention de la solution du sol, nous avons utilisé l'extrait de pâte saturée correspondant à la méthode de référence l'USSL (1954).

Les analyses suivantes sont réalisées sur la solution du sol :

- La conductivité électrique : par conductivitémètrie électrique sur un extrait de pâte saturée.
- Le pH : mesure potentiométrique au pH-mètre sur l'extrait de pâte saturée.
- Les sulfates : Le dosage des sulfates est basé sur la réaction en milieu acide, entre l'ion sulfate et le chlorure de baryum qui conduit quantitativement à la formation de sulfate de baryum, sel très peu soluble (Van Reeuwijk, 1987).
- Les bicarbonates : Le dosage a été fait par titrimétrie à l'acide sulfurique en présence d'indicateur l'orange de méthyle (Rodier, 2005).
- Les chlorures : cette analyse a été réalisée selon la méthode de Mohr ; dosage par titrimétrie au nitrate d'argent (Rodier, 2005).
- Le sodium : par spectrophotométrie à flamme d'émission atomique.
- Le potassium, le calcium et le magnésium : par photométrie d'absorption atomique.

L'analyse du sélénium total est réalisée selon la méthode préconisée par EPA 3051A. La méthode consiste en une prise d'essai de 0,5 g de terre, une digestion assistée par micro-ondes est réalisée par un mélange d'acides nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) et chlorhydrique ( $\text{HCl}$ ) (un rapport de 3/1( $\text{HNO}_3/\text{HCl}$ )) et l'eau régale. Les analyses des échantillons sont faites par SAA Agilent Technologie 240 Fs /240Z avec un four graphite à correction Zeeman. L'analyse du sélénium total dans le sol a été réalisée sur 36 échantillons issus de 7 profils qui couvrent la gamme de salinité des échantillons étudiés.

### 2.1. Approches géochimiques

La démarche géochimique utilisée repose sur trois points :

- La détermination des faciès chimiques de la solution du sol,
- les tests de saturation vis-à-vis des minéraux,
- et une simulation de l'évolution de la concentration saline de la solution du sol.

#### 2.1.1. Les faciès chimiques

Le recours à des diagrammes et graphiques divers est très utile en géochimie pour visualiser des caractéristiques importantes d'un échantillon ou d'un groupe d'échantillons. Plusieurs logiciels (AquaChem, Grapher, diagramme...) permettent de représenter ces différents diagrammes. Parmi eux, le diagramme de Simler (2012) est un logiciel gratuit qui permet de réaliser :

- Diagramme de Piper, Stiff, Schoeller-Berkalov, Korjinski, Riverside et Wilcox, Stabler, Ternaïre.
- Statistiques (fréquences, matrice de corrélation), calcul de balance ionique et de conductivité.
- Simulation de neutralisation, datation  $^{14}\text{C}$ , relation  $^{18}\text{O}$  et deutérium.
- Transfert vers PHREEQ d'une partie ou de l'ensemble des données avec récupération des résultats

Le diagramme de Piper est utilisé dans cette étude. Il permet de représenter le faciès chimique d'un ensemble d'échantillons de solutions de sol.

#### 2.1.2. Les indices de saturation

Les indices de saturation sont déterminés à l'aide du programme PHREEQC (Parkhurst et Appelo, 2013). Ce dernier est un 'free programme informatique', disponible sur le web, conçu pour effectuer une grande variété de calculs géochimiques :

- (1) les calculs de spéciation et d'indices de saturation ;
- (2) des calculs de transport par lots et unidimensionnels (1D) avec des réactions réversibles et irréversibles, comprenant des équilibres aqueux, minéraux, gazeux, en solution solide, en complexation de surface et d'échange d'ions, et des

transferts molaires spécifiés de réactifs cinétiquement contrôlés, mélange de solutions et changements de pression et de température ;

- (3) la modélisation inverse qui permet de trouver des ensembles de transferts de moles minérales et gazeuses tenant compte des différences de composition entre les eaux dans les limites d'incertitude de composition spécifiées.

### 2.2. Simulation de l'évolution de la concentration de la solution du sol

D'après Suarez et Taber (2007), le logiciel ExtractChem est conçu pour prédire l'évolution de la conductivité électrique (CE), les concentrations ioniques et la pression osmotique (PO) d'une solution de sol à une teneur en eau souhaitée en fonction d'une composition ionique connue.

Les principales utilisations du modèle sont :

- Obtention d'une prédiction de la composition d'extrait de la pâte saturée, la conductivité électrique et la pression osmotique basée sur l'analyse de rapports sol/eau de 1: 1, 1: 2 ou 1: 5.
- Correction des données d'analyse de rapports sol/eau pour les sols gypsifères lors de l'étalonnage des levés électromagnétiques ou électromagnétiques de terrain pour la salinité.

Le programme est basé sur les routines chimiques utilisées dans le modèle UNSATCHEM. Il prend en compte les ions majeurs, le bore et les processus chimiques d'échange de cations, de précipitation-dissolution de la calcite et du gypse et l'adsorption de bore en utilisant le modèle de capacité constante. Le modèle peut être exécuté en mode batch ou dans des cas individuels avec affichage à l'écran.

Pour notre cas d'étude, la solution initiale considérée est la solution la moins concentrée avec une CE égale à 1.6 dS/m, et une concentration en chlore égale à 10 meq/l. Le facteur de concentration se calcule ainsi :

- Le choix du chlorure pour calculer le facteur de concentration est basé sur la solubilité élevée des chlorures dans le sol.

## CHAPITRE II. MATERIELS ET METHODES

- La concentration initiale est la concentration en chlore de l'échantillon A507 H1 qui contient la plus faible concentration en chlore qui est égale à 10 meq/l.

Le facteur de concentration =  $\frac{\text{la concentration en chlorure de l'échantillon meq/l}}{\text{la concentration initiale en chlore (meq/l)}}$

Le facteur de concentration de l'échantillon A495 H1 est égale à  $= \frac{40\text{meq/l}}{10 \text{ (meq/l)}} = 4$

L'état hydrique du sol se détermine ainsi : La teneur en eau de la solution initiale est égale à 100%.

la teneur en eau % =  $\frac{\text{la teneur en eau de la solution initiale}}{\text{le facteur de concentration}}$

Par exemple, la teneur en eau de l'horizon A495H1 est égale à  $100 \% / 4 = 25 \%$ .

### CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans ce chapitre, nous présentons trois points essentiels de cette recherche :

- Le premier portera sur une étude de la salinité par une caractérisation analytique de la solution du sol, ensuite une caractérisation des processus géochimiques dont la détermination des faciès chimiques et la saturation de la solution du sol vis-à-vis des minéraux.
- Le deuxième point est l'étude de la fiabilité de la simulation de l'évolution de la composition de la solution du sol lors de sa concentration par évaporation.
- Le troisième point est réservé à la détermination du sélénium total dans les sols salés du Bas-Chelif.

#### 1. CARACTERISATION ANALYTIQUE DE LA SOLUTION DES SOLS

Dans cette partie, le point sera mis sur :

- L'étude de la conductivité électrique et la composition de la solution du sol.
- L'effet de la composition de la solution du sol sur la CE.
- Une caractérisation des valeurs du SAR et de L'ESP.

##### 1.1. La conductivité électrique

Les résultats obtenus montrent que CE varie d'un profil à un autre et d'un horizon à un autre (tableau III). Les valeurs obtenues sont comprises entre 0,72 dS/m pour l'échantillon B217 H1 et 51,7 dS/m pour l'échantillon A495 H5.

Selon les normes de l'USSS (1954), 5 échantillons sont classés non salés ( $CE < 2$  dS/m), 3 échantillons sont peu salés ( $2 \text{ dS/m} \leq CE < 4 \text{ dS/m}$ ), 8 échantillons sont moyennement salés ( $4 \text{ dS/m} \leq CE < 8 \text{ dS/m}$ ), 18 échantillons sont salés ( $8 \text{ dS/m} \leq CE < 16 \text{ dS/m}$ ), et 19 échantillons sont très salés ( $CE > 16 \text{ dS/m}$ ).

L'histogramme des fréquences des classes de salinité montre une dominance de la classe très salée avec 35,85 % des échantillons, elle est suivie par la classe salée avec 33,96 % (figure 7). Les échantillons moyennement salés représentent 15,09 %, et les échantillons peu salés et non salés représentent respectivement 5,66 % et 9,43 %. Ces résultats montrent une nette prédominance des échantillons salés et très salés qui représentent à eux seuls 69,81 % des échantillons.

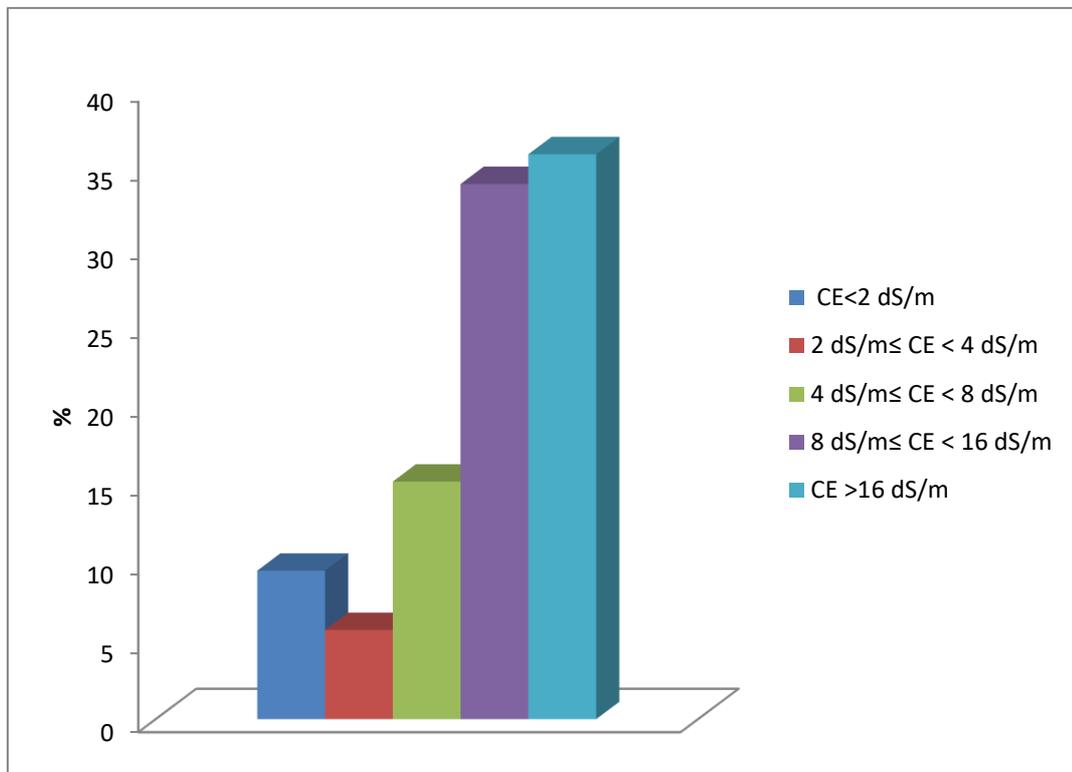


Figure 7 : Histogramme des fréquences des classes de CE

## CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau III. Caractéristiques de la solution des sols

Profil	Horizon	CE (dS/m)	pH	Les cations				Les anions			Somme des Cations	Somme des Anions
				Ca <sup>2+</sup> meq/l	Mg <sup>2+</sup> meq/l	Na <sup>+</sup> meq/l	K <sup>+</sup> meq/l	Cl <sup>-</sup> meq/l	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> meq/l	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> meq/l		
A 495	H1	4,95	8,3	15,1	1,68	43,86	0,24	40	2	16,46	60,89	58,46
	H2	11,18	7,45	20,35	1,79	99,31	0,28	90	2	16,04	121,73	108,04
	H3	26,1	7,95	34,25	2,73	224,45	0,3	260	3	19,37	261,74	282,37
	H4	32	7,97	38,3	5,13	291,99	0,29	280	3	17,92	335,71	300,92
	H5	51,7	7,5	35,75	5,9	331,04	0,29	400	3,5	20	372,98	423,5
A503	H1	8,66	8,29	16,7	2,62	66,21	0,33	80	0,5	8,75	85,86	89,25
	H2	16,82	8,15	33,45	2,66	149,63	0,33	160	2	10,62	186,06	172,62
	H3	31,5	7,49	32,5	4,32	201,59	0,28	300	3	17,92	238,69	320,92
	H4	25,9	8,01	28,55	3,56	237,36	0,28	260	2	7,92	269,75	269,92
	H5	24,4	8,15	37,6	5,1	230,09	0,28	240	4	23,12	273,07	267,12
	H6	23	8,17	30,45	2,76	219,33	0,27	220	3	15,62	252,81	238,62
A507	H1	1,6	8,35	3,35	2,16	11,58	0,25	10	2	5,42	17,35	17,42
	H2	7,45	8,02	19,5	2,58	48,99	0,24	70	2,5	13,75	71,31	86,25
	H3	14,57	7,41	30,75	2,76	144,51	0,23	140	2,5	14,79	178,25	157,29
	H4	15,02	7,51	30,35	4,32	106,59	0,24	150	1,5	3,96	141,5	155,46
A557	H1	1,7	8,32	6,55	1,78	15,88	0,23	10	4	4,58	24,44	18,58
	H2	2,56	7,66	6,7	2,25	22,34	0,24	15	4	2,5	31,52	21,5
	H3	6,9	7,64	18,15	2,57	57,6	0,22	60	3	6,67	78,54	69,67
	H4	8,46	8,02	18,95	2,59	74,82	0,21	80	2	11,46	96,57	93,46
	H5	8,84	8,07	19,8	2,62	83,43	0,25	80	1,5	19,58	106,09	101,08
A567	H1	1,55	8,36	6	2,24	5,12	0,29	15	0,5	9,58	13,63	25,08
	H2	7,27	7,73	22,6	2,66	53,29	0,28	65	1	3,96	78,84	69,96
	H3	20,3	7,65	57,85	3,58	154,76	0,31	200	2	9,58	216,5	211,58
	H4	29,7	7,51	59	2,82	224,45	0,23	350	2,5	13,96	286,5	366,46
	H5	30,5	7,47	39,9	5,19	201,59	0,25	380	1	8,54	246,93	389,54
A570	H1	3,14	8,34	11,3	2,45	28,8	0,26	25	3	3,12	42,8	31,12
	H2	14,38	7,41	31,3	2,72	157,42	0,29	140	1,5	7,71	191,73	149,21
	H3	25,6	7,98	45,05	3,55	198,62	0,26	300	2,5	17,29	247,48	319,79
	H4	25,3	7,87	44,05	3,13	211,54	0,25	290	1,5	15,42	258,96	306,92
	H5	23,9	7,92	42,9	3,77	208,57	0,24	240	5	7,92	255,48	252,92
A573	H1	1,63	7,91	7,8	2,34	5,12	0,28	15	2,5	2,29	15,54	19,79
	H2	4,76	7,7	21,45	2,56	46,02	0,29	40	2	5,83	70,31	47,83
	H3	10,26	7,03	25,6	2,63	150,97	0,27	95	3	15,42	179,47	113,42
	H4	11,87	7,82	23,9	1,86	138,05	0,24	115	2	16,46	164,05	133,46
	H5	12,78	7,73	23,05	2,64	131,6	0,24	120	1,5	12,92	157,52	134,42
	H6	14,88	7,15	28,4	2,74	144,51	0,26	145	2	10,21	175,92	157,21
A922	H1	5,1	8,38	12,55	2,42	40,38	0,31	40	2,5	14,37	55,66	56,87
	H2	13,3	8,29	19,65	2,56	202,62	0,31	120	3	15,83	225,14	138,83
	H3	20,4	7,79	25,75	2,56	230,09	0,27	200	2,5	17,5	258,68	220
	H4	41,2	7,67	52	5,95	588,51	0,29	490	2	13,12	646,74	505,12
	H5	37,7	7,53	57,15	4,38	316,49	0,29	430	5	10,83	378,31	445,83
A923	H1	7,25	8,23	8,7	2,47	139,39	0,29	70	1,5	5,42	150,85	76,92
	H2	12,01	8,29	19,6	2,58	163,88	0,31	110	2	14,37	186,37	126,37
	H3	18,96	8,02	27,5	2,12	244,34	0,28	180	2,5	16,67	274,23	199,16
	H4	34,9	7,82	52,75	3,73	307,06	0,27	340	2,5	4,79	363,81	347,29
B163	H1	1,58	7,84	7,1	2,31	9,43	0,23	15	1,5	3,12	19,07	19,62
	H2	6,77	8,27	26,7	2,64	44,68	0,27	65	1	6,25	74,29	72,25
	H3	14,15	7,69	31,95	2,76	157,42	0,24	140	1,5	11,87	192,38	153,37
	H4	12,61	8,05	32,4	2,75	112,22	0,26	120	2	10,21	147,63	132,21
B217	H1	0,72	8,24	0,75	2,04	0,82	0,26	5	1	1,87	3,87	7,87
	H2	3,57	8,04	11,8	2,48	28,8	0,25	30	1,5	2,08	43,33	33,58
	H3	8,43	7,53	22,6	2,71	70,51	0,26	80	3	8,12	96,08	91,12
	H4	9,63	7,47	26,75	2,67	79,12	0,28	90	2	17,71	108,82	109,71

## **1.2. Effet de la concentration ionique de la solution du sol sur CE**

La salinité est la quantité de sels dans l'eau ou le sol. Elle peut être estimée en termes de conductivité électrique (CE) et exprimée en dS/m (Chesworth, 2007). Les principaux cations présents dans les solutions salines du sol sont  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{K}^+$ , et les principaux anions sont  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  et  $\text{NO}_3^-$  (Tanji, 2002).

Dans ce qui suit, nous présentons l'effet du changement de la concentration des principaux cations ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{K}^+$ ) et anions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , et  $\text{HCO}_3^-$ ) présents dans les solutions du sol sur CE.

Dans l'étude de la relation entre CE et la concentration en électrolytes (somme des cations et somme des anions), l'interception est définie aux origines des axes dans les équations de corrélation, c'est-à-dire quand  $y = 0$ ,  $x = 0$  et l'équation sera de type  $y = ax$ .

### **1.2.1. Relation entre CE et la concentration en électrolytes**

La somme des cations varie entre 3,87 meq/l et 646,74 meq/l (tableau III). L'équation de la régression linéaire entre la somme des cations et CE est la suivante :

$$\text{CE} = 0,0882 \sum \text{cations} \quad r = 0,92 \text{ et } n = 53$$

Cette relation est positive et statistiquement significative ( $r=0,92$  ;  $p<0.05$ ) (figure 8). La CE varie dans le même sens que celui de la somme des cations, surtout pour les valeurs inférieures à 200 meq/l. Dans cette gamme de valeur, les points se situent carrément sur la droite de la régression linéaire et traduisent donc un très fort effet de la somme des cations sur CE. Au-delà de ce seuil, une légère dispersion du nuage de points est observée. L'échantillon A922 H4 (figure 8), avec une CE égale à 41,2 dS/m présente la valeur maximale de la somme des cations (646,74 meq/l), tandis que l'échantillons A495 H5, avec la valeur maximale de CE (51,7dS/m) présente une valeur de somme des cations égale à 372,98 meq/l.

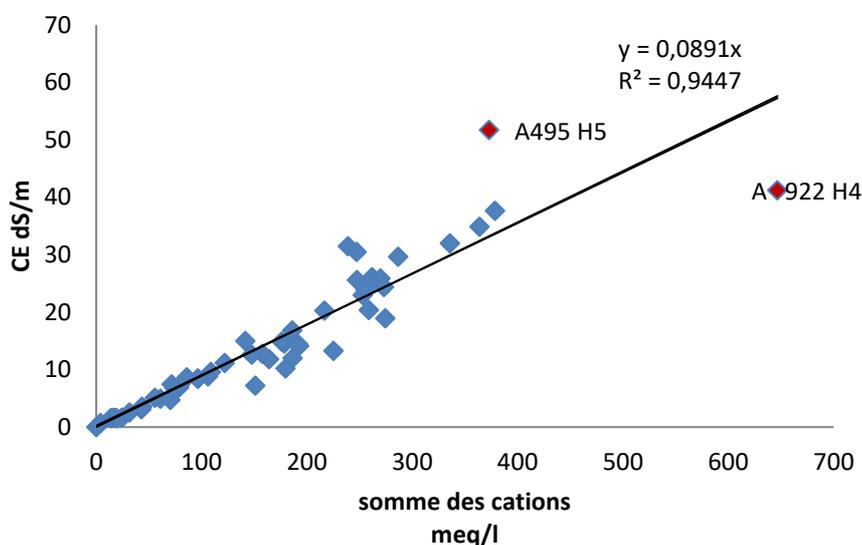


Figure 8 : Effet de l'augmentation de la somme des cations sur la CE

La somme des anions varie entre 7,87 meq/l et 505,12 meq/l (tableau III). L'équation de régression entre la somme des anions et la CE est la suivante:

$$CE = 0,091 \sum \text{anions} \quad r = 0,97 \text{ et } n = 53$$

Cette relation est positive et statistiquement significative ( $r=0,97$  ;  $p<0.05$ ) (figure 9). Elle signifie que CE augmente avec l'augmentation de la somme des anions. Les points dans la figure sont presque sur la droite de régression ce qui signifie une forte liaison entre CE et la somme des anions jusqu'à 300 meq/l. Au-delà la liaison devient faible traduit par une dispersion du nuage de points est observée pour les concentrations supérieures à 300meq/l. L'échantillon A922 H4 (figure 9), avec une CE égale à 41,2 dS/m présente la valeur maximale de la somme des anions (505,12 meq/l), alors que l'échantillons A495 H5, avec une valeur maximale de CE 51,7dS/m présente une valeur de somme des anions égale à 423,5 meq/l.

