

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار- عنابة

Faculté des Sciences

Année : 2018

Département de biologie

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT EN SCIENCES

Variabilité spatiale de la qualité du sol dans les agrosystèmes du Sahara algérien

Option

Biologie végétale

Par

BENBRAHIM Fouzi

DIRECTEUR DE THÈSE : M. BENSLAMA Mohamed Professeur U.B.M. Annaba

Devant le jury

PRESIDENT : M. LAIFA Aziz Professeur U.B.M. Annaba
EXAMINATEUR : M. KHANCHOUL Kamel Professeur U.B.M. Annaba
EXAMINATEUR : M. CHELOUFI Hamid Professeur U.K.M. Ouargla
EXAMINATEUR : Mme. BELOUAHEM-ABED Djamilia Maître de recherche I.N.R.F. El Kala
EXAMINATEUR : M. SLIMANI Ali Maître de conférences U.C.B. El Tarf

Dédicaces

A la mémoire de ma mère et de mes grands-parents.

A mon père Rabah, mon école de volonté, patience et honnêteté

A ma belle mère

A ma femme et mes enfants, HIBA, Iyad et Tasnim

A mes chers frères et sœurs

A mes nièces et neveux

A toute ma famille et ma belle famille.

A Tous mes amis.

Je dédie ce travail.

Fouzi

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer mes remerciements et toute ma reconnaissance à l'égard de:

- Monsieur LAIFA Aziz, Professeur à l'université BADJI MOKHTAR-Annaba, d'avoir accepté de présider le jury de soutenance de cette thèse.
- Mon directeur de thèse, Monsieur BENSLAMA Mohamed, Professeur à l'université BADJI MOKHTAR-Annaba, non seulement pour l'aide très précieuse qu'il m'a apporté, mais aussi pour sa patience et sa totale disponibilité lors de la réalisation du présent travail.

J'exprime ma profonde gratitude aux membres du jury, qui nous ont honoré par leur participation à l'examen de ce travail :

- Monsieur KHANCHOUL Kamel, Professeur à l'université BADJI MOKHTAR-Annaba
- Monsieur CHELOUFI Hamid, Professeur à l'université KASDI MERBAH-Ouargla
- Monsieur SLIMANI Ali, Maitre de conférences A à l'université CHADLI BENDJEDID-El Tarf.
- Madame BELOUAHEM-ABED Djamila, Maitre de recherche à Institut National de la Recherche Forestière-El Kala.

Mes remerciements vont aussi à :

- Monsieur KRAIMAT M., enseignant-chercheur à l'université de Ghardaïa, pour sa précieuse aide lors de la réalisation de la présente thèse.
- Monsieur BENHAMIDA S., Ingénieur à l'A.N.R.H. Ouargla, pour son aide et ses conseils.
- L'ensemble des membres du laboratoire des Sols et développement durable de l'université BADJI MOKHTAR-Annaba
- Mes collègues du département de biologie de l'université de Ghardaïa.

- L'équipe de jeunes chercheurs de l'université de Ghardaïa, ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail, DAREM S., CHIKHI F., HAMEL I., HEROUNI A., GABANI N., CHENINI M., DAHMANE B., FENNICHE F., KETILA S., ROUIDJI I., ZERGAT A., BENAMAR W. et HOUTIA A.
- Tous les propriétaires et personnel des trois fermes agricoles pour leur accueil et leurs aides sur terrain.

Je remercie très chaleureusement Monsieur OUAKID M.L., Professeur à l'université BADJI MOKHTAR-Annaba, pour ses conseils et l'aide précieuse qu'il m'a apportés.

Je tiens aussi à remercier mes amis, qui n'ont économisé aucun effort pour m'aider et m'encourager : BOUTMEDJET A., BELAROUCI M., GHARIB T., HADJSEYD A., KEMASSI A., OULAD HADDAR R., SADINE S., ALIOUA Y., DADAMOUSA M.L., AGGOUN M.S., OULAD HADDAR A. et KHELLAF K...

J'exprime mes remerciements et ma reconnaissance à Monsieur DADAMOUSA B., Professeur en chimie et recteur de l'université de Ghardaïa, pour son soutien moral et ses conseils.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur KHENE B., Doyen de la faculté des sciences de la nature et de la vie et sciences de la terre et Madame BENSANIA W., vice-doyen chargée de la pédagogie, pour leurs aides et soutien.

Enfin, je remercie très particulièrement ma chère épouse pour son soutien quotidien indéfectible et son enthousiasme à l'égard de mes travaux comme de la vie en général, qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je remercie dans une même pensée toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse, qu'ils trouvent ici, l'expression de mon extrême reconnaissance.

Variabilité spatiale de la qualité du sol dans les agrosystèmes du Sahara algérien

La productivité des sols sahariens dépend de la variabilité de ses propriétés à l'échelle du champ. Cette étude vise la détermination de la variabilité spatiale de la salinité, du pH et du calcaire total du sol par une approche géostatistique.

La présente étude a été réalisée au Sahara septentrional algérien, les échantillons ont été prélevés sur une profondeur de 0 à 25 cm et analysés pour la salinité du sol, le pH et le calcaire total.

Les eaux d'irrigation proviennent de deux nappes : miopliocène et albiennne, leur qualité varie de mauvaise à excellente. Les sols sont non salés, d'un pH alcalin et modérément à fortement calcaire.

L'analyse couplée de la variance et du taux de variation annuelle des paramètres étudiés a montré une augmentation significative de la salinité dans les stations ERIAD et HOUTIA et une diminution non significative de la salinité du sol dans la station BENHAMOUDA ainsi qu'une diminution très hautement significative du pH et du calcaire total dans la station HOUTIA.

L'analyse géostatistique a révélé divers modèles et niveaux de distribution spatiale des propriétés étudiées. Les résultats ont montré une dépendance spatiale faible à modérée pour la salinité, modérée pour le pH et modérée à forte pour le calcaire total.

L'analyse variographique a montré que l'effet de pépite est très faible pour la salinité et le pH et varie de faible à élevé pour le calcaire total. La portée varie de 27,5 mètres pour la salinité à 103,59 mètres pour le calcaire total, confirmant ainsi la validité de l'échantillonnage adopté et permettant l'optimisation des plans d'échantillonnage futurs.

Les résultats de la validation croisée ont abouti à la sélection des modèles de variogrammes les plus fiables à savoir, le circulaire, le gaussien et l'exponentiel, qui ont servi à la réalisation des cartes de variabilité spatiale par krigeage ordinaire.

Collectivement, les résultats indiquent que l'intensification agricole en zones arides a influencé quantitativement et qualitativement la teneur et la variabilité spatiale des propriétés du sol, résultat qui doit être pris en considération pour une gestion intégrée et durable des terres dans des régions similaires.

Mots clés : Sahara, géostatistiques, salinité, pH, calcaire total.

التباين المكاني لنوعية التربة في النظم الزراعية في الصحراء الجزائرية

تعتمد إنتاجية التربة الصحراوية على التوزيع المكاني لخصائص التربة على مستوى الحقل. تهدف هذه الدراسة إلى تحديد التباين المكاني لملوحة التربة، ودرجة الحموضة ونسبة الكلس وفقا لنهج جيواحصائي.

أجريت هذه الدراسة في الصحراء الشمالية الجزائرية، وتم جمع عينات التربة من عمق 0 إلى 25 سم وتحليلها لملوحة التربة، ودرجة الحموضة ونسبة الكلسية.

مياه السقي مستقدمة من طبقتين جوفيتين: ميوبليوسين و ألبان، ونوعيتها تختلف من سيئة إلى ممتازة. التربة غير مالحة، قلوية، ومعتدلة إلى عالية الكلسية.

أظهر التحليل المتقارن للتباين ومعدل التغير السنوي للخصائص المدروسة زيادة دالة في الملوحة في محطتي الرياض وحوتيه وانخفاض دال في ملوحة التربة في محطة بن حمودة، إضافة إلى انخفاض عالي الدلالة في الأس الهيدروجيني والكلسية في محطة حوتيه.

كشف التحليل الجيو إحصائي عن نماذج ومستويات مختلفة للتوزيع المكاني للخصائص المدروسة. وأظهرت النتائج اعتماد مكاني من منخفض إلى معتدل للملوحة، معتدل لدرجة الحموضة ومتوسط إلى مرتفع للكلسية.

يبين التحليل الفاربيوغرافي أن التشذر منخفض جدا بالنسبة للملوحة ودرجة الحموضة ويختلف من منخفض إلى مرتفع للكلسية. ويتراوح مدى التأثير من 27.5 متر للملوحة إلى 103.59 متر للكلسية، مما يؤكد صحة خطة أخذ العينات المعتمدة ويسمح بتحسين خطط أخذ العينات مستقبلا.

أدت نتائج التحليل المتبادل إلى اختيار النماذج الأكثر موثوقية، وهي النماذج الدائرية، الجوسية والأسية، والتي استخدمت لإنجاز خرائط التوزيع المكاني بواسطة الكريجينغ العادي.

تشير النتائج مجتمعة إلى أن التكثيف الزراعي في الأراضي الجافة قد أثر كميًا ونوعيًا على المحتوى والتغير المكاني لخصائص التربة، وهو أمر يلزم النظر فيه من أجل تسيير متكامل ومستدام للأراضي في مناطق مماثلة.

الكلمات الدالة : الصحراء، الجيو إحصاء، الملوحة، درجة الحموضة، الكلسية.

Spatial variability of soil quality in agrosystems of the Algerian Sahara

Productivity of Saharan soils depends on the variability of these properties at field scale. This study aimed at determining the spatial variability of soil salinity, pH and soil calcareous by a geostatistical approach.

The present study was carried out in the Algerian northern Sahara, soil samples were collected from a depth of 0 to 25 cm and analyzed for soil salinity, pH and calcareous.

The irrigation water comes from two aquifers: Miopliocene and Albian, their quality varies from bad to excellent. Soils are non-saline, alkaline, and moderately to strongly calcareous.

The coupled analysis of variance and annual rate of variation of the studied parameters showed a significant increase of salinity in the ERIAD and HOUTIA stations and a non-significant decrease of soil salinity in BENHAMOUDA station as well as a very highly significant decrease in pH and calcareous containing in the HOUTIA station.

Geostatistical analysis revealed various models and levels of spatial distribution of studied properties. The results showed a low to moderate spatial dependence for salinity, moderate for pH and moderate to high for calcareous.

Variographic analysis showed that nugget effect is very low for salinity and pH and varies from low to high for calcareous. The range varies from 27.5 meters for salinity to 103.59 meters for calcareous, confirming the validity of the sampling adopted and allowing the optimization of future sampling plans.

Results of cross-validation led to the selection of the most reliable variograms models namely, circular, Gaussian and exponential, which were used for realization of spatial variability maps by ordinary kriging.

Collectively, the results indicate that agricultural intensification in dry lands has quantitatively and qualitatively influenced the content and spatial variability of soil properties, result that needs to be considered for integrated and durably land management in similar regions.

Key words: Sahara, geostatistics, salinity, pH, calcareous.

ASE	: Erreur standard moyenne d'interpolation (average standard error)
C.E.	: Conductivité Electrique
CV	: Coefficient de variation
DDS	: Degré de dépendance spatiale
E.R.I.A.D.	: Entreprise Régionale d'Industrie Alimentaire et Dérivées
ME	: Erreur moyenne (de prédiction) (Mean error)
MSE	: Erreur moyenne standardisée (mean standardized error)
O.N.M.	: Office National de Météorologie
P1	: Parcelle irriguée n° 01 de la station HOUTIA
P2	: Parcelle irriguée n° 02 de la station HOUTIA
PBH	: Parcelle irriguée de la station BENHAMOUDA
pH	: Potentiel hydrogène
POGX	: Parcelle irriguée de la station de Ouargla
R	: Parcelle de référence de la station HOUTIA
RBH	: Parcelle de référence de la station BENHAMOUDA
RMSE	: Erreur quadratique moyenne (root-mean-square error)
RMSSE	: Erreur quadratique moyenne standardisée (root-mean-square standardized error)
ROGX	: Parcelle de référence de la station de Ouargla
SAR	: Sodium Adsorption Ratio (taux d'adsorption de sodium)
TSP	: Triple Super Phosphate
TVA	: Taux de Variation Annuelle
U.S.D.A.	: United States Department of Agriculture

N°	Titre	Page
Figure 01	Limites du Sahara septentrional algérien	5
Figure 02	Diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN de la région de Ouargla (2007 -2016)	11
Figure 03	Diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN de la région de Ghardaïa (2007 -2016).	11
Figure 04	Place des deux régions d'étude (Ouargla et Ghardaïa) sur le Climagramme d'EMBERGER (2007-2016)	13
Figure 05	Situation géographique des stations d'étude	15
Figure 06	Localisation des parcelles de la station 01	16
Figure 07	Localisation des parcelles de la station 02	17
Figure 08	Localisation des parcelles de la station 03	18
Figure 09	Plan d'échantillonnage dans les stations 01 et 02	19
Figure 10	Plan d'échantillonnage général dans la station 03	20
Figure 11	Plan d'échantillonnage détaillé dans la station 03	20
Figure 12	Variogramme	26
Figure 13	Classification des eaux d'irrigation dans les stations d'étude (Diagramme de RIVERSIDE)	34
Figure 14	Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation dans les stations d'étude (Diagramme de WILCOX)	36
Figure 15	Diagramme de PIPER pour les eaux des stations d'étude	37
Figure 16	Boîte à moustaches de la variation de la salinité dans la station 01	40
Figure 17	Boîte à moustaches de la variation de la salinité dans la station 02	41
Figure 18	Boîte à moustaches de la variation de la salinité dans la station 03	43
Figure 19	Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle R (Circulaire)	44
Figure 20	Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle R (sphérique)	45
Figure 21	Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle R (Exponentiel)	45
Figure 22	Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle R (Gaussien)	46
Figure 23	Carte de variabilité spatiale de la salinité dans la parcelle de référence	48
Figure 24	Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle P1 (Circulaire)	49
Figure 25	Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle P1 (sphérique)	49
Figure 26	Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle P1 (Exponentiel)	50
Figure 27	Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle P1 (Gaussien)	51
Figure 28	Carte de variabilité spatiale de la salinité dans la parcelle P1	52
Figure 29	Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle P2 (Circulaire)	53
Figure 30	Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle P2 (sphérique)	54
Figure 31	Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle P2 (Exponentiel)	54
Figure 32	Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle P2 (Gaussien)	55
Figure 33	Carte de variabilité spatiale de la salinité dans la parcelle P2	57
Figure 34	Boîte à moustaches de la variation du pH du sol dans la station 03	64
Figure 35	Variogramme du pH du sol dans la parcelle T (Circulaire)	65
Figure 36	Variogramme du pH du sol dans la parcelle T (sphérique)	66

Figure 37	Variogramme du pH du sol dans la parcelle T (Exponentiel)	66
Figure 38	Variogramme du pH du sol dans la parcelle T (Gaussien)	67
Figure 39	Carte de variabilité spatiale du pH dans la parcelle R	69
Figure 40	Variogramme du pH du sol dans la parcelle P1 (Circulaire)	70
Figure 41	Variogramme du pH du sol dans la parcelle P1 (sphérique)	70
Figure 42	Variogramme du pH du sol dans la parcelle P1 (Exponentiel)	71
Figure 43	Variogramme du pH du sol dans la parcelle P1 (Gaussien)	72
Figure 44	Carte de variabilité spatiale du pH dans la parcelle P1	73
Figure 45	Variogramme du pH du sol dans la parcelle P2 (Circulaire)	74
Figure 46	Variogramme du pH du sol dans la parcelle P2 (sphérique)	75
Figure 47	Variogramme du pH du sol dans la parcelle P2 (Exponentiel)	75
Figure 48	Variogramme du pH du sol dans la parcelle P2 (Gaussien)	76
Figure 49	Carte de variabilité spatiale du pH dans la parcelle P2	78
Figure 50	Boîte à moustaches de la variation du calcaire total dans la station 03	83
Figure 51	Variogramme du calcaire total dans la parcelle R (Circulaire)	84
Figure 52	Variogramme du calcaire total dans la parcelle R (sphérique)	85
Figure 53	Variogramme du calcaire total dans la parcelle R (Exponentiel)	85
Figure 54	Variogramme du calcaire total dans la parcelle R (Gaussien)	86
Figure 55	Carte de variabilité spatiale du calcaire total dans la parcelle R	88
Figure 56	Variogramme du calcaire total dans la parcelle P1 (Circulaire)	89
Figure 57	Variogramme du calcaire total dans la parcelle P1 (sphérique)	89
Figure 58	Variogramme du calcaire total dans la parcelle P1 (Exponentiel)	90
Figure 59	Variogramme du calcaire total dans la parcelle P1 (Gaussien)	91
Figure 60	Carte de variabilité spatiale du calcaire total dans la parcelle P1	92
Figure 61	Variogramme du calcaire total dans la parcelle P2 (Circulaire)	93
Figure 62	Variogramme du calcaire total dans la parcelle P2 (sphérique)	94
Figure 63	Variogramme du calcaire total dans la parcelle P2 (Exponentiel)	94
Figure 64	Variogramme du calcaire total dans la parcelle P2 (Gaussien)	95
Figure 65	Carte de variabilité spatiale du calcaire total dans la parcelle P2	97

N°	Titre	Page
Tableau 01	Limites géographiques de Ouargla et de Ghardaïa	6
Tableau 02	Géomorphologie et pédologie des zones d'étude	7
Tableau 03	Données climatiques des zones d'étude de 2007 à 2016	8
Tableau 04	Classes d'intensité de la variabilité	24
Tableau 05	Classes de dépendance spatiale	27
Tableau 06	Résultats d'analyse des eaux d'irrigation	33
Tableau 07	Qualité des eaux d'irrigation dans les stations d'étude	35
Tableau 08	Faciès chimique des eaux d'irrigation	38
Tableau 09	Résultats d'analyse de la salinité du sol dans la station 01	39
Tableau 10	Test de Tukey de la salinité du sol dans la station 01	40
Tableau 11	Résultats d'analyse de la salinité du sol dans la station 02	41
Tableau 12	Test de Tukey de la salinité du sol dans la station 02	42
Tableau 13	Résultats d'analyse de la salinité du sol dans la station 03	42
Tableau 14	Test de Tukey de la salinité du sol dans la station 03	43
Tableau 15	Validation croisée des variogrammes de la salinité de la parcelle de référence	47
Tableau 16	Validation croisée des variogrammes de la salinité de la parcelle P1	51
Tableau 17	Validation croisée des variogrammes de la salinité de la parcelle P2	56
Tableau 18	Modèles de variogramme les mieux adaptés et paramètres des modèles pour la salinité du sol	60
Tableau 19	Résultats d'analyse de la réaction du sol	63
Tableau 20	Test de Tukey de la réaction du sol dans la station 03	64
Tableau 21	Validation croisée des variogrammes du pH de la parcelle de référence	68
Tableau 22	Validation croisée des variogrammes du pH de la parcelle P1	72
Tableau 23	Validation croisée des variogrammes du pH de la parcelle P2	77
Tableau 24	Modèles de variogramme les mieux adaptés et paramètres des modèles pour le pH du sol	80
Tableau 25	Résultats d'analyse du taux de calcaire total	82
Tableau 26	Test de Tukey du calcaire total dans la station 03	83
Tableau 27	Validation croisée des variogrammes du calcaire total de la parcelle de référence	87
Tableau 28	Validation croisée des variogrammes du calcaire total de la parcelle P1	91
Tableau 29	Validation croisée des variogrammes du calcaire total de la parcelle P2	96
Tableau 30	Modèles de variogramme les mieux adaptés et paramètres des modèles pour le taux du calcaire total	99

Table des matières

Introduction	1
Première partie : Matériel et méthodes d'étude	
Chapitre I : Présentation des zones d'étude	5
1. Situation géographique	6
2. Géomorphologie, géologie et pédologie	6
3. Hydrogéologie	7
4. Synthèse climatique et bioclimatique	8
4.1. Synthèse climatique	8
4.1.1. Température	9
4.1.2. Précipitations	9
4.1.3. Vents	9
4.2. Synthèse bioclimatique	10
4.2.1. Diagramme ombrothermique	10
4.2.2. Climagramme d'Emberger	12
Chapitre II : Matériel et méthodes d'étude	14
1. Approche méthodologique	14
2. Choix du site d'étude	14
3. Présentation des stations d'étude	16
3.1. Station 01 : Ferme E.R.I.A.D/Agro Sud Ouargla	16
3.2. Station 02 : Ferme BENHAMOUDA Ghardaïa	17
3.3. Station 03 : Ferme HOUTIA Ghardaïa	18
4. Echantillonnage	19
5. Analyses au laboratoire	21
5.1. Analyses du sol	21
5.2. Analyses de l'eau	21
6. Analyses statistiques	22
6.1. Variation annuelle des paramètres étudiés	22
6.2. Statistiques descriptives	22
6.3. Analyse de variance à un facteur	23
6.4. Coefficient de variation	23
7. Modélisation géostatistique	24
7.1. Variogramme expérimental	25
7.2. Validation croisée	28
7.3. Krigeage	29
7.4. Réalisation des cartes thématiques	30

Deuxième partie : Résultats et Discussions	
Chapitre III : Caractéristiques des eaux d'irrigation	31
1. Critères de classification des eaux d'irrigation	31
1.1. Salinité de l'eau	31
1.2. Danger d'alcalinisation du sol	32
1.3. Le faciès chimique (Diagramme de PIPER)	33
2. Caractérisation de l'eau d'irrigation	33
Chapitre IV: Etude de la variabilité spatiale de la salinité du sol	39
1. Etude de la salinité	39
1.1. Etude de la salinité du sol dans la station 01	39
1.2. Etude de la salinité du sol dans la station 02	40
1.3. Etude de la salinité du sol dans la station 03	42
2. Modélisation géostatistique de la variabilité spatiale de la salinité	44
2.1. Modélisation géostatistique de la salinité dans la parcelle de référence	44
2.1.1. Analyse variographique	44
2.1.2. Validation croisée	46
2.1.3. Cartographie par krigeage	47
2.2. Modélisation géostatistique de la variabilité de la salinité dans les parcelles cultivées	48
2.2.1. Modélisation géostatistique de la variabilité de la salinité dans la parcelle P1	48
2.2.1.1. Analyse variographique	48
2.2.1.2. Validation croisée	51
2.2.1.3. Cartographie par krigeage	52
2.2.2. Modélisation géostatistique de la variabilité de la salinité dans la parcelle P2	53
2.2.2.1. Analyse variographique	53
2.2.2.2. Validation croisée	55
2.2.2.3. Cartographie par krigeage	56
3. Discussions	57
Chapitre V. Etude de la variabilité spatiale de la réaction du sol	63
1. Etude de la réaction du sol	63
2. Modélisation géostatistique de la variabilité spatiale de la réaction du sol	65
2.1. Modélisation géostatistique de la variabilité du pH dans la parcelle de référence	65
2.1.1. Analyse variographique	65
2.1.2. Validation croisée	67
2.1.3. Cartographie par krigeage	68
2.2. Modélisation géostatistique de la variabilité du pH dans les parcelles cultivées	69
2.2.1. Modélisation géostatistique de la variabilité du pH dans la parcelle P1	69
2.2.1.1. Analyse variographique	69
2.2.1.2. Validation croisée	72
2.2.1.3. Cartographie par krigeage	73
2.2.2. Modélisation géostatistique de la variabilité du pH dans la parcelle P2	74
2.2.2.1. Analyse variographique	74

2.2.2.2. Validation croisée	76
2.2.2.3. Cartographie par krigeage	77
3. Discussions	78
Chapitre VI. Etude de la variabilité spatiale du calcaire total	82
1. Etude du taux de calcaire total du sol	82
2. Modélisation géostatistique de la variabilité spatiale du calcaire total	83
2.1. Modélisation géostatistique de la variabilité du calcaire total dans la parcelle de référence	84
2.1.1. Analyse variographique	84
2.1.2. Validation croisée	86
2.1.3. Cartographie par krigeage	87
2.2. Modélisation géostatistique de la variabilité du calcaire total dans les parcelles cultivées	88
2.2.1. Modélisation géostatistique de la variabilité du calcaire total dans la parcelle P1	88
2.2.1.1. Analyse variographique	88
2.2.1.2. Validation croisée	91
2.2.1.3. Cartographie par krigeage	92
2.2.2. Modélisation géostatistique de la variabilité du calcaire total dans la parcelle P2	93
2.2.2.1. Analyse variographique	93
2.2.2.2. Validation croisée	95
2.2.2.3. Cartographie par krigeage	96
3. Discussions	97
Conclusion	101
Références	106

Introduction

La qualité du sol a été définie comme étant la résultante des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol permettant la croissance et le développement des cultures, la régulation et la partition des flux d'eau à travers l'environnement et enfin jouant le rôle de filtre épurateur vis-à-vis des polluants (LARSON et PIERCE, 1992). La qualité du sol traduit sa capacité à retenir et à libérer l'eau et les éléments fertilisants, à maintenir sa biodiversité et à résister aux effets des pratiques pouvant conduire à sa dégradation (travail du sol, irrigation,...etc.). Il est évident que la qualité du sol vis-à-vis d'une utilisation donnée dépend de ses propriétés intrinsèques, de ses environnements géochimique et climatique et de son utilisation par l'homme (ARSHAD et COEN, 1992).

La qualité du sol est un élément essentiel pour l'évaluation de la durabilité de la mise en valeur agricole intensive. Un aménagement du sol ne peut être durable que s'il maintient ou améliore les qualités des sols et des eaux (LARSON et PIERCE, 1992).

La qualité physique, chimique et biologique des sols sahariens posent à la fois des problèmes d'ordre agronomique (aptitude culturale faible) et environnemental (érosion et ruissellement de surface) (KOULL, 2007).

Les sols de la zone saharienne d'Algérie contiennent des quantités relativement importantes de sels solubles qui s'accumulent et présentent souvent des croûtes calcaires ou gypseuses ou les deux à la fois (TIR, 2007).

