

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ – BOUIRA
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
ET DES SCIENCES DE LA TERRE
DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES**



Réf :/UAMOB/F.SNV.ST/DEP.AGR/2022

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME MASTER**

Domaine: SNV Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Sciences du Sol

Présenté par :

Hadj Ali Fatiha et Oukas Farida

Thème

Evaluation de l'humidité des sols par la méthode d'induction électromagnétique :
cas d'un champ vigne et d'un verger d'agrumes

Soutenu le : 06/07/2022

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
Mm Yallaoui- Guellal Drifa	MCA	FSNVST/UNIV de Bouira	Présidente
Mm Ouradi Linda	MCA	FSNVST/Univ. de Bouira	Promotrice
M. Iddir Mohamed Amine	MCB	ENS Kouba	Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciement

Un grands Merci au Dieu le tous puissant de nous avoir donné la santé et la force pour concrétiser ce travail.

Notre reconnaissance va plus particulièrement à :

Notre directrice de mémoire madame Ouradi Lynda pour sa disponibilité et ses conseils utiles.

Tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leur écrit, leurs conseils ont guidée nos réflexion et ont accepté de nos rencontrer et de répondre à nos questions

Notre respect aux membres du jury qui nous feront l'honneur d'apprécier notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A ma mère, pour son amour, ses encouragements et ses sacrifices.

A mon père, pour son soutien son affection et la confiance qu'il m'a accordé

A tous les membres de ma famille.

A tous mes amies

Et tous ceux qui m'aiment

Hadj Ali Fatiha

Dédicaces

Je dédie ce modeste et simple travail :

A la mémoire de ma mère que Dieu lui fasse miséricorde

A mon très cher père, pour ses sacrifices et son soutien morale et matériel

A ma chère sœur : soumia

A mes chers frères : Mohammed et Amer

A mon marie et mon adorable bébé : Younes

A ma binôme Fatiha, je dis merci pour ta compréhension.

Et à tous ceux qui me connaissent

Ouqase Farida

Sommaire

Sommaire

Remerciement.....	
Dédicaces	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
La liste des abréviations	
Résumé	
Introduction	1

Chapitre I

Recherche bibliographique

1. L'humidité et l'état de l'eau dans le sol	4
1.1. Le cycle de l'eau	4
1.2. L'eau dans le sol.....	5
1.2.1. Humidité à saturation :	6
1.2.2. Humidité à la capacité de rétention (la capacité au champ) :.....	7
1.2.3. Point de flétrissement :	7
1.2.4. L'humidité résiduelle :	9
1.2.5. La réserve utile :	9
1.3. Facteurs influençant l'humidité dans le sol :.....	10
1.3.1. Influence de climat sur la variabilité temporelle de l'humidité de sol :.....	10
1.3.2. Influence de couvert végétale sur la variabilité spatio-temporelle d'humidité des sols :	11
1.3.3. Influence de la topographie sur la variabilité spatiale l'humidité des sols :.....	11
1.3.4. Influence des propriétés pédologiques sur la variabilité spatiale de l'humidité de sol : 12	
1.3.4.1. La texture :	12
1.3.4.2. Conteneur en matière organique :.....	13
1.3.4.3. La structure du sol :.....	13
1.3.4.4. La densité ou la masse volumique :	14

Sommaire

1.1.3.5. Profils hydriques et réserves en eau du sol	15
1.4. Méthodes de mesure de l'humidité du sol.....	17
1.4.1 Méthodes thermogravimétriques.....	17
1.4.2 Mesure par les sondes neutroniques.....	18
1.4.3. Méthode par tensiomètre	19
1.4.4. Méthode capacimétrique	20
1.4.5 Méthode TDR :.....	21
1.4.6. La méthode électromagnétique	22
1.4.6. 1. L'induction électromagnétique (EM).....	22
1.4.6. 2. Les propriétés pédologiques qui influencent la conductivité électromagnétique	23
1.4.6. 3. Principe de fonctionnement EM38.....	24
1.4.6. 4. Les avantages et les inconvénients de EM38.....	24
a. Les inconvénients de EM38	24
b. Les avantages de EM38.....	24

Chapitre II

Matériels et méthodes

1.1. Le contexte de l'étude	27
1.2. Le climat de la région d'étude.....	29
1.2.1. Les Précipitations :	29
1.2.2. La température.....	30
1.2.3. La classification climatique.....	30
2.3. Méthodologie adoptée	31
2.3.1. Expérimentation sur terrain	31
2.3.1.1. Prospection géophysique.....	32
a. Mesures électromagnétiques d'étalonnage.....	32
b. Mesures électromagnétiques à étalonner.....	32
2.3.1.2. Prélèvement du sol	33
2.3.1.3. Méthode d'analyses des échantillons du sol	33
3.2 Traitements statistiques et géostatistiques des données	36

Sommaire

3.2.1. Traitements statistiques	36
3.2.2. Traitements géostatistiques	36

Chapitre III

Les résultats et discussions

3.1. Caractéristiques des sols étudiés	39
3.1.1. Parcelle 1(vigne)	39
3.1.2. Parcelle 2 (agrumes)	40
3.2. Distributions verticales et latérales des taux des différents paramètres pédologiques au niveau des transects.....	41
3.2.1. Fractions granulométriques	41
3.2.2. La salinité	45
3.2.3. Le pH.....	46
3.2.4. Le taux de calcaire.....	47
3.2.5. Le taux de l'humidité	48
3.3.1. Effet des différents paramètres du sol sur EM	50
3.3.2. Étude de la variabilité spatiale l'humidité par EM.....	51
3.3.2.1. Etalonnage de EM	51
3.3.2.21. Cartographie en courbes d'isovaleur de la Hp%	52
a. Analyse de la structure spatiale	52
b. Cartographie par krigeage de l'humidité prédite.....	53
Conclusion générale	57
Références bibliographiques	60
Annexes.....	65

Liste des figures

Liste des figures

Figure 1-1 : Les étapes de cycle de l'eau	4
Figure 1-2: Eau contenue dans le sol selon sa texture.....	8
Figure 1-3: courbes pF-humidité.....	10
Figure 1-4 : La rétention du l'eau en fonction de la texture du sol.....	13
Figure 1-5: la teneur en eau selon la structure du sol.....	14
Figure 1-6 : Exemples de profils hydriques au temps t1 et t2 (Musy et Soutter, 1991).....	16
Figure 1-6 : Schéma type de la méthode thermogravimétrique	18
Figure 1-7 : La sonde neutronique	19
Figure 1.8 : schéma d'une cane tensiométrique.	20
Figure 1.9 : schéma d'une sonde TDR.....	22
Figure 2-1 : Situation de géographique de la zone étudiée	28
Figure 2-2. Parcelles d'études (champs de vigne et verger d'agrumes)	28
Figure 2-3 : Système d'irrigation	29
Figure 2.4 : Diagramme ombrothermique de Gaussen (2014 -2021).....	31
Figure 2-5 Dispositifs d'échantillonnages (prélèvements du sol + Mesures électromagnétiques	32
Figure 2-6: Dispositif d'échantillonnage des Mesures électromagnétiques à étalonner	33
Figure 2-7 : Mesure de pH des extraits aqueux 2:5 (laboratoire sol Université de Bouira).....	34
Figure 2-8 : Mesure de conductivité électrique des extraits aqueux 1:5 (laboratoire sol Université de Bouira).	34
Figure 2-9 : Mesure de CaCO ₃ totale (laboratoire sol	35
Figure 2-10 : Mesure de l'humidité pondérale H% par la méthode.....	35
Figure 3-1 : Triangle textural de USDA, 1954.....	41
Figure 3-2: Distributions verticales et latérales des taux d'argile dans la parcelle 1	42
Figure 3-3: Distributions verticales et latérales des taux d'argile dans la parcelle 2	42
Figure 3-4: Distributions verticales et latérales des taux de limon dans la parcelle 1	43
Figure 3-5: Distributions verticales et latérales des taux de limon dans la parcelle 2	43
Figure 3-6: Distributions verticales et latérales des taux de sables dans la parcelle 1	44

Liste des figures

Figure3-7: Distributions verticales et latérales de sable dans la parcelle 2.....	44
Figure 3-8: Distributions verticales et latérales de la conductivité électrique dans la parcelle 1	45
Figure3-9: Distributions verticales et latérales de la conductivité électrique dans la parcelle 2	46
Figure3-10: Distributions verticales et latérales du pH dans la parcelle 1	46
Figure3-11: Distributions verticales et latérales du pH dans la parcelle 2.....	47
Figure3-12: Distributions verticales et latérales du CaCO ₃ dans la parcelle 1	47
Figure3-13: Distributions verticales et latérales du CaCO ₃ dans la parcelle 2	48
Figure3-14: Distributions verticales et latérales de l'humidité dans la parcelle 1	49
Figure3-15: Distributions verticales et latérales de l'humidité dans la parcelle 2	49
Figure 3-16: Semivariogrammes ajustés du parcelle 1(0 -75cm)	54
Figure 3-17: Semivariogrammes ajustés du parcelle 1(0 -75cm)	54
Figure 3-18: Carte d'isovaleurs de l'humidité pondérale prédites (Parcelle 1- 0-75 cm).....	55
Figure 3-19: Carte d'isovaleurs de l'humidité pondérale prédites (Parcelle 1- 0-75 cm).....	55

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : variation du point de flétrissement permanent avec la texture du sol et l'espèce végétale.....	8
Tableau 1-2 : Propriétés physiques des sols (valeurs moyennes)	15
Tableau 2-1:Pluviométrie moyenne mensuelle en mm pour la période (2014-2021).....	29
Tableau 2-2 : paramètres climatiques températures dans la commune de corso, pour la période (2014-2021).....	30
Tableau 3-1 : Analyse statistique des paramètres pédologique de parcelle de vigne.....	40
Tableau 3-2 : Analyse statistique des paramètres pédologique de parcelle d'agrumes.....	40
Tableau 3-3. Matrice de corrélations entre les Emh et les différents paramètres pédologiques étudiés.....	50
Tableau 3-4. Paramètres des équations RLS des deux parcelles d'études	52

La liste des abréviations

La liste des abréviations

UV : ultra violet.

Pf : point de flétrissement.

Hp : humidité pondérale.

Hv : humidité volumique

RU : réserve utile

Hcc : humidité à capacité au champ.

Hpf : humidité à point de flétrissement.

Da : densité apparente sèche.

CE : conductivité électrique.

S : spire.

SP : spire primaire.

F : fréquence.

EM : électromagnétique.

Hp : champ primaire.

SS : spire secondaire.

FAO : organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture.

PH : potentiel hydrogène.

CEM : conductivité électromagnétique.

Emh : conductivité électromagnétique horizontale.

SIG : système d'information géographique.

USDA : United states departement of agriculture.

EUE : eau usées épurées.

H : humidité.

L : limon.

A : argile.

S : sable.

La liste des abréviation

RLS : régression linéaire simple.

TDR : réflection temporelle.

NRCS : national soil survey center.

Résumé

Résumé

Le but de cette étude est d'utiliser la méthode de la conductivité électromagnétique pour mettre en évidence la variabilité spatiale de l'humidité du sol, qui est une méthode rapide et non destructive. L'expérimentation a été réalisée sur 2 champs, un champ de vigne 1 et l'autre d'agrumes 2 situé dans la région de CORSO wilaya de BOUMERDES.

Les principaux résultats obtenus montrent que la corrélation entre les paramètres du sol et EM sont non significatives. Elles sont hautement significatives pour l'H% ($R^2 > 0,7$). De même, la matrice de corrélation montre que les corrélations entre EM et A+L % et S% respectivement sont moins fortes que celles obtenues avec H % ($0,711 < R^2 < 0,78$). Ce résultat suggère une prédominance de l'effet de l'humidité sur EM. De ce fait, EM constitue un moyen suffisamment efficace pour l'estimation et la cartographie de H% dans la zone d'étude.

Les cartes krigées ont montré que dans la parcelle 1 il y a une très grande hétérogénéité de l'humidité avec un gradient de l'humidité du sud vers le nord-ouest avec une prédominance de la classe d'humidité entre 12 et 13% , et que dans la parcelle 2 les niveaux d'humidité plus élevés avec un aspect relativement plus au moins homogène avec la prédominance de la classe d'humidité supérieur à 15%.

L'ensemble de ces résultats confirme et montre que l'humidité peut être correctement estimée par le biais de la conductivité électromagnétique.

Mots clés : Conductivité électromagnétique, Humidité, Variogrammes, Krigeage ; EM38, CORSO.

Abstract

The purpose of this study is to use the method of electromagnetic conductivity to highlight the spatial variability of soil moisture, which is a rapid and non destructive method. The experiment was carried out on 2 fields: a field of vines 1 and the other of citrus fruits 2, located in the region of corso wilaya of boumerdes.

The main results obtained show that the correlation between the soil parameters and EM are not significant. They are highly significant for H% ($R^2 > 0.7$). Similarly, the correlation matrix shows that the correlations between EM and A%+L%+S% respectively are weaker than those obtained with

Résumé

$H\%(0.711 < R^2 < 0.78)$. this result suggest a predominance of th effect of humidity on EM. Therefore, EM is asufficiently effective means for estimating and mapping H% in the study area.

The kriged maps have shown that in plot 1 there is a very great heterogeneity of humidity from the south to the northwest with a predominance of the humidity class between 12 and 13% , and that in plot 2 the levels of humidity with a relatively more or less homogeneous appearance with the predominance of the homidity class greater than 15%.

All of these results confirm and show that the humidity can be correctly estimated through the electromagnetic conductivity.

Key words : electromagnitic conductivity, humidity, variograms, kriging, EM38, corso.

ملخص:

الغرض من هذه الدراسة هو استخدام طريقة التوصيل الكهرومغناطيسي لإبراز التباين المكاني لرتطوبة التربة وهي طريقة سريعة و غير مدمرة. نفذت التجربة على حقل كرمة 1 والأخر حمضيات 2 يقع في منطقة قورصو ولاية بومرداس.

اظهرت النتائج الرئيسية التي تم الحصول عليها أن العلاقة بين معاملات التربة و EM ليست معنوية. كانت مهمة للغاية بالنسبة ل $h\% (R^2 > 0.7)$. وبالمثل, توضح مصفوفة الارتباطات بين EM و $S\% + A\% + L\%$ على التوالي اقل قوة من تلك التي تم الحصول عليها مع $H\% (0.711 < R^2 < 0.78)$. تشير هذه النتيجة إلى غلبة تأثيرا لرتطوبة على الكهرومغناطيسية , وبالتالي , فان الكهرومغناطيسية يشكل وسيلة فعالة بدرجة كافية لتقدير ورسم خرائط ل H% في منطقة الدراسة.

اظهر الكريغ انه في قطعة الأرض 1 يوجد تباين كبير جدا في الرطوبة مع تدرج رطوبة من الجنوب إلى الشمال الغربي مع غلبة فئة الرطوبة بين 12 و 13% , وانه في قطعة الأرض 2 مستويات رطوبة أعلى او اقل متجانس نسبيا إلى حد ما مع غلبة فئة الرطوبة اعلي من 15%.

تؤكد كل هذه النتائج وتوضح انه يمكن تقدير الرطوبة بشكل صحيح من خلال التوصيل الكهرومغناطيسي.

الكلمات المفتاحية: التوصيل الكهرومغناطيسي, الرطوبة, EM38, الكريجيج, فاريوجرام, قورصو.

Introduction

Introduction

Introduction

Les interactions entre les propriétés du milieu et la croissance de la plante ont plusieurs origines principales (Foth, 1978 in Nemeth I, 2001): les propriétés physiques du sol, sa teneur en eau et en éléments minéraux.

Le sol dans sa partie non saturée apparaît comme un complexe dynamique à trois phases : liquide, solide et gazeuse. L'eau du sol, faisant partie de la phase liquide du sol, alimente les racines des végétaux et constitue un espace de transition important pour l'eau des nappes souterraines (alimentation, évaporation).

Du point de vue des propriétés physiques, hydriques et mécaniques, le sol est considéré comme un milieu poreux (Hillel, 1980). La redistribution de l'eau arrivant au sol est largement conditionnée par les propriétés hydriques (conductivité hydraulique, rétention hydrique) des sols. Ces propriétés sont contrôlées par la structure et la texture des milieux poreux, très variables tant verticalement (selon les horizons dans les profils de sol) que latéralement (suivant les formations superficielles).

Les analyses du sol démontrent l'extrême hétérogénéité et complexité du sol et les variations rapides des structures qui peuvent exister à quelques mètres de distance, à travers lesquels la dynamique de l'eau est souvent complexe ce qui explique l'irrégularité de développement du couvert végétal (*Ruelle, 1995*). Les hétérogénéités sont considérablement atténuées dans les horizons de culture et dans les couches organiques où l'activité biologique est très intense. Par contre, dans les horizons sous- culturaux et les couches profondes, ces hétérogénéités sont très fréquentes.

L'humidité du sol, c'est la quantité d'eau qu'il contient. Elle dépend de la qualité du sol (structure et texture) et de sa capacité à retenir l'eau. Un sol de qualité médiocre s'asséchera trop rapidement, comme par exemple un sol limoneux (on le qualifie de sol sec) et /ou gorgera d'eau en cas de pluie.

Le taux d'humidité du sol en particulier va déterminer les caractéristiques de diffusion ou de stockage de l'eau dans ce sol. Ces caractéristiques concernent aussi bien les intrants solides que liquides qui vont pénétrer dans le sol.

Il existe différentes méthodes de mesure de l'humidité d'un sol (ou autres substrats équivalents), certaines sont analysées au laboratoire, d'autres donnent l'état du sol in situ.

Introduction

La méthode de la conductivité électromagnétique par l'EM 38 est une méthode rapide et non destructive. Elle est très utilisée par les chercheurs, surtout après avoir été combinée avec la géostatistique, ce qui permet de prendre de nombreuses mesures dans un court laps de temps et donne des résultats de manière plus efficace.

C'est dans ce contexte que nous avons voulu, par ce travail, apporter une contribution qui, malgré les moyens expérimentaux peu suffisants mis en œuvre, aura pour principal objectif d'utiliser la méthode de la conductivité électromagnétique par l'EM 38 (Geonics Ltd, Canada) pour mettre en évidence la variabilité spatiale de l'humidité du sol sur 2 champs, un champ de vigne 1 et l'autre d'agrumes 2 situé dans la région de CORSO wilaya de BOUMERDES.

Notre travail s'articule autour de trois axes, (a) la caractérisation des sols étudiés, (b) la cartographie spatio-temporelle de l'humidité et (c) l'analyse méthodologique de l'extrapolation des équations d'étalonnage de EM dans l'espace.

Ce document sera structuré en trois grandes parties :

- Une première partie de mise au point bibliographique.
- Une deuxième partie décrivant le site expérimental, le protocole d'essai adopté ainsi que les méthodes de mesures et d'interprétations.
- Une troisième partie destinée à la présentation des résultats expérimentaux, leurs interprétations et discussions.

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale dans laquelle nous mettrons en évidence les résultats qui nous paraîtront les plus déterminants par rapport aux objectifs fixés et dégagerons des recommandations et perspectives pour de futurs travaux dans le même contexte.

Chapitre I :

Recherche bibliographique

1. L'humidité et l'état de l'eau dans le sol

L'humidité du sol est la source d'eau important de la surface continentale , elle permet de préserver la vie de la faune du sol, d'améliore la germination et la croissance des végétaux une connaissance précise de l'humidité du sol et son évolution spatio-temporelle est un élément clé pour pronostiquer la production agricole , pour améliorer la gestion des ressources en eau ainsi que les prévisions météorologiques et notamment pour mieux comprendre les processuce de transfert d'eau et de chaleur dans l'interaction entre surface continentale et l'atmosphère

1.1. Le cycle de l'eau

Le cycle d'eau appelé aussi le cycle hydrologique. Ensemble des cheminements que peut suivre une particule d'eau ces mouvement accompagnés de changement d'état peuvent s'effectuer dans l'atmosphère, à la surface du sol et dans le sous-sol. Chaque particule n'effectue qu'une partie de cycle d'eau et avec des durées très variables. Une goutte de pluie peut retourner à l'océan en quelques jours alors que sous forme de neige, en montagne, elle pourra mettre des dizaines d'année (Laborde, 2009).