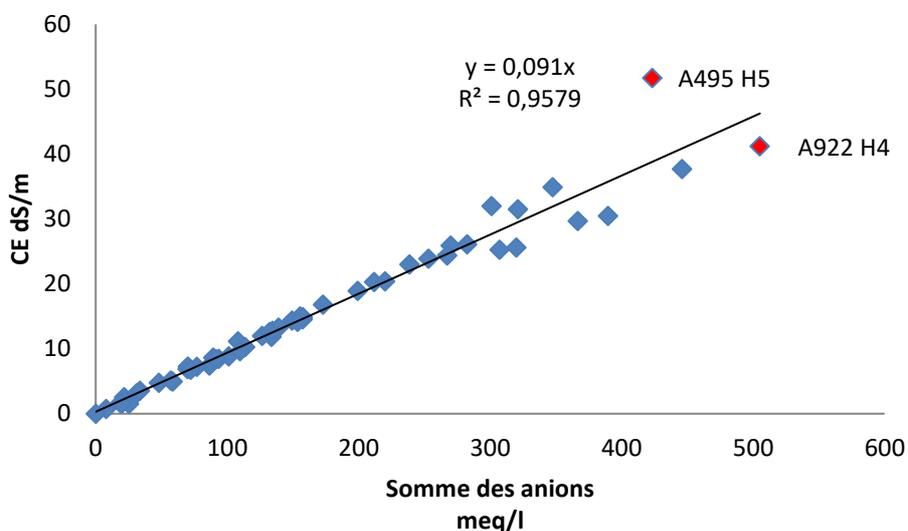


Figure 9 : Effet de l'augmentation de la somme des anions sur la CE

### 1.2.2. Relation entre CE et $\text{Ca}^{2+}$

La concentration en  $\text{Ca}^{2+}$  varie entre 0,75 meq/l et 57,85 meq/l, la valeur moyenne est égale à 26,47 meq/l (tableau III). L'équation de la régression linéaire entre  $\text{Ca}^{2+}$  et CE est la suivante :

$$\text{CE} = 0,67\text{Ca}^{2+} (\text{meq/l}) - 2,62 \quad r = 0,83 \text{ et } n = 53$$

Cette relation est statistiquement significative ( $r = 0,83$  ;  $p < 0,05$ ) (figure 10). Ce résultat signifie que CE varie dans le même sens que  $\text{Ca}^{2+}$ . Le nuage de points révèle une certaine dispersion surtout pour les solutions les plus concentrées. Selon l'équation de régression linéaire, les taux de  $\text{Ca}^{2+} < 3,91 \text{ meq/l}$  correspondent à des valeurs négatives de CE.

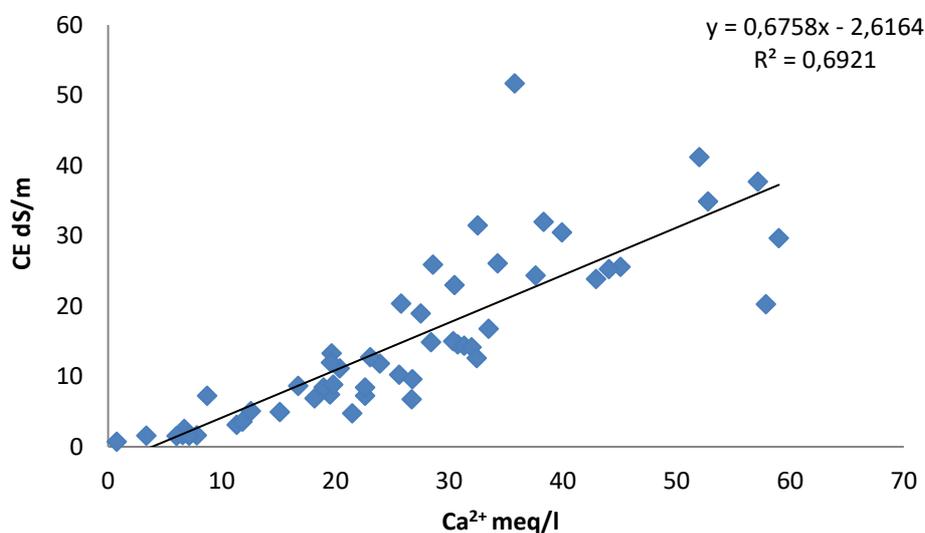


Figure 10 : Effet de l'augmentation de la concentration du Ca<sup>2+</sup> sur la CE

### 1.2.3. Relation entre CE et Mg<sup>2+</sup>

La concentration en Mg<sup>2+</sup> varie entre 1,68 meq/l et 5,95 meq/l avec une valeur moyenne égale à 2,98 meq/l (tableau III). L'équation de la régression linéaire entre Mg<sup>2+</sup> et CE est de type :

$$CE = 9,59 \text{ Mg}^{2+} (\text{meq/l}) - 13,298 \quad r = 0,82 \quad \text{et } n = 53$$

Cette relation est positive et statistiquement significative ( $r=0,82$  ;  $p<0.05$ ) (figure 11). Elle signifie que CE varie dans le même sens que la variation de Mg<sup>2+</sup>. La figure 11 montre que la majorité des points se situent dans l'intervalle correspondant à une concentration en Mg<sup>2+</sup> comprise entre 1,68 meq/l et 2,76 meq/l. Pour des concentrations en Mg<sup>2+</sup> plus fortes à 2,76 meq/l, la dispersion des points est plus lâche ce qui signifie que la liaison entre CE et Mg<sup>2+</sup> devient plus faible.

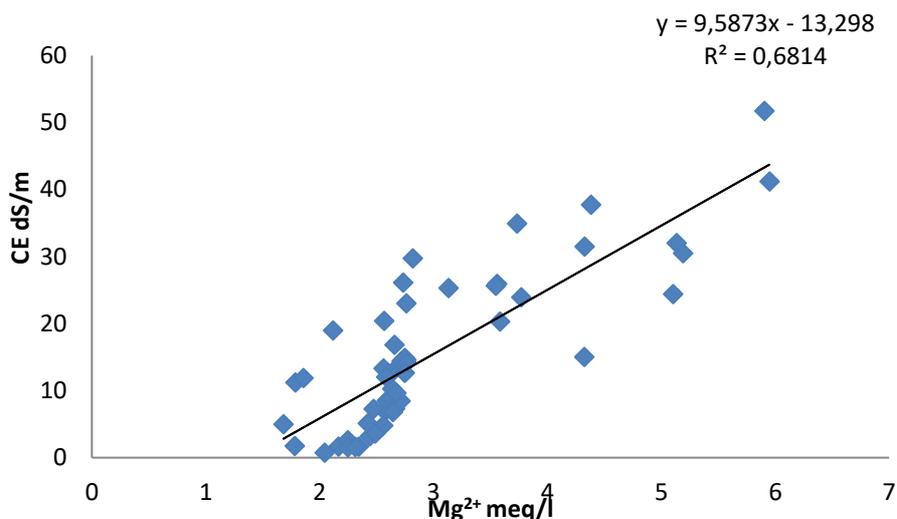


Figure 11 : Effet de l'augmentation de la concentration du Mg<sup>2+</sup> sur la CE

#### 1.2.4. Relation entre CE et Na<sup>+</sup>

La concentration en Na<sup>+</sup> varie entre 0,82 meq/l et 588,51meq/l. Sa valeur moyenne est égale à 140,69 meq/l (tableau III). L'équation de la régression linéaire entre la teneur en Na<sup>+</sup> et CE est la suivante :

$$CE = 0,1 Na^+ (\text{meq/l}) + 1,71 \quad r = 0,9 \text{ et } n = 53$$

La relation est forte, positive et statistiquement significative ( $r=0,9$  ;  $p<0.05$ ) (figure 12). Elle signifie que CE évolue dans le même sens que Na<sup>+</sup>. Ce résultat est bien confirmé par la figure 12 qui montre que la majorité des points est très proche de la droite de régression. Elle montre aussi que les concentrations en Na<sup>+</sup> inférieures à 107 meq/l se situent même sur la droite de la régression ce qui dénote la forte liaison entre Na<sup>+</sup> et CE pour les relatives faibles concentration de Na<sup>+</sup>. Au-delà de ce seuil, la figure 12 révèle une certaine dispersion des points par rapport à la droite de régression. D'un autre côté, cette figure montre que la droite de régression passe approximativement par l'origine des axes. Ce résultat signifie que la CE est particulièrement contrôlée par les concentrations en Na<sup>+</sup>.

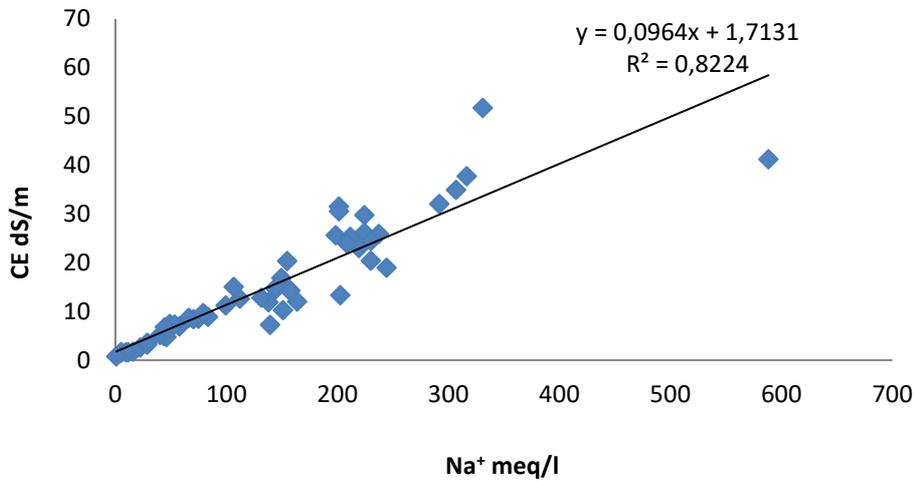


Figure 12 : Effet de l'augmentation de la concentration du  $\text{Na}^+$  sur la CE

#### 1.2.5. Relation entre CE et $\text{K}^+$

La concentration en  $\text{K}^+$  varie de 0,21 meq/l à 0,33 meq/l avec une valeur moyenne égale à 0,27 meq/l (tableau III). L'équation de la régression linéaire entre la teneur en  $\text{K}^+$  et CE est la suivante :

$$\text{CE} = 105,52 \text{ K}^+ (\text{meq/l}) \quad r = 0,25 \text{ et } n = 53$$

Cette relation est non significative ( $r = 0,25$  ;  $p < 0,05$ ). Ce résultat signifie que CE ne varie pas en fonction de la concentration en  $\text{K}^+$ .

#### 1.2.6. Relation entre CE et $\text{Cl}^-$

La concentration en  $\text{Cl}^-$  varie entre 5 meq/l et 490 meq/l. Sa valeur moyenne est égale à 151,04 meq/l (tableau III). L'équation de la régression linéaire entre la teneur en  $\text{Cl}^-$  et CE est la suivante :

$$\text{CE} = 0,09 \text{ Cl}^- (\text{meq/l}) + 1,26 \quad r = 0,97 \text{ et } n = 53$$

Cette relation est positive et statistiquement significative ( $r = 0,97$  ;  $p < 0,05$ ) (figure 13). Elle signifie que CE et  $\text{Cl}^-$  varient dans le même sens. La figure 13 révèle que les points sont très proches de la droite de la régression linéaire.

Il est utile de remarquer que les points dont la concentration en  $\text{Cl}^-$  est inférieure à 260 meq/l se situent même sur la droite, ce qui traduit la forte liaison entre ces deux paramètres pour cette gamme de valeur. Au-delà de ce seuil, le nuage des points se disperse légèrement et traduit donc une relative faiblesse de la liaison entre ces deux paramètres. Selon l'équation de régression linéaire, pour une valeur de  $\text{Cl}^-$  égale à 0 meq/l, CE sera égale à 1,26 dS/m. Ainsi donc, comme pour le couple  $\text{Na}^+ - \text{CE}$ , la droite de la régression linéaire du couple  $\text{Cl}^- - \text{CE}$  passe aussi très proche de l'origine des axes et traduit aussi la forte relation entre les  $\text{Cl}^-$  et CE.

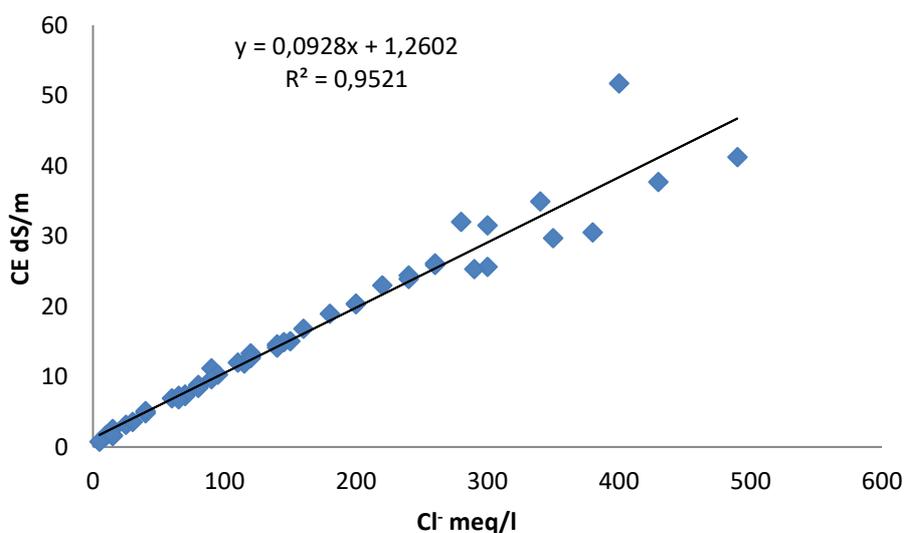


Figure 13 : Effet de l'augmentation de la concentration de  $\text{Cl}^-$  sur la CE

### 1.2.7. Relation entre la CE et la concentration en $\text{SO}_4^{2-}$

La concentration en  $\text{SO}_4^{2-}$  varie de 1,87 meq/l à 23,12 meq/l, la valeur moyenne est égale à 11,15 meq/l (tableau III). L'équation de la régression linéaire entre les teneurs en  $\text{SO}_4^{2-}$  et CE est la suivante :

$$\text{CE} = 0,99 \text{SO}_4^{2-}(\text{meq/l}) + 4,17 \quad r = 0,48 \text{ et } n = 53$$

Cette relation est positive et significative ( $r=0,48$  ;  $p<0.05$  (figure 14). Cette relation statistique signifie que l'évolution de CE est dépendante de l'évolution de la concentration en  $SO_4^{2-}$ . Cependant, la dispersion du nuage de points est assez importante, surtout pour les fortes valeurs de  $SO_4^{2-}$ . La droite de la régression présente une légère tendance de l'augmentation de CE quand  $SO_4^{2-}$  augmente. Selon cette équation, pour une valeur de  $SO_4^{2-} = 0$  meq/l, CE sera égale à 4,17 dS/m.

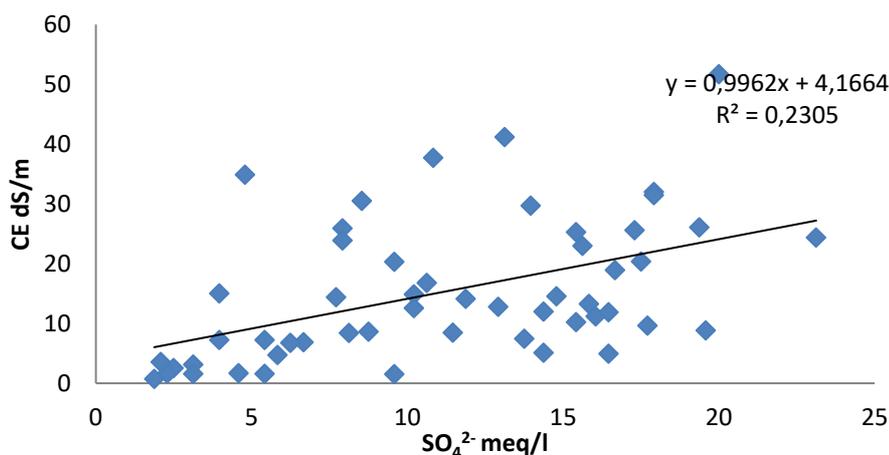


Figure 14 : Effet de l'augmentation de la concentration de  $SO_4^{2-}$  sur la CE

#### 1.2.8. Relation entre la CE et la concentration en $HCO_3^-$

La concentration en  $HCO_3^-$  varie entre 1 meq/l à 3,5 meq/l, la valeur moyenne est égale à 2,33 meq/l (tableau III). L'équation de régression entre la teneur en  $HCO_3^-$  et CE est la suivante :

$$CE = 6,06 HCO_3^- (\text{meq/l}) \quad r = 0,14 \text{ et } n = 53$$

Cette relation est statistiquement non significative ( $r= 0,14$  ;  $p > 0,05$ ) ce qui signifie que CE ne varie pas en fonction de la concentration en  $HCO_3^-$  soluble.

### 1.2.9. Relation entre les composantes de la solution du sol

L'évolution de la concentration des ions dans la solution du sol suit l'évolution de la concentration de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  sauf le  $\text{K}^+$  et  $\text{HCO}_3^-$ . La variation de la concentration de  $\text{K}^+$  et  $\text{HCO}_3^-$  est indépendantes des autres ions. Le changement de la concentration de  $\text{SO}_4^{2-}$  semble indépendant au changement de la concentration de  $\text{Mg}^{2+}$  (tableau IV).

Tableau IV : Matrice de corrélation entre les composantes de la solution du sol

Variabes	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$
$\text{Ca}^{2+}$	<b>1</b>	<b>0,652*</b>	<b>0,769*</b>	0,138	<b>0,871*</b>	0,227	<b>0,386*</b>
$\text{Mg}^{2+}$	<b>0,652*</b>	<b>1</b>	<b>0,738*</b>	0,187	<b>0,811*</b>	0,239	0,265
$\text{Na}^+$	<b>0,769*</b>	<b>0,738*</b>	<b>1</b>	0,268	<b>0,914*</b>	0,270	<b>0,478*</b>
$\text{K}^+$	0,138	0,187	0,268	<b>1</b>	0,174	-0,090	0,188
$\text{Cl}^-$	<b>0,871*</b>	<b>0,811*</b>	<b>0,914*</b>	0,174	<b>1</b>	0,270	<b>0,432*</b>
$\text{HCO}_3^-$	0,227	0,239	<b>0,275*</b>	-0,090	<b>0,277*</b>	<b>1</b>	0,194
$\text{SO}_4^{2-}$	<b>0,386</b>	0,265	<b>0,478*</b>	0,188	<b>0,432*</b>	0,194	<b>1</b>

\* corrélation significative ( $r_c = 0,273$ ,  $ddl = 51$  et  $\alpha = 0,05$ )

### 1.2.10. La régression multiple entre CE et Les électrolytes

La régression multiple entre CE et les cations donne l'équation suivante :

$$\text{CE (dS/m)} = -7,44 + 0,22 * \text{Ca}^{2+} + 3,41 * \text{Mg}^{2+} + 0,06 * \text{Na}^+ - 1,73 * \text{K}^+$$

Le  $\text{K}^+$  agit dans le sens négatif de l'augmentation de CE, alors que  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Na}^+$  agissent dans le sens positif de l'augmentation de la CE. Le  $\text{Ca}^{2+}$  agit dans le sens négatif de l'augmentation de CE jusqu'à une concentration de 360 meq/l.

La régression multiple entre CE et les anions donne l'équation suivante :

$$\text{CE (dS/m)} = 0,09 * \text{Cl}^- + 0,57 * \text{HCO}_3^- + 0,15 * \text{SO}_4^{2-}$$

Les anions agissent dans le sens positif de l'augmentation de la CE.

Les relations statistiques entre les ions et CE présentent des relations hautement significatives entre la CE et  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , et des relations non significatives entre CE et  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ .

1.2.11. Relation entre CE et le SAR et L'ESP

Les résultats du tableau V montrent que les valeurs du SAR sont comprises entre 0,98 et 66,44. L'ESP est calculé à partir des valeurs du SAR présentées dans le tableau V. L'équation utilisée est celle de l'USSL (1954) :

$$ESP = 100 (- 0,0126 + 0,01475 X SAR ) / 1 + (- 0,0126 + 0,01475 X SAR )$$

Nous avons éliminé 14 données dont l'ESP dépasse 100%, ces valeurs étant considérées comme aberrantes.

L'équation de la régression linéaire entre le SAR et CE est de type  $y = ax$  (si  $SAR = 0$  alors  $CE = 0$ ), le calcul donne la relation suivante :

$$CE = 0,32 SAR \quad R^2 = 0,7 \quad \text{et } n = 39$$

La relation est significative ( $r_o = 0,84$  ;  $r_c = 0,31$  pour  $ddl = 37$  et  $\alpha = 0,05$ ) (figure 15). Cette relation signifie que CE augmente avec l'augmentation du SAR et que le risque de sodisation du complexe adsorbant suit le niveau de salinité.

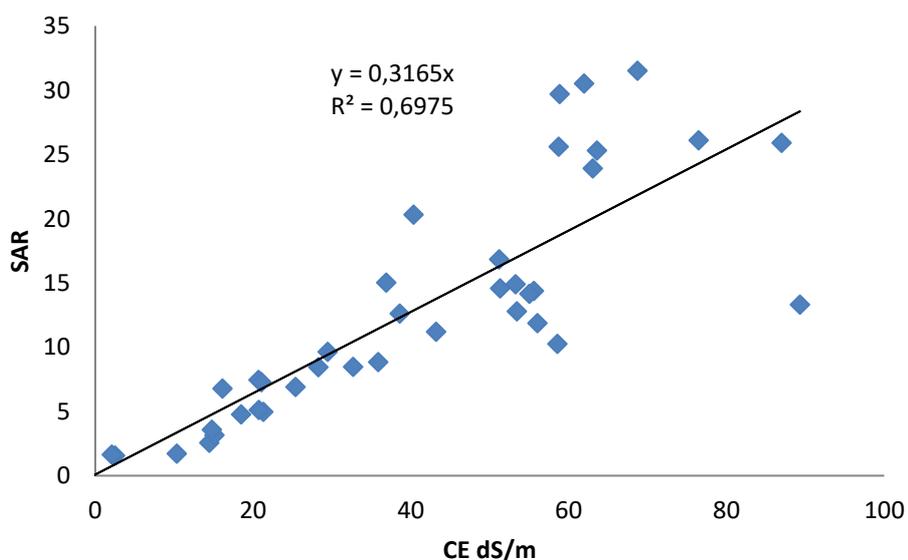


Figure 15 : Relation entre le SAR et la CE

Les résultats du tableau IV indiquent que 34 échantillons ont des taux de sodium échangeables supérieurs à 15%.

