

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Hassiba Benbouali de Chlef
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département en Eau, Environnement et Développement Durable



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Filière : Agronomie.

Spécialité : Eau et Environnement.

Par

HAMEL ZINEB

Thème :

***ESTIMATION DE LA STABILITE DE L'AGREGAT DU SOL A L'AIDE DES FONCTIONS
DE PEDOTRANFERT. DEVELOPPEMENT DE NOUVELLE APPROCHE DE
MODELISATION***

Soutenue le : 29/03/2022 devant le jury composé de :

ACHITE MOHAMMED	Professeur	Université de Chlef	Président
ABABOU ADDA	Professeur	Université de Chlef	Rapporteur
HARTANI TARIK	Professeur	ENSA D'Alger	Examineur
REGUIEG YSSAAD HOUCINE ABDELHAKIM	Professeur	Université de Mostaganem	Examineur
NEDJAI SACI	MCA	Université de Chlef	Examineur

الحمد لله رب العالمين

Remerciements

Tout d'abord, je remercie notre Dieu tout puissant qui m'a donné la foi, qui m'a Guidé durant toute ma vie et qui m'a donné la volonté de continuer mes études.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à mon premier directeur de thèse **Pr. Djamel SAIDI** (رحمه الله)

J'exprime aussi mes remerciements à mon directeur de thèse, **Pr. ABABOU ADDA**, pour sa patience, et surtout pour sa confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance. Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude.

Mes remerciements sincères et respectueux s'adressent au **Pr. ACHIT MOUHAMED** professeur à l'université Hassiba Ben Bouali Chlef, qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider la soutenance de cette thèse et lui demande d'accepter ma profonde reconnaissance.

Il m'est aussi très agréable d'adresser mes vifs et respectueux remerciements à :

Pr. HARTANI TARIK Directeur de l'ENSA D'Alger,

Pr. REGUIEG YSSAAD HOCINE ABDELHAKIM professeur à l'université de Mostaganem et **Dr. NEDJAI SACI** Maitre de conférences à l'université Hassiba Ben Bouali Chlef, qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'examiner mon travail, qu'ils veuillent accepter ma profonde reconnaissance.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers mes collègues les doctorants :

AKKACHA Abderrahmane, DAHMANI Hannan, Dr. ABDELKRIM Nouredine, et **Dr. KOUADRI SAMEUT Moussa** chef de département de EDD à l'université Hassiba Ben Bouali Chlef, qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche. Je remercie également, **Mr. Akki Alouani Bachir** et **Mr. Mekki Ahmed** collègues de travail.

Ainsi que le personnel et les enseignants de l'université Hassiba Benbouali de Chlef sans oublier les enseignants étrangers qui ont contribué à ma formation.

Dédicace

Toute destination a un point de départ et pour commencer j'insiste à dédier cet extrait de mes connaissances universitaire spécialement et premièrement à mes très chers parents qui n'ont jamais cessé de crier et d'épargner tout le bonheur de ma vie.

Ma très chère mère : Source inépuisable de tendresse, de patience et de sacrifice. Ta prière et ta Bénédiction m'ont été d'un grand secours tout au long de ma vie.

Mon très cher père : Aucune dédicace ne saurait exprimer mes respects, ma reconnaissance et mon profond amour.

Je dédie cet événement marquant de ma vie à la mémoire de mon premier directeur de thèse (Pr. Djamel Saidi) décédé trop tôt. J'espère que, du monde qui est sein maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'une étudiante qui a toujours prié pour le salut de son âme.

A mon frère (Farouk) et mes sœurs (Hadjer, Imene, Hiba)

Spéciale dédicace à ma tante Naima ;

A mes grands-parents, mes oncles, et toutes mes tantes.

A Toutes mes amies.

A celles et ceux que je garde enfouie dans mon cœur et mes pensées.

ZINEB.H

Table des matières

المخلص.....	i
Abstract.....	ii
Résumé.....	iii
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux.....	v
Liste des abréviations.....	vi
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Aperçu bibliographique.....	3
1. Introduction.....	3
2. Les constitutions du sol.....	3
2.1. Phase solide, pédogenèse et variabilité spatiale.....	4
2.2. Constituants minéraux et triangle USDA.....	4
2.3. Constituants organiques.....	5
2.3.1. Complexe argilo-humique.....	5
3. Structure et stabilité structurale du sol.....	6
3.1. Structure du sol.....	6
3.1.1. La structure du sol en pédologie.....	7
3.2. Stabilité structurale.....	7
3.2.1. Facteurs influençant la stabilité structurale.....	7
3.2.2. Mesures de la stabilité structurale.....	9
4. Modélisation de la dynamique structurale du sol.....	12
4.1. Les étapes de la modélisation.....	12
5. Les fonctions de pédotransfert.....	12
5.1. Introduction.....	12
5.2. Historique des fonctions de pédotransfert.....	13
5.3. Définition et concepts.....	13
5.4. Principes.....	14
5.5. Classification des FPT.....	15
5.6. Approches pour les différentes classes.....	15
5.7. Un schéma de développement des FPT.....	16
5.8. Les fonctions de pédotransfert à fondement physique.....	16
5.9. Origine des sols utilisés pour établir des FPT.....	17
6. Les réseaux de neurones artificiels.....	17
6.1. Définition et concepts.....	17
6.2. Types de réseaux de neurones.....	19
6.2.1. Les réseaux de neurones non bouclés.....	19
6.2.2. Les réseaux de neurones bouclés.....	20
Chapitre II : Matériels et méthodes.....	21
I. Milieu physique.....	21
1. Géologie et Géomorphologie.....	22
2. Pédologie.....	22
2.1. Les sols peu évolués.....	23
2.2. Les vertisols.....	23
2.3. Les sols calcimagnésiques.....	23
2.4. Les sols Isohumiques.....	24
2.5. Les sols hydromorphes.....	24

2.6. Les sols salé.....	24
3. Le climat.....	24
3.1. Les précipitations.....	24
3.1.1. Le régime Saisonnier.....	24
3.2. La température.....	25
3.3. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен.....	25
3.4. Le quotient pluviothermique d'Emberger.....	26
3.5. L'évapotranspiration (ETP)	27
3.6. L'humidité.....	27
3.7. Le vent.....	27
4. Les ressources en eau.....	28
4.1. Les ressource en eaux superficielles.....	28
4.2. Les ressources souterraines.....	28
5. Ecologie et occupation du sol.....	29
II. Présentation des échantillons de sol.....	30
1. Les analyses physicochimiques	30
2. La stratification des données.....	31
2.1. Stratification texturale.....	31
2.2. Stratification de la salinité.....	32
2.3. Stratification texturo-organique.....	32
3. Les fonctions de pédotransfert "FPT".....	35
4. Critère de la qualité d'estimation.....	35
4.1. Coefficient de détermination.....	35
4.2. Ecart type des résidus.....	35
4.3. Erreur moyenne de prédiction (EMP).....	36
4.4. La somme des carrées des écarts résiduels.....	36
5. Ensembles de données pour les réseaux de neurones artificiels.....	37
6. Modélisation géostatistique.....	38
6.1. La géostatistique en tant que méthode de cartographie de la stabilité structurale.....	38
6.1.1. Le Variogramme.....	38
6.1.2. Le krigeage.....	38
Chapitre IV : Résultats et discussions.....	38
1. Données utilisées.....	39
2. Caractéristique statistique des données recueillies.....	39
3. Relation entre stabilité structurale (MWD) et paramètres physico-chimiques.....	40
4. Analyse en composantes principales.....	41
5. Démarche générale.....	43
1ère variante.....	44
2eme variante.....	44
6. Effet de la stratification dans la corrélation entre les caractéristiques physico-chimiques et la stabilité structurale.....	45
7. Performance des modèles de prédiction pour chaque groupe de sols.....	49
8. Réseaux de neurones artificiels.....	54
9. Performance des réseaux de neurones.....	55
10. Modélisation géostatistique.....	59
10.1. Krigeage.....	59
10.2. Co-Krigeage.....	62
Conclusion.....	66
Références Bibliographiques.....	I
ANNEXES	II

المخلص

تعد هشاشة الاستقرار الهيكلي للتربة أحد الخصائص الفيزيائية الرئيسية التي تؤدي لتعرية الأراضي، لهذا فإن مراقبة هذا المؤشر ودراسته الجيدة مفيدة لرصد وإدارة تدهور التربة. في هذا السياق، أجريت هذه الدراسة في الشلف الأدنى؛ وهي منطقة شبه قاحلة تتميز بفترة جفاف سنوية طويلة نوعاً ما؛ بهدف التنبؤ بالاستقرار الهيكلي للتربة، باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) ودوال الـ PTF. أظهرت النتائج أن أفضل التنبؤات للاستقرار الهيكلي من خلال دوال الـ PTF، كانت تلك التي تأخذ بعين الاعتبار قوام التربة والمادة العضوية، في هذا الإطار، أظهرت فئة التربة الطميية الطينية الغنية بالمادة العضوية أعلى معامل ارتباط $R^2=0.65$ وأدنى خطأ تربيعي متوسط (0.03)، بينما لم يؤدي استخدام الملوحة أو قوام التربة كل على حدي إلى تنبؤات مرضية، حيث تم تسجيل معاملات ارتباط منخفضة. أظهرت النتائج أيضاً أن أداء الشبكات العصبية الاصطناعية في التنبؤ بالاستقرار الهيكلي للتربة كان أفضل من أداء دوال الـ PTF. فيما يخص الشبكات العصبية الاصطناعية، تم الحصول على أفضل التنبؤات عند استخدام عدد كبير من المتغيرات. بالإضافة إلى ذلك، باستخدام عدد كبير من الطبقات المخفية، كان أداء دوال الـ RBF أفضل من دوال الـ MLP. ولوحظ أيضاً أن أفضل التنبؤات لدوال الـ RBF كانت مرتبطة دائماً بنموذج التنشيط الغاوسي (Gaussian)، بينما لم تكن دوال الـ MLP مرتبطة بأي نموذج تنشيط محدد. أظهرت النمذجة الجيواحصائية استقرار هيكلي للتربة جد متغير يتراوح من 0.6 مم (تربة غير مستقرة) إلى 1.4 مم (تربة مستقرة) وأفضل تقديرات الاستقرار الهيكلي للتربة كانت تلك المتعلقة بالنموذج الجاوسي (Gaussian). أخيراً، أدى الـ Co-kriging إلى تقدير أحسن للاستقرار الهيكلي مقارنةً بـ Kriging، باستخدام $CaCO_3$ ، الموصلية الكهربائية والمواد العضوية كمتغيرات إضافية.

Abstract

The aggregates stability is one of the main physical properties regulating erodibility, and represents a useful indicator for monitoring and managing soil degradation. In this context, this study carried out in the lower Cheliff; a semi-arid area with a lengthy dry period; aims to predict the aggregates stability through the mean weight diameter (MWD), using artificial neural networks (ANN) and pedotransfer functions (PTF) based on several stratifications (textural, salinity and textural-organic). The results showed that through the pedotransfer functions the best prediction of MWD, were always related to the texturo-organic stratification, in this stratification, the clay-loam soils moderately rich in organic matter, showed the highest significant coefficient of determination ($R^2 = 0.65$) and the lowest mean squared error (0.03), while the remaining stratifications led to a non-satisfactory prediction with the lowest R^2 . The performances of artificial neural networks in predicting MWD were better than those of pedotransfer functions. Regarding artificial neural networks, the best predictions were obtained when using a large number of input variables. In addition, when using a large number of hidden layers, the performances of radial basis functions (RBF) were better than those of multilayer perception functions (MLP). It was also noted that the best RBF predictions were always related to the Gaussian activation model, while MLP functions were not related to a specific activation model. The Geostatistical modeling showed a highly variable stability, ranging from 0.6 mm (unstable soils) to 1.4 mm (stable soils) and the best estimates of the stability were those related to the Gaussian and stable models, with the smallest mean error (0.001) and the highest R^2 between the observed and the predicted MWD. Finally, co-kriging showed better results in estimating structural stability compared to kriging, when using CaCO_3 , electrical conductivity and organic matter as co-variables.

Résumé

La stabilité des agrégats est l'une des principales propriétés physiques régulant l'érodabilité, ses observations représentent des indicateurs utiles de suivi et de gestion de la dégradation des sols. Dans ce contexte, cette étude réalisée dans le Bas Cheliff ; zone semi-aride avec une longue période de sécheresse ; vise à prédire la stabilité des agrégats par le biais du diamètre moyen pondéral (MWD), en utilisant les réseaux de neurones artificiels (RNA) et les fonctions de pédotransferts (FPT) à travers différentes stratifications (texturale, salinité et texturale -organique). Les résultats ont montré que les meilleures prédictions du MWD par le biais des fonctions de pédotransfert, étaient celles liées la stratification texturo-organique, dans cette stratification, la classe des sols argilo-limoneux modérément riche en MO a montré le plus fort coefficient de détermination significatif avec $R^2 = 0.65$ et la plus faible erreur quadratique moyenne (0.03), alors que les stratifications texturales ou de la salinité ont conduit à des prédictions non satisfaisantes avec un faible R^2 . Les résultats ont également montré que les performances des réseaux de neurones artificiels dans la prédiction du MWD étaient meilleures que celles des fonctions de pédotransfert. En termes de variables d'entrée dans les réseaux de neurones, les meilleures prédictions ont été obtenues lors de l'utilisation d'un grand nombre de variables. De plus, en utilisant un grand nombre de couches cachés, les performances des fonctions bases radiales (RBF) étaient meilleurs que celles des fonctions perception multicouche (MLP). Il a également été remarqué que les meilleures prédictions des fonctions RBF étaient toujours liées au modèle d'activation gaussien, alors que les fonctions MLP n'étaient liées à aucun modèle spécifique d'activation. La modélisation géostatistique a montré une stabilité variable allant de 0.6 mm (sols instables) à 1.4 mm (sols stables) et les meilleures estimations de la stabilité ont été celles liées aux modèles gaussien et stable, avec les plus forts R^2 et la plus faible erreur moyenne (0.001). Enfin, le co-krigeage a conduit à une améliore estimation de la stabilité structurale par comparaison au krigeage, en utilisant le CaCO_3 , la conductivité électrique et la matière organiques comme co-variables.

Liste des figures

- Figure 1** Les phases du sol (Navel, 2011).
- Figure 2** Fractions granulométriques fines et grossières du sol (AFNOR X 31-003, 1998*b*).
- Figure 3** Triangle texturale USDA 1951.
- Figure 4** Représentation schématique des facteurs influençant l'agrégation (Six et al. 2004).
- Figure 5** Schéma de développement des fonctions de pédotransfert
- Figure 6** Structure des cellules nerveuses biologiques (Brain Education, 2018)
- Figure 7** Structure d'un réseau de neurone artificiel.
- Figure 8** Schéma d'un réseau de neurones non-bouclé (Siou LKA, 2011)
- Figure 9** Schéma d'un réseau de neurones bouclés à deux entrées les nombres dans les carrés sont les retards associés à chaque connexion (Dreyfus, 1998).
- Figure 10** Localisation de la plaine du Bas Cheliff.
- Figure 11** Carte géologique de la plaine de Bas Cheliff. (Bradai, 2017)
- Figure 12** Carte des sols (Boulaine 1956)
- Figure 13** Régime saisonnier du Bas-Cheliff (1985/2014)
- Figure 14** Diagramme ombrothermique de la plaine du Bas-Cheliff (1985/2014)
- Figure 15** Position de la station de Hmadna sur le climagramme d'Emberger
- Figure 16** Distribution spatiale d'échantillonnage des sols dans le Bas Chélif. (Nos travaux)
- Figure 17** Représentation schématique de la stratification des 4 classes à travers la base de données (n=1248)
- Figure 18** Représentation schématique des stratifications des 3 classes à travers la base de données (n=1248).
- Figure 19** Structure schématique d'un réseau de neurone.
- Figure 20** Analyse en composantes principales, projection des variables sur le plan 1×2
- Figure 21** Analyse en composantes principales, projection des variables sur le plan 1×3
- Figure 22** Distribution des échantillons du sol dans le triangle textural USDA
- Figure 23** Triangle texturale USDA (1951) et stratification du triangle selon les deux variantes.
- Figure 24** Distribution des échantillons selon le triangle USDA
- Figure 25** Performance des variables après filtrage
- Figure 26** Diamètre moyen pondéral mesuré (MWD) par rapport au diamètre moyen estimé (MWD) et sensibilité globale des différents réseaux de neurones artificiels (RNA)
- Figure 27** Diagrammes de dispersion du MWD Prédite vs MWD mesurée par utilisation de 4 modèles de Krigeage ; A= Modèle Stable, B= Modèle Gaussien, C = Modèle Sphérique et D = Modèle Exponentiel
- Figure 28** Carte de variabilité de stabilité structurale dans la plaine Bas-Cheliff obtenue par Krigeage
- Figure 29** Carte des écarts types variabilité de stabilité structurale dans la plaine Bas-Cheliff obtenue par Krigeage
- Figure 30** Carte de variabilité de la stabilité structurale dans la plaine Bas-Cheliff obtenue par Co-Krigeage.
- Figure 31** Carte des différences d'estimation de la stabilité structurale dans la plaine Bas-Cheliff entre le Co-Krigeage et le Krigeage.

Liste des tableaux

- Tableau 1.** Processus biologiques, chimiques et physiques influencées par la structure du sol, (Díaz-Zorita *et al.* 2002).
- Tableau 2.** Quelques méthodes classiques de la mesure de stabilité structurale (Le Bissonnais et Le Souder, 1995)
- Tableau 3.** Classes de stabilité, battance et érosion en fonction du MWD (Le Bissonnais et Le Souder, 1995).
- Tableau 4.** Exemples des fonctions de pédotransfert
- Tableau 5.** Statistique descriptive des données de la zone d'étude
- Tableau 6.** Classes texturales des deux variantes utilisées.
- Tableau 7.** Classes de la salinité des deux variantes utilisées.
- Tableau 8.** Classes texturo-organique des deux variantes utilisées.
- Tableau 9.** Résultats des analyses physico-chimiques des 183 échantillons du sol prélevés dans le Bas-Chélif.
- Tableau 10.** Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques.
- Tableau 11.** Valeurs propre et pourcentages des axes.
- Tableau 12.** Matrice de corrélation entre variables physico-chimiques.
- Tableau 13.** Matrice de corrélation des différentes stratifications de la 1^{ère} variante
- Tableau 14.** Matrice de corrélation sur les différentes stratifications de la 2^{ème} variante
- Tableau 15.** Tableau des modèles sélectionnés pour la première variante, 4 classes
- Tableau 16.** Tableau des modèles sélectionnés pour la deuxième variante, 3 classes
- Tableau 17.** Résultats du réseau de neurones
- Tableau 18.** Résumé des fonctions retenues à travers les fonctions RBF et MLP
- Tableau 19.** Performance des 4 modèles dans la prédiction du MWD par Krigeage ordinaire et équations de régression
- Tableau 20.** Superficies des classes de stabilité dans le Ba-Cheliff obtenues par Krigeage ordinaire
- Tableau 21.** Performance des différentes co-variables utilisées modèles dans la prédiction du MWD par Co-Krigeage et équations de régression
- Tableau 22.** Superficies des classes de stabilité dans le Ba-Cheliff obtenues par Co-Krigeage
- Tableau 23.** Test de significativité de la différence des moyennes entre Krigeage et Co-Krigeage
- Tableau 24.** Superficies des différences d'estimation du MWD dans la plaine Bas-Cheliff entre le Co-Krigeage et le Krigeage

Abréviations

σ	L'écart type des résidus
A	Argile (%).
CaCO₃	Calcaire total (%).
CE	Conductivité électrique (ds / m) à 25°C.
CEC e	Capacité d'échange cationique effective (meq/100g)
CEC m	Capacité d'échange cationique metson (meq/100g)
FPT	Fonction de pédotransfert.
G	Groupe de stratification texturale.
GM	Groupe de stratification texturo-organique.
L	Limon (%).
\bar{M}	La moyenne de MWD mesurée.
MEP	Erreur moyenne de prédiction.
MO	Matière organique (%)
Mp	La valeur prédite de MWD.
MWD	Diamètre moyen pondéral
N	Nombre d'échantillons.
Q	Nombre de variables explicatives.
R²	Coefficient de détermination.
RNA	Les réseaux de neurones artificiels
RBF	Radial basis function
MLP	Multilayer perceptron
S	Groupe de stratification de salinité.
S	Sable (%).
SCER	La somme des carrées des écarts résiduels.
SDP	L'écart type de prédiction.
USSL	United States salinity laboratory.



INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale :

Le sol est le lieu d'interaction entre l'atmosphère, la biosphère, la lithosphère et l'hydrosphère, c'est une entité naturelle superficielle souvent meuble qui subit tous les contacts et les transformations (Baise et Girard, 1995 et 1998 ; Christian *et al.*, 2005). Il est de plus en plus menacé par de multiples formes de dégradations physiques, chimiques et biologiques conduisant principalement à une désorganisation des propriétés physiques du sol, sous l'effet des différentes contraintes que le sol subit en permanence.

La stabilité structurale des sols est parmi les plus importantes propriétés physiques du sol, dont la dégradation altère fortement la production agricole, surtout dans les régions arides et semi arides où le sol est soumis en permanence à de longues périodes de sécheresses et à une salinisation intense que ce soit d'origine anthropique ou géologique. Cette dégradation risque de s'aggraver si rien n'évolue dans les pratiques agricoles et environnementales, à cet effet, le suivi en continu de la stabilité structurale, son estimation rapide et précise est l'étape la plus incontournable pour la sauvegarde et la gestion des sols (Bastet, 1999).

Cependant, la mesure des propriétés physiques du sol telles que la stabilité structurale, la conductivité hydraulique ou la rétention en eau est particulièrement longue et difficile et exigerait dans certaines conditions des moyens financiers très coûteux. À cet effet, de nombreux chercheurs ont très tôt cherché à prédire ces propriétés à partir d'autres caractéristiques du sol plus facilement mesurables (Bastet, 1999 ; Bruand., 2004 ; Saidi., 2005), ainsi plusieurs relations ont été établies entre des caractéristiques du sol (granulométrie, teneur en matière organique, teneur en calcaire ...etc.) et son comportement. Ces relations ou fonctions de pédotransfert correspondent à des expressions mathématiques reliant les caractéristiques du sol à une propriété ou un comportement du sol (Bouma et Van Lanen, 1987, Bouma, 1989).

Les sols de la plaine du bas Chelif ; plaine alluviale très vaste et à haut potentiel de production agricole, présentent souvent une structure à stabilité moyenne ou médiocre, sous la dépendance de nombreux facteurs comme la matière organique, la texture du sol, la minéralogie des argiles et la salinité qui participe à affaiblir cette propriété du sol. Les manifestations les plus caractéristiques de cette médiocre stabilité est la battance et la sensibilité des sols à l'érosion, résultant essentiellement de la désagrégation des mottes des terres (Saidi, 1992), en plus du détachement des particules et leurs mobilités (AL Durrach et Bradford, 1983 ; 1984 ; le Bissonnais et le Souder, 1995).

Le suivi en continu de la stabilité structurale dans le Bas-Chelif comme partout ailleurs est particulièrement difficile, surtout en termes de superficie de la plaine, de date de

prélèvement, de conservation, de fragilité des échantillons et de lourdeur des protocoles de mesures, face à ce problème, la modélisation mathématique à travers, les fonctions pédotransfert (FPT) (Bouma, 1989), ou les réseaux de neurones artificiels (RNA) (Pachepsky *et al.*, 1996; Schaap et Bouten, 1996) devient la solution la plus évidente.

Par la suite la connaissance des variations spatiales de la stabilité tout au long du Bas-Cheliff, est d'un intérêt majeur, notamment dans la connaissance de la distribution des états de surface. Dans ce contexte, la modélisation géostatistique à savoir le krigeage, et le co-krigeage, est la meilleure approche pour estimer la structure du sol en continu, si le krigeage est une méthode d'interpolation spatiale qui prévoit la valeur d'un phénomène naturel en des sites non échantillonnés, le co-krigeage améliore l'estimation de la variabilité spatiale par utilisation d'autres variables bien corrélées à la variable à estimer.

Dans ce contexte, cette recherche à un double objectif :

1. L'estimation de la stabilité des agrégats par modélisation mathématique (FPT, RNA) en utilisant des propriétés du sol facilement mesurables et plus pratiques tel que la granulométrie, la teneur en matière organique, le pH, le CaCO₃ et la conductivité électrique, les modèles obtenus vont permettre de prédire la stabilité structurale et d'améliorer la compréhension des processus pédologiques à l'origine de la dégradation de la stabilité.
2. L'estimation en continu de la stabilité structurale par modélisation géostatistique par utilisation du krigeage et du Co-krigeage par utilisation des variables les plus fortement corrélés à la stabilité structurale.

Pour répondre à la problématique posée nous avons structuré ce travail en trois parties

- La première partie, est consacrée à une revue bibliographique sur la modélisation
- La deuxième partie concerne, le matériel et les méthodes utilisées
- La troisième partie est réservée aux résultats et discussion
- Enfin, l'étude se termine par une conclusion générale où sont récapitulés les principaux résultats obtenus et les perspectives.

CHAPITRE I

APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : Aperçu bibliographique

1 Introduction

Les notions de structure et d'agrégat du sol ont été rapportées par de très nombreux travaux dès les années trente, à l'exemple de Tiulin (1928), Baver et Rhoades (1932), Yoder (1936), et Henin (1938). Ces travaux ont été entrepris pour répondre notamment aux problèmes de dégradation des terres arables, ainsi que pour la valorisation, la compréhension de la dynamique des sols et leur classification.

Il existe de nombreuses incertitudes et ambiguïtés dans la définition et dans le mode de description de la structure du sol, celles-ci diffèrent principalement selon les disciplines, le centre d'intérêt, les techniques de mesure et les échelles d'investigation employées.

La diversité des noms pour caractériser une même unité structurale (agrégat, ped, granule, morphème, pseudo sable, etc.) reflète l'existence d'un problème de terminologie. Le même terme peut être défini de différentes façons et différentes appellations sont utilisées (Brewer, 1964 ; Beaudou *et al.* , 1987).

En pédologie, la structure du sol est définie comme « le mode d'organisation des différentes particules solides (simples ou complexes) et des vides qui leur-sont associés » (Diome, 1996, Baize et al, 2013).

On distingue, la structure particulaire, la structure massive et la structure en agrégats dans laquelle les particules (argile, limon, sables) du sol sont organisées en agrégats.

2 Les constitutions du sol

Le sol est constitué de 3 phases, une phase solide, une phase liquide et une phase gazeuse. Chacune de ces phases peut être caractérisée indépendamment des autres, cependant, elles sont en réalité intimement mêlées (Figure 1).

Selon MOREL (1996) la phase solide est composée d'éléments minéraux et d'éléments organiques. Elle représente 50 à 70 % du volume, elle est formée de trois types de constituants, les composés inorganiques (90 % du volume total), organiques et biotiques (tels que la faune, la flore et les microorganismes) (Navel, 2011). La phase liquide se trouve dans les espaces lacunaires entre les particules solides et contient des substances dissoutes appelé solution du sol, la composition de la phase liquide du sol dépend du milieu géologique avec lequel elle interagit chimiquement. La phase gazeuse est représentée par l'air emprisonné dans les espaces vides du sol. Elle est composée de gaz tel que l'oxygène, l'azote, le dioxyde de carbone...etc

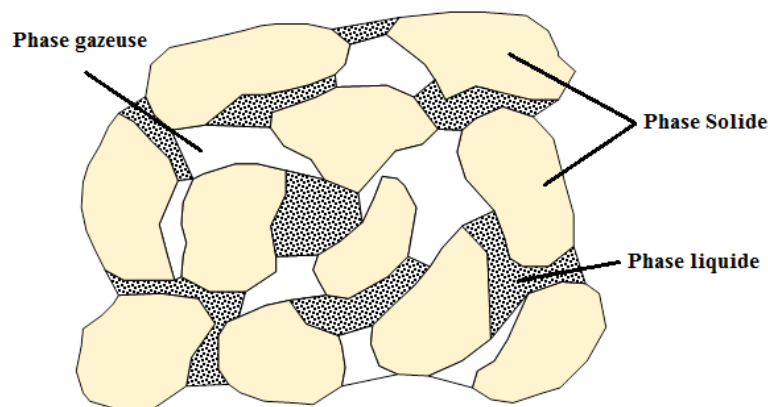


Figure 1 : Les phases du sol (Navel, 2011).

2.1 Phase solide, pédogenèse et variabilité spatiale :

La constitution minéralogique de la phase solide, ainsi que la granulométrie fine et grossière, sont des propriétés essentielles du sol. La variabilité spatiale des propriétés de la phase solide est liée à la variabilité spatiale des sols, cette variabilité dépend des formations géologiques dans lesquels le sol s'est développé, des phénomènes d'érosion et de redistribution qui ont affecté ces matériaux et des processus pédogénétiques qui ont donné naissance aux sols.

Par conséquent, les propriétés de la phase solide du sol dépendent du climat, de l'âge du sol, de la position topographique/géographique, et du biotope (faune et flore). Ces facteurs ont

été définis sous forme d'un modèle conceptuel, initié par Jenny (1941), puis largement développé et employé par la suite (McBratney *et al.*, 2003 ; Salvador-Blanes *et al.*, 2007).

La structuration (organisation interne) de la phase solide du sol et les caractéristiques de ses constituants organiques dépendent des facteurs agissant à plus courtes échelles de temps (variations saisonnières du climat, facteurs anthropiques), alors que la stratification verticale et ses variations latérales sont fortement liées à la pédogenèse.

2.2 Constituants minéraux et triangle USDA :

Le triangle textural USDA (United States Department of Agriculture) est utilisé dans le monde entier, il présente 12 classes (Figure 3), ces classes ont été fixées en 1951 (Collectif, 1951). Les limites des tailles des fractions ont été données par Osborne, (1887), mais elles ont changé au cours du temps. Ainsi la limite séparant les argiles des limons est passée de 5 μm à 2 μm en 1927 (Shaw et Alexander, 1936) (Figure 2).

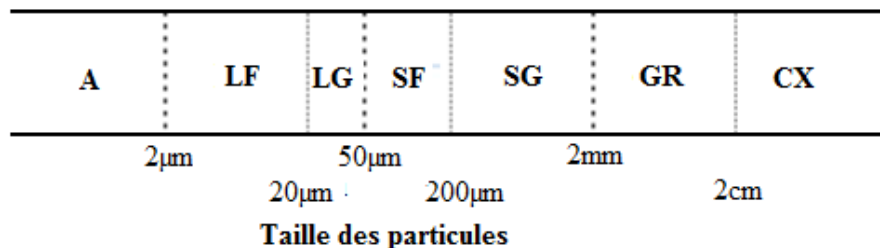


Figure 2 : Fractions granulométriques fines et grossières du sol (AFNOR X 31-003, 1998b).

Avec A : Argile ; LF : Limons fins ; LG : Limons grossiers ; SF : Sables fins ; SG : Sables grossiers ; GR : Graviers ; CX : Cailloux [2cm ; 7,5cm]. Il existe d'autres fractions grossières non représentées ici : Les pierres [7,5 cm ; 25 cm] et les blocs (> 25 cm).