Cette circulation est alimentée par l'énergie solaire, a noté aussi quelques échange entre l'hydrosphère et manteau terrestre par ailleurs des molécules d'eau sont cassées en permanences par les rayonnements UV en provenance du soleil, l'hydrogène et la résultante s'échappant hors de terre (figure 1-1) (Jacques Sauguet, 2011).

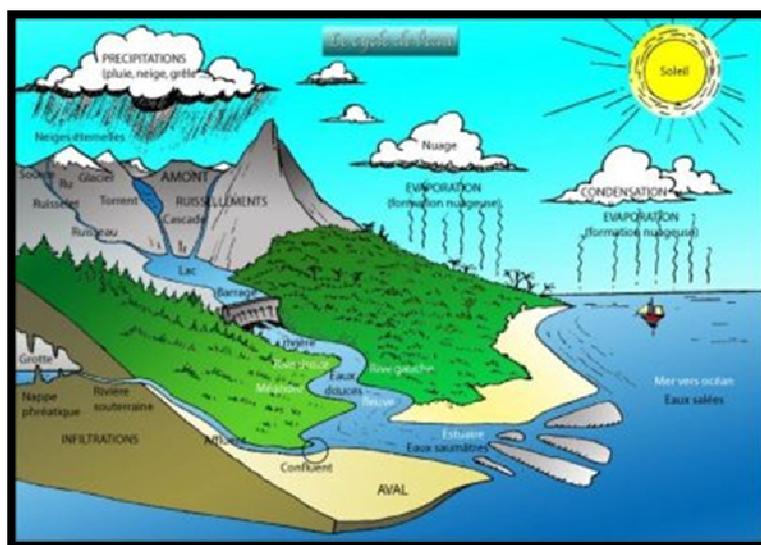


Figure1-1 : Les étapes de cycle de l'eau

1.2. L'eau dans le sol

Les interactions entre les propriétés du milieu et la croissance de la plante ont plusieurs origines principales (Foth, 1978 in Nemeth I, 2001): les propriétés physiques du sol, sa teneur en eau et en éléments minéraux.

Le sol dans sa partie non saturée apparaît comme un complexe dynamique à trois phases : liquide, solide et gazeuse. L'eau du sol, faisant partie de la phase liquide du sol, alimente les racines des végétaux et constitue un espace de transition important pour l'eau des nappes souterraines (alimentation, évaporation).

Du point de vue des propriétés physiques, hydriques et mécaniques, le sol est considéré comme un milieu poreux (Hillel, 1980). La redistribution de l'eau arrivant au sol est largement conditionnée par les propriétés hydriques (conductivité hydraulique, rétention hydrique) des sols. Ces propriétés sont contrôlées par la structure et la texture des milieux poreux, très variables tant verticalement (selon les horizons dans les profils de sol) que latéralement (suivant les formations superficielles).

Le comportement hydrique du sol régie par :

1. la quantité des eaux d'infiltration pénétrant dans le sol ;
2. la dynamique de l'eau dans les horizons et les phénomènes de remontées capillaires ;
3. l'importance de la succion racinaire et l'évapotranspiration de la plante.

Les analyses du sol démontrent l'extrême hétérogénéité et complexité du sol et les variations rapides des structures qui peuvent exister à quelques mètres de distance, à travers lesquels la dynamique de l'eau est souvent complexe ce qui explique l'irrégularité de développement du couvert végétal (Ruelle, 1995). Les hétérogénéités sont considérablement atténuées dans les horizons de culture et dans les couches organiques où l'activité biologique est très intense. Par contre, dans les horizons sous- culturaux et les couches profondes, ces hétérogénéités sont très fréquentes.

Le sol fournit à la plante l'eau qui lui permet de croître et de se développer entre deux pluies, et de supporter des périodes sèches plus ou moins longues. C'est un milieu poreux qui est constitué de particules solides entre lesquelles circulent les deux éléments indispensables à la plante : l'eau et l'air. L'irrigation et le drainage sont deux méthodes qui concourent à maintenir, dans des proportions convenables, l'eau et l'air du sol.

L'eau est retenue par les particules du sol sous forme d'adsorption mais surtout par la tension superficielle qui s'exerce à l'intérieur des pores dont les dimensions varient avec la nature du sol. Les sols constitués de particules relativement grosses (sables, par exemple) présentent des pores peu nombreux mais relativement grands où l'eau retenue par tension superficielle est moins importante, pour un volume de sol donné, que dans le cas d'un sol à particules plus fines (sols limoneux ou argileux) et donc à pores plus petits et plus nombreux.

Cette eau provenant des précipitations, des remontées capillaires et/ou des apports par l'irrigation, au contact du sol, s'infiltré totalement ou partiellement pour former des films fins autour des particules solides et des parois fissurée. Cette eau est ensuite répartie en trois types qui sont :

-l'eau gravitaire ou eau mobilisable, dont la force est assez faible pour s'opposer à la pesanteur .sous l'action de la forces de gravite, cette eau s'écoule dans les macros porosités du sol et alimente les nappes, les ouvrages de captage et les sources (koita ,2013).

-l'eau de rétention capillaire c'est une partie de l'eau non mobilisable dont la force de rétention du sol est inférieure à celle de succion racinaire des plantes. Cette eau est contenue dans les micros porosités et constitue la réserve utilisable par les plantes.

-l'eau adsorbés qui est difficile à extraire car elle forme un film continue d'une épaisseur de l'ordre de quelques micros autour des particules solides (Robinson, et al, 2012).

1.2.1. Humidité à saturation :

L'humidité du sol à saturation, s indique le volume d'eau maximum qu'un volume .lorsque 'un sol est saturé tous les de sol contenir espèces poreux sont occupés par d'eau .l'air y est inexistant.

Après une pluie, l'eau s'infiltré à la fois sous l'action de la pesanteur et sous celle d'une force de succion exercée par le sol quand il peut encore absorber de l'eau. Plus ou moins saturé près de la surface (les pores étant presque remplis d'eau), le sol va se «ressuyer», la pesanteur entraînant l'eau vers le bas. Cependant, au fur et à mesure que les pores se vident dans la zone saturée, la tension superficielle augmente et le mouvement de l'eau vers le bas se ralentit.

Lorsque l'apport en eau en surface est supérieur à la capacité d'infiltration du sol, celui-ci ne peut plus infiltrer d'eau une accumulation d'eau en surface se crée alors .en fin cas de pente un écoulement latérale appelé ruissellement peut se former (Karine ,2011).

1.2.2. Humidité à la capacité de rétention (la capacité au champ) :

Un ou deux jours après la pluie, la quantité d'eau retenue dans le sol près de la surface n'évolue plus que très lentement. Les agronomes considèrent alors qu'elle est à peu près stationnaire et constitue alors la «capacité au champ».

Selon Brochet et Gerbier 1978 la capacité de rétention correspond à la teneur en eau après le ressuage, lorsque tout écoulement gravitaire a cessé. La capacité de rétention est étroitement liée à la constitution minéralogique et augmente avec la teneur en argile et en matière organique (Morel, 1996). Elle correspond à des potentiels hydriques compris entre 0,005 et -0,01 mp (0,1 atm ou $\psi_f = 2,7$) (Brochet et Gerbier, 1978 ; Ducros, 1990). C'est la limite supérieure de l'eau utile pour les plantes.

La capacité de rétention appelée aussi capacité au champ est généralement notée H_{cc} . Dans la pratique, H_r ou H_{cc} est mesurée non pas au champ, mais au laboratoire sur des échantillons de sols on obtient ainsi une mesure équivalente à la capacité au champ appelé pour cette raison humidité équivalente et notée H_e (Morel, 1996).

On évalue une teneur en eau du sol que l'on rapporte au poids de terre séché (séché à 105°C) ou volume de terre en place. On peut aussi l'exprimer en hauteur d'eau équivalente (en mm de précipitation).

Humidité en p100 pondérale : $h_{p100} = \text{poids frais} - \text{poids sec} / \text{poids sec}$

Humidité en p100 volumique : $h_{v100} = \text{poids frais} - \text{poids sec} / \text{volume de terre en place}$

1.2.3. Point de flétrissement :

Sous l'effet de l'évaporation et de l'absorption d'eau par les racines, cette réserve d'eau diminue peu à peu en l'absence d'autres précipitations jusqu'au moment où il devient difficile pour la plante d'extraire l'eau alors retenue très fortement par le sol. Cette humidité résiduelle, difficilement accessible, correspond pour la plante au «point de flétrissement». Le point de flétrissement présente l'état hydrique du sol auquel les plantes ne peuvent plus puiser de l'eau nécessaire à sa croissance et flétrissent de manière réversible (Morel, 1996). Selon Beauchamp (1989), c'est le seuil en dessous duquel les racines jusqu'à 1500 kPa pour puiser l'eau » (figure 1-2).

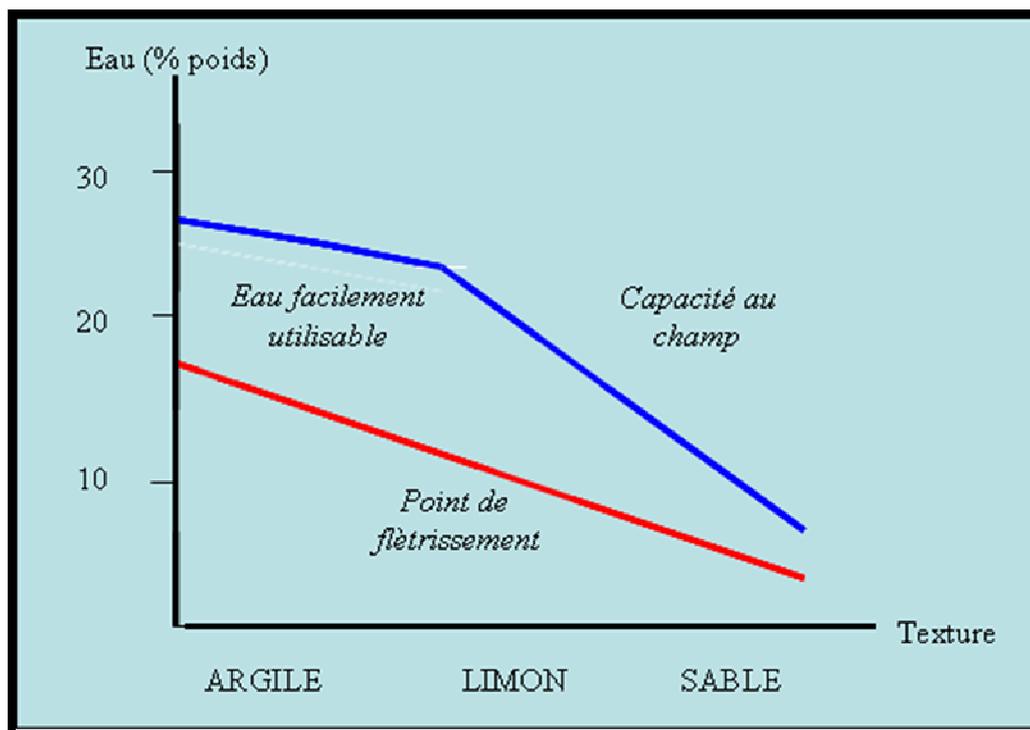


Figure 1-2: Eau contenue dans le sol selon sa texture (Duchaufour 2002 in Leulmi S., 2003)

On peut la mesure d’après Soltner (1989), soit par la mesure de l’humidité de sol lorsque la plante se fane soit au laboratoire par centrifugation ou la presse à membrane.

Tableau 1-1 : variation du point de flétrissement permanent avec la texture du sol et l’espèce végétale (Robert Morel 1996 ; in Briggs et Shantz, 2012).

Espèce végétale	Sable grossier	Sable fin	Limon sableux	Limon	Limon argileux
Maïs	1,07	3,1	6,5	9,9	15,5
Sorgho	0,94	3,6	5,9	10,0	14,1
Blé	0,88	3,3	6,3	10,3	15,5
Avoine	1,07	3,5	5,9	11,1	14,8
Pois	1,02	3,3	6,9	12,4	16,6
Tomate	1,11	3,3	6,9	11,9	15,3
Riz	0,96	2,7	5,6	10,1	13,0
moyenne	1,01	3,3	6,3	10,8	15,0

Le tableau 1-1 rappelle quelque résultat concernant la relation entre le point de flétrissement, la texture du sol et l'espèce végétale obtenue par Briggs et Shantz (2012).

1.2.4. L'humidité résiduelle :

En dessous de point de flétrissement quantité d'eau dans le sol peut continuer de diminuer par évaporation ce changement d'état peut se faire soit au contact de l'atmosphère, les molécules d'eau remontant en surface par capillarité, soit au sein des pores du sol en passant de l'état liquide à l'état gazeux.

Lorsque l'eau présent dans les deux phases du sol, liquide et gazeuse est en équilibre, le taux d'humidité résiduelle ou point d'hygroscopicité est atteint (Musy et Soutter, 1991). Même après une longue période de sécheresse un sol contient toujours une fraction d'eau liée à la matrice du sol par adsorption. Le séchage total d'un sol ne peut être obtenu quand dans le cadre d'expérimentation en laboratoire (séchage à 105°).

1.2.5. La réserve utile :

La réserve utile (RU) correspond à la fraction de la réserve qui est exploitable par la plante, c'est-à-dire la fraction accessible par la racine et absorbable par leur succion. Cette réserve est exploitée en fonction de sa disponibilité et des caractéristiques du système racinaire (profondeur, densité...). Il est donc nécessaire de connaître les différents paramètres représentatifs de la disponibilité de l'eau dans le sol et les différentes relations qui les relient (Polge de Combret, 1990). Les plantes n'exploitent l'eau du sol qu'entre deux limites, qui définissent la réserve utile :

- Celle où le sol est à la teneur en eau en dessous de laquelle la culture ne parvient plus à transpirer et dite teneur en eau au point de flétrissement permanent, H_{pf} , évaluée classiquement par la teneur en eau à $pF = 4,2$;
- Celle où le sol est à sa teneur en eau maximale au-delà de laquelle l'eau s'écoule par gravité, dite capacité au champ, H_{cc} .

La réserve utile des sols est très variable. La texture a une grande influence sur la **RU**, ainsi que la profondeur de sol colonisable par les racines est un facteur pouvant limiter la réserve utile, et dépend à la fois de l'espèce cultivée, des techniques culturales, et des obstacles physiques et chimiques que le sol peut opposer à la croissance racinaire. Elle est exprimée par la relation suivante :

$$RU = (H_{cc} - H_{pf}) \times d_a \times Z_r \dots\dots\dots(1)$$

Avec :

RU : Réserve utile du sol en mm ;

H_{cc} : l'humidité pondérale à la capacité au champ en % ;

H_{pf} : humidité pondérale au point de flétrissement en % ;

d_a : densité apparente sèche (g.cm-3) ;

Z_r : profondeur d'enracinement en m.

Cette quantité d'eau disponible par la plante est déterminée rigoureusement au laboratoire par l'établissement de courbes de rétention en eau (dites aussi courbes pF-humidité) (figure 1-3) sur des échantillons de sols non remaniés prélevés dans chaque horizon (cylindres ou mottes). Cette méthode est recommandée pour une évaluation de réserve utile précise sur un sol donné (Badeau et Ulrich, 2008).

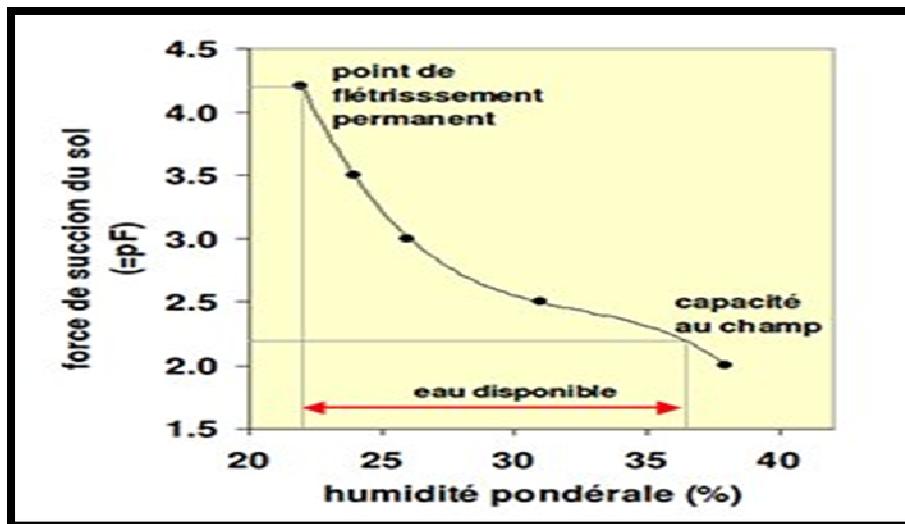


Figure 1-3: courbes pF-humidité

1.3. Facteurs influençant l'humidité dans le sol :

1.3.1. Influence de climat sur la variabilité temporelle de l'humidité de sol :

L'apport d'eau au sol se fait sous la forme de pluie, neige, rosée et brouillard. Toute l'eau des précipitations n'atteint pas le sol : une partie est évaporée directement pendant et après la pluie, les gouttes peuvent être interceptées en partie par le feuillage. L'eau qui atteint le

sol ruisselle, s'infiltrer et ré humecte le sol. Les racines absorbent cette eau que la tige et les feuilles évaporent par transpiration, et une fraction réduite percole en profondeur, la teneur en eau n'augmente plus : Le sol est saturé, cette zone saturée forme donc une nappe. Si la pluie est importante, le sol ne peut pas absorber toute l'eau tombée, la partie supérieure du sol devient saturée mais le transfert vers la profondeur n'est pas assez rapide. Une pellicule d'eau s'accumule en surface et s'écoule selon la pente : c'est ce qu'on appelle ruissellement. Lorsque la surface du sol est imperméable, le ruissellement apparaît aussitôt que les dépressions du sol ont été remplies. La végétation favorise l'infiltration et s'oppose ainsi au ruissellement.

1.3.2. Influence de couvert végétale sur la variabilité spatio-temporelle d'humidité des sols :

La nature de couvert végétale influence le comportement de l'eau provenant des précipitation .en effet , la végétation s'oppose au ruissèlement de surface et favorise infiltration .les tiges constituent des obstacles à l'écoulement superficiel puisqu'elles diminuent la vitesse des filets d'eau .quant aux racines , elles augmente la perméabilité du sol .la présence et le type de culture influence grandement les effet d'une précipitation sur un sol .en effet selon ,Beauchamp (2006), les conséquence des précipitation seront plus importantes pour une parcelle sous cultures de maïs ,que pour un partie .il établît d'ailleurs qu'une prairie protégera le sol de sorte que seulement 5%de celui-ci sera affecté par l'eau de pluies comparativement à50% pour la culture de maïs .le choix d'une culture a aussi un effet sur la gestion du sol en modifiant certaine propriété du sol , telles que sa structure .une culture sur bilons peut entrainer le compactage de la zones d'accumulation de l'eau ainsi que des surfaces de sol nues non protégées une prairie permettra à un sol , lors de périodes de sécheresse, de conserver à plus long terme un haut taux d'humidité qu'une culture de maïs(Karine,2011).

1.3.3. Influence de la topographie sur la variabilité spatiale l'humidité des sols :

La topographie influence la variabilité spatiale de l'humidité de surface est normalement plus faible et que plus on se dirige vers le bas, généralement plus l'humidité est élevée (pater&mcreynold,2005).ce phénomène est du au ruissellement ainsi qui l'écoulement hypodermique et souterrain .le long du gradient de pente plus particulièrement celles de petite taille comme l'argile et le limon fin qui s'accumulent au bas de la pente .ces particules sont

facilement compactables ce qui entraîne une diminution de la porosité. Une augmentation de la densité du sol affecte la teneur en humidité du sol (NRCS, 1996).

Ce gradient de pente entraîne également une différence dans l'évolution des sols (Lafond, 1992). Ainsi on retrouve souvent des podzols sur les crêtes et haut de pente des bruni sols en milieu de pente et des Gley sols ou sols organique dans les dépression en bas ou dans le pied de pente. Le modèle peut être légèrement différent si le socle rocheux présente des ondulations, comme c'est fréquemment le cas dans les Appalaches. En bref la topographie joue un rôle important dans la variabilité spatiale de l'humidité des sols (Lafond, 1992).