Selon les normes de FAO (1984), 3 échantillons présentent une sodicité légère (ESP < 5%), 3 échantillons présentent une sodicité modérée (ESP compris entre 5% et 20%), 13 échantillons ont une sodicité grave (ESP compris entre 20% et 45%), et 20 échantillons ont une sodicité très grave (ESP > 45%).

L'histogramme des fréquences des classes de sodicité montre une dominance de la sodicité très grave avec 51,28% des échantillons, la sodicité grave représente 33,33% des échantillons. Les échantillons présentant une sodicité modérée ou légère se partagent à parts égales (7,69 %) le reste des fréquences (figure 16). Les niveaux de sodicité du complexe adsorbant sont donc élevés à très élevés pour 84,61 % des échantillons.

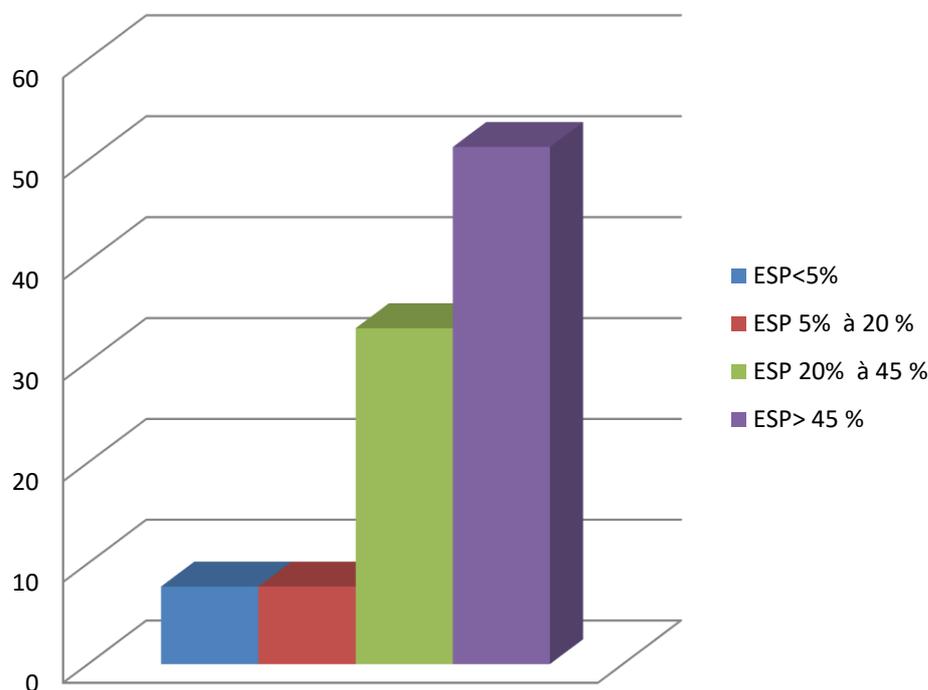


Figure 16 : Histogramme des fréquences des classes de sodicité

### CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau V : Valeurs du SAR et de l'ESP des échantillons

Profil	Horizon	SAR	ESP (%)
A 495	H1	21,41	30,63
	H2	42,21	61,61
A503	H1	30,13	43,61
	H2	49,80	72,92
	H3	66,44	97,71
A507	H1	9,87	13,43
	H2	20,85	29,79
	H3	49,93	73,11
	H4	36,21	52,66
A557	H1	11,00	15,12
	H2	14,93	20,98
	H3	25,31	36,43
	H4	32,24	46,76
	H5	35,24	51,23
A567	H1	3,57	4,05
	H2	21,21	30,32
	H3	39,49	57,56
	H4	57,09	83,78
	H5	60,04	88,18
A570	H1	15,53	21,87
	H2	53,98	79,14
	H3	56,98	83,62
	H4	61,59	90,49
	H5	61,06	89,69
A573	H1	3,22	3,52
	H2	18,78	26,71
	H3	56,83	83,39
	H4	54,40	79,77
	H5	51,93	76,09
	H6	51,79	75,89
A922	H1	20,87	29,82
B163	H1	6,15	7,89
	H2	16,50	23,30
	H3	53,44	78,34
	H4	37,86	55,12
B217	H1	0,98	0,19
	H2	15,24	21,44
	H3	28,03	40,49
	H4	29,17	42,19

### 1.3. Discussion

La solution des sols est caractérisée par une CE variable. Elle couvre une large gamme de salinité qui varie du niveau non salé ( $CE < 2$  dS/m) jusqu'au niveau très salé ( $CE > 16$  dS/m). Les échantillons ayant une  $CE > 4$  dS/m représentent 84,9% du total, ils sont salés selon les normes de l'USSL (1954).

Le pH révèle une réaction relativement alcaline des sols.

La CE augmente linéairement avec la somme des cations et la somme des anions.

Le  $K^+$  agit dans le sens négatif de l'augmentation de CE, alors que  $Mg^{2+}$  et  $Na^+$  agissent dans le sens positif de l'augmentation de la CE. Le  $Ca^{2+}$  agit dans le sens négatif de l'augmentation de CE jusqu'à une concentration de 360 meq/l.

Les anions agissent dans le sens positif de l'augmentation de la CE.

Les relations statistiques entre les ions et CE présentent des relations hautement significatives entre la CE et  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , et des relations non significatives entre CE et  $K^+$ ,  $HCO_3^-$ .

L'évolution de CE est donc linéaire et dans un sens positif par rapport à l'évolution des cations et des anions, surtout dans les solutions les moins concentrées. La dispersion est observée surtout au niveau des solutions les plus concentrés.

L'évolution linéaire et positive de CE avec l'évolution de  $Na^+$  et de  $Cl^-$  est due que, le  $Na^+$  et le  $Cl^-$ , qui sont les ions dominants dans la solution des sols, ne rentrent pas dans les phénomènes de précipitation des minéraux jusqu'à des valeurs de CE très élevées (Droubi *et al.*, 1980).

Concernant le calcium et le magnésium, leur évolution peut être contrôlée par la précipitation de la calcite et de la magnésite, mais ce contrôle semble insuffisant pour limiter leur évolution avec le niveau de salinité (Laoufi, 2010).

L'évolution des sulfates pourrait être contrôlée par la précipitation des minéraux sulfatés, ces évolutions semblent insuffisantes pour contrôler leur augmentation avec le niveau de salinité (Daoud, 1993).

L'évolution des bicarbonates pourrait être contrôlée par la précipitation des minéraux calciques. Elle présente une évolution spécifique et indépendante de la salinité (Daoud, 1993 ; Laoufi, 2010 ; Ait Mechedal, 2014).

Le comportement du potassium n'est pas lié à l'évolution de CE, il pourrait être contrôlé par le phénomène d'échange cationique ou par la rétrogradation par des minéraux argileux (Boussoussa, 2012 ; Ait Mechedal et al, 2017).

Les valeurs du SAR sont variables et comprises entre 0,98 et 66,44. Le SAR évolue d'une manière linéaire et dans un sens positif avec l'augmentation de la CE comme l'ont déjà montré les travaux de Touaf (2002) et de Hadj Miloud (2010). L'augmentation de la salinité s'accompagne d'une sodisation du complexe adsorbant. Les valeurs calculées de l'ESP à partir du SAR couvrent une large gamme de valeurs avec une prédominance du caractère très sodique. Selon les normes de l'USSL (1954), 34 échantillons présentent des taux de sodium échangeable supérieurs à 15% et correspondent à des horizons sodiques.

## 2. LE FACIES CHIMIQUE

Les faciès chimiques sont déterminés à partir des proportions des trois principaux cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Na}^+$ ) et des trois principaux anions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$ ) présents dans la solution du sol.

### 2.1. Les résultats du logiciel Diagramme

Le logiciel Diagramme utilisé dans ce travail (Simler, 2012) ne traite simultanément que 30 solutions. Les données présentées dans le digramme de Piper sont divisées en deux groupes selon la valeur de CE de manière à obtenir deux groupes approximativement homogènes par rapport aux nombres d'échantillons. La figure 17 présente les échantillons qui ont une CE inférieure à 14 dS/m, les échantillons qui ont une CE supérieure à 14 dS/m sont présentés dans la figure 18.

L'analyse des diagrammes de Piper révèle la présence d'un faciès de type chloruré sodique pour 49 échantillons. L'échantillon B217H1 a un faciès de type chloruré magnésien, et les échantillons B163H1, A573H1 et A567H1 ont un faciès chloruré sans dominance de l'un des cations.

### 2.2. Synthèse et discussion

L'analyse du diagramme de Piper a permis de mettre en évidence trois types de faciès chimiques de la solution des sols. Un faciès chloruré sodique qui domine la solution des sols (49 échantillons), un faciès de type chloruré magnésien (L'échantillon

B217H1), et un faciès chloruré sans dominance de l'un des cations pour les échantillons B163H1, A573H1, A567H1. Ces résultats concordent avec ceux de Daoud (1993), Laoufi (2010) et Hadj Miloud (2010).

Le faciès chloruré sodique est observé au niveau des solutions qui ont une CE élevée (CE > 1,63 dS/m). Les autres faciès sont observés pour des niveaux de CE plus faibles (CE ≤ 1,63 dS/m). Ces sols évoluent donc selon la voie saline neutre à dominante chlorurée (Marlet et Job, 2006).

Sur le plan géochimique, le faciès chimique chloruré sodique ne favorise la précipitation de sel (NaCl) que lorsque les niveaux de salinité sont très élevés (Droubi *et al.*, 1980). Sur le plan agronomique, ce faciès chloruré sodique est néfaste pour la croissance des plantes. En effet, les concentrations élevées en sodium et en chlore provoquent des perturbations multiples sur le métabolisme, la croissance et le développement des plantes aux niveaux moléculaire, biochimique et physiologique (Munns, 2002).

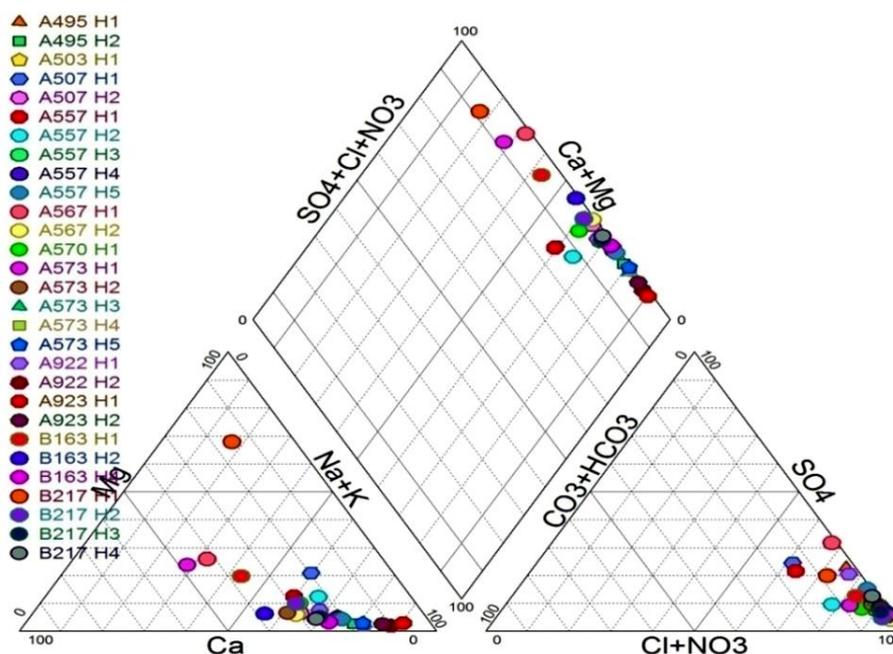


Figure 17 : Faciès chimiques des solutions dont CE ≤ 14 dS/m

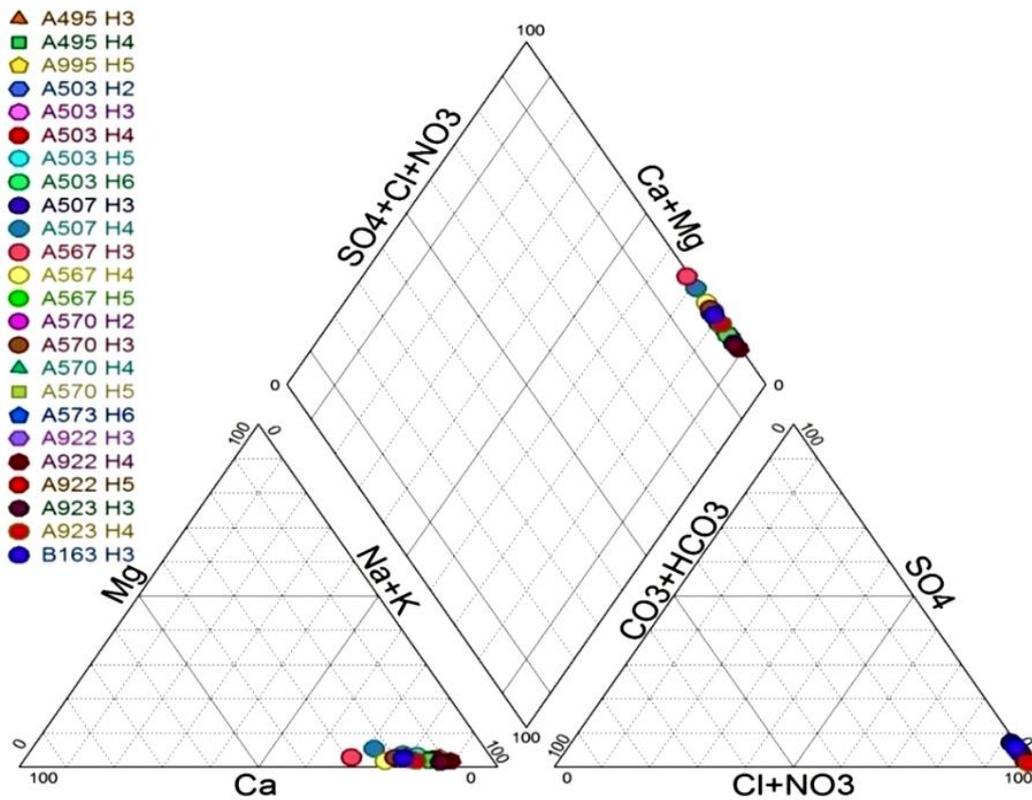


Figure 18 : Faciès chimiques des solutions dont CE > 14 dS/m

### 3. ETAT DE SATURATION DES SOLUTIONS VIS-A-VIS DES MINERAUX

Le degré de saturation d'une solution vis-à-vis d'un minéral est testé par une comparaison du produit de solubilité (Kps) au produit ionique (Q) des ions présents dans la solution (Droubi et al., 1976) :

$Q = Kps$  : la solution est au point de (en équilibre) saturation vis-à-vis du minéral testé

$Q < Kps$  : la solution est sous-saturée vis-à-vis de ce minéral

$Q > Kps$  : la solution est sursaturée vis-à-vis de ce minéral

Le degré de saturation d'une solution vis-à-vis d'un minéral peut être testé par le logarithme du rapport entre le produit ionique (Q) et le produit de solubilité (Kps) (Droubi et

al., 1976 ). La valeur obtenue correspondra à l'indice de saturation (IS) dont l'interprétation utilise les indications suivantes (Droubi et al., 1976) :

IS > 0 : solution sursaturée vis-à-vis du minéral

IS = 0 : solution en équilibre vis-à-vis du minéral

IS < 0 : solution sous saturée vis-à-vis du minéral.

Les activités ioniques sont calculées par le logiciel PHREEQC (Parkhurst et Appelo, 2013).

La réaction de précipitation – dissolution des minéraux s'écrit ainsi (Droubi et al., 1976 ; Parkhurst et al., 1990 ; Fehdi et al., 2009) :



$$K_{ps} = \frac{(\text{Ca}^{2+}) * (\text{SO}_4^{2-})}{(\text{CaSO}_4)} = 10^{-4,36}$$



$$K_{ps} = \frac{(\text{Ca}^{2+}) * (\text{CO}_3^{2-})}{\text{CaCO}_3} = 10^{-8,34}$$



$$K_{ps} = \frac{(\text{Ca}^{2+}) * (\text{CO}_3^{2-})}{(\text{CaCO}_3)} = 10^{-8,48}$$



$$K_{ps} = \frac{(\text{Ca}^{2+}) * (\text{SO}_4^{2-}) * (\text{H}_2\text{O})^2}{(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})} = 10^{-4,58}$$



$$K_{ps} = \frac{(\text{Ca}^{2+}) * (\text{Mg}^{2+}) * 2(\text{CO}_3^{2-})}{(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)} = 10^{-17,09}$$



$$K_{ps} = \frac{(\text{Na}^+) * (\text{Cl}^-)}{(\text{NaCl})} = 10^{1,58}$$

### **3.1. Résultats du test de saturation**

Le test de saturation (tableau VI) montre que toutes les solutions du sol sont sous-saturées ( $IS < 0$ ) vis-à-vis de l'anhydrite, du gypse et de l'halite. Le produit ionique des solutions est inférieur au produit de solubilité de ces trois minéraux. Par contre, elles sont saturées ( $IS > 0$ ) vis-à-vis de l'aragonite, de la calcite et de la dolomite pour la majorité des échantillons. Le produit ionique des solutions est supérieur au produit de solubilité de ces trois minéraux.

Les échantillons qui sont sous-saturés ( $IS < 0$ ) vis-à-vis de l'aragonite sont (A 495H1, A 495H2, A573H3, A573H6 et B217H1).

Deux échantillons (A 495H1 et A 495H2) sont sous-saturés ( $IS < 0$ ) vis-à-vis de la calcite.

Les échantillons qui sont sous-saturés ( $IS < 0$ ) vis-à-vis de la dolomite sont (A 495H1, A 495H2, A507H4, A567H2, A567H5, A570H2, A573H3, A573H6, B217H1 et B217H4).

### **3.2. Effet de CE sur les indices de saturation (IS)**

Dans ce qui suit, nous présentons l'effet de CE sur les IS de l'aragonite, de la calcite et de la dolomite. L'effet de CE sur les IS de l'anhydrite, du gypse et de l'halite ne sera pas présenté du fait que les solutions du sol ne sont pas saturées vis-à-vis de ces derniers.

#### **3.2.1. Effet de CE sur IS vis-à-vis de l'aragonite ( $IS_{aragonite}$ )**

L'équation de régression entre ( $IS_{aragonite}$ ) et CE est la suivante :

$$IS_{aragonite} = 0,01CE + 0,33 \quad r = 0,22 \text{ et } n = 53$$

La relation est non significative ( $r=0,22$  ;  $p<0.05$ ) (figure19). Cette relation signifie que CE n'a pas un effet statistiquement significatif sur  $IS_{aragonite}$ . Nous remarquons la présence des valeurs négatives et positives de  $IS_{aragonite}$  pour les solutions les moins concentrées ( $0 \text{ dS/m} < CE < 11,87 \text{ dS/m}$ ). La droite de la régression linéaire indique une légère tendance à l'augmentation de  $IS_{aragonite}$  quand CE augmente pour les solutions les plus concentrées.

## CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau VI : Indices de saturation vis-à-vis des minéraux

Profils	Horizons	CE (dS/m)	IS Anhydrite	IS Aragonite	IS Calcite	IS Dolomite	IS Gypse	IS Halite
A 495	H1	4,95	-2,71	-1,1	-0,96	-0,72	-2,5	-4,53
	H2	11,18	-2,74	-1,86	-1,72	-2,34	-2,53	-3,86
	H3	26,1	-0,76	0,87	1,01	1,1	-0,55	-3,11
	H4	32	-0,81	0,91	1,05	1,41	-0,59	-2,97
	H5	51,7	-0,83	0,48	0,62	0,65	-0,62	-2,77
A503	H1	8,66	-1,09	0,27	0,42	0,19	-0,87	-4,08
	H2	16,82	-0,92	0,93	1,07	1,22	-0,71	-3,47
	H3	31,5	-0,82	0,41	0,55	0,41	-0,6	-3,1
	H4	25,9	-1,21	0,69	0,84	0,95	-0,99	-3,08
	H5	24,4	-0,67	1,2	1,34	1,99	-0,45	-3,13
	H6	23	-0,88	1,04	1,18	1,49	-0,66	-3,19
A507	H1	1,607	-1,62	0,76	0,9	1,76	-1,41	-5,65
	H2	7,45	-0,83	0,79	0,93	1,14	-0,61	-4,26
	H3	14,57	-0,8	0,3	0,44	0,00	-0,59	-3,54
	H4	15,02	-1,37	0,19	0,33	-0,01	-1,15	-3,49
A557	H1	1,699	-1,45	1	1,15	1,88	-1,23	-5,52
	H2	2,56	-1,72	0,38	0,53	0,73	-1,5	-5,2
	H3	6,9	-1,14	0,51	0,66	0,62	-0,92	-4,25
	H4	8,46	-0,95	0,67	0,81	0,92	-0,74	-4,03
	H5	8,84	-0,75	0,57	0,71	0,70	-0,53	-3,99
A567	H1	1,554	-1,17	0,08	0,22	0,15	-0,96	-5,83
	H2	7,27	-1,28	0,22	0,37	-0,04	-1,06	-4,25
	H3	20,3	-0,82	0,66	0,8	0,57	-0,6	-3,37
	H4	29,7	-0,73	0,58	0,72	0,31	-0,52	-2,99
	H5	30,5	-1,07	0	0,14	-0,41	-0,86	-3
A570	H1	3,14	-1,5	1,07	1,22	1,93	-1,28	-4,89
	H2	14,38	-1,07	0,1	0,24	-0,41	-0,86	-3,5
	H3	25,6	-0,71	0,93	1,07	1,21	-0,5	-3,1
	H4	25,3	-0,77	0,6	0,74	0,51	-0,56	-3,09
	H5	23,9	-1,04	1,17	1,32	1,76	-0,83	-3,17
A573	H1	1,63	-1,64	0,53	0,67	0,97	-1,42	-5,82
	H2	4,76	-1,1	0,49	0,64	0,5	-0,88	-4,51
	H3	10,26	-0,83	-0,06	0,08	-0,66	-0,62	-3,68
	H4	11,87	-0,83	0,5	0,65	0,35	-0,61	-3,64
	H5	12,78	-0,93	0,29	0,43	0,09	-0,72	-3,64
	H6	14,88	-0,98	-0,08	0,07	-0,71	-0,77	-3,52
A922	H1	5,1	-0,92	0,97	1,11	1,66	-0,7	-4,57
	H2	13,3	-1	0,99	1,13	1,55	-0,79	-3,41
	H3	20,4	-0,89	0,54	0,68	0,53	-0,68	-3,2
	H4	41,2	-0,97	0,51	0,66	0,57	-0,77	-2,45
	H5	37,7	-0,91	0,86	1	1,08	-0,71	-2,76
A923	H1	7,25	-1,62	0,41	0,55	0,73	-1,4	-3,83
	H2	12,01	-0,98	0,85	0,99	1,27	-0,76	-3,58
	H3	18,96	-0,89	0,78	0,92	0,91	-0,68	-3,22
	H4	34,9	-1,26	0,82	0,97	0,97	-1,05	-2,87
B163	H1	1,585	-1,55	0,19	0,33	0,33	-1,33	-5,56
	H2	6,77	-1,03	0,78	0,92	0,99	-0,81	-4,33
	H3	14,15	-0,89	0,36	0,51	0,12	-0,67	-3,5
	H4	12,61	-0,9	0,86	1,01	1,11	-0,68	-3,71
B217	H1	0,725	-2,51	-0,44	-0,3	-0,03	-2,29	-7,05
	H2	3,57	-1,65	0,52	0,67	0,81	-1,43	-4,81
	H3	8,43	-1,03	0,46	0,6	0,44	-0,81	-4,06
	H4	9,63	-0,68	0,25	0,39	-0,07	-0,47	-3,97

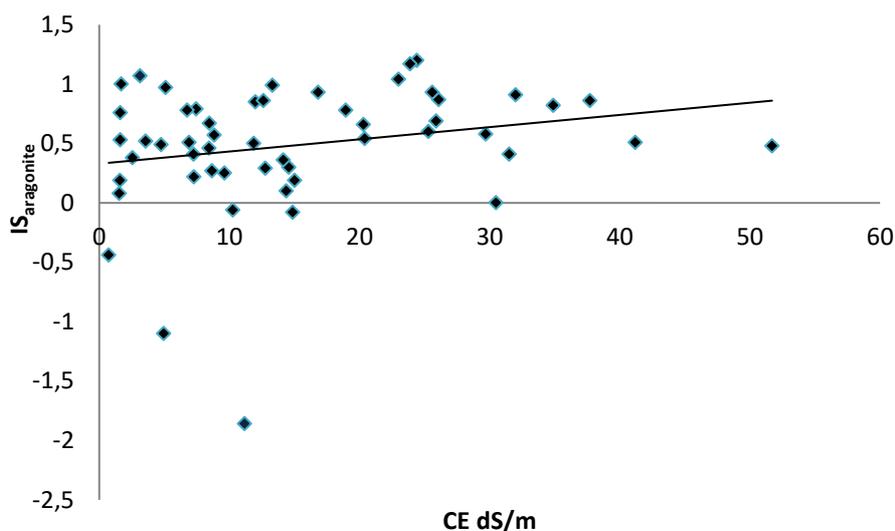


Figure 19 : Effet de CE sur  $IS_{\text{aragonite}}$

### 3.2.2. Effet de CE sur $IS$ vis-à-vis de la calcite ( $IS_{\text{calcite}}$ )

L'équation de régression entre  $IS_{\text{calcite}}$  et CE est la suivante :

$$IS_{\text{calcite}} = 0,01CE + 0,47 \quad r = 0,22 \text{ et } n = 53$$

La relation est non significative ( $r=0,22$  ;  $p<0.05$ ) (figure20). Cette relation statistique signifie que l'augmentation de CE n'a pas un effet statistiquement significatif sur la précipitation de la calcite. Nous remarquons la présence des valeurs négatives et positives de  $IS_{\text{calcite}}$  pour les solutions les moins concentrées ( $0 \text{ dS/m} < CE < 11,87 \text{ dS/m}$ ). La droite de la régression linéaire indique une légère tendance à l'augmentation de  $IS_{\text{calcite}}$  quand CE augmente pour les solutions les plus concentrées.

Nous remarquons que l'effet de CE sur  $IS_{\text{calcite}}$  est similaire à celui de CE sur  $IS_{\text{aragonite}}$ . Cette similitude serait due au fait que ce sont les mêmes ions ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{CO}_3^{2-}$ ) qui rentrent dans la précipitation de la calcite et de l'aragonite.

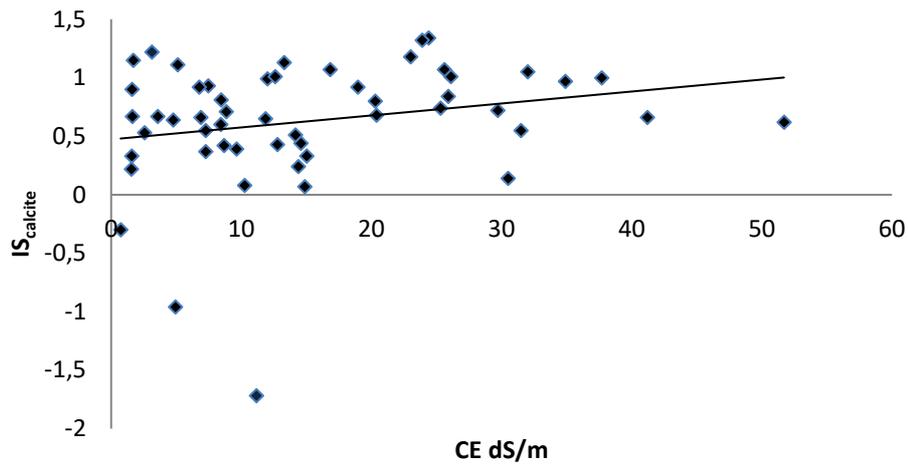


Figure 20 : Effet de CE sur  $IS_{calcite}$

### 3.2.3. Effet de la CE sur IS vis-à-vis de la dolomite ( $IS_{dolomite}$ )

L'équation de régression entre  $IS_{dolomite}$  et CE est la suivante:

$$IS_{dolomite} = 0,005CE + 0,54 \quad r = 0,077 \text{ et } n = 53$$

La relation est non significative ( $r=0,077$  ;  $p<0.05$ ) (figure21). Cette relation statistique signifie que l'augmentation de CE n'a pas un effet statistiquement significatif sur la précipitation de la dolomite. Nous remarquons la présence des valeurs négatives et positives de  $IS_{dolomite}$  pour un intervalle de CE compris entre 0 et 31,5 dS/m.

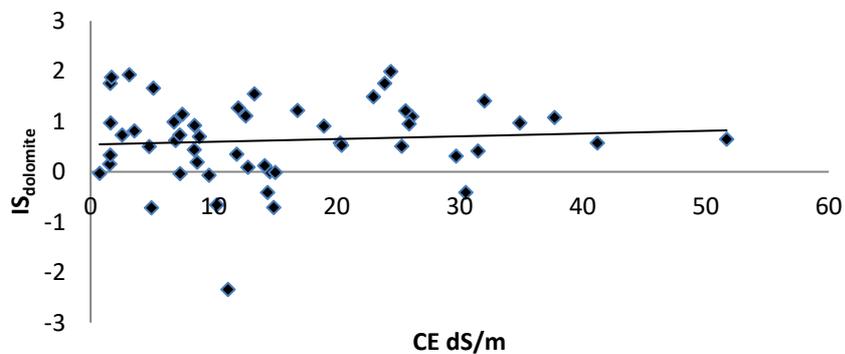


Figure 21 : Effet de CE sur  $IS_{dolomite}$

### 3.3. Synthèse et discussion

La concentration d'une solution par évaporation aboutit à une augmentation de la concentration des éléments dans la solution. A partir du moment où la solution en question devient saturée par rapport à un minéral, la précipitation de ce minéral se produit. Les sels les moins solubles s'impliquent en premier lieu dans la précipitation (Droubi, 1976).

Les tests de saturation des solutions du sol saturées vis-à-vis des minéraux montrent que :

- Les solutions du sol sont saturées vis-à-vis des minéraux calciques, à l'exception de 7 solutions. En effet, le produit ionique de ces 7 solutions est inférieur au produit de solubilité de ces deux minéraux, donc l'équilibre avec le minéral n'est pas encore atteint.
- Les solutions du sol sont saturées vis-à-vis de la dolomite, à l'exception de 10 solutions. Ceci indique que l'équilibre avec le minéral n'est pas encore atteint pour ces solutions.
- Les solutions du sol sont sous-saturées vis-à-vis de l'anhydrite, du gypse, et de l'halite. Cela veut dire que le produit ionique des solutions est inférieur au produit de solubilité de ces trois minéraux, et l'équilibre avec le minéral n'est pas encore atteint.

En général, les solutions du sol sont saturées vis-à-vis des minéraux carbonatés, l'aragonite, la calcite et la dolomite qui présentent un produit de solubilité plus faible que ceux des autres minéraux qui sont l'anhydrite, le gypse et l'halite. L'effet de CE sur IS (aragonite, calcite, dolomite) est statistiquement non significatif. IS semble indépendant du niveau de concentration de la solution, même si la droite de la régression linéaire indique une légère tendance à l'augmentation de IS quand CE augmente pour les solutions les plus concentrées. Ces résultats concordent avec ceux de Laoufi (2010) obtenus dans la même région.

### 4. SIMULATION DES CHANGEMENTS DE LA CONCENTRATION DE LA SOLUTION DU SOL

L'augmentation de la concentration de la solution du sol engendre une augmentation de la salinité (Daoud, 1993 ; Ait Mechedal, 2014). Les changements des concentrations ioniques de la solution du sol varient en fonction de la teneur en eau du sol (Gouaidia et al., 2012).

Le modèle ExtractChem simule les changements d'une solution du sol à une teneur en eau souhaitée en fonction d'une composition ionique connue. Ce volet de la recherche a pour objet de comparer les résultats obtenus par le model ExtractChem à ceux mesurés au laboratoire pour les sols de la région d'étude.

Le choix du chlorure pour calculer le facteur de concentration est basé sur sa solubilité élevée dans le sol. Le modèle ExtractChem considère que la concentration de cet élément évolue proportionnellement en fonction de la teneur en eau du sol (Suarez et Taber, 2007).

Dans la suite de l'étude le symbole c est donné pour les valeurs des paramètres simulées par le logiciel ( $CEc$ ,  $Mg^{2+c}$ ,  $Na^+c$ ,  $K^+c$ ,  $SO_4^{2-c}$  et  $HCO_3^-c$ ) et le symbole o est donné pour les valeurs mesurées aux laboratoire ( $CEo$ ,  $Mg^{2+o}$ ,  $Na^+o$ ,  $K^+o$ ,  $SO_4^{2-o}$  et  $HCO_3^-o$ ).

Les résultats obtenus par le model (tableau VII) révèlent que les facteurs de concentration varient entre 1 (échantillons A570H1 et A577H1) et 49 (échantillon A922H4) et les teneurs en eau relatives varient entre 2,04 % et 100 %.  $CEc$  varie entre 0,22 et 57,6 dS/m.

Pour l'ensemble des solutions étudiées et selon le facteur de concentration, le  $Ca^{2+c}$  se caractérise par une faible variation (6,9 meq/l à 11,78 meq/l) comparativement à  $K^+c$  (0,24 meq/l à 11,8 meq/l),  $Mg^{2+c}$  (2,16 meq/l à 105,8 meq/l) et  $Na^+c$  (11,6 meq/l à 568 meq/l).

En ce qui concerne les anions,  $HCO_3^-c$  se caractérise par une faible variation ( 5,58 meq/l à 7,83 meq/l, alors que le  $Cl^-c$  (10 meq/l à 490 meq/l) et le  $SO_4^{2-c}$  (5,42 meq/l et 266 meq/l) s'illustrent par leur forte variation .

## CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau VII : Résultats du logiciel ExtractChem

Profil	Horizon	facteur de concentration FC= cl/10	teneur en eau % 100%/FC	CEc dS/m	Ca <sup>2+</sup> c meq/l	Mg <sup>2+</sup> c meq/l	Na <sup>+</sup> c meq/l	K <sup>+</sup> c meq/l	Cl <sup>-</sup> c meq/l	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> c meq/l	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> c meq/l
A 495	H1	4	25	5,8	11,64	8,64	46	0,96	40	7,14	21,6
	H2	9	11,11	12	11,76	19,4	104	2,16	90	8,85	48,8
	H3	26	3,85	31,2	9,78	56,2	301	6,23	260	13,5	140,8
	H4	28	3,57	33,4	9,5	60,6	324	7	280	14	151,8
	H5	40	2,50	46	7,94	86,4	463	10	400	17,2	216
A503	H1	8	12,50	10,8	11,78	17,28	92,6	1,92	80	8,53	43,4
	H2	16	6,25	20,4	11,12	34,6	185	3,84	160	10,8	86,8
	H3	30	3,33	35,7	9,24	64,8	348	7,21	300	7,82	162,8
	H4	26	3,85	31,2	9,78	56,2	301	6,23	260	13,5	140,8
	H5	24	4,17	29	10,6	51,8	278	5,76	240	12,9	130
	H6	22	4,55	26,8	10,34	47,4	255	5,27	220	12,4	119,2
A507	H1	1	100	0,26	10,7	2,16	11,6	0,24	10	5,68	5,42
	H2	7	14,29	9,55	11,8	15,1	81	1,68	70	8,21	38
	H3	14	7,14	18	11,34	30,2	162	3,36	140	10,3	76
	H4	15	6,67	19,2	11,22	32,4	174	3,6	150	10,6	81,2
A557	H1	1	100	0,26	10,7	2,16	11,6	0,24	10	5,68	5,42
	H2	1.50	66,67	2,46	10,96	3,24	17,5	0,36	15	5,98	8,12
	H3	6	16,67	8,28	11,78	12,96	69,5	1,44	60	7,87	32,6
	H4	8	12,50	10,8	11,78	17,28	92,6	1,92	80	8,53	43,4
	H5	8	12,50	10,8	11,78	17,28	92,6	1,92	80	8,53	43,4
A567	H1	1.50	66,67	2,46	10,96	3,24	17,5	0,36	15	5,98	8,12
	H2	6.50	15,38	8,92	11,8	14,04	75,3	1,56	65	8,05	35,2
	H3	20	5	24,7	10,6	43,2	232	4,8	200	11,9	108,4
	H4	35	2,86	40,6	8,58	75,6	405	8,39	350	15,8	189,6
	H5	38	2,63	43,9	8,18	82,2	440	9,13	380	16,6	206
A570	H1	2.50	40	3,79	11,32	5,4	28,9	0,6	25	6,49	13,56
	H2	14	7,14	18	11,34	30,2	162	3,36	140	10,3	76
	H3	30	3,33	35,7	9,24	64,8	348	7,21	300	7,82	162,8
	H4	29	3,45	34,5	9,38	62,6	336	6,96	290	14,3	157,2
	H5	24	4,17	29	10,6	51,8	278	5,76	240	12,9	130
A573	H1	1.50	66,67	2,46	10,96	3,24	17,5	0,36	15	5,98	8,12
	H2	4	25	5,8	11,64	8,64	46	0,96	40	7,14	21,6
	H3	9.50	10,53	12,6	11,72	20,6	110	2,28	95	9	51,4
	H4	11.50	8,70	15	11,58	24,8	133	2,76	115	9,58	62,2
	H5	12	8,33	15,6	11,54	26	139	2,88	120	9,73	65
	H6	14.50	6,90	18,6	11,28	31,4	168	3,48	145	10,4	78,6
A922	H1	4	25	5,8	11,64	8,64	46	0,96	40	7,14	21,6
	H2	12	8,33	15,6	11,54	26	139	2,88	120	9,73	65
	H3	20	5	24,7	10,6	43,2	232	4,8	200	11,9	108,4
	H4	49	2,04	55	6,9	105,8	568	11,8	490	19,6	266
	H5	43	2,33	48,5	7,58	92,8	497	10,3	429	18	232
A923	H1	7	14,29	9,55	11,8	15,1	81	1,68	70	8,21	38
	H2	11	9,09	14,4	11,62	23,8	127	2,64	110	9,44	59,6
	H3	18	5,56	22,6	10,86	38,8	208	4,32	180	11,4	97,4
	H4	34	2,94	39,6	8,7	73,4	394	8,16	340	15,6	184,4
B163	H1	1.50	66,67	2,46	10,96	3,24	17,5	0,36	15	5,98	8,12
	H2	6.50	15,38	8,92	11,8	14,04	75,3	1,56	65	8,05	35,2
	H3	14	7,14	18	11,34	30,2	162	3,36	140	10,3	76
	H4	12	8,33	15,6	11,54	26	139	2,88	120	9,73	65
B217	H2	3	33,33	4,45	11,46	6,48	34,7	0,72	30	6,72	16,26
	H3	8	12,50	10,8	11,78	17,28	92,6	1,92	80	8,53	43,4
	H4	9	11,11	12	11,76	19,4	104	2,16	90	8,85	48,8

#### 4.1. Prédiction de l'évolution de la solution du sol

##### 4.1.1. La conductivité électrique

L'équation de la régression linéaire entre  $CE_o$  et  $CE_c$  est la suivante:

$$CE_c = 1,16CE_o + 0,8 \quad r = 0,97 \text{ et } n = 52$$

La relation est statistiquement significative ( $r=0,97$  ;  $p<0,05$ ) (figure 22). Ce résultat signifie que ExtractChem prédit convenablement l'évolution de  $CE_c$  à partir de  $CE_o$ . Les valeurs des  $CE_o$  et des  $CE_c$  sont mieux corrélées pour les solutions les moins concentrées ( $CE < 26,1$  dS/m). La dispersion des points se produit entre  $CE_o$  et  $CE_c$  pour les solutions les plus concentrées ( $CE_o > 26,1$  dS/m). Le point rouge de la figure 22 représente l'échantillon A495 H5, qui représente une valeur maximale de  $CE_o$  51,7dS/m, ne représente pas une valeur maximale de la  $CE_c$ .

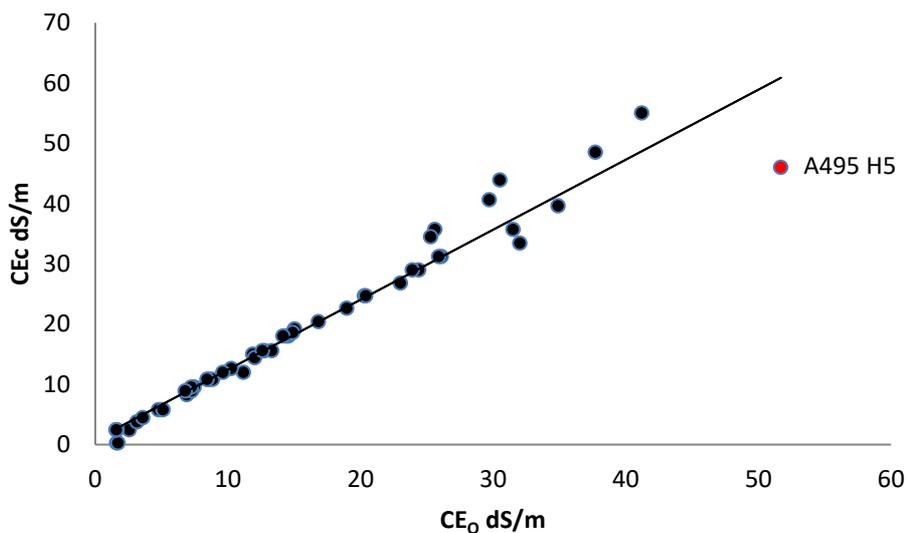


Figure 22 : Relation entre  $CE_o$  et  $CE_c$

##### 4.1.2. La concentration en $Ca^{2+}$

L'équation de la régression linéaire entre  $Ca^{2+}o$  et  $Ca^{2+}c$  est la suivante:

$$Ca^{2+}c = -0,06 de Ca^{2+}o + 12,35 \quad r = 0,67 \text{ et } n = 52$$

La relation est significative et négative ( $r=0,67$  ;  $p<0,05$ ) (figure 23). Ce résultat signifie que plus la concentration de calcium dans la solution du sol augmente, la concentration en calcium simulée diminue. Nous remarquons que la majorité des points sont concentrés dans un intervalle de  $Ca^{2+o}$  situé entre 3,35 meq/l et 23,9 meq/l, les deux points sont représentés par une couleur rouge dans la figure 23, au-delà, une nette dispersion des points est observée.