En pédologies différentes aires (classes de texture) sont défini sur les triangles de texture, dans ce contexte, le triangle USDA a proposé deux simplifications successives de son triangle initial. La première a été limité à 5 classes par regroupement des différentes classes ternaires et en « isolant » les matériaux argileux et la deuxième simplification en seulement 4 classes (Figure 3) concerne essentiellement les pôles extrêmes sableux ,argileux, limoneux et argileux limoneux. (Forges *et al.* 2008)

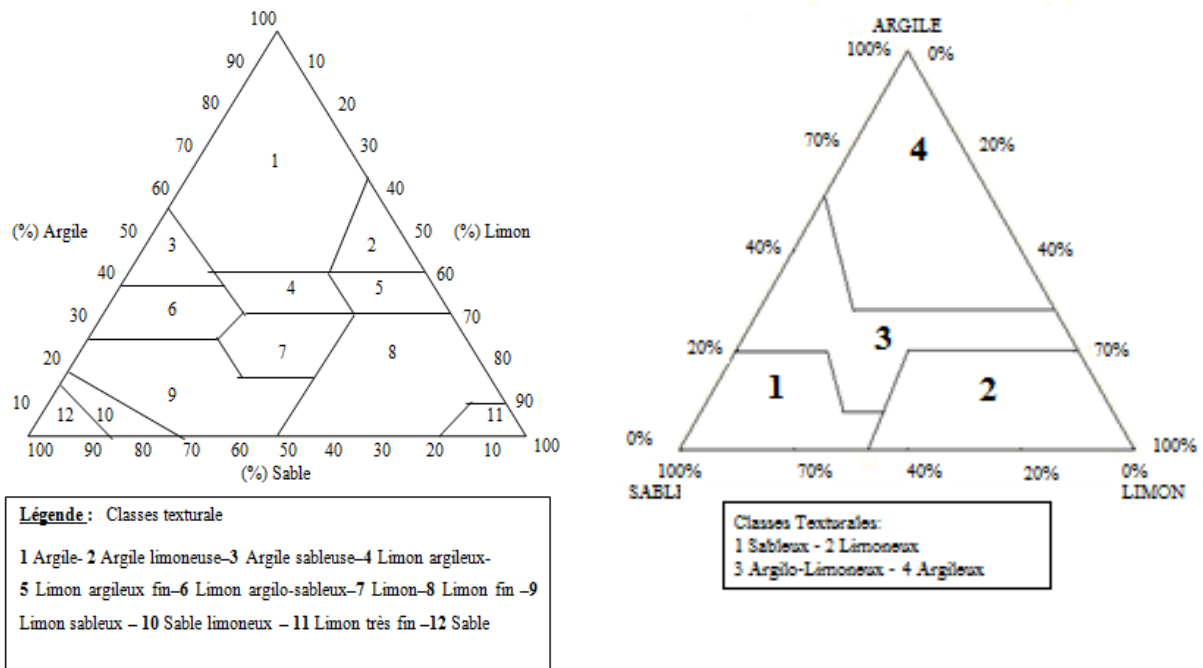


Figure 3 : Triangle texturale USDA (1951).

2.3 Constituants organiques :

La partie organique du sol est caractérisée en premier lieu par son abondance en pourcentage (%), calculé en fonction de la teneur en carbone (C) au sol. Le carbone est un élément majeur dans la constitution des molécules organiques, le dosage du carbone organique du sol est plus facile que celui de la matière organique totale, c'est pourquoi la teneur en carbone organique (g.kg-1). Est utilisée comme expression de l'importance de la partie organique du sol.

2.3.1 Complexe argilo-humique :

La matière organique est intimement liée à la matière minérale du sol, principalement l'argile, ces deux composantes forment le complexe argilo-humique (Gobat *et al.*, 2003 ; Bronick *et al.*, 2005). Ce complexe est très important du fait qu'il soude les particules du sol entre elles et il permet les interactions entre la phase solide du sol et les molécules solubilisées dans sa phase liquide.

3 Structure et stabilité structurale du sol

3.1 Structure du sol

La structure du sol représente l'arrangement spatial des particules minérales et leur éventuelles liaisons (Kay, 1990) par la matière organique, les hydroxydes de fer et /ou d'aluminium à un instant donné, Dexter (1988), définit la structure de sol comme étant "l'hétérogénéité spatiale des différents constituants ou propriétés du sol"

Selon Letey (1991), l'arrangement architectural des particules d'un sol à un moment donné est le résultat d'interaction entre facteurs physiques, chimiques, minéralogiques et biologiques, ce qui rend l'analyse de la structure du sol très complexes et impossible à mesurer quantitativement.

La structure du sol conditionne un éventail de processus physiques et biogéochimiques dans les environnements naturels et agronomiques (Tableau 1).

Tableau 1 : Processus biologiques, chimiques et physiques influencés par la structure du sol, (Díaz-Zorita *et al.* 2002).

Biologique	Habitat de la microflore et mésofaune du sol Stocke et cycle des nutriments (dénitrification, séquestration de C, etc) Inhibition des graines et émergences des plantes Croissance des plantes et racines Production des cultures
Chimique	Sorption et désorption des composés organiques et inorganiques Transport de soluté Pollution
Physique	Rétention d'eau et évaporation Formation de macropores et macroporosité, infiltration et mouvement de l'eau, aération Croute de battance Tassement, densité Erosion hydrique et éolienne

Les particules peuvent être regroupées de plusieurs façons, en fonction de la taille des particules, du type, de la quantité et de la nature des composés organiques, et des conditions climatiques.

La structure du sol peut être donc définie en référence à trois caractéristiques :

1. La taille, la forme et l'arrangement des particules et des agrégats ;
2. La taille, la forme et l'arrangement des espaces vides,
3. La combinaison des vides et des agrégats dans différents types de structures.

3.1.1 La structure du sol en pédologie :

La pédologie distingue trois niveaux d'organisation :

- La micro-organisation des sols c'est le domaine de la micromorphologie,
- Les éléments structuraux visibles à l'œil (agrégats, mottes),
- L'organisation des horizons de sols.

3.2 Stabilité structurale :

La stabilité structurale, représente la résistance opposée par les agrégats à toute action mécanique ou physico-chimique tendant à les dégrader ou à les détruire. Elle joue un rôle important dans la fertilité des sols car elle influence ses propriétés physiques (aération, circulation de l'eau, perméabilité, érodibilité), chimiques (échanges ioniques, séquestration du carbone) et biologiques (activités des microorganismes, croissance racinaire) .(Mrabet 2004).

3.2.1 Facteurs influençant la stabilité structurale :

L'agrégation des sols et leur stabilité reposent sur un ensemble de facteurs, selon Six et al. (2004), la stabilité des agrégats dépend de cinq facteurs qui conduisent à l'agrégation, la faune, les microorganismes, les racines, les agents inorganiques de liaisons et les variables environnementales (Figure 4).

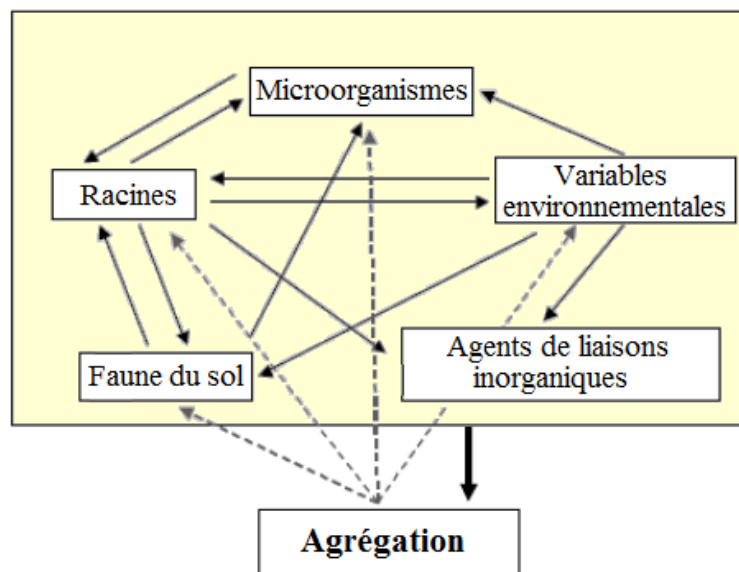


Figure 4 : Représentation schématique des facteurs influençant l'agrégation (Six *et al.*, 2004).

En termes de variables environnementales, le climat agit par les précipitations en causant le ruissellement, l'érosion et la sédimentation, ou par l'augmentation de la teneur en eau du sol, qui peut provoquer l'éclatement mécanique des agrégats, ou par la fermeture des fissures par gonflement des particules argileuses du sol ou par l'évapotranspiration qui provoque le dessèchement des sols et la remontée des sels.(Moeys , 2007)

De nombreuses études ont aussi montré que la stabilité des agrégats change avec le temps (Bullock *et al.*,1988; Chan *et al.*, 1994; Bajracharya *et al.*, 1998; Deneff *et al.*, 2001; Cosentino *et al.*, 2006; Dimoyiannis, 2009), ces variations temporelles ont été montrées au pas de temps en relation avec les cycles de mouillage et de séchage (Utomo & Dexter, 1982; Deneff *et al.*, 2001 ; Bullock *et al.*, 1988; Chan *et al.*,1994; Dimoyiannis, 2009), ces alternances d'humidité affectent surtout les macro-agrégats qui s'agrègent et se désagrègent en fonction des cycles.

L'activité biologique affecte aussi la stabilité des agrégats du sol (Deneff *et al.*, 2001 ; Cosentino *et al.*, 2006 ; Abiven *et al.*, 2007), dans ce contexte, la flore stabilise le sol de par les résidus de plantes, riches en carbone, qui produisent sous l'effet de la biodégradation microbienne des composés humiques très réactifs qui stabilisent les agrégats des sols, et par les racines qui s'infilrent dans le sol et dans les agrégats (Angers & Caron 1998).

Selon plusieurs auteurs (Amézketa, 1999 ; Six *et al.*, 2004 ; Bronick & Lal, 2005), en plus des facteurs externes comme le climat, le temps et la gestion agricole, de nombreux facteurs internes tel que les propriétés du sol (conductivité électrique, pH, nature des argiles, matière organique, hydroxydes) interviennent dans l'ensemble des variations de la stabilité des agrégats.

Dans ce contexte, les principales propriétés du sol influençant la stabilité structurale (Le Bissonais, 1996b ; Kay, 1997 ; Bronick *et al.*, 2004) sont :

- *La texture du sol* : La stabilité structurale augmente avec la teneur en argile, alors que les sols limoneux et sableux sont plus fragiles (Le Bissonais, 1996b).
- *La minéralogie des argiles* : Le type d'argile joue un rôle important dans la stabilité structurale. Les argiles avec une capacité d'échange cationique forte induisent des agrégats plus résistants, car elles offrent une surface de contact plus importante, mais elles peuvent se disperser plus facilement quand les conditions sont défavorables, la dispersion est d'autant plus importante que les argiles sont gonflantes.
- *La matière organique* : La matière organique influence la stabilité structurale par plusieurs mécanismes, à cet effet plusieurs études ont montré une relation directe entre la teneur en carbone total et la stabilité structurale (Dutartre *et al.*, 1993 ; Le Bissonais *et al.*,

2002). Cependant cette relation reste dépendante du type de sol (Martens, 2000b ; Kushwaha *et al.*, 2001) ou du test de mesure de la stabilité structurale utilisé (Le Bissonais *et al.*, 1995 ; Le Bissonais et Arrouays, 1997 ; Chenu *et al.*, 2000). Le Bissonais (1996b) suggère une relation non linéaire qui dépend de la nature des interactions des particules de sol et de la matière organique. Dans les sols limoneux, la teneur en matière organique est la caractéristique à la fois la plus efficace et la plus accessible pour l'agriculteur à travers ses pratiques, l'apport de matières organiques exogènes modifie la quantité et la qualité de la matière organique du sol

- *La teneur en cations.* La teneur et la nature des cations échangeables influencent la stabilité structurale par leur effet sur les processus de dispersion et de floculation des argiles, cette caractéristique est fortement liée à la texture du sol et au type d'argile. Parmi ces cations le taux de sodium échangeable joue un rôle prédominant, selon Emerson (1967) et Kamzan *et al.*, (1983) les sols deviennent très favorables à la dispersion à partir de 10% de la CEC, mais la dispersion peut intervenir dès 2%.

- *Les oxydes de fer et d'aluminium :* Ces oxydes jouent le rôle de flocculant dans le sol et contribuent ainsi à augmenter la stabilité structurale en servant de "ponts" entre les différentes composantes de la structure, leur effet a été particulièrement effectif dans les sols tropicaux, où les teneurs en argiles sont importantes (Six *et al.*, 2002). La cohésion qui en résulte des oxydes de fer et d'aluminium augmente la résistance à l'éclatement et à la désagrégation mécanique, cependant leur effet dépend du pH des sols (Romkens *et al.*, 1977 ; Le Bissonais et Singer, 1993), l'élévation du pH induit une dominance des charges négatives (répulsives), ce qui conduit à la dispersion. Les particules dispersées notamment les argiles flocculent sous l'action de l'eau, et cette floculation conduit à la fragilité de la structure et réduit le taux d'infiltration de l'eau dans le sol (Amezketta *et al.*, 2004).

- *La teneur en calcaire :* L'apport du CaCO_3 a un effet favorable sur la stabilité structurale. Cependant, son action n'est significative que lorsque la teneur en argile est suffisante, l'effet du calcaire est principalement dû à l'ion Ca^{2+} .

3.2.2 Mesures de la stabilité structurale :

Il existe au niveau international de nombreuses méthodes de mesure de la stabilité structurale (Tableau 2). La majorité des méthodes ont en commun la mise en contact des matériaux étudiés avec un excès d'eau (immersion), ensuite la séparation par tamisage des différents diamètres des agrégats et enfin la classification des sols selon leur aptitude à la dégradation. (Le Bissonais et Le Souder 1995)

Cependant, quel que soit la méthode, elle doit être facile à réaliser, reproductible, suffisamment précise et doit utilisable avec la plus large gamme possible de sols.

La combinaison entre l'humectation et une action mécanique, avec des niveaux d'énergie très variables est le traitement appliqué dans la majorité des méthodes et les traitements appliqués sont très variables, allant de l'immersion dans l'eau suivie ou non d'une agitation mécanique ou ultrasonique (Yoder, 1936 ; Edwards et Bremner, 1967), jusqu'à l'application de gouttes calibrées (Low, 1967 ; Young, 1984).

Selon, Le Bissonais et Le Souder 1995, la multiplicité des méthodes peut s'expliquer par la multiplicité des mécanismes mis en cause, et par les aspects méthodologiques, à cet effet, les différences entre les méthodes peuvent être liées aux caractéristiques de l'échantillon mis au test, au traitement appliqué et à la mesure du résultat ou à son mode d'expression.

Pour toutes les méthodes certaines conditions de l'échantillonnage doivent être respectées.

- Les conditions au champ de prélèvement des échantillons peuvent être très variable, et il est nécessaire pour pouvoir établir des comparaisons de respecter une standardisation de l'état physique de l'échantillon avant de le soumettre au test.

- Les échantillons doivent être prélevés dans les même conditions de terrain en évitant les conditions extrêmes (gel, sol saturé ou très sec), d'après Kemper et Rosenau, (1984), tous les échantillons doivent être à un état standard par un séchage à l'air, sachant que l'histoire hydrique et culturale de l'échantillon peut avoir une influence sur le résultat du test.

Tableau 2 : Quelques méthodes classiques de la mesure de stabilité structurale (Le Bissonais et Le Souder, 1995)

Auteurs	Dates	Caractéristiques de la méthode		
		Echantillon	Traitement	Expression du résultat
Yoder	1936	3-5 mm	Tamissage à l'eau	MWD
Hénin et al.	1958	< 2 mm	Tamissage à l'eau	% > 0.200 mm
De Leehner et De Boodt	1959	Sol entier	Tamissage à l'eau	Delta MWD
Low	1967	4-5 mm	Gouttes de pluie	Nombre de gouttes
Edwards et Bremner	1967	4-5 mm	Ultrasons	Taux de dispersion
Emerson	1967	3-5 mm	Immersion	Notation qualitative
Grieve	1980	4-5 mm	Ultrasons	Porosité inter-agrégats
Young	1984	2-9 mm	Gouttes de pluie	MWD
Kemper et Rosenau	1986	1-2 mm	Tamissage à l'eau	% > 0.250 mm
Churchman et Tate	1987	2-3, 4 mm	Tamissage à l'eau	MWD
Farres	1987	5-8 mm	Gouttes de pluie	Temps jusqu'à rupture
Loch	1989	Sol entier	Pluie simulé	% > 0.125 mm
Pojasok et Kay	1990	1-2 mm	Tamissage à l'eau	% > 0.125 mm

Méthode de Le Bissonais (1996) :

Vu la diversification des méthodes on citera seulement la méthode Le Bissonais et Le Souder, (1995) utilisé dans cette étude.

Le test de stabilité structurale proposé par Le Bissonais (Le Bissonais et Le Souder, 1995 ; Le Bissonais, 1996) se distingue des autres tests en raison de sa simplicité et de ses meilleurs liens avec la perte en terre décrits par Amezketa *et al.*, (1996).

Ce test comporte trois étapes ou traitements :

T1 : Humectation rapide par immersion, reproduisant l'effet de mouillabilité brutale et de désagrégation du sol sous pluie intense, après une période de sècheresse. Quelques grammes d'agrégats sont brutalement immergés dans l'eau distillée pendant 10 minutes.

T2 : Humectation lente par capillarité, imitant le comportement du sol sous pluie modérée en période humide. Quelques grammes d'agrégats sont placés sur un support couvert d'un papier absorbant puis ré-humectés par capillarité par de l'eau permutée pendant au moins 30 minutes.

T3 : Désagrégation mécanique par agitation après ré-humectation, permettant de tester la cohésion du sol à l'état humide indépendamment de l'éclatement. Quelques grammes d'agrégats sont immergés dans l'alcool (solvant non polaire et miscible à l'eau) pendant 30 minutes.

Après chaque traitement, les agrégats sont transférés et tamisés à 50 μm dans l'éthanol.

L'expression des résultats de la méthode (Le Bissonais et Le Souder, 1995), est résumée dans le tableau 3.

Tableau 3 : Classes de stabilité, battance et érosion en fonction du MWD (Le Bissonais et Le Souder, 1995).

MWD	Stabilité	Battance	Ruissellement et érosion diffuse
< 0.4 mm	Très instable	Systématique	Risque important et permanent en toutes conditions topographiques
0.4 - 0.8 mm	Instable	Très fréquente	Risque fréquent en toute situation
0.8 - 1.3 mm	Moyennement stable	Fréquente	Risque variable en fonction des paramètres climatiques et topographiques
1.3 - 2.0 mm	Stable	Occasionnelle	Risque limité
> 2.0 mm	Très stable	Très rare	Risque très faible

4 Modélisation de la dynamique structurale du sol

Selon Hartt (2005), la classification des modèles dépend du domaine d'intérêt et des critères retenus, cette classification repose sur la notion :

- De modèle mécaniste et de modèle empirique, Les modèles mécanistes modélisent souvent un seul mécanisme et s'intéressent aux relations entre des variables observables, tout en limitant le nombre de variables, alors que le modèle empirique utilise autant de variables que nécessaire, l'objectif de ce type de modèle est uniquement de décrire le phénomène.
- Des modèles directs qui font des prédictions par utilisation des paramètres puis comparés à des données expérimentales et des modèles inverses qui utilisent des données expérimentales pour prédire des paramètres
- Des modèles dynamiques ou statiques, les modèles dynamiques peuvent être déterministes ou stochastiques. Les modèles déterministes produiront toujours les mêmes résultats avec un jeu de paramètres donné.

4.1 Les étapes de la modélisation :

Plusieurs travaux se sont intéressés aux étapes de conception des modèles, selon Quesnel, (2006) et Ramat (2006) il s'agit de :

- De définir la question de recherche, l'objet à modéliser et les conditions du phénomène à modéliser
- La sélection de ce qui est pertinent dans les processus et systèmes à modéliser.
- La construction du modèle
- L'établissement du plan d'expérience pour le modèle, pour l'analyse de la sensibilité du modèle et sa calibration,
- La mise en action du modèle.
- L'analyse des résultats qui peut amener à redéfinir le modèle.

5 Les fonctions de pédotransfert

5.1 Introduction :

Le développement de modèles simulant les processus du sol a progressé rapidement au cours des dernières années. Ces modèles ont été développés pour améliorer la compréhension des importants processus du sol et d'agir également comme des outils pour évaluer les problèmes agricoles et environnementaux. Par conséquent, la modélisation est à l'heure actuelle largement utilisée dans la recherche et la gestion.

5.2 Historique des fonctions de pédotransfert :

Bien que non officiellement reconnu qu'en 1989, le concept des fonctions de pédotransfert a longtemps été utilisée pour estimer les propriétés du sol qui sont difficiles à déterminer. La recherche la plus complète en développement des PTF a été réalisée pour l'estimation de la rétention d'eau, la première tentative d'utiliser ces prévisions a été faite par Briggs et McLane (1907), puis raffiné ensuite par Briggs et Shantz (1912) pour déterminer le coefficient de flétrissement, définie comme étant la teneur en eau (%) d'un sol durant la croissance végétale.

Au cours des années 1960, diverses études ont été consacré à l'estimation de la capacité au champ (FC), du point de flétrissement permanent (PWP) et de la Capacité disponible en eau du (AWC) à l'exemple de Salter et Williams (1965a, b, 1967, 1969) et Salter *et al.* (1966).

Dans les années 1970, des estimations plus approfondies ont été réalisées à l'aide de grandes bases de données, comme l'étude de Hall *et al.* (1977) à partir des sols en Angleterre et Pays de Galles.

Lampe et Kneib (1981) a officiellement présenté le terme pedo-fonction, alors que Bouma et van Lanen (1986) ont opté pour le terme fonction de transfert et plus tard fonction de pédotransfert, pour éviter toute confusion avec le terme « fonction de transfert » utilisé en physique des sols Bouma (1989).

5.3 Définition et concepts :

D'après Bouma et Van Lanen (1987), le terme de « fonction de transfert » correspond à une expression mathématique reliant des caractéristiques du sol (composition granulométrique, densité apparente, matière organique, carbone organique, etc.) à une propriété ou un comportement d'un sol (conductivité hydraulique, rétention en eau, stabilité structurale, etc.). Le terme de fonction pédotransfert, souligne le fait qu'il s'agit d'une fonction de transfert de l'information appliquée au sol et établie à partir d'un jeu de données dont les caractéristiques peuvent être très variables (taille du jeu de données, méthodologies utilisées, types de sol constituant le jeu de données) (Bastet, 1999).

Les fonctions de pédotransfert, devenues un sujet populaire dans la recherche en sciences du sol, ont pour objectif la prédiction des propriétés du sol par utilisation d'autres propriétés moins chères et facilement mesurables (Bouma, 1989).

Différents types de fonctions ont été développé pour prédire les propriétés physiques ou chimiques du sol (Tableau 4), ainsi les propriétés hydrauliques du sol ont fait l'objet de plusieurs études par le biais des fonctions de pédotransfert à l'exemple de Rawls *et al.* (1991), Wosten (1997), Pachepsky *et al.* (1999b) et Wosten *et al.* (2001) et plus récemment les recherches se sont intéressées aux propriétés physiques (Alijan, 2010).

Tableau 4 : Exemples des fonctions de pédotransfert

Propriétés prédites du sol	Variables prédictives	Auteurs
<u>Les propriétés physiques</u> La perméabilité	La teneur en eau initiale, déficit d'humidité, porosité totale	Canarach <i>et al.</i> , (1968)
La densité apparente Paramètre d'infiltration	La distribution des particules	Rawls (1983)
	La distribution des particules, matière organique	Van de Genachte <i>et al.</i> , (1996)
<u>Les propriétés mécaniques</u> La résistance mécanique du sol	La teneur en carbone organique, la teneur en argile	Da silva and Kay (1997)
<u>Les propriétés chimiques</u> Capacité d'échange cationique L'adsorption du phosphore	La teneur en argile, la teneur en matière organique	Bell and van keulen (1995)
	La teneur en argile, pH,	Sheionst and Schwertman (1995)

5.4 Principes :

Plusieurs fonctions de pédotransfert (FPT) ont été développées au cours des dernières décennies. A ce stade, deux principes utiles et efficaces sur les FPT doivent être définis. Ces principes sont l'effort et l'incertitude.

✓ **L'effort** : Ce principe consiste à ne pas prédire des paramètres plus faciles à mesurer que le prédicateur. Le coût et l'effort pour obtenir les informations sur le prédicateur doivent être inférieure à celles fournies pour l'obtention des informations sur la prédite.

✓ **L'incertitude** : Ne pas utiliser les FPT à moins qu'on puisse évaluer l'incertitude. Pour un problème donné, si un ensemble de FPT alternatives est disponible, utiliser celle qui donne la variance minimale.

L'incertitude d'une fonction de pédotransfert (FPT) peut être due à l'incertitude du modèle, ou à l'incertitude dans les données d'entrée.

L'incertitude associée au modèle peut être calculée à partir de la méthode bootstrap non-paramétrique (Efron and Tibshirani, 1993), ou analyse de premier ordre si les FPT sont générés en utilisant la méthode des moindres carrés.

L'incertitude des données d'entrée peut être facilement calculée en utilisant plusieurs méthodes. Cela se fait par échantillonnage à plusieurs reprises à partir de la répartition supposée de la donnée d'entrée et l'évaluation de la sortie des FPT.

5.5 Classification des FPT :

Selon Wosten *et al.*, (1995) il existe deux types de FPT en fonction de la disposition des informations, à savoir les classes de fonctions de pédotransfert (CFPT) qui prédisent certaines propriétés des sols sur la base des classes (texture, horizon, etc) auxquelles appartient l'échantillon du sol et les fonctions de pédotransfert continues (FPTC) et les FPT continues qui prédisent de façon continue la variation d'une ou de plusieurs caractéristiques du sol.

Les FPT peuvent être aussi classées en considérant le prédicateur et la variable prédite. Les prédicateurs / prédits sont des variables qui peuvent être des classes difficiles ou floues, des variables continues ou floues ou des classes continues mixte, atteignant 25 possibilités, malgré en conformité avec les principes, il n'est pas raisonnable de considérer toutes les combinaisons des FPT efficaces.

5.6 Approches pour les différentes classes :

En règle générale les fonctions de pédotransfert (FPT), peuvent être divisées en deux approches.

- L'Approche mécaniste-empirique : Cette approche vise à décrire un modèle physique ou chimique, reliant les propriétés de base aux propriétés prédites (Aryaand (1981).
- L'Approche empirique : C'est la méthode la plus courante, elle est utilisée pour corréliser les propriétés de base du sol aux propriétés du sol les plus difficiles à mesurer par utilisation de différentes méthodes d'ajustement numériques. La technique la plus fréquemment utilisée pour l'ajustement des FPT est la régression linéaire multiple (Wosten *et al.*, 1999), et plus récemment les réseaux de neurones artificiels (Schaap *et al.*, 1998) . D'autres méthodes numériques et statistiques modernes telles que les modèles linéaires généralisés (McCullagh and Nelder, 1989), les modèles généraux additifs (GAM) (Hastie, 1992) et arbres de régression (Breiman *et al.*, 1984) peuvent également être appliquées,

5.7 Un schéma de développement des FPT :

Le développement des PTF nécessite les étapes suivantes (Figure 5) :

- Recherche bibliographique, recherche de fonctions de pédotransfert disponibles.
- Base de données recueil : rechercher une base existante, ou créer une nouvelle base de données.
- Rechercher la meilleure méthode numérique, y compris le regroupement des propriétés du sol en fonction de l'emplacement géographique, la texture ou la couche fonctionnelle.
- Générer les nouvelles fonctions de pédotransfert et effectuer une analyse d'incertitude.

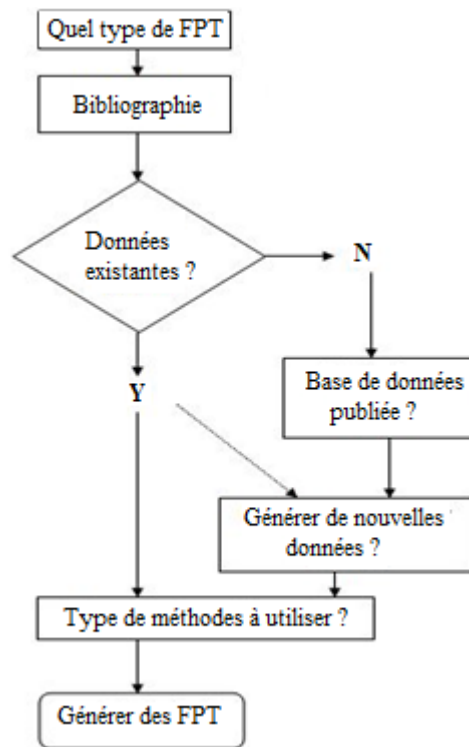


Figure 5 : Schéma de développement des fonctions de pédotransfert (McBratney *et al.* , 2002) .

D'autre part, Scheinost *et al.* (1997b) a proposé de mettre en place la relation attendue entre les paramètres du modèle et les propriétés du sol, puis insérer la relation dans le modèle et estimer les paramètres de la relation en ajustement du modèle attendu à l'aide de la régression non linéaire.

5.8 Les fonctions de pédotransfert à fondement physique :

Dans ces fonctions de pédotransfert (FPT), les paramètres des modèles sont directement issus des propriétés du sol. Les modèles physiques établis peuvent être le plus souvent assimilés à une fonction de pédotransfert puisque l'expression analytique utilise directement des caractéristiques de constitution du sol. Ces modèles physiques établis cherchent à simuler la distribution des pores ou à assimiler la distribution des particules dans le sol (Arya et Paris, 1981 ; Haverkamp et Parlange, 1986 ; Nimmo, 1997 ; Assouline *et al.*, 1998).

5.9 Origine des sols utilisés pour établir des FPT :

Les sols utilisés pour développer les FPT ont des origines qui peuvent être très variables mais d'une façon générale, les chercheurs développent des FPT pour les sols des pays où ils conduisaient leurs recherches.

Ainsi Rawls *et al.* (1982), Cosby *et al.* (1984) et Gupta et Larson (1979) ont établi des FPT pour les sols du continent Nord-américain, alors que Hall *et al.* (1977) en ont développé pour la Grande Bretagne et Vereecken *et al.* (1989) pour les sols de Belgique.

6 Les réseaux de neurones artificiels

6.1 Définition et concepts :

Les réseaux de neurones (RNA) sont généralement optimisés par des méthodes d'apprentissage de type statistique, et peuvent donc être placés dans la famille des applications statistiques.

La base des réseaux de neurones artificiels a commencé en 1942 avec le premier modèle de cellule proposé par McCulloch et Pitts (1942).

Un réseau de neurones est un réseau très complexe composé d'une combinaison de nerfs simples (Lippmann, 1987). Les caractéristiques importantes des réseaux de neurones (RNA) sont la résolution de problèmes non linéaires, ayant une structure distribuée parallèlement, un apprentissage, une tolérance aux erreurs et une généralisation. À travers ces fonctionnalités les RNA sont utilisées dans de nombreux domaines.