1.3.4. Influence des propriétés pédologiques sur la variabilité spatiale de l'humidité de sol :

Bien qu'à la surface du sol, la présence d'eau soit facilement percevable par la présence ou encore par le type de végétation présent i.e. espèce hydrophiles (milieu humide) ou xérophiles (milieu sec) (Day et Mcmenamin, 1982). Il en est tout autrement sous la surface, dans la section de contrôle (généralement 1m) que l'on appelle « le profil de sol ». Celui-ci présente une succession de couches ou d'horizon plus ou moins parallèle affichant des propriétés morphologiques particulières et diagnostique de l'évolution génétique du sol (lessivage, podzolisation, gleyification, etc). Toutefois, la présence de certains signes morphologiques peut fournir de l'information sur la présence d'eau dans le sol durant une période plus ou moins prolongée. C'est par exemple, le cas de la couleur de la matrice et la présence de taches ou de marbrures aux couleurs contrastantes par rapport au fond matriciel du sol. Certaines propriétés physiques ont un impact direct sur la variabilité spatiale de l'humidité de surface, c'est le cas de la texture, du contenu en fragments grossiers, de la teneur en matière organique, de la structure, de la densité apparente, de la porosité, etc. D'autres éléments pédologiques ont un impact indirect, tel que la capacité de rétention en eau, la perméabilité, etc.

1.3.4.1. La texture :

La texture du sol (granulométrie) a une importance primordiale sur la capacité au champ et le point de flétrissement. En effet, c'est entre les particules du sol que se trouve l'eau capillaire absorbable, la quantité d'eau que le sol peut retenir ne peut pas dépasser l'espace disponible entre les particules de sol et elle est limitée par le pouvoir de rétention du sol. Ces deux limites dépendent de la granulométrie.

Selon Mahiou 1996 l'eau qui pénètre au sol peut circuler librement dans les sols à texture grossière (sols sableuse). En revanche, l'eau retenue plus ou moins fortement dans le cas des sols à texture fine (sol argileux). Les particules fines sont donc un facteur de rétention d'eau (figure 1-4).

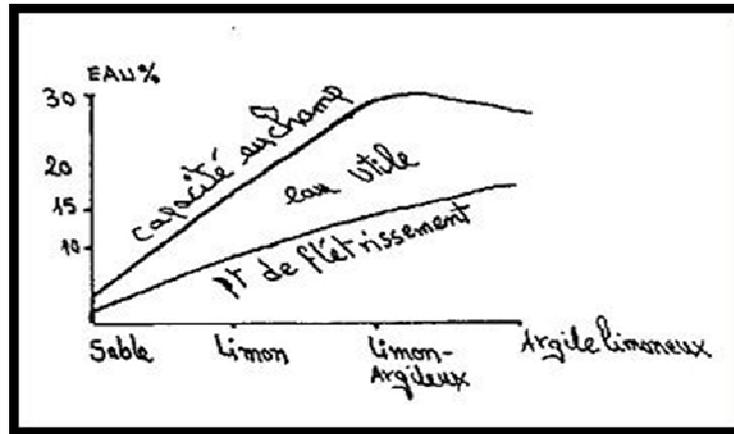


Figure 1-4 : La rétention de l'eau en fonction de la texture du sol.

1.3.4.2. Conteneur en matière organique :

La teneur en matière organique influe la teneur en humidité d'un sol, maintenant l'eau dans le sol par sa bonne capacité de rétention (NRCS, 1998). Certains sols ayant des teneurs en matière organique très élevées seront saturés en eau. C'est particulièrement le cas en milieu humide (tourbière, marécage, marais, etc.), caractérisé par l'accumulation de matière organique qui se décompose très lentement (supérieur à 17% de C organique). Cependant, la matière organique peut, dans certains cas, améliorer la teneur en humidité des sols, en liant d'autres particules de sol (limons, argiles) pour former des agrégats favorisant ainsi une meilleure structure et porosité du sol (Fausey, 2002).

1.3.4.3. La structure du sol :

Selon le mode d'arrangement des différentes particules du sol, la teneur du sol en eau varie (Henin, 1974).

Dans les sols tassés, les pores sont plus nombreux que les macropores, ils retiennent donc fortement l'eau. Contrairement, les sols contenant des pores de grande taille sont des sols qui retiennent une faible quantité d'eau (figure 1-5).

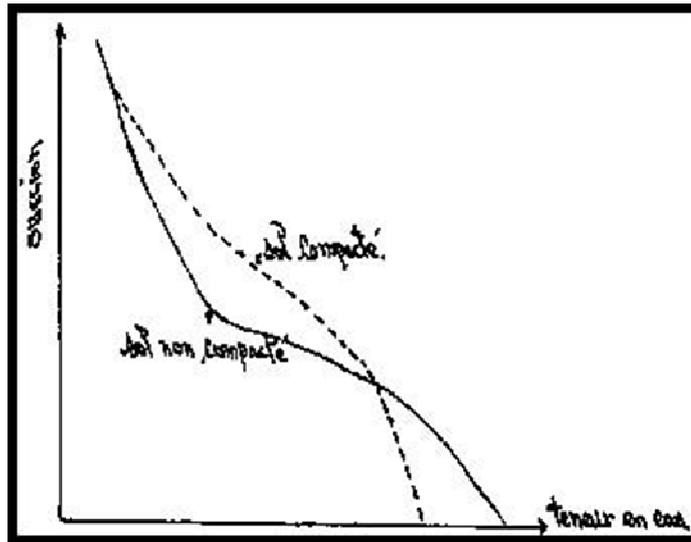


Figure 1-5: la teneur en eau selon la structure du sol.

1.3.4.4. La densité ou la masse volumique :

La densité d'un sol a également une influence sur la variabilité de la teneur en humidité d'un sol. La cause la plus répandue du tassement limite non seulement la croissance des racines de la culture en place mais aussi le mouvement vertical de l'eau et de l'air dans le sol. Les zones de pâturage peuvent aussi présenter des sols d'une densité élevée due à la circulation des animaux (Karine, 2011).

La teneur en eau est en fonction de la porosité et de la perméabilité du sol. Le volume maximal d'eau qu'un sol peut retenir est la « Capacité au Champ » (ou Capacité de Rétention) du sol qui dépend essentiellement de la granulométrie du sol. Près de la surface, le sol n'est pas saturé, les espaces vides contiennent de l'eau et de l'air, l'eau est soumise aux forces de gravité et de capillarité.

Le tableau 1-2 présente les propriétés physiques du sol les plus importantes.

Tableau 1-2 : Propriétés physiques des sols (valeurs moyennes) (FAO, 2005)

Type de sol	Texture légère (grossière)	Texture moyenne	Texture lourde (fine)
Capacité de saturation, % poids	25–35	35–45	55–65
Capacité au champ (CC), % poids	8–10	18–26	32–42
Point de flétrissement (WP), % poids	4–5	10–14	20–24
Capacité de saturation/CC, CC/WP	2/1	1,85/1	1,75/1
Densité en vrac (poids par volume), g/cm ³	1,4–1,6	1,2–1,4	1,0–1,2
Humidité disponible du sol en volume (CC-WP x densité)	6	12	16–20
Humidité disponible (Sa) par profondeur de sol en m (CC-WP x densité x 10), mm	60	120	160–200
Tension d'humidité des sols, bars:			
• à la capacité au champ	0,1	0,2	0,3
• au point de flétrissement	15,0	15,0	15,0
Temps requis de la saturation à la capacité au champ, heures	18–24	24–36	36–89
Taux d'infiltration, mm/h	25–75	8–16	2–6

1.1.3.5. Profils hydriques et réserves en eau du sol

C'est un profil successif permettant de décrire la variabilité spatiale et temporelle de la teneur en eau dans le sol (figure 1-6). Il permet le calcul de la réserve en eau du sol et de visualiser les phases d'humectation et de dessèchement du sol.

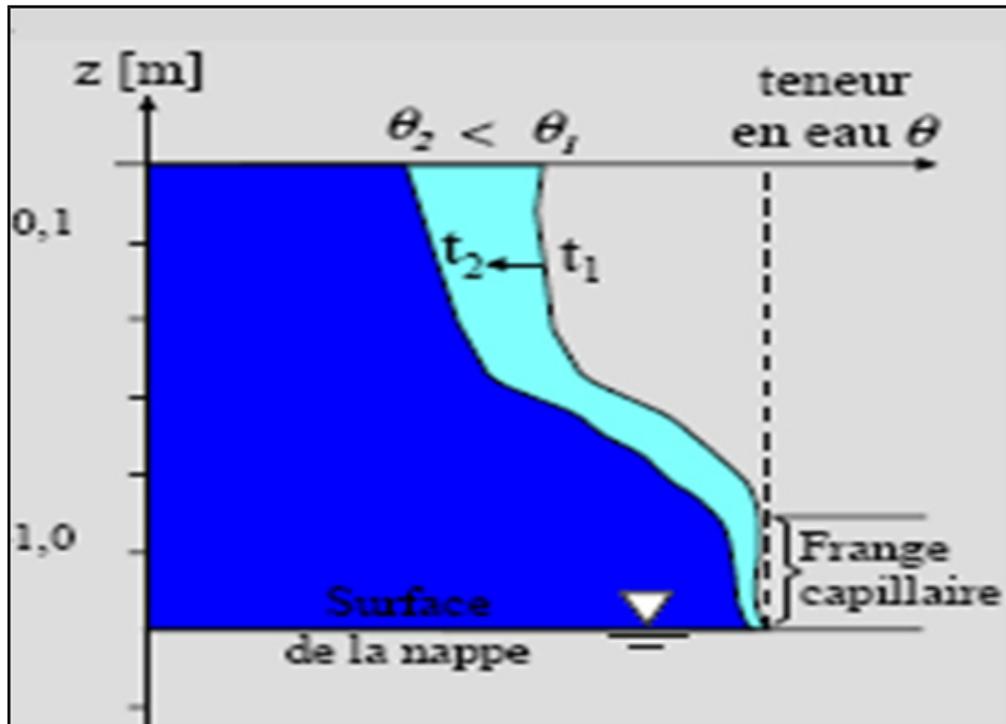


Figure 1-6 : Exemples de profils hydriques au temps t1 et t2 (Musy et Soutter, 1991)

Le stock d'eau, représentant l'intégration de l'humidité sur la profondeur z est déterminé par l'expression :

$$S_0^z = \int_0^z \theta_v dz \dots\dots\dots(2)$$

Avec :

θ_v : teneur en eau volumétrique (%).

S : stock d'eau (cm).

z : profondeur de sol envisagé (cm).

Quand à la variation du stock d'eau, elle est déterminée par :

$$\Delta S_0^z = \int_0^z (\theta_v - \theta_{v_i}) dz \dots\dots\dots(3)$$

Avec :

ΔS : variation du stock d'eau en cm.

θ_v et θ_{vi} : teneur en eau volumétrique (%), respectivement à la profondeur Z et Z_i .

Ces calculs nous renseignent sur les pertes ou les gains en eau d'où une estimation des besoins en eau d'une culture à différentes périodes de sa vie. De plus, l'étude du gradient de pression peut nous indiquer le sens d'écoulement grâce à l'équation de DARCY en séparation les flux grâce au positionnement de la zone de flux nul (tensiomètres).

1.4. Méthodes de mesure de l'humidité du sol

Il existe différentes méthodes de mesure de l'humidité d'un sol (ou autres substrats équivalents), certaines sont analysées au laboratoire, d'autres donnent l'état du sol in situ.

1.4.1 Méthodes thermogravimétriques

C'est une méthode classique pour mesurer l'humidité d'un échantillon de sol, elle consiste à prélever de manière très minutieuse à l'aide d'une tarière un échantillon du sol dans un cylindre dont le volume et le point sont connues, le poids de l'échantillon est mesuré avant et après passage dans une étuve afin d'en déduire l'humidité massique de l'échantillon (maintenir l'échantillon à 105°C, jusqu'à ce que le poids soit constant généralement autour de 48 heures)

La connaissance de la densité donne la teneur en eau volumique du système, c'est la méthode la plus précise de mesure de l'humidité du sol, elle est indispensable pour calibrer les autres méthodes de mesures, en particulier les méthodes neutroniques (Hillel, 1998). Elle présente néanmoins de nombreux inconvénient :

- Longe à mettre en place, la méthode est très fastidieuse pour de grand périmètre pour de nombreux échantillons, la méthode est souvent qualifiée de destructrice pour le sol car elle exige bon nombre d'échantillons, surtout si l'on envisage de réaliser un profil d'humidité sur plusieurs centimètres du sol.
- Les résultats ne sont pas instantanés, et doivent être traités au laboratoire.

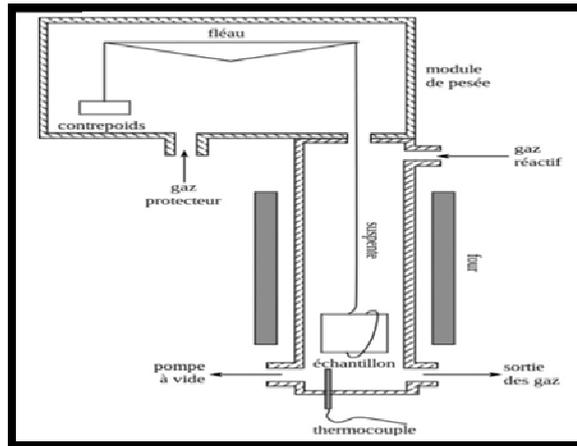


Figure 1-6 : Schéma type de la méthode thermogravimétrique.

1.4.2 Mesure par les sondes neutroniques.

Cette méthode reste particulièrement efficace mais chère et désormais beaucoup trop réglementée (caractère radioactif du principe de l'appareille) pour être utilisé simplement par un opérateur.

Le principe de l'humidité neutronique s'appuie sur l'utilisation d'une faible source radioactive qui émet en continu des neutrons rapides, ces neutrons perdent leur énergie lorsqu'ils percutent des atomes d'hydrogène entourant la source. Si l'on admet que la majeure partie de l'hydrogène appartient aux molécules d'eau autour de la source. Cette hypothèse constitue la base de la mesure d'humidité des sols avec la sonde à neutrons.

Lorsque la source est placée dans le sol selon le dispositif présenté sur la figure 1-7 ; celle-ci permet d'y estimer la quantité d'eau environnante, l'émission des neutrons étant sphérique, la sonde explore l'eau contenue dans le volume sphérique, d'environ 40 cm de rayon (Daudet et Vachaud, 1977).

De façon pratique, la sonde à neutrons est posée sur un tube d'accès en aluminium placé dans le sol, à l'intérieur duquel la source est guidée, le tube installé une fois pour toute sur un site donné. Un détecteur placé près de la source compte le nombre N de neutrons lents qui se reviennent à la source.

La difficulté majeure de cette méthode repose sur l'installation d'un tube d'accès neutronique de quelque centimètre jusqu'à une profondeur de plusieurs mètres, rendue difficile à cause des

hétérogénéités du sol, de plus pour obtenir la teneur en eau, il est nécessaire de réaliser une calibration en fonction du type de sol étudié.

De plus elle présente un autre inconvénient d'ordre technique, puisque la méthode est très influencée par le rayonnement superficiel.



Figure 1-7 : La sonde neutronique

1.4.3. Méthode par tensiomètre

La cane tensiométrique se présente comme un tube obturé à l'une de ces extrémités par un bouchon auto cicatrisant, l'autre extrémité est constituée d'une céramique poreuse qui assurent la circulation de l'eau et donc de la solution du sol à l'intérieur du tensiomètre et pour créer ainsi un équilibre physicochimique entre l'eau du tube et celle du sol (figure 1-8).

Le tensiomètre dont on a au préalable saturé la céramique poreuse, est placé sur le site à l'aide d'une tarière.

Le tensiomètre doit être rempli d'eau jusqu'à 5mm du bord supérieur du tube, le tube est alors fermé à l'aide d'un bouchon auto cicatrisant, le déficit en eau du sol entraîne une diminution du niveau dans le tube et crée ainsi une tension qui sera mesurée à l'aide d'un tensiomètre électronique à aiguille hypodermique de type (SMS.2500 S).

La mesure densitométrique va nous permettre d'évaluer la succion que crée le déficit en eau du sol à l'intérieur du tube. (Les tensionics) ont également la propriété de posséder des capillaires qui permettent de collecter les échantillons d'eau contenue dans la céramique

poreuse, En effet, après 8 à 10 jours, la diffusion des ions à travers la céramique permet d'obtenir un équilibre chimique entre la solution du sol.

Bien que l'eau contenue dans la céramique soit en équilibre avec l'eau et la solution du sol, il n'en va pas de même avec l'eau contenue les capillaires ce qui entraîne une dilution des ions dans l'échantillon, il faut donc appliquer une correction des concentrations mesurées dans ces échantillons

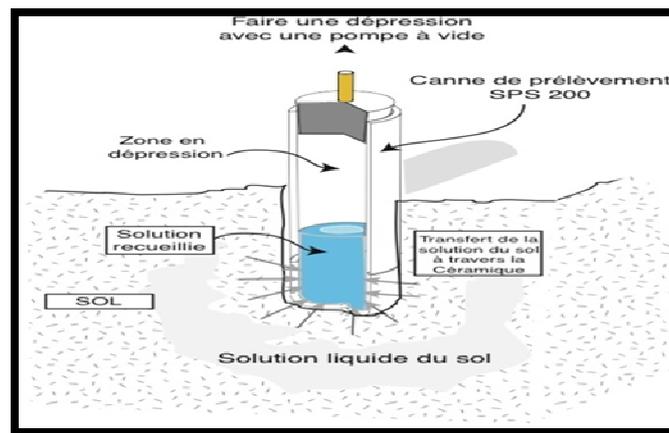


Figure 1.8 : schéma d'une cane tensiométrique.

Enfin, l'utilisation de cet appareil présente des difficultés lorsque le déficit en eau du sol est trop important, la diminution du niveau dans le tube est telle que celui-ci finit par se vider, il est alors impossible de mesurer la succion ou de prélever un échantillon.

1.4.4. Méthode capacimétrique

Méthode électromagnétique économique, mais au volume d'influence limité (1 à 2 cm autour des pointes du capteur) et influencée par le type de sol, la température et la salinité. Bien adaptée aux petits volumes de sol avec un bon rapport prix/ performance.

Les humidimètres capacitifs gagnent en popularité maintenant qu'ils sont offerts sur le marché, car ils fournissent des lectures continues, il reste qu'en raison de leur coût, ces appareils servent principalement dans des essais. Les sondes capacitives actuelles sont conçues peut-être installées en un lieu fixe dans le champ pour toute la saison de croissance.

Elles sont compatibles avec des niveaux élevés d'automatisation et/ou de télémétrie, Des contraintes de coût limitent souvent le nombre de sondes capacitives utilisées, l'emplacement

de l'instrument est primordiale pour assurer une information représentative du champ surveillé

Pour son utilisation dans l'estimation de l'humidité du sol, on installe une conduite d'accès imperméable à l'eau dans laquelle on insère la sonde (les conduites d'accès sont généralement installées en permanence et ne bougent pas d'une année à l'autre, de nombreux points de mesure d'humidité peuvent être fixés le long de la sonde pour obtenir des lectures à différentes profondeurs, selon la profondeur d'enracinement des cultures.

1.4.5 Méthode TDR :

Née dans les années 1980 la méthode TDR (réflectométrie temporelle) se place comme une méthode incontournable tant par la qualité que par la convivialité de ces mesures.

Le principe de cette mesure est basé sur la détermination du temps de propagation d'un pulse électromagnétique le long d'une électrode introduite dans le sol.

Le temps de propagation de ce pulse dépend étroitement de l'humidité du sol (mesure de permittivité diélectrique)

Son volume d'influence est supérieur à celui des techniques capacitives. La mesure est par ailleurs faiblement influencée par la température, la salinité et le type du sol.

Cette technologie permet des mesures précises à un tarif maintenant abordable.

Les sondes TDR cherchent aussi de mesurer la permittivité relative du sol mais cette mesure s'effectue grâce à un générateur –enregistreur d'ondes électromagnétiques. Une onde est créée par la sonde et se propage le long d'un guide d'ondes (tige métallique parallèle) puis arrivant au bout de ce guide, se réfléchit et est enregistrée par la sonde (figure 1-9)

Le temps d'aller- retour de l'onde permet de calculer sa vitesse (V) qui est liée aux parties réelles et imaginaires de la permittivité relative du sol.