La présence de ces accumulations gypseuses, calcaires et salines, d'une manière générale pose d'énormes problèmes de mise en valeur. Dans ce contexte, des études ont été menées sur ces types de sols en Algérie (HALITIM, 1988 ; MESKINE, 1992 ; BOUZID, 1993 ; BENZAH, 1994 ; DAOUD et HALITIM, 1994 ; OMEIRI, 1994 ; TRAORE, 1995 ; ABEDLSSELEM, 1998 ; BENSALD, 1999 ; BENBRAHIM, 2001 ; HAMDIAISSA, 2001 ; BOUMAAREF, 2003 ; DJILI et *al.*, 2003 ; BOUMAAREF, 2013 ; BENRBAHIM et *al.*, 2016...).

Selon HALITIM (1988), la mise en valeur des terres dans ces régions, l'augmentation de la productivité par unité de surface et leur conservation exigent ici plus qu'ailleurs des études détaillées.

Devant le besoin incessant d'une population en croissance démographique rapide, la rareté de la pluviométrie et la diminution des rendements dans les périmètres agricoles du nord du pays, l'instauration de nouveaux périmètres irrigués en zones arides d'Algérie devient impérative pour renforcer la production agricole nationale et maintenir l'équilibre socioéconomique de ces régions.

Le secteur agricole dans les régions sahariennes a connu des mutations importantes ces dernières années, la loi 83-18 portant l'accession à la propriété foncière agricole (A.P.F.A.) est à l'origine de cette nouvelle dynamique agricole. Elle s'est matérialisée par la création de périmètres de mise en valeur dans les vastes étendues sahariennes et par conséquent de nouvelles exploitations agricoles généralement hors oasis (CHELOUFI et BOUAMMAR, 2010).

Les années 90 se présentent comme étant les années de mise en place des grands périmètres de mise en valeur à caractère privé. En effet, le décret exécutif n°92-289 fixe les conditions de cessions et les modalités d'acquisition des terres sahariennes dans les périmètres de mise en valeur. L'objectif escompté est la création de périmètres de mise en valeur, en vue de la constitution de grandes exploitations destinées à recevoir des cultures stratégiques.

Introduite en zones sahariennes d'Algérie en 1986 dans les wilayas d'Ouargla et Adrar puis en 1989 dans la wilaya de Ghardaïa, la céréaliculture sous pivot a connu des fluctuations en matière de superficies emblavées et rendements. Cette spéculation est confrontée à plusieurs contraintes qui s'opposent à son développement (BENBRAHIM et *al.*, 2016), parmi lesquelles celles liés à la qualité des sols et à sa dégradation (salinité, sodicité...).

L'efficacité en agriculture requiert l'application de principes basés sur la variabilité au champ, ce qui crée de nouvelles exigences pour l'estimation et la cartographie de la variabilité spatiale des propriétés du sol (EMADI *et al.*, 2008 ; DARWISH *et al.*, 2015).

La variabilité spatiale des propriétés du sol est quelque peu inhérente à la nature, en raison des variations dans les matériaux parentaux du sol et de l'interface microclimatique (ZHAO *et al.*, 2007).

La distribution spatiale des propriétés du sol n'est pas uniforme. Cette répartition inégale des caractéristiques du sol peut refléter les processus qui se produisent dans l'écosystème plus large (CORSTANJE *et al.*, 2006).

Afin de modéliser la variabilité spatiale et délimiter la distribution spatiale des propriétés du sol, la géostatistique par l'analyse du variogramme et l'estimation du krigeage, fournissant la meilleure prédiction linéaire sans biais aux emplacements non échantillonnés, ont été largement utilisées (CAMBARDELLA *et al.*, 1994 ; DUFFERA *et al.*, 2007; SAUER *et al.*, 2003; WANG *et al.*, 2008 ; LIU *et al.*, 2008; ASKIN *et al.*, 2006 ; ZUO *et al.*, 2008 ; PARFITT *et al.*, 2009 ; EMADI *et al.*, 2008 ; AKRAMKHANOV *et al.*, 2011 ; NAJAFIAN *et al.*, 2012 ; AL-OMRAN *et al.*, 2013 ; SAFARI *et al.*, 2013).

En Algérie, peu de travaux sur la variabilité spatiale des propriétés du sol ont été réalisés, surtout ceux adoptant l'approche géostatistique dans le traitement de données, nous citons WALTER *et al.* (2001), IDDIR (2006), DOUAOUI *et al.* (2006) et ABDELHAFID (2010) et encore très peu aux zones arides, nous citons DEKHINAT *et al.* (2010).

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail, qui portera sur l'évaluation de la variabilité spatiale de quelques propriétés du sol en zones sahariennes, en adoptant les techniques de la géostatistique.

Notre travail aura comme objectif :

- De caractériser la variation spatiale de quelques propriétés de sol à savoir, la salinité, la réaction du sol et le calcaire total.
- D'estimer l'intensité de l'évolution de ces propriétés par l'analyse des taux de variation annuelle (TVA) et évaluer par conséquent, les variations causées par l'intensification agricole sur les paramètres étudiés.

La présente thèse comporte deux parties :

- La première partie, prendra en compte le matériel et les méthodes utilisés pour la réalisation de ce travail.
- La deuxième partie, traitera les résultats.

Première partie

Matériel et Méthodes d'étude

Chapitre I. Présentation des zones d'étude

Le Sahara est le plus grand des déserts, mais également le plus expressif et typique par son extrême aridité, c'est-à-dire celui dans lequel les conditions désertiques atteignent leur plus grande austérité (TOUTAIN, 1979 ; OZENDA, 1991). Il s'étend à travers le tiers septentrional de l'Afrique, de l'Atlantique à la Mer Rouge, sur une surface totale de 8 millions de Km² (LE HOUEROU, 1990).

Le Sahara septentrional (Fig. 01), zone de notre présente étude, occupe plus de 1 million de Km² et est soumis à l'extrême rigueur du climat méditerranéen, où les pluies surviennent presque toujours en hiver (LE HOUEROU, 1990). Il se présente comme une zone de transition entre les steppes méditerranéennes nord africaines et le Sahara central.

Nous avons choisi deux zones d'études au sein du Sahara septentrional algérien : Ouargla et Ghar daïa.

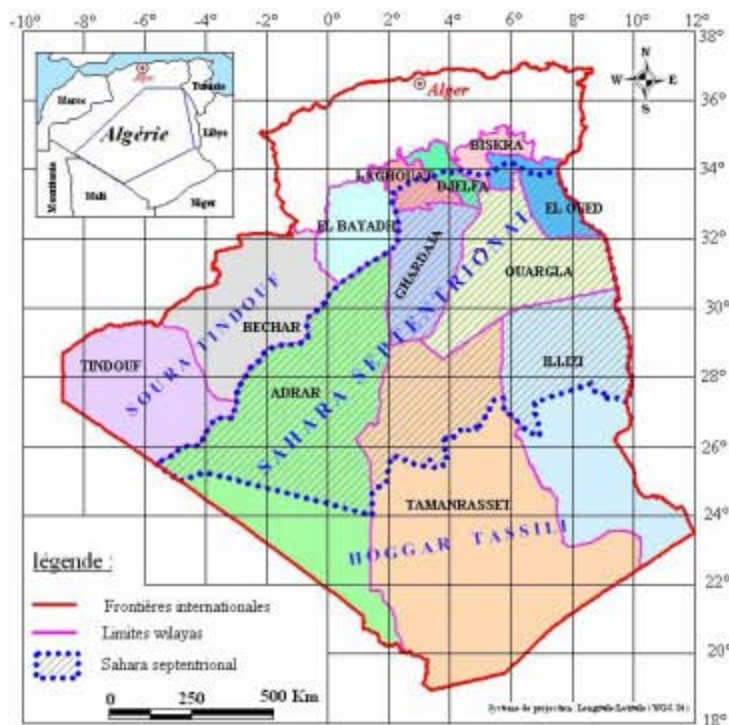


Figure 01: Limites du Sahara septentrional algérien (SADINE et BISSATI, 2014)

1. Situation géographique

Les limites géographiques des deux zones d'études Ouargla et Ghardaïa sont reportées dans le tableau 01.

Tableau 01. Limites géographiques de Ouargla et de Ghardaïa

		Ouargla (BARADAI, 2014)	Ghardaïa (HOUICHITI, 2009)
Superficie (km²)		163.230	86.560
Limites	Nord	Djelfa et Ghardaïa	Laghouat et Djelfa
	Est	Tunisie et Ghardaïa	Ouargla
	Sud	Tamanrasset et Illizi	Tamanrasset
	Ouest	Ghardaïa	El-Bayadh et Adrar
Administrations	Daïrates	10	09
	Communes	21	13

2. Géomorphologie, géologie et pédologie

Au Sahara, la couverture pédologique présente une grande hétérogénéité et se compose des classes suivantes : sols minéraux bruts, sols peu évolués, sols halomorphes et sols hydromorphes (Tabl. 02): la fraction minérale est constituée dans sa quasi-totalité de sable. La fraction organique est très faible (inférieure à 1%) et ne permet pas une bonne agrégation. Les sols sont très peu fertiles, leur rétention en eau est très faible, environ 8 % en volume d'eau disponible (DAOUD et HALITIM, 1994).

D'après HAMDY-AÏSSA (2001), ce sont les formations sédimentaires qui dominent le Sahara septentrional. Pour les régions de Ghardaïa, Ouargla, et Oued Righ, on constate les formations suivantes :

- Le grand Erg Occidental, vaste dépôt de sable éolien à l'Est et au Sud.
- Les vallées au centre où prédominent les dépôts d'alluvions.
- Le plateau du M'Zab à l'Ouest.

Le désert se présente sous des formes diversifiées : Les ergs, restes massifs de dunes. Les Regs sont des plaines caillouteuses, avec des sols pierreux recouvrant une partie importante des déserts.

Sur l'ensemble des paysages sahariens, le sable ne couvre qu'une faible partie de la surface (20% environ). Les hamadas et les regs représentent l'essentiel du paysage ; les sols alluviaux et les sols à encroûtement ne constituent que des phénomènes locaux (OZENDA, 1991 ; MONOD, 1992).

La région de Ouargla est caractérisée par des sols légers à prédominance sableuse et à structure particulière. Ils sont caractérisés par un faible taux de matière organique, un pH alcalin, une activité biologique faible et une forte salinité (HALILAT, 1993).

Tableau 02. Géomorphologie et pédologie des zones d'étude

	Formes géomorphologiques						Types de sols	Références
	Erg	Reg	Sebkha	Lit d'Oued	Hamada	Chebka		
Ouargla	+	+	+	+	+	-	<ul style="list-style-type: none"> • Sols légers à prédominance sableuse • faible taux de matière organique 	HALILAT, 1993 ; DAOUD et HALITIM, 1994
Ghardaïa	+	+	-	+	+	+	<ul style="list-style-type: none"> • Roches calcaires • Dominance d'un faciès gypseux 	PASSAGER, 1958 ; URBATIA, 1996
+ : présence						- : Absence		

3. Hydrogéologie

Les formations géologiques de la région de Ouargla contiennent deux grands ensembles de formation aquifère: le continental intercalaire à la base et le complexe terminal au sommet. Une troisième formation d'importance plus modeste s'ajoute aux deux précédentes : La nappe phréatique ou nappe superficielle (IDDER, 1998).

L'existence d'eaux souterraines dans la région du M'Zab, s'explique par la présence d'assises marneuses imperméables, de l'étage cénomanien, sous les calcaires turoniens de la Chebka (MOULIAS, 1927). La 1^{ère} étude réalisée par les services d'hydrologie de SONATRACH en 1992 a montré que mis à part la nappe phréatique, la région se situe dans la province triasique où quatre (04) aquifères peuvent être exploités pour les besoins en eau domestique et agroindustrielle : Mio-Pliocène et Eocène, Sénonien carbonaté, Turonien carbonaté, Continental intercalaire (GAUTIER et GOUSKOV, 1951 ; BAIT *et al.*, 1977).

4. Synthèse Climatique et bioclimatique

4.1. Synthèse climatique

Parmi les facteurs climatiques, nous citerons ici la température, les précipitations, l'humidité relative de l'air, les vents et l'insolation. Le tableau 03 résume les données climatiques des deux régions d'étude de 2007 à 2016.

Le climat d'Ouargla est particulièrement contrasté malgré la latitude relativement septentrionale. Il est caractérisé par une faiblesse des précipitations, une luminosité intense, une forte évaporation et un grand écart des températures avec la sécheresse de l'air (ROUVILLOIS-BRIGOL, 1975).

Tableau 03. Données climatiques des zones d'études de 2007 à 2016 (O.N.M., 2016)

Mois	Ouargla					Ghardaïa				
	Température (°C)			P (mm)	V (km/h)	Température (°C)			P (mm)	V (km/h)
	Moy.	Max.	Min.			Moy.	Max.	Min.		
Janvier	11,12	20,87	5,18	12,93	9,45	11,96	17,73	6,8	9,04	11,78
Février	12,93	23,28	6,48	0,61	11,58	13,2	18,85	7,83	2,82	10,91
Mars	16,5	28,46	9,48	3,455	13,39	16,83	22,71	10,84	8,61	12,71
Avril	21,02	33,81	13,67	3,302	14,99	21,77	27,99	15,13	5,51	11,72
Mai	25,24	38,88	17,77	1,625	15,71	26,3	32,6	19,36	2,92	12,49
Juin	30,08	44,51	22,33	0,889	15,71	31,38	37,83	24,73	3,12	12,33
Juillet	33,04	47,6	25,35	0,204	12,52	35,22	41,49	28,26	1,42	10,2
Août	31,97	46,86	24,65	0,533	13,25	34,17	40,56	27,78	2,74	9,68
Septembre	28,28	41,76	21,67	5,589	13,43	29,49	35,68	23,47	11,32	10,7
Octobre	22,15	35,21	15,66	2,439	10,79	23,55	29,41	17,94	10,99	10,06
Novembre	15,43	27,65	9,29	2,997	9,01	16,4	22,07	11,18	7,06	10,48
Décembre	11,13	21,32	5,48	4,089	8,55	11,11	17,57	7,3	4,72	10,74
Moyenne annuelle	21,6	34,2	14,8	38,66*	12,4	24,46	28,71	16,72	70,29*	11,57

T : Température; H : humidité relative ; P : Pluviométrie ; V : Vitesse du vent ; * cumule annuelle

Les indices climatiques montrent que Ghardaïa est caractérisée par un climat hyper aride et présente un caractère xérique, une continentalité pluviale et thermique, ce qui accentue l'aridité, et une durée d'évaporation de la tranche annuelle de pluie très courte (YOUCEF, 2003).

4.1.1. Température

La température est importante pour les êtres vivants. Ses variations agissent sur le comportement des différentes espèces.

Selon (DAJOZ, 1970), les limites des aires de répartition sont souvent déterminées par la température qui agit comme un facteur limitant.

La région de Ouargla est caractérisée par des températures maximales élevées qui peuvent dépasser 40° C. La moyenne des températures du mois le plus froid est enregistrée en janvier (11,12 °C.), alors que le mois le plus chaud est juillet (33,04 °C.) (O.N.M., 2016)

Concernant la région de Ghardaïa, la température moyenne du mois le plus froid (décembre) est de 11,11°C., et la température moyenne du mois le plus chaud (Juillet) est de 35.22°C (O.N.M., 2016).

4.1.2. Précipitations

Les précipitations constituent un facteur écologique d'importance fondamentale pour le fonctionnement et la répartition des écosystèmes terrestres (RAMADE, 1984).

Comme dans la majeure partie des régions sahariennes, les précipitations sont marquées par leur caractère faible et irrégulier (ROUVILLOIS-BRIGOL, 1975).

Selon le tableau 03, le cumul annuel des précipitations pour Ouargla et Ghardaïa est respectivement de 38,66 mm et 70,29 mm, avec un maximum en avril pour Ouargla et septembre pour Ghardaïa.

4.1.3. Vents

Le vent agit soit directement par une action mécanique sur le sol et les végétaux, soit indirectement en modifiant l'humidité et la température (OZENDA, 1982). D'autre part, le vent a une action indirecte sur les êtres vivants et il joue le rôle de facteur de mortalité vis à vis des oiseaux et des insectes (DAJOZ, 1983).

D'après les données de l'O.N.M. (2016), les vents sont fréquents sur toute l'année 2016 avec une vitesse moyenne annuelle de 12,4 km/h et une vitesse maximale de 15,71km/h pour Ouargla et moyenne annuelle de 11.57 km/h et maximale de 12,71km/h pour Ghardaïa.

Dans les deux régions, les vents soufflent du Nord-Ouest vers le Sud-Est (Dahraoui), particulièrement au printemps (ROUVILLOIS-BRIGOL, 1975). Le vent d'orientation Est-Nord (Bahri), se manifeste de fin août à mi-octobre. Tandis que les vents du sirocco (ou Chehili) apparaissent pendant la période estivale à une direction Sud-Nord et Sud -Ouest, et se manifestent par des chaleurs excessives (NADJAH, 1971).

4.2. Synthèse bioclimatique

Pour caractériser le climat d'une région, il faut procéder à une synthèse des principaux facteurs climatiques (température et précipitation).

La synthèse des données climatiques est représentée par le diagramme ombrothermique de Gaussen et par le climagramme d'Emberger (DAJOZ, 1971),

4.2.1. Diagramme ombrothermique

Le diagramme ombrothermique de Gaussen permet de déterminer les périodes sèches et humides de n'importe quelle région à partir de l'exploitation des données des précipitations mensuelles et des températures moyennes mensuelles (DAJOZ, 2003).

D'après FRONTIER et *al.* (2004), les diagrammes ombrothermiques de Gaussen sont constitués en portant en abscisses les mois et en ordonnées, à la fois, les températures moyennes mensuelles en (°C) et les précipitations mensuelles en (mm). L'échelle adoptée pour les pluies est double de celle adoptée pour les températures dans les unités choisies ($P = 2T$).

Un mois est réputé «sec» si les précipitations sont inférieures à 2 fois la température moyenne et réputé «humide» dans le cas contraire (FRONTIER et *al.*, 2004).

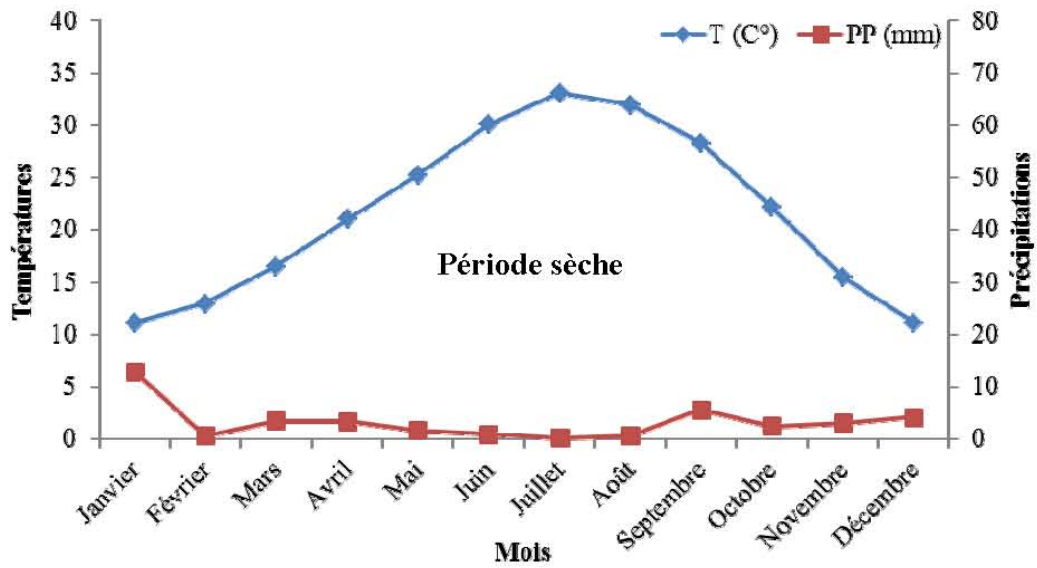


Figure 02. Diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN de la région de Ouargla (2007 -2016)

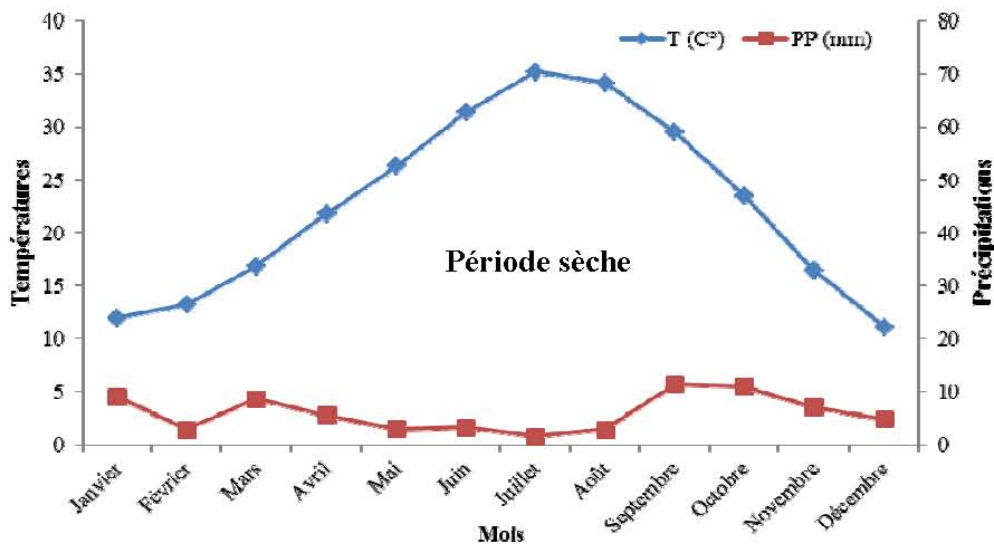


Figure 03. Diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN de la région de Ghardaïa (2007 -2016).

Les diagrammes ombrothermiques (Fig. 02 et Fig. 03) montrent que la période de sécheresse de 10 ans s'étale presque sur toute l'année de février jusqu'à décembre pour les deux régions.

4.2.2. Climagramme d'Emberger

Le système d'Emberger permet la classification des différents climats méditerranéens (DAJOZ, 1985; DAJOZ, 2003). Cette classification fait intervenir deux facteurs essentiels, d'une part la sécheresse représentée par le quotient pluviothermique (Q_2) en ordonnées et d'autre part la moyenne des températures minimales du mois le plus froid en abscisses. Il est défini par la formule simplifiée suivante (STEWART, 1969) :

$$Q_2 = 3,43 \frac{p}{(M-m)}$$

- P= Pluviométrie moyenne en (mm)
- M= Moyenne des Maxima du mois le plus chaud en (°C)
- m= Moyenne des minima du mois le plus froid en (°C)
- 3,43= Coefficient de Stewart établi pour l'Algérie

Le quotient pluviothermique est d'autant plus élevé que le climat est plus humide (DAJOZ, 1985).

A partir de ce climagramme (Fig. 04), nous constatons que l'étage bioclimatique des deux régions Ouargla et Ghardaïa est saharien à hiver doux, puisque Q_2 est égal respectivement à 5.53 et 6.96.

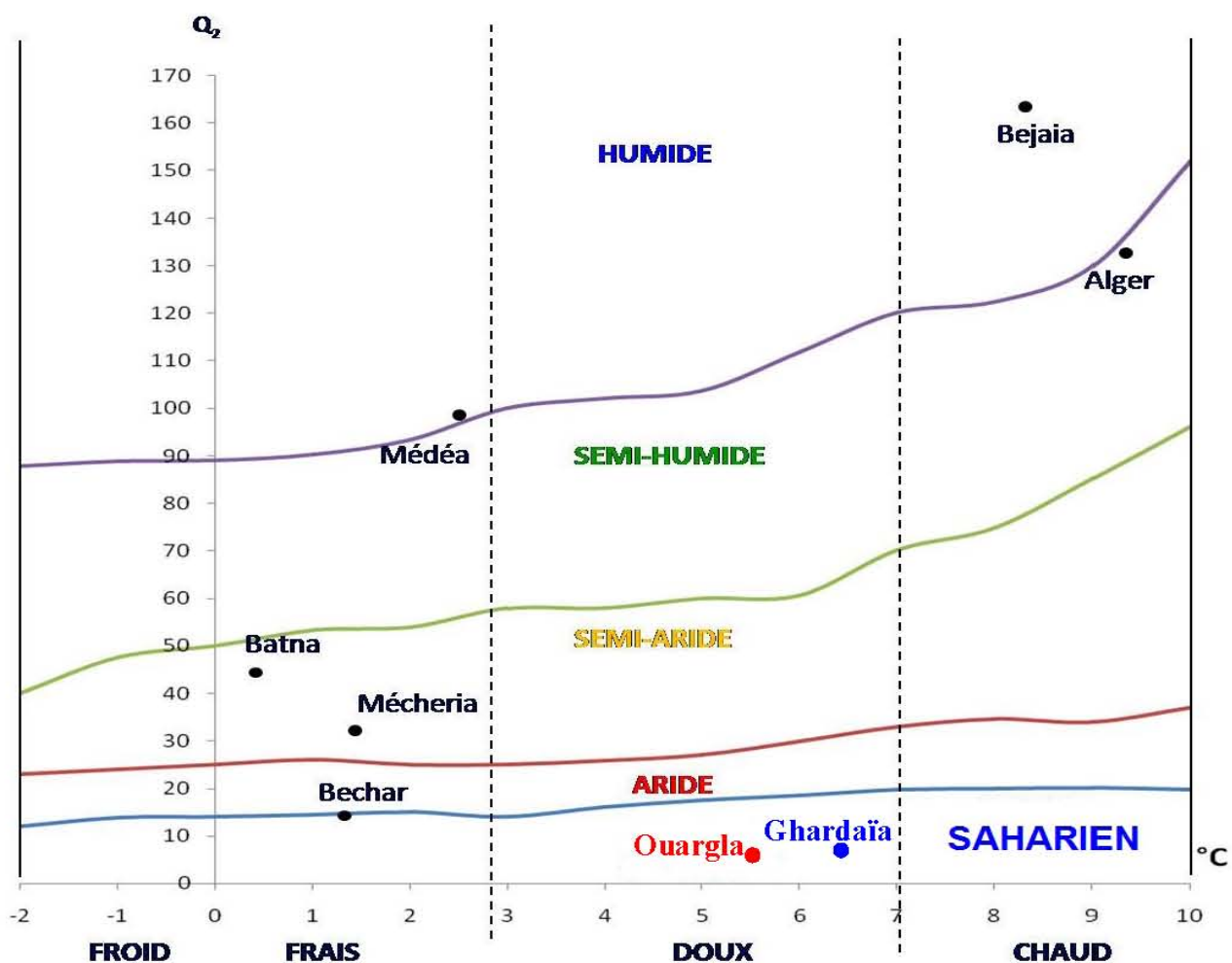


Figure 04. Place des deux régions d'étude (Ouargla et Ghardaïa) sur le climagramme d'EMBERGER (2007-2016)

Chapitre II. Matériel et méthodes d'étude

1. Approche méthodologique

La qualité du sol est un élément essentiel pour l'évaluation de la durabilité de la mise en valeur agricole intensive. Un aménagement du sol ne peut être durable que s'il maintient ou améliore les qualités des sols et des eaux (LARSON et PIERCE, 1992). Pour évaluer la qualité du sol, l'U.S.D.A. (1999) a proposé deux manières d'évaluation :

- Soit par la prise de mesures périodiquement dans le temps pour surveiller les changements ou les tendances de qualité du sol.
- Soit par la comparaison des valeurs mesurées à un état de sol de référence ou à l'écosystème naturel.