En explorant la relation entre les données d'entrées et sorties, le réseau de neurones est capable de produire les sorties appropriées (Garip, 2011).

Les réseaux de neurones (RN) sont des méthodes de calcul dont la conception est inspirée du fonctionnement des neurones humains. Les cellules nerveuses reçoivent des signaux et effectuent la transmission du signal selon le signal qu'ils reçoivent (Figure 6). Les signaux reçus sont transmis au centre de la cellule (corps cellulaire), lorsque les signaux collectés dépassent le seuil, le signal est transmis à d'autres cellules nerveuses via l'axone (Akkaya, 2011). De la même manière, un réseau de neurones artificiel est un ensemble de cellules (neurones) connectées entre elles et organisées par couches.

La première couche est appelée couche d'entrée, les cellules qui la composent reçoivent les informations du monde extérieur. La dernière couche est appelée couche de sortie et fournit les résultats du calcul effectué par le réseau. Entre les couches d'entrée et de sortie, on trouve les couches intermédiaires ou couches cachées, dont les neurones n'ont aucun contact avec l'extérieur (Abdelkafi *et al.*, 2012)

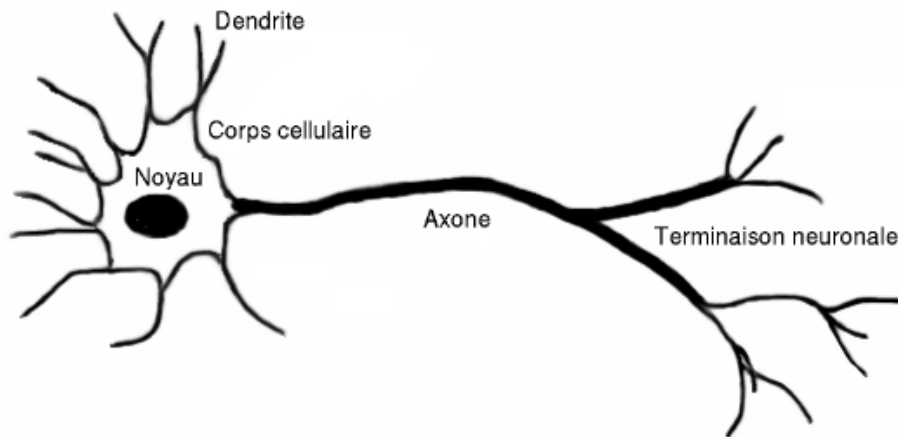


Figure 6 : Structure des cellules nerveuses biologiques (Brain Education, 2018)

Le réseau de neurones artificiel est formé par la combinaison de nombreuses cellules artificielles, cette combinaison est structurée en couches non arbitraires (Akkaya, 2011).

Les réseaux de neurones (RNA), en tant que systèmes capables d'apprendre mettent en œuvre le principe de l'apprentissage par l'expérience (Haykin, 1994), par confrontation avec des situations ponctuelles, ils infèrent un processus de décision intégré dont le caractère générique est fonction du nombre de cas d'apprentissage rencontrés et de leur complexité par rapport à la complexité du problème à résoudre. On désigne par apprentissage des réseaux de neurones, la procédure qui consiste à estimer les paramètres des réseaux de neurones afin que celui-ci remplisse au mieux la tâche qui lui est affectée (Lemmouchi, 2013).

Ce réseau est en général composé d'une succession de couches dont chacune utilise comme entrées les sorties de la précédente. Chaque synapse connectant les neurones des différentes couches possède un poids synaptique, de sorte que les neurones sont multipliés par ce poids, puis additionnés (Figure 7).

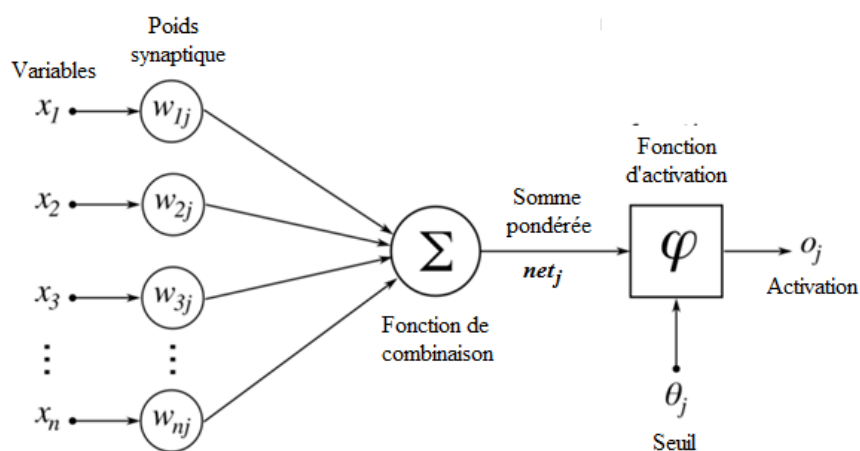


Figure 7 : Structure d'un réseau de neurone artificiel(Lemmouchi, 2013).

La construction d'un réseau optimal repose sur une sélection judicieuse des variables d'entrée et de sortie, sur une architecture adéquate et sur la sélection de jeux de données représentatifs du phénomène pour son entraînement et sa validation. Le soin apporté à ces différents éléments garantit la généralisation (Anctil et Lauzon, 2004), ou la capacité du modèle à inférer le comportement du système à l'étude pour des conditions qui ne sont pas représentées dans le jeu de données utilisé pour son entraînement et sa validation.

La plupart des études consultées rapportent que les réseaux de neurones seraient souvent plus performants que les modèles linéaires pour diverses applications agronomiques et écologiques. Ainsi, la comparaison des résultats d'un réseau de neurone à d'autres modèles de régression linéaire et non linéaire pour la prédiction des rendements de cultures selon les sols, la topographie et les variables climatiques aux USA, a montré que les réseaux de neurones offrent une meilleure généralisation (Drummond *et al.* 2000).

Dans la même optique, Park *et al.* (2005) rapportent que la prédiction des propriétés physiques du sol par application de différents modèles (réseaux de neurones et régressions), a montré une nette supériorité des réseaux de neurones.

En dehors de la simulation et de la prédiction des propriétés physique du sol, les réseaux de neurones ont été utilisés pour l'estimation de la radiation solaire (Bocco *et al.*, 2006; Fortin *et al.*, 2008), l'estimation des températures maximales et minimales de l'air (Li, 2002), l'analyse de tendances pluviométriques (Phillip et Joseph, 2003), l'estimation de la concentration en ozone (Chung Lu *et al.*, 2006), les impacts des changements climatiques sur les changement de la distribution potentielle des espèces végétales (Hilbert et Ostendorf, 2001), ainsi que le contrôle des mauvaises herbes (Donohue *et al.*, 2005; Kavdir, 2004) et des maladies (Paul et Munkvold, 2005; Francl, 2004).

6.2 Types de réseaux de neurones

On distingue deux types de réseaux de neurones : les réseaux non bouclés et les réseaux bouclés.

6.2.1 Les réseaux de neurones non bouclés :

Un réseau de neurones non bouclé réalise une (ou plusieurs) fonctions algébriques de ses entrées, par composition des fonctions réalisées par chacun de ses neurones (Dreyfus, 1998).

Il est représenté par un ensemble de neurones "connectés" entre eux, et l'information circule des entrées vers les sorties sans retour en arrière. L'arrangement des neurones fait qu'il n'y a pas de cycle, ce type de réseau est donc un réseau non-bouclé (Figure 8).

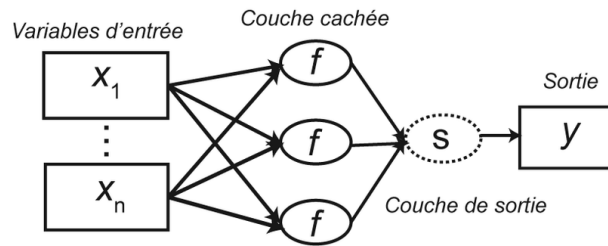


Figure 8 : schéma d'un réseau de neurones non-bouclé (Siou LKA, 2011)

6.2.2 Les réseaux de neurones bouclés :

A l'inverse des réseaux non bouclés, les réseaux de neurones bouclés sont cycliques, ainsi il est possible de trouver dans ce type de réseaux au moins un chemin qui revient à son point de départ (cycle). C'est-à-dire ayant une topologie de connexions quelconque, comprenant notamment des boucles qui ramènent aux entrées la valeur d'une ou plusieurs sorties (Dreyfus, 1998). Ainsi, à chaque connexion d'un réseau de neurones bouclé est attaché, un poids et un retard, multiple entier de l'unité de temps choisie.

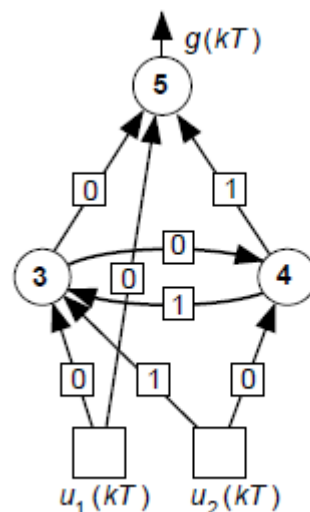


Figure 9 : Schéma d'un réseau de neurones bouclés à deux entrées les nombres dans les carrés sont les retards associés à chaque connexion (Dreyfus, 1998).

Selon Nerrand *et al.* (1993), tout réseau de neurones bouclé, aussi complexe soit-il, peut être mis sous une forme canonique, comportant un réseau de neurones non bouclé dont certaines sorties (les variables d'état) sont ramenées aux entrées par des bouclages de retard unité.



CHAPITRE II

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Chapitre II : Matériel et méthodes

I. Milieu physique

La plaine du Bas-Cheliff est localisée au Nord-Ouest Algérien (Figure 10), à 250 km d'Alger ; c'est l'une des plus vastes plaines alluviales quaternaires qui s'étend sur environ 50000 hectares, elle occupe la partie ouest du bassin versant du Cheliff, comme elle est traversée par l'oued Cheliff le plus long oued d'Algérie.

Elle est comprise entre 35° 44' 16.8" et 36° 5' 45.6" de latitude Nord et 0° 25' 15.6" et 1° 5' 13.2" de longitude Est. Les coordonnées de cette plaine, selon la projection UTM Algérie Fuseau 31, sont :

$$X = 267\ 818.72 \text{ et } 327\ 007.07 \text{ m}$$

$$Y = 3956\ 576.62 \text{ et } 3997\ 676.09 \text{ m}$$

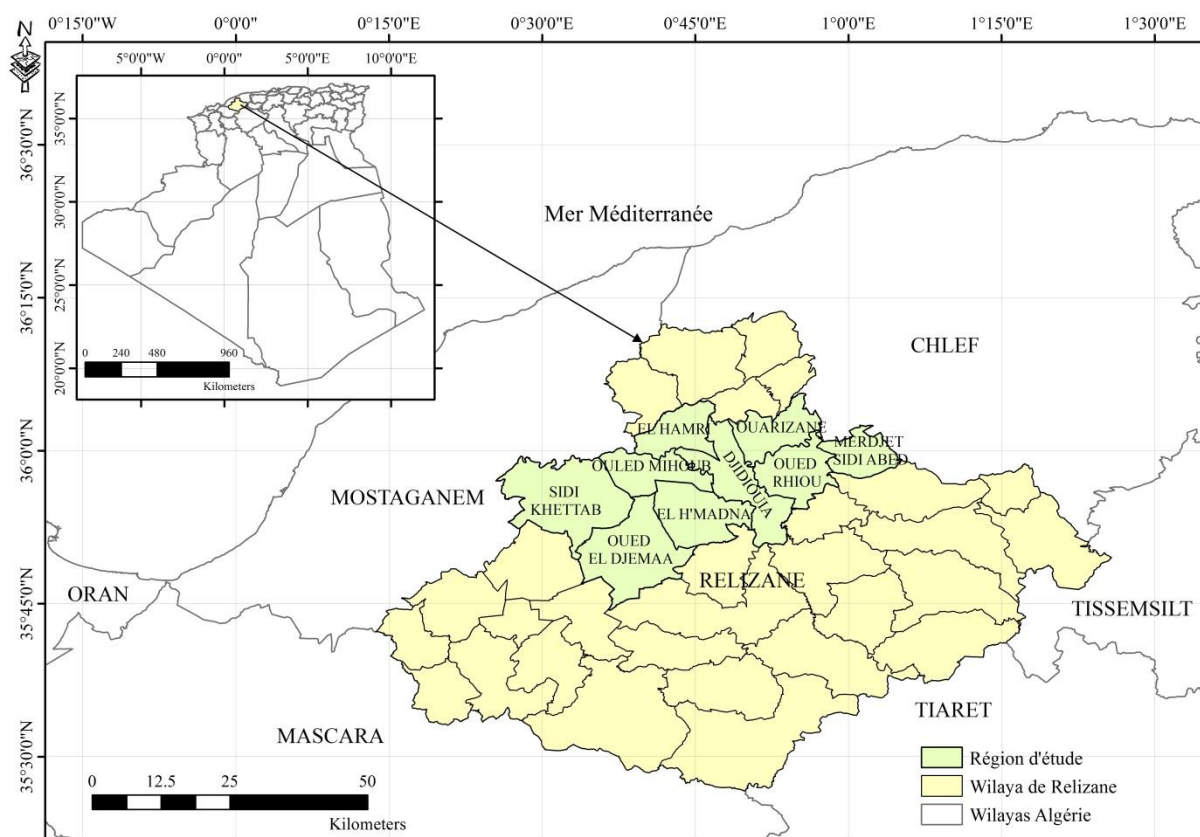


Figure 10 : Localisation du Bas Cheliff (nos travaux).

1 Géologie et Géomorphologie

Le Bas-chélif est un synclinal comblé du rharbien (quaternaire) encadré au Nord et au sud par des collines de l'âge Mio-pliocène (tertiaire). En conséquence, les alluvions du Bas-chélif proviennent directement de l'érosion de ces collines (McDonald et BNEDER, 1990).

Au sud, les collines coupées par l'oued Rhiou et l'oued Djidouia, consistent en de schistes et de marnes salés, ce qui explique la haute salinité des sols alluviaux de la plaine ainsi que le niveau de la salinité des eaux de la retenue du barrage Gargar. (McDonald et BNEDER, 1990).

Au Nord, Les collines de Dahra sont composées de marnes et de limons argileux qui deviennent vers l'ouest des sables et des conglomérats plus grossiers. Encore une fois, certains de ces lits sont salés.

Les collines de l'Est du Bas-Chélif sont plus récentes que le Dahra et le massif de l'Ouarsenis, d'âge Villafranchien et sont composées de limons calcaires intercalés de sables, extrêmement tendres, une érosion sévère à ravines profondes. (I.N .S.I.D, 1998)

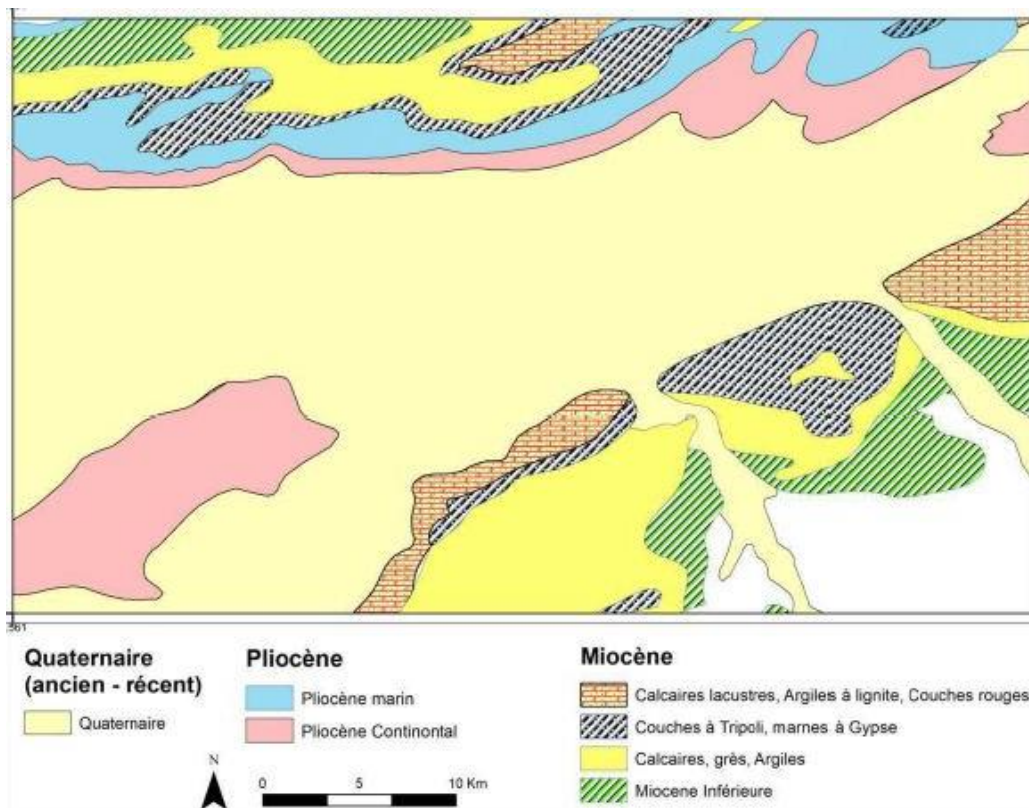


Figure 11 : Carte géologique de la plaine de Bas Cheliff. (Bradai, 2017)

2 Pédologie

La pédologie du Bas-Cheliff est très variable, les sols des bordures sont formés par des associations de sols plus ou moins érodés, qui peuvent évoluer sur du calcaire, des grès ou des marnes. Lorsque la roche n'affleure pas à la surface, on observe des sols calcimagnésiques rendziniformes avec parfois la présence d'une croûte calcaire.

Dans la plaine du Bas-Cheliff on distingue cinq classes de sols (Figure 15) (Boulaine, 1957):

- Les sols salés ;
- Les sols hydromorphes ;
- Les vertisols ;
- Les sols peu évolués alluviaux et colluviaux ;
- Les sols calcimagnésiques.

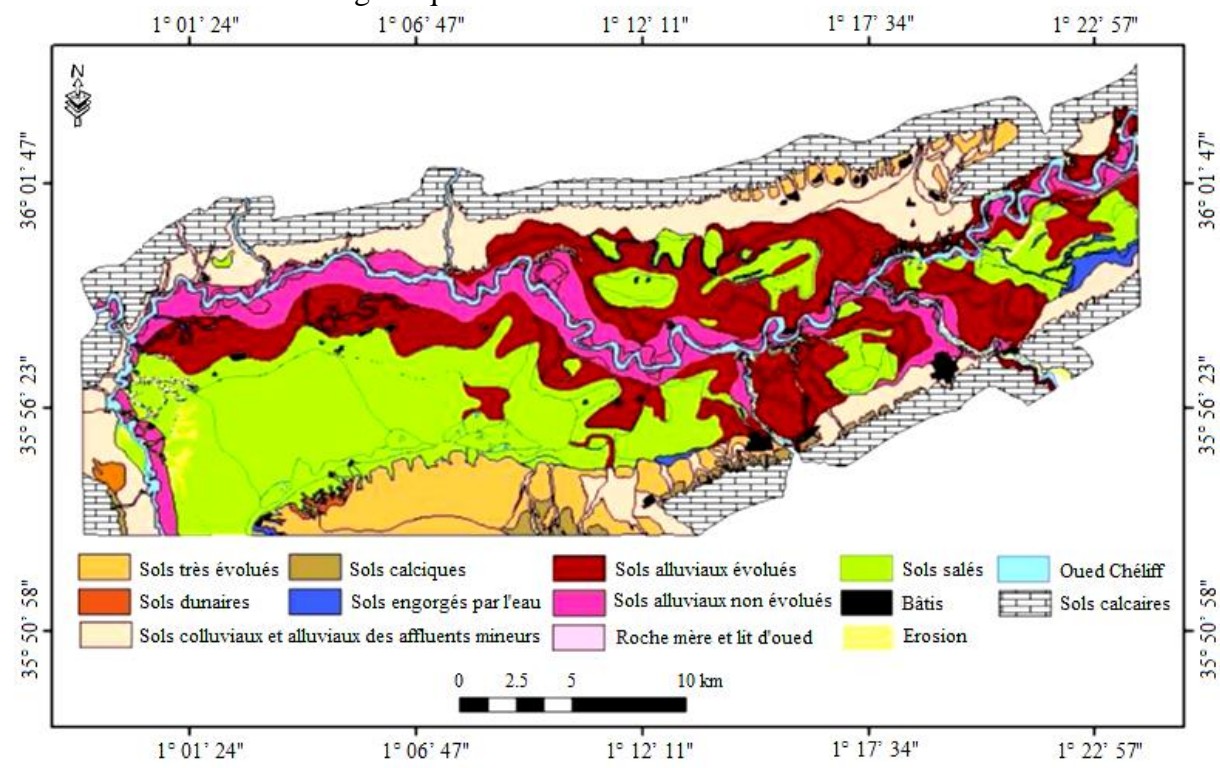


Figure 12: Carte des sols. (Boulaine, 1956).

2.1 Les sols peu évolués :

✓ Les sols peu évolués d'apport alluvial: C'est des sols avec des caractéristiques physico-chimiques très variées selon les différentes conditions de leurs dépôts et migrations. Ils présentent une granulométrie argileuse, limoneuse ou sableuse. Ces des sols généralement profonds rencontrés sur les terrasses des lits de l'oued. Ils peuvent présenter une nappe temporaire qui est à l'origine des taches d'oxydoréduction.

✓ Les sols peu évolués d'apport colluvial : Ils sont localisés sur les bordures de la plaine entre les piémonts et les glacis et au niveau des cônes de déjection des oueds comme Oued Rhiou et Oued Djédouia. Ils se caractérisent souvent par des dépôts de cailloux et de graviers.

2.2 Les vertisols :

Les vertisols sont riches en smectites (argiles gonflantes). Ce sont des sols à mauvais drainage, qui se localisent sur les alluvions des terrasses Rharbiennes, présentant souvent le caractère salin avec une hydromorphie en profondeur.

2.3 Les sols calcimagnésiques :

Ils sont rencontrés le long des limites nord et sud de la plaine du Bas-Cheliff. C'est des sols carbonatés, plus ou moins différenciés, présentant parfois des accumulations calcaires nodulaires ou continues sous forme de croûte et d'encroûtement et montrent parfois des caractères vertiques.

2.4 Les sols Isohumiques :

Ces sols sont moins fréquents, rencontrés sur les colluvions de la partie sud de la plaine et sur le plateau de Benziane. Ils se caractérisent par une couleur marronne et présentent parfois le caractère vertique ou des accumulations discontinues de calcaire.

2.5 Les sols hydromorphes :

C'est des sols profonds avec un drainage imparfait, ils sont rencontrés un peu partout dans le Bas Cheliff et surtout dans les dépressions fermées telles que la région du Gaa.

2.6 Les sols salés :

Appelés halomorphes : sont des sols dont l'évolution est influencée par la présence de sels solubles et du pourcentage du sodium échangeable. Lorsque la conductivité électrique dépasse les 4 dS/m par la méthode de la pâte saturée, ils sont appelés sols salés I (Richards, 1954).

3 Le climat

Les composantes majeures du climat sont essentiellement les facteurs hydriques et thermiques.

3.1 Les précipitations :

La pluviométrie est un paramètre primordial du fait qu'elle assure le maintien et l'épanouissement du tapis végétal, comme elle joue un rôle important dans la dégradation des sols par érosion lors des averses torrentielles et par la remontée des sels en cas d'insuffisance pluviométrique.

3.1.1 Le régime Saisonnier :

La connaissance du régime pluviométrique constitue un élément majeur dans l'analyse du climat. Il s'agit de définir la répartition des pluies sur les quatre saisons : Automne (A), l'Hiver (H), le Printemps (P) et l'été (E).

Le régime saisonnier du Bas-Cheliff (Figure 13) pour la période 1985/2014 est de type HAPE, l'essentiel de la pluviométrie annuelle presque 70% est enregistré durant les saisons d'hiver et d'automne alors que l'été est la saison la plus sèche.

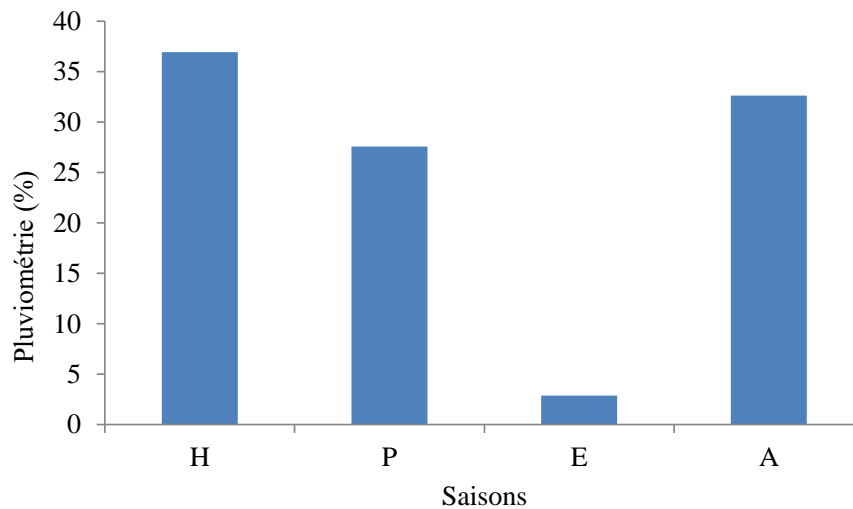


Figure 13 : Régime saisonnier du Bas-Cheliff (1985/2014)

La région d'étude a connu durant les dernières décennies des cycles de sécheresse intenses s'étalant de 1987 à 1990 et de 1992 à 1995. Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 290 mm.

Généralement, la pluie tombe sous forme d'averse de forte intensité de courte durée causant des inondations dans la plaine.

L'analyse pluviométrique montre que novembre est le mois le plus pluvieux avec 36 mm, alors que la faible pluviosité est enregistrée au cours du mois de juillet avec une moyenne de seulement 1 mm.

3.2 La température :

L'effet de la température est considérable dans le processus de salinisation des sols par le fait qu'elle augmente l'évaporation, ce qui provoque la remontée des sels en surface et participe ainsi à la dégradation des sols, (Seltzer.1946) dans son étude climat de l'Algérie décrivait la région comme étant le « four du Tell ».

Le régime thermique du Bas-Cheliff est caractérisé par des températures élevées en été et relativement basses en hiver. Les températures les plus élevées sont enregistrées durant la période s'étalant entre le mois de mai et jusqu'au mois d'octobre avec une moyenne de

26°C, les températures maximales de l'ordre de 38 °C sont atteintes en juillet et août, ces températures correspondent à une forte évaporation et une remontée capillaire de la nappe qui se trouve parfois à un mètre de profondeur. Les basses températures se manifestent au mois de janvier avec une température moyenne de 12 °C et une moyenne minimale de 5 °C.

3.3 Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen :

Selon Bagnouls et Gaussen (1953) un mois est considéré comme sec lorsque le total des précipitations P (mm) est égal ou inférieur au double de la température moyenne T (°C) ($P \leq 2T$). Le diagramme ombrothermique (Figure 14) relative à la plaine du Bas-Cheliff montre durant la période 1985/2014 une saison sèche de l'ordre de 7 mois et demi, allant du début du mois de mars jusqu'au mi-octobre.

Sur ce diagramme on note un écart considérable entre la température de juillet celle de janvier de l'ordre de 19°C en moyenne ou plus pour certaines années, ce fort écart traduit un climat continental malgré la proximité de la méditerranée (35 km à vol d'oiseau).

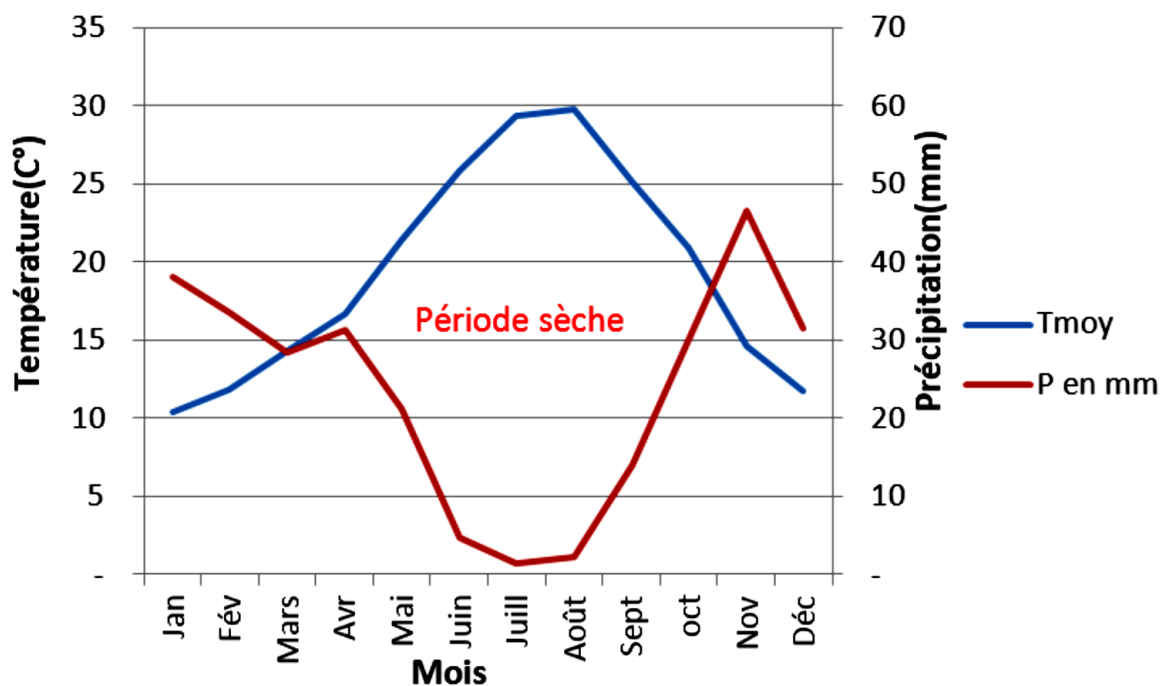


Figure 14 : Diagramme ombrothermique de la station de Relizane de la période (1985/2014).

3.4 Le quotient pluviothermique d'Emberger :

La sécheresse et le froid sont les principaux facteurs limitant la croissance de la végétation méditerranéenne. Dans ce contexte, Emberger (1952) a proposé un indice climatique visant à traduire un écosystème méditerranéen en fonction de la vie végétale :

Pour classer le climat méditerranéen, Emberger (1955) a établi le quotient pluviothermique (Q2) exprimé par la formule suivante

$$Q2 = \frac{2000 \times P}{M^2 - m^2}$$

P : Pluviométrie moyenne annuelle en mm.

M : Moyenne des maxima du mois le plus chaud en °K.

m : Moyenne des minima du mois le plus froid en °K.

Le climagramme proposé par Emberger pour la zone méditerranéenne est constitué par la combinaison des valeurs de m, en abscisses et celle du Q2 en ordonnées, ce qui permet de situer les stations étudiées en fonction des étages climatiques établis sur le climagramme.

Le climagramme d'Emberger (Figure.15) montre que la plaine du Bas -Chélif est localisée dans l'étage climatique aride à hiver doux, avec un Q2 moyen de 37 et une température minimale moyenne autour de 5°C.