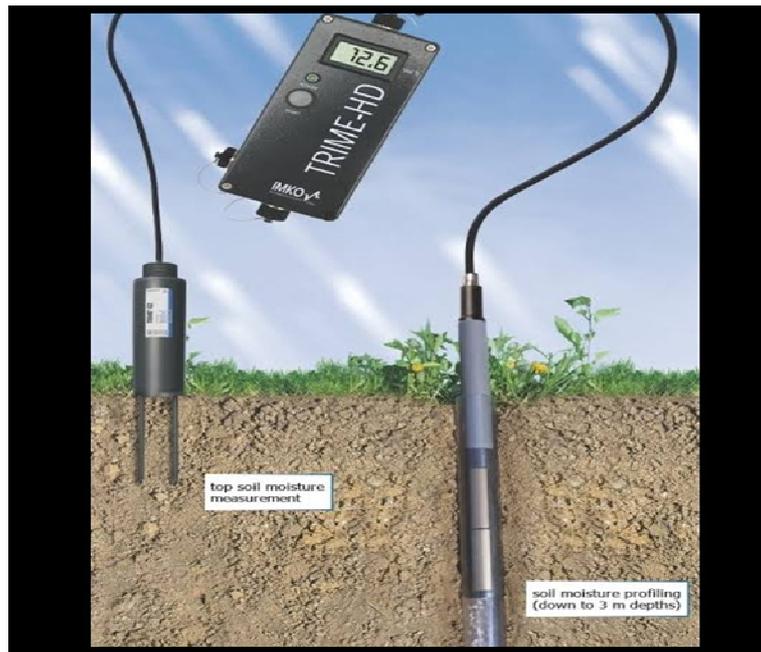


Figure 1.9 : schéma d'une sonde TDR

1.4.6. La méthode électromagnétique

1.4.6. 1. L'induction électromagnétique (EM)

EM est un paramètre utilisé en prospection géophysique comme en physique, décrit un phénomène qui combine les champs électriques et magnétiques. La propagation d'une onde électromagnétique ou la conduction d'un courant électrique dans un sol dépend de ses propriétés électriques et magnétiques, telles que la conductivité électrique (CE), la permittivité diélectrique et la perméabilité magnétique (Besson, 2007). Ces propriétés sont mises en relation avec le champ électromagnétique par les équations de Maxwells. Son fonctionnement est basé sur l'utilisation de deux dipôles électromagnétiques correspondant à deux bobines ou spires espacées d'une distance inter-spires « S », l'une étant émettrice et l'autre réceptrice, où les champs électromagnétiques sont générés et détectés à l'intérieur de bobines dans lesquelles circulent des courants alternatifs. Lorsque la spire primaire (émettrice) (SP) est parcourue par un courant électrique de basse fréquence F, elle produit un champ magnétique primaire H_p de même fréquence qui crée dans le sol supposé homogène des courants induits (courants de Foucault) (Michot, 2003). Ces courants produisent à leur tour un champ magnétique secondaire de même fréquence qui se superpose au champ magnétique primaire et qui est mesuré à l'aide d'une spire secondaire (réceptrice) (SS) (Job et

al., 1987) (Figure 1-10). L'amplitude et la phase du champ secondaire sont différentes de celles du champ primaire en raison de la variation des propriétés du sol (taux d'argile, teneur en eau, salinité...), de la distance inter-bobine et de leur orientation, de la fréquence du courant et de la distance au-dessus de la surface du sol (Hendrickx et Kachanoski, 2002 ; Corwin et Lesch, 2003). Le rapport entre le champ magnétique secondaire mesuré et le champ primaire émis est proportionnel à EM du sol et donne directement accès à son inverse, la résistivité électrique (Michot, 2003). Selon McNeil (1980), celle-ci est égale à :

H_s : champ magnétique secondaire à la bobine réceptrice (A.m-1)

H_p : est le champ magnétique primaire à la bobine émettrice (A.m-1)

ω : $2\pi f$

f : fréquence (Hz)

μ_0 : perméabilité magnétique du vide en henry par mètre (H. m-1)

S : distance inter bobine (m)

σ_a : EM du sol (S.m-1)

Le rapport H_s / H_p eq (1), pour une même position initiale de spire, dépend de la géométrie des lignes de courant dans le sol et donc du volume exploré et de la conductivité propre du sol (Job et al., 1987). Cette conductivité dépend à son tour des différents paramètres du sol influençant EM du sol (CE de la solution du sol (salinité), texture, teneur en eau, porosité...) (McNeill, 1992 ; Rhoades et al. 1999).

1.4.6. 2. Les propriétés pédologiques qui influencent la conductivité électromagnétique

La conductivité électromagnétique tout comme son homologue, la résistivité électrique est une mesure « globalisante ». On obtient un seul résultat alors que les facteurs qui y contribuent sont multiples : humidité, salinité et composition minérale de l'eau, texture, structure et organisation verticale du sol (couche de sol) et même la température.

Les différentes tranches de sol (0 à 30 cm, de 30 à 60 cm, et de 60 à 90 cm) contribuent respectivement de 45, 20, 10 et 5% à la mesure globale. L'impact des tranches plus profondes étant moins important. Ainsi, un sol présentant une texture légère en surface et plus argileuse en profondeur peut donc présenter une conductivité globale (mesure sur toute l'épaisseur) équivalente à un sol de texture limoneuse. Ce point illustre l'impact de profil pédologique et de l'agencement vertical du sol (Sudduck, 2001)

1.4.6. 3. Principe de fonctionnement EM38

L'EM38 été conçu spécialement par la société Génois pour la cartographie différents paramètres pédologique des sols agricoles et peut être utilise pour surfiler rapidement de grandes surfaces sans contact avec le sol (FAO, 1999). L'EM38 est un appareil, léger et utilisable par simple lecture des mises en contact avec le sol. EM38 peut être utilisé selon deux configurations (figure 1-2) :

En mode vertical : Les bobines d'induction sont horizontales et les dipôles magnétiques sont verticaux. La profondeur d'investigation est approximativement de 1,5 m.

En mode horizontal : Les bobines sont verticales et les dipôles magnétiques sont horizontaux. La profondeur d'investigation est alors réduite à 0.75 m (McNeil, 1980) (figure 1-10).

1.4.6. 4. Les avantages et les inconvénients de EM38

a. Les inconvénients de EM38

Sensible aux perturbations électromagnétique (équipements métalliques, véhicules, canalisation métalliques enfouies ...)

Gamme de fonctionnement 1 à Ω .m (dans les terrains très résistants il est difficile d'induire des courants dans le sol permettant de générer des champs électromagnétiques détectables)

Mesure en conductivités ou résistivité apparentes (nécessite de recalculer en résistivités vrais par étalonnage).

b. Les avantages de EM38

L'utilisation de L'EM38 présente plusieurs avantages par rapport aux méthodes traditionnelles.

-Les mesures peuvent être prises aussi rapidement que L'on peut déplacer d'un point de mesure a un autre.

-Un grand volume de sol peut être mesurée qui réduit la variabilité et relativement peu mesures donne une estimation fiable de la propriété moyen du sol des mesures dans le sols relativement secs ou rocailleux sont possible parce que le contact entre le sol et l'appareil n'est pas nécessaire comme dans de la sonde d'électrode.

Et L'EM38 permet une acquisition de données d'une façon non destructive, moins coûteuse et plus rapide que n'importe quelle autre technique (Triantafylis et al, 2000).

Chapitre II :

Matériel et méthodes

Ce chapitre est une présentation de la région d'étude, du protocole expérimental et de la méthodologie utilisée pour l'étude de la variabilité spatiale de l'humidité des sols.

Latitude :36.7565 ;36°45 23

Longitude :3.43333 ;3° 25 60

1.1. Le contexte de l'étude

La présente étude a été réalisée dans la région du Corso qui se situe dans la wilaya de Boumerdes, qui s'étend sur une superficie de 22,41km². Elle est délimitée par la mer méditerranéenne au nord, la commune de BOUMERDES et Tidjelabine à l'est, la commune de Boudouaou au sud et Boudouaou El Bahri à l'ouest (Figure 2-1).

La zone étudiée couvre une superficie de 74 hectares. Elle est située sur le littoral Est de l'Algérois au Nord de la localité de Corso. L'accès à ces parcelles se fait à travers une route secondaire goudronnée (route Corso – Corso Marine). Les cultures pratiquées sont essentiellement l'arboriculture fruitière, vignoble et les cultures fourragères.

Les cultures fourragères (luzerne et sorgho) sont irriguées par les eaux usées épurées provenant de la STEPE située sur la littoral Est d'ELGEROIS au Nord de la localisation de CORSO.

Les coordonnées géographiques de corso :

Latitude :36.7565 ;36°45 23 - Longitude :3.43333 ;3° 25 60

Cette recherche a été réalisée sur deux parcelles (parcelle 1 et 2) représentatives des pratiques agricoles de la zone d'étude. La première (parcelle 1) est un vignoble irrigué avec des eaux usées épurées (EUE), la deuxième (parcelle 2) est un verger d'agrumes irrigué par l'eau de forage (Figure 2-3). L'irrigation dans les deux parcelles est effectuée à l'aide de système de goutte à goutte. L'accès à ces parcelles se fait à travers une route secondaire goudronnée (route corso –corso marine).

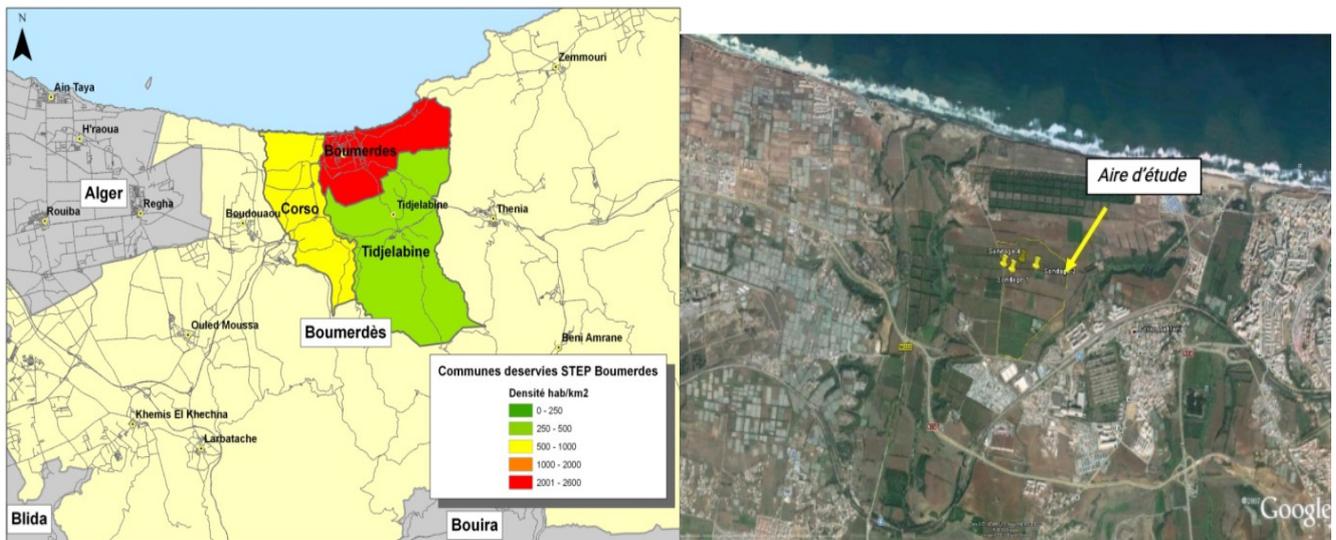


Figure 2-1 : Situation de géographique de la zone etudies



Parcelle 1



Parcelle 2

Figure 2-2. Parcelles d'études (champs de vigne et verger d'agrumes)



Figure 2-3 : Système d'irrigation

1.2. Le climat de la région d'étude

Afin de caractériser les tendances générales des différents paramètres climatiques du site, nous avons utilisé une série de données climatiques journalières allant de 2014 à 2021 enregistrées au niveau de l'Office National de la Météorologie de Dar El Beida. Cette disponibilité nous a permis d'étudier les variations interannuelles des paramètres climatiques.

1.2.1. Les Précipitations :

Le tableau 2-1 ci dessous montre la variation mensuelle des précipitations de la série climatique considérée (2014-2021).

Tableau 2-1: Pluviométrie moyenne mensuelle en mm pour la période (2014-2021)

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	juin	Juil.	Aou	sep	oct	Nov	dec	Total
P (mm)	62.0	57.8	44.5	33.4	30	9	2.5	6.2	22.4	39..5	63.3	68.9	439.5

Selon le tableau les précipitations montrent un maximum de 68.9 mm au mois de décembre le mois le plus pluvieux et un minimum de 2.5mm au mois de juillet le mois le plus sec. La pluviométrie totale est de 439.5 mm, elle correspond à la moyenne annuelle de précipitation pour la période 2014-2021 dont 95% sont enregistré durant la période octobre à mai.

1.2.2. La température

Le tableau 2-2 montre la variation moyenne mensuelle des températures de l'air maximal, minimal et moyen durant la période de 2014 à 2021. Le tableau montre que le régime thermique de la région est caractérisé par des températures élevées en été et relativement bas en hiver. La température minimale enregistrée est de 7.34°C en février et la température maximale est de 30.47°C en août. Les températures moyennes les plus élevées sont enregistrées durant le mois de juillet et août, où elle atteint un maximum de 28.05°C, ces températures se manifestent aux mois de février avec une température moyenne 11.48°C.

Tableau 2-2 : paramètres climatiques températures dans la commune de corso, pour la période (2014-2021).

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avr	Mai	Jun	Juit	Aout	Sep	Oct	Nov	dec	Moy
Tmin (C°)	7.66	7.34	10.5	8.02	16.32	23.47	26.35	25.61	21.65	21.14	14	9.28	15.95
Tmax (C°)	15.55	15.63	16.95	12.6	22.63	26.48	30.15	30.47	26.55	29.48	23.6	16.35	19.07
T moy (C°)	11.60	11.48	13.7	10.3	19.47	24.97	28.25	28.04	24.1	25.31	18.8	12.81	19.07

1.2.3. La classification climatique

Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson montre que la région d'étude est sous climat méditerranéen, dans l'étage bioclimatique subhumide tempéré avec une période sèche qui s'étend de la fin mai jusqu'à la mi-octobre (Figure 2-4).

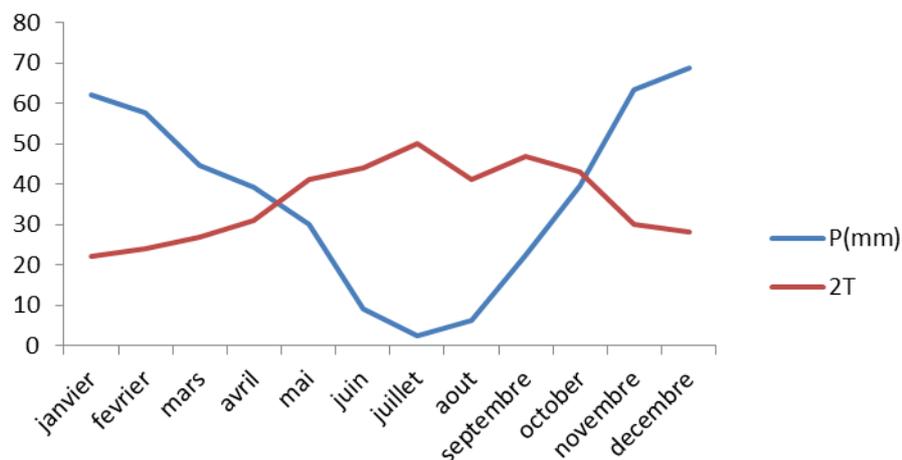


Figure 2.4 : Diagramme ombrothermique de Gaussen (2014 -2021)

2.3. Méthodologie adoptée

La démarche méthodologique s'articule autour de trois axes, (a) la caractérisation des sols étudiés, (b) la cartographie spatio-temporelle de l'humidité et (c) l'analyse méthodologique de l'extrapolation des équations d'étalonnage de EM dans l'espace.

La caractérisation des sols de la zone d'étude : Pour ce faire, nous avons réalisé dans chacun des deux parcelles des prélèvements de sol sur lequel nous avons effectué des analyses au laboratoire.

La cartographie spatiale de l'humidité à l'échelle de la parcelle: Il s'agit de décrire l'extension spatiale et saisonnière de l'humidité par utilisation des méthodes géophysiques. Ces dernières sont non destructives et elles permettent de réaliser une grande densité de mesures et de les répéter dans le temps. La méthode géophysique retenue est la mesure de EM par induction électromagnétique en utilisant l'EM38 (Geonics Ltd, Canada). Les résultats obtenus ont été traités par les méthodes géostatistiques.

2.3.1. Expérimentation sur terrain

Le travail de terrain a été mené en deux étapes principales :

- Prospection géophysique ;
- Prélèvement des échantillons du sol

2.3.1.1. Prospection géophysique

Il s'agit de la caractérisation de l'humidité du sol par la méthode électromagnétique en utilisant l'EM38. L'appareil a été posé directement sur le sol pour mesurer EM sur une profondeur de 0,75 cm en mode horizontal (EMh). Cette étape nécessite la collecte de deux types de mesures électromagnétiques :

- Des mesures électromagnétiques d'étalonnage effectuées pour la réalisation des équations d'étalonnage entre ces mesures et les mesure de la l'humidité au laboratoire.
- Des mesures électromagnétiques à étalonner effectuées pour la cartographie de la l'humidité du sol sur l'ensemble des deux parcelles d'études.

a. Mesures électromagnétiques d'étalonnage

Dans chaque parcelle d'étude, des mesures électromagnétiques ont été effectuées par EM38 en EMh selon deux transects orientés sud-nord correspondant Au total, 20 mesures ont été réalisées dont 10 sur chacune des deux parcelles (Figure 2-5).

b. Mesures électromagnétiques à étalonner

Les mesures électromagnétiques à étalonner ont été effectuées d'une façon systématique aléatoire sur l'ensemble des deux parcelles avec un pas de mesure approximative de 10 m (Figure 2-6)

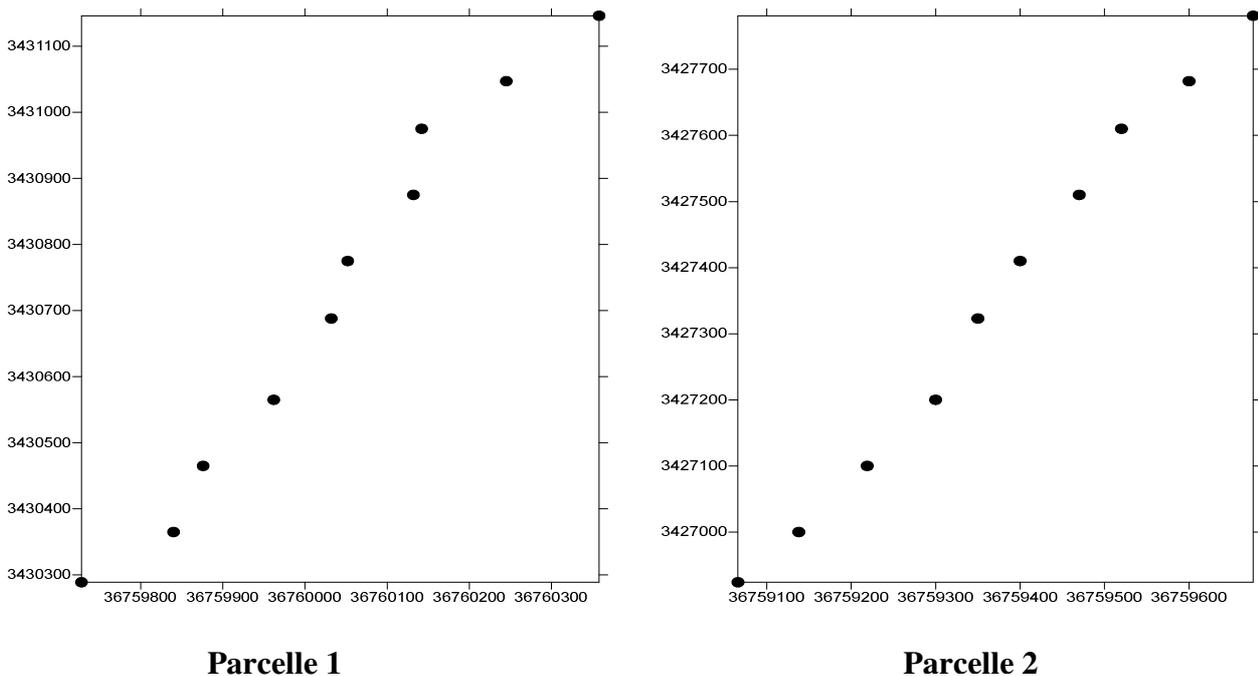


Figure 2-5 Dispositifs d'échantillonnages (prélèvements du sol + Mesures électromagnétiques)