En absence des données et d'études des sols en début de la mise en valeur, nous avons adopté la deuxième méthode en comparant les valeurs mesurées dans les parcelles pivot à l'écosystème naturel.

L'objectif du travail est d'évaluer les variations causées par la céréaliculture sous pivot pour quelques propriétés du sol au Sahara algérien, par l'analyse du taux de variation annuel et l'étude de leurs variabilités spatiales.

2. Choix des sites d'étude

Trois stations ont été choisies pour la réalisation du travail (Fig. 05):

- Station 01 : Ferme ERIAD/Agro Sud, située à Hassi Ben Abdellah, Ouargla, avec une parcelle pivot exploitée pendant 04 ans et une parcelle de référence jamais exploitée.
- Station 02 : Ferme de BENHAMOUDA située à Hassi Fehal, Ghardaïa, avec une parcelle pivot exploitée pendant 04 ans et une parcelle de référence jamais exploitée.

Ces deux stations ont été choisies pour comparer l'intensité de l'évolution de la salinité avec l'utilisation des eaux de qualités différentes (eau fortement minéralisée dans la station 1 et faiblement minéralisée dans la station 2).

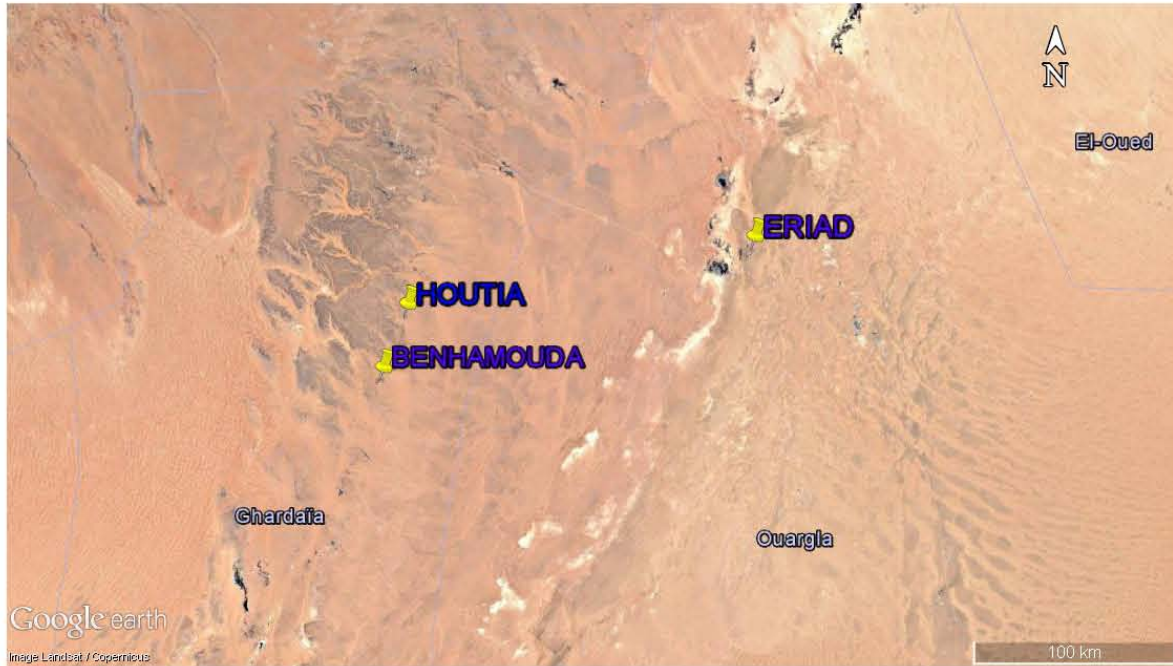


Figure 05 : Situation géographique des stations d'étude

- Station 03 : Ferme HOUTIA, située à Hassi Fehal, Ghardaïa, avec deux parcelles pivot exploitées pendant 19 ans et une parcelle de référence jamais exploitée.

Cette station est choisie pour les raisons suivants :

- Le nombre d'années successives de mise en culture est de 19 ans, période relativement satisfaisante pour évaluer les variations causées par la céréaliculture sur le sol.
- L'accessibilité et facilités de la part du propriétaire de la ferme.
- L'uniformité de l'itinéraire technique pour les parcelles sélectionnées, ce qui permet d'effectuer des comparaisons entre les taux d'évolution des paramètres à étudier.
- L'existence d'une parcelle de référence de la même superficie des parcelles cultivées et de même aspect de surface.

3. Présentation des stations d'étude

3.1. Station 01 : Ferme E.R.I.A.D./Agro Sud Ouargla (32° 2'N., 5°30'E., 152 m)

La ferme E.R.I.A.D./Agro Sud a été créée en 1991 à Ouargla, dans le périmètre El KHALIDJ commune de Hassi Ben Abdellah, à une distance d'environ 25 Km du chef-lieu de la Wilaya de Ouargla.

Elle couvre une superficie totale de 1675 ha, avec une superficie exploitée estimée à 488 ha. Cette ferme spécialisée en céréaliculture compte 16 pivots dont 12 de 30 ha et 4 de 32 ha.

En plus de la céréaliculture, la phoeniciculture trouve sa place avec un effectif de 1400 pieds couvrant une superficie de 11,5 ha, comprenant les variétés Deglet Nour, Ghars et Deglat Baida.

Les ressources hydriques au niveau du site proviennent de deux aquifères : le continental intercalaire et le complexe terminal.

Nous avons choisi le pivot n°3 (POGX) qui couvre une superficie de 32 ha et qui a été exploité pendant 4 ans en céréaliculture sous pivot. Une autre parcelle de référence, non cultivée (ROGX) a été échantillonnée de la même manière (Fig. 06).

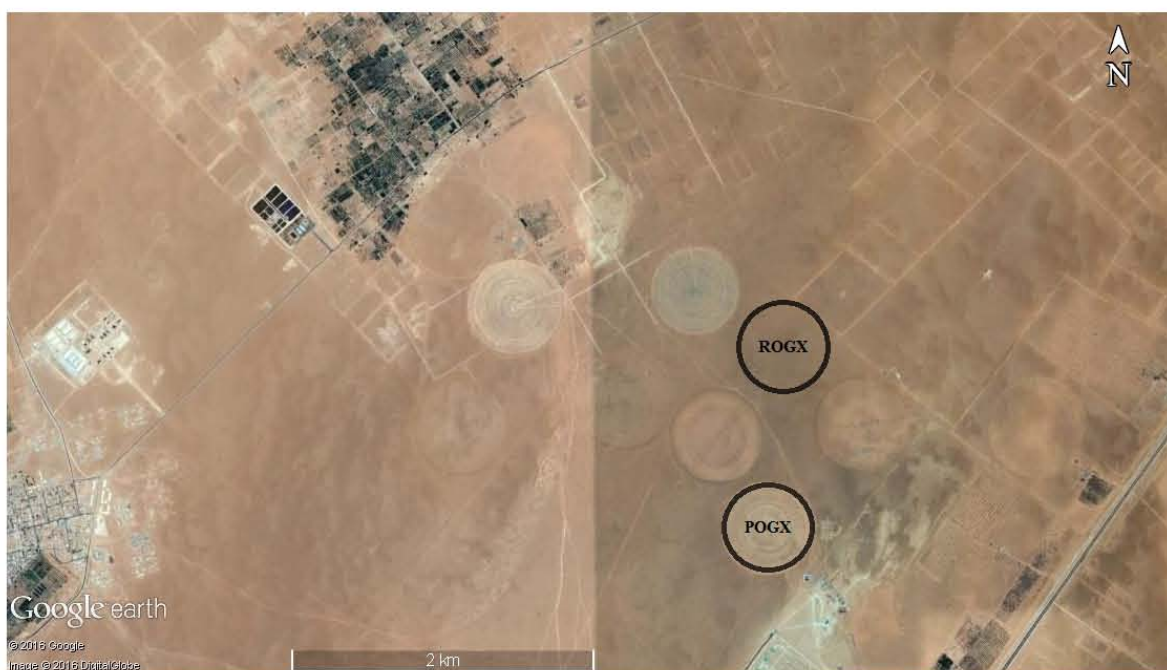


Figure 06 : Localisation des parcelles de la station 01 (32° 2'N., 5°30'E.)

3.2. Station 02 : Ferme BENHAMOUDA Ghardaïa ($31^{\circ}27'N.$, $3^{\circ}36'E.$, 434 m)

La ferme BENHAMOUDA a été créée en 1995 à Ghardaïa, dans la commune de Hassi Fehal, à 140 Km environ du chef-lieu de la wilaya ; elle couvre une superficie totale de 1000 ha, avec une superficie exploitée estimée à 600 ha.

La ferme à vocation céréalière, renferme 08 pivots de superficie variable de 35 ha, de 40 et de 50 ha. La superficie totale exploitée est de 400 ha.

En plus de la céréaliculture, la phoeniciculture trouve sa place avec un effectif de 5000 pieds couvrant une superficie de 50 ha.

Les ressources hydriques au niveau du site proviennent d'un seul aquifère : le continental intercalaire (albien).

Nous avons choisi le pivot n°5 (PBH) qui couvre une superficie de 45 ha et qui a été exploité pendant 4 ans en céréaliculture sous pivot. Une autre parcelle non cultivée prise comme parcelle de référence (RBH) a été échantillonnée de la même manière (Fig. 07).

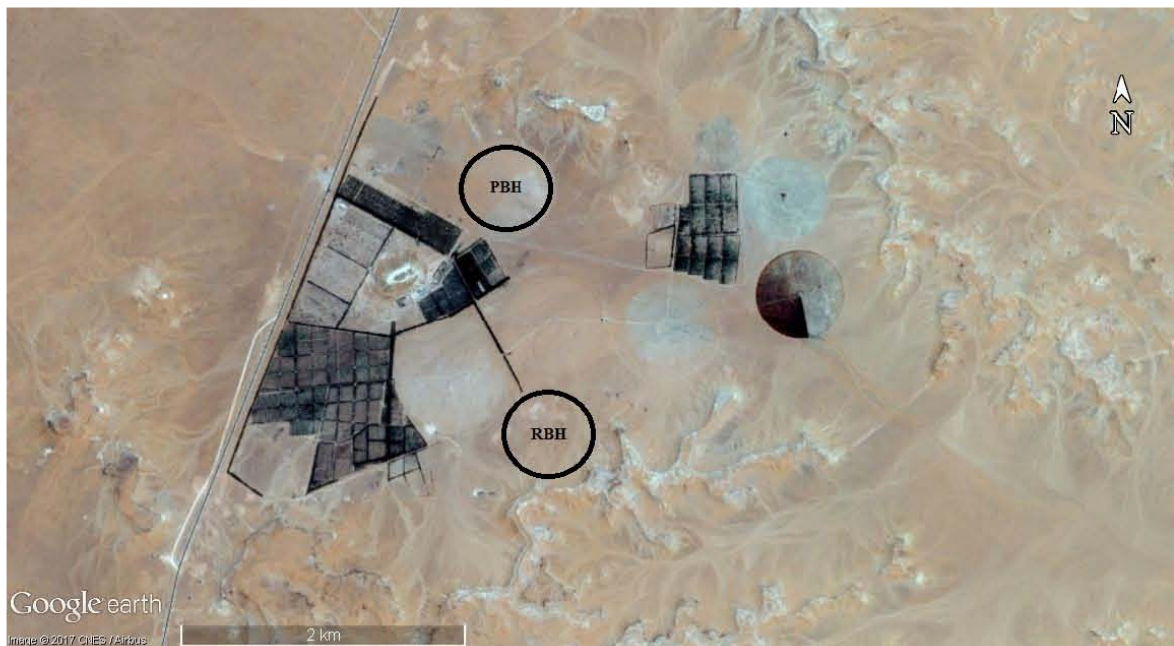


Figure 07 : Localisation des parcelles de la station 02 ($31^{\circ}27'N.$, $3^{\circ}36'E.$, 434 m)

3.3. Station 03 : Ferme HOUTIA Ghardaïa (31°44'N., 3°43'E., 431 m)

La ferme HOUTIA a été créée en 1990 à Ghardaïa, dans la commune de Hassi Fehal (Fig. 07), à une distance d'environ 100 Km du chef-lieu de la Wilaya de Ghardaïa.

Elle couvre une superficie totale de 703 ha, avec une superficie exploitée estimée à 450 ha. Cette ferme spécialisée en céréaliculture compte 3 pivots de 32 ha.

En plus de la céréaliculture, la phoeniciculture trouve sa place avec un effectif de 1000 pieds couvrant une superficie de 10 ha, comprenant les variétés Deglet Nour, Ghars, Bentkhbala et Azerza.

Les ressources hydriques au niveau du site proviennent du continental intercalaire (albien) capté par 02 forages.

Nous avons sélectionné deux parcelles irriguées par pivot. Ces dernières couvrent une superficie de 32 ha chacune. Ces deux parcelles ont été exploitées pendant 19 ans en céréaliculture sous pivot (P1 et P2). Une autre parcelle couvrant la même superficie et jamais cultivée (R) est prise comme référence (Fig. 08).

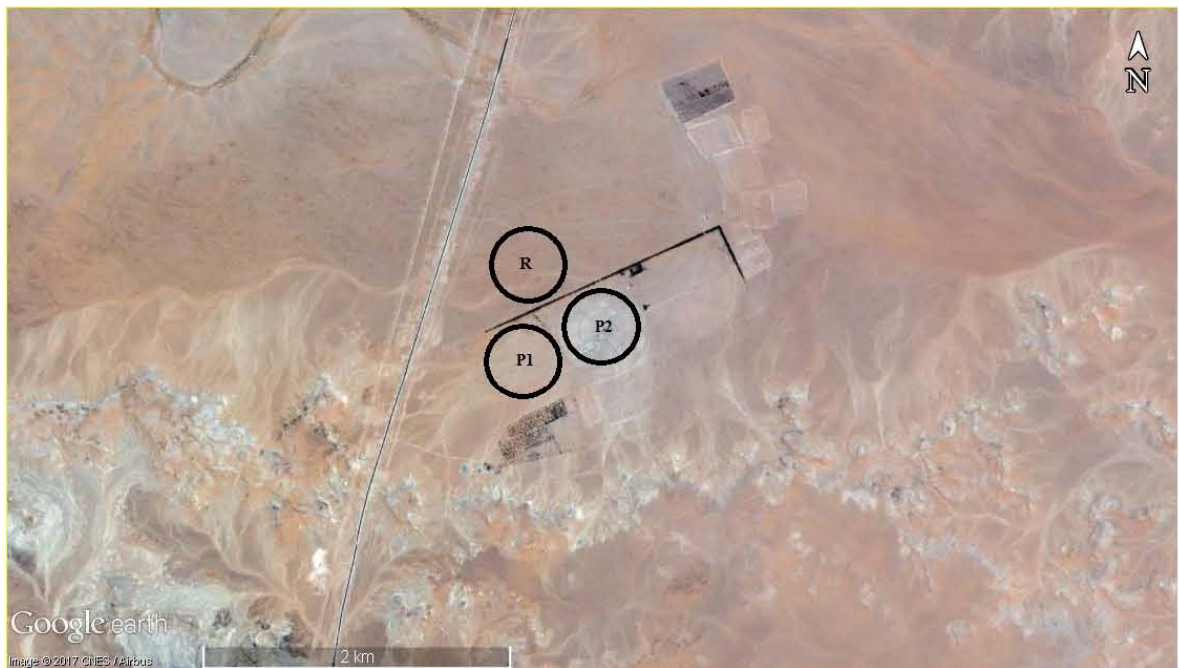


Figure 08. Localisation des parcelles de la station 03 (31°44'N., 3°43'E.)

4. Echantillonnage

Deux méthodes d'échantillonnages ont été adoptées :

01. Echantillonnage systématique en diagonale (RAYEN et *al.*, 2003) pour les stations 01 et 02 avec un nombre de 30 échantillons par parcelle pivot et par parcelle de référence sur une profondeur de 0 à 25 cm (Fig. 09)

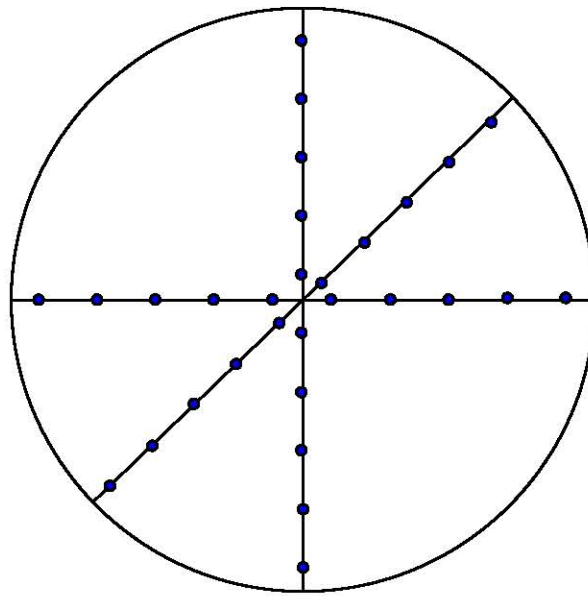


Figure 09 : Plan d'échantillonnage dans les stations 01 et 02

02. Echantillonnage systématique sur une maille régulière de 15 m x 15 m pour la station 03, avec un nombre de 100 échantillons par parcelle pivot et de même pour la parcelle de référence sur une profondeur de 0 à 25 cm. Les échantillons sont pris aux nœuds de la grille (Fig. 10 et 11). Cette position des points est parfaitement statistique: les résultats peuvent être représentés par toute méthode cartographique, et l'exploitation géostatistique est possible (BELKESSAM et LEMIERE, 2006).

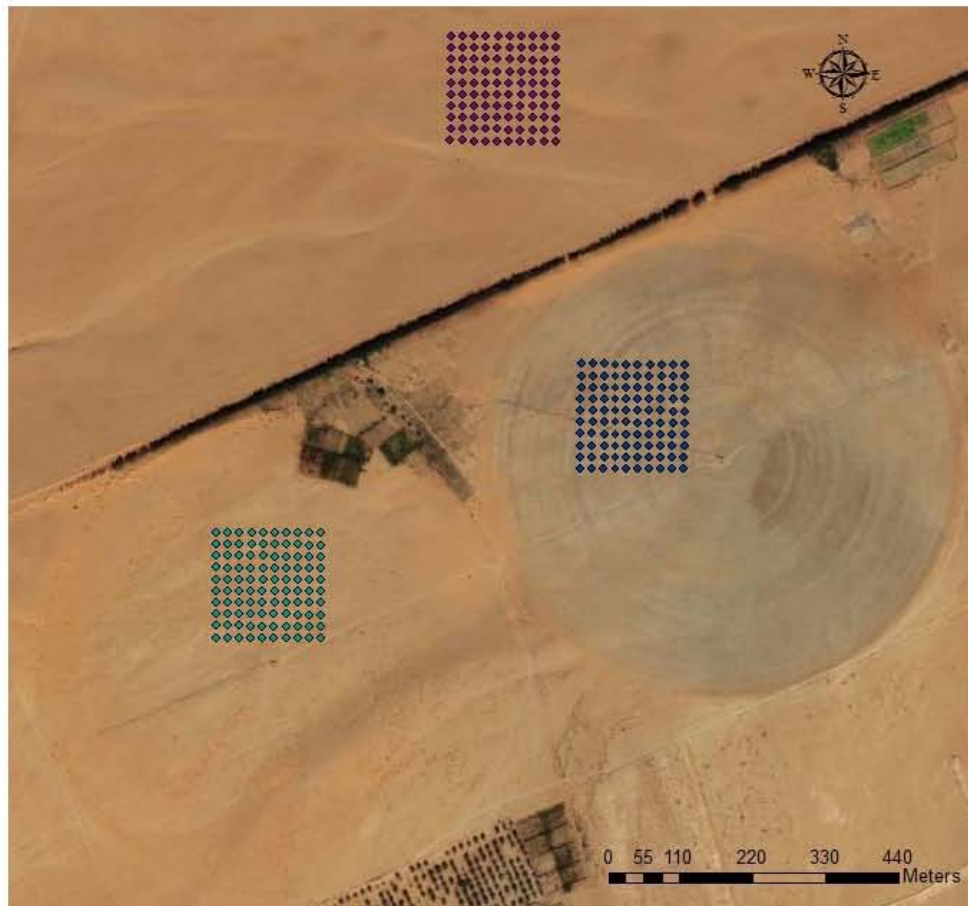


Figure 10 : Plan d'échantillonnage général dans la station 03

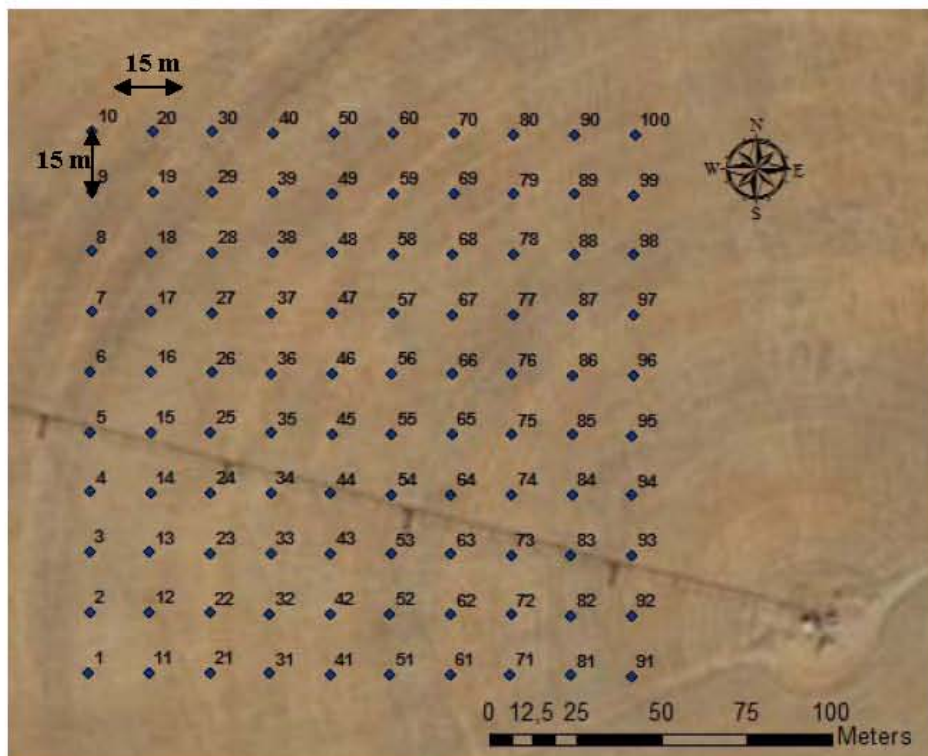


Figure 11 : Plan d'échantillonnage détaillé dans la station 03

5. Analyses au laboratoire

5.1. Analyses du sol

Tous les échantillons ont été séchés à l'air libre, tamisés à 2 mm puis analysés au laboratoire, les analyses du sol concernent la salinité du sol exprimée par la conductivité électrique, le pH du sol et le calcaire total.

- Conductivité électrique (C.E.) à 25°C : Mesurée au conductimètre, avec un rapport sol / eau de 1/5.
- pH : Mesuré au pH mètre à électrode en verre, avec un rapport sol/eau (1/5).
- Calcaire total (CaCO₃) : Méthode du calcimètre de BERNARD : Le dosage du calcaire total est basé sur la réaction acide-base. Le carbonate de calcium contenu dans l'échantillon de terre est décomposé par un acide fort (acide chlorhydrique), le volume de gaz carbonique dégagé par la réaction est mesuré à l'aide d'une burette à gaz (calcimètre de BERNARD) (MATHIEU et PIELTAIN, 2009).

5.2. Analyses d'eau

Les eaux des 04 forages des trois stations sont prélevées et analysées au laboratoire. Les analyses d'eaux ont porté sur la conductivité électrique, le résidu sec à 105° C, le pH et le bilan ionique.

- Conductivité électrique (C.E.) à 25°C : Mesurée au conductimètre.
- pH : Mesuré au pH mètre à électrode en verre.
- Dosage des cations Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ : Par spectrophotométrie à absorption atomique.
- Dosage des cations Na⁺ et K⁺ : Par spectrophotométrie à flamme.
- Dosage des chlorures (Cl⁻) : Par la méthode argentométrique de MOHR, qui consiste à précipiter les ions Cl⁻ sous forme de AgCl en présence de AgNO₃.
- Dosage des sulfates (SO₄⁻) : Par la méthode gravimétrique au BaCl₂, qui consiste à précipiter les ions SO₄⁻ sous forme de sulfate de baryum en présence de BaCl₂ à 10 %.

- Dosage des bicarbonates (HCO_3^-): Par titrimétrie à H_2SO_4 . Qui consiste à titrer les bicarbonates en présence de méthylorange par l'acide sulfurique.

Les analyses sont réalisées au niveau des laboratoires de la faculté des sciences de la nature et de la vie de l'université de Ouargla, le laboratoire de la faculté des sciences de la nature et de la vie de l'université de Ghardaïa et le laboratoire de l'agence nationale des ressources hydriques (ANRH Ouargla).