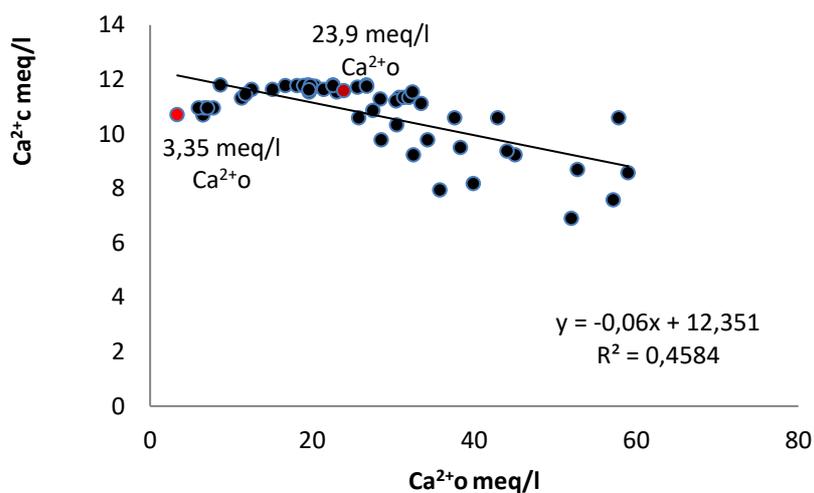


Figure 23 : Relation entre  $Ca^{2+c}$  et  $Ca^{2+o}$

#### 4.1.3. La concentration en $Mg^{2+}$

L'équation de la régression linéaire entre  $Mg^{2+c}$  et  $Mg^{2+o}$  est la suivante:

$$Mg^{2+c} = 21,18 Mg^{2+o} + 30 \quad r = 0,8 \text{ et } n = 52$$

La relation est significative ( $r=0,8$  ;  $p<0,05$ ) (figure 24). Cette relation signifie que la prédiction des changements de la concentration de la solution du sol en magnésium est significative, avec une certaine dispersion des points.

Cette dispersion elle est importante à partir d'une concentration de 2,66 meq/l. La majorité des points sont en dessous de la droite de régression, ils sont concentrés surtout dans l'intervalle 1,78 meq/l et 2,8 meq/l de  $Mg^{2+o}$ .

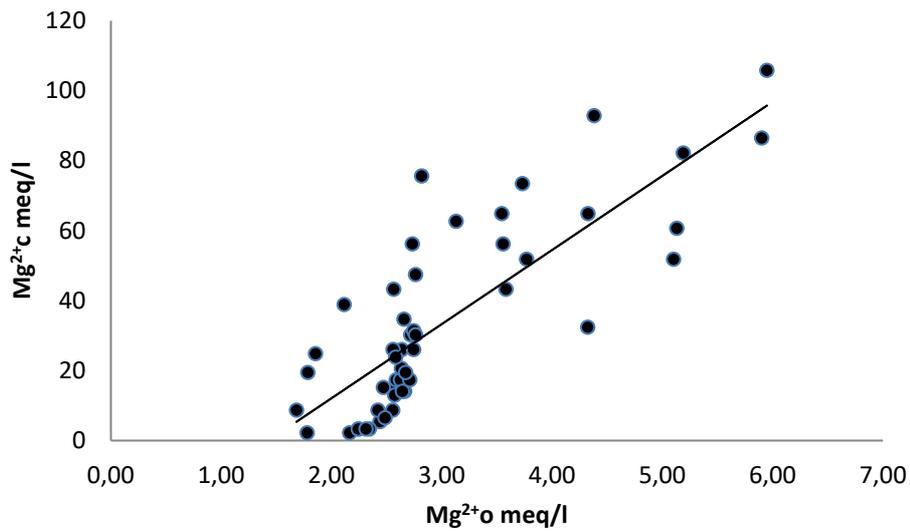


Figure 24 : Relation entre  $Mg^{2+c}$  et  $Mg^{2+o}$

#### 4.1.4. La concentration en $Na^+$

L'équation de régression entre  $Na^{+o}$  et  $Na^{+c}$  est la suivante:

$$Na^{+c} = 1,18 Na^{+o} + 8,5 \quad r = 0,91 \text{ et } n = 52$$

La relation est significative ( $r=0,91$  ;  $p<0,05$ ) (figure 25). Cette relation est statistiquement très hautement significative. La prédiction des changements de la concentration de la solution du sol en sodium est proportionnelle avec les résultats analytiques jusqu'à une concentration de 100meq/l, ou une dispersion des points se produit. L'échantillon A495 H5 (figure 25), qui présente une valeur maximale de  $Na^{+o}$  588,51 meq/l présente une valeur maximale de  $Na^{+c}$  568 meq/l.

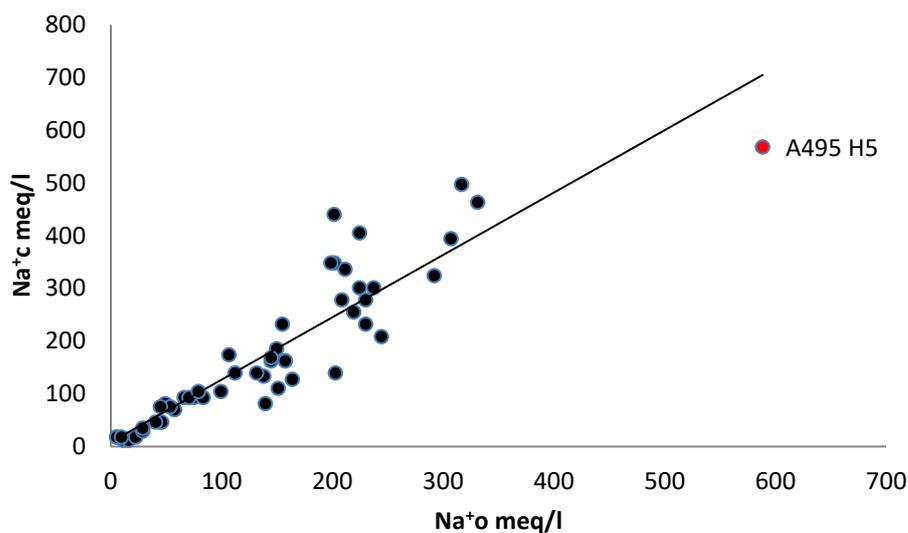


Figure 25 : Relation entre Na<sup>o</sup> et Na<sup>c</sup>

#### 4.1.5. La concentration en K<sup>+</sup>

L'équation de régression entre K<sup>o</sup> et K<sup>c</sup> est la suivante:

$$K^c = 21,03 K^o + 1,92 \quad r = 0,19 \quad \text{et } n = 52$$

La relation est non significative ( $r=0,19$  ;  $p<0,05$ ) (figure 26). Cette relation signifie que la prédiction des changements de la concentration de la solution du sol en potassium est statistiquement non satisfaisante. K<sup>c</sup> est environ 21 fois plus grande que K<sup>o</sup>. La figure 26 montre que qu'une même valeur de K<sup>o</sup> peut correspondre à plusieurs valeurs de K<sup>c</sup>.

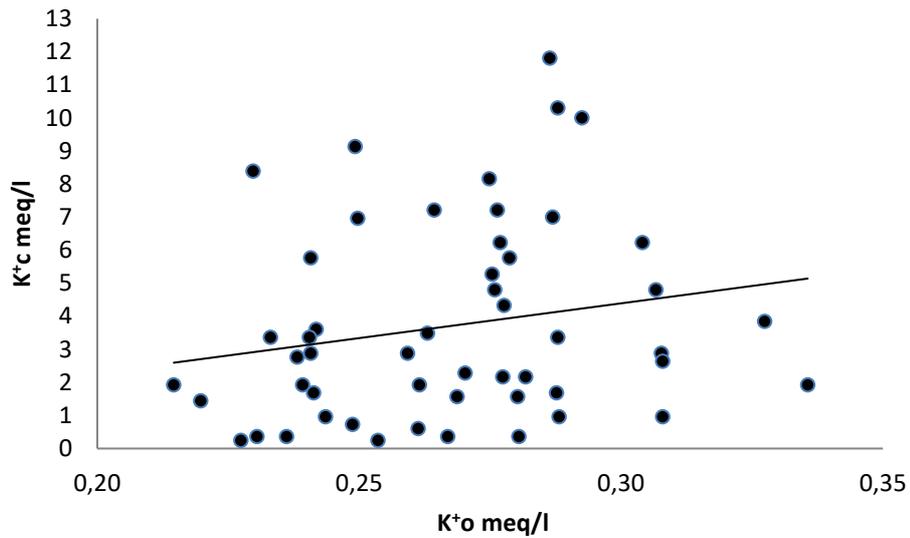


Figure 26 : Relation entre K<sup>o</sup> et K<sup>c</sup>

#### 4.1.6. La concentration en Cl<sup>-</sup>

L'équation de régression entre Cl<sup>-o</sup> et Cl<sup>-c</sup> est la suivante :

$$\text{Cl}^{-c} = 0,99 \text{Cl}^{-o} + 0,03 \quad r = 1 \quad \text{et } n = 52$$

La relation est très hautement significative ( $r=1$  ;  $p<0,05$ ) (figure27). Les points sont bien alignés sur la droite de régression. Cette relation signifie que la prédiction des changements de la concentration de la solution du sol en chlore est correcte et proportionnelle avec les résultats analytiques, et ce quelle que soit la concentration de Cl<sup>-o</sup>.

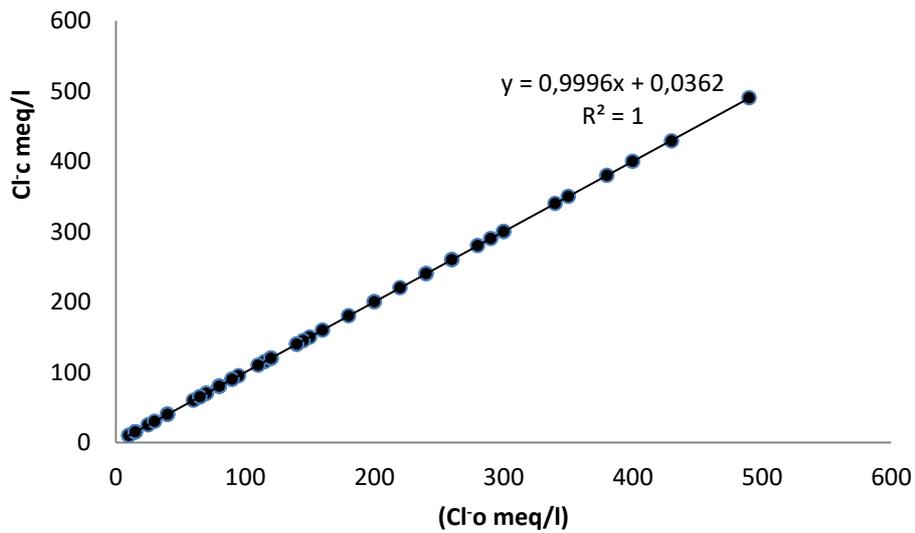


Figure 27 : Relation entre Cl<sup>-</sup>o et Cl<sup>-</sup>c

#### 4.1.7. La concentration en SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

L'équation de régression linéaire entre SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>o et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>c est la suivante:

$$SO_4^{2-c} = 4,48 SO_4^{2-o} + 28,05 \quad r = 0,41 \text{ et } n = 52$$

La relation est significative ( $r=0,41$  ;  $p<0,05$ ) (figure28). La prédiction des changements de la concentration de la solution du sol en sulfates est statistiquement satisfaisante. Nous remarquons une grande dispersion des points, avec une légère tendance de l'augmentation de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>c quand le SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>o augmente.

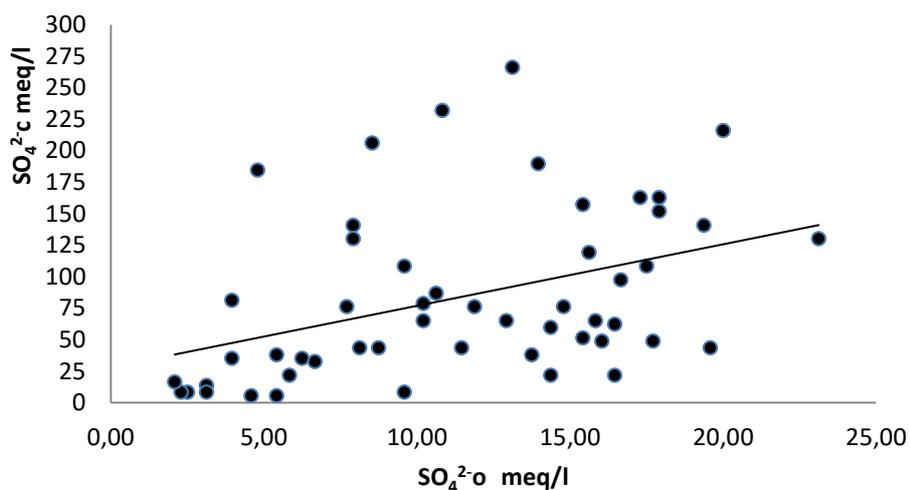


Figure 28 : Relation entre  $SO_4^{2-o}$  et  $SO_4^{2-c}$

#### 4.1.8. La concentration en $HCO_3^-$

L'équation de régression linéaire entre  $HCO_3^-o$  et  $HCO_3^-c$  est la suivante:

$$HCO_3^-c = 0,6 HCO_3^-o + 8,77 \quad r = 0,03 \text{ et } n = 52$$

La relation est non significative ( $r=0,03$  ;  $p<0,05$ ) (figure 29). Ce résultat signifie que ExtractChem ne prédit pas convenablement les changements de la concentration de la solution du sol en carbonates calcium. Nous remarquons que pour une même valeur de  $HCO_3^-o$  ,  $HCO_3^-c$  peut augmenter ou diminuer.

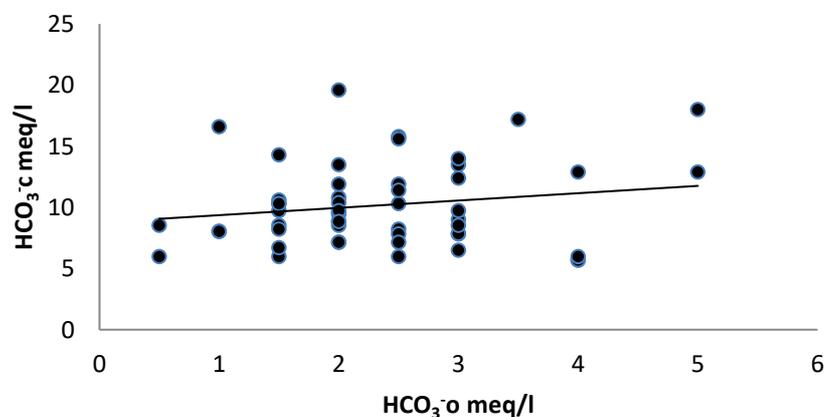


Figure 29 : Relation entre  $HCO_3^-o$  et  $HCO_3^-c$

### 4.2. L'écart de prédiction du model

L'écart (ou erreur) de prédiction du model est la différence entre la valeur du paramètre mesuré et la valeur du paramètre calculé par le modèle de simulation (Wallach et al., 2006).

Dans la suite de ce document, l'analyse de l'écart de prédiction du model n'est réalisée que pour les paramètres qui présentent des relations statistiques significatives et positives entre leurs valeurs mesurées et leurs valeurs simulées (CE,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$  et  $SO_4^{2-}$ ).

Les écarts de prédiction de la concentration de la solution du sol par le logiciel ExtractChem sont variables pour les paramètres étudiés (tableau VIII). Les valeurs prédites sont souvent sous-estimées ou surestimées avec des écarts très variables d'un échantillon à l'autre.

La prédiction de CE et  $Mg^{2+}$  est surestimée pour tous les échantillons sauf pour un seul échantillon (A507H1) qui présente une valeur de CE mesurée faible (1,6 dS/m).

La prédiction de  $Na^+$  est toujours surestimée sauf pour une dizaine d'échantillons (A507H1, A557H1, A557H2, A573H2, A573H3, A922H2, A922H4, A923H1, A923H2, A923H3). Ces échantillons sont aussi bien des horizons de surface que de profondeur.

La prédiction de  $Cl^-$  est égale à la valeur mesurée pour tous les échantillons sauf pour l'échantillon A922H5 pour lequel l'écart est de 1meq/l.

La prédiction de  $SO_4^{2-}$  est surestimée pour tous les échantillons sauf pour les horizons de surface A507H1 et A567H1.

Tous ces résultats sont illustrés par la figure 30 qui montre que certains paramètres ( $Cl^-$  et CE) sont mieux prédits que d'autres ( $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  et  $SO_4^{2-}$ ). Elle montre aussi que l'amplitude de l'écart entre les valeurs mesurées et calculées dépend de l'échantillon considéré. La figure 30 montre aussi que ExtractChem a tendance à surestimer les valeurs prédites sauf pour quelques échantillons (10 échantillons) dans les lesquels les valeurs de  $Na^+$  sont sous-estimés.

## CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau VIII : L'écart de prédiction du model pour les différents paramètres

Profil	Horizon	L'erreur CE <sub>o</sub> -CE <sub>c</sub> (ds/m)	L'erreur Mg <sup>2+</sup> <sub>o</sub> -Mg <sup>2+</sup> <sub>c</sub> (meq/l)	L'erreur Na <sup>+</sup> <sub>o</sub> -Na <sup>+</sup> <sub>c</sub> (meq/l)	L'erreur Cl <sub>o</sub> -Cl <sub>c</sub> (meq/l)	L'erreur SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> <sub>o</sub> - SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> <sub>c</sub> (meq/l)
<b>A 495</b>	H1	-0,85	-6,96	-2,14	0	-5,14
	H2	-0,82	-17,61	-4,69	0	-32,76
	H3	-5,1	-53,47	-76,55	0	-121,43
	H4	-1,4	-55,47	-32,01	0	-133,88
	H5	5,7	-80,5	-131,96	0	-196
<b>A503</b>	H1	-2,14	-14,66	-26,39	0	-34,65
	H2	-3,58	-31,94	-35,37	0	-76,18
	H3	-4,2	-60,48	-146,41	0	-144,88
	H4	-5,3	-52,64	-63,64	0	-132,88
	H5	-4,6	-46,7	-47,91	0	-106,88
	H6	-3,8	-44,64	-35,67	0	-103,58
<b>A507</b>	H1	1,34	0	-0,02	0	0
	H2	-2,1	-12,52	-32,01	0	-24,25
	H3	-3,43	-27,44	-17,49	0	-61,21
	H4	-4,18	-28,08	-67,41	0	-77,24
<b>A557</b>	H1	1,44	-0,38	4,28	0	-0,84
	H2	0,1	-0,99	4,84	0	-5,62
	H3	-1,38	-10,39	-11,9	0	-25,93
	H4	-2,34	-14,69	-17,78	0	-31,94
	H5	-1,96	-14,66	-9,17	0	-23,82
<b>A567</b>	H1	-0,91	-1	-12,38	0	1,46
	H2	-1,65	-11,38	-22,01	0	-31,24
	H3	-4,4	-39,62	-77,24	0	-98,82
	H4	-10,9	-72,78	-180,55	0	-175,64
	H5	-13,4	-77,01	-238,41	0	-197,46
<b>A570</b>	H1	-0,65	-2,95	-0,1	0	-10,44
	H2	-3,62	-27,48	-4,58	0	-68,29
	H3	-10,1	-61,25	-149,38	0	-145,51
	H4	-9,2	-59,47	-124,46	0	-141,78
	H5	-5,1	-48,03	-69,43	0	-122,08
<b>A573</b>	H1	-0,83	-0,9	-12,38	0	-5,83
	H2	-1,04	-6,08	0,02	0	-15,77
	H3	-2,34	-17,97	40,97	0	-35,98
	H4	-3,13	-22,94	5,05	0	-45,74
	H5	-2,82	-23,36	-7,4	0	-52,08
	H6	-3,72	-28,66	-23,49	0	-68,39
<b>A922</b>	H1	-0,7	-6,22	-5,62	0	-7,23
	H2	-2,3	-23,44	63,62	0	-49,17
	H3	-4,3	-40,64	-1,91	0	-90,9
	H4	-13,8	-99,85	20,51	0	-252,88
	H5	-10,8	-88,42	-180,51	1	-221,17
<b>A923</b>	H1	-2,3	-12,63	58,39	0	-32,58
	H2	-2,39	-21,22	36,88	0	-45,23
	H3	-3,64	-36,68	36,34	0	-80,73
	H4	-4,7	-69,67	-86,94	0	-179,61
<b>B163</b>	H1	-0,88	-0,93	-8,07	0	-5
	H2	-2,15	-11,4	-30,62	0	-28,95
	H3	-3,85	-27,44	-4,58	0	-64,13
	H4	-2,99	-23,25	-26,78	0	-54,79
<b>B217</b>	H2	-0,88	-4	-5,9	0	-14,18
	H3	-2,37	-14,57	-22,09	0	-35,28
	H4	-2,37	-16,73	-24,88	0	-31,09