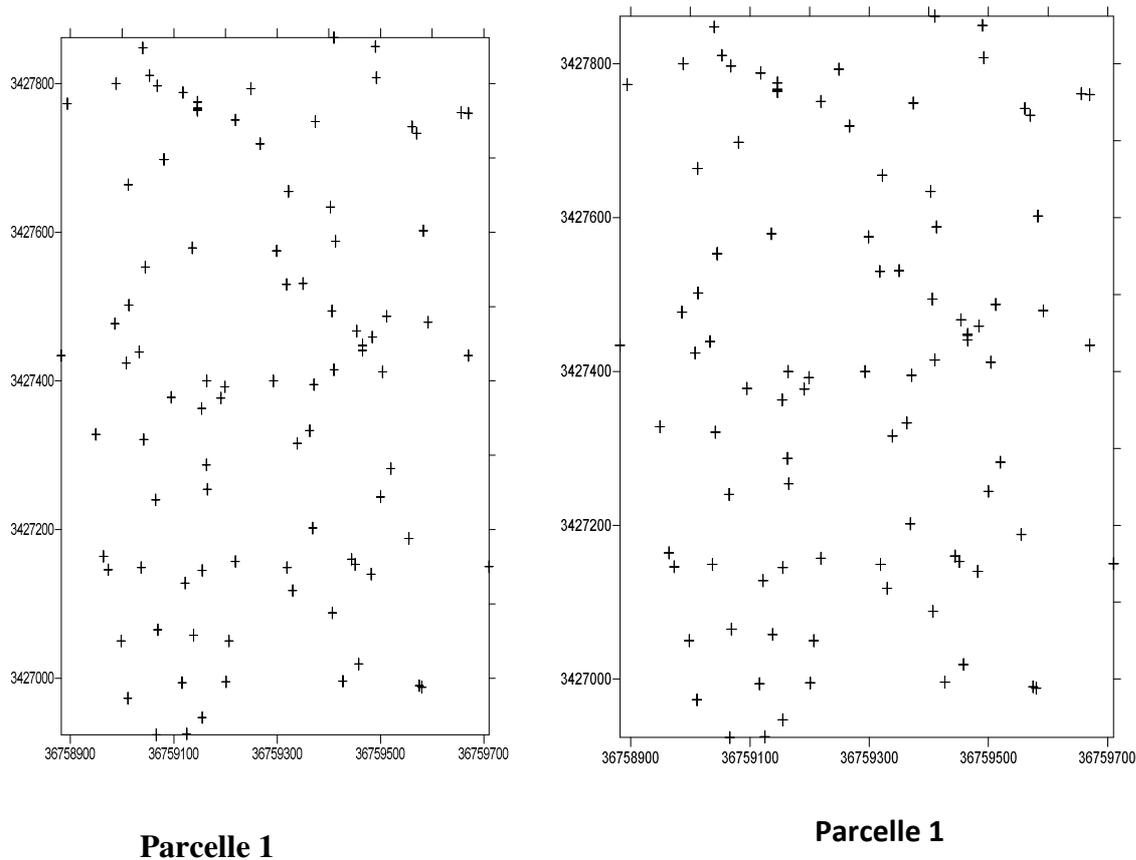


Figure 2-6: Dispositif d'échantillonnage des Mesures électromagnétiques à étalonner

2.3.1.2. Prélèvement du sol

Chaque mesure électromagnétique d'étalonnage a été accompagnée par un prélèvement d'échantillons de sols à la tarière par incrément de 25 cm jusqu'à une profondeur de 75 cm (profondeur d'investigation de l'EM38 en mode horizontal). Au total, 60 échantillons de sol ont été prélevés dont 30 sur la parcelle 1 et 30 sur la parcelle 2 (Figure 2-5).

2.3.1.3. Méthode d'analyses des échantillons du sol

Les analyses du sol effectuées concernent l'ensemble des échantillons du sol prélevé pour les deux parcelles d'étude. Rappelons que les prélèvements des échantillons de sols ont été effectués à la tarière par incrément de 25 cm jusqu'à une profondeur de 75 cm. Au total, 60 échantillons de sol ont été prélevés, dont 30 échantillons sur chacune des deux parcelles.

Les analyses réalisées sont :

- La texture du sol par la méthode internationale à la pipette de robinson (Sédimentation + tamisage).

- Le pH (1:2,5) : Méthode électrométrique (figure 2-7).
- La conductivité électrique des extraits aqueux 1:5 (figure 2-8).
- Le calcaire total : Méthode volumétrique au calcimètre de Bernard (figure 2-9).
- L'humidité pondérale (H%) : Méthode gravimétrique (figure 2-10).

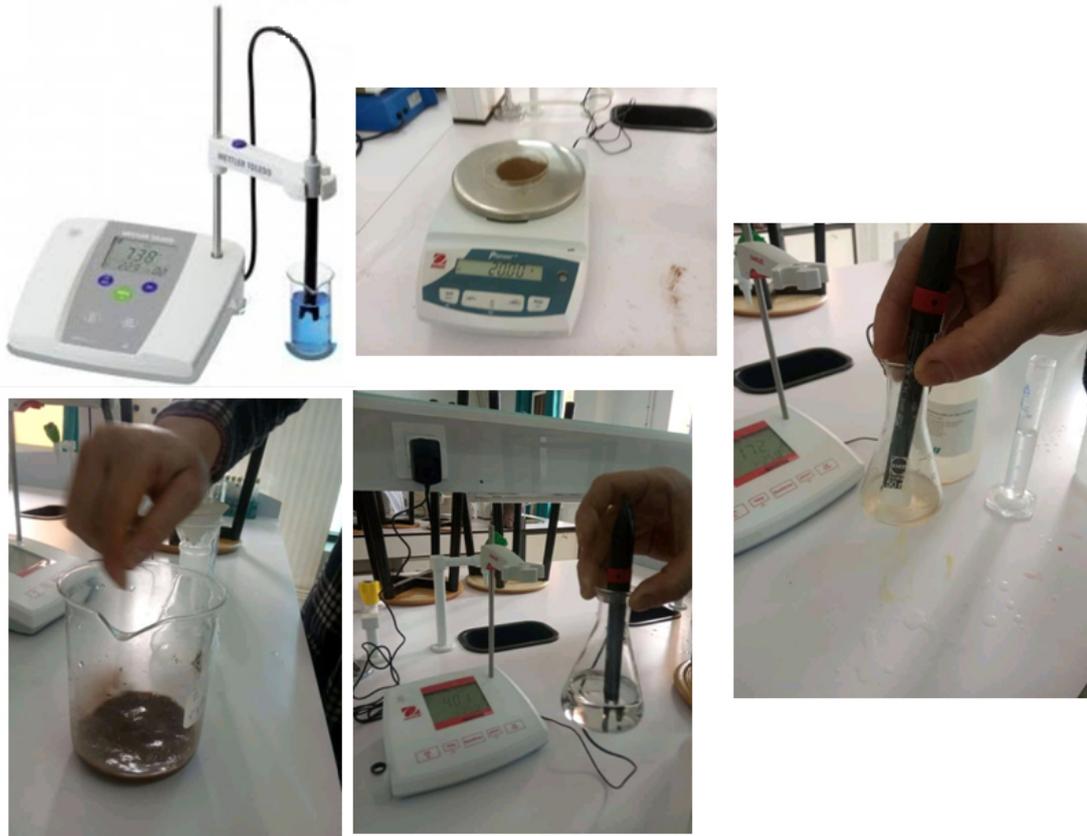


Figure 2-7 : Mesure de pH des extraits aqueux 2:5 (Laboratoire sol Université de Bouira).



**Figure 2-8 : Mesure de conductivité électrique des extraits aqueux 1:5
(Laboratoire sol Université de Bouira).**

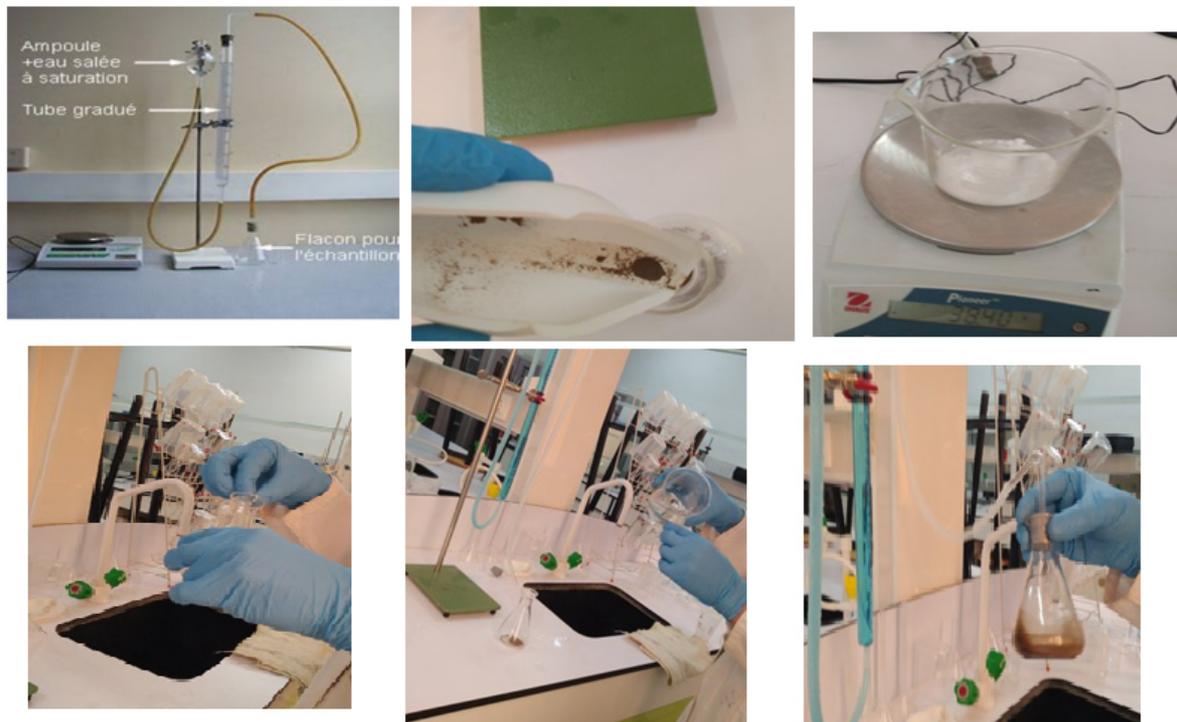


Figure 2-9 : Mesure de CaCO₃ totale (laboratoire sol Université de Bouira).



Figure 2-10 : Mesure de l'humidité pondérale H% par la méthode gravimétrique (Laboratoire sol)

3.2 Traitements statistiques et géostatistiques des données

3.2.1. Traitements statistiques

Les statistiques ont été utilisées pour appuyer et décrire d'une façon synthétique les données des différents paramètres du sol étudiés. Ces statistiques ont été réalisées en utilisant les logiciels Excel avec son complément XLSTAT 5.03

Dans un premier temps, nous avons effectué les statistiques descriptives en se basant sur les tendances centrales et de dispersion des paramètres étudiés ;

Dans un deuxième temps, nous avons effectué des tests de régression linéaire simple entre les valeurs d'EM et les paramètres pédologiques mesurés. L'objectif recherché ici est d'identifier l'influence des différents paramètres pédologiques sur la réponse de EM et de réaliser l'équation d'étalonnage de l'humidité par le biais de EM.

3.2.2. Traitements géostatistiques

La méthode géostatistique est une méthode optimale et non biaisée qui s'appuie sur le degré de similarité entre les valeurs (Mathéron 1962). Elle est utilisée pour analyser et prédire les valeurs associées aux phénomènes spatiales et temporels et ou spatiotemporelles. Il intègre les coordonnées spatiales (et dans certain cas temporelle) des données dans les analyse (Matéron 1962).

De nombreux outils géostatistique ont été développées à l'origine comme un moyen pratique de décrire les modèles spatiaux et d'interpoler les valeurs des emplacements ou les échantillons n'ont pas été prélevés. Ces outils et méthode ont ensuite évolué pour fournir non seulement des valeurs interpolées, mais aussi des mesure d'incertitude pour ces valeurs. La mesure de l'incertitude est essentielle à la prise de décision éclairée, car elle fournit des informations sur les valeurs possibles pour chaque emplacement plutôt que sur une seule valeur interpolée (Goovaerts, 1997)

Plusieurs chercheur ont utilisé la géostatique, parmi lesquels Yang and Yao (2007) ont appliqué plusieurs approches géostatistiques et ont étudié la similitude spatiale des données de l'EM38 de divers nombres d'échantillon pour déterminer la méthode d'estimation optimale. Wang et al, (2008) ont appliqués des statistiques classiques, le système d'information géographique (SIG) et la géostatique pour estimer l'évolution spatiale de la salinité et son rapport avec la dynamique des eaux souterrains dans une oasis d'une région de la chine. Zheng et al (2009) ont exploré la variabilité spatiale et temporelle de la salinité du sol en

utilisant des données in situ de la conductivité électrique, et en appliquant la géostatistique pour analyser les données, et le krigeage pour tracer les modèles spatiaux de la CE.

En Algérie Iddir (2006) a appliqué la géostatistique pour caractériser la variabilité spatiale de la salinité des sols d'une parcelle de plaine de la Macta en réalisant des cartes de salinité obtenues par krigeage. De même, Abdelhafid (2010) a réalisé des cartes d'isovaleurs de la salinité du périmètre de la Mina. Daououi et Lipenard (2011) ont cartographié la salinité en appliquant le krigeage ordinaire en tenant compte d'un variogramme ajusté par un modèle sphérique. Une autre étude a été faite par Khacheba (2011) pour estimer la salinité du sous-bassin de Sidi Rachad par Krigeage. Saoud Mohamed (2014) a évalué l'état actuel de la salinité des sols des Bas Chéouli par utilisation de l'induction électromagnétique de l'EM38.

Ces méthodes se basent sur l'analyse de la structure spatiale du paramètre étudié et se réfèrent à la théorie de la variable régionalisée (Mathéron, 1963). Ils ont pour but de connaître l'organisation de la structure spatiale d'un phénomène. Ces traitements consistent en :

- une analyse variographique de la structure spatiale d'une propriété donnée et
- une cartographie des propriétés étudiées par krigeage.

La structure spatiale de l'humidité dans le contexte de notre travail a été réalisée par analyse variographique et l'interpolation a été effectuée par le krigeage ordinaire.

Dans cette étude, nous avons utilisé le logiciel Surfer 11 (Golden Software) pour l'approche géostatistique. Il permet à la fois d'étudier la structure spatiale par la réalisation de semivariogrammes et d'interpoler par krigeage les données irrégulières des points de mesures géoréférencés.

Chapitre III :

Les résultats et discussion

Cette partie, comporte trois étapes, consacrées la présentation et à la discussion des résultats. Dans la première étape nous présentons les caractéristiques des paramètres pédologiques étudiés, y compris ceux relatifs à la mesure de l'humidité. La deuxième étape est réservée à la recherche des équations d'étalonnage des lectures électromagnétiques en fonction de l'humidité pondérale. Enfin, l'analyse spatiale de l'humidité et sa cartographie seront présentées dans la troisième étape.

3.1. Caractéristiques des sols étudiés

Dans ce chapitre, nous présentons une description statistique des données du sol relatives à la texture, à l'humidité pondérale (H %), au taux de calcaire total, au pH de l'extrait 2/5, à la CE de l'extrait 1/5 et, enfin, aux lectures électromagnétiques (CEM). Les analyses ont été effectuées sur 30 échantillons pour chaque site, provenant de 10 sondages réalisés sur trois (03) niveaux de profondeurs correspondant aux couches 0 – 25 cm (H1), 25 – 50 cm (H2) et 50 – 75 cm (H3).

3.1.1. Parcelle 1(vigne)

L'observation du tableau 3-1 révèle que les taux d'argile oscillent entre 27,32% et 34,33 %, avec une moyenne de 29,97%. Les résultats montrent également que les limons varient entre une valeur minimale de 20,55% à une valeur maximale de 51,33% avec une valeur moyenne de 27,72%. Les taux de sables quand à eux, sont relativement plus élevés et oscillent entre 19,36 et 51,12% avec une valeur moyenne de 42,27%. D'après le triangle texturale (Figure 3-1) de l'USSS (United Soil Survey Staff, 2014) la texture des sols pour ce site est de type limono argileux à limono argilo sableux. Les résultats montrent également que les fractions granulométriques varient faiblement au niveau de ce site avec des coefficients de variation qui ne dépasse pas les 25%.

Les résultats mentionnés dans le tableau montre aussi que, le sol du site 1 est acide à légèrement alcalin ($4,45 < \text{pH} < 7,47$), peu calcaire ($0,75 \% < \text{CaCO}_3 < 2,2\%$) (Baise, 1988), non salin ($\text{CE} < 0,24\%$) (Durand, 1984), peu Humide ($9,22 < \text{H}\% < 18,33$). Les résultats montrent également que les paramètres étudiés varient différemment au niveau du site 2, faibles variation pour le pH et H%, moyenne variation pour la CE et une forte variation pour le $\text{CaCO}_3\%$.

Tableau 3-1 : Analyse statistique des paramètres pédologique de parcelle de vigne

Parcelle de vigne							
	A%	L%	S%	H%	CE ds/m	CaCO ₃ %	pH
Moy	29,97	27,72	42,27	13,76	0,10	0,75	6,01
Min	27,32	20,55	19,36	9,22	0,24	0,44	4,45
Max	34,33	51,33	51,12	18,33	0,19	2,20	7,46
CV	5,8%	25,5%	17,3%	18,7%	38,3%	63,9%	0,8%

3.1.2. Parcelle 2 (agrume)

L'observation du tableau 3-2 révèle que les taux d'argile oscillent entre 26,35% et 33,25 %, avec une moyenne de 29.79%. Les résultats montrent également que les limons varient entre une valeur minimale de 24.33% et une valeur maximale de 31.25%, avec une valeur moyenne de 28,51%. Les taux de sables quand à eux, sont relativement plus élevés et varient entre 35.53 et 47,12%, avec une valeur moyenne de 41,67%. D'après le triangle texturale de l'USSS(United Soil Survey Staff, 2014) la texture des sols pour ce site est de type limono argileux.

Les résultats mentionnés dans le tableau 3-2 montre également que, le sol du site 1 est neutre à légèrement alcalin ($7,18 < \text{pH} < 7,98$), peu calcaire ($0 \% < \text{CaCO}_3 < 2,2\%$) (Baise, 1988), non salin ($\text{CE} < 0,24\%$) (Durand, 1984), peu Humide ($9,03 < \text{H}\% < 20,22$). Les résultats montrent également que les paramètres étudiés varient différemment au niveau du site 2, faibles variation pour la texture, le pH et H%, moyenne variation pour la CE et une forte variation pour le CaCO₃% .