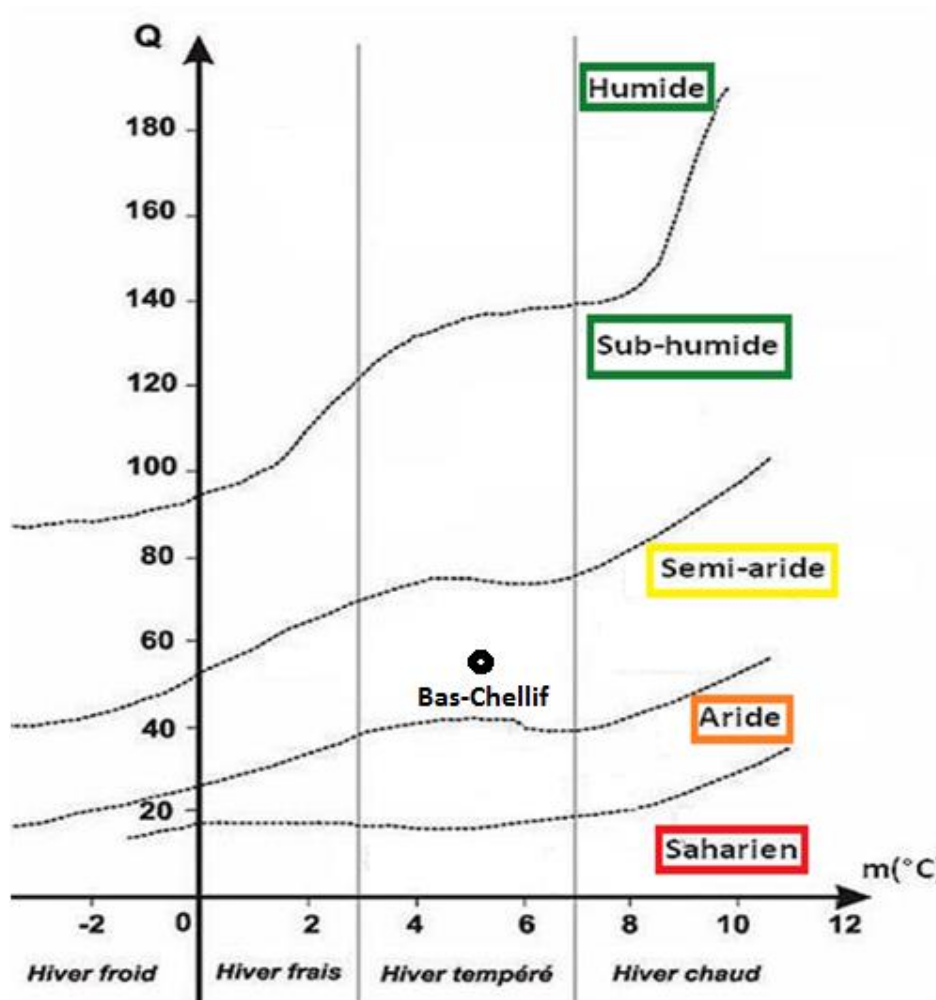


Figure 15 : Position de la station de Hmadna sur le climagramme d'Emberger

3.5 L'évapotranspiration (ETP) :

Elle est définie comme étant la valeur maximale possible de l'évaporation dans des conditions climatiques données. Elle résulte d'un phénomène physique qui est l'évaporation et l'autre biologique qui est la transpiration.

L'évapotranspiration potentielle estimée dans le Bas-Cheliff selon la formule de Penman est de 1500 mm/an.

3.6 L'humidité :

L'humidité relative de l'air est généralement plus élevée le matin pour tous les mois, elle est de l'ordre de 65 à 75 % en hiver et près de 35 % en été.

Elle peut compenser en un certain degré l'absence ou la rareté des précipitations en favorisant le développement des plantes.

Le mois le plus humide est le mois de décembre, par contre le mois le plus sec est le mois de juillet.

3.7 Le vent :

Le vent est un élément du climat qui conditionne la température et l'évapotranspiration, il joue un rôle très important dans le processus de salinisation dans la mesure où il provoque le dessèchement de la croûte superficielle par le phénomène d'évapotranspiration, ce qui se manifeste par la remontée des sels.

Le vent Ouest est le vent dominant dans la plaine du Bas-Cheliff. Sa vitesse moyenne varie de 13 à 33 Km/h, il joue un important rôle dans dégradation mécanique des sols et agit sur l'amplitude de la température. Il constitue un important agent d'érosion surtout durant la période sèche.

4 Les ressources en eau

4.1 Les ressources en eaux superficielles :

Les deux principales ressources en eau superficielles dans le Bas-Cheliff sont :

- Le barrage de Gargar sur l'oued Rhiou, d'une capacité de 450 millions de m³, il est l'un des plus importants barrages d'Algérie ;
- La retenue de Merdjet Sidi Abed, est un réservoir hors cours d'eau d'une capacité de 50 millions de m³, elle est remplie essentiellement pendant l'hiver par dérivation des eaux de l'oued Cheliff.

La qualité des eaux du bassin de Chéiff est variable, mais généralement médiocre. La salinité de l'eau dans l'oued Rhiou varie entre 0,5 g/l environ pour les débits les plus forts et 2 g/l pour les débits d'étiage.

4.2 Les ressources souterraines :

Deux sortes de nappes superposées existent dans le quaternaire ; les nappes superficielles libres contenues dans les formations du quaternaire récent et les nappes de profondeurs captives contenues dans celles du pli quaternaire.

Selon Benziane (1983), Les aquifères responsables des nappes superficielles sont pratiquement étendus sur toute la plaine du Chellif. Les nappes profondes captives sont renfermées le plus souvent dans un système de lentilles d'éléments détritiques attribuées soit au pliocène supérieur continental soit au quaternaire ancien.

La salinité des nappes superficielles est généralement plus élevée que celle des nappes profondes, elle atteint les 22 g/l dans l'axe Chellif.

Le faciès chimique des eaux des nappes superficielles et des nappes profondes est bicarbonaté à chloruro-sodique.

5 Ecologie et occupation du sol

Selon l'étude de McDonald et BNEDER (1990), la plus grande partie de la vallée du Bas-Cheliff est cultivée, et caractérisée par un système de champs ouverts avec par endroits des brise-vent de conifères et d'eucalyptus.

Les cultures principales dans l'aire d'étude sont les céréales, les cultures maraîchères (notamment les artichauts), l'arboriculture (oliviers et agrumes), et les cultures fourragères.

D'après la même étude (McDonald et BNEDER, 1990), les principales cultures réparties sur la S.A.U du Bas-Cheliff sont : l'orge (20%), le blé (8.5%), les oliviers (3.6%), le melon, la pastèque et l'artichaut (6.7%), alors qu'en été, certains types de sols sont totalement dépourvus de végétation

L'espèce halophyte la plus abondante dans le Bas-Cheliff est *Suaeda fructuosa* qui peut se développer sur des sols salés à très salés et *Salicornia fructuosa* aussi abondante dans les sols très salés des bas-fonds.

D'autres espèces plus ou moins résistantes à la salinité sont aussi fréquentes, telles que : *Salsola vermiculata*, *Avena sterilis*, *Cynodon dactylon*, *Beta maritima*, *Calendula arvensis*, *Phalaris paradoxa*, *Atriplex halimus* .etc.

II. Présentation des échantillons de sol

La base de données recueillie comprend 1248 échantillons. Ces échantillons sont répartis sur le territoire national et international, parmi lesquels 352 échantillons provenant du nord de l'Algérie et 896 données d'origine internationale. L'ensemble de donnée a été utilisé pour l'établissement des fonctions de pédotransfert.

Un deuxième ensemble composé de 183 échantillons et prélevé au niveau du bas Cheliff à partir de la couche de surface a été utilisé pour le réseau de neurones. (Figure 16).

La mesure des caractéristiques physico-chimiques des échantillons a été faite selon les normes internationales standardisées.

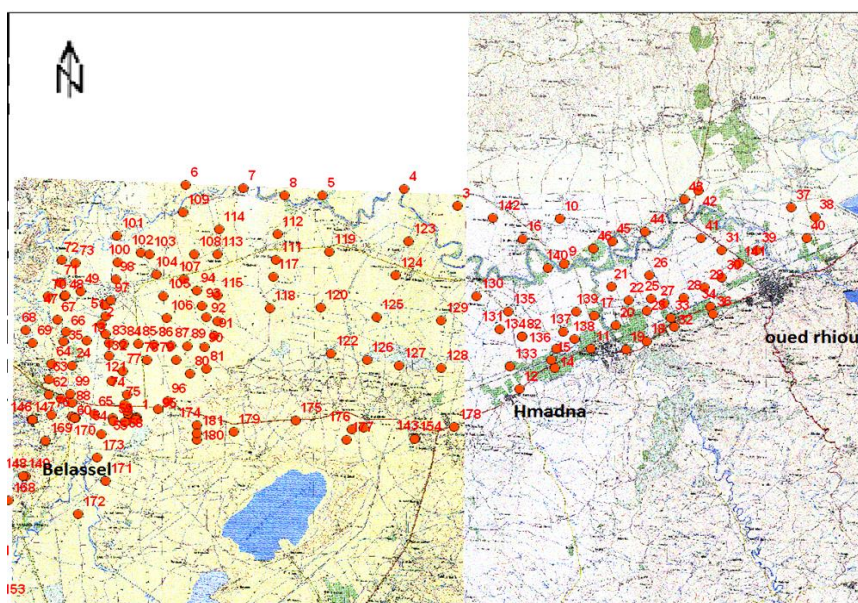


Figure 16 : Distribution spatiale d'échantillonnage des sols dans le Bas Chélif. (Nos travaux)

La méthode d'échantillonnage adoptée et qui est à même de répondre aux objectifs fixés de notre étude, est celle dite semi-aléatoire. Le choix des matériaux concerne différentes textures.

Ce sont des échantillons homogénéisés dans toute la zone d'étude dont les caractéristiques physico-chimique (pH, matière organique, granulométrie et calcaire) ainsi que les propriétés (MWD) sont disponible. Une standardisation de l'état physique des échantillons avant de les soumettre aux tests, un séchage à l'air des matériaux est fondamental sachant que l'histoire hydrique de l'échantillon peut toujours avoir une influence sur le résultat du test (Le Bissonais *et al.*, 1999).

La recherche d'une forte variabilité texturale a été menée afin de disposer, éventuellement, d'une large gamme de stabilités structurales. Selon Halitim (1985) et Daoud (1993), la

présence des carbonates dans les différentes fractions granulométriques a une influence considérable sur les propriétés physiques des sols. Leur répartition étant en outre très variable dans notre cas, nous avons jugé nécessaire, pour établir des comparaisons valables, de résonner uniquement sur les pourcentages relatifs des diverses fractions minérales insolubles. sur chaque échantillons préalablement tamisé à 2 mm, nous avons fait d'une part, une analyse granulométrique (après décarbonatation et dispersion à l'hexaméthaphosphate de sodium en utilisant la méthode de la pipette de Robinson basée sur la loi de Stokes).

D'autre part, la mesure de la teneur en calcaire a été faite par volumétrie au calcimètre de Bernard . Le carbone organique est analysé par la méthode de Anne (1945). Le pH est mesuré dans une suspension terre /eau de 1 /2,5, après 2 heures d'agitation et 24 heures de mise en équilibre. La conductivité électrique est déterminée sur un extrait de pate saturée.

Tableau 5 : Statistique descriptive des données de la zone d'étude.

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Argile	10,20	51,60	28,40	8,06
Limon	14,32	85,49	48,84	11,83
Sable	1,18	89,74	24,48	12,12
CE	0,89	14,70	6,75	2,02
MO	0,61	4,02	2,35	0,67
pH	7,42	8,83	7,97	0,28
CaCO ₃	6,81	38,86	17,73	4,01
MWD	0,08	2,28	1,01	0,32

Les statistiques générales des caractéristiques physico-chimiques sont données dans le tableau n°5. Elle indique la prédominance de sol a pH basique, généralement calcaire, avec des teneurs en matière organique comprisent entre 06 % et 04% et une texture argilo-limoneuse.

La conductivité électrique des sols varie entre 0.9 et 14 ds/m de l'extrait dilué 1/5. Ces échantillons se distinguent par des moyennes élevées en argile, limon, sable. Qui se traduisent par des écarts type généralement important, montrant en forte variabilité texturale. Des écarts-

type faibles de la matière organique et de pH montrent une faible variabilité au sein des données recueillies.

La valeur moyenne de la stabilité structurale (MWD) est de 1,01 mm, cette dernière traduit une stabilité moyenne selon l'échelle de Bissonais *et al*, 1995. Ces sols présentent une moindre variabilité qui se manifeste par des écarts type faible de 0.32.

1. Les analyses physicochimiques:

Les paramètres analysés sont :

- La fraction granulométrique après décarbonatation, argile (A), limon (L) et sable (S), selon la méthode d'Atterberg
- Le pH mesuré dans une suspension terre/eau (1/2,5).
- Le calcaire total (CaCO_3) déterminé par volumétrie au calcimètre de Bernard.
- La matière organique (MO) par le dosage du carbone organique, selon la méthode Anne (1945) ;
- La conductivité électrique (CE) est mesurée sur un extrait de pâte saturée.
- La capacité d'échange cationique (CEC) représente la capacité maximale de cations échangeables qu'un sol peut retenir à un pH donné, ce qui correspond à la somme des sites d'échange occupés par des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K, Na, H et Al), la capacité d'échange cationique a été déterminée à la fois au pH du sol par échange avec une solution de chlorure de cobaltihexammine $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6] \text{Cl}_3$ (Ciesielski et Sterckeman, 1997) et à pH égal à 7 par échange avec une solution d'acétate d'ammonium (méthode Metson). (Saidi *et al.*, 2008).
- **La stabilité structurale** : Les mesures de la stabilité structurale qui traduisent l'aptitude d'un sol à résister à l'action dégradante de l'eau proviennent des résultats des tests au laboratoire préconisés par Le Bissonais (1995). Cette méthode est la plus récente et la plus utilisée par rapport aux autres méthodes de stabilité structurale car elle reflète mieux le comportement structural du sol au moment des pluies et des irrigations.
- **Diamètre moyen pondéral (Mean Weight Diameter) MWD** : A partir de la distribution granulométrique, nous avons calculé le diamètre moyen pondéral (MWD) il est donné par l'équation suivante :

$$MWD(mm) = \sum (F_n \cdot D_n) / n$$

Avec: F_n : proportion de l'échantillon résiduel de la fraction n et D_n : diamètre moyen de la taille de la classe.

2. La stratification des données

Nous sommes partis de l'idée selon laquelle la stabilité structurale dépend principalement des caractéristiques physico-chimiques. Une façon de procéder pour améliorer la qualité de prédiction consiste alors à tenir compte à la fois de ces deux aspects.

C'est d'ailleurs la raison pour laquelle la plupart des fonctions pédotransfert prennent en compte d'une part la composition granulométrique et la teneur en matière organique (nature de constituants) et d'autre part, la Conductivité électrique (la charge électrolytique). On procède de la sorte, les auteurs considèrent implicitement que ces deux ensembles de caractéristique sont indépendants et qu'ils interviennent de façon additive seul leur période relative variant en fonction de la stabilité structurale.

Ainsi pour aboutir à des valeurs de stabilité structurale appréciables, on recourt à la stratification tenant compte des classes de texture, de matière organique et de salinité

a. Stratification texturale :

Dès les premières études, des auteurs procèdent à une classification par texture. Ainsi Petersen et al (1968) établissent des FPT pour chaque classe de texture du triangle utilisé par L'USDA aux Etats-unis. Le choix de la texture s'explique par le fait que le constituant minéral (caractère physique) influence considérablement les propriétés physiques du sol à savoir la stabilité structurale. La classification texturale possède aussi l'avantage d'utiliser des critères qui sont souvent les régresseurs des FPT. Plusieurs manières de regrouper les échantillons à travers des diagrammes de classification. Le triangle textural américain USDA (1951) est divisé en 12 classes de texture. La stratification texturale des échantillons de sol sur ce triangle permet de regrouper les sols en classes suivant deux variantes. (Tableau 6)

Tableau 6 : Classes texturales des deux variantes utilisées.

Variante texturale	
1 ^{ère} variante	2 ^{ème} variante
G1 : sableux	G1 : argilo-limoneux.
G2 : limoneux	G2 : limoneux
G3 : argileux	G3 : argilo-limono-sableux
G4 : argilo-limoneux	

b. Stratification de la salinité :

La salinité du sol est un processus d'accumulation des sels à la surface du sol. Elle est exprimée par la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée et de l'extrait dilué eau/sol de 1/5 ds/ m (25C°). Dans notre travail, nous avons classé les sols selon aussi deux variantes. Une variante à 04 groupes et l'autre variante à 03 groupes selon la classification USSL, (1954) (tableau 7).

Tableau 7 : Classes de la salinité des deux variantes utilisées.

Variante de la salinité	
1 ^{ère} variante	2 ^{ème} variante
S1 : < 4 : non salé	S1:< 7 peu sale
S2 : 4 – 8 : moyennement salé	S2: 7 - 16 salé
S3 : 8 – 16 : salé	S3:>16 très salé
S4 : > 16 : très salé	

c. Stratification texturo-organique :

Concernant cette stratification, nous avons combiné les groupes par classes de textures et par classe de teneur en matière organique. Nous avons regroupé les échantillons selon des teneurs variables en matière organique appartenant à chaque groupe de texture. Les teneurs en matières organiques prises en considération sont illustrées dans le tableau 8.

Tableau 8 : Classes texturo-organique des deux variantes utilisées.

Variante de texturo-organique	
1 ^{ère} variante	2 ^{ème} variante
Pauvre	Pauvre
Moyen riche	Moyennement riche
Riche	Bien pourvu
Très riche	

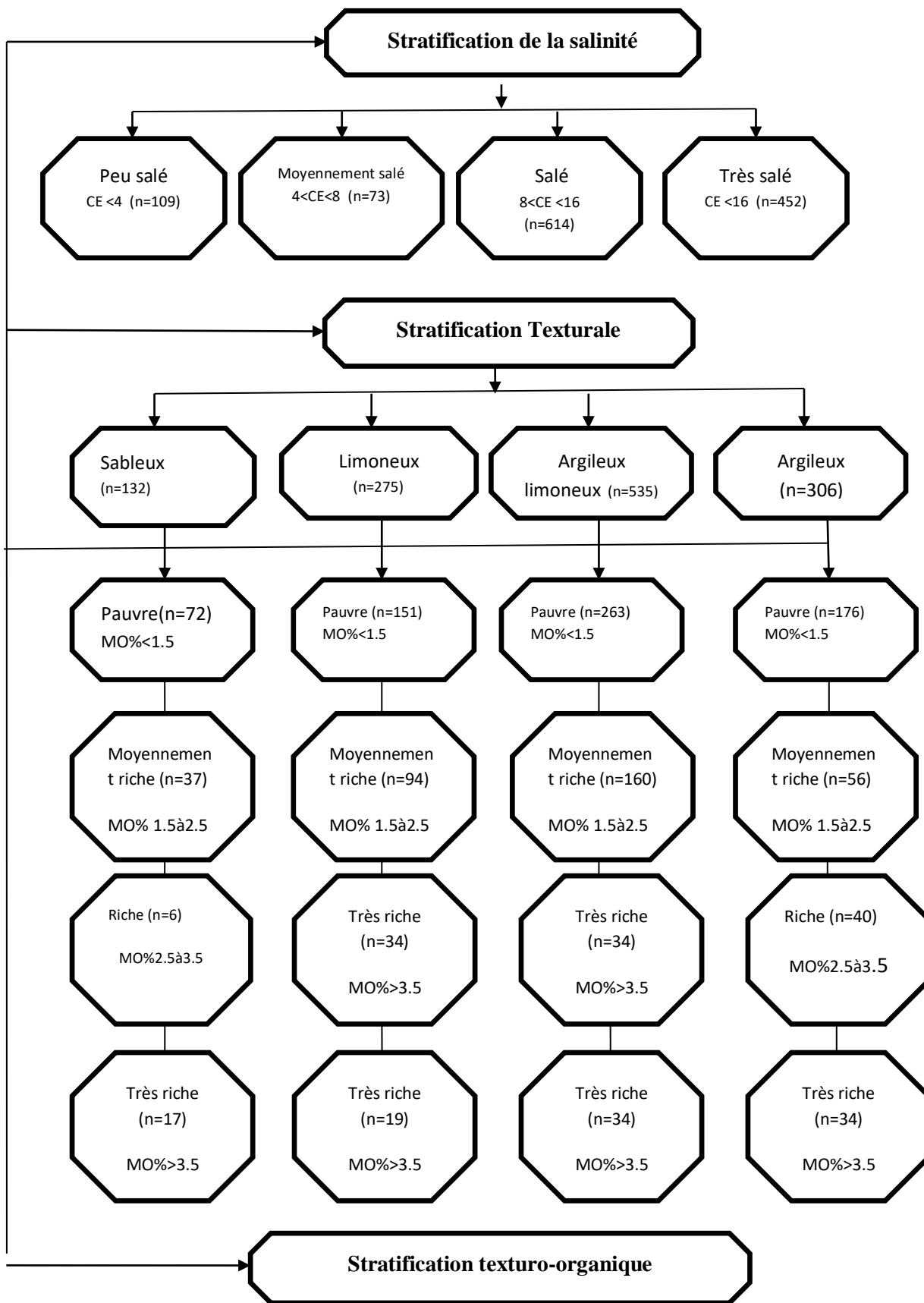


Figure 17 : Représentation schématique de la stratification des 4 classes à travers la base de données (n=1248)

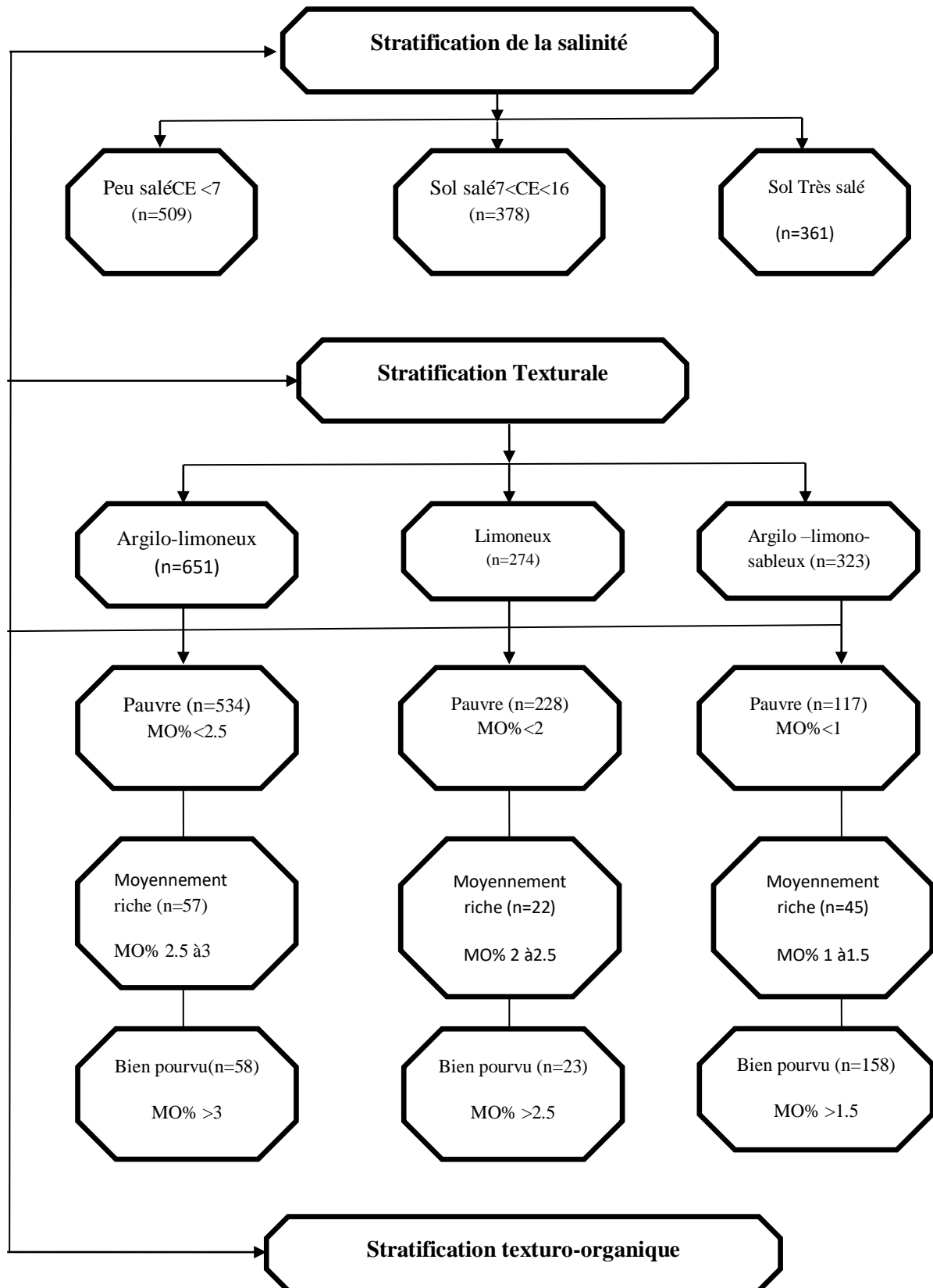


Figure 18 : Représentation schématique des stratifications des 3 classes à travers la base de données (n=1248).

3. Les fonctions de pédotransfert "FPT"

En 1987, Bouma et Van Lanen proposent l'expression "fonction de transfert" (transfer function) pour décrire la relation statistique qui lie des caractéristiques du sol (variable explicative) à savoir la composition granulométrique, la teneur en matière organique, le pH du sol et la conductivité électrique à une propriété ou à un comportement physique du sol (variable expliquée) telle que la stabilité structurale. L'établissement de ces fonctions nécessitent d'avoir une base de données suffisamment importante.

L'expression "fonction de pédotransfert", souligne le fait qu'il s'agisse d'une fonction de transfert de l'information concernant le sol.

Afin d'élaborer ces FPT, les résultats des analyses physico-chimique de chaque échantillon ont été utilisés.

4. Critère de la qualité d'estimation

De nombreuses études ont eu pour objectif l'établissement de FPT, un nombre beaucoup plus restreint a cherché à quantifier la précision des estimations et, a valider les FPT disponibles (Williams et al. 1992 ; Tietje et Tapkenhinrichs, 1993 ; Kern, 1995).

Plusieurs critères de validation ont été utilisé dans ce travail pour discuter la précision des prédictions effectuées à l'aide de FPT.

a. Coefficient de détermination

Le coefficient de détermination R^2 permet de donner une valeur à la qualité de l'ajustement du modèle fournit par les équations de régression. Si la valeur est voisine de 1, les régresseurs expliquent bien la variabilité du MWD et inversement si la valeur est proche de 0. Il est calculé à partir de :

$$R^2 = \frac{\sum_i^n (M_p - \bar{M})^2}{\sum (M - \bar{M})^2}$$

Avec : M , M_p représentent respectivement la valeur mesurée et la valeur prédite des MWD, \bar{M} est la moyenne des MWD mesurées, et n est le nombre total des échantillons.

b. Ecart type des résidus :

L'écart type des résidus σ représente la variabilité de l'erreur de prédiction de chacune des équations de régression, il permet donc d'appréhender la précision fournit par l'équation. Son calcul s'effectue de la manière suivante :

$$\partial = \sqrt{\frac{\sum_i^2 (M - \bar{M}_p)^2}{(n - q - 1)}}$$

Où : n est le nombre total des échantillons et q le nombre des variables explicatives.

c. Erreur moyenne de prédiction (EMP) :

Dans le but d'évaluer de façon globale l'efficacité des FPT sélectionnées, pour chaque FPT on calcul l'erreur moyenne de prédiction (MEP), cette erreur doit être proche de 0, indiquant une surestimation (signe positif) ou sous-estimation (signe négatif), elle est définie par :

$$MEP = \frac{1}{n} \sum_i^n (M_p - M)$$

=

Associe à la MEP, l'écart type de prédiction (SDP) est défini par :

$$SDP = \left\{ \frac{1}{n} \sum_i^n [(M_p - M) - MEP]^2 \right\}^{1/2}$$

La valeur de l'écart type de prédiction doit permettre de juger la précision des FPT pour dans l'estimation du MWD. Plus le SDP est faible, plus l'estimation est précise.

d. La somme des carrés des écarts résiduels :

La somme des carrés des écarts résiduels renseigne sur l'erreur totale produite en utilisant les équations de régression correspondantes à cette classification : Son objectif est d'identifier la classe qui produit l'erreur totale la plus faible elle est donnée par.

$$SDCER = [\sum (M_p - M)^2] / n$$

5. Ensembles de données pour les réseaux de neurones artificiels

Afin d'établir les réseaux de neurones artificiels (RNA), un ensemble de 183 échantillons de sol de surface ont été prélevés dans la plaine de Cheliff à une profondeur allant de 0 à 20 cm.

Les échantillons ont été répartis aléatoirement en trois groupes inégaux, 70% des échantillons ont été utilisés pour l'entraînement des réseaux neurones artificiels (RNA), 15% pour les tests et 15% pour valider les modèles.

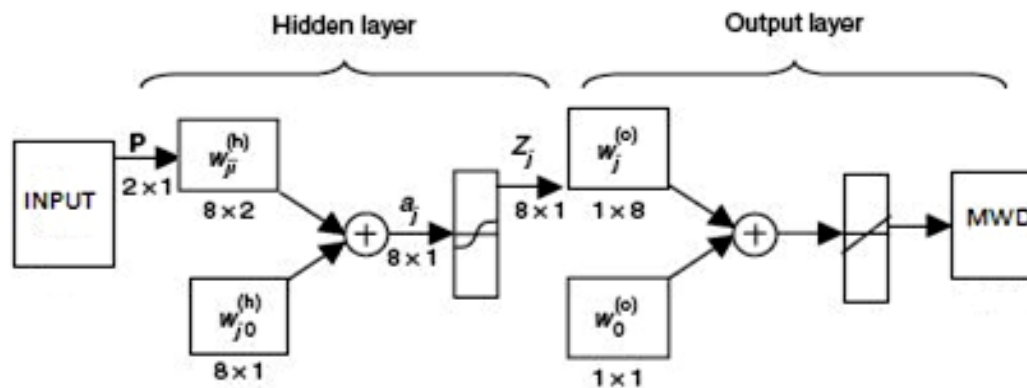


Figure 19 : Structure schématique d'un réseau de neurone (Amini *et al.*, 2005).

L'utilisation des réseaux de neurones artificiels (RNA) présente un avantage qu'aucun type de fonction spécifique n'est nécessaire. Dans cette étude, deux modèles ont été retenues, le modèle perceptron multicouche (MLP) et le modèle base radiale (RBF).

Les paramètres statistiques utilisés pour évaluer les performances des réseaux de neurones (RNA) étaient le coefficient de détermination (R^2) et l'erreur standard moyenne (MSE).

$$R^2 = \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

6. Modélisation géostatistique

L'approche géostatistique constitue une seconde voie de caractérisation statistique de la variabilité des sols (Wackernagel.1998). Elle considère que la distribution spatiale d'une variable, supposé être une réalisation d'un processus aléatoire susceptible de présenter une structure s'exprimant par l'existence de corrélations spatiales entre observation.