6. Analyses statistiques

6.1. Variation annuelle des paramètres étudiés

Comme d'un pivot à l'autre, le nombre d'années depuis la mise en culture intensive sous irrigation est variable, un indicateur normalisé de variation de la qualité des sols est utilisé. Il s'agit du taux de variation annuelle de chaque propriété du sol (q_i) dont la forme générale est la suivante (BADRAOUI et al., 1998) :

$$\text{TVA-}q_i = (q_{it2} - q_{it1}) / (t_2 - t_1)$$

avec :

q_{it1} : la valeur moyenne de la propriété q_i au début de l'irrigation,

q_{it2} : la valeur moyenne de la propriété q_i après un certain nombre d'années ($t_2 - t_1$) d'irrigation.

6.2. Statistiques descriptives

Cet outil d'analyse génère un rapport de statistiques à une seule variable pour les données contenues dans la plage d'entrée, fournissant ainsi des informations sur la tendance centrale et la dispersion des données (MICROSOFT CORPORATION, 1993 ; DHUNNA et DIXIT, 2010).

Les statistiques descriptives dans notre cas concernent la moyenne, l'écart type, le minimum, et le maximum.

6.3. Analyse de variance à un facteur

Nous avons procédé à une analyse de variance à un facteur entre les échantillons du sol de la parcelle de référence et ceux du sol cultivé pour chaque paramètre et pour chaque horizon.

Cette analyse va permettre la mise en évidence de l'existence ou pas de différences entre les moyennes et la signification de ces différences si elles existent.

Les traitements des données obtenues font appel à des approches statistiques. Les résultats obtenus pour chaque paramètre seront interprétés statistiquement. D'après DAGNILLIE (1975), l'analyse de la variance consiste à étudier la comparaison des moyennes à partir de la variabilité des échantillons. Elle permet suivant le niveau de la signification de déterminer l'influence des facteurs étudiés ou des interactions entre les facteurs. La probabilité inférieure à 0,001 donne un effet très hautement significatif, à 0,01 un effet hautement significatif et à 0,05 un effet significatif et pour une probabilité supérieure à 0,05 on considère que l'effet n'est pas significatif.

Les comparaisons multiples sont effectuées en adoptant le test de Tukey (HSD) de la différence franchement significative (Honest Significant Difference), ce test vise à déterminer quelles sont les paires de moyennes pour lesquelles les différences sont significatives (CADOT, 2010) et permet un bon traitement de tous les problèmes de comparaison par paires (BRETZ et *al.*, 2011). Le test est effectué à un intervalle de confiance de 95 %. Le risque de 5% que nous avons choisi est utilisé pour déterminer la valeur critique, qui est comparée à la différence standardisée entre les moyennes ; la différence est significative si la différence standardisée est supérieure à la valeur critique.

Les logiciels utilisés pour les analyses statistiques sont STATISTICA version 5.1 et XLSTAT version 2014.5.03.

6.4. Coefficient de variation

Le coefficient de variation représente le rapport de l'écart type à la moyenne, il est une statistique utile pour comparer le degré de variation par rapport à une série de données à l'autre, même si les moyennes sont considérablement différentes l'une de l'autre.

$$CV (\%) = 100.\sigma/m$$

Cinq (5) classes, basées sur la valeur du CV, sont proposées par NOLIN et *al.*, 1997 pour qualifier l'intensité de la variabilité des propriétés du sol (Tabl. 04).

Tableau 04 : Classes d'intensité de la variabilité (NOLIN et *al.*, 1997)

Intensité de la variabilité	Coefficient de variabilité (%)
Faible	<15
Modérée	15-35
Élevée	35-50
Très élevée	50-100
Extrêmement élevée	>100

7. Modélisation géostatistique

La géostatistique est un outil d'analyse de la structure de variation et d'organisation spatiale de l'information géographique, comme les propriétés des sols (fertilité, texture...). Elle regroupe un ensemble de techniques statistiques permettant aux pédologues et aux scientifiques du sol de mieux comprendre et de reproduire le modèle de la variabilité spatiale des sols (TRANGMAR et *al.*, 1986). Ces techniques reposent sur l'analyse numérique de la dépendance des échantillons dans l'espace. En d'autres termes, cela signifie que « plus les échantillons sont rapprochés dans l'espace, plus ils se ressemblent jusqu'à une certaine distance au-delà de laquelle ils deviennent indépendants les uns des autres » (NOLIN, 2000). Une méthode couramment utilisée pour étudier la dépendance spatiale des observations est d'analyser le semi-variogramme, un graphique qui présente la variation de la demi-variance $\gamma(h)$ en fonction de la distance (h) entre les échantillons.

Afin d'étudier la répartition spatiale des propriétés du sol, la géostatistique a été largement appliquée (GOOVAERTS, 1998 ; SALDANA et *al.*, 1998; SEPASKHAH et *al.*, 2005, LIU et *al.*, 2006 ; AL-OMRAN et *al.*, 2013). Basée sur la théorie d'une variable régionalisée (MATHERON, 1963, WEBSTER et OLIVER, 2007), la géostatistique fournit des outils avancés pour quantifier les caractéristiques spatiales des paramètres du sol et permet une interpolation spatiale. Les avantages de la recherche sur les systèmes d'information géographique (SIG) ont été illustrés par de nombreuses études écologiques et agricoles (BRADSHAW et MULLER, 1998, ADAMCHUK et *al.*, 2004 ; MZUKU et *al.*, 2005 ; ZANOLIN et *al.*, 2007 ; JINFU et *al.*, 2011 ; SEVERINO et *al.*, 2016...).

7.1. Variogramme expérimental

Le variogramme expérimental est une forme simplifiée d'outils d'analyse exploratoire des données plus élaborées, tel le nuage variographique. Si ce dernier n'est pas nouveau, l'informatique permet d'obtenir de façon quasi instantanée des graphiques dont l'élaboration pouvait demander une année de calcul à la main dans les années 50 (GANDIN, 1963).

C'est un outil statistique provenant de la théorie des variables régionalisées, il a été initialement utilisé en minéralogie, puis étendu dans d'autres domaines tels que l'hydrologie, la mécanique des sols et les ressources forestières (DELHOMME, 1976 ; MARBEAU, 1976 ; VAUCLIN, 1982 ; FAMIGLIETTI, 1995 ; GUEKIE *et al.*, 2016).

Les variogrammes sont utilisés en géostatistique pour résoudre des problèmes d'estimation spatiale qui, en pédologie, peuvent être appliqués à la cartographie assistée par ordinateur (IRIS, 1986).

C'est l'outil généralement utilisé pour analyser la dépendance spatiale d'une propriété du sol, il donne des informations sur la nature des processus spatiaux à l'origine d'une variable observée (WALTER, 2002 ; QUENUM, 2009) ; il est ensuite ajusté à un modèle théorique qui sera utilisé lors de l'interpolation par Krigeage (DAUPHINE et VOIRON-CANICIO, 1988 ; NOLIN *et al.*, 1991). Le variogramme expérimental n'est pas applicable dans l'estimation par krigeage car il ne peut pas être représenté par une équation. Il doit être ajusté à un modèle théorique (sphérique, gaussien...).

Selon GODARD (1994), plusieurs modèles d'ajustement (sphérique, exponentiel,...) ont été déjà testés par différents auteurs sur des données de terrain (BURGESS *et al.*, 1981 ; MCBRATNEY et WEBSTER, 1986 ; WEBSTER *et al.*, 1989).

Le variogramme est défini de la manière suivante :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{var}(Z(s+h) - Z(s)) \quad \forall s \in D$$

Où :

- $Z(.)$ est la variable régionalisée étudiée.
- s est le vecteur des coordonnées.

- h est le vecteur distance.
- D est le domaine géographique considéré.

Le variogramme est caractérisé par trois paramètres à savoir, la portée, le palier et la pépité (Fig. 12).

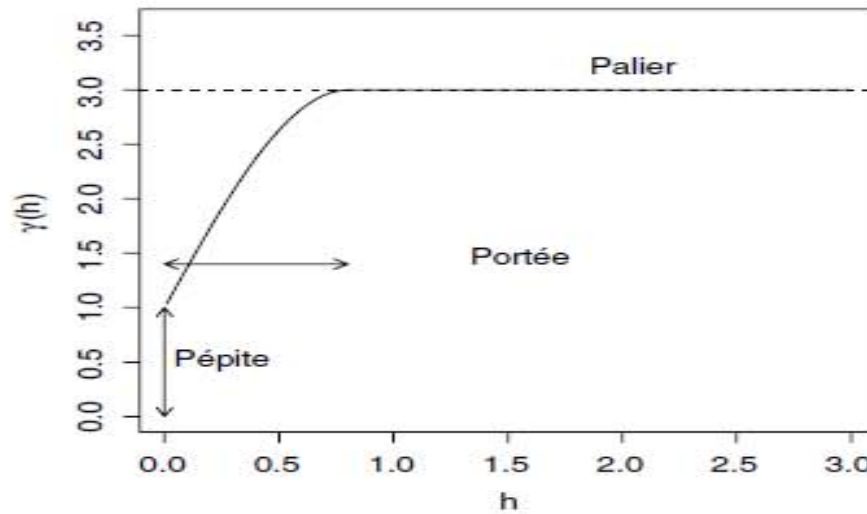


Figure 12 : Variogramme (GAETAN et GUYON, 2008)

Le palier correspond à la dissemblance maximale du modèle (la valeur de γ maximale). La portée est la distance à partir de laquelle le variogramme atteint son palier. C'est la distance à partir de laquelle deux valeurs ne sont plus corrélées et par conséquent, un échantillon sur une distance excédant la portée n'apporte plus de contribution à l'estimation. La pépité correspond à la valeur positive du modèle lorsqu'il traverse l'axe Y. Une valeur de pépité supérieure à 0 signifie que même à des points d'échantillonnage séparés par une très faible distance, les valeurs diffèrent (variabilité à petit échelle). Cela peut s'expliquer par une variabilité naturelle de la variable ou par l'erreur de la mesure (erreur de l'instrument, ou de sa manipulation, etc.) (SAHLIN, 2014).

S'ajoutant aux paramètres du variogramme, le degré de dépendance spatiale (DDS) est couramment utilisé en termes de rapport entre la pépité et le palier et exprimé en pourcentage (TRANGMAR et al., 1986 ; CAMBARDELLA et al., 1994 ; EMADI et al., 2008 ; ZUO et al., 2008). Il permet de définir des classes distinctes de dépendance spatiale pour les variables du sol comme montré dans le tableau 05 (TRANGMAR et al., 1986 ; CAMBARDELLA et al., 1994).

Tableau 05 : Classes de dépendance spatiale (TRANGMAR et *al.*, 1986 ; CAMBARDELLA et *al.*, 1994)

degré de dépendance spatiale DDS (%)	Dépendance spatiale
< 25 %	Forte
25-75 %	modérée
>75%	Faible

L'étude variographique a été réalisée par le logiciel ARCGIS 10.1, quatre modèles les plus couramment utilisées en sciences du sol ont été testés pour l'ajustement des variogrammes, les modèles sphérique, exponentiel, gaussien et circulaire. (CAMBARDELLA et *al.*, 1994 ; EMADI et *al.*, 2008 ; ZUO et *al.*, 2008 ; PARFITT et *al.*, 2009 ; NAJAFIAN et *al.*, 2012 ; AL-OMRAN et *al.*, 2013 ; SAFARI et *al.*, 2013...).

Les formes générales et les équations des modèles mathématiques de variogrammes utilisés dans la présente étude sont présentées comme suit (MCBRATNEY et WEBSTER, 1986 ; SRIVASTAVA et PARKER, 1988 ; OLIVER et WEBSTER, 1990 ; WEBSTER et OLIVER, 2007 ; GAETAN et GUYON, 2008) :

- **Modèle circulaire**

$$\gamma(h) = C_0 + C \left(1 - \left(\frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{h}{a} \right) \right) + \frac{2h}{\pi a} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{a} \right)^2} \right) \quad 0 < h \leq a$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad h > a$$

$$\gamma(0) = 0$$

- **Modèle sphérique**

$$\gamma(h) = C_0 + C \left(1,5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right) \quad 0 < h \leq a$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad h > a$$

$$\gamma(0) = 0$$

- **Modèle exponentiel**

$$\gamma(h) = C_0 + C \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right) \quad h > 0$$

$$\gamma(0) = 0$$

- **Modèle gaussien**

$$\gamma(h) = C_0 + C \left(1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a}\right) \right) \quad h > 0$$

$$\gamma(0) = 0$$

Où :

$C_0 + C$: représente le palier, avec : C_0 : Effet de pépité et C : palier partiel (variance de la variable aléatoire $Z(s)$).

a : représente la portée

7.2. Validation croisée

La validation croisée permet le bon choix du modèle de variogramme susceptible de fournir les meilleures prévisions. Les statistiques calculées servent de diagnostics, indiquant si le modèle et les valeurs de ses paramètres associés sont raisonnables (QUENUM, 2009). C'est une étape d'importance capitale avant de cartographier une surface donnée ou un phénomène par interpolation.

La validation croisée s'effectue en éliminant à tour de rôle chaque observation et de la prévoir à l'aide des autres observations en utilisant le krigeage (GAETAN et GUYON, 2008). De cette manière, nous pouvons comparer la valeur prédite à la valeur observée et obtenir des informations utiles sur la qualité du modèle de krigeage.

Le meilleur modèle de variogramme est sélectionné sur la base des critères suivants (CRESSIE, 1993 ; SALLAM et *al.*, 2011 ; BHADRA et *al.*, 2012 ; YAN et *al.*, 2015):

- Erreur moyenne (de prédiction) (Mean error) « ME » proche de zéro 0.
- La plus petite erreur quadratique moyenne (root-mean-square error) « RMSE »

- Une erreur moyenne standardisée (mean standardized error) « MSE » proche de zéro 0.
- Une erreur quadratique moyenne standardisée (root-mean-square standardized error) « RMSSE » proche de 1.
- Une erreur standard moyenne d'interpolation (average standard error) « ASE » proche de l'erreur quadratique moyenne (RMSE).

Le calcul des paramètres de la validation croisée est effectué par le logiciel ARCGIS 10.1. L'analyse et la détermination du meilleur modèle sont réalisées par des calculs à l'Excel.

7.3. Krigeage

Le Krigeage porte le nom de son précurseur, l'ingénieur minier sud-africain KRIGE. Dans les années 50, KRIGE a développé une série de méthodes statistiques empiriques afin de déterminer la distribution spatiale des minerais à partir d'un ensemble de forages. Dix ans plus tard, Gorges MATHERON développa un outil pour analyser la continuité spatiale des teneurs appelé le «variogramme» et une méthode d'estimation basée sur le variogramme appelé «Krigeage» (MATHERON, 1976). Aujourd'hui, la géostatistique est utilisée dans divers domaines comme la science du sol, l'océanographie, l'hydrogéologie, l'agriculture en particulier de précision, l'écologie et l'environnement, et récemment dans les sciences de la santé... (FERNANDEZ-AVILES et *al.*, 2012).

Le Krigeage est la méthode optimale, au sens statistique, d'interpolation et d'extrapolation. C'est la méthode d'estimation la plus précise (GRATTON, 2002). Il est considéré comme le meilleur prédicteur linéaire (OLIVER, 2010).

Plusieurs études ont montré l'efficacité du krigeage pour l'interpolation des paramètres pédologiques (MYERS, 1994 ; LOPEZ-GRANADOS et *al.*, 2002 ; SULLIVAN et *al.*, 2005 ; LIU et *al.*, 2006 ; BENAZZOUZ, 2011...).

Le terme de krigeage désigne un ensemble de méthodes d'interpolation linéaire basées sur l'expression de la dépendance spatiale par le semi-variogramme (LAURENT et

ROSSI, 1997). Il utilise le variogramme pour assigner les poids aux points d'observation pendant le processus d'interpolation (BOIS, 2007).

L'idée de base du krigeage est de prévoir la valeur de la variable régionalisée étudiée en un site non échantillonné par une combinaison linéaire de données ponctuelles adjacentes (BAILLARGEON, 2005).

Il existe plusieurs types de Krigeage (KRESSE et DANKO, 2012), les plus connus sont : le simple, l'ordinaire et l'universel (GRATTON, 2002 ; BAILLARGEON, 2005).

Dans notre travail, nous avons adopté le krigeage ordinaire qui est la méthode la plus fréquemment utilisée (GRATTON, 2002 ; OSAMA et *al.*, 2005 ; LI et *al.*, 2012).

7.4. Réalisation des cartes thématiques

La cartographie des variables présentant une structure spatiale peut être réalisée par le krigeage (LAURENT et ROSSI, 1997). Les cartes thématiques de différents paramètres étudiés sont tracées par le logiciel ARCGIS 10.1, sur la base du krigeage du modèle de variogramme le plus fiable.

Deuxième partie

Résultats et Discussions

Chapitre III. Caractéristiques des eaux d'irrigation

Dans les régions sahariennes, l'agriculture n'est possible que grâce à l'irrigation. Le développement de cette dernière s'accompagne dans la plupart des cas par des modifications des propriétés des sols, aggravées par l'apparition de phénomènes de salinisation, sodisation et alcalinisation (DAOUD et HALITIM, 1994 ; DJILI *et al.*, 2003 ; BRADAÏ *et al.*, 2009). La connaissance de la qualité des eaux d'irrigation est par conséquent indispensable avant toute mise en valeur des sols.

1. Critères de classification des eaux d'irrigation

Les principaux paramètres de caractérisation d'une eau sont : la salinité, la sodicité (SERVANT, 1978) et le faciès chimique (SAFAR, 1983).

D'après SERVANT (1978), la salinité est ordinairement exprimée par la conductivité électrique en dS/m à 25°C. La sodicité d'une eau traduit la propriété qu'a cette eau d'augmenter la proportion de sodium échangeable, quand elle est mise en contact prolongé avec le sol : irrigation, inondation, et remontée de nappe. Le paramètre le plus utilisé pour déterminer la sodicité est le SAR (Sodium adsorption ratio).

Le Laboratoire de Riverside a classé les eaux en fonction de leurs salinités et le danger d'alcalinisation qui peut se produire dans le sol (RICHARDS, 1954) ; les classes déterminées sont :

1.1. Salinité de l'eau

C1 : C.E. à 25°C < 0,25 dS/m : eaux non salines, utilisables pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la plupart des terrains avec peu de chances d'apparition de salinité dans le sol.

C2 : C.E. à 25°C comprise entre 0,25 et 0,75 dS/m : eaux à salinité moyenne, utilisables avec un léger lessivage. Les plantes modérément tolérantes aux sels peuvent pousser dans la plupart des cas sans pratique spéciale de contrôle de la salinité

C3 : C.E. à 25°C comprise entre 0,75 et 2,25 dS/m : eaux à forte salinité, inutilisables pour les sols à drainage restreint. Même avec un bon drainage, des pratiques spéciales de contrôle de salinité peuvent être nécessaires et les plantes ayant une bonne tolérance aux sels peuvent seules être cultivées.

C4 : C.E. à 25°C comprise entre 2,25 et 5 dS/m : eaux à très forte salinité, inutilisables normalement pour l'irrigation. Exceptionnellement, elles peuvent être utilisées sur des sols très perméables avec un bon drainage et avec une dose d'irrigation en excès pour assurer un fort lessivage du sol. Les plantes cultivées devront être très tolérantes aux sels.

1.2. Danger d'alcalinisation du sol

En fonction du risque d'alcalinisation des sols, quatre classes ont été distinguées par RICHARDS (1954), ces classes ne sont pas délimitées par des valeurs absolues mais par des droites à pentes négatives en fonction de l'accroissement de la salinité. Le SAR est calculé selon la formule suivante :

S1 : SAR de 0 à 10 : Eaux faiblement sodiques, utilisables pour l'irrigation de presque tous les sols avec peu de danger d'alcalinisation bien que certaines cultures sensibles au sodium puissent être gênées (avocatier).

S2 : SAR de 10 à 18 : Eaux moyennement sodiques, le danger d'alcalinisation du sol est appréciable dans les sols à texture fine et à forte capacité d'échange. Ces eaux sont utilisables sur les sols à texture grossière ou en présence de gypse.

S3 : SAR de 18 à 26 : Eaux fortement sodiques, pouvant provoquer l'apparition d'une sodicité dangereuse dans la plupart des sols, leur emploi exigera la mise en œuvre d'un aménagement spécial ; bon drainage, fort lessivage, addition de matières organiques.

S4 : SAR > 30 : Eaux très fortement sodiques, le danger d'alcalinisation est très fort, de telles eaux sont impropres à l'irrigation sauf si leur salinité est faible et permet l'addition de calcium soluble ou si le sol en contient suffisamment.

1.3. Le faciès chimique (Diagramme de PIPER)

Le faciès chimique représente la/les anion(s) et cation(s) prédominant dans l'eau ou dans une solution de sol.

Le diagramme de PIPER (1944), utilisé pour la détermination du faciès chimique est divisé en deux triangles de classification : l'un pour le faciès cationique et l'autre pour le faciès anionique. A partir des deux faciès, nous déterminons le faciès global dont la nomination anionique précède toujours celle cationique (par exemple : Chloruré sodique).

Actuellement, les logiciels informatiques permettent la représentation graphique du faciès des eaux sur le diagramme de PIPER. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel DIAGRAMMES version 6.48.

2. Caractérisation de l'eau d'irrigation

Les résultats d'analyse d'eau des quatre forages utilisés pour l'irrigation sont représentés dans le tableau 06.

Tableau 06 : Résultats d'analyse des eaux d'irrigation

		Forage OGX Station 1	Forage BH Station 2	Forage H1 Station 3	Forage H2 Station 3
pH		8.23	8.32	8.2	8.28
Résidu sec (g/l)		4152	640	726	722
C.E. à 25°C (dS/m)		4.39	0.67	0.87	0.85
Bilan ionique (mg/l)	Na⁺	600	125	127.5	125
	K⁺	25	5	3.5	4.00
	Ca⁺⁺	165	42	87.5	87.50
	Mg⁺⁺	255	48	38.4	35.80
	Cl⁻	1187	75	130	125
	SO₄⁻	1140	393	292	285
	HCO₃⁻	131	134	222.65	222.65
SAR	SAR	6.82	3.13	2.86	2.84

Dans la station 01, l'eau utilisée pour l'irrigation provient de la nappe miopliocène du complexe terminal. Cette eau est très fortement salée (C.E. à 25°C de 4,39 dS/m), faiblement sodique (SAR de 6.82) et d'un pH alcalin (8,23).

Dans les stations 02 et 03, les eaux proviennent de la nappe albienne du continental intercalaire.

L'eau d'irrigation de la station 02 est moyennement salée (C.E. à 25°C de 0,67 dS/m), faiblement sodique (SAR de 3.13) et d'un pH alcalin (8,32).

Les eaux d'irrigation de la station 03 sont fortement salées ($0,85 \text{ dS/m} \leq \text{C.E. à } 25^\circ\text{C} \leq 0,87 \text{ dS/m}$), faiblement sodiques ($2,84 \leq \text{SAR} \leq 2,86$) et d'un pH alcalin ($8,2 \leq \text{pH} \leq 8,28$).

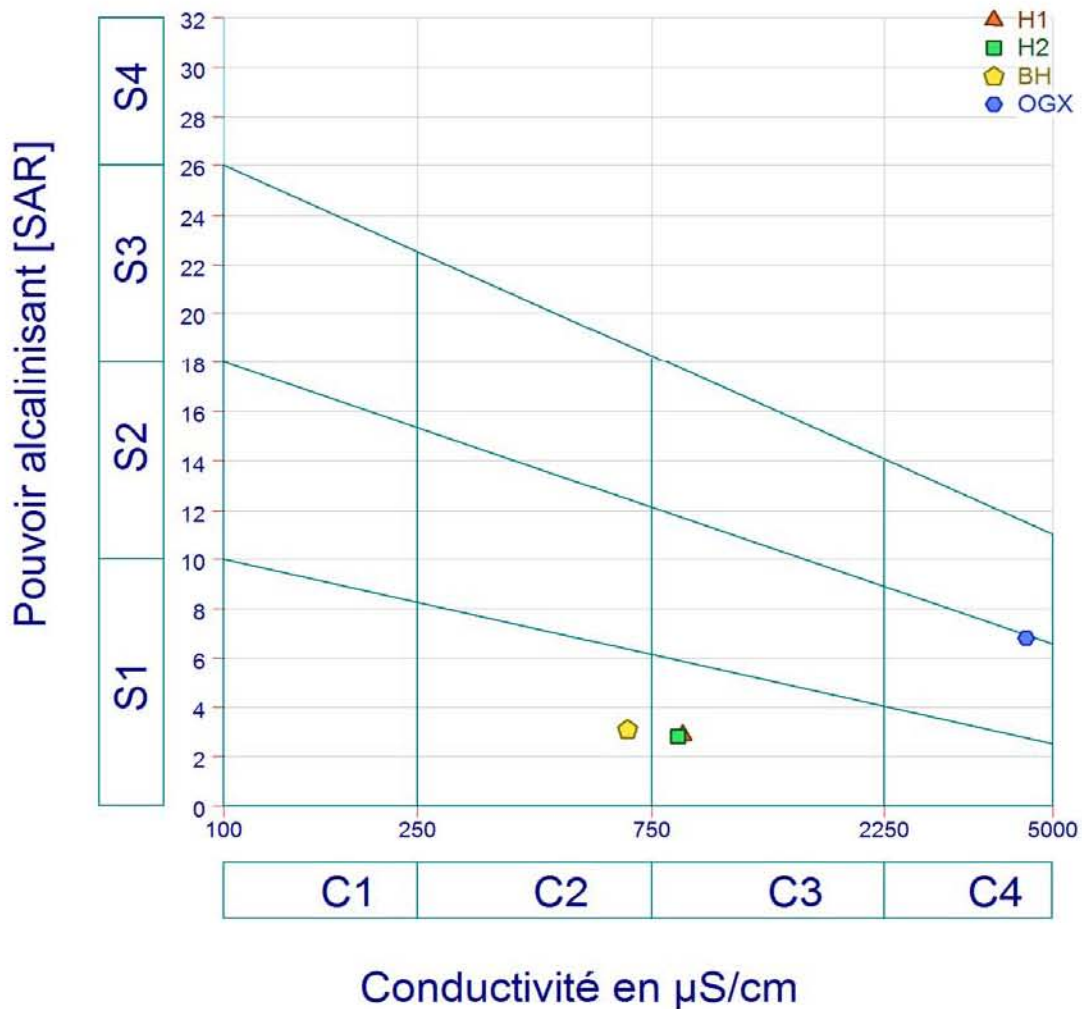


Figure 13. Classification des eaux d'irrigation dans les stations d'étude (Diagramme de RIVERSIDE)

D'après la figure 13, qui représente le diagramme de classification des eaux d'irrigation d'après RIVERSIDE réalisé par le logiciel DIAGRAMMES, trois classes de qualité d'eau d'irrigation sont distinguées, la classe C2S1 (Qualité moyenne à bonne) pour le forage de la station BENHAMOUDA, la classe C3S1 (Qualité moyenne à médiocre) pour les deux forages H1 et H2 de la station HOUTIA et la classe C4S2 (Qualité mauvaise) pour le forage de la station ERIAD.