Tableau 3-2 : Analyse statistique des paramètres pédologique de parcelle d'agrume

Parcelle d'agrume							
	A%	L%	S%	H%	CE ds/m	Caco3%	pH
Moy	29,79	28,51	41,67	13,80	0,12	1,03	7,45
Min	26,35	24,33	35,53	9,03	0,01	0,00	7,18
Max	33,25	31,25	43,66	20,22	0,24	2,20	7,98
CV	5,8%	5,8%	6,3%	21,2%	45,9%	63,0%	2,3%

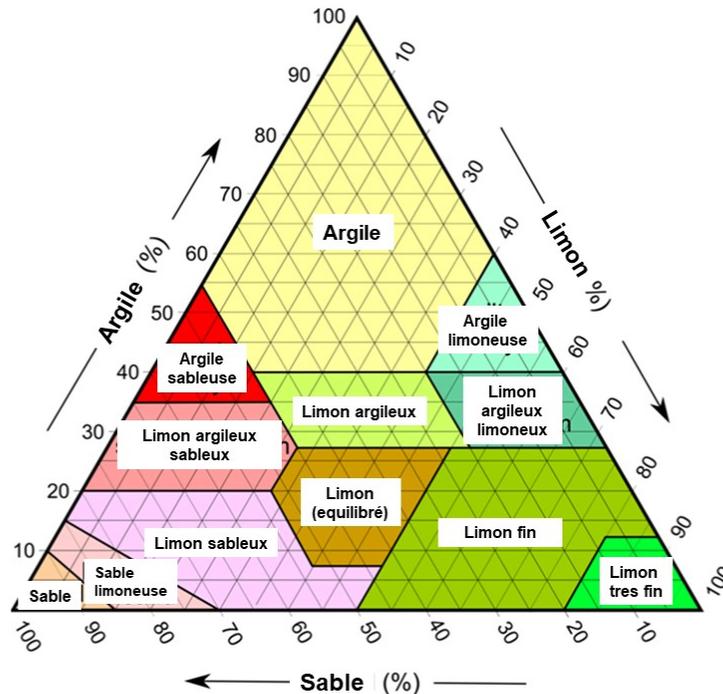


Figure 3-1 : Triangle textural de (United Soil Survey Staff, 2014)

3.2. Distributions verticales et latérales des taux des différents paramètres pédologique au niveau des transects.

3.2.1. Fractions granulométriques

Les figures 3-2 et 3-3 révèlent que quels que soit le transect considéré le taux d'argile varie faiblement dans tous les profils, les écarts sont faibles, ce qui traduit une homogénéité verticale et horizontale de ce paramètre au niveau des deux parcelles.

Les figures 3-4 et 3-5 montrent que les taux de limons se distribuent différemment selon le transect considéré. En effet, ces taux sont hétérogènes dans la première partie du transect 1 (sondages 1 à 4) puis elles deviennent homogènes dans le reste des sondages. En revanche pour le transect 2, les taux de limon sont homogènes au niveau de la première partie du transect (sondages 1 à 4) puis elles deviennent hétérogènes dans le reste des sondages.

Les figures 3-6 et 3-7 révèlent que quels que suit le sondage considéré les taux de sables varie faiblement (exception les sondages 1 à 4 du premier transect) dans tous les profils, les écarts sont faibles, ce qui traduit une homogénéité verticale et horizontales de ce paramètres au niveau des deux parcelles.

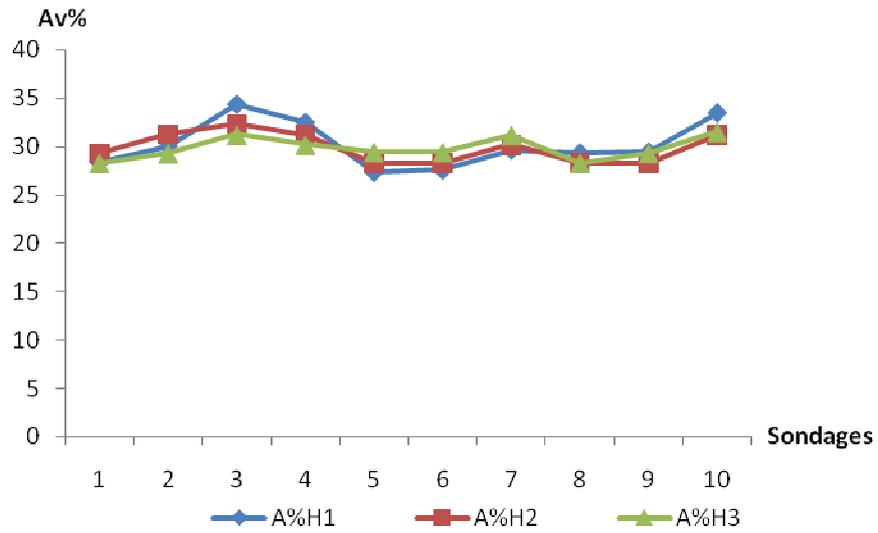


Figure 3-2: Distributions verticales et latérales des taux d'argile dans la parcelle 1

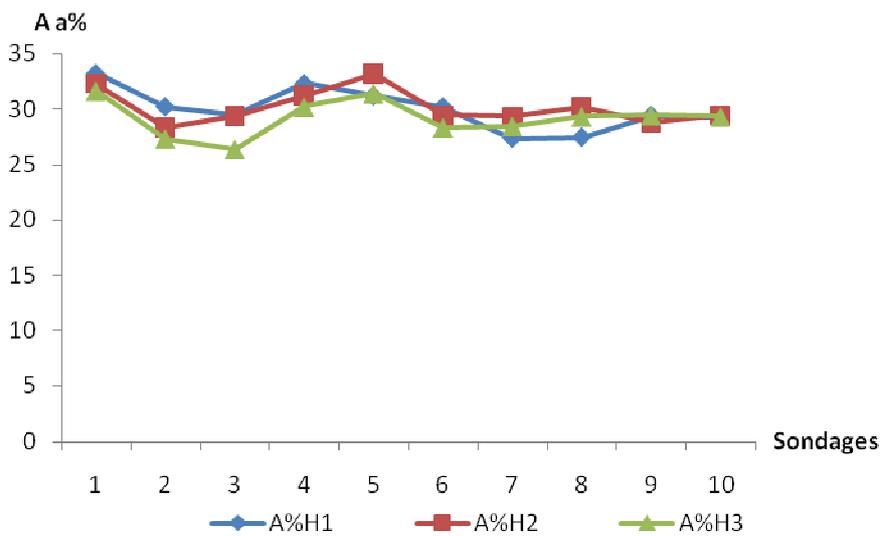


Figure3-3: Distributions verticales et latérales des taux d'argile dans la parcelle 2

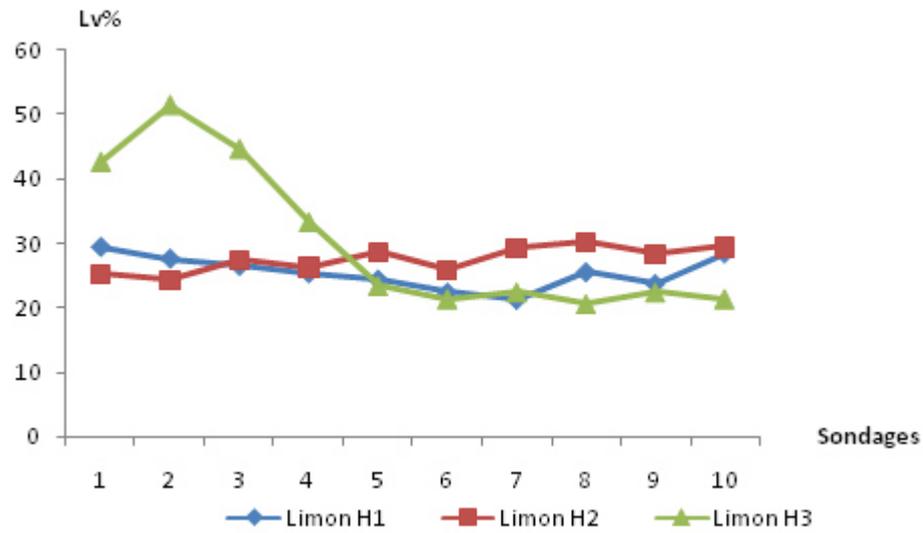


Figure3-4: Distributions verticales et latérales des taux de limon dans la parcelle 1

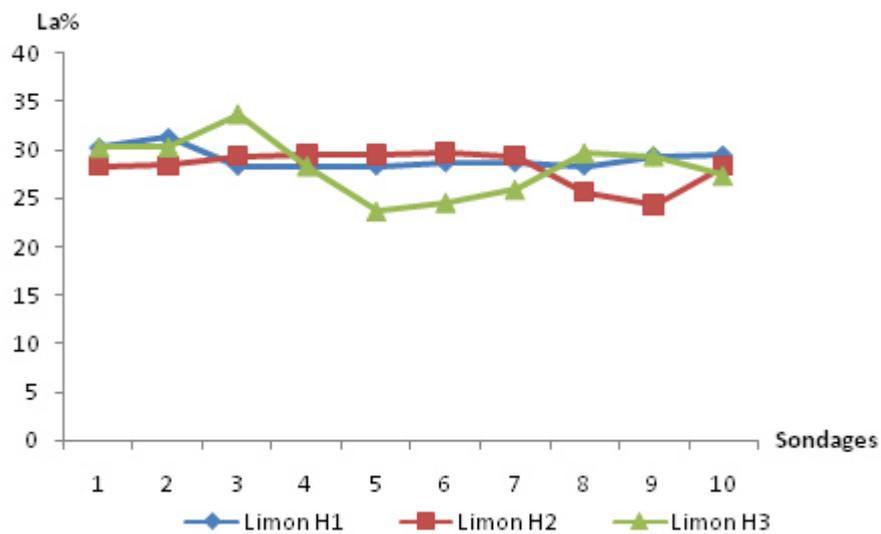


Figure3-5: Distributions verticales et latérales des taux de limon dans la parcelle 2

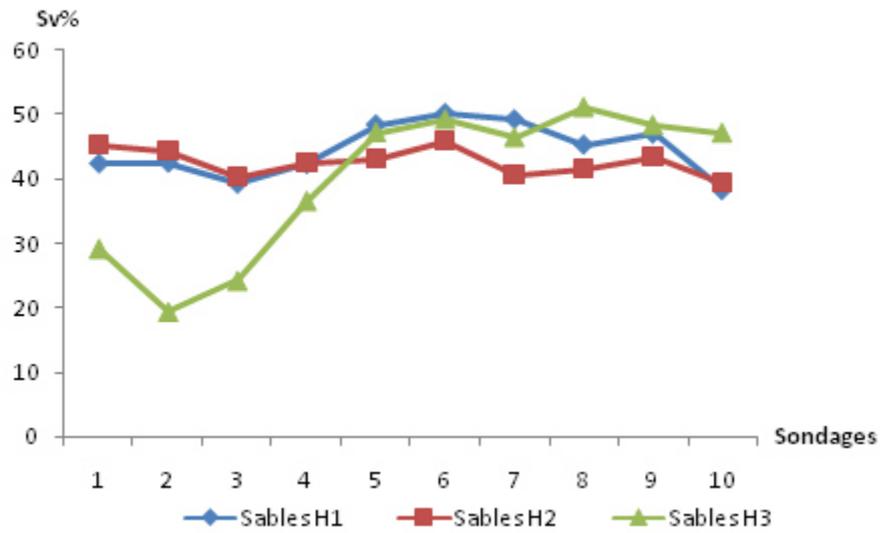


Figure3-6: Distributions verticales et latérales des taux de sables dans la parcelle 1

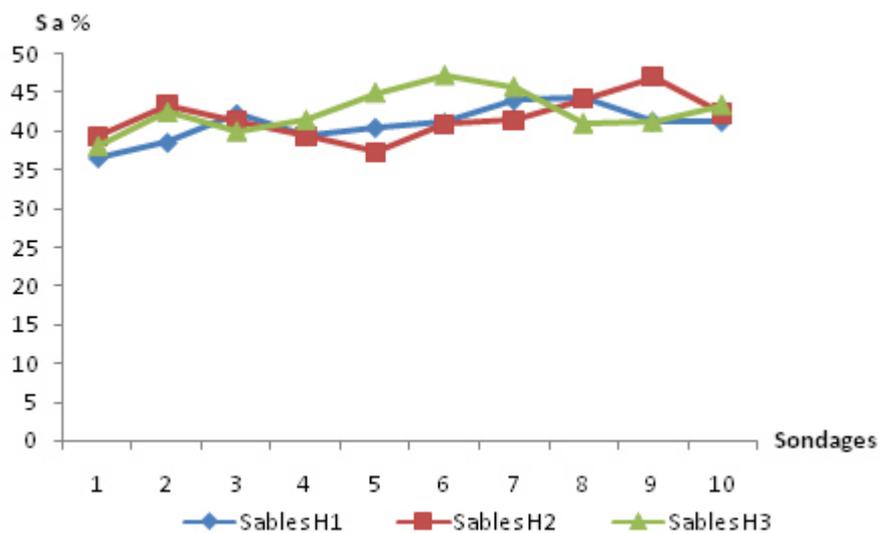


Figure3-7: Distributions verticales et latérales de sable dans laparcelle 2

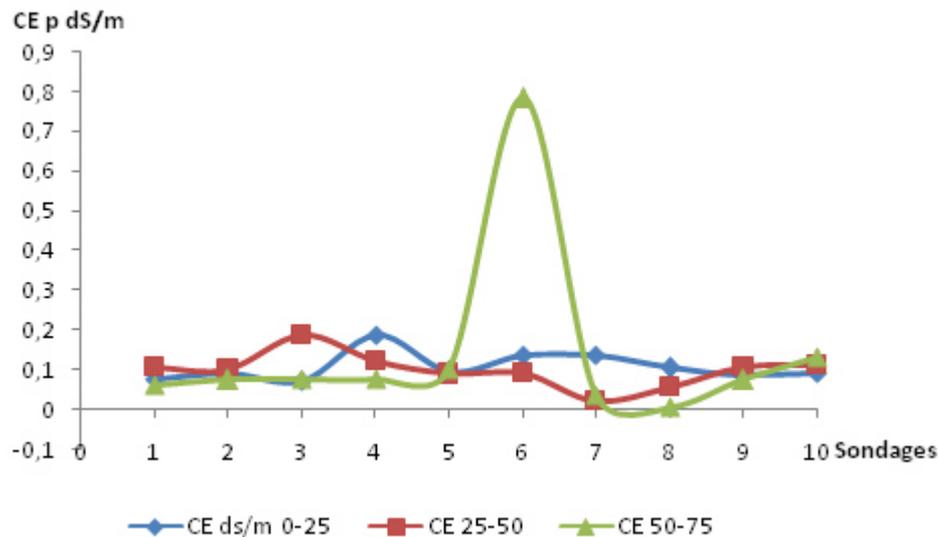


Figure 3-8: Distributions verticales et latérales de la conductivité électrique dans la parcelle 1

3.2.2. La salinité

Les figures 3-8 et 3-9 révèlent que quel que soit le transect considéré, la distribution latérale de la salinité est sinusoïdale avec des courbes qui s'entrecroisent. Cette observation signifie que la salinité se distribue d'une façon hétérogène aussi bien d'un sondage à l'autre que du haut vers le bas du profil au sein d'un même transect. Les figures montrent également que la salinité présente des niveaux très faibles quel que soit le position du sondage et la profondeur du sol considérée, ce qui dénote le caractère faiblement salin des parcelles d'étude (Durand, 1984).

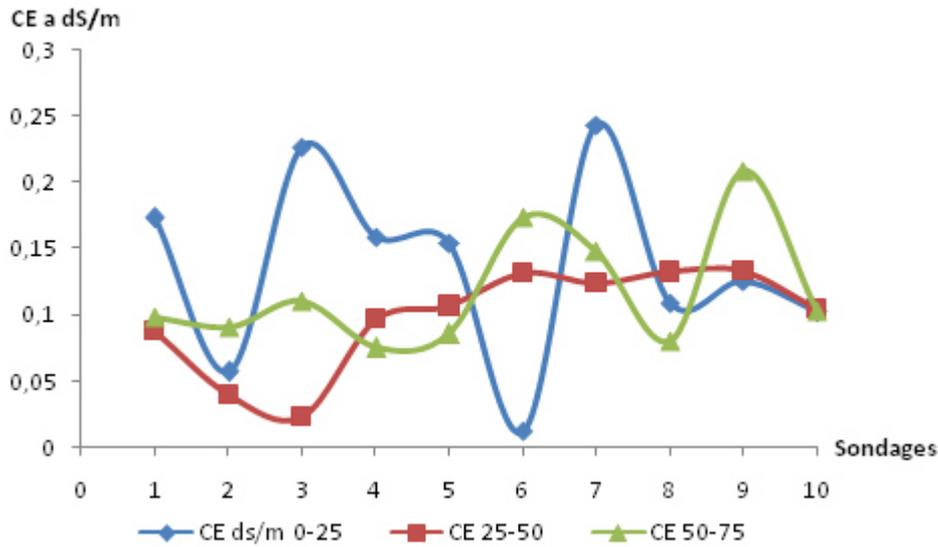


Figure3-9: Distributions verticales et latérales de la conductivité électrique dans la parcelle 2

3.2.3. Le pH

Les figures 3-10 et 3-11 révèlent que quels que soit le sondage considéré les valeurs du pH varie faiblement (exception les sondages 1 à 33 du deuxième transect) dans tous les profils, les écarts sont faibles, ce qui traduit une homogénéité verticale et horizontales de ce paramètres au niveau des deux parcelles. Les résultats montrent également que la réaction du sol est dans l'ensemble acide à neutre pour la première parcelle, par contre elle est neutre à alcaline pour la deuxième parcelle.

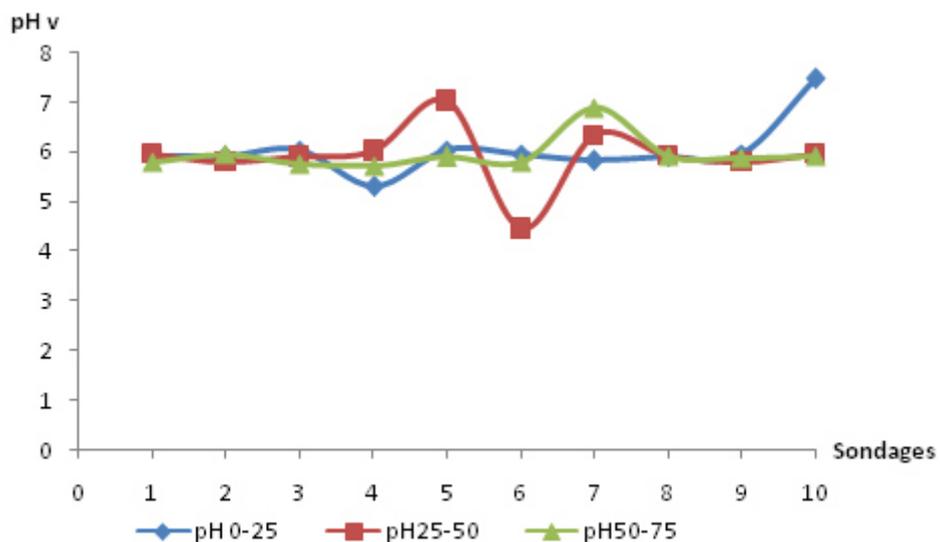


Figure3-10: Distributions verticales et latérales du pH dans la parcelle 1

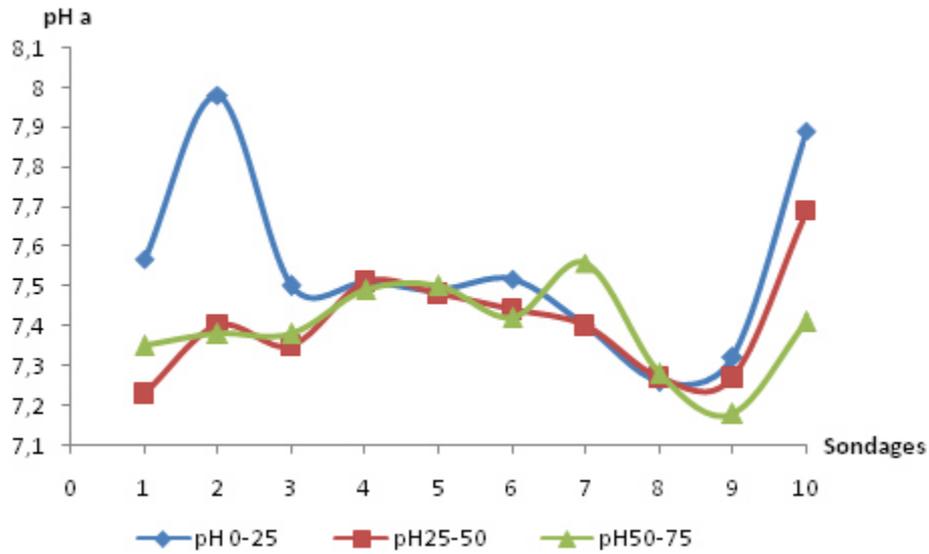


Figure3-11: Distributions verticales et latérales du pH dans la parcelle 2

3.2.4. Le taux de calcaire

Les figures 3-12 et 3-13 montrent que quelle que soit le transect considéré, les profils en long de la distribution latérale du CaCO_3 des différentes couches ne sont jamais parallèles et se recoupent et s'inversent fréquemment avec des écarts plus ou moins important au sein d'une même observation. Ce résultat signifie que les deux parcelles se caractérisent par une légère variabilité spatiale de leurs profils calcaires et que la distribution du CaCO_3 ne serait pas liée à une quelconque dynamique de cet élément dans le profil