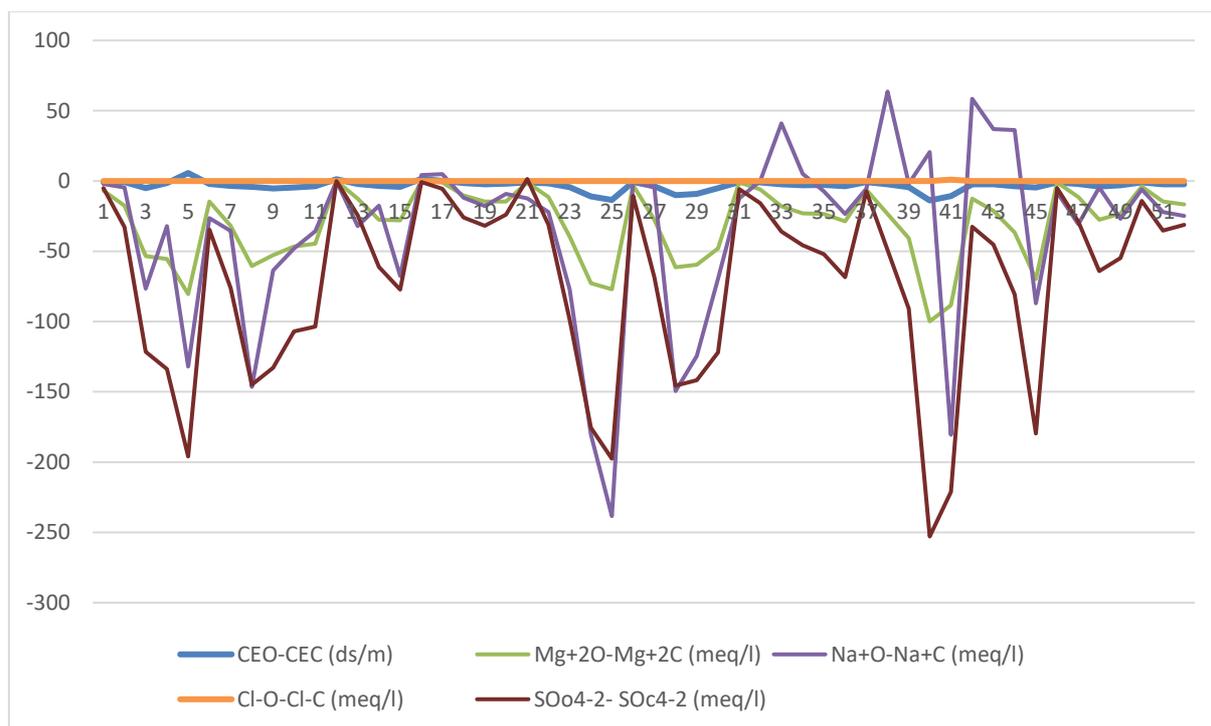


Figure 30 : Variation des écarts de prédiction du modèle

#### 4.2.1. Relation entre CE<sub>o</sub> et les écarts absolus des paramètres étudiés

##### 4.2.1.1. Relation entre CE<sub>o</sub> et CE<sub>o</sub>-CE<sub>c</sub>

L'équation de la régression linéaire entre CE<sub>o</sub> et CE<sub>o</sub>-CE<sub>c</sub> est la suivante:

$$CE_o - CE_c \left( \frac{dS}{m} \right) = 0,21 CE_o \left( \frac{dS}{m} \right) + 0,39 \quad r = 0,76 \text{ et } n = 52$$

Cette relation est statistiquement significative ( $r=0,76$  ;  $p<0.05$ ). Ceci signifie que l'augmentation de CE<sub>o</sub> s'accompagne d'une augmentation de l'écart de prédiction de CE, surtout entre des valeurs de CE<sub>o</sub> inférieures à 26,1dS/m comme illustré par la figure 31. Dans cette gamme de valeur, une très forte liaison existe entre l'augmentation de CE<sub>o</sub> et l'augmentation de l'écart de prédiction de CE. Au-delà de ce seuil, une importante dispersion du nuage de points est observée, la liaison devient plus faible (figure31) et pour des valeurs assez proches de CE<sub>o</sub>, les écarts absolus sont parfois faibles et parfois très forts. L'ensemble de ces résultats signifie que plus CE<sub>o</sub>

augmente et plus les écarts absolus entre valeurs observées et valeurs prédites sont grands. De ce fait, les meilleures prédictions de CEC par ExtractChem ne sont réalisées que pour les plus faibles valeurs de CEO.

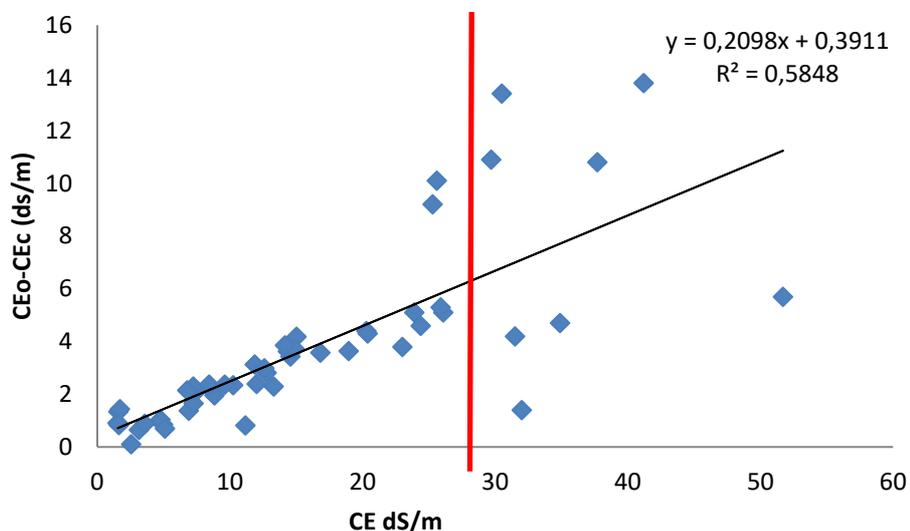


Figure 31 : Relation entre la CEO (dS/m ) et CEO-CE<sub>c</sub> (ds/m)

#### 4.2.1.2. Relation entre CEO et Mg<sup>2+</sup><sub>o</sub>-Mg<sup>2+</sup><sub>c</sub>

L'équation de régression linéaire entre CEO et Mg<sup>2+</sup><sub>o</sub>-Mg<sup>2+</sup><sub>c</sub> est la suivante:

$$\text{Mg}^{2+}_o - \text{Mg}^{2+}_c \left( \frac{\text{meq}}{\text{l}} \right) = 2,15 \text{ CEO} \left( \frac{\text{dS}}{\text{m}} \right) - 3,15 \quad r = 0,97 \text{ et } n = 52$$

La relation entre CEO et les écarts absolus entre Mg<sup>2+</sup><sub>o</sub> et Mg<sup>2+</sup><sub>c</sub> est positive et statistiquement significative (r=0,97 ; p<0.05). Cette relation signifie que l'augmentation de CEO s'accompagne d'une augmentation de l'écart de prédiction de Mg<sup>2+</sup> surtout pour les valeurs de CEO inférieures à 26,1dS/m. Dans cette gamme de valeur, les points se situent sur la droite de la régression linéaire (figure 32) et traduisent donc une très forte liaison entre l'augmentation de CEO et l'augmentation de l'écart de prédiction de Mg<sup>2+</sup>. Au-delà de ce seuil, une dispersion du nuage de points est observée (figure32). Ce résultat signifie que les meilleures prédictions de Mg<sup>2+</sup><sub>c</sub> par

ExtractChem ne le sont que pour les plus faibles valeurs de CEo. En effet, plus CEo augmente et plus les écarts entre  $Mg^{2+}_c$  et  $Mg^{2+}_o$  sont grands.

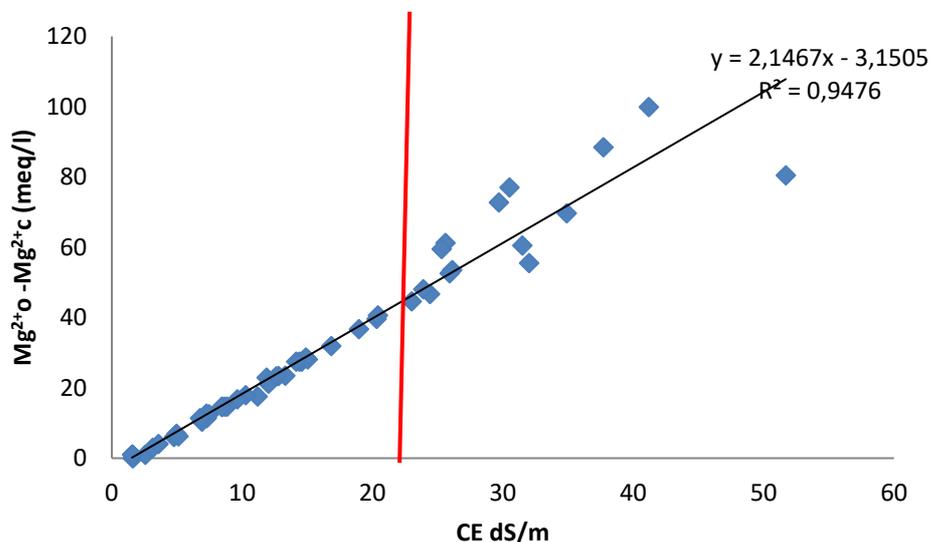


Figure 32 : Relation entre la CEo (dS/m ) et  $Mg^{2+}_o - Mg^{2+}_c$  (meq/l)

#### 4.2.1.3. Relation entre CEo et $Na^+_o - Na^+_c$

L'équation de régression linéaire entre CEo et  $Na^+_o - Na^+_c$  est la suivante:

$$Na^+_o - Na^+_c \left( \frac{meq}{l} \right) = 3,26 CE \left( \frac{dS}{m} \right) - 5,51 \quad r = 0,70 \text{ et } n = 52$$

Cette relation est positive et statistiquement significative ( $r=0,70$  ;  $p<0.05$ ). Elle signifie que l'augmentation de CEo s'accompagne d'une augmentation de l'écart de prédiction de  $Na^+$ . Cependant, la dispersion du nuage de points est assez importante, surtout pour les fortes valeurs de CE comme illustré par la figure33. Ce résultat signifie que les meilleures prédictions de  $Na^+$  par ExtractChem ne sont réalisées que pour les plus faibles CE. La figure 33 montre aussi que pour une même gamme de

salinité, les écarts entre  $\text{Na}^{\text{o}}$  et  $\text{Na}^{\text{c}}$  peuvent être très faibles (bonne prédiction) ou très forts (mauvaise prédiction).

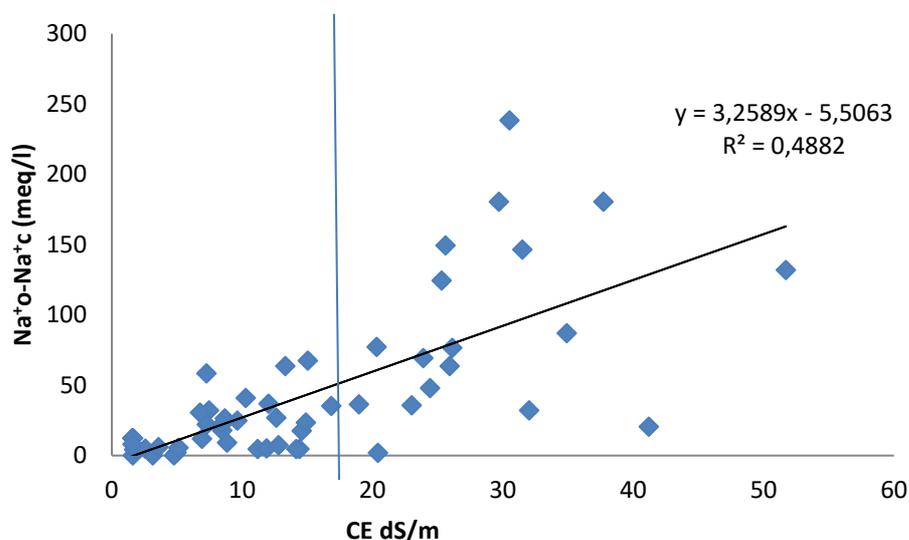


Figure 33 : Relation entre la CEo (dS/m) et  $\text{Na}^{\text{o}} - \text{Na}^{\text{c}}$  (meq/l)

#### 4.2.1.4. Relation entre CEo et $\text{SO}_4^{2-\text{o}} - \text{SO}_4^{2-\text{c}}$

L'équation de régression linéaire entre CEo et  $\text{SO}_4^{2-\text{o}} - \text{SO}_4^{2-\text{c}}$  est la suivante :

$$\text{SO}_4^{2-\text{o}} - \text{SO}_4^{2-\text{c}} \left( \frac{\text{meq}}{\text{l}} \right) = 5,34 \text{ CE} \left( \frac{\text{dS}}{\text{m}} \right) - 10,9 \quad r = 0,97 \text{ et } n = 52$$

La relation est positive et statistiquement significative ( $r=0,97$  ;  $p<0.05$ ). Cette relation signifie que l'augmentation de CEo s'accompagne par une augmentation de l'écart de prédiction de  $\text{SO}_4^{2-}$ .  $\text{SO}_4^{2-}$  a pratiquement le même comportement que  $\text{Mg}^{2+}$ , les valeurs de CEo inférieures à 26,1dS/m sont très proches de la droite de la régression linéaire (figure 34) et traduisent donc une très forte liaison entre l'augmentation de CEo et l'augmentation de l'écart de prédiction de  $\text{SO}_4^{2-}$ . Au-delà de ce seuil, une dispersion du nuage de points est observée (figure34). Comme pour les précédents paramètres, les meilleures prédictions de  $\text{SO}_4^{2-\text{c}}$  par ExtractChem le sont pour les échantillons les moins salés (faible CE).

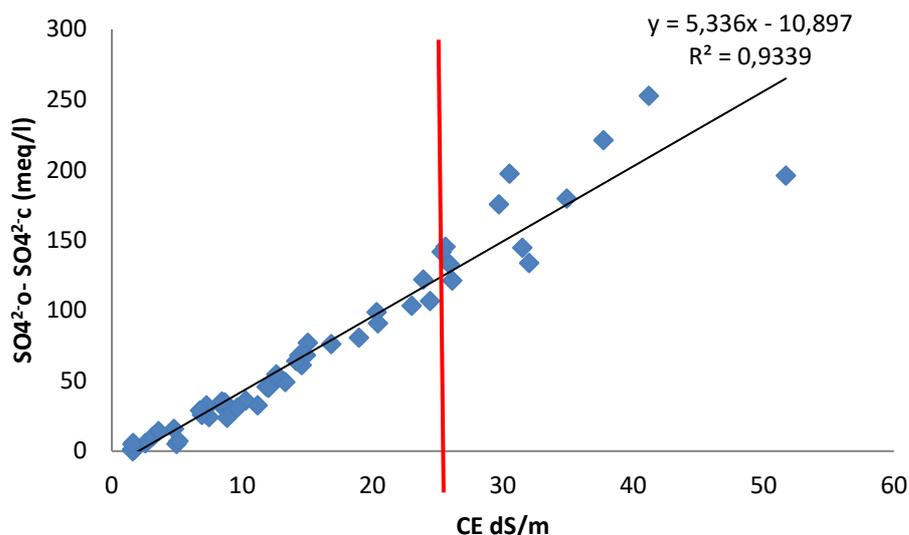


Figure 34: Relation entre la CEo (dS/m ) et SO<sub>4</sub><sup>2-o</sup>- SO<sub>4</sub><sup>2-c</sup> (meq/l)

#### 4.2.2. Analyse statistique des écarts de prédiction du model

L'analyse statistique (tableau IX) est réalisée sur les valeurs absolues des écarts de prédiction pour CE, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Cl<sup>-</sup>, qui présente des écarts nuls entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites pour 51 échantillons et un écart de 1meq/l pour un seul échantillon n'a pas été pris en considération.

Tableau IX : Statistiques descriptives des écarts absolus de prédiction du model

Statistique	CEo-CEc (dS/m)	Mg <sup>2+o</sup> -Mg <sup>2+c</sup> (meq/l)	Na <sup>+o</sup> -Na <sup>+c</sup> (meq/l)	SO <sub>4</sub> <sup>2-o</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-c</sup> (meq/l)
Nb. observations	52	52	52	52
Minimum	0,1	0	0,02	0
Maximum	13,8	99,85	238,41	252,88
1er Quartile	1,43	11,39	7,02	25,51
Médiane	2,6	23,3	25,63	50,62
3ème Quartile	4,32	47,03	63,62	110,52
Moyenne	3,65	30,23	45,18	72,09
Coefficient de variation	87%	84%	120%	89%

Les résultats du tableau IX indiquent que les écarts de valeurs entre les paramètres observés et les paramètres calculés sont très variables. Ainsi, ces écarts sont parfois pratiquement nuls (écarts minimum) ce qui suggère que la prédiction du modèle est bonne pour certains échantillons. Mais pour d'autres échantillons, les écarts sont excessifs et peuvent même dépasser de plusieurs fois la valeur du paramètre observé comme c'est surtout le cas de  $Mg^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$ . Dans ces conditions, la prédiction du modèle est médiocre. Toutefois dans le détail, les indicateurs statistiques du tableau IX révèlent des comportements différents entre les quatre paramètres étudiés :

- La CE : Sachant que 75 % des échantillons ont des valeurs de  $CE_o$  supérieures à 6,9 dS/m (tableau III), nous pouvons considérer que 50 % des écarts des valeurs entre  $CE_o$  et  $CE_c$  déterminées par la médiane (2,6 dS/m) (tableau IX) sont acceptables. De même, 75 % des écarts sont inférieurs à 4,32 dS/m ce qui, en regard de la structure de  $CE_o$  (75 % de  $CE_o > 6,9$  dS/m), conforte une relative bonne prédiction du modèle.

- Le  $Na^+$  : Les valeurs de  $Na^+_o$  varient entre moins de 1 meq/l et 588 meq/l dont 75 % ont des valeurs inférieures à 208 meq/l (tableau III). L'écart maximal entre  $Na^+_o$  et  $Na^+_c$  est de 238 meq/l avec un écart moyen égale à 45 meq/l. Ces résultats traduisent une relative mauvaise prédiction du modèle vis à vis du  $Na^+$  même si les indicateurs statistiques du tableau IX paraissent nettement plus faibles que ceux du tableaux III.

- Le  $Mg^{2+}$  : A l'exception de la valeur minimum (0 meq/l), toutes les valeurs des indicateurs statistiques des écarts (tableau IX) sont nettement plus fortes que celles de  $Mg^{2+_o}$ . Ce résultat suggère que le modèle prédit très mal les valeurs de  $Mg^{2+_c}$ .

- Les  $SO_4^{2-}$  : Le comportement du modèle vis-à-vis des sulfates est exactement le même qu'avec le  $Mg^{2+}$  mais avec des écarts de prédiction encore plus grands. Ce résultat signifie que le modèle prédit encore plus mal les sulfates.

En faisant abstraction de la nature de l'élément et de son impact dans les processus physicochimiques du sol, et en considérant l'écart moyen entre la valeur observée et la valeur calculée, il s'avère que les quatre éléments sont pratiquement mal prédits dans l'ordre  $SO_4^{2-}$  (72) >  $Na^+$  (45) >  $Mg^{2+}$  (30) > CE (3).

### 4.2.3. Les classes de prédiction

Dans cette approche, nous avons classé les écarts de prédiction du model en 4 classes en fonction de la valeur de l'écart entre la valeur mesurée et la valeur estimée par rapport à la valeur mesurée et exprimée en pourcent selon l'équation  $\frac{\text{valeur mesurée} - \text{valeur estimée}}{\text{valeur mesurée}} \times 100$ . Le résultat obtenu exprime donc l'erreur de prédiction en pourcentage. Les classes proposées sont réparties comme suit :

- Classe 1 : Erreur < 5% : Bonne prédiction
- Classe 2 : 5% < erreur < 10% : Prédiction acceptable
- Classe3 : 10% < erreur < 20% : Prédiction moyenne
- Classe4 : Erreur > 20% : Prédiction médiocre

Le nombre des échantillons dans chaque classe est calculé en pourcentage par rapport au nombre total des échantillons. Les résultats sont présentés dans le tableau X.

Tableau X : Classes de prédiction du model

	prédiction Bonne %	Prédiction acceptable %	Prédiction moyenne %	Prédiction médiocre %
CE dS/m	3,85 %	1,92 %	23,07 %	71,15 %
Mg <sup>2+</sup> meq/l	1,92 %	0 %	0 %	98,07 %
Na <sup>+</sup>	19,23 %	1,92 %	13,46 %	65,38 %
Cl <sup>-</sup>	100 %	0 %	0 %	0 %
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1,92 %	0 %	3,85 %	94,23 %

Les résultats du tableau X suggèrent que les paramètres étudiés peuvent être subdivisés en trois groupes selon le % d'appartenance à l'une des classes de prédiction :

- Le groupe 1 est représenté par Cl<sup>-</sup> dont la prédiction est bonne à 100 %.
- Le groupe 2 est représenté par Mg<sup>2+</sup> et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> dont la prédiction est médiocre respectivement à 94 % et 98 %.

- Le groupe 3 est représenté par  $\text{Na}^+$  et CE dont les prédictions bonnes à moyennes représentent respectivement 35 % et 30 %. Ce résultat signifie que la classe prédiction médiocre pour ces deux paramètres est largement dominante (environ les 2/3 des échantillons). Les résultats montrent aussi que  $\text{Na}^+$ , avec 19 % qui appartiennent à la classe prédiction bonne, est mieux prédit par le logiciel que  $\text{Mg}^{2+}$  (3,8 % prédiction bonne).

Ces résultats montrent que le modèle ExtractChem prédit d'une façon excellente les  $\text{Cl}^-$  dont les valeurs calculées se situent toutes dans la classe 'bonne prédiction'. Le  $\text{Na}^+$  et la CE, avec respectivement 35 % et 30 % des valeurs calculées qui se situent dans les classes 'bonne à moyenne prédiction', sont moyennement à mal prédits par le modèle du fait que 65 % et 70 % de leurs valeurs prédites se situent dans la classe 'prédiction médiocre'. Le  $\text{Mg}^{2+}$  et les  $\text{SO}_4^{2-}$  avec 98 % et 94 % des valeurs prédites qui se situent dans la classe 'prédiction médiocre' sont très mal prédits par le modèle.

### 4.3. Discussion

Les relations statistiques entre les valeurs analytiques observées et les valeurs simulées par le logiciel sont :

- statistiquement significatives et positives pour les variables CE,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$
- statistiquement significative et négative pour  $\text{Ca}^{2+}$ .
- statistiquement non significatives pour  $\text{K}^+$  et  $\text{HCO}_3^-$ .