L'interprétation de la qualité des eaux d'irrigation dans les stations d'étude est présentée dans le tableau 07, selon SERVANT (1978).

Tableau 07 : Qualité des eaux d'irrigation dans les stations d'étude

Forages	Classe	Qualité	Interprétation
BH	C2 – S1	<i>Qualité moyenne à bonne</i>	A utiliser avec précaution dans les sols lourds mal drainés et pour les plantes sensibles (arbres fruitiers).
H1 et H2	C3 – S1	<i>Qualité moyenne à médiocre</i>	A utiliser avec précaution. Nécessité de drainage avec doses de lessivage et/ou apports de gypse.
OGX	C4 – S2	<i>Qualité mauvaise</i>	A utiliser, avec beaucoup de précautions que dans les sols légers et bien drainés et pour des plantes résistantes. Risques élevés. Lessivage et apports de gypse indispensables.

WILCOX (1948) a proposé une méthode pour évaluer les eaux d'irrigation, basée sur le pourcentage de sodium et la conductivité électrique, le logiciel DIAGRAMMES permet de tracer le diagramme de WILCOX (Fig. 14).

Le pourcentage de sodium est calculé selon la formule :

$$\%Na^+ = \frac{(Na^+ + K^+)}{(Ca^{+2} + Mg^{+2} + Na^+ + K^+)} \times 100$$

A partir du diagramme de WICOX (Fig.14), trois classes d'eau sont distinguées :

- La classe « excellente » pour l'eau du forage BH de la station BENHAMOUDA

- La classe « bonne » pour les deux forages H1 et H2 de la station HOUTIA
- La classe « mauvaise » pour l'eau de forage OGX de la station ERIAD

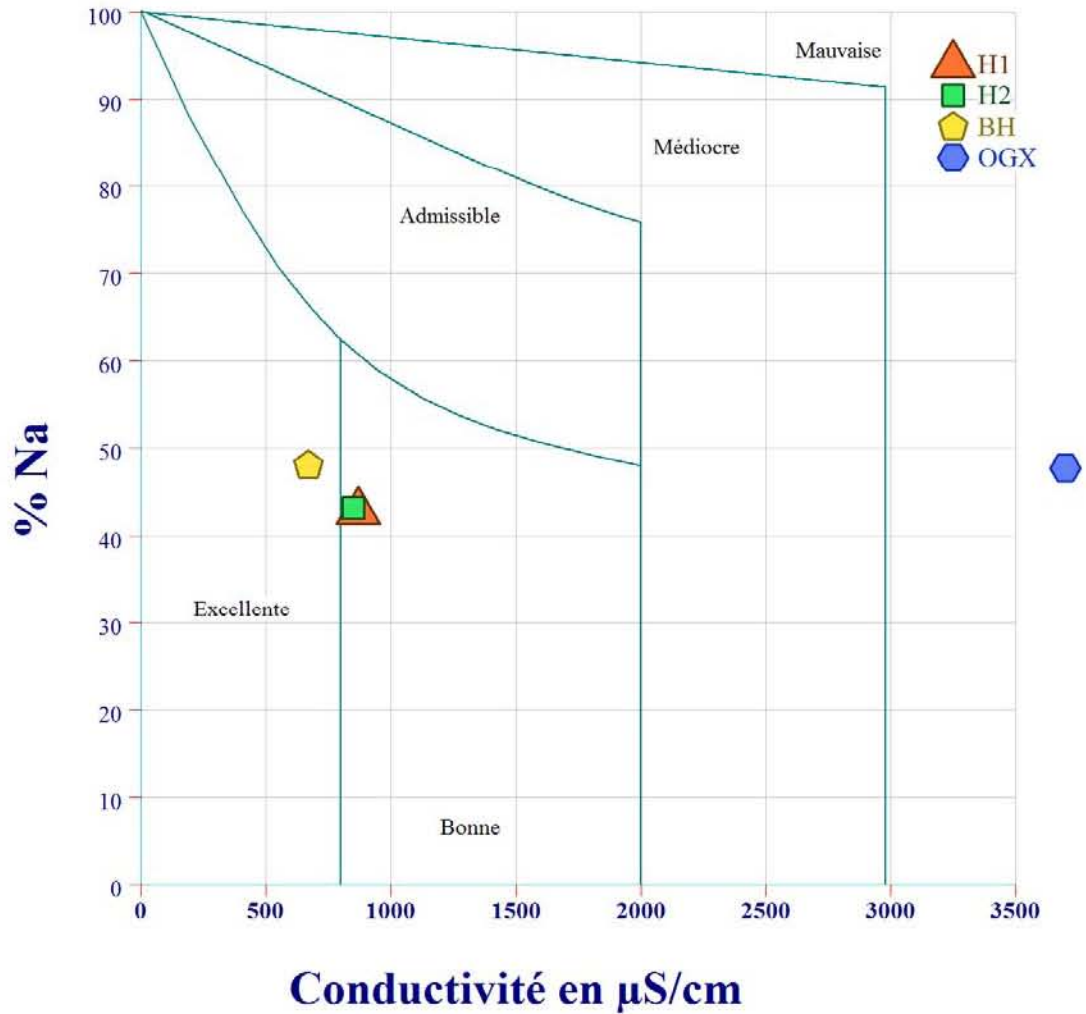


Figure 14. Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation dans les stations d'étude (Diagramme de WILCOX)

Le faciès chimique des eaux d'irrigation des quatre forages des stations étudiées, est représenté dans le diagramme de PIPER (Fig. 15).

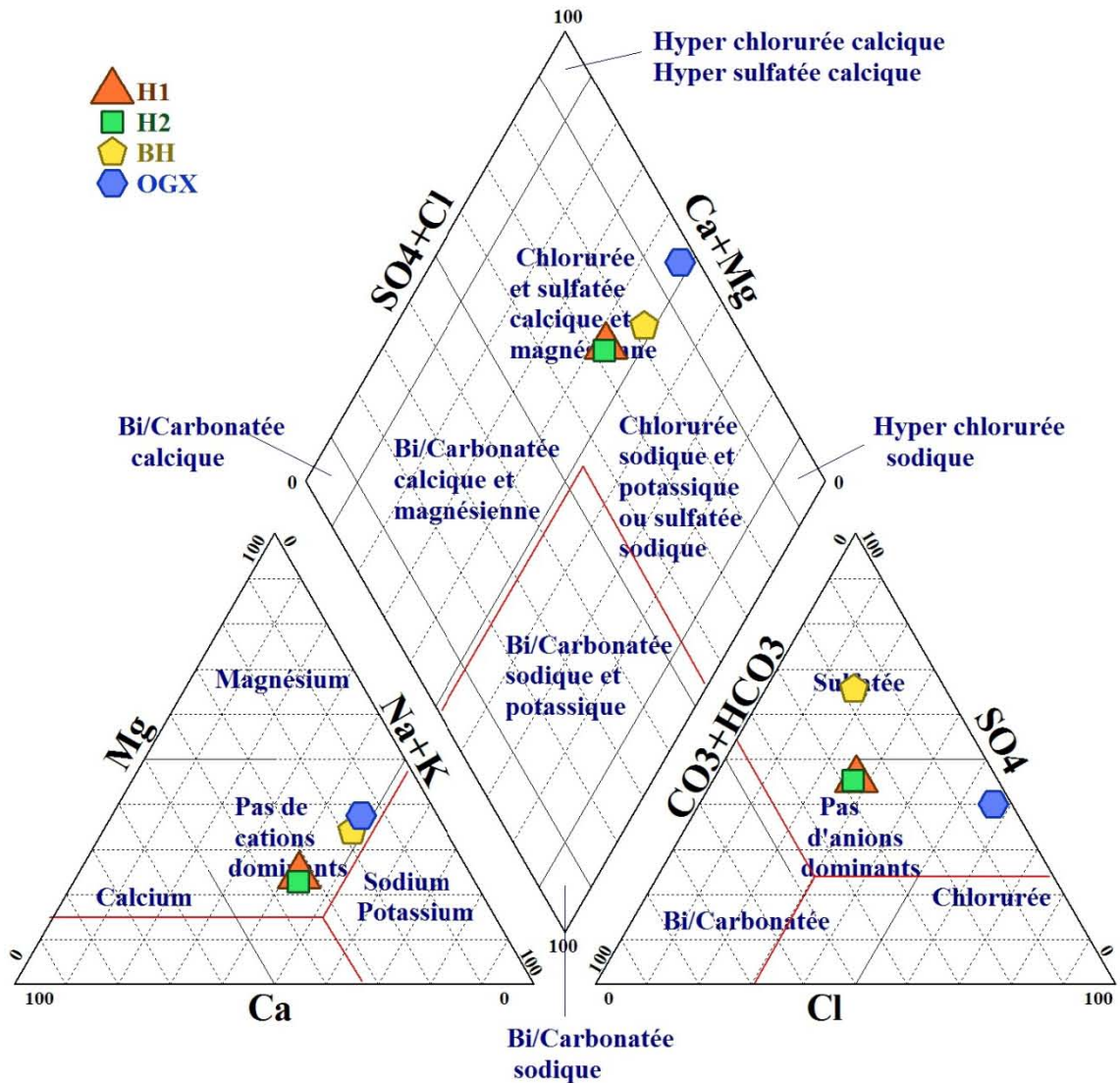


Figure 15 : Diagramme de PIPER pour les eaux des stations d'étude

A partir du diagramme de PIPER (Fig. 15), les échantillons analysés ne présentent pas de cation dominant. Le faciès des anions de la station de BENHAMOUDA est sulfaté, celui de la station ERIAD est chloruré. Les eaux des deux forages H1 et H2 de la station HOUTIA ne présentent pas d'anion dominant.

Le tableau 08 représente synthétiquement le faciès des eaux des forages des stations étudiées.

Tableau 08 : Faciès chimique des eaux d'irrigation

Faciès \ Forages	Forage H1 Station 3	Forage H2 Station 3	Forage BH Station 2	Forage OGX Station 1
Faciès des cations	Pas de cation dominant	Pas de cation dominant	Pas de cation dominant	Pas de cation dominant
Faciès des anions	Pas d'anion dominant	Pas d'anion dominant	Sulfatée	Chlorurée
Faciès chimique global	Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne	Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne	Sulfatée calcique et magnésienne	Chlorurée calcique et magnésienne

Les faciès chimiques des eaux de forages des stations d'étude sont :

- Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne pour les eaux des deux forages de la station HOUTIA.
- Sulfatée calcique et magnésienne pour l'eau de forage de la station BENHAMOUDA
- Chlorurée calcique et magnésienne pour l'eau de forage de la station ERIAD.

Chapitre IV. Etude de la variabilité spatiale de la salinité du sol

L'étude de la salinité du sol par l'analyse de la conductivité électrique est effectuée sur une profondeur de 0 à 25 cm dans toutes les parcelles étudiées avec un nombre de 30 prélèvements par parcelle pris sur les trois diagonales de la parcelle pivot et de même pour la parcelle de référence dans les deux stations 01 et 02. Dans la station 03, l'étude est réalisée avec un maillage systématique de 15 m x 15 m et un nombre de 100 prélèvements par parcelle.

1. Etude de la salinité

1.1. Etude de la salinité du sol dans la station 01

Les résultats d'analyse de la salinité dans la station ERIAD sont présentés synthétiquement dans le tableau 09.

Tableau 09. Résultats d'analyse de la salinité du sol dans la station 01

C.E. à 25°C (dS/m)	ROGX	POGX
Nombre d'échantillons	30	30
Moyenne	0.15	0.39
Écart-type	0.05	0.07
Minimum	0.03	0.28
Maximum	0.24	0.55
Coefficient de variation	31.64	18.73
TVA dS/m/an	-	0.06±0.02

Dans la parcelle de référence ROGX, la salinité varie de 0,03 à 0,24 dS/m avec une moyenne de 0,15±0,05 dS/m, le sol est non salé.

Dans la parcelle POGX, la salinité varie de 0,28 à 0,55 dS/m avec une moyenne de 0,39±0,07 dS/m, le sol est non salé.

L'analyse du taux de variation annuelle montre que la salinité a augmenté dans la parcelle POGX après 4 ans d'irrigation, avec une évolution moyenne annuelle de 0,06±0,02 dS/m/an. L'analyse de variance a montré que cette augmentation (Fig.16) est très hautement significative ($F^{1,58} = 232,085$, $P < 0,0001$, T.H.S.).

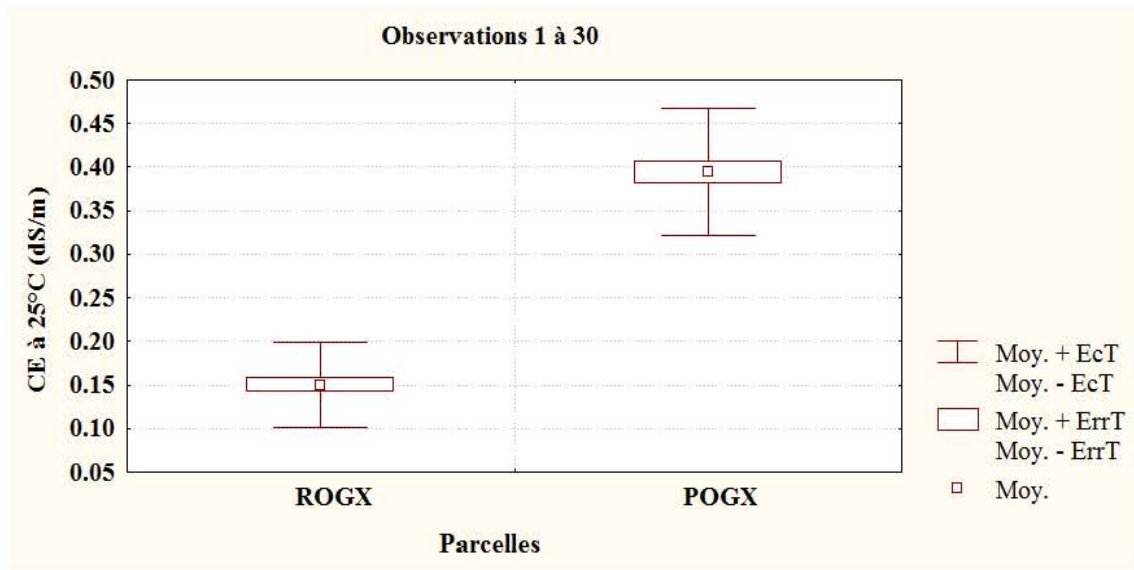


Figure 16. Boite à moustaches de la variation de la salinité dans la station 01

Le test de Tukey, représentant l'analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%, montre que la parcelle de référence ROGX et la parcelle pivot POGX n'appartiennent pas à un seul groupe (Tabl. 10), la différence étant significative.

Tableau 10. Test de Tukey de la salinité du sol dans la station 01

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
POGX vs ROGX	0.244	15.234	2.002	< 0.0001	Oui
Valeur critique du d de Tukey :			2.831		

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
POGX	0.394	A
ROGX	0.150	B

1.2. Etude de la salinité du sol dans la station 02

Les résultats d'analyse de la salinité dans la station BENHAMOUDA sont présentés synthétiquement dans le tableau 11.

Tableau 11. Résultats d'analyse de la salinité du sol dans la station 02

C.E. à 25°C (dS/m)	RBH	PBH
Nombre d'échantillons	30.00	30.00
Moyenne	0.24	0.19
Écart-type	0.16	0.07
Minimum	0.10	0.10
Maximum	0.74	0.36
Coefficient de variation	66.44	36.20
TVA dS/m/an	-	-0.01±0.04

Dans la parcelle de référence RBH, la salinité varie de 0,10 à 0,74 dS/m avec une moyenne de $0,24 \pm 0,16$ dS/m, le sol est non salé.

Dans la parcelle PBH, la salinité varie de 0,10 à 0,36 dS/m avec une moyenne de $0,19 \pm 0,07$ dS/m, le sol est non salé.

L'analyse du taux de variation annuelle montre que la salinité a diminué dans la parcelle PBH après 4 ans d'irrigation, avec une évolution moyenne annuelle de $-0,01 \pm 0,04$ dS/m/an. L'analyse de variance a montré que cette diminution (Fig.17) est non significative ($F^{1,58} = 3,208$, $P = 0,079$, N.S.).

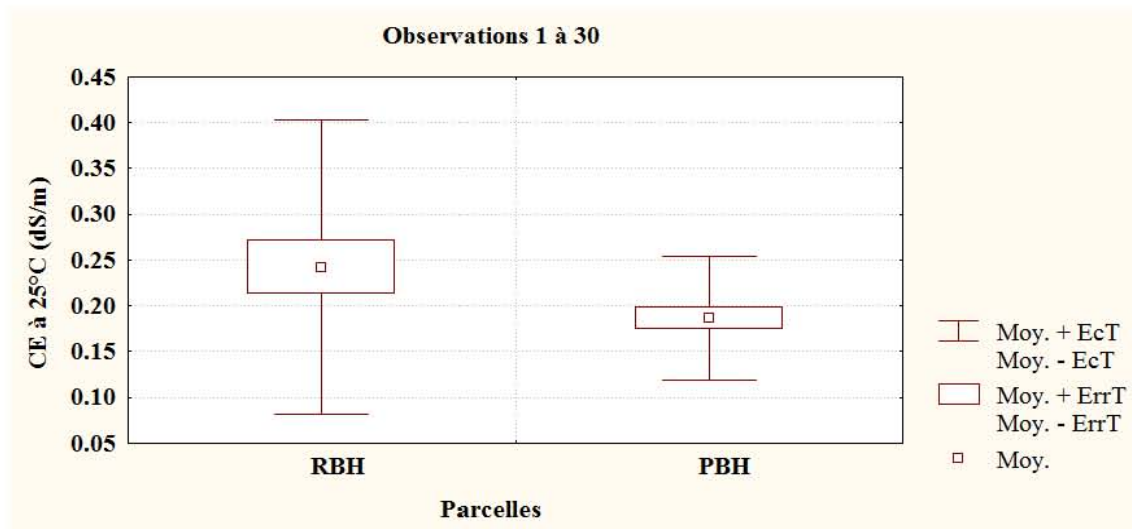


Figure 17. Boîte à moustaches de la variation de la salinité dans la station 02

Le test de Tukey, représentant l'analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%, montre que la parcelle de référence RBH et la parcelle pivot PBH appartiennent à un seul groupe (Tabl. 12), la différence étant non significative.

Tableau 12. Test de Tukey de la salinité du sol dans la station 02

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
RBH vs PBH	0.057	1.791	2.002	0.079	Non
Valeur critique du d de Tukey :			2.831		

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
RBH	0.242	A
PBH	0.185	A

1.3. Etude de la salinité du sol dans la station 03

Les résultats d'analyse de la salinité dans la station HOUTIA sont présentés synthétiquement dans le tableau 13.

Tableau 13. Résultats d'analyse de la salinité du sol dans la station 03

C.E. à 25°C (dS/m)	R	P1	P2
Nombre d'échantillons	100.00	100.00	100.00
Moyenne	0.10	0.18	0.16
Écart-type	0.08	0.09	0.08
Minimum	0.05	0.08	0.08
Maximum	0.42	0.49	0.45
Coefficient de variation	75.18	47.47	46.65
TVA dS/m/an	-	0,004±0,0064	0,003±0,0060

Dans la parcelle de référence R, la salinité varie de 0,05 à 0,42 dS/m avec une moyenne de 0,10±0,08 dS/m, le sol est non salé.

Dans la parcelle P1, la salinité varie de 0,08 à 0,49 dS/m avec une moyenne de 0,18±0,09 dS/m, le sol est non salé.

Dans la parcelle P2, la salinité varie de 0,08 à 0,45 dS/m avec une moyenne de 0,16±0,08 dS/m, le sol est non salé.

L'analyse du taux de variation annuelle montre que la salinité a augmenté dans la parcelle P1 après 19 ans d'irrigation, avec une évolution moyenne annuelle de 0,004±0,0064 dS/m/an, et dans la parcelle P2 avec une évolution moyenne annuelle de

0,003±0,0060 dS/m/an. L'analyse de variance a montré que cette augmentation (Fig.18) est très hautement significative ($F^{2,297} = 24,317$, $P < 0,0001$, T.H.S.).

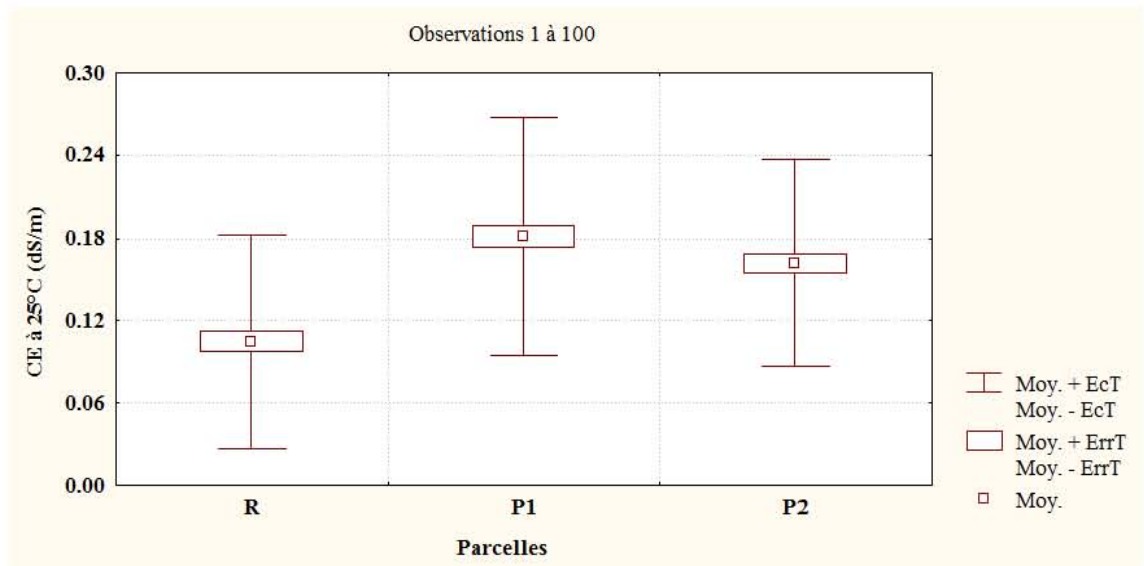


Figure 18. Boîte à moustaches de la variation de la salinité dans la station 03

Des différences significatives sont enregistrées à partir du test de Tukey entre la parcelle de référence R et la parcelle pivot P1 et entre la parcelle de référence R et la parcelle pivot P2. Aucune différence significative n'a été enregistrée entre la parcelle pivot P1 et la parcelle pivot P2, ces deux parcelles appartiennent au même groupe (Tabl. 14).

Tableau 14. Test de Tukey de la salinité du sol dans la station 03

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
P1 vs R	0.076	6.734	2.344	< 0.0001	Oui
P2 vs R	0.056	4.937	2.344	< 0.0001	Oui
P1 vs P2	0.020	1.797	2.344	0.171	Non
Valeur critique du d de Tukey			3.314		

Modalité	Moyenne estimée	Groupes	
P1	0.181	A	
P2	0.161	A	
R	0.105		B

2. Modélisation géostatistique de la variabilité spatiale de la salinité

L'analyse variographique a été effectuée sur quatre modèles les plus fréquemment utilisés: circulaire, sphérique, exponentiel et gaussien, suivie d'une validation croisée afin de choisir le meilleur modèle de variogramme qui sera utilisé par la suite dans la réalisation des cartes de variabilité spatiale par krigeage.

2. 1. Modélisation géostatistique de la salinité dans la parcelle de référence

2.1.1. Analyse variographique

La figure 19 montre le variogramme ajusté au modèle circulaire.

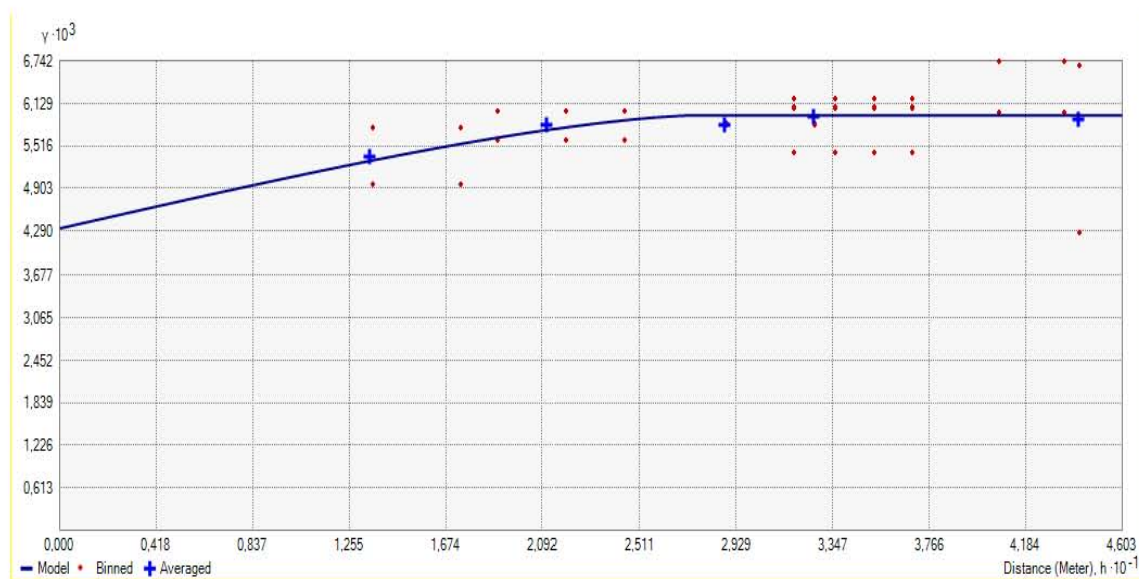


Figure 19. Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle R (Circulaire)

Le variogramme ajusté au modèle circulaire (Fig.19) est caractérisé par un palier de 0,00596, une portée de 27,5 m et un effet de pépite de 0,0043.