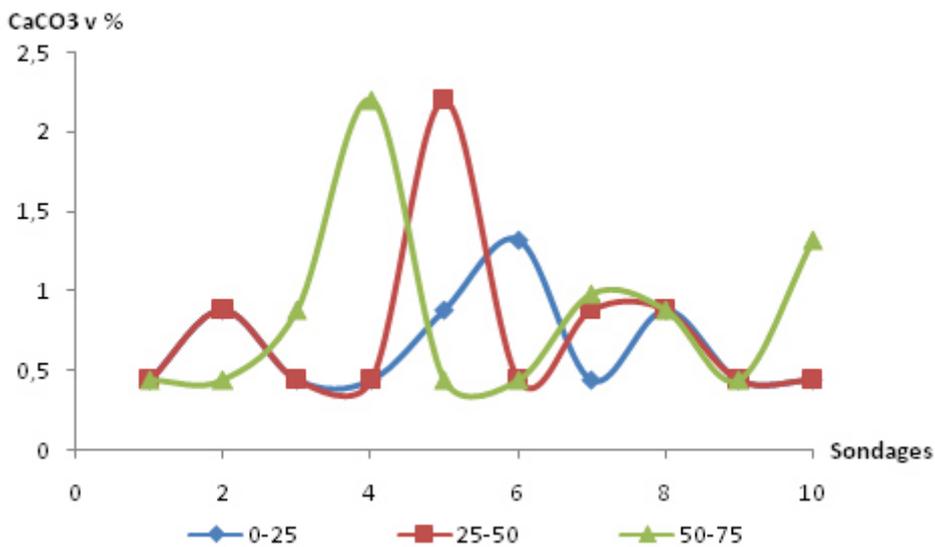


Figure3-12: Distributions verticales et latérales du CaCO_3 dans la parcelle 1

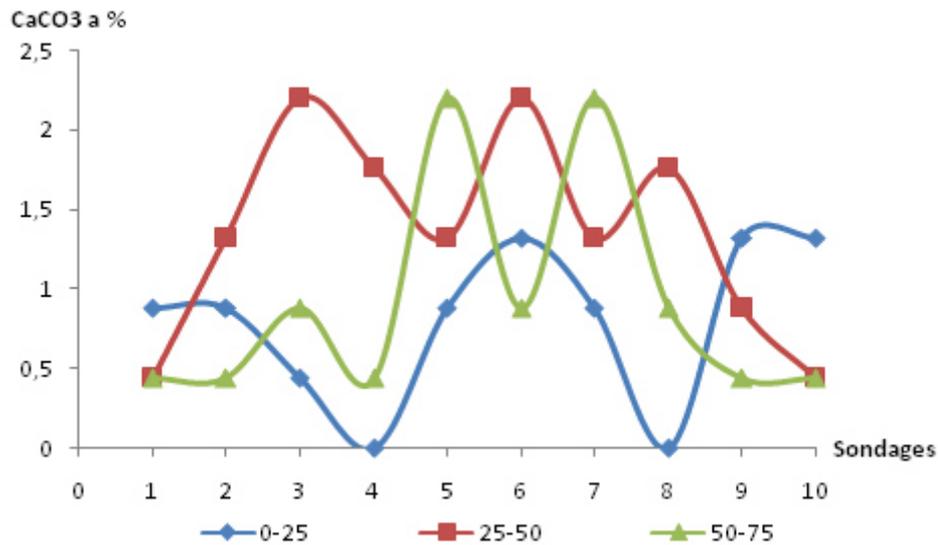


Figure3-13: Distributions verticales et latérales du CaCO_3 dans la parcelle 2

3.2.5. Le taux de l'humidité

Les résultats obtenus (figures 3-14 et 3-15) montrent une grande disparité entre les écarts d'humidité selon le sondage, la couche du sol. Ces écarts d'humidité varient dans une large fourchette de 0 % et 9 % ce qui dénote une très grande variabilité de ce paramètre au niveau des deux parcelles. Les résultats montrent également que la parcelle de vignes présente une hétérogénéité concernant le type du profil hydrique. De ce fait les résultats montrent que les profils 1, 3, 8 et 10 sont de type concave avec un minimum d'humidité au niveau de l'horizon médian. Les profils 2, 6 et 7 sont de type ascendant avec un maximum d'humidité au niveau de l'horizon de surface. Les profils hydriques descendants sont représentés par les sondages 5 et 9. Et enfin le profil hydrique convexe avec un maximum d'humidité dans l'horizon médian est représenté par le sondage 10.

En revanche, les profils hydrique de la parcelle sont relativement plus homogène avec la prédominance des profils hydrique ascendant et qui concerne les sondages (1, 2, 3, 6, 7, 8, 9 et 10). Le restent des sondages sont représentés par le profil hydrique convexe.

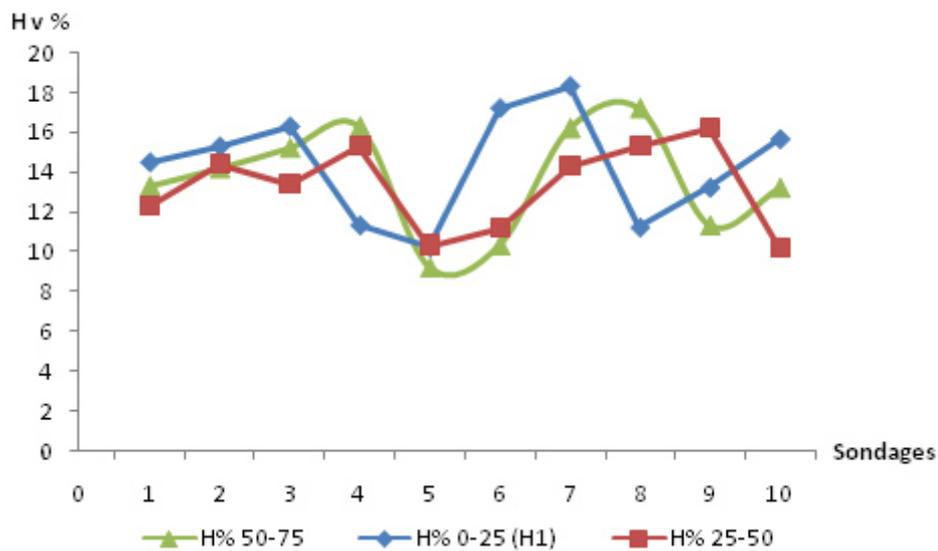


Figure3-14: Distributions verticales et latérales de l'humidité dans la parcelle 1

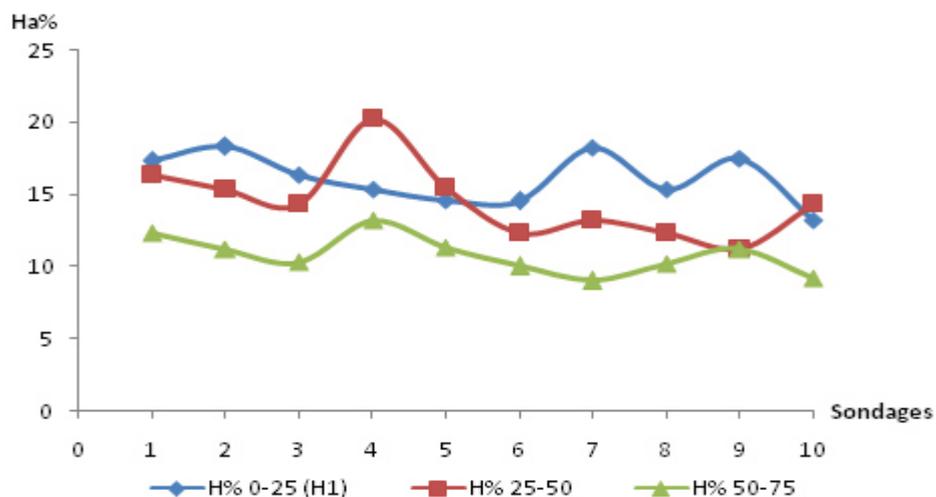


Figure3-15: Distributions verticales et latérales de l'humidité dans la parcelle 2

Dans ce qui suit chapitre, nous étudions la variabilité spatiale l'humidité par utilisation de la méthode électromagnétique. Comme il a été déjà évoqué dans le deuxième chapitre, les mesures de EM ont été effectuées par EM38 en modes EMh sur deux transects situés respectivement dans les parcelles de vigne et d'agrumes. Chaque mesure EM a été accompagnée par un prélèvement d'un échantillon de sols à la tarière par incrément de 25 cm jusqu'à une profondeur de 75 cm. Au total, 60 échantillons de sol ont été prélevés dont 30 échantillons sur chacune des deux parcelles. (figure 2-6).

La synthèse bibliographique effectuée précédemment (voir chapitre 1) met en exergue la multiplicité et la complexité de l'influence de nombreux paramètres pédologiques sur les lectures de EM. Cette multidépendance rend l'interprétation de la mesure électromagnétique délicate. De ce fait, et dans une première étape, il est indispensable (1) de discriminer les influences liées à certains paramètres du sol susceptibles d'influencer EM et (2) de confirmer ou infirmer la possibilité de caractériser la variabilité de l'humidité par EM dans le contexte de cette étude. Dans une deuxième étape, il s'agira de vérifier la capacité de EM à cartographier et à réaliser un suivi spatiale de l'humidité du sol de la zone d'étude.

3.3.1. Effet des différents paramètres du sol sur EM

L'utilisation de EM pour cartographier CE nécessite au préalable la connaissance du degré de corrélation entre les variables pédologiques d'intérêt et EM. Dans ce sens, de nombreux auteurs ont démontré que les mesures de EM sont influencées par des paramètres pédologiques comme l'humidité du sol (Hossain et al., 2010 ; Martini et al., 2017), la texture (Triantafilis et Lesch, 2005 ; Zhao et al., 2019), le calcaire (Bourenane et al., 1997 ; Corwin et al., 2006), le pH (Corwin et al., 2006), ce qui rend l'interprétation de H% par le biais de EM délicate.

Dans cette recherche, nous avons considéré les principaux paramètres du sol étudiés susceptibles d'impacter les lectures de EM. Les paramètres pris en considération sont l'humidité % (H %), CaCO₃ %, CE %, pH et texture. Il s'agit en fait de rechercher les corrélations entre ces paramètres et EM. Pour ce faire, nous avons réalisé une matrice de corrélation entre EM et les sept paramètres du sol pris en considération par l'utilisation de la régression linéaire simple (tableau 3-3).

Tableau 3-3. Matrice de corrélations entre les Emh et les différents paramètres pédologiques étudiés

Parcelle de vigne							
Variable	CEds/m	H%	CaCO ₃ %	pH	A%	L%	S%
R ²	0.159**	0.887***	0.068	0.006	0.506*	0.063	0.196*
Parcelle d'agrumes							
Variable	CEds/m	H%	Caco3%	Ph	A%	L%	S%
R ²	0.006	0.715***	0.227*	0.090*	0.524*	0.108	0.692***

*, **, *** Significatif à $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$, respectivement

Les résultats mentionnés dans le tableau 3-3 indiquent que, excepté pour le H%, A% et le S% (deuxième parcelle), la corrélation entre les paramètres du sol et EM sont non significatives. Elles sont hautement significatifs pour l'H% ($R^2 > 0,7$) hautement significatif pour S% ($R^2 = 0,69$) et significatifs pour A% ($0,5 < R^2 < 0,53$). Ces résultats concordent avec ceux des différents travaux dans le domaine (Brus et al., 1992 ; Bourenane et al., 1997 ; Triantafilis et Lesch, 2005 ; Corwin et al., 2006 ; Hall et al., 2014 ; Zhao et al., 2019). Ce résultat suggère que ces paramètres sont les facteurs qui ont plus de poids sur les variations de EM par rapport au CaCO_3 , CE et pH ($r < 0,25$). En revanche, la faible corrélation entre la CE et EM est du probablement aux faibles valeurs de la CE aux niveaux des deux parcelles. De même, la matrice de corrélation (tableau 4-3) montrent que les corrélations entre EM et A+L % et S% respectivement sont moins fortes que celles obtenues avec H % ($0,711 < R^2 < 0,78$). Ce résultat suggère une prédominance de l'effet de l'humidité sur EM. De ce fait, EM constitue un moyen suffisamment efficace pour l'estimation et la cartographie de H% dans la zone d'étude.

3.3.2. Étude de la variabilité spatiale l'humidité par EM

A ce niveau, il s'agira de tester la capacité de EM à cartographier et à réaliser le suivi spatial de l'humidité du sol au niveau des deux parcelles.

La démarche retenue comporte trois étapes :

Il s'agit d'abord de réaliser un modèle d'étalonnage de EM à partir des données pour lesquelles nous disposons à la fois des mesures de EM et des mesures de H% (figure 2-6).

Dans une deuxième étape, nous appliquons le modèle d'étalonnage sur l'ensemble des sites pour convertir les EM en Humidité prédites ($H_p\%$).

Pour terminer, nous utilisons les méthodes géostatistiques sur les valeurs de $H_p\%$ obtenues à partir du modèle d'étalonnage pour dresser les cartes de l'humidité pour des couches de sols 0-75 cm.

3.3.2.1. Etalonnage de EM

Comme évoqué dans le chapitre II, les mesures de H% ont été effectuées sur trois profondeurs du sol (0-25cm, 25-50cm et 50-75 cm) de chacune des deux parcelles (figure 2-6). Il s'agit de les corréler aux données de EMh pour des couches de sols de 0-75 cm. Pour ce faire, les valeurs de H% ont été pondérées pour des couches de sols de 0-75 cm. De ce fait il devient possible de trouver une relation mathématique entre H% et EM qui permettra de convertir EM en $H_p\%$. Pour ce faire, nous avons utilisé un modèle de régression linéaire simple (RLS) entre

EM et H% tout en considérant que l'humidité est le seul facteur responsable de la variation de EM.

$$H\%_{(0-75\text{cm})} = a \text{ EMh} + b \dots (1)$$

EMh : EM en mode horizontal.

H%_(0-75 cm): moyenne des H% pour les trois niveaux de prélèvement (0-25 ; 25-50 et 50-75) pondérée pour une couche de 150 cm.

A : coefficient de régression

b : constant

Les paramètres des deux équations d'étalonnage pour les deux parcelles qui relient H% aux EM par les modèles RLS sont présentés dans le tableau 3-4.

L'utilisation des équations d'étalonnage permettra donc de transformer convenablement EM en H%. Les Hp% ainsi obtenues seront traitées par les méthodes statistiques et géostatistiques.

Tableau 3-4. Paramètres des équations RLS des deux parcelles d'études

	Equation d'étalonnage	R ²
Parcelle Vigne	$H\%_{(0-75\text{cm})} = 0,092\text{EMh} + 8,116$	R ² = 0,788***
Parcelle Agrume	$H\%_{(0-75\text{c})} = 0,081\text{EMh} + 8,508$	R ² = 0,711***

*, **, *** Significatif à $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$, respectivement

3.3.2.21. Cartographie en courbes d'isovaleur de la Hp%

Dans cette étape, il s'agit d'estimer Hp% en tout point non mesuré du secteur d'étude. Pour cela, des cartes d'isovaleurs seront dressées pour des profondeurs de 0 cm et 75 cm qui correspondent respectivement aux limites inférieures des EM en modes horizontal. La réalisation des cartes d'isovaleurs nécessite de procéder d'abord à une analyse de la structure spatiale de Hp%. Il s'agit, en fait, de construire des semivariogrammes expérimentaux ajustés à des semivariogrammes théoriques qui seront ensuite modélisés et utilisés pour estimer par krigeage ordinaire les valeurs de Hp% sur des points où la mesure n'a pas été effectuée.

a. Analyse de la structure spatiale

Les semivariogrammes réalisés pour les parcelles 1 et deux sont illustrés par les figures 3-16 et 3-17 et leurs paramètres sont regroupés dans le tableau 4-16. Les figures montrent que les semivariogrammes expérimentaux sont clairement structurés et qu'ils sont adaptés à des modèles sphériques, Le meilleur ajustement du variogramme est assuré par la fonction Autofit

du logiciel surfer. Cette fonction se base sur des calculs algorithmiques proposés par Press et al. (1988). Les modèles mathématiques sphériques sont souvent très cités dans les études des sciences du sol (Carvalho et al., 2002 ; Molin et Faulin., 2013, Iddir, 2006, Iddir ,2021). Les semivariogrammes présentent une divergence dans leur dépendance spatiale avec 56,7% de la variabilité totale ((palier/variance) %). Ce qui traduit une très grande variabilité de l'humidité dans les deux parcelles d'étude. Les semivariogrammes montrent également que les valeurs de la portée égale à 100 m pour la parcelle 1 et elle est de 70 pour la parcelle 2. Au delà de ces distances, les mesures de Hp% deviennent statistiquement indépendantes. La connaissance de cette portée peut être également utilisée pour choisir le pas d'échantillonnage lors d'une cartographie prochaine de l'humidité à un pas inférieur à 70 m.

b. Cartographie par krigeage de l'humidité prédite

Les cartes d'isovaleurs issues de l'analyse géostatistique de CEp pour les parcelles 1 et 2 sont représentées par les figures (3-18 et 3-19). L'interpolation a été effectuée par krigeage ordinaire. Ce type de krigeage est largement utilisé pour caractériser et cartographier la variation spatiale de l'humidité des sols (Lesch et al., 1998 ; Herrero et al., 2003 ; Adam et al., 2012). La réalisation des cartes a été établie par le logiciel Surfer 11.

Les cartes d'isovaleurs issue de l'analyse géostatistique de Hp pour les deux parcelles par la figure (28), (29). L'interpolation a été effectué par krigeage .ce type de krigeage est largement utilise pour caractériser et cartographie la variation spatiale de l'humidité (Lesh et al ., 1998 ;Herro et al ., 2003 ;Adem et al .,2012).

L'observation de la carte de la parcelle 1 montre une très grande hétérogénéité de l'humidité au niveau de cette parcelle avec un gradient de d'humidité du sud vers le nord ouest avec une prédominance de la classe d'humidité entre 12 et 13%. En revanche, la carte de la deuxième présente des niveaux d'humidité plus élevés avec un aspect relativement plus au moins homogène avec la prédominance de la classe d'humidité supérieur à 15%. L'ensemble de ces résultats confirme les résultats obtenues auparavant et montre que l'humidité peut être correctement estimée par le biais de la conductivité électromagnétique.