Ces corrélations spatiales peuvent être mises à profit pour prédire à partir de sites de mesure les propriétés du sol dans des sites non échantillonnés.

a. La géostatistique en tant que méthode de cartographie de la stabilité structurale :

Les techniques géostatistiques procèdent en deux étapes :

- L'analyse de la structure spatiale de la variable étudiée grâce au variogramme
- L'emploi de la technique de prédiction spatiale par le krigeage.

i. Le Variogramme :

Le Variogramme est une étape indispensable en géostatistique. Il permet de renseigner sur le meilleur modèle décrivant la variabilité spatiale de la stabilité structurale, les paramètres de ce variogramme sont par la suite utilisés pour établir la carte du MWD par krigeage.

ii. Le krigeage :

L'estimation spatiale de la stabilité structurale a été faite par krigeage ordinaire, le krigeage permet l'estimation d'une propriété Z en un point quelconque de l'espace de coordonnées x_0 selon une combinaison linéaire des observations faites en des points voisins x_i .

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

où n est le nombre de points x_i
et λ_i est le poids affecté à chaque voisin

Les paramètres de la structure spatiale de la variable à Krieger sont déterminés à partir de l'ajustement du variogramme à un modèle théorique donné (sphérique, exponentiel, Gaussien...) dans le cadre de l'hypothèse intrinsèque

Logiciels utilisés :

- Le logiciel XLSTAT, pour le développement des modèles PTF
- Le logiciel STATISTICA pour les réseaux de neurone
- Le logiciel ARCGIS pour la Modélisation géostatistique

Tableau 9 : Résultats des analyses physico-chimiques des 183 échantillons du sol prélevés dans le Bas-Chélif.

ECH	MWD	pH	CaCO ₃	A	L	S	MO	CE
1	1,42	7,86	13,63	25,92	49,27	24,81	2,03	9,31
2	1,19	7,69	13,63	33,78	41,99	23,76	1,56	7,85
3	0,60	8,01	20,45	34,00	41,67	24,33	1,67	4,18
4	0,69	8,03	15,68	26,21	44,68	29,11	1,88	4,72
5	0,89	7,79	21,81	28,51	43,02	28,47	1,35	5,98
6	1,09	7,82	30,00	28,07	41,52	30,41	1,77	7,26
7	1,09	7,74	24,54	28,91	42,56	28,53	1,35	7,24
8	0,84	8,28	21,81	30,22	43,15	26,63	2,09	5,65
9	1,22	7,72	21,81	29,43	45,69	24,88	2,09	8,04
10	0,80	8,16	17,72	28,37	44,81	26,82	2,41	5,43
11	0,98	8,18	18,40	27,73	47,26	25,37	2,84	6,54
12	0,50	8,78	13,63	27,30	48,44	24,26	1,04	3,53
13	0,93	8,03	13,63	27,66	48,68	23,66	1,77	6,21
14	0,58	8,54	10,90	27,99	48,84	23,17	1,89	4,03
15	0,66	8,27	27,95	31,40	41,08	27,47	2,30	4,54
16	1,24	7,71	19,09	23,79	44,17	32,04	2,94	8,18
17	0,86	8,10	18,40	25,19	42,94	31,87	2,94	5,79
18	0,83	7,81	19,08	23,16	42,68	34,65	1,98	5,60
19	0,55	8,07	21,81	24,66	39,88	35,46	1,17	3,84
20	0,79	8,27	19,09	30,50	41,87	27,46	2,38	5,35
21	0,88	7,78	15,68	25,34	56,80	17,86	2,38	5,92
22	1,05	8,07	17,40	34,00	43,34	22,66	2,83	6,98
23	0,87	8,48	19,09	27,52	51,81	20,67	2,38	5,85
24	1,30	7,74	14,31	30,83	46,02	23,15	2,20	8,55
25	0,93	8,13	19,77	27,33	48,67	24,00	2,94	6,23
26	0,82	8,05	17,72	23,21	55,32	21,47	3,04	5,54
27	0,10	8,37	14,31	42,20	35,18	22,62	2,20	1,00
28	1,30	8,05	15,00	34,03	48,41	17,56	1,46	8,55
29	1,03	8,26	15,00	36,62	57,32	6,07	2,30	6,85
30	1,05	8,02	15,00	39,41	46,23	14,36	2,51	6,98
31	1,11	8,11	17,72	25,07	52,06	22,87	1,56	7,36
32	1,07	8,15	7,49	37,06	54,75	8,46	3,68	7,09
33	0,71	8,21	17,04	21,48	53,52	25,00	2,94	4,87
34	1,40	8,17	16,36	32,26	52,71	15,03	3,92	9,15
35	1,03	7,95	15,00	35,63	51,03	13,34	1,98	6,85
36	0,85	8,22	8,18	33,39	45,22	21,39	2,83	5,73
37	0,98	8,01	18,40	37,22	54,56	8,22	2,38	6,52
38	1,05	7,65	17,72	37,32	54,46	8,22	2,20	6,97
39	1,06	8,25	19,77	27,00	40,00	33,00	2,94	7,07
40	0,92	8,28	15,68	22,33	49,01	28,66	3,04	6,19
41	0,53	8,17	15,68	46,00	34,00	20,00	2,20	3,70
42	0,69	8,14	22,49	24,00	46,34	29,66	1,46	4,70
43	0,72	8,25	19,08	25,66	49,68	24,66	2,30	4,94
44	0,78	8,45	19,77	21,38	59,57	19,05	2,51	5,30
45	1,14	7,82	22,49	29,40	42,82	27,78	1,56	7,56
46	0,50	8,58	21,81	30,50	40,86	28,83	1,59	3,52
47	1,13	7,82	15,68	29,40	42,82	27,78	2,94	7,46
48	1,10	7,62	15,00	24,58	44,13	31,29	3,76	7,33
49	1,13	7,65	15,00	28,24	48,25	23,51	1,98	7,46

50	1,15	7,84	12,95	29,83	47,40	22,75	2,94	7,59
51	0,85	8,03	14,31	21,55	59,38	19,07	2,45	5,76
52	0,90	8,20	17,72	21,55	59,38	19,07	2,62	6,05
53	0,95	7,91	14,99	21,55	59,38	19,07	2,51	6,33
54	1,14	7,84	19,09	25,52	44,70	29,78	3,04	7,53
55	1,10	8,12	14,99	26,00	48,91	25,09	3,04	7,31
56	1,08	7,93	17,72	25,38	39,01	35,61	2,94	7,19
57	1,08	7,66	17,72	25,38	39,01	35,61	2,09	7,18
58	0,72	7,88	23,18	22,88	48,57	28,55	1,77	4,93
59	0,65	8,20	19,77	24,66	50,36	24,98	2,09	4,49
60	0,81	8,07	19,09	24,66	50,36	24,98	2,30	5,49
61	0,54	7,79	20,45	41,76	35,15	23,09	2,84	3,79
62	1,25	7,73	21,81	25,38	39,01	35,61	2,83	8,23
63	0,42	7,42	21,13	41,76	35,15	23,09	3,46	3,03
64	0,97	7,81	20,45	26,31	55,86	17,83	3,46	6,47
65	1,60	7,58	20,45	40,06	44,98	14,96	3,46	10,45
66	0,88	7,91	17,72	25,38	39,01	35,61	1,56	5,92
67	1,18	7,95	16,36	32,62	51,13	16,25	2,94	7,80
68	1,09	7,58	17,72	22,20	85,49	4,31	2,94	7,24
69	0,95	7,60	19,09	13,97	70,08	23,31	2,62	6,34
70	0,92	7,68	16,36	11,00	57,27	41,05	2,62	6,14
71	0,95	7,62	17,72	20,01	33,71	52,64	2,62	6,37
72	0,69	7,59	18,40	34,00	56,70	89,74	2,94	4,71
73	1,09	7,64	17,72	26,66	63,79	25,29	2,94	7,26
74	1,48	7,83	19,09	46,99	62,45	45,98	2,94	9,67
75	0,79	7,94	20,45	29,54	41,91	28,92	1,05	5,37
76	1,12	7,68	18,40	19,33	77,85	12,81	1,46	7,41
77	1,25	7,68	17,72	16,24	43,55	39,61	2,30	8,27
78	0,95	7,70	17,04	17,35	74,31	8,33	2,94	6,37
79	0,96	8,24	13,63	10,20	34,22	55,58	2,94	6,41
80	1,15	7,59	17,72	21,40	83,23	15,24	1,98	7,59
81	0,99	7,85	17,04	12,61	80,70	6,69	0,99	6,61
82	1,03	7,75	15,68	17,35	80,69	1,96	2,38	6,89
83	1,51	7,84	17,07	12,17	83,22	4,60	2,38	9,87
84	1,26	8,23	18,40	34,79	61,16	4,23	2,83	8,28
85	0,74	8,21	17,72	18,28	52,95	28,81	2,38	5,06
86	0,70	8,20	17,04	20,59	48,33	31,08	2,20	4,79
87	1,30	8,01	13,63	41,30	44,84	2,93	2,94	8,55
88	1,47	7,61	19,08	34,70	18,35	64,62	3,04	9,60
89	1,05	7,70	16,36	15,93	82,85	1,18	2,20	6,97
90	0,96	7,73	13,63	14,26	52,49	61,84	1,46	6,44
91	0,93	8,45	15,68	20,17	62,26	11,57	2,30	6,20
92	1,29	7,71	19,77	34,48	61,10	4,41	2,51	8,52
93	1,00	7,94	19,09	16,00	62,27	25,64	1,56	6,65
94	0,99	7,51	14,31	17,48	65,91	16,61	3,68	6,61
95	0,71	7,72	21,81	43,40	36,31	8,71	2,94	4,85
96	0,85	7,84	12,27	18,45	77,64	3,90	2,94	5,75
97	1,00	7,83	16,36	12,47	55,24	32,28	1,22	6,65
98	1,10	7,63	16,36	24,79	66,68	8,53	2,03	7,29
99	1,31	7,71	17,72	29,10	35,02	49,28	1,56	8,62
100	1,52	7,82	21,81	13,70	57,29	2,85	1,67	9,93
101	1,75	7,74	21,81	21,38	73,87	4,74	1,88	11,39
102	1,16	7,65	20,45	11,00	68,71	3,32	1,35	7,69

103	1,04	7,78	17,04	19,77	27,12	53,21	1,77	6,94
104	1,21	7,48	17,04	32,80	61,84	23,83	1,35	7,97
105	1,31	7,61	13,63	24,16	50,47	25,37	2,09	8,63
106	1,32	8,03	15,68	12,20	78,71	14,00	2,09	8,65
107	1,14	8,41	15,68	12,80	59,52	34,55	2,41	7,56
108	1,26	7,75	16,36	29,33	53,82	16,85	2,84	8,33
109	1,18	7,66	19,77	37,98	14,32	47,71	1,67	7,81
110	0,72	7,81	18,40	12,50	49,15	43,01	1,77	4,93
111	0,94	7,62	18,40	21,50	78,54	12,14	3,36	6,28
112	1,30	8,03	21,81	17,62	33,91	48,47	2,30	8,57
113	1,03	8,34	20,45	19,16	58,76	22,08	2,94	6,83
114	1,31	7,60	19,77	36,93	42,31	20,76	2,94	8,60
115	1,59	7,60	14,31	26,71	39,01	34,28	1,98	10,35
116	0,95	7,74	14,31	26,16	36,82	37,02	1,10	6,36
117	1,31	8,12	14,31	29,70	61,00	9,30	2,38	8,63
118	1,21	7,66	15,00	34,00	35,00	31,00	2,38	7,96
119	1,10	7,83	17,04	27,70	52,30	20,00	2,83	7,32
120	1,24	7,64	16,36	31,70	37,70	30,60	2,38	8,16
121	1,20	7,70	19,08	30,70	24,40	44,90	2,20	7,94
122	1,81	7,58	15,68	25,70	39,00	35,30	2,94	11,77
123	1,23	7,67	21,81	27,70	55,00	17,30	3,04	8,09
124	1,60	7,67	16,36	34,00	39,10	26,90	2,20	10,45
125	1,59	7,89	16,36	44,00	40,40	15,60	1,46	10,35
126	1,28	7,73	14,31	29,37	43,81	26,82	2,30	8,44
127	1,83	7,96	12,95	39,40	32,13	35,47	2,51	11,91
128	1,23	7,61	15,68	29,37	43,81	26,82	1,56	8,14
129	1,06	8,15	19,09	26,19	41,94	31,87	3,68	7,07
130	1,25	7,77	19,77	28,66	47,68	23,66	2,94	8,22
131	1,65	7,73	15,68	31,83	45,02	23,15	4,02	10,72
132	0,86	8,07	14,31	32,38	48,76	18,86	1,98	5,81
133	2,28	8,13	15,00	51,60	48,76	18,86	2,94	14,70
134	0,96	7,93	15,68	32,38	48,76	18,86	2,45	6,44
135	1,24	7,72	19,09	27,22	43,68	29,10	2,62	8,21
136	1,67	7,91	18,40	26,92	48,27	24,81	2,51	10,86
137	1,01	8,04	18,40	25,66	48,88	25,46	3,04	6,75
138	1,49	7,70	18,40	24,16	41,68	34,16	3,04	9,76
139	1,20	7,81	21,81	29,33	42,01	28,66	2,94	7,92
140	0,69	8,15	20,45	30,86	44,48	24,66	2,09	4,74
141	0,97	7,82	20,45	30,86	44,48	24,66	1,77	6,51
142	1,03	7,52	16,36	48,40	34,18	22,62	2,09	6,88
143	1,33	8,03	14,99	25,66	48,88	25,46	2,30	8,75
144	0,08	8,26	20,45	43,20	34,18	22,62	2,84	0,89
145	0,81	8,28	23,86	33,34	48,89	17,77	2,83	5,50
146	1,05	8,34	12,95	40,41	45,23	14,36	3,46	6,97
147	0,61	8,54	9,54	26,16	48,38	25,46	2,43	4,25
148	0,69	8,49	16,36	33,34	48,89	17,77	2,22	4,74
149	0,57	8,24	15,68	33,22	44,12	22,66	1,56	3,98
150	0,84	8,51	21,81	28,52	50,81	20,67	2,94	5,67
151	0,93	8,51	21,81	31,83	45,02	23,15	2,94	6,23
152	1,34	8,21	38,86	35,33	39,67	25,00	2,94	8,78
153	0,71	8,24	21,13	50,90	54,32	21,47	2,62	4,87
154	0,51	8,02	9,54	43,10	34,18	22,72	2,62	3,59
155	1,53	7,90	24,54	35,03	47,41	17,56	2,62	10,03

156	1,37	7,92	24,54	37,62	47,80	14,58	2,94	9,02
157	1,31	8,01	15,00	40,41	45,23	14,36	2,94	8,64
158	0,72	8,22	21,81	26,07	51,06	22,87	2,94	4,90
159	0,69	8,27	21,13	38,06	53,48	8,46	0,61	4,72
160	0,74	7,87	19,76	22,48	52,52	25,00	1,46	5,05
161	0,88	7,97	20,45	33,26	51,71	15,03	2,94	5,95
162	0,97	8,45	23,18	36,63	50,48	12,89	2,94	6,47
163	0,66	8,18	19,77	34,39	44,22	21,39	1,22	4,51
164	1,55	7,68	19,09	38,22	53,56	8,22	2,03	10,14
165	0,67	7,86	6,81	38,22	53,56	8,22	1,56	4,61
166	1,24	7,90	21,13	28,00	39,00	33,00	1,67	8,16
167	1,19	8,83	19,77	29,33	42,01	28,66	1,43	7,87
168	0,60	8,07	20,45	30,88	43,06	26,06	1,35	4,13
169	0,77	8,03	21,81	25,00	45,34	29,66	1,77	5,26
170	0,56	8,18	21,81	25,00	45,34	29,66	1,35	3,92
171	0,58	8,32	11,58	24,16	41,68	34,16	2,09	4,03
172	0,70	8,03	19,09	28,30	47,44	24,26	2,09	4,77
173	0,82	8,03	21,13	28,66	47,68	23,66	2,41	5,56
174	0,91	8,10	21,81	28,99	47,84	23,17	2,84	6,09
175	0,61	8,04	10,90	32,40	32,13	35,47	1,67	4,22
176	0,55	8,05	8,18	24,79	43,17	32,04	1,77	3,82
177	0,91	8,06	12,95	26,19	41,94	31,87	3,36	6,12
178	0,66	7,90	8,18	24,16	41,68	34,16	2,30	4,55
179	0,84	8,16	12,27	25,66	48,88	25,46	2,94	5,64
180	0,94	8,21	20,45	35,50	37,04	27,46	2,94	6,32
181	0,62	8,14	9,54	30,43	44,69	24,88	1,98	4,29
182	0,53	8,64	17,72	29,37	43,81	26,82	0,61	3,71
183	1,03	8,11	21,81	28,73	45,90	25,37	2,38	6,83

CHAPITRE III
RÉSULTATS ET DISCUSSION

Chapitre III : Résultats et discussion

1 Données utilisées

Un ensemble de 1248 échantillons de sols superficiels (0–20 cm) provenant de différentes études nationales et internationales parmi lesquels 352 données provenant du nord de l'Algérie et 896 données international collectées à partir d'études publiées antérieurement ont été utilisées dans cette étude pour dériver des fonctions de pédotransfert (FPT) en utilisant des régressions linéaires simple et multiples. Ces données étaient caractérisées par une grande hétérogénéité en termes d'origine des échantillons et des caractéristiques physico-chimiques.

Notre principal objectif est l'estimation de la stabilité des agrégats dans la plaine du bas Cheliff, la considération des données internationales en plus des données nationales, réside dans le fait qu'ils augmentent à la fois le volume de données et la variation des propriétés du sol.

7. Caractéristique statistique des données recueillies

Les statistiques générales des paramètres physico-chimiques de notre base de données sont résumées dans le tableau 10. Ils sont caractérisés généralement par un pH basique de 7.32, avec une capacité d'échange cationique modérée qui représente environ 15meq/100g selon l'échelle de classification de (Martin et Nolin, 1991).

Les résultats montrent des sols moyennement riches en matière organique avec des teneurs qui varient entre 0.5% et 1.5%. La conductivité électrique de l'extrait pâte saturée est de 9.9 dS/m, ce qui témoigne de sols moyennement salés. Les sols sont généralement de texture argilo- limoneuse. La majorité des paramètres analysés présentent des écarts type élevées ce qui témoigne d'une grande variabilité à l'exception du pH, MO et MWD.

Le diamètre moyen pondéral (MWD) (Mean Wight diamètre) est de 1.04 mm, cette valeur permet de classer les sols selon l'échelle de Le Bissonais *et al.*, (1995) dans la catégorie des sols à stabilité moyenne.

Tableau 10 : Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Q1	Q3
A	1.68	97.10	32.43	16.64	20.70	40.45
L	0.00	91.70	42.31	19.07	27.25	57.95
S	0.00	92.00	25.47	21.05	7.50	35.47
CE	0.07	59.30	9.69	7.03	11.17	16.26
MO	0.06	9.50	1.52	1.15	0.63	2.20
pH	3.40	9.10	7.32	0.68	7.12	7.87
CaCO ₃	0.00	46.60	7.81	10.21	0.00	17.42
CEC _m	0.67	73.50	15.14	8.46	9.63	18.75
CEC _e	0.61	86.14	15.79	9.33	10.17	19.61
MWD	0.13	4.66	1.04	0.50	0.72	1.29

8. Relation entre stabilité structurale (MWD) et paramètres physico-chimiques

a. Coefficient de corrélation

Les coefficients de corrélation linaires entre la stabilité structurale et les paramètres physico-chimiques sont très variables. Selon la matrice de corrélation (Tableau 11), plusieurs niveaux apparaissent :

- Une corrélation hautement significative ($P < 0.01$) entre le MWD et la capacité d'échange cationique (Metson) et la capacité d'échange cationique effective.
- Une corrélation significative ($P < 0.05$) entre MWD et fraction argileuse ainsi que MWD et matière organique. Aussi entre CEC et teneur en argile et teneur en matière organique, qui fait référence en science du sol à la notion de complexe argilo humique (SAIDI *et al* ; 2008).
- Une corrélation faible entre le reste des paramètres

Tableau 11 : Matrice de corrélation entre variables physico-chimiques.

	A	L	S	PH	CACO3	MO	CE	MWD	CEC m	CEC e
A	1.000	*	**	NS	NS	NS	NS	*	**	**
L	-0.277	1.000	**	NS	NS	NS	NS	NS	*	*
S	-0.493	-0.646	1.000	NS	NS	NS	NS	*	*	*
PH	0.060	0.091	-0.139	1.000	*	NS	*	*	NS	*
CACO3	0.017	0.009	0.000	0.448	1.000	*	**	NS	NS	NS
MO	0.002	0.014	0.015	0.115	0.446	1.000	**	*	*	*
CE	0.032	-0.034	-0.010	-0.404	-0.682	-0.652	1.000	*	NS	NS
MWD	0.492	-0.143	-0.197	-0.236	-0.038	0.242	0.112	1.000	**	**
CEC m	0.791	-0.277	-0.332	0.008	0.073	0.229	-0.049	0.715	1.000	**
CEC e	0.677	-0.276	-0.236	-0.218	0.058	0.213	-0.089	0.509	0.727	1.000

Les valeurs en gras représentent les coefficients de corrélation significative, * (P < 0.05) et ** (P < 0.01).

9. Analyse en composantes principales

Les résultats de l'ACP sont influencés par les différences d'unités des variables (Philippeau, 1986), le même poids est donc donné aux différentes variables en travaillant sur des données centrées et réduites (normées).

L'analyse en composante principale a montré que les trois premiers axes expliquent 65.5% de l'information ce qui est largement suffisant pour expliquer les relations entre les différents paramètres.

Le premier axe explique à lui seule 30,72% de l'information (Figure 20), cet axe est fortement positivement corrélé à CEC_m, CEC_{c,A} et a un degré moindre le MWD ; et il est négativement corrélée au sable limon ce qui signifie que la stabilité structurale est meilleure dans les sols à forte capacité d'échange cationique, et dans les sols à forte teneur en argile et en matière organique et faible dans les sols sableux et limoneux.

Le deuxième axe explique 20,85% de l'information, cet axe est positivement corrélé au pH et CaCO₃ ce qui est logique car le pH est lié à la teneur en CaCO₃, cependant cet axe est négativement corrélé à la conductivité électrique.

Le troisième axe explique 17.69% de variabilité (Figure 21), cet axe est positivement corrélé au sable et à la matière organique et négativement corrélée au limon.

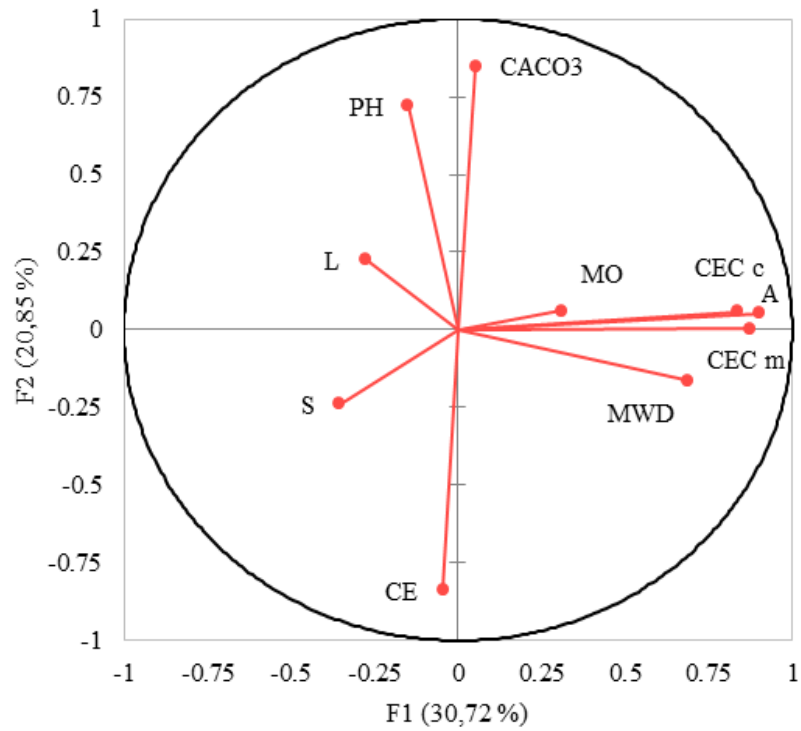


Figure 20 : Analyse en composantes principales, projection des variables sur le plan 1×2

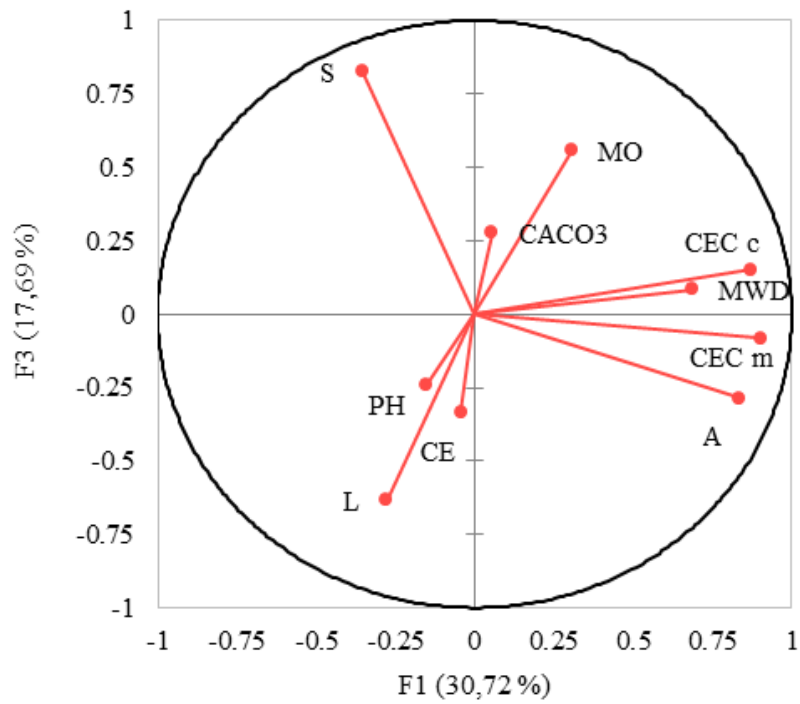


Figure 21 :Analyse en composantes principales, projection des variables sur le plan 1×3

Tableau 12 : valeurs propre et pourcentages des axes.

Numéro	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
Valeur propre	3,07	2,08	1,76	1,37	0,66	0,32	0,28	0,20	0,17	0,03
Variabilité (%)	30,71	20,84	17,69	13,79	6,68	3,29	2,83	2,05	1,72	0,36
% cumulé	30,71	51,56	69,25	83,05	89,73	93,03	95,86	97,92	99,64	100,00

Le tableau (12) montre que les trois premiers axes factoriels expriment **69,25** % de la variance totale dont 30,71 % pour le premier, 20,84 % pour le second et 17,69 % pour le troisième axe. Cette variance devrait suffire pour fournir les renseignements nécessaires sur la corrélation entre les caractéristiques physicochimique et la stabilité structurale (MWD) dans la base des données.

Le pourcentage cumulé de la variance exprimée par les deux premiers facteurs est de 30,71 % et les regroupements des variables dans le plan F1-F2 rend compte de façon satisfaisante de leur structure. Notre analyse a été poussée jusqu'aux trois premiers axes qui expriment une information totale de **69,25** %. Au-delà du troisième axe, l'information expliquée devient assez faible pour être prise en considération.

Les variables de sol qui participent fortement à l'axe 1 sont les variables qui ont les valeurs des coordonnées les plus élevées en valeurs absolue ; cette composante principale est l'axe de la texture qui est influencé en ordre croissante par la teneur en Argile (A), Matière organique (MO) et en ordre décroissante par la teneur en Limon (L), le calcaire total (CaCO_3).

Pour le deuxième axe, les variables qui participent le plus à sa formation sont respectivement le pH, le calcaire total (CaCO_3), négativement corrélé la teneur en Sable (S).

Le troisième axe est expliqué par la teneur en Matière organique (MO). Cet axe explique 17,69 % seulement de la variance totale et reste très faible pour le prendre en considération dans un plan à deux dimensions.

10. Démarche générale

La méthodologie adoptée est basée principalement sur le lien qui existe entre la stabilité structurale et les caractéristiques physico-chimiques. La démarche consiste à établir des liens par groupes d'échantillons de sols. Ces derniers sont regroupés selon la composition granulométrique, la teneur en matière organique et la conductivité électrique. Ainsi, afin de développer des modèles destinés à l'estimation de la stabilité structurale avec une meilleure précision, la stratification appliquée prend en considération la texture, la salinité et la teneur en matière organique. Deux variantes de stratification ont été appliquées. La première variante est constituée de 4 classes de sols chacune composée de sols ayant les mêmes tendances. La deuxième variante regroupe 3 classes de sols selon la tendance faible, moyenne et élevée.