L'équation du modèle circulaire de la salinité du sol dans la parcelle de référence s'écrit de la manière suivante :

$$\gamma(h) = 0,004328 + 0,0016277 \left(1 - \left(\frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{h}{27,5} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 27,5} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{27,5} \right)^2} \right)$$

La figure 20 montre le variogramme ajusté au modèle sphérique,

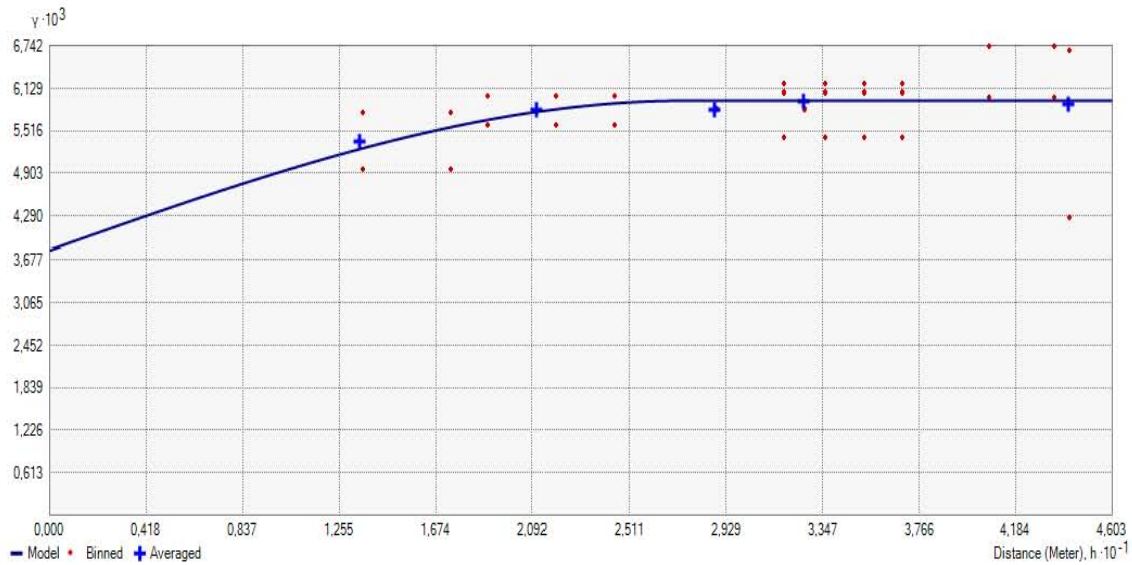


Figure 20. Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle R (sphérique)

Le variogramme ajusté au modèle sphérique (Fig.20) est caractérisé par un palier de 0,00595, une portée de 27,5 m et un effet de pépite de 0,0038

L'équation du modèle sphérique de la salinité du sol dans la parcelle de référence s'écrit ainsi :

$$\gamma(h) = 0,0038072 + 0,0021418 \left(1,5 \left(\frac{h}{27,5} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{27,5} \right)^3 \right)$$

La figure 21 montre le variogramme ajusté au modèle exponentiel,

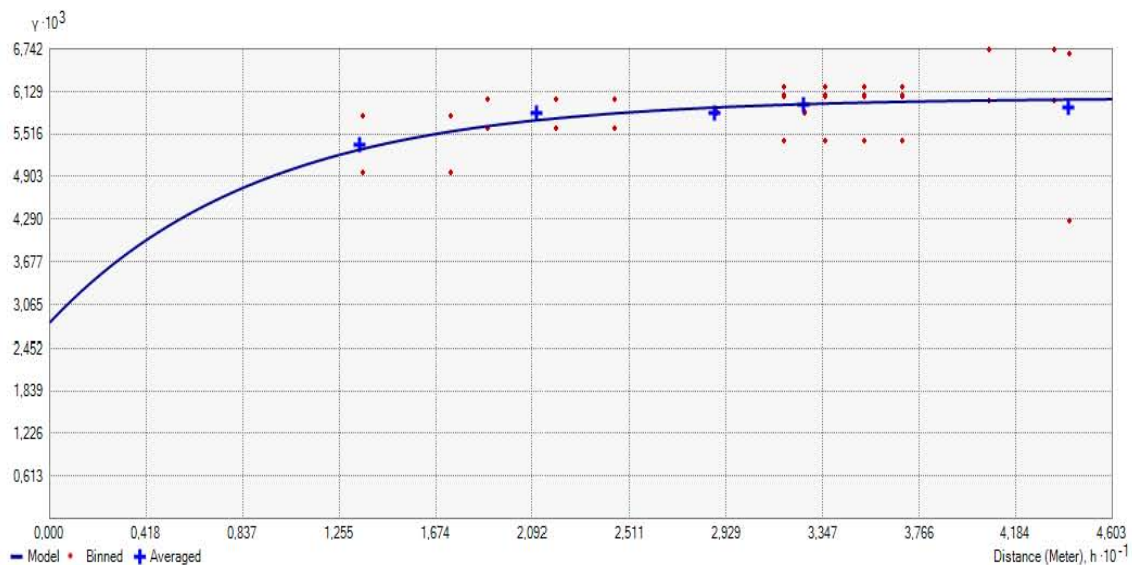


Figure 21. Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle R (Exponentiel)

Le variogramme ajusté au modèle exponentiel (Fig.21) présente un palier de 0,00604, une portée de 27,5 m et un effet de pépité de 0,0028

L'équation du modèle exponentiel de la salinité du sol dans la parcelle de référence s'écrit comme suit :

$$\gamma(h) = 0,0028028 + 0,0032353 \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{27,5}\right) \right)$$

La figure 22 montre le variogramme ajusté au modèle Gaussien,

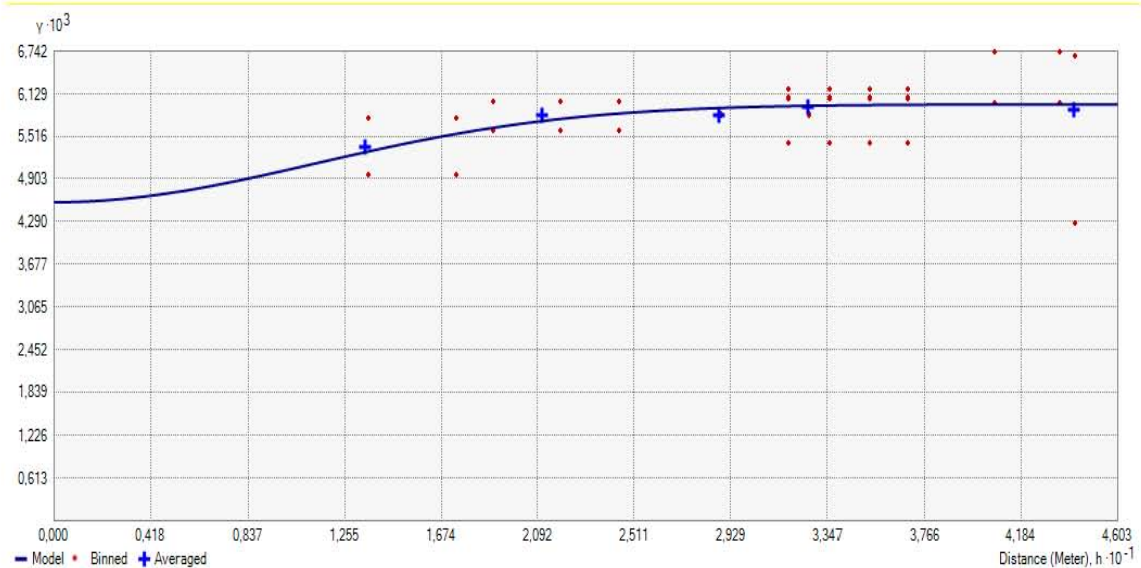


Figure 22. Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle R (Gaussien)

Le variogramme ajusté au modèle Gaussien (Fig.22) présente un palier de 0,00598, une portée de 27,5 m et un effet de pépité de 0,0046.

L'équation du modèle gaussien de la salinité du sol dans la parcelle de référence s'écrit de la façon suivante :

$$\gamma(h) = 0,0045666 + 0,0014097 \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{27,5}\right)^2 \right)$$

2.1.2. Validation croisée

Le tableau 15 représente une synthèse des résultats de la validation croisée des modèles de variogramme de la salinité du sol dans la parcelle de référence.

Tableau 15 : Validation croisée des variogrammes de la salinité de la parcelle de référence

CE T	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	100 of 100	100 of 100	100 of 100	100 of 100
Erreur moyenne de prédiction (ME)	0,00057	0,00051	0,00051	0,00054
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,076767	0,076816	0,076746	0,076759
Erreur moyenne standardisée (MSE)	0,00538	0,00473	0,00460	0,00496
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	0,97898	0,97914	0,97955	0,97948
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	0,07870	0,07874	0,07863	0,07865

A partir du tableau 15, représentant les paramètres de la validation croisée des variogrammes expérimentaux de la salinité dans la parcelle de référence, tous les modèles ont une erreur de prédiction moyenne et une erreur moyenne standardisée proche du 0 ainsi qu'une erreur quadratique moyenne standardisée proche du 1, ce qui signifie que les quatre modèles sont optimaux. Le modèle le plus valide est le modèle exponentiel car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche de l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

Le modèle exponentiel fournira la meilleure interpolation possible par krigeage, et nous permettra de tracer la carte la plus fiable.

2.1.3. Cartographie par krigeage

Les résultats de la validation croisée ont montrés que le meilleur modèle de variogramme expérimental est le modèle exponentiel. Ce modèle a été utilisé pour la réalisation de la carte de variabilité spatiale de la salinité dans la parcelle de référence par krigeage.

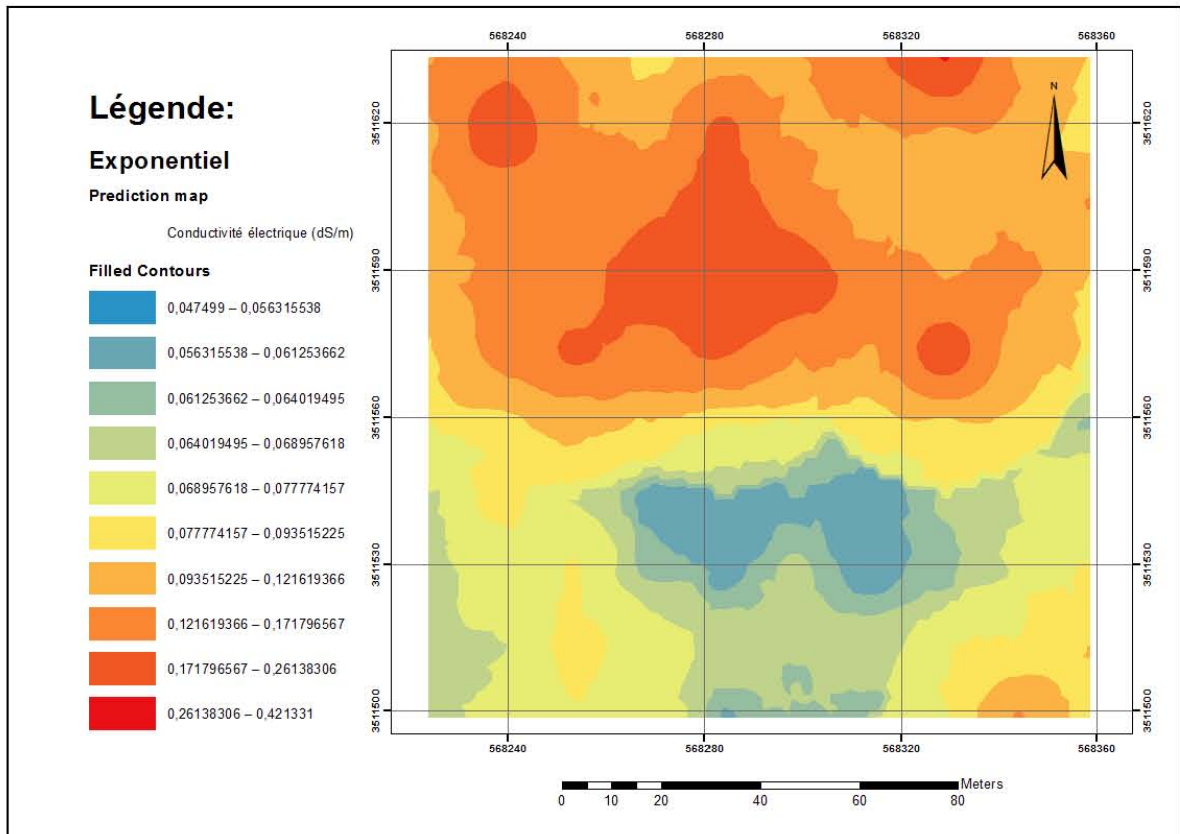


Figure 23. Carte de variabilité spatiale de la salinité dans la parcelle de référence

La carte (Fig. 23) montre une variation très élevée de la salinité dans la parcelle de référence, avec un coefficient de variation de 75,18% selon l'échelle de NOLIN et al. (1997).

Nous observons que la variation de la salinité dans cette parcelle augmente suivant un gradient sud-nord, les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans le nord de la parcelle. Le sol est non salé dans toute la parcelle avec des valeurs variant de 0.05 à 0.42 dS/m.

2.2. Modélisation géostatistique de la variabilité de la salinité dans les parcelles cultivées

2.2.1. Modélisation géostatistique de la variabilité de la salinité dans la parcelle P1

2.2.1.1. Analyse variographique

La figure 24 montre le variogramme ajusté au modèle circulaire,

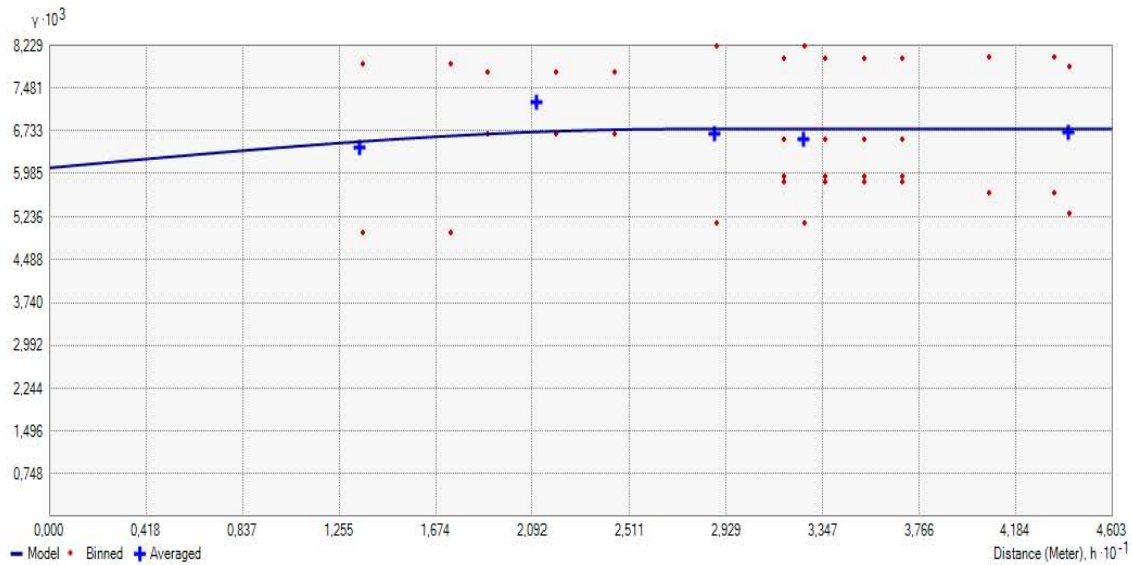


Figure 24. Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle P1 (Circulaire)

Le variogramme ajusté au modèle circulaire (Fig. 24) présente un palier de 0,00675, une portée de 27,5 m et un effet de pépité de 0,00639

L'équation du modèle circulaire de la salinité du sol dans la parcelle P1 s'écrit de la manière suivante :

$$\gamma(h) = 0,006395 + 0,00035615 \left(1 - \left(\frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{h}{27,5} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 27,5} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{27,5} \right)^2} \right)$$

La figure 25 montre le variogramme ajusté au modèle sphérique,

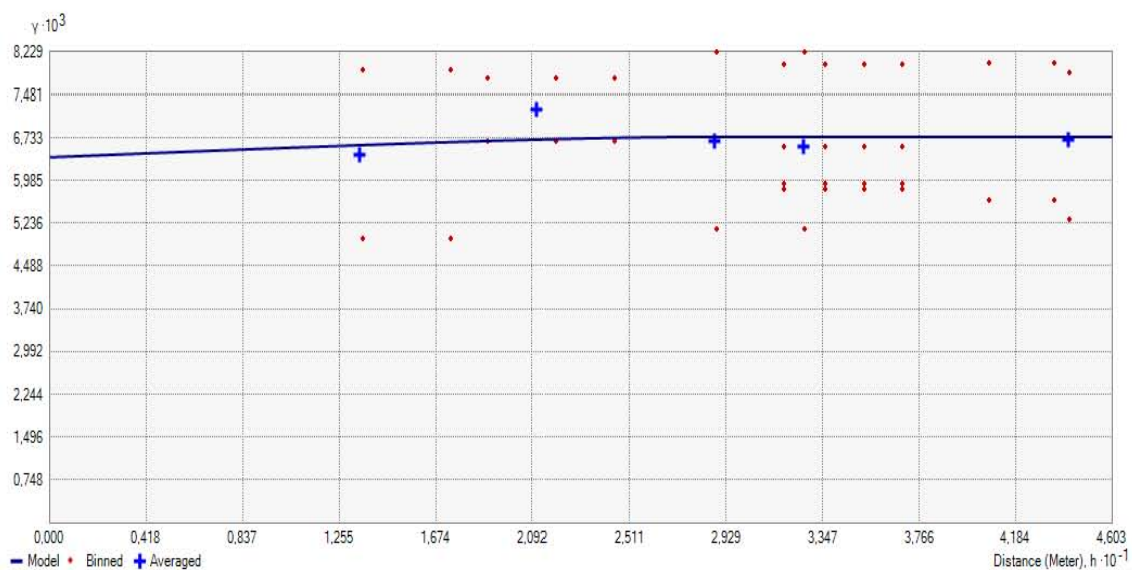


Figure 25. Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle P1 (sphérique)

Le variogramme ajusté au modèle sphérique (Fig. 25) présente un palier de 0,00676, une portée de 27,5 m et un effet de pépite de 0,00608.

L'équation du modèle sphérique de la salinité du sol dans la parcelle P1 s'écrit ainsi :

$$\gamma(h) = 0,0060819 + 0,0006803 \left(1,5 \left(\frac{h}{27,5} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{27,5} \right)^3 \right)$$

La figure 26 montre le variogramme ajusté au modèle exponentiel.

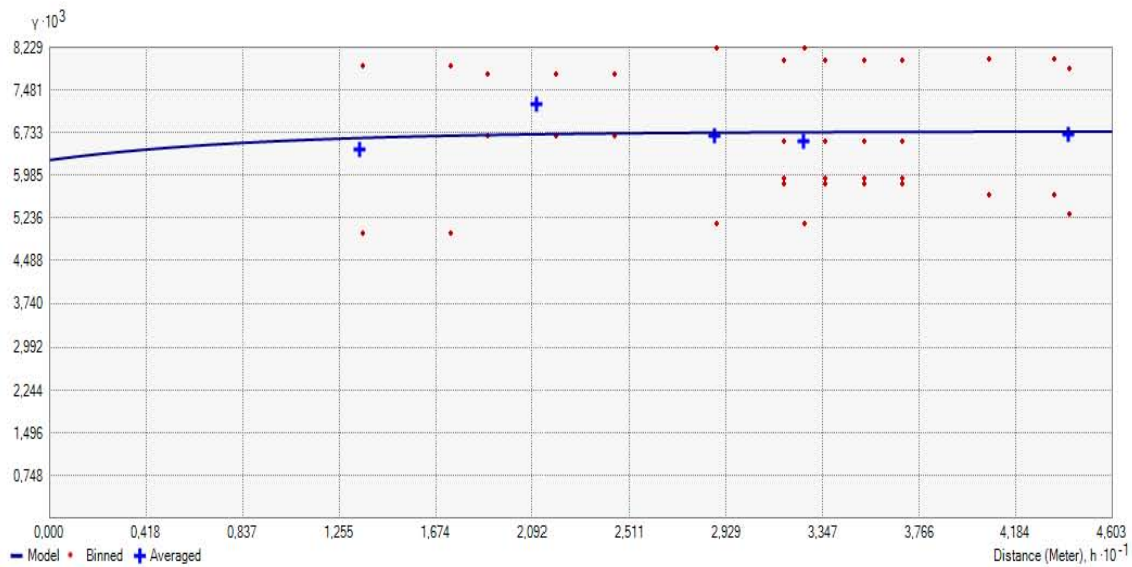


Figure 26. Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle P1 (Exponentiel)

Le variogramme ajusté au modèle exponentiel (Fig. 26) présente un palier de 0,00676, une portée de 27,5 et un effet de pépite de 0,00625

L'équation du modèle exponentiel de la salinité du sol dans la parcelle P1 s'écrit comme suit :

$$\gamma(h) = 0,0062529 + 0,00050253 \left(1 - \exp \left(- \frac{h}{27,5} \right) \right)$$

La figure 27 montre le variogramme ajusté au modèle Gaussien,

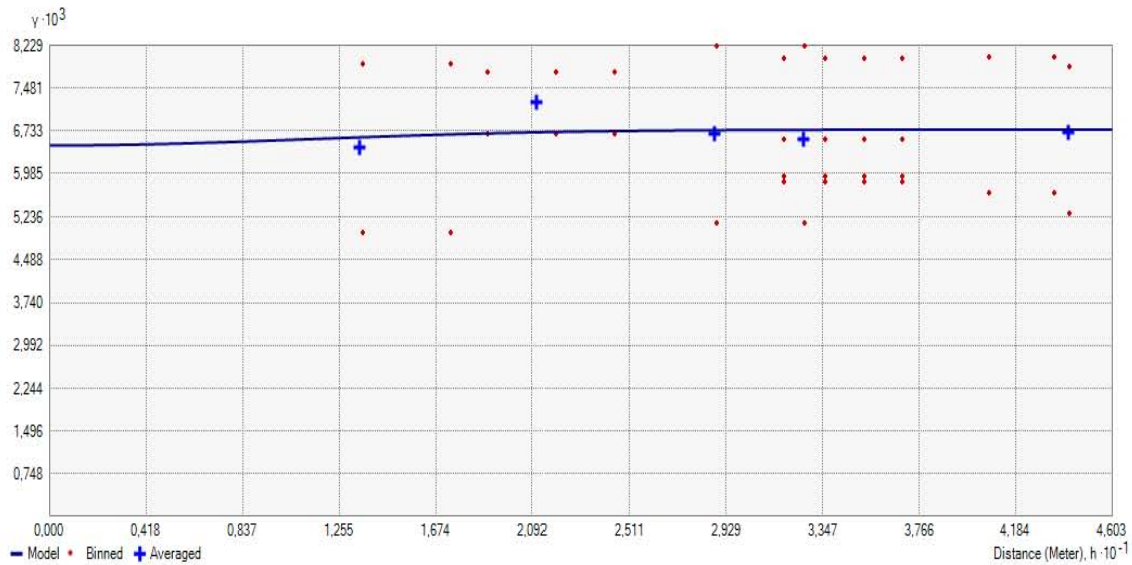


Figure 27. Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle P1 (Gaussien)

Le variogramme ajusté au modèle gaussien (Fig. 27) présente un palier de 0,00675, une portée de 27,5 m et un effet de pépité de 0,00647.

L'équation du modèle gaussien de la salinité du sol dans la parcelle P1 s'écrit de la façon suivante :

$$\gamma(h) = 0,0064745 + 0,00027771 \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{27,5}\right)^2 \right)$$

2.2.1.2. Validation croisée

Le tableau 16 représente une synthèse des résultats de la validation croisée des modèles de variogramme de la salinité du sol dans la parcelle pivot 1.

Tableau 16: Validation croisée des variogrammes de la salinité de la parcelle P1

CE P1	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	100 of 100	100 of 100	100 of 100	100 of 100
Erreur moyenne de prédiction (ME)	-0,00120	-0,00119	-0,00120	-0,00120
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,08961	0,08948	0,08966	0,08962
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,01210	-0,01199	-0,01207	-0,01208
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	1,02698	1,02771	1,02627	1,02676
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	0,08687	0,08668	0,08699	0,08691

A partir du tableau 16, représentant les paramètres de la validation croisée des variogrammes expérimentaux de la salinité dans la parcelle P1, tous les modèles ont une erreur de prédiction moyenne et une erreur moyenne standardisée proche du 0 ainsi qu'une erreur quadratique moyenne standardisée proche du 1, ce qui signifie que les quatre modèles sont optimaux. Le modèle le plus valide est le modèle exponentiel car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche de l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

Le modèle exponentiel fournira la meilleure interpolation possible par krigeage, et nous permettra de tracer la carte la plus fiable.

2.2.1.3. Cartographie par krigeage

Les résultats de la validation croisée ont montrés que le meilleur modèle de variogramme expérimental est le modèle exponentiel. Ce modèle a été utilisé pour la réalisation de la carte de variabilité spatiale de la salinité dans la parcelle de référence par krigeage.