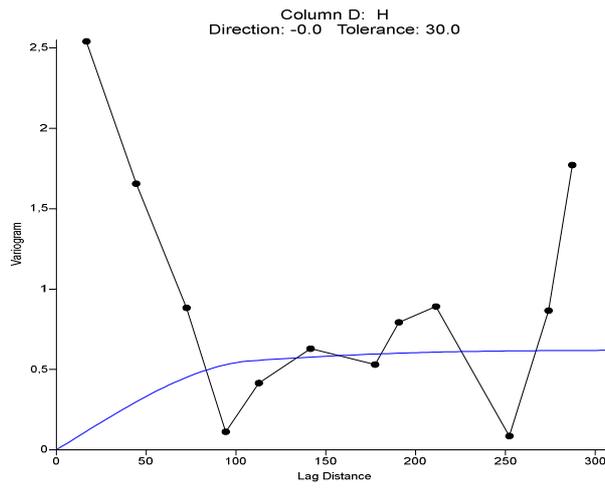


Figure 3-16: Semivariogrammes ajustés de la parcelle 1(0 -75cm)

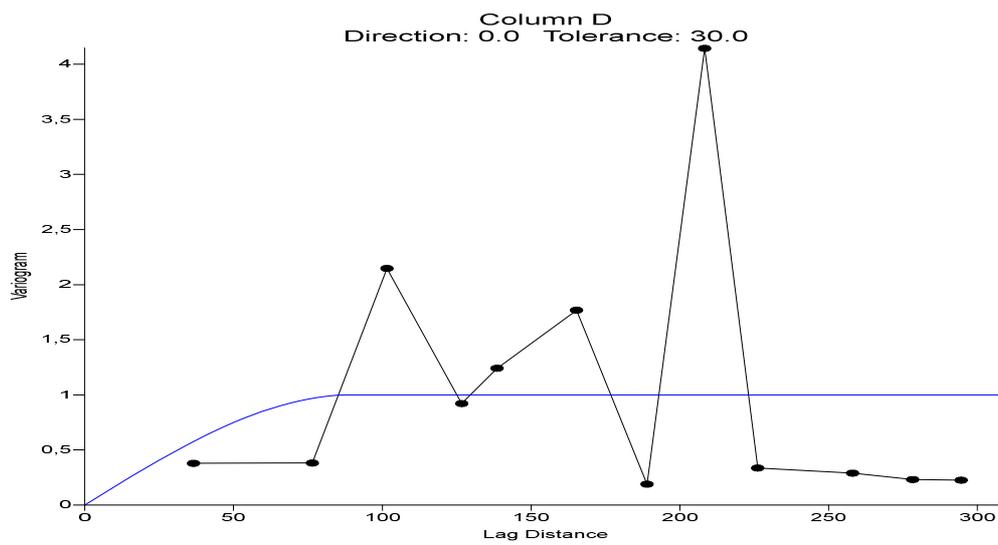


Figure 3-17: Semivariogrammes ajustés de la parcelle 2 (0 -75cm)

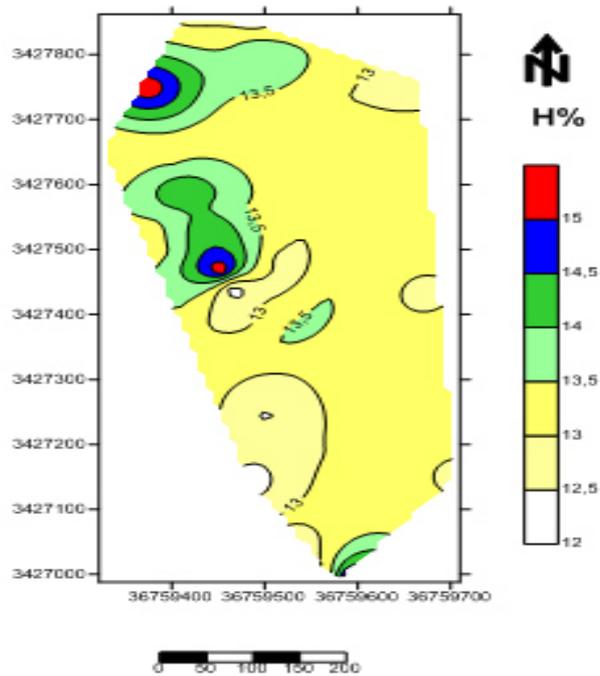


Figure 3-18: Carte d'isovaleurs de l'humidité pondérale prédites (Parcelle 1- 0-75 cm)

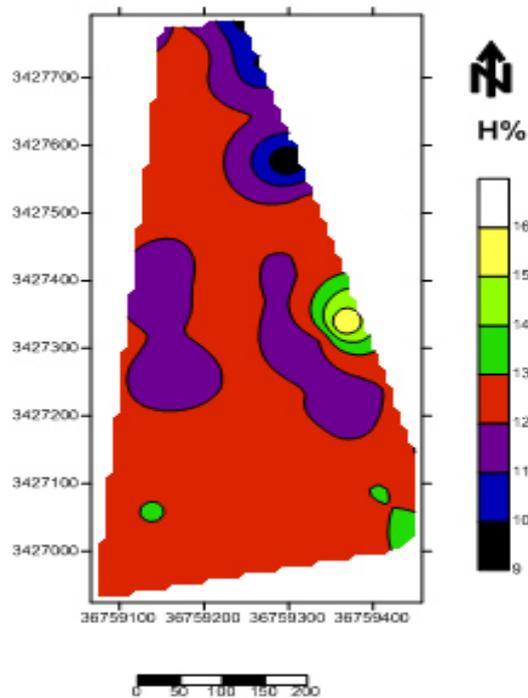


Figure 3-19: Carte d'isovaleurs de l'humidité pondérale prédites (Parcelle 1- 0-75 cm)

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Les objectifs principales de cette étude sont multiples dont les plus importants: 1-La caractérisation des sols pour contribuer à la connaissance des sols d'Algérie: Pour ce faire, nous avons réalisé dans chacun des deux parcelles 1 et 2 des prélèvements de sol sur lequel nous avons effectué des analyses au laboratoire. 2- La cartographie spatiale de l'humidité à l'échelle de la parcelle : Il s'agit de décrire l'extension spatiale et saisonnière de l'humidité par utilisation des méthodes géophysiques. Ces dernières sont non destructives et elles permettent de réaliser une grande densité de mesures et de les répéter dans le temps. La méthode géophysique retenue est la mesure de EM par induction électromagnétique en utilisant l'EM38 (Geonics Ltd, Canada). Les résultats obtenus ont été traités par les méthodes géostatistiques.

Notre expérimentation a été réalisée sur 2 parcelles, une parcelle 1 de vigne et l'autre parcelle 2 d'agrumes situées au niveau la commune de CORSO wilaya de BOUMERDES.

La description statistique des données du sol relatives à la texture, à l'humidité pondérale (H %), au taux de calcaire total, au pH de l'extrait 2/5, à la CE de l'extrait 1/5 et, enfin, aux lectures électromagnétiques (EM) ont été réalisées. Les analyses ont été effectuées sur 30 échantillons pour chaque site, provenant de 10 sondages réalisés sur trois (03) niveaux de profondeurs correspondant aux couches 0 – 25 cm (H1), 25 – 50 cm (H2) et 50 – 75 cm (H3). Les résultats ont montré que la texture des sols pour la parcelle 1 est de type limono argileux à limono argilo sableux et que la texture des sols pour la parcelle 2 est de type limono argileux. Les résultats ont montré aussi que, le sol est acide à légèrement alcalin pour le site 1 et neutre à légèrement alcalin pour le site 2, peu calcaire, non salin et peu Humide. Les résultats montrent également que les paramètres étudiés varient différemment faibles variation pour le pH et H%, moyenne variation pour la CE et une forte variation pour le CaCO₃%.

La distribution verticale et latérale des taux des différents paramètres pédologique au niveau des transects a montré une homogénéité d'argile verticale et horizontales au niveau des deux parcelles, les taux de limons sont hétérogènes dans la première partie du transect 1 (sondages 1 à 4) puis elles deviennent homogènes dans le reste des sondages. En revanche pour le transect 2, le taux de limons sont homogènes au niveau de la première partie du transect (sondages 1 à 4) puis elles deviennent hétérogène dans le reste des sondages et les taux de sables présentent une homogénéité verticale et horizontales de ce paramètres au niveau des deux parcelles. La salinité se distribuent d'une façon hétérogène aussi bien d'un sondage à

l'autre que du haut vers le bas du profil au sein d'un même transect. Une homogénéité verticale et horizontales de pH au niveau des deux parcelles. Les deux parcelles se caractérisent par une légère variabilité spatiale de leurs profils calcaires et que la distribution du CaCO₃ ne serait pas liée à une quelconque dynamique de cet élément dans le profil. Une très grande variabilité de l'humidité au niveau des deux parcelles. Les résultats montrent également que la parcelle 1 présente une hétérogénéité concernant le type du profil hydrique. De ce fait les résultats montrent que les profils 1, 3,8 et 10 sont de type concave avec un minimum d'humidité au niveau de l'horizon médian. Les profils 2, 6 et 7 sont de type

Conclusion générale

ascendant avec un maximum d'humidité au niveau de l'horizon de surface. Les profils hydriques descendants sont représentés par les sondages 5 et 9. Et enfin le profil hydrique convexe avec un maximum d'humidité dans l'horizon médian est représenté par le sondage 10. En revanche, les profils hydrique de la parcelle 2 sont relativement plus homogène avec la prédominance des profils hydrique ascendant et qui concerne les sondages (1, 2, 3, 6, 7, 8, 9 et 10). Le restent des sondages sont représentés par le profil hydrique convexe.

Une matrices de corrélation entre EM et l'humidité (H %), CaCO₃ %, CE %, pH et la texture par l'utilisation de la régression linéaire simple a été faite. Les résultats ont montré que, excepté pour le H%, A% et le S% (deuxième parcelle), la corrélation entre les paramètres du sol et EM sont non significatives et la matrice de corrélation montrent aussi que les corrélations entre EM et A+L % et S% respectivement sont moins fortes que celles obtenues avec H % ($0,711 < R^2 < 0,78$). De ce fait, EM constitue un moyen suffisamment efficace pour l'estimation et la cartographie de H% dans la zone d'étude.

L'étude de la variabilité spatiale de l'humidité par EM pour tester la capacité de EM à cartographier et à réaliser le suivi spatial de l'humidité du sol au niveau des deux parcelles. L'interpolation a été effectuée par krigeage ordinaire et la réalisation des cartes a été établie par le logiciel Surfer 11. Les cartes krigées ont montré que dans la parcelle 1 il y a une très grande hétérogénéité de l'humidité avec un gradient de d'humidité du sud vers le nord-ouest avec une prédominance de la classe d'humidité entre 12 et 13% , et que dans la parcelle 2 les niveaux d'humidité plus élevés avec un aspect relativement plus au moins homogène avec la prédominance de la classe d'humidité supérieur à 15%.

Enfin, nous pouvons conclure globalement que l'ensemble de ces résultats confirme les résultats obtenues auparavant et montre que l'humidité peut être correctement estimée par le biais de la conductivité électromagnétique.

Nous pouvons cependant relever que les résultats obtenus doivent être approfondis davantage avec d'autres essais dans les mêmes contextes, mais avec des modalités complémentaires afin d'étudier une gamme plus importante des variabilités spatiales par l'EM.

Concernant les aspects caractérisation des sols, le protocole d'essai a accusé certaines insuffisances liées soit à la faiblesse des points de mesure des profils pédologiques dans les même ou autres parcelles soit à l'absence de données mesurées (autres analyses physico-chimiques et biologiques du sol), et ce en raison du manque de matériels de mesure approprié.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Abdelhafid Y., 2010. Cartographie de la salinité des sols par induction électromagnétique. Cas de la zone est du périmètre irrigué de la Mina. Mémoire de magister, ENSA, Alger, 102p.

Abu-Hassanein Z.S., Benson C.H., Blotz L.R., 1996. Electrical Resistivity of compacted clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(5), 397-406.

Adam I., Michot D., Guero Y., Soubega B., Moussa I., Dutin G., Walter C., 2012. Detecting soil salinity changes in irrigated vertisols by electrical resistivity prospecting during a desalinisation experiment. *Agricultural Water Management* 109, 1-10.

Baize, D., 1988. Guide des analyses courantes en pédologie : choix, expression, présentation, interprétation. INRA, Paris.

Berkal I., 2016. Dynamique spatiotemporelle de la salinité de sols sableux irrigués en milieu aride. Application à une palmeraie de la cuvette de Ouargla en Algérie. Thèse de Doctorat, ENSA, Alger. 113 p.

Besson, A., 2007. Analyse de la variabilité spatio-temporelle de la teneur en eau des sols à l'échelle parcellaire par la méthode de résistivité électrique. *Science de la terre*. Université d'Orléans, Orléans, p. 212.

Cambardella, C.A.; Moorman, T.B.; Novak, J.M.; Parkin, T.B.; Karlen, D.L.; TurV, R.F. & Konopa, A.E. 1994. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:1501-1511,

Carvalho, J.R.P.D., Silveira, P.M., Vieira, S.R., 2002. Geostatistics to determine spatial variability of soil chemical properties using different preparation systems. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 37: 1151-1159.

Cetin M., Kirda C., 2003. Spatial and temporal changes of soil salinity in a cotton field irrigated with low-quality water. *Journal of Hydrology*. 272. 238-249.

Daudet et Vachaud 1977, la mesure neutronique du stock d'eau du sol et sa variation application à la détermination du bilan hydrique. *Ann Agron* 28(5) .pp503-519.

Day JH., et McMennamin. J., 1982. Manuel de description des sols sur terrain . comite d'expert sur la prospection pédologique. (document pdf sur agriculture et agroalimentaire canada 2008) [http : // res .agr.ca/ssiscan/publication /manuals/describing soil htm](http://res.agr.ca/ssiscan/publication/manuals/describing%20soil.htm). 197 p.

Daudet Vachaud., 1977. La mesure neutronique du stock d'eau du sol et sa variation application à la détermination du bilan hydrique. *Ann Agron* 28(5) .pp503-519.

Hall D., Galloway P., Lemon J., Curtis B., van Burgel A., Kong K., 2014. The agronomy jigsaw Finding the pieces that maximise water use efficiency Department of Agriculture and Food, Western Australia; and Nigel Metz, South East Premium Wheat Growers Association. Edited by Sandra Prosser 96 p.

Références bibliographiques

- De Jong E., Ballantyne A.K., Cameron D.R., Read D.L., 1979. Measurement of apparent electrical conductivity of soils by an electromagnetic induction probe to aid salinity surveys. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 810–812.
- Durand J.H., 1983. *Les sols Irrigables. Etude pédologique.* Presses Universitaire de France. Agence de Coopération Culturelle et Technique. 338 p.
- FAO., 2005. *Irrigation in Africa in figures - AQUASTAT Survey-2005.* Food and Agriculture
- Fausey NR 2002. *Drainages, Aération, and Traficabilité.* Edition Encyclopedia of soil science .Marcel Dekker , NEW York. 361 363p .
- Goovaerts, 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation.* New York, Oxford: Oxford University Press. 483 pp.
- Hendrickx J.M.H., Kachanoski R.G., 2002. Indirect measurement of solute concentration: Nonintrusive electromagnetic induction. p. 1297–1306. In J.H. Dane and G.C. Topp (ed.) *Methods of soil analysis.* Part 4. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.
- Herrero J., Ba A.A., Aragues R., 2003. Soil salinity and its distribution determined by soil sampling and electromagnetic techniques. *Soil Use Manage.* 19: 119–126.
- Hillel, A ,1998 : *L'eau et le Sol Principe et processus physiques.* Pedasup universite catholique de Louvin.
- Hillel D., 1980. *L'eau et le sol. Principes et processus physiques,* 294p.
- Bourenane H., King D., Isambert M., Le Parco R. 1997. Utilisation de la prospection géophysique par résistivité pour l'étude de la variabilité spatiale du sol et des matériaux géologiques d'un site de Petite Beauce. Colloque GEOFCAN Géophysique des sols et des formations superficielles. 11-12 septembre 1997, Bondy, France BRGM, INRA, ORSTOM, UPMC.
- Iddir M.A., 2006. *Evaluation de la salinité par induction électromagnétique : Exemple d'une parcelle cultivée de la plaine de la Macta (Wilaya de Mascara).* Mémoire de Magistère. INA, Alger.113 pages.
- Jacques Sauquet. Diplôme d'université « Structuratio de l'univers » 2010-2011. *L'eau dans l'univers.*
- Job J.O., Loyer J.Y., Ailoul M., 1987. Utilisation de la conductivité électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* 23: 123-131.
- Karine L., 2011, mémoire magistere en science de l'eau cartographie numirique de l'humidite de surface des sols a l'échelle de la parcelle agricole a l'aide de la telidetecion de la prospection electrique.
- Khacheba R., *Cartographie de la salinité du sol évaluée par induction électromagnétique « Géonics EM38.* Thèse de magister, ENSA, Alger. 94p.

Références bibliographiques

- Kiota, M, 2013. Cours de physiques du sol complexe eau /roche , Ouga Dougou.
- Laborde .J.P 2009. Element d'hydrologie de surface Support de Cours Universite de Nice Sophia. 191p.
- Lafond R.,1992. La pédogenèse et la classification canadienne des sols ,61-81. Dans R Lafond éd Pédologie forestière , direction générale de l'enseignement collégiale du ministère de l'enseignement supérieur et de science .Quebec.
- Lesch S.M., Herrero J., Rhoades J.D., 1998. Monitoring for Temporal Changes in Soil Salinity using Electromagnetic Induction Techniques. SOIL SCI. SOC. AM. J., VOL. 62, JANUARY–FEBRUARY 1998.
- Leulmi Sonia. , 2006. Cinétique hydrique et croissance de la culture de blé dur dans la plaine de la Mitidja sous contrainte hydrique : Approche par les modèles Pilote et Bilhyna, mémoire de magister, INA El-Harrach, 193p.
- Martini E., WerbanU.,ZachariasS., Pohle M., Dietrich P., Wollschläger U., 2017. Repeated electromagnetic induction measurementsfor mapping soil moisture at the field scale: validation with data from a wireless soil moisture monitoring network. Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 495–513.
- Matheron G., 1963. Principles of Geostatistics. Economic Geology, 58, 1246-1266.
- McNeill J.D., 1980. -Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Geonics Tech. Note TN-6.Geonics Limited, Mississauga, ON, Canada. 14 p.
- Michot M.D., 2003. Intérêt de la géophysique de subsurface et de la télédétection multispectrale pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle intraparcellaire.Thèse de Doctorat de l'université de Paris 6, 394p.
- Molin J.P., Faulin G.D., 2013. Spatial and temporal variability of soil electrical conductivity related to soil moisture Sci. Agric. v.70, n.1, p.1-5.
- Musy ,A & M. Soutter , 1991 : physique de sol .collectio Gerer L'Environnement , Press Polytechnique et Universitaires Romandes.
- NRCS 1996. Soil quality ressource concenes soil érosion . Nationale Soil Survey Center 2p.
- Polge De Combret M., 1980. Etude de la dynamique conjointe des indicateurs d'état hydrique d'une culture. Test sur une culture de soja irriguée, mémoire de D.A.A, 72p.
- Robinson .D. Abdu.,H ,Lebron. I., Jones, S , 2012. Imaging of hill- Slope Soil Moisture.
- Ruelle P., 1995. L'eau, la plante, le sol et le climat. La conduite de l'irrigation- de la stratégie au pilotage de l'irrigation, RNED-HA, pp 21-33.
- Saoud M., 2014. Evolution spatiale de la salinité des sols du Bas-Chélif. Mémoire de magister, ENSA, Alger. 105p.

Références bibliographiques

Soil Survey Staff., 2014. Keys to soil taxonomy. 12th ed. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 372p.

Sudduth K.A., Kitchen N.R., Wiebold W.J., Batchelor W.D., Bollero G.A., Bullock D.G., Clay D.E., Palm H.L., Pierce F.J., Schuler R.T., Thelen K.D., 2005. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north–central USA. *Computers and Electronics in Agriculture*. 46: 263–283.

Sudduth K.A., Drummond S.T., Kitchen N.R., 2001. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 31 (2001) 239–264.

Triantafilis J., Lesch S.M., 2005. Mapping clay content variation using electromagnetic induction technique. *Comput. Electron. Agric.* 46: 203-237

Zhao X., Wang J., Zhao D., Li N., Zare E., Triantafilis J., 2019. Digital regolith mapping of clay across the Ashley irrigation area using electromagnetic induction data and inversion modeling. *Geoderma* 346 (2019) 18–29.

Annexes

Annexes

Annexes

Annexe 1: Humidité pondérale mesurée

	Parcelle 1			Parcelle 2		
Sondages	H% 0-25 (H1)	H% 25-50	H% 50-75	H% 0-25	H% 25-50	H% 50-75
Sondage 1	14,5	12,3	13,3	17,32	16,33	12,33
Sondage 2	15,3	14,4	14,2	18,32	15,32	11,22
Sondage 3	16,3	13,4	15,22	16,32	14,33	10,33
Sondage 4	11,33	15,3	16,3	15,36	20,22	13,22
Sondage 5	10,22	10,33	9,22	14,62	15,44	11,32
Sondage 6	17,22	11,2	10,33	14,53	12,33	10,02
Sondage 7	18,33	14,3	16,22	18,25	13,22	9,03
Sondage 8	11,22	15,33	17,22	15,33	12,33	10,22
Sondage 9	13,22	16,2	11,33	17,45	11,22	11,22
Sondage 10	15,66	10,2	13,22	13,22	14,32	9,222

Annexes

Annexe 2: Mesures électromagnétiques d'étalonnage

	Parcelle 1	Parcelle 2
Sondages	EMh	Emh
Sondage 1	52	88
Sondage 2	65	65
Sondage 3	82	58
Sondage 4	68	90
Sondage 5	35	66
Sondage 6	45	53
Sondage 7	90	63
Sondage 8	58	48
Sondage 9	56	55
Sondage 10	62	65