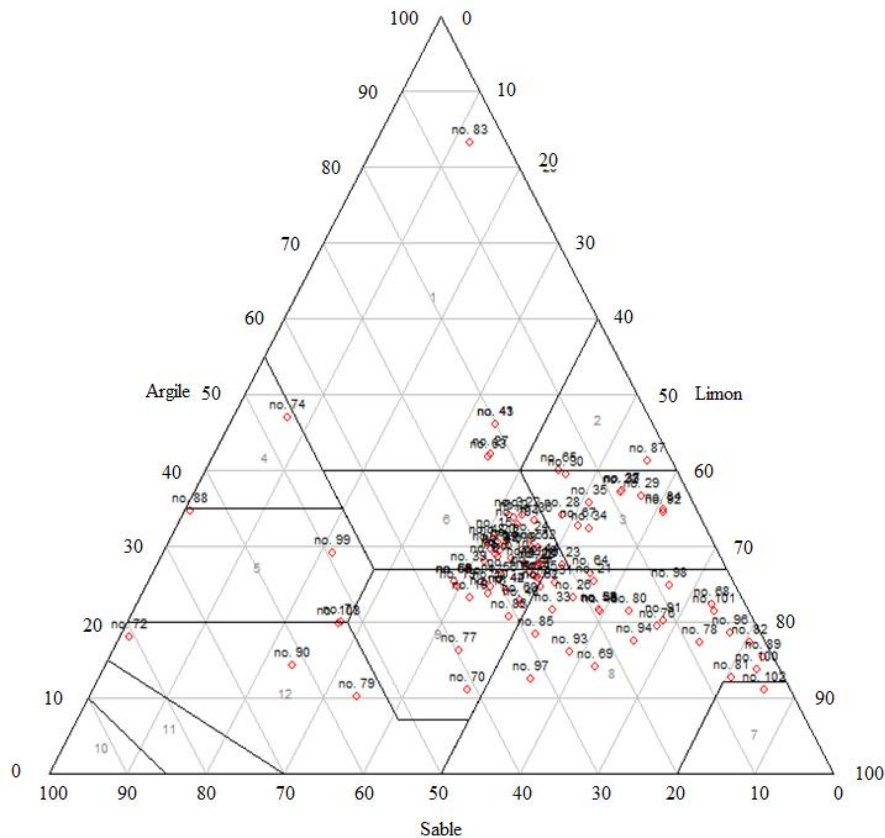
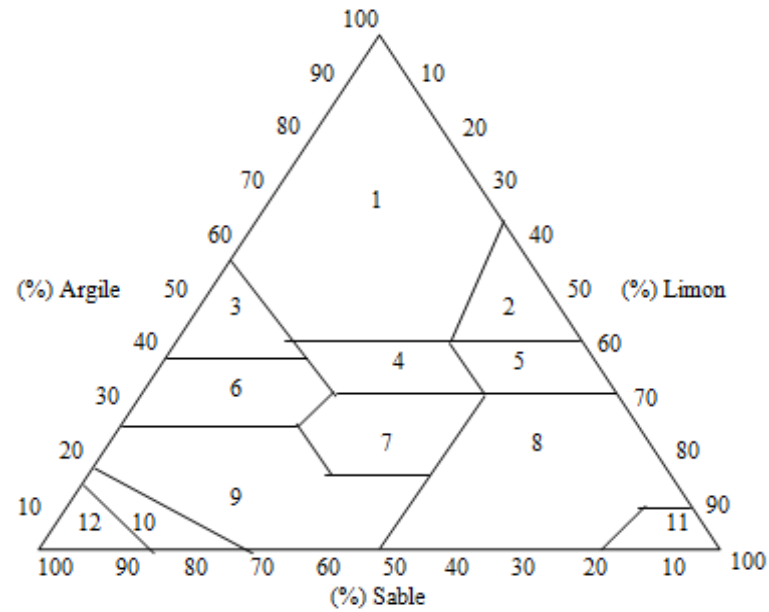
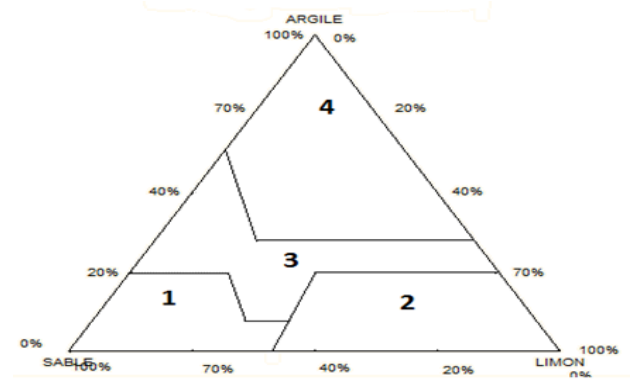


Figure 22 : Distribution des échantillons du sol dans le triangle textural USDA (1951)



Légende : Classes texturale

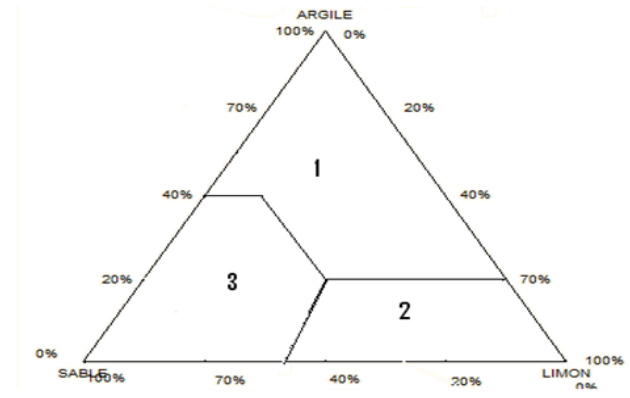
1 Argile- 2 Argile limoneuse-3 Argile sableuse-4 Limon argileux-
 5 Limon argileux fm-6 Limon argilo-sableux-7 Limon-8 Limon fm -9
 Limon sableux - 10 Sable limoneux - 11 Limon très fin -12 Sable



légende : classes texturale

1 Sableux - 2 Limoneux
 3 Argilo_limoneux - 4 Argileux

1ère variante



légende : classes texturale

1 Argileux - 2 Limoneux
 3 Argilo-limono-sableux

2eme variante

Figure 23 : Triangle texturale USDA (1951) et stratification du triangle selon les deux variantes.

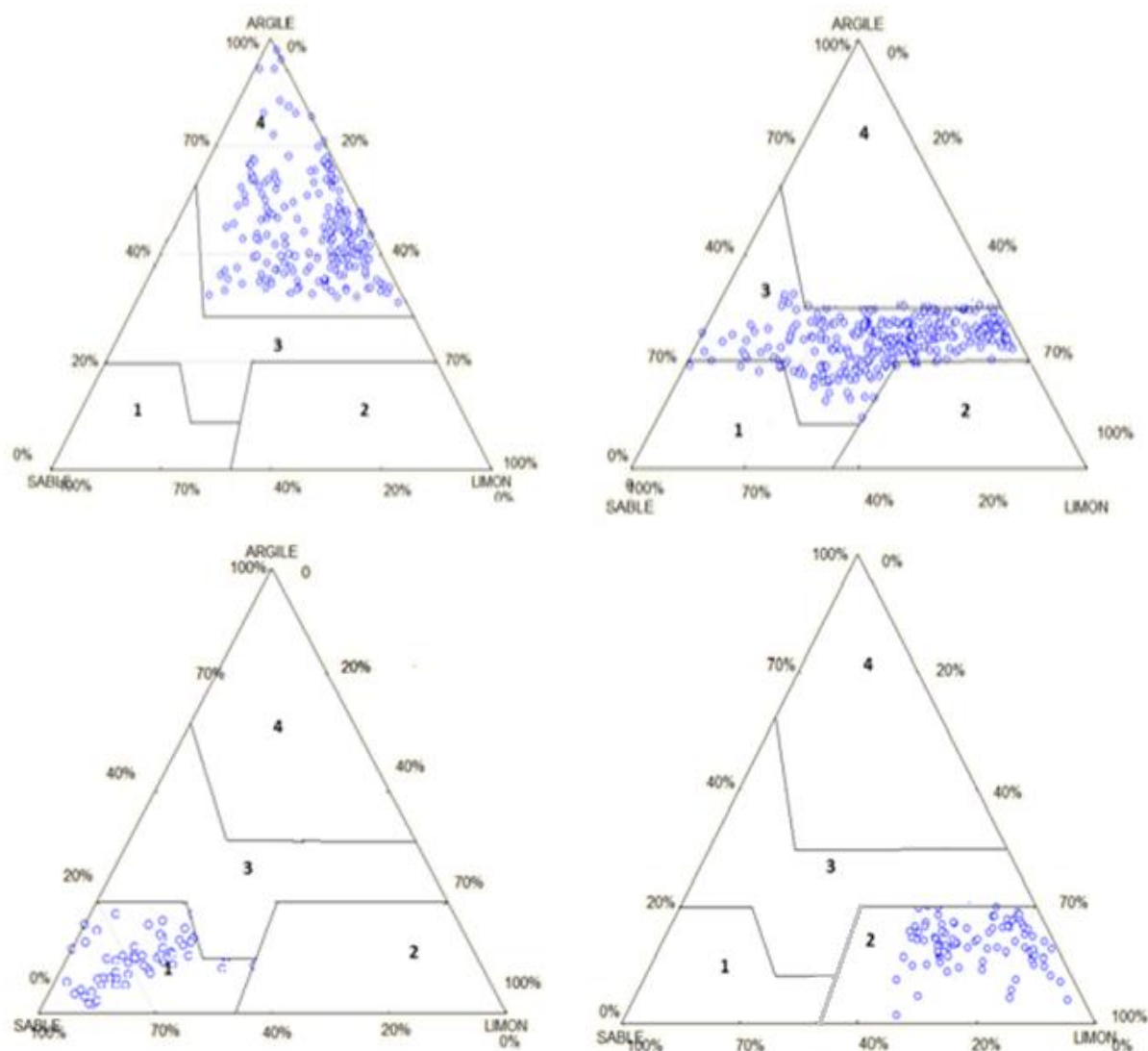


Figure 24 : Distribution des échantillons selon le triangle USDA (1951)

11. Effet de la stratification dans la corrélation entre les caractéristiques physico-chimiques et la stabilité structurale

A travers la matrice de corrélation, il a été constaté qu'il existe différentes corrélations pour chaque groupe de stratification. Certains groupes ont montrés de très forts coefficients de corrélation et d'autres ont montrés de faibles corrélations.

Les résultats de la 1^{ère} variante (Tableau 13) ont montrés que les MWD issues a travers la stratification de la salinité ont montré que les corrélations les plus significatives sont liée à la capacité d'échange cationique. Ces résultats soulignent encore l'importance de la CEC sur les propriétés physiques du sol à savoir la stabilité structurale, cette constatation rejoint celle de Saidi *et al.*, 2008. La même tendance montrée par la CEC pour la salinité se retrouve au niveau des restes des stratifications.

La fraction argileuse a montré une corrélation significative dans les groupes de stratifications texture-salinité, ce qui signifie que la teneur en l'argile agit fortement la stabilité structurale. Les résultats montrent aussi que la matière organique est le principal facteur influençant la stabilité structurale quel que soit le type de stratification. Cette forte corrélation MO-MWD est surtout bien illustrée dans le groupe à texture limoneuse, la même constatation a été soulignée par Le Bissonnais *et al.*, 2002.

L'effet de la teneur en CaCO₃ est positif lorsque la texture est argileuse, alors que son effet est inverse lorsque la texture est sableuse, car l'action du CaCO₃ n'est significative que lorsque la teneur en argile est suffisante. Selon Abiven (2004), l'effet du calcaire est principalement dû à l'effet de l'ion Ca²⁺

Aussi quel que soit la stratification, la conductivité électrique, le pH et le limon semblent avoir un effet remarquable sur la stabilité structurale, à l'exception des MWD des groupes sableux qui montrent de faible corrélation.

Concernant la 2^{ème} variante les matrices de corrélations (Tableau 14) montrent que les coefficients de corrélation sont élevés pour certain groupe est faibles pour les autres dans le groupe de stratification texturo-organique et salinité.

Les corrélations les plus significatives avec le MWD sont la teneur en argile, la capacité d'échange cationique et la matière organique.

Inversement, le calcaire, le limon et la conductivité électrique présentent une corrélation non significative avec le MWD.

Tableau 13 : Matrice de corrélation des différentes stratifications de la 1^{ère} variante

Groupe de sol	MWD																							
	Stratification de la salinité				Stratification texturale				Stratification texturo-organique															
	SI	S2	S3	S4	G1	G2	G3	G4	Texture sableux				Texture limoneux				Texture argileux				Texture argilo-limoneux			
									G1M1	G1M2	G1M3	G1M4	G2M1	G2M2	G2M3	G2M4	G3M1	G3M2	G3M3	G3M4	G4M1	G4M2	G4M3	G4M4
CE	0,35	0,17	0,03	-0,1	-0,6	-0,2	0,25	0,35	-0,47	-0,64	0,24	0,89	-0,02	0,06	0,01	0,75	0,37	0,49	0,3	-0,08	0,37	0,82	0,58	-0,02
pH	-0,3	-0,2	0,26	-0,1	0,03	-0,4	-0,4	-0,3	0,1	0,2	0,11	0,1	0	-0,2	-0,6	-0,84	-0,43	-0,28	-0,3	-0,15	-0,25	-0,64	-0,34	0,1
A	0,05	0,35	0,93	0,95	0,49	-0	0,12	0,43	0,63	0,6	-0,15	0,57	0,3	-0,17	-0,39	0,2	0,23	0,05	0,17	0,16	0,43	0,56	0,19	0
S	0,08	0,01	-0,5	-0,5	0,42	0,13	-0,1	0,43	-0,56	-0,31	-0,53	-0,25	-0,28	-0,13	0,18	0,08	-0,11	-0,11	0,07	0,06	0,05	0,08	0,2	0,16
L	-0	-0,4	-0,3	-0,2	0,42	0,2	0,02	-0,4	0,52	0,29	0,69	0,16	0,16	0,22	0,58	0,58	-0,11	0,13	-0,17	-0,13	-0,36	-0,52	-0,34	-0,04
MO	0,5	0,61	-0,1	0,06	0,61	0,62	0,18	0,09	0,45	0,46	-0,23	0,9	-0,04	0,07	0,35	0,9	-0,16	0,2	0,13	0,77	0,07	-0,45	0,48	0,27
Caco ₃	0,04	-0,1	0,16	-0	0,69	0,16	-0,1	-0,3	0,56	0,72	0,55	0,86	0,07	0,06	0,15	0,54	-0,22	0,31	-0,05	0,19	-0,34	-0,48	-0,35	0,27
CEC m	0,45	0,3	0,58	0,77	0,15	-0	0,3	0,82	0,02	0,72	0,78	0,66	0,44	0	-0,24	-0,82	0,2	0,55	0,54	0,69	0,81	0,8	0,85	0,9
CEC e	0,52	0,35	0,91	0,94	0,32	0,83	0,36	0,43	0,37	0,3	-0,2	-0,17	0,28	0,15	0,76	0,99	0,43	0,37	0,37	-0,2	0,43	0,53	0,54	0,17

Les valeurs en gras représentent les coefficients de corrélation significatifs au seuil de 5%

Tableau 14 : Matrice de corrélation sur les différentes stratifications de la 2^{ème} variante

Groupes de Sol	MWD1														
	Stratification de salinité			Stratification texturale			Stratification texturo-organique								
	S1	S2	S3	G1	G2	G3	Argilo-limoneux			Limoneux			Argilo-limono-sableux		
							G1M1	G1M2	G1M3	G2M1	G2M2	G2M3	G3M1	G3M2	G3M3
CE	0.31	0.03	0.03	0.32	-0.2	-0.14	0.54	0.52	0.21	-0.03	-0.17	-0.04	0.09	-0.11	-0.07
pH	-0.33	0.26	0.26	-0.35	-0.4	-0.09	-0.46	-0.47	-0.04	-0.08	-0.07	-0.81	-0.031	-0.35	-0.11
A	0.11	0.93	0.95	0.53	-0.03	0.33	0.64	0.26	0.13	0.1	-0.52	-0.02	0.74	0.24	0.2
S	0.08	-0.47	-0.47	-0.12	0.13	-0.18	-0.21	0.07	0.12	-0.16	-0.55	0.22	-0.49	-0.14	-0.01
L	-0.08	-0.27	-0.27	-0.34	0.18	0.09	-0.37	-0.27	-0.13	0.12	0.66	0.43	0.23	0.08	-0.06
MO	0.52	-0.09	-0.09	0.1	0.61	0.38	-0.27	0.03	0.26	0.09	-0.35	0.85	0.08	-0.19	0.51
Ca CO ₃	0.007	0.16	0.16	-0.24	0.18	0.3	-0.35	-0.18	-0.19	0.06	0.25	0.11	-0.05	0.14	0.3
CECm	0.42	0.58	0.58	0.79	-0.02	0.25	0.75	0.505	0.88	0.28	-0.28	-0.51	0.08	0.92	0.62
CECe	0.5	0.9	0.9	0.56	0.82	0.37	0.68	0.47	0.25	0.3	-0.19	0.97	0.577	0.51	0.31

Les valeurs en gras représentent les coefficients de corrélation significatifs au seuil de 5%

12. Performance des modèles de prédiction pour chaque groupe de sols

Pour établir des FPT, Les variables explicatives ont été sélectionnées pour chaque groupe de sols en fonction des corrélations significatives entre MWD et paramètres physico-chimiques. Les FPT ont été établis pour les groupes de sols représentant d'une part les principaux grands pôles des classes texturales et d'autre part des sols représentant différents les degrés de salinité et la teneur en matière organique. Afin de développer les modèles pour chaque groupe des stratifications, nous avons comparé les deux modèles linéaires, simples et multiples pour chaque groupe de sols. Les tests d'efficacité et de précision des prédictions ont été réalisés par l'intermédiaire du coefficient de détermination R^2 , de l'écart type résiduel $\hat{\sigma}$, de l'erreur moyenne de prédiction MEP, de l'écart type de prédiction SDP, et de la somme des carrés des écarts résiduels SCER. Le R^2 Représente la proportion de variance commune ou partagée entre le MWD expliquées par les variables explicatives utilisées par rapport à la variabilité totale.

Si la valeur du R^2 est voisine de 1, on dit alors que le régresseur explique bien la variabilité du MWD et inversement si la valeur est proche de 0. Si les valeurs de l'écart type résiduel $\hat{\sigma}$, de la MEP, du SDP et de la SCER sont faibles dans l'un des deux modèles on dit que ce modèle est plus représentatif de la variable à prédire. L'évaluation des FPT a essentiellement porté sur leur capacité d'estimer avec plus ou moins de justesse la stabilité structurale (MWD) pour un ensemble des données.

Les tableaux 15 et 16 montrent que les deux modèles de prédiction simple et multiple génèrent des R^2 assez élevés et semblent, pour la plupart des groupes de sols, bien expliquer la variabilité de la MWD.

Ainsi, Il est à noter que lorsque nous passons du modèle simple au modèle multiple, la qualité de l'ajustement est meilleure avec un coefficient de détermination R^2 plus élevé.

Les modèles utilisés pour décrire la variable MWD, s'appuie essentiellement sur des fonctions mathématiques qui visent à décrire de la façon la plus fiable possible la relation entre la variable à expliquer et la variable explicative, Le développement des équations de régression linéaire (FPT) a été établit selon les modèles de prédiction suivants :

$$\text{Modèle simple : } MWD (\text{test}) = ax + b$$

$$\text{Modèle multiple : } MWD (\text{test}) = ax_1 + bx_2 + c$$

Où : a, b, c sont des coefficients de régression linéaire et A, L, S, pH, CaCO₃, MO, CEC_m, CEC_e et CE sont les régresseurs.

Concernant la stratification texturale utilisant la première variante à 4 classes (Tableau 14), les meilleurs modèles de prédictions ont été montrés par les textures argileuses. En effet, la régression simple pour la texture argileuse utilisant la CEC_m a fourni un coefficient de corrélation élevé de l'ordre de 0.94, alors que dans le cas de la texture Argilo-limoneuse les meilleurs résultats ont été fournis par utilisation de la régression multiple, avec un coefficient de corrélation de 0.91, pour le reste des stratifications texturales quel que soit le type de régressions les résultats de prédiction ont été médiocres.

Concernant la salinité, quel que soit la stratification les prédictions ont été presque identiques que ce soit par utilisation des régressions simples ou multiples, avec des coefficients de corrélations allant de 0.81 à 0.9.

Enfin, pour la stratification texturo-organique, les meilleures prédictions ont été montrées par les sols sableux moyennement riche en matière organique (R=0.94), ainsi que les sols argileux limoneux moyennement riche en matière organique (0.90) à travers la régression multiple,

Pour la deuxième variante (Tableau 15), en termes de stratification texturale, la meilleure prédiction de MWD a été montrée par la régression multiple dans le cas de la texture limono-argilo-sableuse (R = 0.89), alors que pour le reste des textures la prédiction a été médiocre avec des coefficients de corrélations allant de 0.7 à 0.76. Concernant la stratification de la salinité, la meilleure prédiction a été montrée par la régression simple dans le cas des sols très salés (R = 0.9) et par la régression multiple dans le cas des sols salés (R = 0.89).

En termes de stratification texturo-organique, les meilleures prédictions ont été obtenues dans le cas des sols à textures moyennes moyennement riche et bien pourvue en matière organique (R= 0.92 à 0.94), cependant les plus mauvaises prédictions ont été obtenues dans le cas des sols à texture grossière quel que soit le contenu en matière organique (R = 0.5 à 0.55) et dans le cas des textures fines pauvre en matière organique (R = 0.57).

Conclusion

Les fonctions de pédotransfert nous ont permis d'aboutir à l'estimation de la stabilité structurale et la sensibilité du sol à la dégradation sans passer par des mesures directes au laboratoire. Il est recommandé de faire appel à la stratification des sols basée sur le critère

Pédologique de la texture et la salinité pour permettre d'une part à contraindre et à organiser la variabilité des propriétés physiques et d'autre part à contraindre l'extrapolation des FPT (Bruand, 1990 ; Bastet, 1999 et Ouaddah, 2000).

Tableau 15 : Tableau des modèles sélectionnés pour la première variante, 4 classes.

Groupe de sol		Modèle	R ²	Θ	SC ER	MEP	SDP	FPT
Stratification texturale	Sableux (n=132)	Multiple	0.67	0.30	0.03	-0.02	0.17	$MWD=0.052+0.017*A+0.004*L+0.002*S+0.018*CaCO_3+0.14*MO+0.006*CECe$
	Limoneux (n=275)	Multiple	0.71	0.41	0.05	-0.03	0.22	$MWD=-0.3+0.007*L+0.001*S+0.05*pH+2.6^{-4}*CaCO_3+0.04*MO+0.04*CE+0.02*CECe$
		Multiple	0.70	0.40	0.05	-0.01	0.22	$MWD=0.57-0.05*MO+0.02*CECe$
	Argileux limoneux (n=535)	Multiple	0.91	0.39	0.09	-0.03	0.30	$MWD=0.005*A-0.02*pH+0.01*CaCO_3+0.15*MO+0.04*CE+0.08*CECm+0.01*CECe$
	Argileux (n=306)	Simple	0.94	1.26	0.13	0	0.36	$MWD=0.0056*CECm$
Stratification de la salinité	Peu salé (n=109)	Multiple	0.81	0.64	0.24	-0.02	0.49	$MWD=0.21*MO+0.12*CE+0.017*CECm$
	Salé (n=614)	Multiple	0.87	0.39	0.02	0	0.14	$MWD=0.26+0.014*A-0.001*L-0.001*S+0.048*pH+0.001*CaCO_3+0.001*CECm+0.008*CECe$
		Simple	0.86	0.39	0.02	-0.01	0.14	$MWD=0.54+0.018*A$
			0.82	0.46	0.03	-0.06	0.16	$MWD=0.44+0.04*CECe$
	Très salé (n=452)	Multiple	0.90	0.34	0.02	-0.07	0.10	$MWD=0.52+0.026*A+1.5E-4*L+6.2E-5*S-0.006*CE+0.004*CECm-0.022*CECe$

Tableau 15 : suite

Stratification texturo - organique	Sableux	P (n=62)	Multiple	0.90	0.24	0.04	-0.13	0.04	$MWD=0.02*CaCO_3+0.25*MO+0.02*CE+0.007 CEC e$
		MR (n=37)	Multiple	0.94	0.29	0.04	-0.13	0.2	$MWD=0.02*CaCO_3+0.4*MO$
	Limoneux	P (n=151)	Simple	0.74	0.61	0.35	-0.35	0.13	$MWD=0.04*CEC e$
		Argileux limoneux	MR (n=160)	Multiple	0.90	0.41	0.10	-0.04	0.31
	TR (n=34)		Multiple	0.65	0.06	0.06	0.01	0.24	$MWD=0.04+0.13*MO+0.04*CEC m$
	Argileux	P (n=176)	Multiple	0.81	0.04	0.08	-0.09	0.27	$MWD=0.5-0.01*A-0.004*L-0.075*pH+0.004*CaCO_3+0.06*CECm+0.006*CEC e$
		MR (n=56)	Multiple	0.73	0.09	0.12	-0.14	0.32	$MWD=-0.3+0.06*CE+0.04*CEC m$
		R (n=40)	Multiple	0.88	1.02	0.20	-0.33	0.30	$MWD=-4.04+0.002*L+0.02*pH+0.03*CaCO_3+0.93*MO+0.25*CE+0.04*CECm-0.008*CECe$
		TR (n=34)	Simple	0.8	0.92	0.18	-0.16	0.39	$MWD=0.009+0.05*CEC m$

*Note : **P** = Pauvre, **MR** = Moyennement riche, **R** = Riche et **TR** = Très riche en matière organique (MO)

Tableau 16 : Tableau des modèles sélectionnés pour la deuxième variante, 3 classes.

Groupe de sol		Modèle	R ²	∂	SCER	MEP	SDP	FPT	
Stratification texturale	Argilo-limoneuse (n=651)	Multiple	0.76	0.55	0.07	-0.01	0.26	MWD=0.2-0.005A+0.002L+0.003S-0.071pH +0.003CaCO3 +0.071MO+0.034CE +0.055CECm+0.002CECe	
	Limoneux (n=274)	Multiple	0.70	0.41	0.05	0.02	0.22	MWD=0.35+0.006L+0.001S+0.069pH+0.001CaCO3+0.045MO+0.0045CE +0.022CECc	
	Limono- argilo sableux (n=323)	Multiple	0.89	0.41	0.1	-0.03	0.32	MWD=0.009A+0.0007S+0.069pH+0.001CaCO3+0.125MO+0.025CE +0.003CECm +0.006CECe	
Stratification de la salinité	Peu sale (n=509)	Simple	0.76	0.65	0.32	-0.07	0.56	MWD=0.383MO	
	Salé (n=378)	Multiple	0.87	0.39	0.14	0	0.02	MWD=0.261+0.014A-0.001L-0.001S+0.048pH+0.001CaCO3+0.001CECm +0.008CECe	
	Très salé (n=361)	Simple	0.90	0.33	0.01	0.01	0.1	MWD=0.42+0.019A	
Stratification texturo-organique	Texture fine	P (n=534)	Simple	0.57	0.45	0.09	0.001	0.30	MWD=0.158+0.053CECm
		MR (n=57)	Multiple	0.87	0.55	0.14	0.05	0.31	MWD=-0.062A-0.009L+0.135pH+0.038CE+0.149CECe
		BP (n=58)	Multiple	0.81	0.89	0.14	-0.01	0.37	MWD=0.384+0.121MO+0.052CECm
	Texture moyenne	MR (n=22)	Multiple	0.92	0.40	0.07	-0.04	0.26	MWD=0.0068A+0.017L-0.0065S
		BP (n=23)	Simple	0.94	0.98	0.03	-0.01	0.17	MWD=0.696+0.023CECm
	Texture grossière	P (n=117)	Simple	0.55	0.25	0.03	0	0.17	MWD=0.38+0.047CECm
BP (n=158)		Multiple	0.50	0.46	0.1	0.01	0.32	MWD=0.267-0.006A+0.003CaCO3+0.135MO+0.037CECm-0.002CECm	

*Note : **P** = Pauvre, **MR** = Moyennement riche, **BP** = Bien pourvue en matière organique (MO)

13. Réseaux de neurones artificiels

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) représentent une nouvelle approche de modélisation dans le but est de prédire le (MWD), cette technique d'exploration est utilisée pour entraîner les relations non linéaires avec plus ou moins de fiabilité (Jane *et al* ; 2006, Zhongy *et al* ; 2011)

La technique des réseaux de neurones a été appliquée sur un ensemble de données de 183 échantillons prélevés au niveau de la zone d'étude (Bas-Cheliff), l'ensemble de données a été divisé aléatoirement en deux lots, un premier lot composé de 129 échantillons destiné à l'apprentissage et un deuxième lot test composé de 54 échantillons. Deux modèles de réseau de neurones ont été utilisés, le modèle MLP (Multilayer perception) et le modèle RBF (Radial basis Function), pour le modèle MLP, le choix du nombre d'unités cachées et de sortie a été pris au hasard avec toutes les fonctions d'activation disponibles au niveau du logiciel Statistica V.8 à savoir la fonction logistique, la fonction Tanh et la fonction exponentielle, car les neurones peuvent utiliser n'importe quelle fonction de transfert différentiable pour générer leurs sortie. Ces fonctions sont généralement utilisées car elles sont mathématiquement pratiques et permettent au réseau de neurones de modéliser des relations à la fois fortes et faiblement non linéaires (Zhongyi Qu, 2011). Nous avons conservé les meilleurs réseaux après avoir exécuté le processus.

Les performances des RNA telles qu'indiqués dans le tableau 14 sont données à travers le modèle de réseau définit par les fonctions et le nombre de couches cachées utilisées pour prédire le MWD.

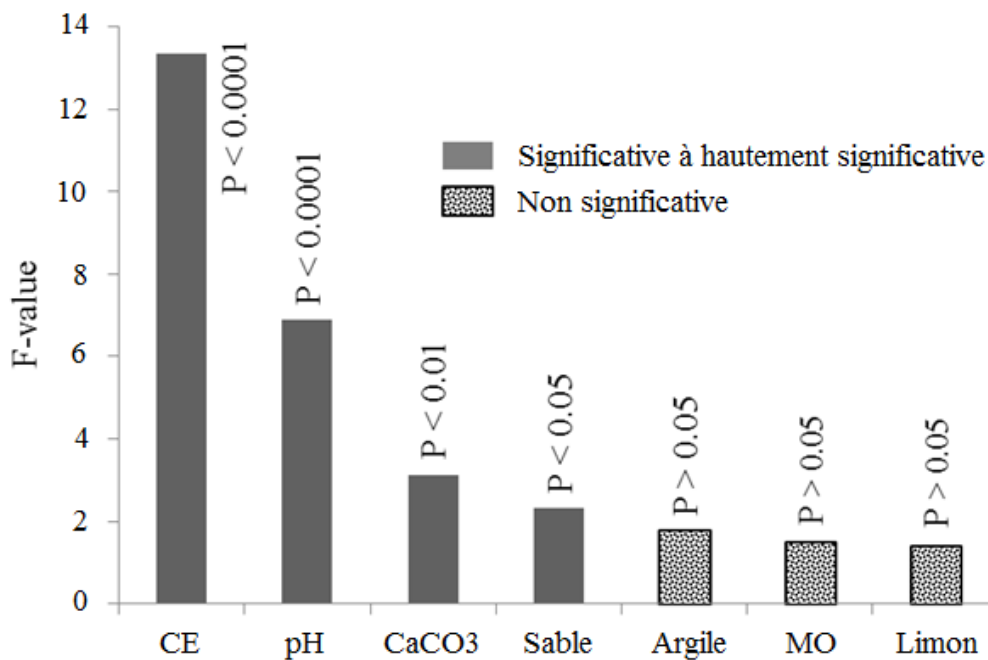
Les ajustements obtenus à travers les deux modèles montrent que les meilleurs résultats ($R^2 = 0.73$; Erreur = 0.0048) pour le modèle RBF sont obtenus lorsque le nombre de couches cachés est élevés avec utilisation de tous les paramètres comme variables d'entrées, à l'inverse le modèle MLP ne nécessite pas autant de couches cachés pour la prédiction du MWD, les meilleures performances ($R^2 = 0.88$; Erreur = 0.0022) de ce modèle ont été obtenues par utilisation du l'argile, la conductivité électrolytique et le pH (Tableau 17).

Tableau 17 : Résultats du réseau de neurones

Input (variables)	R ²	Network name	Hidden activation	Output activation	Error
A, L, S, MO	0.71	MLP 4-9-1	Tanh	Logistic	0,0051
A, L, S,	0.67	MLP 3-8-1	Tanh	Tanh	0,0058
A, CE	0.68	MLP 2-14-1	Logistic	Tanh	0,0055
MO, A	0.47	RBF 2-28-1	Gaussian	Identity	0,0081
A, MO, pH	0.72	MLP 3-6-1	Exponential	Logistic	0,0051
CE, pH	0.70	MLP 2-13-1	Tanh	Exponential	0,0053
A, CE, pH	0.88	MLP 3-14-1	Tanh	Exponential	0,0022
MO, CaCO ₃	0.71	MLP 3-10-1	Logistic	Identity	0,0052
A, L, S, MO, CE, pH CaCO ₃	0.73	RBF 7-24-1	Gaussian	Identity	0,0048

14. Performance des réseaux de neurones

Avant l'application des réseaux de neurones un filtrage des variables a été appliqué ; les résultats du filtrage ont montré que parmi les 7 variables utilisées pour prédire le MWD, les variables les plus significatives étaient la CE ($P < 0.0001$), pH ($P < 0.001$), le CaCO₃ ($P < 0.01$) et le sable ($P < 0.05$) alors que le reste des variables n'étaient pas significatives ($P > 0.05$) (Figure 25).