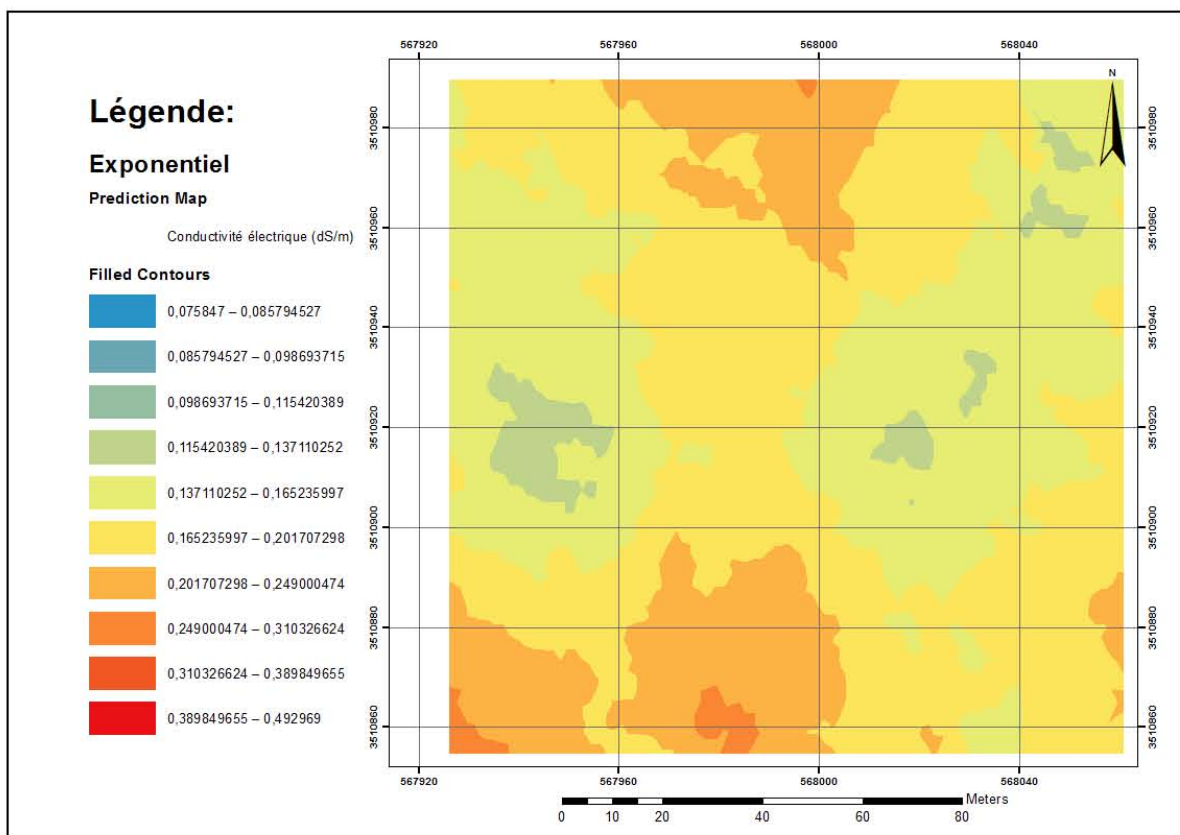


Figure 28. Carte de variabilité spatiale de la salinité dans la parcelle P1

La carte (Fig. 28) montre une variation élevée de la salinité dans la parcelle P1, avec un coefficient de variation de 47,47% selon l'échelle de NOLIN et al. (1997).

Le sol est non salé dans toute la parcelle, la conductivité électrique varie de 0,08 à 0,49 dS/m. Les valeurs les plus élevées se trouvent dans le nord et sud-ouest de la parcelle.

2.2.2. Modélisation géostatistique de la variabilité de la salinité dans la parcelle P2

2.2.2.1. Analyse variographique

La figure 29 montre le variogramme ajusté au modèle circulaire,

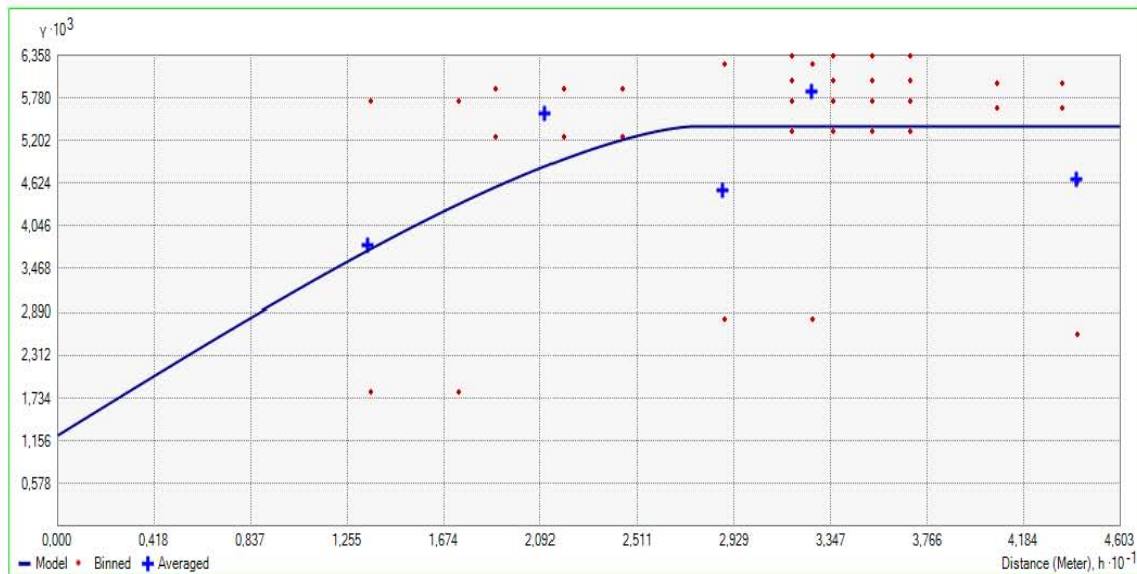


Figure 29. Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle P2 (Circulaire)

Le variogramme ajusté au modèle circulaire (Fig. 29) présente un palier de 0,00539, une portée de 27,5 m et un effet de pépité de 0,0012

L'équation du modèle circulaire de la salinité du sol dans la parcelle P2 s'écrit de la manière suivante :

$$\gamma(h) = 0,0012243 + 0,0041695 \left(1 - \left(\frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{h}{27,5} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 27,5} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{27,5} \right)^2} \right)$$

La figure 30 montre le variogramme ajusté au modèle sphérique,

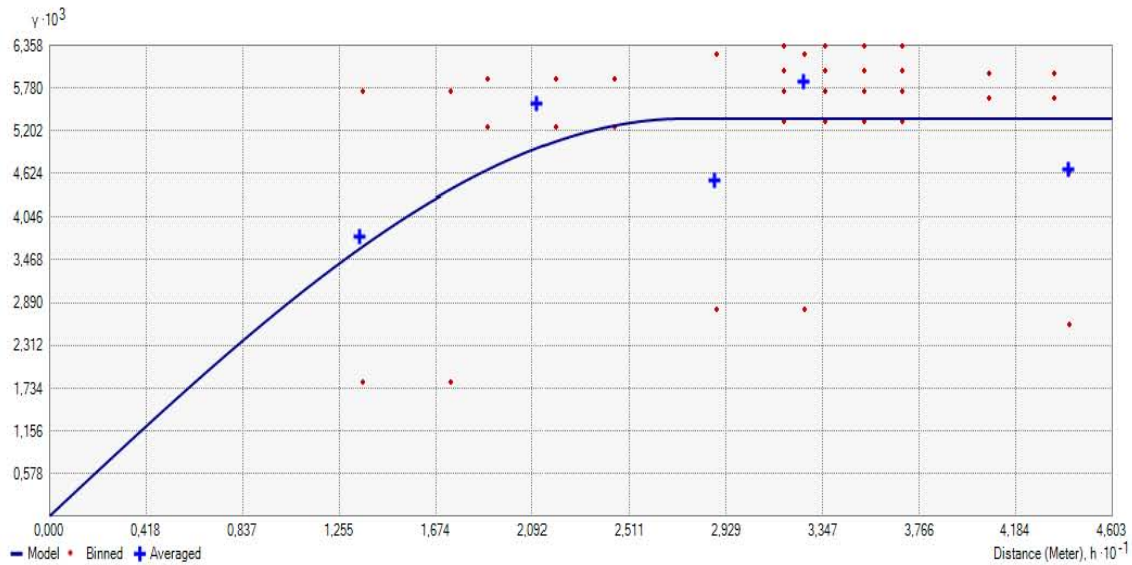


Figure 30. Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle P2 (sphérique)

Le variogramme ajusté au modèle sphérique (Fig. 30) présente un palier de 0,00537, une portée de 27,5 m et ne présente pas un effet de pépite

L'équation du modèle sphérique de la salinité du sol dans la parcelle P1 s'écrit ainsi :

$$\gamma(h) = 0,0053658 \left(1,5 \left(\frac{h}{27,5} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{27,5} \right)^3 \right)$$

La figure 31 montre le variogramme ajusté au modèle exponentiel,

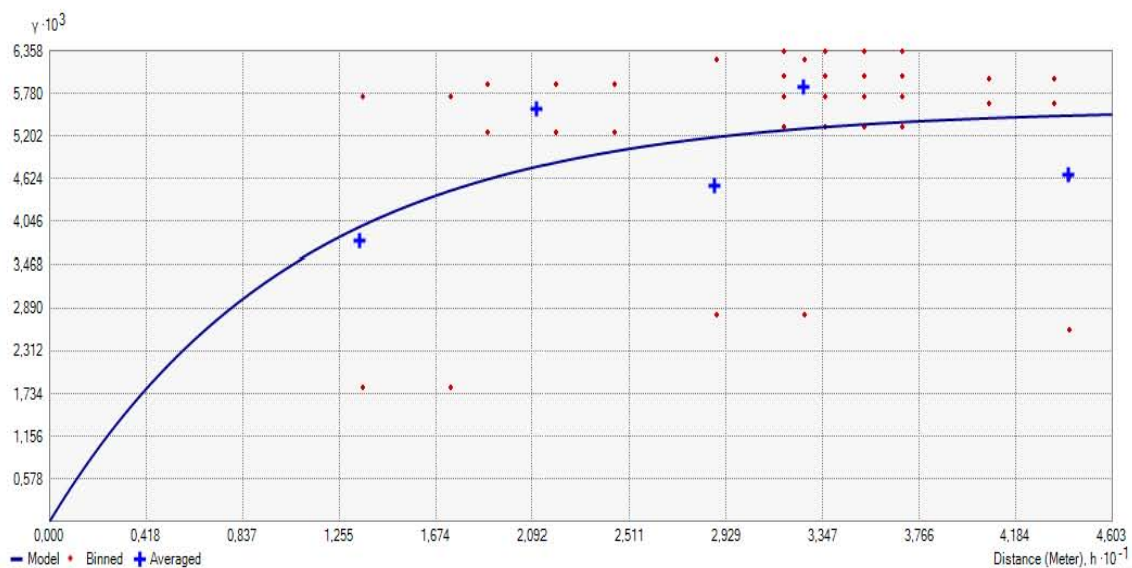


Figure 31. Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle P2 (Exponentiel)

Le variogramme ajusté au modèle exponentiel (Fig. 31) présente un palier de 0,00557, une portée de 32,3 m et ne présente pas un effet de pépité

L'équation du modèle exponentiel de la salinité du sol dans la parcelle P2 s'écrit comme suit :

$$\gamma(h) = 0,0055703 \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{32,302}\right) \right)$$

La figure 32 montre le variogramme ajusté au modèle Gaussien,

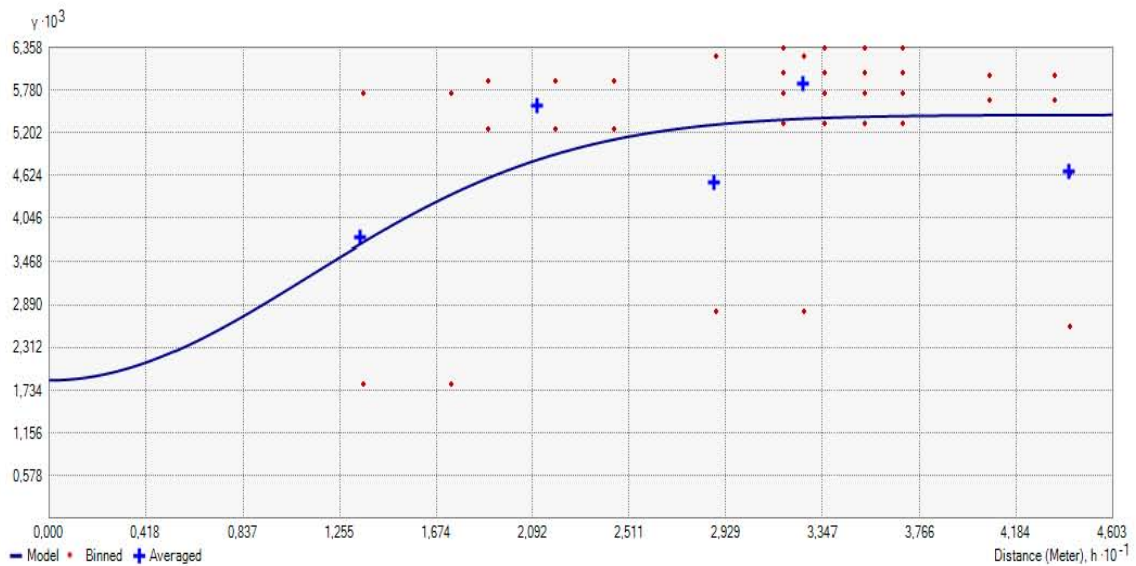


Figure 32. Variogramme de la salinité du sol dans la parcelle P2 (Gaussien)

Le variogramme ajusté au modèle gaussien (Fig. 32) présente un palier de 0,00544, une portée de 27,5 m et un effet de pépité de 0,0019.

L'équation du modèle gaussien de la salinité du sol dans la parcelle P2 s'écrit de la façon suivante :

$$\gamma(h) = 0,0018651 + 0,003578 \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{27,5}\right)^2 \right)$$

2.2.2.2. Validation croisée

Le tableau 17 représente une synthèse des résultats de la validation croisée des modèles de variogramme de la salinité du sol dans la parcelle pivot 2.

Tableau 17 : Validation croisée des variogrammes de la salinité de la parcelle P2

CE P2	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	100 of 100	100 of 100	100 of 100	100 of 100
Erreur moyenne de prédiction (ME)	-0,00095	-0,00097	-0,00147	-0,00102
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,063562	0,061565	0,066369	0,063896
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,011948	-0,012361	-0,018953	-0,013015
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	0,959325	0,936310	0,964797	0,961169
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	0,065807	0,065162	0,068548	0,066072

A partir du tableau 17, représentant les paramètres de la validation croisée des variogrammes expérimentaux de la salinité dans la parcelle P1, tous les modèles ont une erreur de prédiction moyenne et une erreur moyenne standardisée proche du 0 ainsi qu'une erreur quadratique moyenne standardisée proche du 1, ce qui signifie que les quatre modèles sont optimaux. Le modèle le plus valide est le modèle gaussien car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche de l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

Le modèle gaussien fournira la meilleure interpolation possible par krigeage, et nous permettra de tracer la carte la plus valide.

2.2.2.3. Cartographie par krigeage

Les résultats de la validation croisée ont montrés que le meilleur modèle de variogramme expérimental est le modèle gaussien. Ce modèle a été utilisé pour la réalisation de la carte de variabilité spatiale de la salinité dans la parcelle de référence par krigeage.

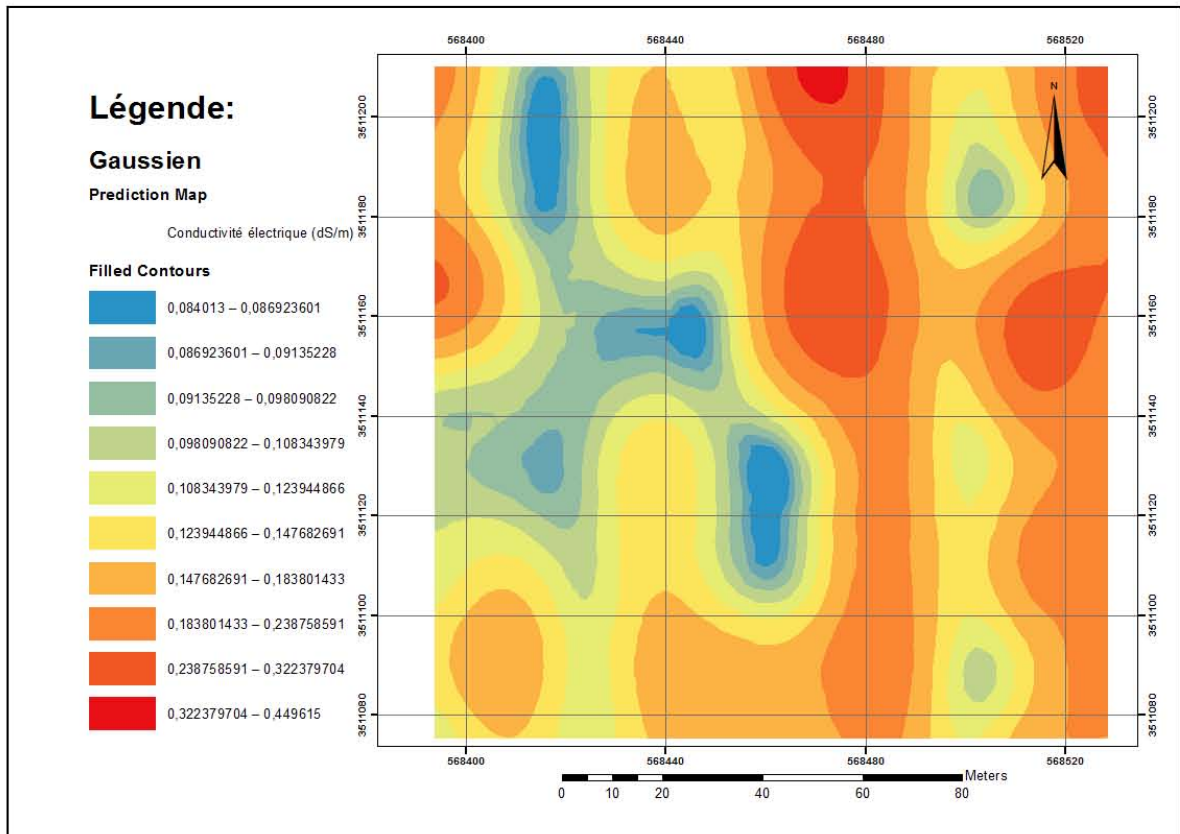


Figure 33. Carte de variabilité spatiale de la salinité dans la parcelle P2

La carte (Fig.33) montre une variation élevée de la salinité dans la parcelle P2, avec un coefficient de variation de 46,65% selon l'échelle de NOLIN et al. (1997).

Dans la parcelle P2, la conductivité électrique varie de 0,08 à 0,45 dS/m, ce qui signifie que le sol est non salé. Les valeurs les plus élevées se trouvent dans l'est et le nord-ouest de la parcelle.

3. Discussions

L'étude de la variabilité spatiale de la salinité du sol exprimée par la conductivité électrique de l'extrait dilué, a été réalisée dans trois stations dont l'une à Hassi Ben Abdallah, Ouargla (station 01) et les deux autres à Hassi Fehal, Ghardaïa (station 01 et 02),

Dans les stations 01 et 02, les parcelles pivots ont été exploitées pendant 04 ans alors que dans la station 03, les parcelles ont été exploitées pendant 19 ans.

Les prélèvements ont été réalisés sur une profondeur de 0 à 25 cm dans toutes les parcelles étudiées avec un nombre de 30 prélèvements par parcelle dans les deux stations

01 et 02. Dans la station 03, l'échantillonnage a été réalisé sur une maille régulière de 15 m x 15 m avec un nombre de 100 prélèvements par parcelle, une de référence jamais cultivée et deux parcelles exploitées pendant 19 ans.

Les résultats d'analyse de la salinité du sol ont révélé une augmentation significative de la salinité dans la parcelle POGX après 4 ans de mise en culture, avec un taux de variation annuelle de la salinité de 0.06 ± 0.02 dS/m/an, ce qui est dû principalement à l'action de l'irrigation continue par une eau saline de qualité mauvaise (C4S2), la salinité de l'eau d'irrigation étant de 4.39 dS/m, ce qui a fait augmenter le stock en sels solubles dans le sol, étant donné que l'effet des engrais utilisés sur la salinité du sol est négligeable à celui de l'eau d'irrigation surtout avec l'utilisation du TSP 46% et l'urée 46 % qui d'après MOUGHILI (2000) ont un effet négligeable sur la salinité du sol.

L'irrigation a un effet souvent défavorable sur le plan de la salinisation notamment dans les zones arides où les eaux d'irrigation sont généralement chargées (AUBERT, 1975 ; HULLIN, 1983 ; DAOUD et HALITIM, 1994 ; CONDOM, 2000). BENBRAHIM et *al.* (2016) et RECHACHI (2017) signalent que la pratique empirique de l'irrigation engendre dans la majorité des cas une salinisation secondaire des terres.

Ce résultat se rapproche des travaux réalisés dans la région de Ouargla sur des parcelles irriguées par pivot à Gassi Touil (BOUZID, 1993 ; DAOUD et HALITIM, 1994 ; DJILI et *al.*, 2003), ainsi qu'à l'échelle internationale, à titre d'exemple non exhaustif par BADRAOUI et *al.* (1998) au Maroc et SALIM et TESSIER (1998) en Syrie.

Contrairement à la station ERIAD (Hassi Ben Abdellah, Ouargla), la mise en culture pendant 4 ans dans la station de BENHAMOUDA (Hassi Fehal, Ghardaïa) n'a pas engendré une augmentation de la salinité du sol, cela est dû à la qualité meilleure de l'eau d'irrigation qui appartient à la classe C2S1 (Qualité moyenne à bonne).

Cependant, une diminution non significative de la salinité du sol a été enregistrée dans la station de BENHAMOUDA suite à la lixiviation des sels par une eau d'irrigation de bonne qualité, le taux de variation annuelle étant de -0.01 ± 0.04 dS/m/an.

Dans la station de HOUTIA, une augmentation très hautement significative de la salinité après 19 ans de mise en culture a été enregistrée, avec un taux de variation annuelle

de $0,004 \pm 0,0064$ dS/m/an dans la parcelle P1 et de $0,003 \pm 0,0060$ dS/m/an dans la parcelle P2.

Malgré l'augmentation très hautement significative de la salinité du sol dans les deux parcelles P1 et P2, le sol demeure non salé, ce qui n'affecte pas le rendement de la plupart des cultures (MAAS et HOFFMAN, 1977). Le test de Tukey a révélé que les deux parcelles P1 et P2 appartiennent au même groupe, la différence de la salinité entre ces deux parcelles étant non significative, montrant ainsi que la salinité évolue d'une manière analogue dans les deux parcelles. Ce résultat se rapproche de celui trouvé par BENBRAHIM *et al.* (2016) dans la région de Ouargla où les parcelles exploitées pendant la même période ont montré la même tendance d'évolution et appartenaient au même groupe.

Le maintien du niveau de la salinité dans la station de HOUTIA après une période d'exploitation relativement longue (19 ans) est du à l'irrigation avec une eau de qualité moyenne à médiocre (classe C3S1), ainsi que la texture grossière du sol favorisant une bonne lixiviation des sels, en l'absence d'une nappe phréatique proche de la surface.

Il est à signaler que l'intensité de l'évolution de la salinité est en rapport avec la qualité de l'eau d'irrigation utilisée (RICHARDS, 1954 ; DURAND, 1958 ; DURAND, 1983, HALILAT, 1998 ; DJILI *et al.*, 2003 ; BENBRAHIM, 2001 et BENBRAHIM *et al.*, 2016).

De point de vue de la répartition spatiale de la salinité, le coefficient de variation de la conductivité électrique du sol a diminué de 31,64 % à 18,73 % dans la station ERIAD-Ouargla sans que la classe de variabilité ne soit affectée, l'intensité de la variation demeure modérée après 04 ans d'exploitation du sol.

La pratique de la céréaliculture sous pivot a permis la diminution de l'intensité de variabilité spatiale de la salinité dans les deux stations de Hassi Fehal, qui passe d'une variation très élevée à une variation élevée ; en effet, le coefficient de variation a été réduit de 66,44% à 36,20 % dans la station de BENHAMOUDA après 04 ans d'exploitation du sol et de 75,18% à 47,47 % et 46,65 % dans les parcelles P1 et P2 respectivement dans la stations de HOUTIA.

ASKRI et BOUHLILA (2010), ont enregistré que la salure des sols non irrigués en Tunisie est hétérogène en surface sous climat aride. Dans la région d'Ouargla, BENBRAHIM (2001) a trouvé que le sol de la parcelle non cultivée est hétérogène de point de vue morphologique et texturale.

Cette tendance générale de diminution de l'intensité de la variation de la salinité dans les trois stations étudiées peut être expliquée par l'impact des pratiques agricoles surtout de l'irrigation sur la répartition des sels dans le sol avec une tendance d'homogénéisation de cette distribution. Le facteur physiologique n'est pas à négliger, la pratique intensive de la céréaliculture avec une colonisation importante du système racinaire dans l'horizon de surface, contribue considérablement à la redistribution des sels dans le sol.

La modélisation géostatistique a indiqué différents modèles de distribution spatiale de la salinité ainsi que différents niveaux de dépendance spatiale, la validation croisée a montré que les modèles de variogrammes les plus fiables sont l'exponentiel pour la parcelle de référence et la parcelle P1 et le gaussien pour la parcelle P2 (Tableau 18).

Tableau 18 : Modèles de variogramme les mieux adaptés et paramètres des modèles pour la salinité du sol

	CE T (Exponentiel)	CE P1 (Exponentiel)	CE P2 (Gaussien)
Effet de pépite	0,0028	0,00625	0,0019
Portée (m)	27,500	27,5	27,5
Palier	0,00604	0,00676	0,00544
Degré de dépendance spatiale (%)	46,42	92,56	34,26
DDS	(modéré)	(faible)	(modéré)

Dans des études sur la variabilité spatiale de la salinité du sol, différents modèles ont été signalés comme étant les plus fiables, en fonction de la nature du sol, du type d'aménagement agricole, de la saison et du même de la grille d'échantillonnage utilisée. En effet, le modèle sphérique seul a été adopté par DING et YU (2014) et SHI et *al.* (2005), le sphérique et le gaussien par HE et *al.* (2015), le Gaussien seul par HU et *al.* (2014) et TOLA et *al.*, 2017, l'exponentiel seul par KILIC et *al.* (2012) et le sphérique, gaussien et exponentiel par ADHIKARI et *al.* (2011)...