D'après les relations statistiques, le modèle prédit correctement l'allure de l'évolution de la composition chimique des solutions concentrées par évaporation à l'exception du calcium, des carbonates et du potassium.

Dans les sols du Bas-Chelif, les carbonates et le potassium ne suivent pas le facteur de concentration, ils seraient contrôlés par d'autres phénomènes (Daoud, 1993).

L'évolution des carbonates est contrôlée par la précipitation ce qui empêche l'augmentation de cet élément lors de la concentration de la solution (Daoud, 1993 ; Laoufi, 2010 ; Ait Mechedal, 2014). Pour le potassium, la relation non significative entre les valeurs analytiques observées et les valeurs simulées par le logiciel peut être due à la rétrogradation de ce dernier, Ce phénomène empêche l'augmentation de la concentration de  $K^+$  dans la solution du sol (Ait Mechedal, 2017).

Lors de la précipitation de la calcite, les éléments qui entrent dans la composition de ce sel sont soustraits à la solution dans des proportions qui ne sont pas obligatoirement celles de la solution initiale (Droubi, 1976). De ce fait, le logiciel ne prend en considération que la précipitation de la calcite, ce qui explique la diminution de la concentration de calcium simulée. Or, dans les sols du Bas-Chelif, la précipitation de la calcite n'empêche pas l'augmentation du calcium lors de la concentration de la solution du sol (Daoud, 1993 ; Laoufi, 2010 ; Ait Mechedal, 2014).

Le calcium dans les sols salés du Bas-Chelif suit le facteur de concentration selon le model suivant :

$$Ca^{2+} \text{ o meq/l} = 0,99 \text{ facteur de cocentration} + 11,61$$

Avec les paramètres du model :  $n = 52$ ,  $r=0,87$ , et  $\alpha=0,05$ .

Concernant les paramètres qui présentent une bonne simulation de l'allure de l'évolution de leur concentration dans la solution du sol (CE,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$ ), les valeurs prédites sont dans la plupart des cas sous-estimées ou surestimées avec des écarts souvent très variables d'un échantillon à l'autre.

Les variations des écarts de prédiction de  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$  sont élevées avec des coefficients de variation de 120%, 84%, 89% respectivement. Les écarts de prédiction sont surestimés pour le  $Mg^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$ , et ils varient entre sous-estimés pour les solutions les moins concentrées à surestimées pour les solutions les plus concentrées pour le  $Na^+$ .

L'augmentation de CE entraine une augmentation de l'écart de prédiction de CE,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$  par le logiciel. Ce dernier prédit donc mieux les solutions les moins concentrées par rapport aux solutions les plus concentrées.

Les écarts de prédiction peuvent être dus à des phénomènes qui contrôlent l'évolution de ces éléments ( $\text{CE}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ ) dans la solution du sol. Ces phénomènes perturbent la cadence de l'augmentation de la concentration de ces derniers dans la solution du sol suivant le facteur de concentration.

Le sodium est affecté par le phénomène de sodisation des sols (Daoud, 1993 ; Hadj Miloud, 2010 ; Ait Mechedal, 2014 ; Hadj Miloud, et al., 2018). Les sulfates pourraient être affectés par le lessivage et le magnésium par précipitation de la dolomite (Laoufi, 2010 ). La variation de la concentration de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  dans la solution du sol influence la variation de CE suivant le facteur de concentration.

Les résultats montrent que ExtractChem prédit d'une façon parfaite les  $\text{Cl}^-$  (100 % de bonnes valeurs prédites), d'une façon moins que moyenne les valeurs de  $\text{Na}^+$  et CE (30 à 35 % des valeurs sont bonnes à moyennement prédites) et d'une façon médiocre les valeurs de  $\text{Mg}^{2+}$  et des  $\text{SO}_4^{2-}$  (plus de 94 % des valeurs sont très mal prédites). Ce résultat suggère que dans le contexte de cette étude, ExtractChem ne peut être utilisé que pour la prédiction des chlorures. Dans leurs travaux sur les sols gypseux, Callaghan et al. (2016) ont également trouvé des écarts entre les valeurs simulées par le logiciel et les valeurs observés de quelques paramètres du sol ( $\text{CEC} \pm 7,2\%$ ,  $\text{CE} \pm 10,3\%$  et le  $\text{SAR} \pm 3,2\%$ ). Il semble que la fiabilité du logiciel ExtractChem est tributaire du contexte pédologique dans lequel le modèle est utilisé. De ce fait, il est utile d'ajuster le modèle en prenant en considération des phénomènes comme la précipitation des autres minéraux à part la calcite et le gypse , la rétrogradation, la sodisation et le lessivage pour une meilleure précision de la simulation.

## **5. LE SELENIUM DANS LE SOL**

L'analyse du sélénium total dans le sol a été réalisée sur 36 échantillons provenant de 7 profils qui couvrent la gamme de salinité des échantillons étudiés ( $0,73 \text{ dS/m} < \text{CE} < 51,7 \text{ dS/m}$ ).

### **5.1. Les teneurs totales en sélénium**

La teneur du Se dans le sol varie de  $0,971 \text{ mg/kg}$  à  $7,08 \text{ mg/kg}$  (Tableau XI). Selon les normes de Tan et al. (1994), aucun échantillon de sol n'est considéré déficient en Se ( $\text{Se total} < 0,15 \text{ mg/kg}$ ) ou même moyennement pourvu en Se ( $0,15 \leq \text{Se total} \leq 0,4 \text{ mg/kg}$ ). En effet, les résultats indiquent que 21 échantillons sont classés à teneur élevée ( $0,40 \leq \text{Se total} \leq 3 \text{ mg/kg}$ ) et 15 autres à teneur excessive ( $\text{Se total} > 3 \text{ mg/kg}$ ). Les sols étudiés présentent donc des teneurs en Se élevées à excessives.

L'histogramme des fréquences des classes des teneurs en Se total montre une dominance de la classe I à teneur élevée avec  $58,33 \%$  des échantillons par rapport à la classe à teneur excessive  $41,67 \%$  (figure 35).

### **5.2. Distribution de la salinité et du sélénium dans les profils**

La distribution du Se dans le profil est hétérogène. Le maximum et le minimum de Se peut se trouver à la surface ou bien au milieu ou bien à la base du profil selon les différents profils du sol présentés. Cette distribution de Se dans les profils du sol ne suit pas les profils salins. La distribution des profils salins correspond au profil de type D selon Servant (1976), ou le maximum de salinité se situe à la base du profil (Figure 36).

Tableau XI: Les teneurs totales en Se

Profils	Horizons	CE ( dS/m)	Se (mg/kg)
A 495	H1	4,95	2,34
	H2	11,18	5,43
	H3	26,1	1,22
	H4	32	0,97
	H5	51,7	7,08
A503	H1	8,66	4,8
	H2	16,82	1,42
	H3	31,5	4,65
	H4	25,9	2,11
	H5	24,4	1,98
	H6	23	1,87
A567	H1	1,55	1,45
	H2	7,27	5,23
	H3	20,3	2,34
	H4	29,7	5,74
	H5	30,5	2,13
A570	H1	3,14	5,43
	H2	14,38	1,87
	H3	25,6	1,98
	H4	25,3	1,11
	H5	23,9	1,78
A573	H1	1,63	1,56
	H2	4,76	4,67
	H3	10,26	2,53
	H4	11,87	2,67
	H5	12,78	5,46
	H6	14,88	2,87
A922	H1	5,1	4,97
	H2	13,3	1,64
	H3	20,4	4,03
	H4	41,2	5,79
	H5	37,7	2,82
B217	H1	0,73	1,37
	H2	3,57	4,34
	H3	8,43	5,17
	H4	9,63	5,54

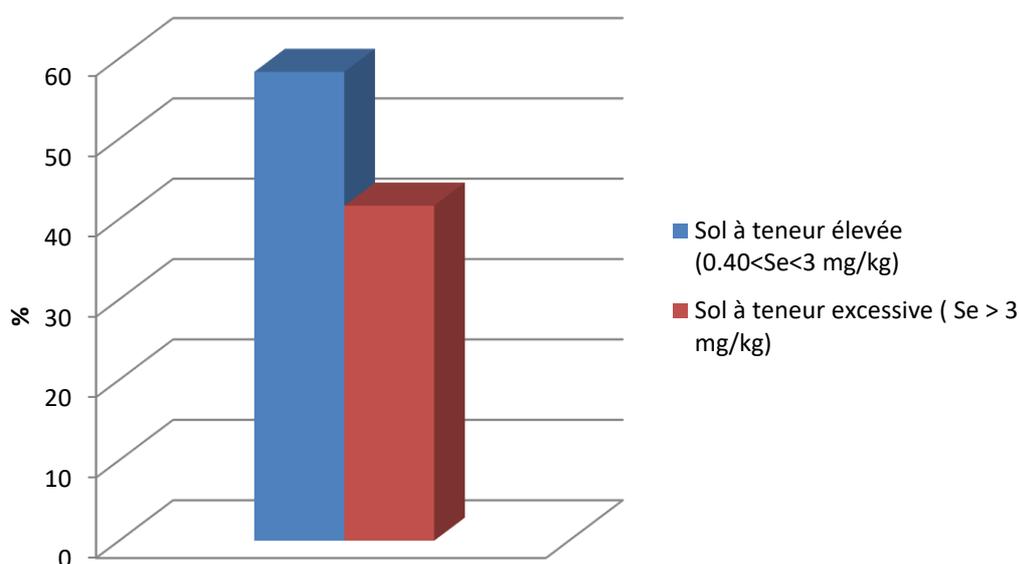


Figure 35: L'histogramme des fréquences des classes des teneurs en Se total

### 5.3. Analyse statistique

#### 5.3.1. Statistiques descriptives

Les teneurs en Se couvre une gamme élevée ( $0,40 \leq \text{Se total} \leq 3 \text{ mg/kg}$ ) à excessive ( $\text{Se total} > 3 \text{ mg/kg}$ ) selon les normes de Tan et al. (1994). Les teneurs en Se sont comprises entre 0,97 mg/kg et 7,08 mg/kg. La teneur moyenne (3,29 mg/kg) est considérée comme étant une teneur excessive ( $\text{Se total} > 3 \text{ mg/kg}$ ) (tableau XII).

Tableau XII : Statistiques descriptives des teneurs de sélénium total

Variables	Nombre d'observations	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur moyenne	Ecart-type
Se mg/kg	36	0,970	7,080	3,288	1,770

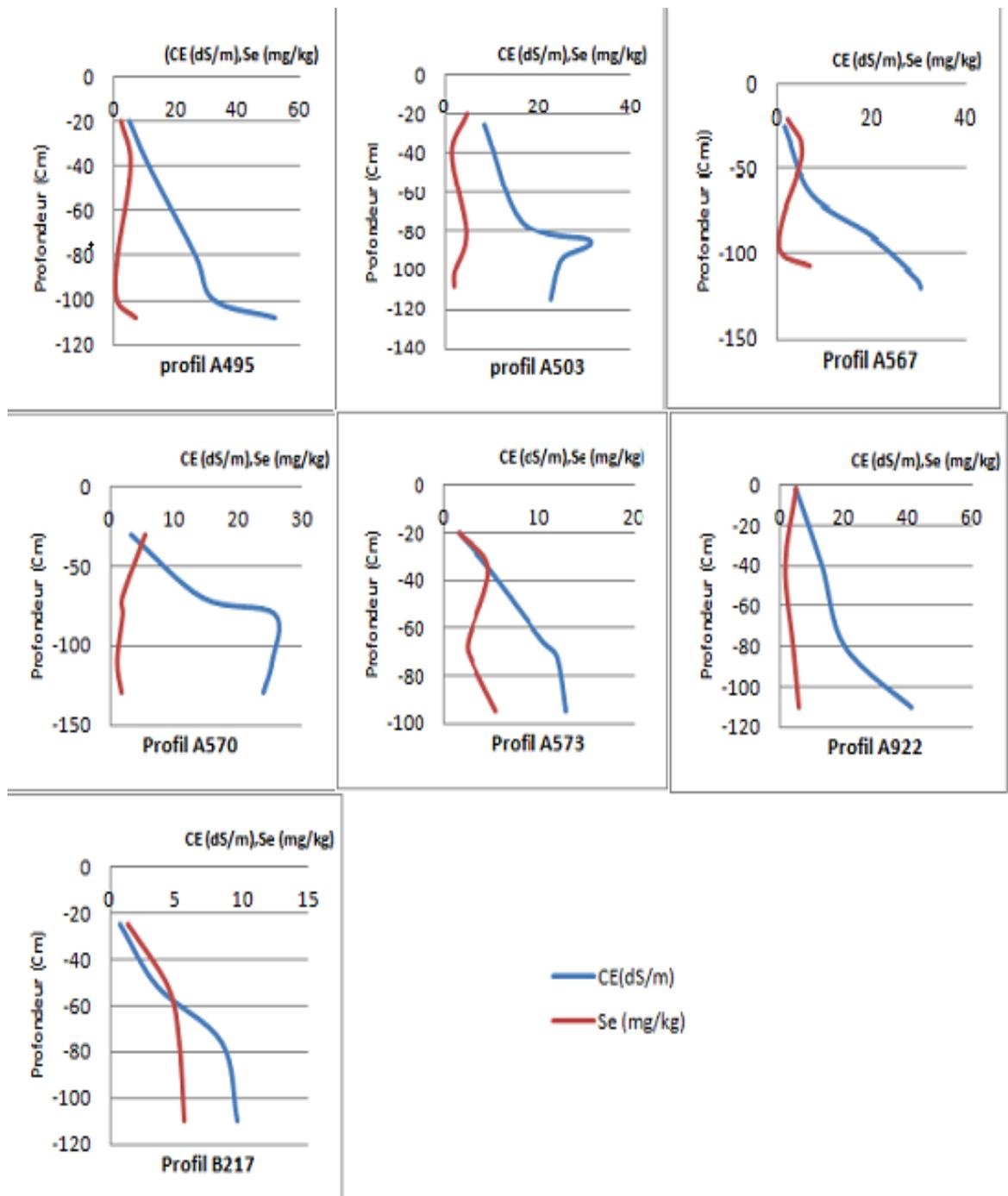


Figure 36 : Distribution de CE et Se dans les profils

### 5.3.2. Relation CE – Se

Pour un ddl égal à 34 et  $\alpha$  égal 0,05, la régression linéaire entre CE et Se n'est pas statistiquement significative (tableau XIII). Ce résultat signifie que la liaison est très faible entre Se et CE. Cette liaison très faible peut être traduite par d'autres modèles d'ajustement comme l'ajustement curvilinéaire.

Tableau XIII : Coefficient de corrélation entre la CE et Se

Variabes	CE dS/m	Se mg/kg
CE dS/m	<b>1</b>	
Se mg/kg	0,059	<b>1</b>

### 5.3.3. L'ajustement curvilinéaire

Afin de trouver une meilleure liaison entre Se et CE, nous avons eu recours à un model curvilinéaire (figure 37) qui a permis de réaliser un meilleur ajustement selon l'équation polynomiale suivante :

$$Se = 4,34 - (0,16 * CE) + 3,97 - (3 * CE^2) \quad R^2 = 0,18 \quad n = 36$$

La relation entre Se et CE est statistiquement significative ( $r=0,42$  ;  $p<0.05$ ). La figure 34 révèle une grande dispersion des points entre SE et CE. Selon la courbe de régression curvilinéaire, la teneur en Se diminue avec l'augmentation de CE jusqu'à une CE égale à 23 dS/m, puis la teneur en Se augmente avec l'augmentation de CE. La faible liaison entre Se et CE se traduit par une relation non monotone, c'est-à-dire le Se peut augmenter ou diminuer selon la valeur de CE.

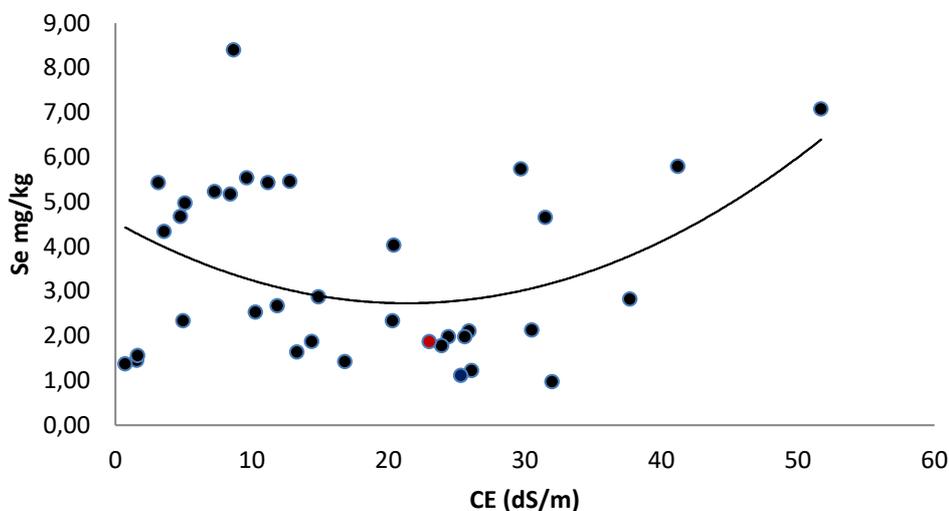


Figure 37 : Relation entre Se et CE

#### 5.4. Discussion

Les teneurs en Se total sont supérieures aux recommandations pour les sols agricoles (CCME, 2009). Selon les normes de Tan et al. (1994), les sols étudiés ont des teneurs en Se élevées à excessives.

La distribution du Se dans le profil est hétérogène. Le maximum et le minimum de Se peut se trouver à la surface ou bien au milieu ou bien à la base du profil selon les différents profils du sol. Cette distribution de Se dans les profils du sol ne suit pas les profils salins.

La corrélation linéaire entre CE et les teneurs totales en Se est statistiquement non significative. L'évolution du Se n'est pas linéaire à l'évolution de la CE.

En général, l'évolution de l'état de la salinité du sol affecterait la concentration totale en sélénium, les sols les plus salés présentent les plus fortes teneurs en sélénium totale (Rodriguez et al., 2005 ; Bañuelos et al., 2013 ; Centofanti et Bañuelos, 2015).

La relation est statistiquement significative entre CE et les teneurs totales en Se pour le modèle polynomial du deuxième degré qui a abouti à un meilleur ajustement. Il existe une

---

### CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

relation non monotone, c'est-à-dire non uniquement croissante ou décroissante dans un intervalle donné entre Se et CE, le Se peut augmenter ou diminuer selon la valeur de CE.

L'augmentation et la diminution de Se total selon la valeur de CE peuvent être expliquées par la spéciation de Se. L'augmentation de Se peut être due à la dominance des sélénites. Ces dernières sont adsorbées par le complexe adsorbant du sol, donc moins lessivés par rapport aux sélénates (Yamada et al., 1998).

**CONCLUSION**

Le présent travail a porté sur la caractérisation géochimique de l'état de salinité des sols du périmètre d'El Hamadna situé dans le Bas-Chelif, l'évaluation de la fiabilité de la simulation des changements des concentrations des solutions des sols par la mise en œuvre du model ExtractChem, et la détermination de la teneur total des sols en sélénium.

Ce travail est effectué sur 53 échantillons provenant de 11 profils de sols pour l'approche géochimique et pour la simulation, et sur 36 échantillons pour la détermination des teneurs totales en sélénium.

Les principaux résultats montrent que la salinité des sols étudiés est variable. Elle couvre une large gamme de salinité variant entre 0,72 dS/m et 51,7 dS/m. Les échantillons salés ( $CE > 16$  dS/m) représentent 84,9% du total.

Le pH révèle une réaction relativement alcaline des sols.

La variation de CE est dépendante de celles des concentrations ioniques, à l'exception de celles du potassium et des bicarbonates.

Les valeurs du SAR sont variables et elles sont comprises entre 0,98 et 66,44. Le SAR évolue proportionnellement à l'augmentation de CE. L'augmentation de la salinité s'accompagne d'une sodisation du complexe adsorbant. Les valeurs calculées de l'ESP à partir du SAR couvrent une large gamme, avec 34 échantillons qui correspondent à des horizons sodiques ( $ESP > 15$  %).

Le faciès chimique des solutions des sols est peu variable. Le faciès chloruré sodique est largement dominant puisqu'il caractérise 92 % des horizons. Le faciès de type chloruré magnésien ne concerne qu'un seul échantillon, et le faciès chloruré sans dominance est rencontré dans 3 horizons de surface.

Les tests de saturation montrent que les échantillons sont sous-saturés vis-à-vis de l'anhydrite, du gypse et de l'halite. Par contre, les solutions des sols sont généralement saturées vis-à-vis de la calcite, l'aragonite et de la dolomite.

Les relations statistiques entre les valeurs observées et les valeurs calculées par le logiciel EXTRACHEM sont significatives et positives pour les variables CE,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$  et  $SO_4^{2-}$ . Elles sont statistiquement non significatives pour  $HCO_3^-$  et  $K^+$ , et significatives et

---

## CONCLUSION

négative pour  $\text{Ca}^{2+}$ . Le modèle ne prédit pas correctement l'allure de l'évolution de ces derniers concentrés par évaporation.

Les valeurs des ions simulés présentent des écarts plus ou moins grands par rapport aux valeurs observées. L'augmentation de la CE entraîne une augmentation de l'écart de prédiction de CE,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  par le logiciel. Ce dernier prédit mieux les solutions les moins concentrées par rapport aux solutions les plus concentrées.

ExtractChem prédit d'une façon moins que moyenne les valeurs de  $\text{Na}^+$  et CE et d'une façon médiocre les valeurs de  $\text{Mg}^{2+}$  et des  $\text{SO}_4^{2-}$ . Ce résultat suggère que dans le contexte de cette étude, ExtractChem ne peut être utilisé que pour la prédiction des chlorures. Il semble que la fiabilité du logiciel ExtractChem est tributaire du contexte pédologique dans lequel le modèle est utilisé.