**Figure 25** : Performance des variables après filtrage

Après filtrage, tous les paramètres ont été utilisés comme variables d'entrée, par la suite en deuxième étape seul les paramètres significatifs ($P < 0.05$) ont été utilisées (CE, pH, CaCO₃ et sable). En troisième étape seules les paramètres les plus significatifs ($P < 0.01$) ont été retenues (CE, pH, CaCO₃) et finalement seuls les paramètres hautement significatifs ($P < 0.0001$) ont été utilisées, les résultats sont résumés dans le tableau 18

Les résultats (Tableau 17) montrent que la performance des réseaux de neurones dans la prédiction de la stabilité structurale sont meilleures que celles produites par les FPT, ce qui est concordant avec les résultats reportés par plusieurs auteurs (Amini *et al* ;2005, Shaap *et al* ;1998, Tamari *et al* ;1996), la principale raison de cette différence est que les FPT ont été développés à partir d'une base de données de sols de source variées ce qui influence la performance des équations linéaires, aussi selon Keshavarz *et al*, (2010), les réseaux de neurones ont une meilleure efficacité de prédiction par comparaison aux régressions linéaires (FPT) à cause de la non-linéarité des relations entre la variable explicative et la variable prédite. Donc le modèle réseau de neurones sont meilleurs que les fonctions FPT dans la détection de la non-linéarité des relations entre variables,

Aussi selon Shaap *et al*, (1998), Marchuk (2013), la modélisation par réseaux de neurones ne nécessite pas une équation spéciale et ceci par création d'équations adéquates entre les données d'entrées et de sortie, ce qui permet au RN de produire les meilleurs résultats.

Le principal inconvénient des réseaux de neurones, est qu'elles sont des boîtes noires, très difficile à identifier (Shaap *et al* ; 1998).

Concernant les variables, les meilleures prédictions ont été obtenues lorsque les 7 paramètres physico-chimiques analysés ont été utilisées comme variables d'entrées. En effet selon Shaap *et al*, (1998), la précision des réseaux de neurones artificiels est liée aux nombres de variables d'entrées plus le nombre de variables est grand plus est la précision des RN, mais malgré ça il a été constaté que pour le réseau RBF, la prédiction du MWD par utilisation de seulement de la CE et du pH ($P < 0.0001$) ($R = 0.67$) été presque similaire à celle où les 7 variables ont été utilisées ($R = 0.7$).

Finalement par utilisation d'un grand nombre de couches cachées, la performance du réseau RBF été meilleure que celle du réseau MLP, en effet selon Keshavarz *et al* (2010), plusieurs études rapportent que lorsque le nombre de variable d'entrées est supérieur à 3, les

réseaux RNA produisent les meilleurs performances (Yilmaz *et al* ;2011, Albayed *et al* ; 2020), il est aussi a noter que les résultats du réseau RBF, ont été toujours liées à la fonction d'activation cachée Gaussienne, alors que les résultats du réseau MLP n'étaient pas liées à une fonction d'activation spécifique..

Tableau 18 : Résumé des fonctions retenues a travers les fonctions RBF et MLP

	Input variables	Network	R (Train)	R (Test)	Train error	Test error	Activation
(a)	pH, CaCO ₃ , Clay, Silt, Sand, OM, EC.	RBF 7-26-1	0.70	0.76	0.006	0.002	Gaussian
		MLP 7-7-1	0.68	0.69	0.006	0.003	Tanh
(b)	EC, pH, CaCO ₃ , Sand.	RBF 4-28-1	0.60	0.63	0.008	0.004	Gaussian
		MLP 4-3-1	0.62	0.55	0.007	0.004	Exponential
(c)	EC, pH, CaCO ₃ .	RBF 3-30-1	0.60	0.40	0.007	0.006	Gaussian
		MLP 3-3-1	0.53	0.50	0.008	0.004	Logistic
(d)	EC, pH.	RBF 2-28-1	0.67	0.48	0.006	0.006	Gaussian
		MLP 2-3-1	0.54	0.43	0.009	0.004	Logistic

Les diagrammes représentant les résultats du MWD mesurés par rapport aux résultats prédits par les réseaux de neurones (Figure 26), ont été établis à travers les 15 % (54 échantillons) des données retenues pour la validation, les résultats obtenus étaient concordants avec les 70% des échantillons utilisés pour l'apprentissage et ont montrés effectivement la supériorité des RBF par rapport aux MLP, en effet les plus forts coefficients de détermination (R^2) reviennent toujours au réseau RBF.

La plus forte corrélation entre le MWD mesuré et le MWD prédit a été obtenue lors de l'utilisation des 4 paramètres les plus significatifs (CE, pH, CaCO₃ et Sable) avec un coefficient de corrélation de 0.71, alors que pour le reste des variables utilisées comme variables d'entrées, les résultats du réseau de neurones ont montré des corrélations presque identiques avec un R compris entre 0.62 et 0.67.

A l'inverse des FPT, le test de conformité a montré une efficacité significative ($P < 0.05$) à hautement significative ($P < 0.01$) des réseaux de neurones et plus spécialement le réseau RBF dans la prédiction du MWD.

Finalement, il a aussi été noté que même durant l'étape de validation les paramètres les plus influant sur la stabilité structurale étaient respectivement la CE et le pH, cependant l'ajout des restes des paramètres a ces deux variables (CE et pH) produit des résultats meilleurs surtout en termes du réseau RBF.

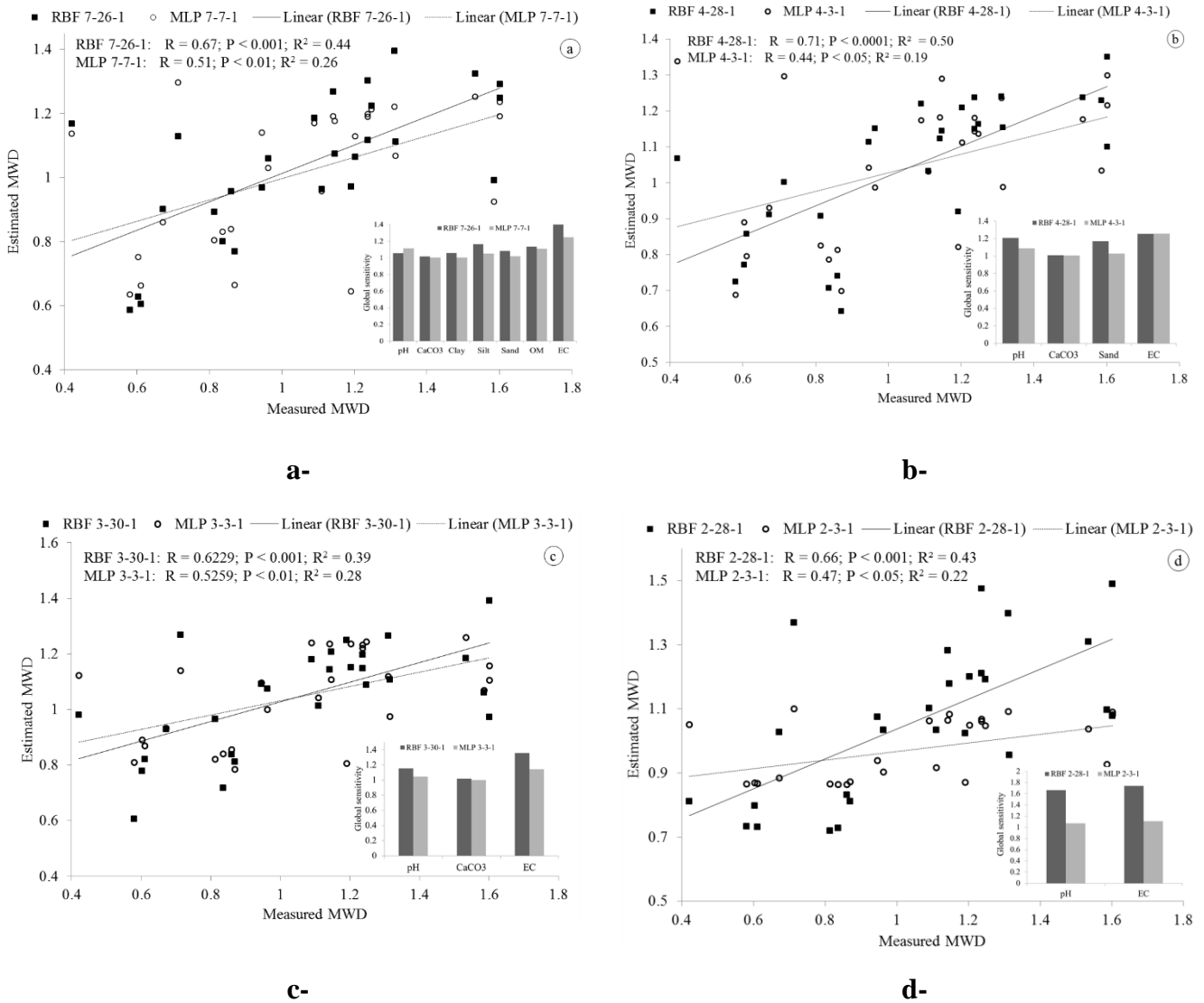


Figure 26 : Diamètre moyen pondéral mesuré (MWD) par rapport au diamètre moyen estimé (MWD) et sensibilité globale des différents réseaux de neurones artificiels (RNA)

15. Modélisation géostatistique

a. Krigeage :

La géostatistique est une branche de la statistique appliquée qui traite des données spatialement corrélées. Son objectif est centré sur l'estimation des variations spatiale ou spatiotemporel des phénomènes régionalisés.

L'étape la plus importante de la géostatistique est la modélisation de la dépendance spatiale et la modélisation du semi-variogramme. Un large choix de modèles de semi-variogrammes est utilisé les plus célèbres sont le modèle power, exponentiel, sphérique et gaussien. Le choix du meilleur modèle pour la modélisation géostatistique dépend des résultats de la validation croisée.

L'analyse de la MWD dans le Bas-Cheliff a montré que les modèles gaussien et stable fournissent les meilleurs résultats (Figure 27), en effet selon la validation croisée ces deux modèles fournissent les plus forts coefficients de détermination ($R^2 = 0.16$), de corrélation ($R = 0.40$) et la plus faible erreur moyenne (0.001) (Tableau19), cependant ces 2 modèles montrent des effets de pépite légèrement supérieurs au reste des modèles testés.

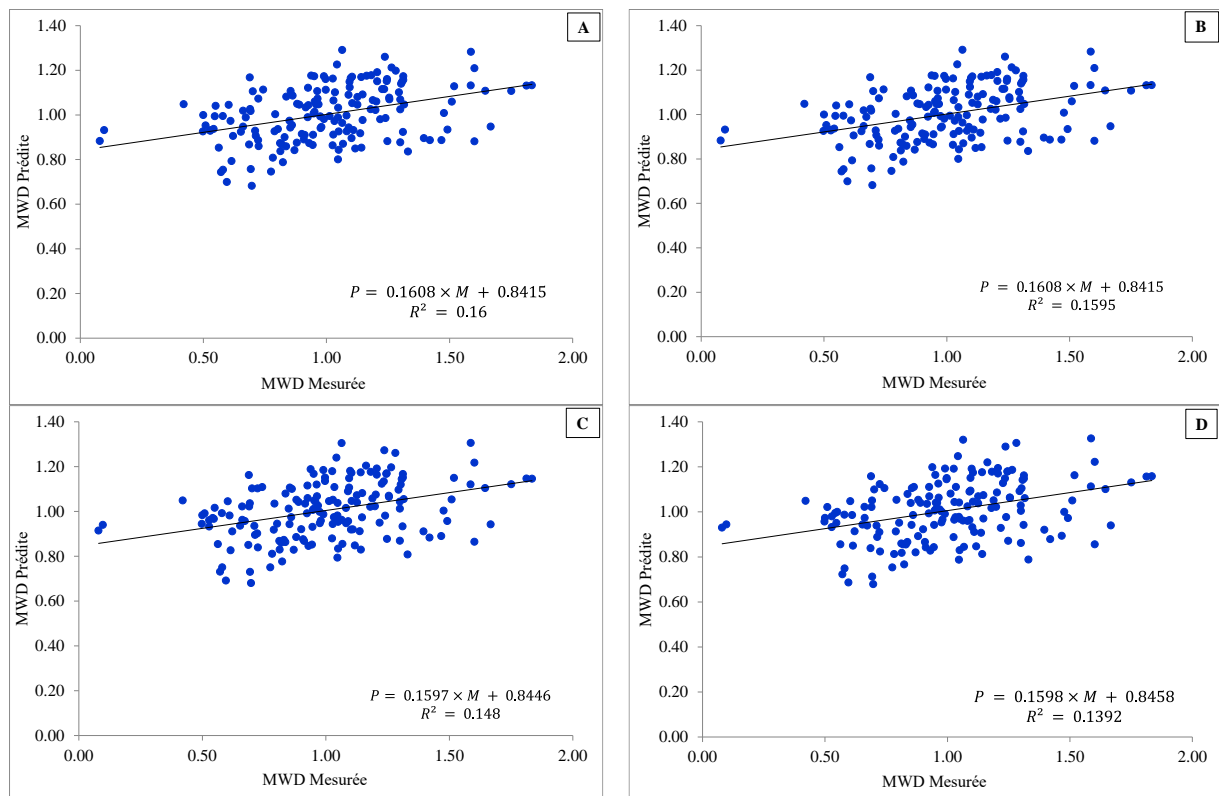


Figure 27 : Diagrammes de dispersion du MWD Prédite vs MWD mesurée par utilisation de 4 modèles de Krigeage ; A= Modèle Stable, B= Modèle Gaussien, C = Modèle Sphérique et D = Modèle Exponentiel

Tableau 19 : Performance des 4 modèles dans la prédiction du MWD par Krigeage ordinaire et équations de régression

Modèle	Effet pépité	R ²	R	RMSE
Stable	0.074	0.16	0.4	0.281
Gaussien	0.073	0.16	0.4	0.281
Sphérique	0.068	0.148	0.385	0.284
Exponentiel	0.064	0.139	0.373	0.285

Le modèle gaussien utilisé pour cartographier la variabilité de la MWD par Krigeage ordinaire a montré que les sols les plus stables sont au centre de la plaine du Bas-Cheliff et dans la direction Nord-Ouest, couvrant la commune de Ouled Mihoub, le Nord de H'madna, et le Nord de Sidi Khettab. Les sols les moins stables sont localisés à la périphérie de la plaine, à savoir les communes de Belaassel, Oued Djemaa, Ouarizane et Oued Rhiou (Figure 28),

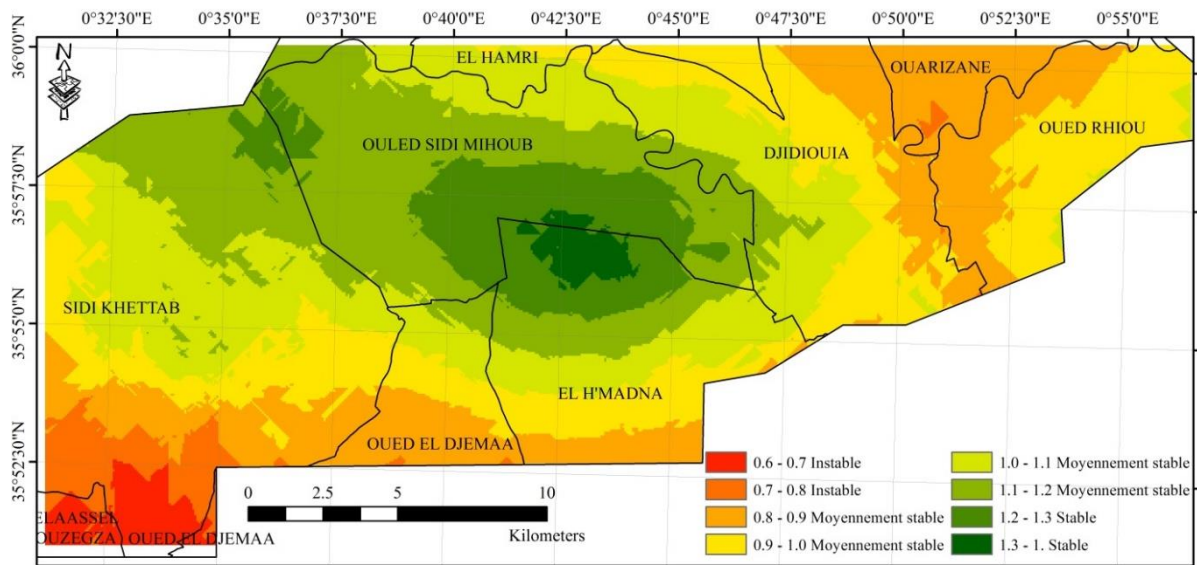


Figure 28 : Carte de variabilité de stabilité structurale dans le Bas-Cheliff obtenue par Krigeage

La majorité des sols de le Bas-Cheliff sont moyennement stables (84.5%), en effet l'analyse des superficies montre les sols instables représentent 23.6km², les sols moyennement stables représentent 368.4 km² et les sols stables représentent 43.9. Km² selon l'échelle Le Bissonais (1996) (Tableau 20)

Tableau 20 : Superficies des classes de stabilité dans le Bas-Cheliff obtenues par Krigeage ordinaire

Krigeage	Instable		Moyennement stable				Stable	
	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1.0	1.0-1.1	1.1-1.2	1.2-1.3	1.3-1.4
Superficie (Km ²)	9.3	14.3	78.3	98.9	97.7	93.5	38.0	5.8
Somme (Km ²)	23.6		368.4				43.9	
Pourcentage (%)	5.4		84.5				10.1	

La géostatistique est une technique qui fournit en plus de l'estimation des phénomènes, l'erreur d'estimation, dans ce contexte, les plus faibles erreurs d'estimation ont été enregistrées au niveau des sols des communes de Sidi Khettab et Djediouia, alors que les plus fortes erreurs d'estimations ont été enregistrées à la périphérie de la plaine (Figure 29)

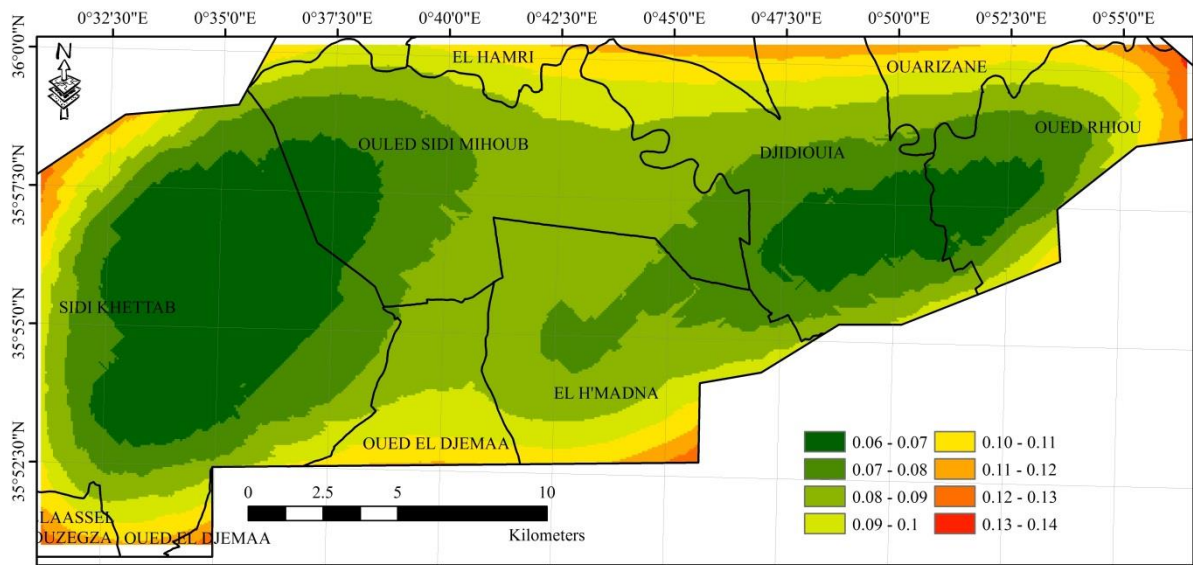


Figure 29 : Carte des écarts types variabilité de stabilité structurale dans le Bas-Cheliff obtenue par Krigeage

b. Co-Krigeage :

Le Co-Krigeage est une variante du Krigeage ordinaire, c'est méthode d'interpolation visant à faire des estimations ou des prédictions pour un phénomène mal échantillonné (la variable prédite) à l'aide d'une variable bien échantillonnée (la co-variable). La variable prédite et la co-variable doivent être corrélées positivement ou négativement.

Les résultats de la validation croisée montrent que les différentes co-variables analysées n'augmentent pas la qualité des estimations d'une façon réellement significative, les co-variables ayant données une légère amélioration des estimations de la MWD comparativement au Krigeage sont le pH ($R^2 = 0.163$), la conductivité électrique ($R^2 = 0.162$) et le CaCO_3 , cependant, la performance des restes des variables étaient inférieures à celle du Krigeage ordinaire (Tableau 21).

Tableau 21 :Performance des différentes co-variables utilisées modèles dans la prédiction du MWD par Co-Krigeage et équations de régression

Variable	R^2	R	RMSE	Equation de régression
Argile	0.103	0.322	0.319	$P = 0.1225 \times M + 0.8858$
CaCO_3	0.161	0.401	0.280	$P = 0.1349 \times M + 0.8738$
CE	0.162	0.403	0.282	$P = 0.1356 \times M + 0.8732$
CEC	0.143	0.379	0.318	$P = 0.1246 \times M + 0.8871$
Limon	0.102	0.319	0.329	$P = 0.1423 \times M + 0.8737$
MO	0.159	0.399	0.283	$P = 0.15875 \times M + 0.8466$
pH	0.163	0.404	0.281	$P = 0.1593 \times M + 0.8467$
Sable	0.112	0.334	0.329	$P = 0.0879 \times M + 0.9237$

Les variables les plus significatives ayant apportés une amélioration des estimations à savoir le pH, la CE et CaCO_3 ont été utilisé comme co-variables dans la cartographie de la distribution du MWD par Co-Krigeage. Comme pour le Krigeage, les résultats du Co-Krigeage ont montrées que les sols les plus stables suivent la direction Nord-Ouest, et la stabilité diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne du centre de la plaine. Les communes présentant la meilleure stabilité sont les communes de Ouled Mihoub, le Nord de H'madna, et le Nord de Sidi Khettab. Par contre les communes situées à la périphérie de la plaine Belaassel, Oued Djemaa, Ouarizane et Oued Rhiou se caractérisent par des sols moins stables (Figure 30),

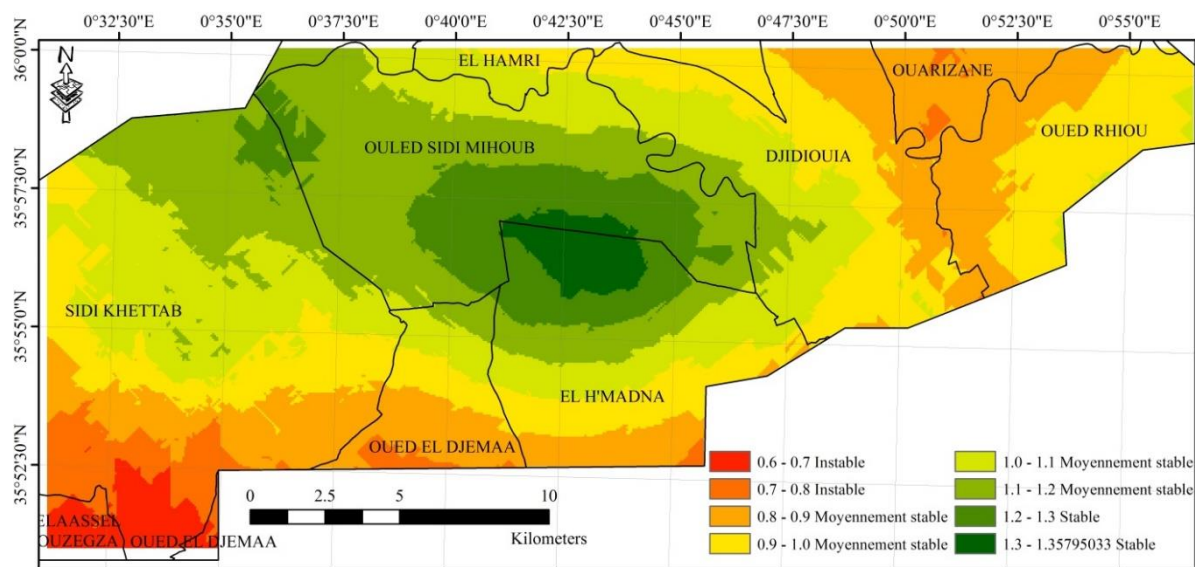


Figure 30 : Carte de variabilité de la stabilité structurale dans le Bas-Cheliff obtenue par Co-Krigeage.

La distribution des superficies obtenues par Co-Krigeage a montrée comme pour le Krigeage que la plus grande part des sols (83.1%) était moyennement stables (362.2 km²) mais légèrement inférieure à celle obtenue par Krigeage avec une diminution de l'ordre de 6.2 km², cependant pour les sols instables et stables, les superficies obtenues par Co-Krigeage 26.7 Km² et 47.0 Km² respectivement, étaient légèrement supérieures à celle du Krigeage avec une différence de 3.1 Km² pour chaque classe (Tableau 22)

Tableau 22 : Superficies des classes de stabilité dans le Bas-Cheliff obtenues par Co-Krigeage

Co-Krigeage	Instable		Moyennement stable				Stable	
	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1.0	1.0-1.1	1.1-1.2	1.2-1.3	1.3-1.4
Superficie (Km ²)	9.7	16.9	80.0	96.9	94.6	90.7	37.7	9.4
Somme (Km ²)	26.7		362.2				47.0	
Pourcentage (%)	6.1		83.1				10.8	

L'analyse des différences entre Co-Krigeage et Krigeage a montré que les estimations du MWD par utilisation du Co-Krigeage étaient supérieures à celles du Krigeage au centre de la plaine au niveau des communes de H'Madna, Ouled Mihoub à l'Est de Oued Rhiou et au Nord de Sidi Khettab, alors que les estimations du MWD relatives au Krigeage étaient supérieures à celles du Co-Krigeage dans les zones périphériques de la plaine surtout au niveau des commune de Ouarizane, El Hamari, Oued El Djemaa et au sud de H'Madna (Figure 31).

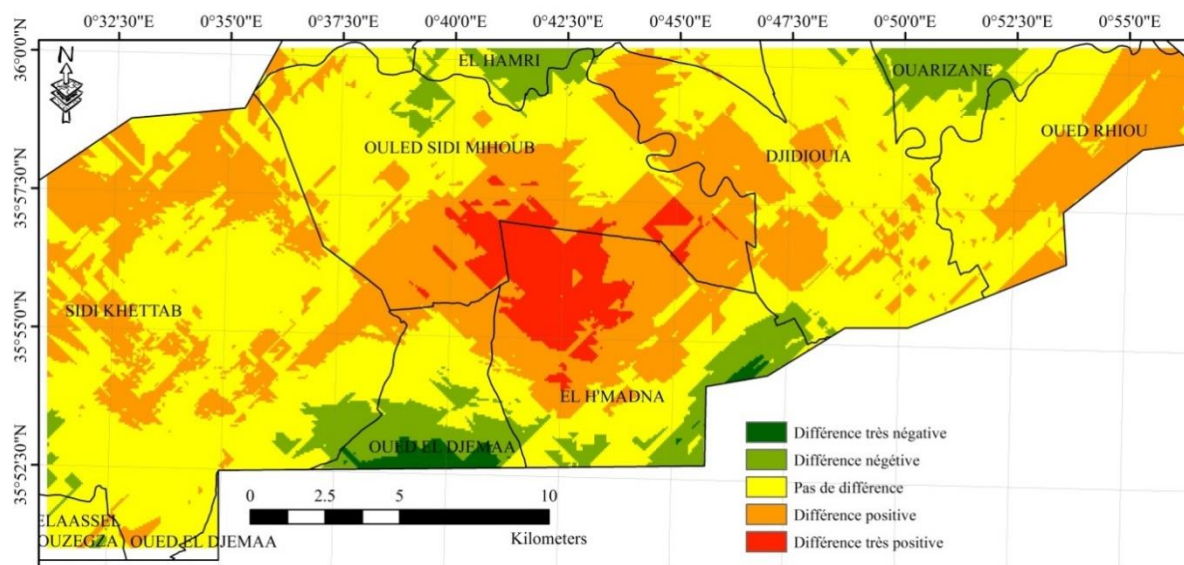


Figure 31 : Carte des différences d'estimation de la stabilité structurale dans le Bas-Cheliff entre le Co-Krigeage et le Krigeage.

Le test de significativité de la différence des moyennes a montré que dans les régions caractérisées par de fortes conductivités électriques (CE), une CEC élevée et un pH bas les estimations du co-Krigeage étaient supérieures à celles du Krigeage alors que dans les régions à faible CE, faible CEC et un pH basique les estimations du Krigeage étaient supérieures à celles du co-Krigeage (Tableau 23)

Tableau 23 : Test de significativité de la différence des moyennes entre Krigeage et Co-Krigeage

	pH	CaCO3	Argile	Limon	Sable	MO	CE	CEC
Moyenne où le Krigeage > Co-Krigeage	8.3	17.27	27.84	44.28	27.88	2.38	1.63	7.30
Moyenne où le Co-Krigeage > Krigeage	7.8	17.57	27.6	47.24	25.16	2.40	14.78	9.85
t observé	5.5377	0.2630	0.0084	1.4312	0.4784	0.1217	4.4777	2.3215
t critique	2.008	2.008	2.008	2.008	2.008	2.008	2.008	2.008
P-value	< 0.0001	0.7938	0.9933	0.1585	0.6344	0.9036	< 0.0001	0.0243
Signification	***	NS	NS	NS	NS	NS	***	*

Note : * significative (P<0.05) ; *** très significative (P < 0.01)

L'analyse des différences entre Krigeage et co-Krigeage a montré que les estimations du Krigeage étaient supérieures à celles du co-Krigeage sur une superficie de 40.5 km², alors que les estimations du co-Krigeage étaient supérieures à celles du Krigeage sur une superficie de 159.57 km², alors que dans le reste des superficies soit 235.73 km², les estimations des deux modèles n'étaient pas différentes (Tableau 24),

Tableau 24 : Superficies des différences d'estimation du MWD dans le Bas-Cheliff entre le Co-Krigeage et le Krigeage

	Différence très négative	Différence négative	Pas de différence	Différence positive	Différence très positive
Superficie (Km ²)	3.67	36.83	235.73	140.20	19.38
Somme (Km ²)	40.50		235.73	159.57	

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion

L'activité humaine visant à satisfaire les besoins alimentaires d'une population, combinée à de graves aléas climatiques et surtout la sécheresse, fait de la dégradation des sols un problème majeur dans les zones arides et semi-arides, dans ce contexte, la stabilité des agrégats est l'un des indicateurs les plus importants de la dégradation des sols.