Les sols étudiés présentent des teneurs totales en sélénium élevées à excessives. L'évolution de la concentration du sélénium totale est spécifique et n'évolue pas d'une manière linéaire avec la CE, Se pouvant augmenter ou diminuer selon la valeur de CE.

Plus généralement ce travail montre que :

- La salinisation dans les sols du Bas-Chelif couvre une large gamme, avec une sodisation du complexe adsorbant, elle présente un faciès chloruré sodique. Le test de saturation vis-à-vis des minéraux révèle la précipitation des minéraux carbonatés.

- Le logiciel EXTRACHEM peut simuler correctement l'allure de l'évolution de CE,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  lors de la concentration de la solution du sol par évaporation, mais la précision de la simulation est médiocre sauf pour le  $\text{Cl}^-$ .

- Les teneurs totales en sélénium sont élevées à excessives, avec une évolution du Se qui suit un modèle polynomial, le Se pouvant augmenter ou diminuer selon la valeur de CE.

Cette recherche mérite d'être approfondie par

- \*\* Le test d'autres modèles de simulation de l'évolution de la salinité des sols,

- \*\* Une meilleure caractérisation du sélénium (origines de l'élément, spéciation, relation des espèces de sélénium avec la salinité, relation sélénium-plante).

**REFERENCES**

- Abdelkrim N., Hartani T., Visconti F., Miguel De Paz J., Douaoui A., 2021. Irrigation Recommendation for Water Saving and Salinity Control in Horticulture in the Semi-arid Lower Cheliff Plain (Algeria). *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, Vol. 18, n° 2, pp. 45–57.
- Achite M., Caloiero T., Wałęga A., Krakauer N., Hartani T., 2021. Analysis of the Spatiotemporal Annual Rainfall Variability in the Wadi Cheliff Basin (Algeria) over the Period 1970 to 2018. *Water*, Vol.13, n°11, 9 p.
- Ait Mechedal M., 2014. Evolution temporelle de la salinité des sols du Bas –Chelif. Mémoire de magistère, ENSA, EL Harrach (Alger), 74p.
- Ait Mechedal M., Ouamer-Ali K., Daoud Y., 2017. Evaluation du statut potassique des sols salés du Bas-Chelif. *Nature & Technology*, vol.16, pp.8-13.
- Bañuelos G.S., Bitterli C., Schulin R., 2013. Fate and movement of selenium from drainage sediments disposed onto soil with and without vegetation. *Environmental Pollution*, vol.180, pp.7-12.
- Baumann K., Marschner P., 2013. Effects of salinity on microbial tolerance to drying and rewetting. *Biogeochemistry*, vol.112, n° 1-3, pp.71–80.
- Beladel B., Nedjimi B., Mansouri A., Tahtat D., Belamri M., Tchanchane A., Khelfaoui F., 2013. Selenium content in wheat and estimation of the selenium daily intake in different regions of Algeria. *Applied Radiation and Isotopes*, vol.71, n° 1, pp.7-10.
- Berkal S., 2006. Contribution à la connaissance des sols du Sahara d’Algerie. Mémoire de magistère, I.N.A., EL Harrach (Alger), 112p.
- Boussoussa Y., 2012. Evaluation du statut potassique des sols du Bas-Chelif. Mémoire de magister, ENSA, EL Harrach (Alger), 60p.
- Callaghan M.V., Cey E.E., Bentley L.R., 2016. Adjustment of soil saturated paste extract electrical conductivity and sodium adsorption ratio for excess gypsum dissolution using equilibrium geochemical modeling. *Soil Science Society of America Journal*, vol.80, n° 4, pp.878-887.
- Centofanti T., Banuelos G., 2015. Evaluation of the halophyte *Salsola soda* as an alternative crop for saline soils high in selenium and boron. *Journal of Environmental Management*, vol.157, pp.96 -102.
- Chesworth W., 2007. *Encyclopedia of soil science*. Springer Science & Business Media, 902p.
- Daoud Y., 1990. Evolution de la salinité d’un sol irrigué dans le périmètre du Haut-Chelif. *Annales de l’Institut National Agronomique El Harrach*, vol.14, n° 1-2, pp.45-57.

---

## REFERENCES

- Daoud Y., 1993. Contribution à l'étude des sols des plaines du Chelif : le phénomène de salinisation, conséquences sur les propriétés physiques des sols argileux. Thèse de doctorat, INA., EL Harrach (Alger), 227p.
- Deverel S. J., Goldberg S., Fujii R., 2012. Chemistry of trace elements in soils and ground water. ASCE Manual and Reports on Engineering Practice No. 71 "Agricultural Salinity Assessment and Management, vol.4, pp.89-137.
- Djamai R., 2007. Contribution à l'étude de la salinité des sols et des eaux du système endoréique du lac Fatzara (Nord-Est algerien). Thèse de doctorat, I.N.A., EL Harrach (Alger), 177p.
- Djili K., 2000. Contribution à la connaissance des sols du Nord de l'Algérie : Création d'une banque des données informatisées et l'utilisation d'un système d'information géographique pour la spatialisation et la vectorisation des données pédologique. Thèse doctorat, INA. EL Harrach (Alger), 384p.
- Douaoui A., 2005. Spatial variability of salinity and related to some characteristics of the low level of soil Chelif approach of geostatistics and remote sensing. Thèse doctorat, INA El Harrach (Algiers), 255p.
- Droubi A., Fritz B., Gac J.Y., Tardy Y., 1980. Predictions of the chemical evolution of natural waters wring evaporation. Doc. ORSTOM, 10p.
- Droubi A., Fritz B., Tardy Y., 1976. Equilibres entre minéraux et solutions. Programmes de calcul appliqués à la prédiction de la salure des sols et des doses optimales d'irrigation. Cahiers de l'ORSTOM, série pédologie, Vol.15, n°1, pp. 13-38.
- Durand J.H., 1956. Some aspects of the study station saline soil HAMADENA and activities. SESSH, Algiers, 31p.
- Elrashidi M.A., Adriano, D.C., Workman, S.M., Lindsay, W.L., 1987. Chemical equilibria of selenium in soils: a theoretical development1. Soil Science, vol. 144, n°2, pp.141-152.
- EPA Method 3051, 1998. Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils and oils, Revision 1.
- FAO, 1984. Prognosis of salinity and alkanity. FAO soils Bulletin 31, 268 p.
- FAO, 2005. Utilisation des engrais par culture en Algérie. Doc. FAO Rome, 61 p.
- Fehdi CH., Boudoukha A., Rouabhia A., Salameh E., 2009. Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du complexe aquifère Morsott-Laouinet (Région Nord de Tébessa, Sud-Est algérien).Afrique SCIENCE, vol.5, n°2, pp.217-231.
- Gouaidia L., Guefaifia O., Boudoukha A., Laidhemila M., Martin C., 2012. Évaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols : exemple de la plaine de Meskiana (Nord-Est Algérien). Physio-Géo, vol.6, n° 1, pp. 141-160.

---

## REFERENCES

- Gupta M., Gupta S., 2017. An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants. *Frontiers in Plant Science*, vol.7, 14p.
- Hadj Miloud S., 2010. Morphologie et propriétés des Solonchaks références de la Mina. Mémoire de Magister, ENSA, EL Harrach (Alger), 112p.
- Hadj Miloud S., Djili, K. and Benidir, M., 2018. Fuzzy Logic Expert System for Classifying Solonchaks of Algeria. *Applied and Environmental Soil Science*, 11p.
- Halitim A., 1988. Sols des régions arides d'Algérie. Edition O.P.U., Alger, 384p.
- Halitim A., 2011. L'aridoculture et le développement durable. *Algerian journal of arid environment*, vol.1, n°1, pp. 3-9.
- Hanson B., Grattan S. R., Fulton A., 2006. Agricultural Salinity and Drainage. University of California Irrigation Program, University of California, Davis, 164p.
- Hazelton P., Murphy B., 2007. Interpreting soil test results. NSW Department of Natural Resources, Australia, 169p.
- Hillel D., 2000. Salinity management for sustainable irrigation: integrating science, environment, and economics. The World Bank, 92p.
- INRA, 2011. Aménagement des terres agricoles salines en Algérie, la région du Bas Chelif w. de Relizane. Projet de coopération Algéro-Chinoise, 22p.
- INSID, 2008. Le point sur la salinité des sols dans les périmètres irrigués Risques et Recommandations. Cas du périmètre irrigué du Bas Chelif. Doc. INSID, 16p.
- Iwai C.B., Oo A. N., Topark-ngarm B., 2012. Soil property and microbial activity in natural salt affected soils in an alternating wet– dry tropical climate. *Geoderma*, vol.189, pp. 144– 152.
- Jacobsen T., Adams R.M., 1958. Salt and silt in ancient Mesopotamian agriculture. *Science*, vol.128, pp. 1251 -1258.
- Kabata-Pendias, A., 2011. Trace elements in soils and plants. Elements group 16, fourth ed. CRC Press, Boca Raton, pp. 367–383.
- Kanzari S., Sahraoui H., Mariem S., Ilahy R., 2016. Aperçu sur les approches utilisées dans la modélisation de l'écoulement de l'eau et du transport des solutés dans les sols. *Journal of new sciences, Agriculture and Biotechnology*, vol.27, n°3, pp. 1474-1477.
- Lahlou M., Badraoui M., Soudi B., 1998. SMSS: un logiciel de simulation du mouvement de sels dans le sol. *Etude et Gestion des sols*, 5, pp.247-256.
- Laoufi H., 2010. Les processus géochimiques de la salinisation des sols du Bas –Chelif. Thèse Magistère, ENSA, EL Harrach (Alger), 99p.
- Mallouhi N., 1989. Etude de la dynamique de la matière organique (MO) dans les sols affectés par la salinité. *Tropicultura*, vol.7, n°3, pp. 90-97.

## REFERENCES

- Marlet S., Job J.O., 2006. Processus et gestion de la salinité des sols : Tiercelin, J.R. Traité d'irrigation, seconde édition. Ed. Tec & Doc Lavoisier, 28p.
- Mavi M., Sanderman J., Chittleborough D., J., Cox J., W., Marschner P., 2012. Sorption of dissolved organic matter in salt-affected soils: Effect of salinity, sodicity and texture. *Science of the Total Environment*, vol.435, pp. 337–344.
- Meyer A., Deiana J., Bernard A., 2004. Cours de microbiologie générale. Wolters Kluwer France, 430p.
- Munns R., 2002. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell and Environment*, vol.25, n°2, pp.239-250.
- Oosterbaan R.J., Pedroso de Lima I., 2002, SALTMOD model, International Institute for Land and Reclamation Improvement (ILRI), Wageningen.
- Parkhurst, D. L., Thorstenson, D. C., & Plummer, L. N., 1990. PHREEQE--A computer program for geochemical calculations. US Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 195p.
- Parkhurst, D.L., and Appelo, C.A.J., 2013. Description of input and examples for PHREEQC version 3— A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, 497p.
- Rodier J., 2005. L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, chimie, physico-chimie, bactériologie, biologie. Dunod, Paris, 1383p.
- Rodriguez M. M., Rivero V. C., Ballesta, R.J., 2005. Selenium distribution in topsoils and plants of a semi-arid Mediterranean environment. *Environmental Geochemistry and Health*, vol. 27, pp. 513-519.
- Rousk J., Elyaagubi F.K., Jones D. L., Godbold D. L., 2011. Bacterial salt tolerance is unrelated to soil salinity across an arid agroecosystem salinity gradient. *Soil Biology & Biochemistry*, vol.43, pp. 1881 - 1887.
- Santos S., Ungureanu G., Boaventura R., Botelho C., 2015. Selenium contaminated waters: An overview of analytical methods, treatment options and recent advances in sorption methods. *Science of the Total Environment*, vol.521, pp.246–260.
- Saoud M., 2014. Evolution spatiale de la salinité des sols du Bas-Chelif. Mémoire de Magistère, ENSA, EL Harrach (Alger), 105p.
- Schiavon M., Lima L.W., Jiang Y., Hawkesford M.J., 2017. Effects of selenium on plant metabolism and implications for crops and consumers. In *Selenium in plants*, pp. 257-275.
- Semiz G.D., Suarez D.L., 2015. Tomato salt tolerance: Impact of grafting and water composition on yield and ion relations. *Turkish Journal of Agriculture and forestry*, vol.39, pp. 876-886.

## REFERENCES

- Servant J. M., 1976. Sur quelques aspects de la pédogénèse en milieu halomorphe : l'exemple des sols salés de la région méditerranéenne française. *Annales de l'Institut National Agronomique*, vol.6, n°1, pp. 225-245.
- Setia R.,Gottschalk P., Smith P., Marschner P., Baldock J., Setia D., Smith J., 2013. Soil salinity decreases global soil organic carbon stocks. *Science of the Total Environment* ,vol.465, pp. 267 – 272.
- Simler R., 2012. Manuel pour DIAGRAMMES. 40p.
- Simunek J., Suarez D. L., 1993. UNSATCHEM-2D Code for Simulating Two-Dimensional Variably Saturated Water Flow, Heat Transport, Carbon Dioxide Production and Transport, and Multicomponent Solute Transport with Major Ion Equilibrium and Kinetic Chemistry, Version 1.1. Research Report No. 128, USDA-ARS U. S. Salinity Laboratory, Riverside, California.
- SOIL SURVEY STAFF, 2006. Keys to Soil Taxonomy. 7th edn. US Dep. Agricult. Nat. Res. Cons. Serv.,Washington, DC. 332p.
- Sparks D. L., 2003. Environmental soil chemistry. Elsevier. 367p.
- Suarez D.L., Taber P., 2007. Extract Chem model to predict major ion and boron composition of a soil solution at desired water content.
- <https://www.ars.usda.gov/research/software/download/?softwareid=155>
- Sumner, M.E., 1993. Sodic soils-New perspectives. *Soil Research*, vol.31, n°6, pp.683-750.
- Tan JA, Wang WY, Wang DC, Hou SF, 1994. Volatilization Adsorption and speciation of selenium in different kinds of soils in China, In Frankberger WT Benson & S Selenium in the Environment, Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 47-68.
- Tanji K. K.,2002. Salinity in the soil environment. *Salinity: Environment - Plants - Molecules* ,pp 21–51.
- Touaf L., 2002. Evaluation du niveau de salinité des sols du Nord de l'Algérie. Mémoire de magister, INA, Alger, 71 p.
- US Salinity Laboratorie Staffe, 1954.Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Hardbook, n°. 60, 160p.
- Van Reeuwijk L. P., 1987. Procedures for soil analysis. ISRIC, n° 9, Second Edition, pp. 13-14.
- Vargas R., Pankova E.I., Balyuk S.A., Krasilnikov P.V., Khasankhanova G.M., 2018 . Handbook for saline soil management. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 132p.
- Wallach D., Makowski D., Jones J.W., 2006. Working with Dynamic Crop Models: Evaluating, Analyzing, Parameterizing, and Using Them. Elsevier, 462p.
- Webb A., 2011. Salinity management handbook. Department of Environment and Resource Management, the State of Queensland, 171p.
- Wicke B., Smeets E., Dornburg V., Vashev B., Gaiser, T., Turkenburg W., Faaij A., 2011. The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils. *Energy & Environmental Science*, vol.4, n°8, pp. 2669-2681.

---

## REFERENCES

World Reference Base For Soil Resources, 2006. A framework for international classification, correlation and communication, 128p.

Yamada, H., Kang, Y., Aso, T., Uesugi, H., Fujimura, T., & Yonebayashi, K.,1998. Chemical forms and stability of selenium in soil. *Soil Science and Plant Nutrition*, vol.44, n°3, pp. 385-391.

Yancey P.H., 2005. Organic osmolytes as compatible, metabolic and counteracting cytoprotectants in high osmolarity and other stresses. *The Journal of Experimental Biology*, vol.208, n°15, pp. 2819-2830.

Zovko M., Romic M., 2011. *Soil Contamination by Trace Metals: Geochemical Behaviour as an Element of Risk Assessment*, Earth and Environmental Sciences, InTech, pp 437-456.

## Résumé :

Le présent travail a porté sur (1) la caractérisation géochimique de l'état de salinité des sols du périmètre d'El Hamadna situé dans le Bas-Chelif, (2) l'évaluation de la fiabilité de la simulation des changements des concentrations ioniques de la solution des sols et sur (3) la détermination de la teneur totale du sélénium et sa relation avec la salinité dans ces sols.

Les résultats ont montré que les sols étudiés se caractérisent par une large gamme de salinité qui varie entre 0,72 dS/m et 51,7 dS/m. La variation de CE est dépendante de celles des différentes concentrations ioniques, selon l'ordre suivant  $Cl^-$  ( $r = 0,97$ ) >  $Na^+$  ( $r = 0,9$ ) >  $Ca^{2+}$  ( $r = 0,83$ ) >  $Mg^{2+}$  ( $r = 0,82$ ) >  $SO_4^{2-}$  ( $r = 0,48$ ), à l'exception de celles du potassium et des bicarbonates. Le faciès chloruré sodique est largement dominant et représente 92 % des horizons. Les tests de saturation ont montré que les solutions des sols sont sous-saturées vis-à-vis de l'anhydrite, du gypse et de l'halite. Par contre, elles sont saturées vis-à-vis de la calcite (46 échantillons), l'aragonite (46 échantillons) et de la dolomite (43 échantillons).

ExtractChem prédit d'une façon parfaite les  $Cl^-$  (100 % de bonnes valeurs prédites), d'une façon moins que moyenne les valeurs de  $Na^+$  et CE (30 à 35 % des valeurs sont bonnes à moyennement prédites) et d'une façon médiocre les valeurs de  $Mg^{2+}$  et des  $SO_4^{2-}$  (plus de 94 % des valeurs sont très mal prédites). Dans le contexte de cette étude, ExtractChem ne peut être utilisé que pour la prédiction des chlorures. Les teneurs totales en sélénium sont élevées ( $0,40 \leq Se \text{ total} \leq 3 \text{ mg/kg}$ ) à excessives ( $Se \text{ total} > 3 \text{ mg/kg}$ ). La variation de la concentration du Se par rapport à CE suit un modèle polynomial, le Se pouvant augmenter ou diminuer selon la valeur de CE.

**Mots clés :** salinité, Chélif, géochimie, modélisation, faciès chimiques, indice de saturation, Sélénium.

## ملخص :

يتعلق العمل الحالي بالتوصيف الجيوكيميائي لحالة ملوحة التربة في محيط الحمادنة الواقع في شليف، محاكاة التغيرات في تراكيز الأيونات وتحديد محتوى السيلينيوم الكلي وعلاقته بالملوحة في هذه التربة. نفذ هذا العمل على 53 عينة من تربة محيط الحمادنة الواقع في سهل شليف.

ان ملوحة التربة المدروسة متغيرة. وهي تغطي نطاقاً واسعاً من الملوحة بشكل عام تتبع الملوحة التركيزات الأيونية، باستثناء البيكربونات والبوتاسيوم. يسود كلوريد الصوديوم إلى حد كبير لأنه يميز 92% من الأفاق. تظهر اختبارات التشبع أن العينات غير مشبعة بالأنهيدريت والجبس والهاليت. في المقابل، تكون محاليل التربة مشبعة بالكالسيت والأراغونيت والدولوميت.

يمكن لبرنامج (اكستراكت شام) محاكاة مسار تطور (الناقلية الكهربائية، المغنيزيوم، الصوديوم، الكلوريدات و الكبريتات) بشكل صحيح أثناء تركيز محلول التربة عن طريق التبخر، لكن دقة المحاكاة ضعيفة باستثناء الكلوريدات في سياق دراستنا، لا يمكن استخدام (اكستراكت شام) إلا للتنبؤ بالكلوريدات. محتويات السيلينيوم الإجمالية عالية إلى مفرطة. تطور تركيز السيلينيوم ليس خطياً مع تطور تركيز الملوحة، هذا الأخير يتبع نموذج متعدد الحدود. يمكن للسيلينيوم ان يزيد او ينقص اعتماداً على درجة الملوحة.

**الكلمات المفتاحية:** الملوحة، الجيوكيميا، النمذجة، السلالات الكيميائية، مؤشر التشبع، السيلينيوم.

## Summary :

This work focused on (1) the geochemical characterization of the salinity state of the soils of the El Hamadna perimeter located in the Bas-Chelif, (2) the evaluation of the reliability of the simulation of changes in ionic concentrations of the soil solution and on (3) the determination of the total selenium content and its relation to the salinity in these soils.

The results showed that the studied soils are characterized by a wide range of salinity which varies between 0,72 dS / m and 51,7 dS / m. The variation of EC is dependent on those of the different ionic concentrations, in the following order  $Cl^-$  ( $r = 0,97$ ) >  $Na^+$  ( $r = 0,9$ ) >  $Ca^{2+}$  ( $r = 0,83$ ) >  $Mg^{2+}$  ( $r = 0,82$ ) >  $SO_4^{2-}$  ( $r = 0,48$ ), except that of potassium and bicarbonates. The sodium chloride facies is largely dominant and represents 92% of the horizons. Saturation tests have shown that soil solutions are undersaturated with anhydrite, gypsum and halite. On the other hand, they are saturated with respect to calcite (46 samples), aragonite (46 samples) and dolomite (43 samples).

ExtractChem perfectly predicts the  $Cl^-$  (100% of good predicted values), in a less than average way the values of  $Na^+$  and CE (30 to 35% of the values are good to moderately predicted) and in a way poor  $Mg^{2+}$  and  $SO_4^{2-}$  values (more than 94% of values are very poorly predicted). In the context of this study, ExtractChem can only be used for the prediction of chlorides. Total selenium levels are high ( $0.40 \leq \text{total Se} \leq 3 \text{ mg / kg}$ ) to excessive (total  $Se > 3 \text{ mg / kg}$ ). The variation in Se concentration with respect to CE follows a polynomial pattern, with Se being able to increase or decrease depending on the value of CE.

**Keywords:** salinity, Chelif, geochemistry, modeling, chemical facies, saturation index, Selenium.