Cette étude avait pour objectifs la prédiction de la stabilité structurale dans une zone semi-aride par le biais des fonctions de pédotransfert (FPT) et des réseaux de neurones artificielles (RN) en utilisant les propriétés du sol les plus facilement mesurables. Le recours à ces techniques a été dicté par la nécessité de trouver un moyen plus rapide, fiable et plus facile pour comprendre les processus du sol et évaluer l'état des sols dans le Bas-Cheliff.

Ainsi ces techniques nous ont permis d'estimer la stabilité structurale à travers un jeu de données disponible du territoire national et international.

Globalement, sur la base de la validation par utilisation du coefficient de détermination (R^2) et de l'erreur quadratique moyenne (MSE), il a été observé que la performance des réseaux de neurones était meilleure que celle des fonctions de pédotransfert (FPT), en effet contrairement aux réseaux de neurones qui ont montrés des R^2 plus élevés et des MSE plus faibles, les modèles FPT ont abouti des MSE plus élevée (0.03 - 0.36) et des R^2 plus faibles.

En-outre, à l'exception de la classe des sols argilo-limoneux modérément riche en matière organique ($P < 0,01$), les prédictions des fonctions FPT n'étaient pas significatives ($P > 0,05$), alors que les prédictions relatives aux réseaux de neurones (ANN) étaient statistiquement significatives ($P < 0.05$) à hautement significatives ($P < 0.01$).

Pour les réseaux de neurones artificiels, il a été constaté que plus le nombre de variables d'entrée est élevé, plus la prédiction du MWD est meilleure, en plus, il a été remarqué que lors de l'utilisation d'un nombre élevé de neurones cachés associées à la fonction d'activation gaussienne les performances de la fonction base radiale (RBF) étaient meilleurs que celles de la fonction (MLP).

Ainsi, en raison de l'efficacité des réseaux de neurones (RN) dans prédiction de la stabilité des agrégats, cette technique doit être prise en considération comme un outil alternatif, car les méthodes d'estimation traditionnelles de la stabilité des agrégats sont coûteuses et nécessitent du temps et de l'effort, en particulier dans les régions très vastes et hétérogènes.

Suite à nos résultats, on s'attend à ce que les performances des réseaux de neurones et des fonctions de pédotransfert seraient meilleures par addition d'autres informations supplémentaires, ce qui représente un catalyseur pour des recherches plus approfondies sur

ces techniques en explorant d'autres paramètres de sol plus facilement mesurables, pour des prédictions de plus en plus précises.

A travers la modélisation géostatistique, il a été remarqué que les meilleures estimations de la stabilité ont été atteintes par utilisation des modèles gaussien et stable, en effet selon la validation croisée ces deux modèles fournissent les plus forts coefficients de détermination (R^2), et la plus faible erreur moyenne (0.001), les résultats de la modélisation géostatistique ont aussi montré une stabilité variable allant de 0.6 mm (sols instables) à 1.4 mm (sols stables), les sols les plus stables étaient localisés au centre de la plaine du Bas-Cheliff et dans la direction Nord-Ouest, alors que les sols les moins stables étaient localisés à la périphérie de la plaine.

Enfin, Il a été remarqué que le co-krigeage améliore l'estimation de la stabilité structurale par comparaison au krigeage, en utilisant le CaCO_3 , la conductivité électrique et la matière organiques comme co-variables.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques :

- Abiven S., Menasseri S., Angers D.A, Leterme P. (2007). Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during decomposition of organic materials. *European Journal of Soil Science*, 58, 239-247.
- Ababou A, Chouieb M, Khader M, Mederbal K, Daidi D, Bentayeb Z. (2009). Multivariate analysis of vegetation of the salted Lower-cheliff plain, Algeria. *Bol.Soc.Bot.Mex.* 85: 59-69.
- Abdelkafi I, Feki R, Bazin D. (2012). La prévision de l'inflation par la méthode des réseaux de neurones : Le cas de la Tunisie. *Éthique et économique/Ethics and Economics*, 9 (1), 2012.
- Angers D.A, Caron J. (1998). Plant-induced changes in soil structure: Processes and feedbacks. *Biogeochemistry*, 42, 55-72.
- Shalmani A, Shahrestani B, Asadi C, Bagheri F. (2010). Comparison of regression pedotransfer functions and artificial neural networks for soil aggregate stability simulation. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World 1 – 6 August 2010, Brisbane, Australia.
- Agatonovic-Kustrin S, Beresford R. (2000). Basic concepts of artificial neural network (ANN) modeling and its application in pharmaceutical research. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 5,717–727.
- Al-Durrah M, Bradford JM. (1982). The mechanism of raindrop splash on soil surface. *soil science society of America Journal*, 46, 1086-1090.
- Amini M, Abbaspour KC, Khademi H, Fathianpour N, Afyuni M, Schulin R. (2005). Neural network models to predict cation exchange capacity in arid regions of Iran. *Eur. J. Soil Sci.*, 53, 748-757.
- Anne P. (1945). Sur le dosage rapide du carbone organique des sols. *Annales Agronomiques* 15, 161-172.
- Algayer B, Le Bissonnais Y, Darboux F. (2014). Physico-chemical processes affecting soil aggregate stability: a review. In preparation.
- Amézketa E. (1999) Soil aggregate stability: a review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14, 83-151.
- Bronick C.J, Lal R. (2005) Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124, 3-22.
- Blackman JD. (1992). Seasonal variation in the aggregate stability of downland soils. *Soil Use and Management*, 8, 142-150.
- Bastet G, Bruand A, Quélin P, Cousin I. (1998). Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonctions de pédotransfert (FPT): une analyse bibliographique. *Etude de Gestion des sols* 5.
- Bastet G. (1999). Estimations des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonction de Pédotransfert. Développement de nouvelles approches, Université d'Orléans.
- BAIZE DENIS., (1988). Guide des analyses courantes en pédologie, Ed. INRRA paris. 172p.
- Baize D, Duval O, Richard G. (2013). Les sols et leurs structures, observations à différentes échelles. Chapitre I. Des volumes emboîtés à toutes échelles d'espace.
- Bishop CM. (1995). "Neural Networks for Pattern Recognition," Oxford University Press, Oxford.
- Black AS, Abdul-Hakim BMS. (1984). Soil structure effects and leaching of sodium following sodium chloride fertiliser applications. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 27: 399-403.

- Boiffin J. (1984). La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse de Decteur ingénieur INAPG 320 p annexes.
- Boulaine J. (1956). Carte des sols des plaines du Chélif au 1/50000, feuilles 1-5. inspection générale de l'Agriculture du gouvernement Générale de l'Algérie.
- Boulaine J. (1957). Etude des sols des plaines du Cheliff. Thèse d'Etat de l'Université d'Alger, 582 p.
- Bouma, J., van Lanen, H.A.J. (1986). Transfer functions and threshold values: from soil characteristics to land qualities. Quantified Land Evaluation Procedures, Proceedings of the International Workshop on Quantified Land Evaluation Procedures, 27 April– 2 May, Washington, DC.
- Bouma J. (1989). Using Soil Survey Data for Quantitative Land Evaluation. In "Advances in Soil Science" (B. A. Stewart, ed.), Vol. 9, pp. 177-213. Springer US.
- Bronick CJ, Lal R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124, 3-22.
- Bruand A. (1990): Etude expérimentale sous pluie simulée de la formation des croûtes
- BRADAI A. (2017) .Evolution de la qualité géochimique des eaux souterraines utilisées dans l'irrigation et leur impact sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-Chélif. Thèse doctorat. pp 34
- Superficielles, apport à la notion d'érodibilité des sols. Cah. ORSTOM, Ser. Pédol., vol. 27, n°1-2, 31-40
- Bruand A, Cousin I, Richard G. (2004). Prédiction des propriétés de rétention en eau des sols: outils disponibles et perspective.
- Bullock, MS, Kemper WD, Nelson, SD. (1988). Soil cohesion as affected by freezing, water content, time and tillage. *Soil Science Society of America Journal* 52, 770-776.
- Cerda A. (1998). Changes in overland flow and infiltration after a rangeland fire in a Mediterranean scrubland. *Hydrological Processes* 12, 1031-1042.
- Chenu, C, Cosentino, D. (2007). Microbial regulation of soil structural dynamics. In *Architecture and Biology of Soils: Life in Inner Space*. Submitted. (K. Ritz & I.M. Young, (Editors). CABI Publishing.
- Chenu, C, Stotzky, G. (2002). Interactions between microorganisms and soil particles: an overview. In *Interactions between soil particles and microorganisms: impact on the terrestrial ecosystem*, UPAC Serie of Applied Geochemistry. (P.M. Huang, J.M. Bollag & N. Senesi, (Editors), pp. 85-131. Wiley and Sons, New York.
- Daoud Y. (1993). Contribution à l'étude des sols des plaines du Cheliff. Thèse de Doctorat d'Etat, INA Alger, 223 pages.
- De Ploey J, Poesen J. (1985). Aggregat stability, runoff generation and interill erosion.
- Dexter AR. (1988). Advances in characterization of soil structure. *Soil & Tillage Research* 11, 199-238.
- Dennis L. Corwin, Keith Loague, Timothy R. Ellsworth .(1999) .Assesment of non point source pollution in the Vadose zone. American Geophysical Union, Washington DC, USA.
- Diome F. (1996). Rôle de la structure du sol dans son fonctionnement hydrique. Sa quantification par la courbe de retrait. thèse de doctorat 3ème cycle, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 131 p.
- Dreyfus G. (1998). Les réseaux de neurones. *Mécanique Industrielle et Matériaux*, n°51
- ESDAC.(2015). Soil Susceptibility to Compaction. <http://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/soil-susceptibilitcompaction.accecd>, [02/05/2015]

- Efron B, Tibshirani RJ.. (1993). An introduction to the bootstrap. Monographs on Statistics and Applied Probability, vol. 57. Chapman & Hall, London, UK.
- Forges, A.C., Feller C., Jamagne M. et Arrouays D. (2008). "Perdus dans le triangle des textures." *étude et Gestion des Sols* 15: 97,111.
- Fortin JG, Anctil F, Parent LE, Bolider MA. (2008). Comparison of empirical daily surface incoming solar radiation models. *Agric. For. Meteorol.* 148,1332-1340.
- Gajic B, Dugalic G, Diurovic N. (2006). Comparison of Soil, Organic Matter Content, Aggregate Composition and Water Stability of Gleyic Fluvisol from Adjacent Forest and Cultivated Areas. *Agron. Res.* 4: 499–508.
- GAUCHER G., (1968). *Traité de pédologie agricole, le sol et ses caractéristiques agronomiques.* Ed. Dunod, Paris. 579 p.
- Hénin S. (1939) L'influence des facteurs climatiques sur la stabilité structurale des sols de limon. *Annales Agronomiques*, 9, 301-311
- Hénin S, Monnier G, Combeau A. (1958) Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Annales Agronomiques*, 9, 71-90.
- Haykin, S. 1994. *Neural networks.* MacMillan College Publishing Company.
- Jain A, Kumar, A. (2006). An evaluation of artificial neural network technique for the determination of infiltration model parameters *Appl Soft compute*,; Volume 6, pp. 272-282.
- Halitim A. (1988). *Sols des régions arides d'Algérie.* OPU Alger 384 p.
- INSID. (1998) .Projet pilote pour caractérisation de l'état actuel de la salinité du baschellif.Rapport 1,2 et 3.

- Kemper WD, Rosenau RC. (1986). Aggregate Stability and Size Distribution. In A. Klute (Ed) *Methods of soil analysis. Part 1.* 2nd edition, Agron. Monogr. 9 ASA and SSSA, Madison: 425-442.
- Kay BD. (1990) Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Advances in soil science*, 12, 1-41.
- Kay BD; Dexter AR. (1990) Influence of aggregate diameter, surface area and antecedent water content on the dispersibility of clay. *Canadian Journal of Soil Science*, 70, 655-671.
- Kemper WD. Rosenau RC. (1984) Soil cohesion as affected by time and water content. *Soil Science Society of America Journal*, 48, 1001-1006.
- Kemper WD. Rosenau RC. (1986) *Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods.* In: Klute, A. (Editor). *Aggregate stability and size distribution* 17. American Society of Agronomy -- Soil Science Society of America, 425-442.

- Kemper WD, Rosenau RC. Dexter AR. (1987) Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter content and temperature. *Soil Science Society of America Journal*, 51, 860-867.
- Kirkby MJ, Le Bissonais Y, Coulthard, TJ, Daroussin J , McMahon MD.(2000). The development of land quality indicators for soil degradation by water erosion. *Agriculture, Ecosystems & Environment.* 81, 125-135.
- Keshavarzi A, Fereydoon S, Sadeghnejad M. (2010). "Developing Pedotransfer Functions for Estimating Some Soil Properties using Artificial Neural Network and Multivariate Regression Approaches " *World Academy of Science, Engineering and Technology* 72.
- Lal R. (1991) Soil structure and sustainability. *Journal of sustainable agriculture.* 1, 67-92.
- Rattan L, Winfried E, Blum H, Valentin C, Bobby A. Stewart. (1998). "Methods of

Assesment of soil degradation," CRC Press.

- Le Bissonnais Y. (1989). Contribution à l'étude de la dégradation structurale superficielle : analyse des processus de microfissuration des agrégats par l'eau. *Science du sol*, 27, 187-199.
- LAMBERT J., (1975). Analyse du sol, El-Harrach, Alger. 110p
- Le Bissonnais Y. (1996) Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*. 47, 425-437.
- Le Bissonnais Y., Renaux B. & Delouche H. (1995). Interactions between soil properties and moisture content in crust formation, runoff and interrill erosion from tilled loess soils. *Catena*, 25, 33-46.
- Le Souder C. (1990). Effet d'un conditionneur minéral sur la formation des croûtes superficielles du sol sous l'action des pluies. Mode d'action du conditionneur sur la stabilité. Thèse Doct. INA PG., 181p.
- Le Bissonnais Y, Le Souder C. (1995). "Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion." *Etude de Gestion des sols* 2: 43-56.
- Lemmouchi M. (2013). Identification des Visages Humains par réseaux de neurones. Thèse de Magister, Université Batna, 94p.
- Loveland PJ, Whalley WR. (1991). Particle size analysis. In: Smith KA, Mullis ChE, editors. *Soil analysis: physical methods*. New York: Marcel Dekker; p. 271–328.
- Manyame C, Morgan CL, Heilman JL, Fatondji D, Gerard B, Payne WA. (2007). Modeling hydraulic properties of sandy soils of Niger using pedotransfer functions. *Geoderma*. 141, 407-415.
- Marchuk A. (2013). Effect of cations on structural stability of salt-affected soils. Thesis Doctorat of philosophy, School of Agriculture, Food and Wine, Adelaide University, 153p.
- Mahmood Alobyde Sahar I., Firas Shawkat Hamid, Ibrahim K. Sarhan Albayati. (2020). Comparison of Artificial Neural Network and Regression Pedotransfer Function for prediction of soil cation exchange capacity at Iraq, Ray ALJazeera, Mosul region, *Journal of Engineering Sciences and Information Technology* Volume (4), P: 90 – 109.
- McBratney AB, Minasny B, Cattle SR, Vervoort RW. (2002). From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma* 109, 41-73.
- McDonald, BNEDER. (1990). Etude de l'avant projet détaillé des extensions de Guerouaou et de Sebkhate Benziante et du réaménagement du Bas-Chéouf. Bureau National d'Etude pour le Développement Rural.
- Minasny B, McBratney AB, Bristow KL. (1999). Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma*. 93, 225-253.
- Moeys J. (2007). Variabilité spatiale et déterminismes agro-pédologiques du devenir d'un herbicide dans l'horizon de surface application au cas de l'isoproturon dans un secteur agricole de Beauce chartraine AgroParisTech.
- Morel, R. (1996) *Les sols cultivés*. Lavoisier, Paris.
- Mrabet R, Lahlou S, Le Bissonnais Y, Duval O. (2004). Estimation de la stabilité structurale des sols semi-arides marocains: Influence des techniques culturales simplifiées.
- Minasny B, McBratney, AB. (2000). Hydraulic conductivity pedotransfer functions for Australian soil. *Australian Journal of Soil Research* 38, 905– 926.
- Minasny B, McBratney AB. (2001). The Australian soil texture boomerang: a comparison of the Australian USDA/FAO soil particle-size classification systems. *Australian Journal of Soil Research* 39, 1443–1451.

- Minasny, B, McBratney, AB., (2002). The efficiency of various approaches to obtaining estimates of soil hydraulic properties. *Geoderma* 107, 55– 70.
- Minasny B, McBratney AB. (2002). The neuro-m method for fitting neural-network parametric pedotransfer functions. *Soil Science Society of America Journal* 66, 352– 361.
- McBratney Alex B, Budiman Minasny, Stephen R. Cattle, R. Willem Vervoort. (2002). From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma* 109 (2002) 41–73.
- McCulloch WS. Pitts W. (1943), A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5, p. 115-133.
- Moeys, J. (2007). Variabilité spatiale et déterminismes agro-pédologiques du devenir d'un herbicide dans l'horizon de surface application au cas de l'isoproturon dans un secteur agricole de Beauce chartraine Docteur.
- Minasny, Budiman, McBratney, Alex B., Bristow, Keith L. (1999). "Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves." *Geoderma* 93(3–4): 225-253.
- Navel A. (2011). Distribution, spéciation, impact et transfert du cuivre dans un sol sous vigne: rôle de la structuration spatiale et du statut organique. Thèse de doctorat, Université de Grenoble. 253p.
- Nerrand O, Roussel-ragot P, Personnaz L, Dreyfus G, Marcos S. (1993), Neural networks and non-linear adaptive filtering: unifying concepts and new algorithms, *Neural Computation*, 5, p. 165-197.
- Nemes A, Pachepsky Y, Rawls W, Wosten H, Zeilguer A. (2002). Using similarity and neural network approach to inter plate soil particle-size distribution In "17th WCSS", pp. 221-943, Thailand.
- Ouadah S. (2000). Analyse du déterminisme de la stabilité structurale des sols Cultivés. D.E.A. National de science du sol. 21 p.
- Oades JM. (1984). Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil*. 76, 319–337.
- Odeh IO, Onus A. (2008). Spatial analysis of soil salinity and soil structural stability in a semi arid region of New South Wales, Australia. *Environ Manage*. 42:265-78.
- Pachepsky YA, Timlin D, Varallyay G. (1996). Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 727-733.
- Pachepsky YA, Rawls WJ, Timlin D, (1999). The current status of Pedotransfer functions: their accuracy, reliability, and utility in field and regional scale modelling. In Corwin DL,
- Paz-Ferreiro J, Fu S. (2013). Biological indices for soil quality evaluation: perspectives and limitations. *Land degradation and development*. 27, doi 10.1002/ldr.2262.
- Pachepsky, Y.A, Timlin, A.D, Varallyay, G.V. (1996). "Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data." *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 727-733.
- Peverill KI, Sparrow LA, Reuter DJ. (1999). *Soil Analysis: An Interpretation Manual*. CSIRO Publishing, 388p.
- Philipeau G. 1992. Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes principales? Collection STA-ITCF. 93P
- Picton PD. (2000). *Neural Networks*, Palgrave Macmillan, New York.
- Pons C.H., Ben Rahim H., Tessier D, Clinard C., (1987) – Apport de la diffusion aux petits angles de rayons X à l'étude de la microstructure des matériaux argileux. Réunion internationale de la micromorphologie des sols Paris 1985, p.37-42.
- Rohoskova M, Valla M. (2004). Comparison of two methods for aggregate stability measurement – a review. *Plant soil environ* 8,379–382.

- Mrabet, R, Le Bissonnais Y, Duval O. (2004). Estimation de la stabilité structurale des sols semi-arides marocains : Influence des techniques culturales simplifiées. *Bulletin du Réseau Erosion*. 23: 405-415.
- Saidi D, Douaoui A, Le Bissonnais Y, Walter C. (1999). Sensibilité de la surface des sols des plaines du chélif à la dégradation structurale. *Etude de Gestion des sols* 6, 15-25.
- Saidi D, Le Bissonnais Y, Duval O, Daoud Y, Halitim A. (2004). Effet du sodium échangeable et de la concentration saline sur les propriétés des sols de la plaine du cheliff (Algérie). *Etude de Gestion des sols*. 11, 137-148.
- Saidi D, Le Bissonnais Y, Duval O, Daoud Y, Tessier D. (2008). Estimation et signification de la capacité d'échange cationique des sols salés du Chellif (Algérie). *Etude de Gestion des sols* 15, 241-253.
- Saidi D. (2005). Influence de la phase saline sur les propriétés physiques des matériaux argileux du Bas Cheliff, INA, Alger.
- Saidi D, Hamel Z, Ababou A. (2015). Using pedotransfer functions to assess aggregate stability: application to the Lower Cheliff soils, Algeria. *International Journal of Plant & Soil Science*, 8, 1–10.
- Sarmadian F, Taghizadeh Mehrjardi R, Akbarzadeh A. (2009). Modeling of some soil properties using artificial neural network and multivariate regression in Gorgan province, north of Iran. *Australian Journal of Basic and Applied Science* 3, 323-329.
- Seltzer P. (1946). Le climat de l'Algérie. *Inst. Météo. Et de Phys. Du globe. Univ. Alger*, 219 p.
- Schaap MG, Leij FJ, Van Genuchten M (1998). Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. *Soil Science Soc. Am. J* 62, 847-855.
- Schaap MG, Marcel G, Leij, Feike J. (1998). Using neural networks to predict soil water retention and soil hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research* 47, 37-42.
- Skujins J. (1991). *Semiarid Lands and Deserts: Soil Resource and Reclamation (Books in Soils, Plants, and the Environment)*. CRC Press, Utah, 648 pages.
- Six J, Elliott ET, Paustian K. (2004) Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology & Biochemistry*, 32, 2099-2103.
- Scheinost, AC, Schwertmann U. (1995). Predicting phosphate adsorption– desorption in a soilscape. *Soil Science Society of America Journal* 59, 1575– 1580.
- Scheinost AC, Sinowski W, Auerswald K. (1997). Regionalization of soil buffering functions: a new concept applied to K/Ca exchange curves. *Advances in GeoEcology* 30, 23– 38.
- Scheinost AC, Sinowski, W, Auerswald K. (1997). Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape: I. Developing a new pedotransfer function. *Geoderma* 78, 129–143.
- Siou LKA. (2011). Modélisation des crues de bassins karstiques par réseaux de neurones. Cas du bassin du Lez (France). Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 232p.
- Tamari S, Wosten JHM, Ruiz-Suarez JC. (1996). Testing an artificial neural network for predicting soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 1732-1741.
- Tessier D, Berrier J. (1979). Utilisation de la microscopie électronique à balayage de l'étude des sols. *Observation des sols humides soumis à différents Pf. Sciences du sol* 1, 67, 82
- Tessier D, Quirk JP. (1979). l'apport de la microscopie électronique dans la connaissance du gonflement des matériaux argileux. *C.R. Acad. Sci, Paris, T. 288, série D*, 1375-1378.
- TIR C., (2001). Dynamique saisonnière des nappes phréatiques dans la station

expérimentale de SEDI MEHDI-TOUGGOURT. Mémoire d'ingénieur, université de BATNA, 63p.

- Van Bavel, CHM. (1949). Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. *Soil Science Society America*, 20-23.
- Vereecken H, Weynants M, Javaux M. (2010). Using pedotransfer functions to estimate the Van Genuchten-Mualem soil hydraulic properties: a review. *Vadosse Zone J.* 9:795-820.
- Vitaly S. (2003). A learning algorithm for evolving cascade neural networks. *Neural Process*, 21-31.
- Wagner B, Tarnawski VR, Hennings, Müller V, Wessolek U, Plagge G R. (2001). Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. *Geoderma* 102, 275-297.
- Whitbread AM. (1995). Soil organic matter: Its fractionation and role in soil structure. p. 124-130. In Lefroy, RDB, Blair GJ. and Craswell ET. (Eds.) *Soil Organic Matter Management for Sustainable Agriculture*. ACIAR Proceedings No.56. Australian Centre for International Agricultural Research. Canberra.
- Wösten JHM, Pachepsky YA, Rawls WJ. (2001). Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology* 251, 123-150.
- Yilmaz I, Kaynar O. (2011). Multiple regression; ANN (RBF, MLP) and ANFIS model for Prediction of swell potential of clayey soils. *Expert Syst App*; Volume 38, pp.5958-5966.
- Zhongyi Qu; Xianyue Li; Dan Tian; Raghavendra B. Jana; Binayak P. Monhanty (2011). Development of Regional Scale Pedotransfert functions based on Bayesian Neural Networks in the Hetao Irrigation District of China. Seventh International Conference on Natural Computation, Shanghai, China.

ANNEXES

ANNEXES :

1-Le triangle de texture:

Le triangle de référence est le triangle rectangle ou le triangle équilatéral cette représentation s'appuie sur le fait quasi, dans un triangle équilatéral, ou même un point, des parallèles aux cotés, la somme des distance interceptés sur les coté est égale au côté du triangle. On procède de la manière suivante:

*Chaque côté du triangle est divisé en 100 parties égale un coté du triangle attribué à l'argile, un autre aux limons et le troisième aux sables, la somme de leurs pourcentage respectifs est égale à 100.

*L'intérieur du triangle est divisé en cases, chacune d'elles représentant un type granulométrique de sol caractérisé par les proportions d'un ou deux éléments dominants

. *L'emplacement du point représentatif d'un sol dans le triangle ne donne qu'une indication simple (HALITIM, 1988)

2 Les analyses physico-chimiques du sol :

a-Le calcaire total et le calcaire actif :

Dosage du calcaire total (carbonates totaux) : Méthode Normalisée (NF ISO 10693)

a) Terre fine + acide chlorhydrique
dégagement de gaz carbonique (CO₂).
mesure du volume en CO₂ dégagé.

Dosage du calcaire actif : Méthode Drouineau - (Galet) - Normalisée (NF X 31-106)

b) Terre fine + oxalate d'ammonium

Combinaison (insoluble) oxalate + calcium du calcaire du sol facile à dissoudre.

Dosage de l'excès d'oxalate => dosage différentiel du calcaire actif.

Signification et intérêt du Calcaire Actif

Pour les plantes, c'est la "réactivité" du calcaire qui est importante d'où la notion de **Calcaire Actif**. Celui-ci est quantifié par un test d'aptitude des carbonates a une dissolution rapide qui n'est pas appliqué lorsque le calcaire total < 5 %. Le Calcaire Actif est la base du calcul de l'indice du Pouvoir Chlorosant (IPC) (estimation des risques de carence en fer, choix du porte-greffe en viticulture et arboriculture).

$$IPC = \frac{C.N}{Fer2} \times 10\,000 \quad (C.A. = \text{Calcaire Actif } \%, \text{ Fer} = \text{Fer facilement extractible en mg/kg})$$

Interprétation :

Calcaire total en %	0,5 5 10 25 50					
Le sol est :	Non calcaire	Très faible en calcaire	Faible en calcaire	Calcaire	Fortement calcaire	Très fortement calcaire
Calcaire Actif en %	5		10	20		
Le sol est :	Faible		Assez élevé	Élevé		Très élevé
IPC*	10		20	30	60	
Le sol est :	Faiblement chlorosant		Moyennement chlorosant	Chlorosant	Très chlorosant	

* Indice de Pouvoir Chlorosant

b- le pH

le pH (eau) est déterminé dans une suspension de terre fine et d'eau distillée. Le rapport sol/liquide est égal à 1/2.5. La lecture se fait à l'aide d'un pH-mètre (pH-mètre étalonné à l'aide d'une solution tampon de pH connu; pH =7).

Annexe b : Classification des sols d'après le pH et leurs spéculations agricoles (GAUCHER, 1968)

Designation des sols	pH	Cultures on speculation agricoles
Sols extrêmementacides	de 3 à 4,5	Marécage landes ou forêts, d'espèces acidiphiles
Sols trèsfortementacides	de 4,5 à 5	Lands, prairies
Sols trèsacides	de 5 à 5,5	Prairies, cultures d'espèces acidophiles (croissance difficile des légumineuses)
Sols acides	de 5,5 à 6	Prairies et cultures
Sols faiblementacides	de 6 à 6,75	Toutes cultures sauf légumineuses calcicoles
Sols neuters	de 6,75 à 7,75	Touts cultures
Sols alcalins	de 7,75 à 8,5	Toutes cultures sauf espèce calcifuges
Sols trèsalcalins	au- dessus	Difficultés ou échec des cultures européennes usuelles

c-La conductivité électrique :

La méthode de mesure consiste à mélanger l'échantillon de sol avec une quantité d'eau suffisante pour obtenir de fortes dilutions. Le rapport sol/eau est en général de 1/5 ou 2/5. Ce rapport est le même quel que soit la texture de l'échantillon (WADE,1998).

Annexe c : Normes d'interprétation de l'état de salinité d'un sol (LAMBRT, 1975).

Résultats CE (mmhos/cm en 25 C°)	<1	0.2	0.5	0.5-1	1>
Interpritations	Très faible	Faible à moyenne	Moyenne à élevée	Très élevée	Très forte salinité

d-Le carbone organique et la matière organique :

Le carbone organique est déterminé par la méthode de (WALKLEY et BLACK), le résultat obtenu est multiplié par 1,72 pour arriver au pourcentage de MO. La mesure est basée sur la transformation du carbone en gaz carbonique sous l'action d'une quantité connue d'un oxydant puissant; le bichromate de potassium en milieu acide (acide sulfurique) On admet que

l'oxygène consommé est proportionnel au C que l'on veut doser Le bichromate en excès est titré par un réducteur (sulfate de fer et d'ammonium).

Annexe d : Classification des teneuses en matière organique (MO) dans le sol

MO (%)	Sol
< 1%	Taux très faible; sol très pauvre en MO.
1,2%	Taux faible; sol pauvre en MO.
2,4%	Bonne; sol riche en MO.
>4%	Très bonne; sol très riche en MO.

(DEJON *et al*, 1998 in Tir 2001).

e-L'analyse granulométrique du sol :

Plusieurs méthodes sont utilisées pour la détermination de la texture des sols. Dans notre cas on a suivi la méthode internationale à la pipette de Robinson, qui permet de connaître la répartition des particules minérales inférieures à (2mm), selon des classes de grosseurs, il s'agit de connaître ou de déduire la répartition des particules minérales d'un échantillon selon les différentes fractions granulométriques (BAIZE, 1988). Selon cette méthode, la destruction de la matière organique et le ciment de calcaire est faite respectivement par l'eau oxygénée (H₂O₂) et le (HCl), la dispersion des particules (colloïdes) est réalisée par addition de l'hexa-méta-phosphate de sodium. Le prélèvement des argiles et des limons fins a été effectué par la pipette de Robinson; tandis que les sables (gros et fins) ont été récupérés par tamisage et enfin les limons grossiers par différences par rapport à 100%. La composition granulométrique est exprimée en pour cent (%). Cette analyse sert à déterminer la texture du sol par l'utilisation du triangle textural et dans notre cas on a utilisé celui de USDA.