L'analyse variographique a révélé un effet de pépite très faible, ce qui signifie que la variation de la salinité à des distances inférieures au pas d'échantillonnage (15 m) est

faible dans les trois parcelles. En effet, l'effet de pépite peut être défini comme un indicateur de continuité à des distances proches (AL-OMRAN *et al.*, 2013). La valeur de pépite représente la variabilité au champ indétectable par l'intervalle d'échantillonnage choisi (TRANGMAR *et al.*, 1986 ; CAMBARDELLA *et al.*, 1994) ; c'est-à-dire l'existence de structures à une échelle beaucoup plus petite que celle explorée, choses qui sont négligeables dans la variation de la salinité du sol des trois parcelles étudiées.

Le degré de dépendance spatiale (DDS) est couramment utilisé en termes de rapport entre la pépite et le palier et exprimé en pourcentage (TRANGMAR *et al.*, 1986 ; CAMBARDELLA *et al.*, 1994 ; EMADI *et al.*, 2008 ; ZUO *et al.*, 2008).

Dans la parcelle de référence et la parcelle P2, la salinité est modérément dépendante de l'espace, les valeurs de rapport pépite/palier ou degré de dépendance spatiale sont de 46,42 % et 34,26 % respectivement, ce résultat est similaire à celui trouvé par EMADI *et al.* (2008), PARFITT *et al.* (2009), NAJAFIAN *et al.* (2012) et SAFARI *et al.* (2013). La valeur de ce rapport dans la parcelle P1 est de 92,56 % montrant une faible dépendance spatiale de la salinité dans cette parcelle. AKIS (2014) a montré que la dépendance spatiale faible de la salinité du sol est liée à un effet de pépite élevée, ce qui peut justifier la faiblesse de la dépendance spatiale dans la parcelle P1 sachant que l'effet de pépite est de 0,00625 et est relativement plus élevé que celui des autres parcelles.

Les valeurs de la portée pour les trois parcelles sont de 27,5 mètres. La portée exprime la distance de dépendance spatiale, au-delà de laquelle les variables sont spatialement indépendantes, c'est à dire, absence d'autocorrélation spatiale (HE *et al.*, 2015).

Une portée de 27,5 m est supérieure au pas d'échantillonnage (15 m), indiquant que les points échantillonnés sont spatialement dépendants, le pas d'échantillonnage est par conséquent valable et fiable pour la cartographie de la salinité dans le site d'étude. Ce résultat de la portée s'avère important du point de vue plan d'échantillonnage, afin de réduire le nombre d'échantillons et augmenter le pas d'échantillonnage (SAFARI *et al.*, 2013). Selon EMADI *et al.* (2008), la portée servira dans la détermination de la distance entre les échantillons dans les futurs plans d'échantillonnage. Dans notre cas, les études futures peuvent être réalisées avec un pas d'échantillonnage inférieur ou égal à la portée (27,5 m).

La portée est influencée par le pas d'échantillonnage. En effet, EMADI *et al.* (2008) ont trouvé une portée de 1121 mètres avec une maille régulière de 150 x 150 m en Iran. En Arabie saoudite, TOLA *et al.* (2017) ont trouvé une portée de 16,6 mètres avec une maille régulière de 40 x 40 m. En Chine, HE *et al.* (2015) ont réalisé une maille régulière de 1 x 1 m et la portée variait de 1.79 à 9.35 m en fonction des strates végétales (arbres, arbustive et herbacée) et de même en fonction de la saison.

La portée est aussi variable en fonction du modèle théorique d'ajustement du variogramme. En effet, la portée calculée avec le modèle exponentiel de la salinité dans la parcelle P2 était de 32,3 mètres contre 27,5 mètres pour les trois autres modèles. Rappelons que le modèle le plus fiable est le modèle gaussien avec une portée de 27,5 m.

Après sélection des modèles de variogrammes les plus performants, des cartes de variabilité spatiale de la salinité ont été réalisées par krigeage ordinaire. Ces cartes montrent que les valeurs les plus élevées de la conductivité électrique sont enregistrées dans le nord de la parcelle de référence, dans le nord et le sud-ouest de la parcelle P1 et dans l'est et le nord-ouest de la parcelle P2.

L'utilisation du krigeage offre la prédiction la plus fiable des valeurs de la salinité dans les endroits non échantillonnés, cette technique permet de renseigner sur les valeurs de la salinité dans les points non échantillonnés, ce qui permettra une meilleure connaissance de la variation spatiale de la salinité du sol en vue d'une meilleure gestion des paramètres liés à cette variation, surtout de point de vue efficacité de l'irrigation et état du profil hydrique, sachant que des travaux sur l'irrigation sous pivots en régions arides ont montré la répartition hétérogène de l'eau d'irrigation (ZERGOUN, 1997 ; BELAMRI, 1999 ; OULD MOUSSA, 1999 ; ATALLAH, 2000 et MAACHI, 2005).

Chapitre V. Etude de la variabilité spatiale de la réaction du sol

Il est crucial de connaître les valeurs du pH du sol, car c'est un prédicteur de diverses activités chimiques et un indicateur approximatif de la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol (NUR AINI et *al.*, 2014).

L'étude de la variabilité de la réaction du sol par la détermination du pH est effectuée sur une profondeur de 0 à 25 cm dans toutes les parcelles étudiées avec un nombre de 100 prélèvements par parcelle prise selon un maillage systématique de 15 m x 15 m.

1. Etude de la réaction du sol

Les résultats d'analyse du pH du sol dans les parcelles étudiées sont présentés synthétiquement dans le tableau 19.

Tableau 19. Résultats d'analyse de la réaction du sol

pH	R	P1	P2
Nombre d'échantillons	100.00	100.00	100.00
Moyenne	8.81	8.30	8.20
Écart-type	0.19	0.28	0.29
Minimum	8.27	7.75	7.51
Maximum	9.20	8.96	9.19
Coefficient de variation	2.13	3.37	3.53
TVA pH/an	-	- 0.027	- 0.032

Dans la parcelle de référence R, le pH varie de 8,27 à 9,20 avec une moyenne de $8,81 \pm 0,19$, le sol est très alcalin.

Dans la parcelle P1, le pH varie de 7,75 (alcalin) à 8,96 (très alcalin) avec une moyenne de $8,30 \pm 0,28$.

Dans la parcelle P2, le pH varie de 7,51 (alcalin) à 9,19 (très alcalin) avec une moyenne de $8,20 \pm 0,29$.

L'analyse du taux de variation annuelle montre que la réaction du sol exprimée par le pH a diminué dans la parcelle P1 après 19 ans d'irrigation, avec une évolution moyenne

annuelle de $-0,027 \pm 0,017/\text{an}$, et dans la parcelle P2 avec une évolution moyenne annuelle de $-0,032 \pm 0,016/\text{an}$. L'analyse de variance a montré que cette diminution (Fig. 34) est très hautement significative ($F^{2,297} = 165,52$, $P < 0,0001$, T.H.S.).

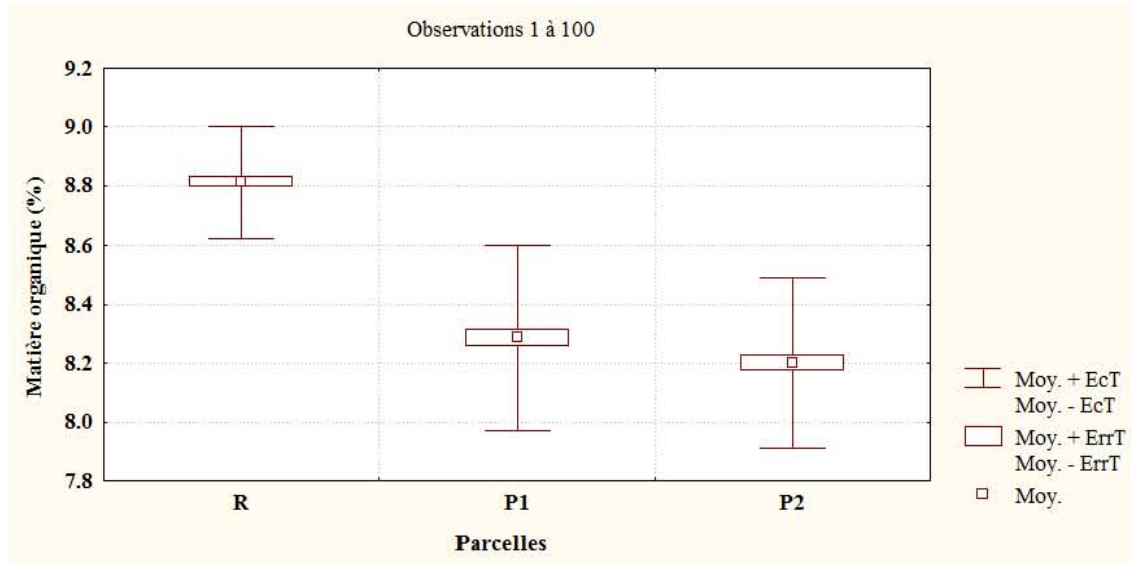


Figure 34. Boîte à moustaches de la variation du pH du sol dans la station 03

Le test de Tukey (Tabl. 20) de la réaction du sol dans la station 03, a révélé des différences significatives du pH entre la parcelle de référence R et la parcelle pivot P1, entre la parcelle de référence R et la parcelle pivot P2 et entre les parcelles pivot P1 et P2. Chaque parcelle appartient à un groupe séparément.

Tableau 20. Test de Tukey de la réaction du sol dans la station 03

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
R vs P2	0.614	16.933	2.344	< 0.0001	Oui
R vs P1	0.516	14.232	2.344	< 0.0001	Oui
P1 vs P2	0.098	2.701	2.344	0.019	Oui
Valeur critique du d de Tukey			3.314		

Modalité	Moyenne estimée	Groupes		
R	8.814	A		
P1	8.298		B	
P2	8.200			C

2. Modélisation géostatistique de la variabilité spatiale de la réaction du sol

L'analyse variographique a été effectuée sur quatre modèles les plus fréquemment utilisés à savoir le modèle circulaire, le modèle sphérique, le modèle exponentiel et le modèle gaussien, suivie d'une validation croisée afin de choisir le meilleur modèle de variogramme qui sera utilisé par la suite dans la réalisation des cartes de variabilité spatiale du pH par krigeage.

2. 1. Modélisation géostatistique de la variabilité du pH dans la parcelle de référence

2.1.1. Analyse variographique

La figure 35 montre le variogramme ajusté au modèle circulaire,

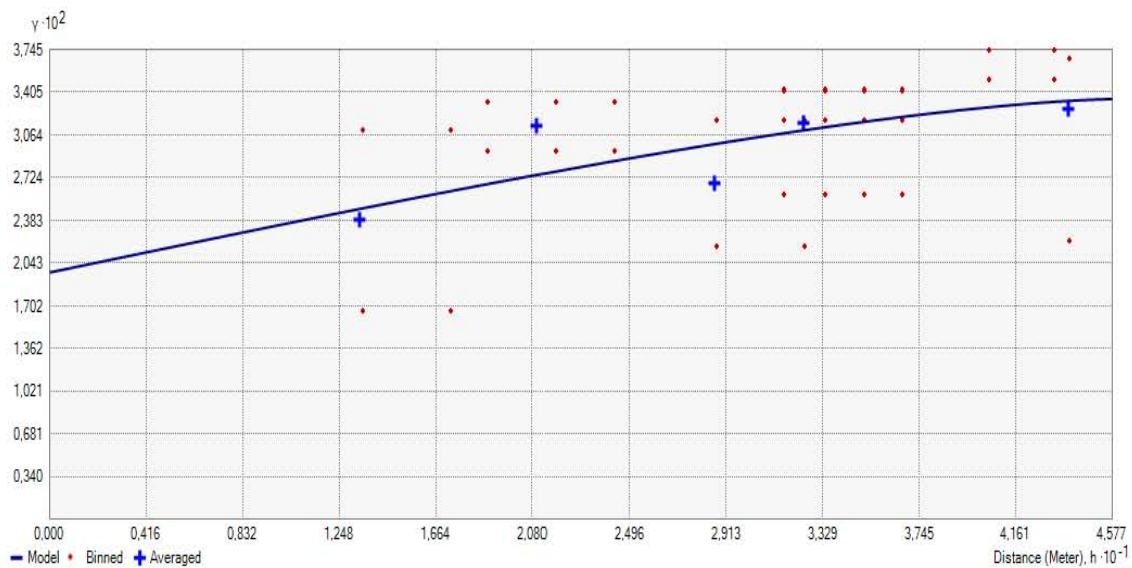


Figure 35. Variogramme du pH du sol dans la parcelle T (Circulaire)

Le variogramme ajusté au modèle circulaire (Fig. 35) est caractérisé par un palier de 0,0335, une portée de 45,77 m et un effet de pépite de 0,020.

L'équation du modèle circulaire du pH du sol dans la parcelle de référence s'écrit de la manière suivante :

$$\gamma(h) = 0,019676 + 0,013819 \left(1 - \left(\frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{h}{45,769} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 245,769} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{45,769} \right)^2} \right)$$

La figure 36 montre le variogramme ajusté au modèle sphérique.

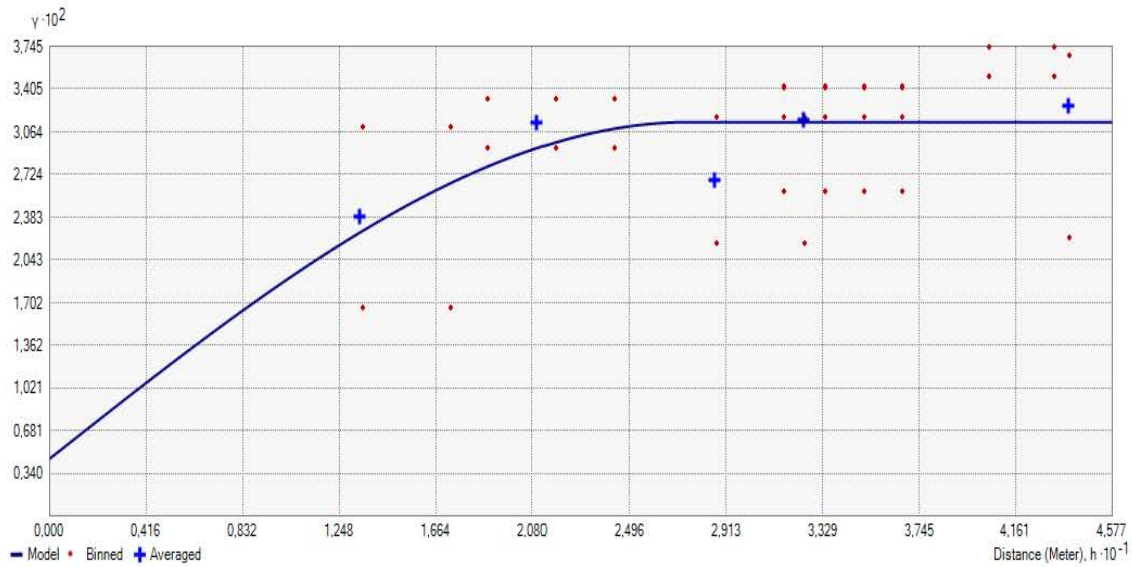


Figure 36. Variogramme du pH du sol dans la parcelle T (sphérique)

Le variogramme ajusté au modèle sphérique (Fig. 36) est caractérisé par un palier de 0,0314, une portée de 27,5 m et un effet de pépité de 0,005.

L'équation du modèle sphérique du pH du sol dans la parcelle de référence, s'écrit ainsi :

$$\gamma(h) = 0,004569 + 0,02684 \left(1,5 \left(\frac{h}{27,5} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{27,5} \right)^3 \right)$$

La figure 37 montre le variogramme ajusté au modèle exponentiel

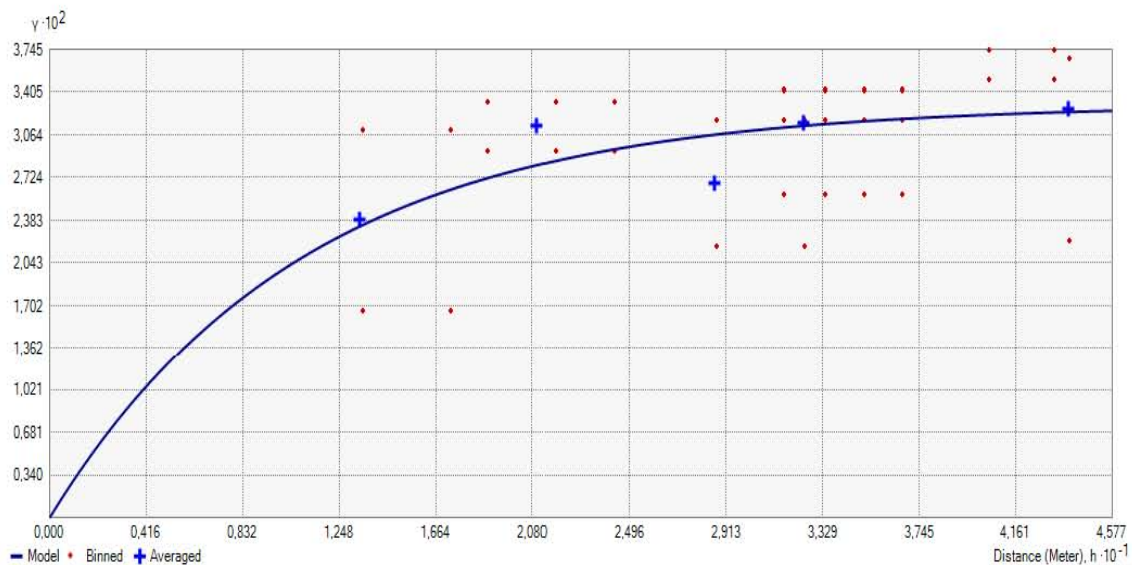


Figure 37. Variogramme du pH du sol dans la parcelle T (Exponentiel)

Le variogramme ajusté au modèle exponentiel (Fig.37) est caractérisé par un palier de 0,0331, une portée de 32,76 m et ne présente pas un effet de pépite.

L'équation du modèle exponentiel du pH du sol dans la parcelle de référence s'écrit comme suit :

$$\gamma(h) = 0,033054 \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{32,763}\right) \right)$$

La figure 38 montre le variogramme ajusté au modèle Gaussien,

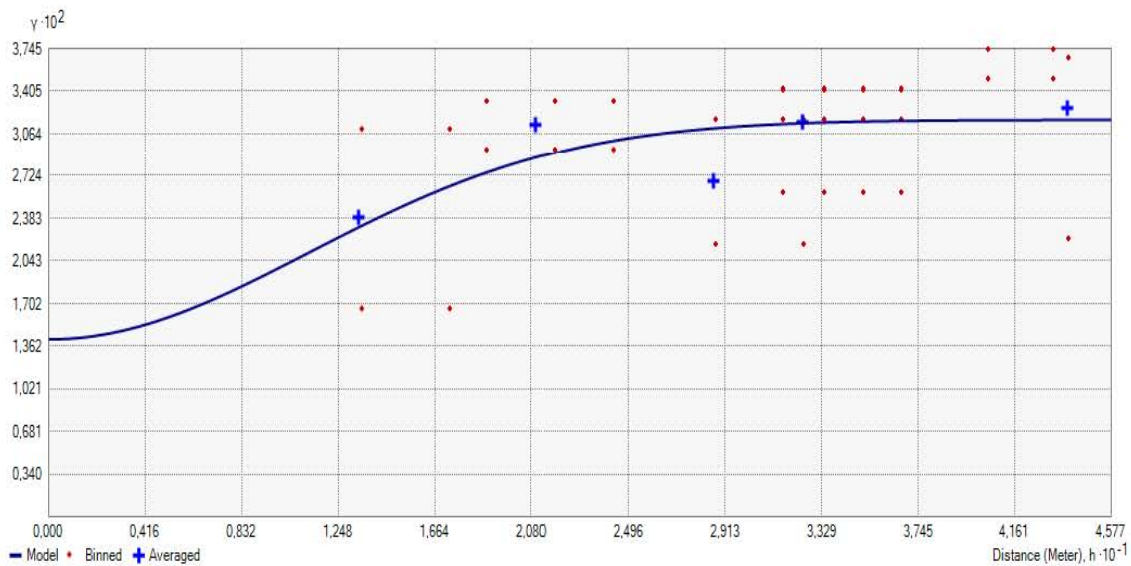


Figure 38. Variogramme du pH du sol dans la parcelle T (Gaussien)

Le variogramme ajusté au modèle Gaussien (Fig. 38) est caractérisé par un palier de 0,0318, une portée de 27,5 m et un effet de pépite de 0,014.

L'équation du modèle gaussien du pH du sol dans la parcelle de référence s'écrit de la façon suivante :

$$\gamma(h) = 0,014147 + 0,017617 \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{27,5}\right)^2 \right)$$

2.1.2. Validation croisée

Le tableau 21 représente synthétiquement les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme du pH de sol dans la parcelle de référence.

Tableau 21 : Validation croisée des variogrammes du pH de la parcelle de référence

pH R	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	100 of 100	100 of 100	100 of 100	100 of 100
Erreur moyenne de prédiction (ME)	-0,0022	-0,0011	-0,0013	-0,0010
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,1644	0,1610	0,1623	0,1627
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,0122	-0,0058	-0,0067	-0,0053
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	0,9864	0,9830	0,9802	0,9845
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	0,1674	0,1647	0,1664	0,1660

A partir du tableau 21, représentant les paramètres de la validation croisée des variogrammes expérimentaux du pH dans la parcelle de référence, tous les modèles ont une erreur de prédiction moyenne et une erreur moyenne standardisée proche du 0 ainsi qu'une erreur quadratique moyenne standardisée proche du 1, ce qui signifie que les quatre modèles sont optimaux. Le modèle le plus fiable est le modèle circulaire car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche de l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

Le modèle circulaire fournira la meilleure interpolation possible par krigeage, et nous permettra de tracer la carte la plus fiable de variation du pH dans la parcelle de référence.

2.1.3. Cartographie par krigeage

Les résultats de la validation croisée ont montré que le modèle de variogramme le mieux adapté pour la parcelle de référence est le modèle circulaire. Ce modèle a été utilisé pour la réalisation de la carte de variabilité spatiale du pH par krigeage ordinaire.

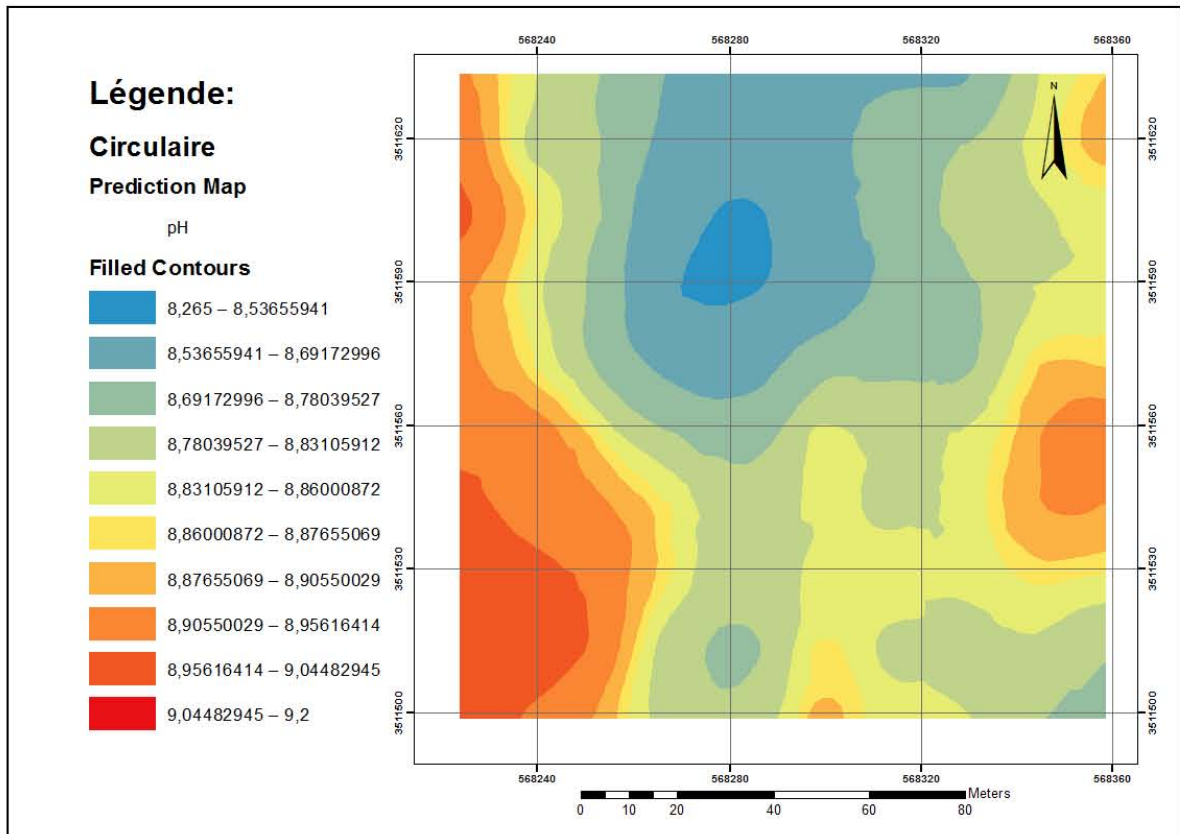


Figure 39. Carte de variabilité spatiale du pH dans la parcelle R

La carte (Fig. 39) montre une variation faible du pH dans la parcelle de référence, avec un coefficient de variation de 2,13% selon l'échelle de NOLIN *et al.* (1997).

Les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans les deux extrémités est et ouest. Le pH est très alcalin dans toute la parcelle avec des valeurs variant de 8,27 à 9,2.

2.2. Modélisation géostatistique de la variabilité du pH dans les parcelles cultivées

2.2.1. Modélisation géostatistique de la variabilité du pH dans la parcelle P1

2.2.1.1. Analyse variographique

La figure 40 montre le variogramme ajusté au modèle circulaire.

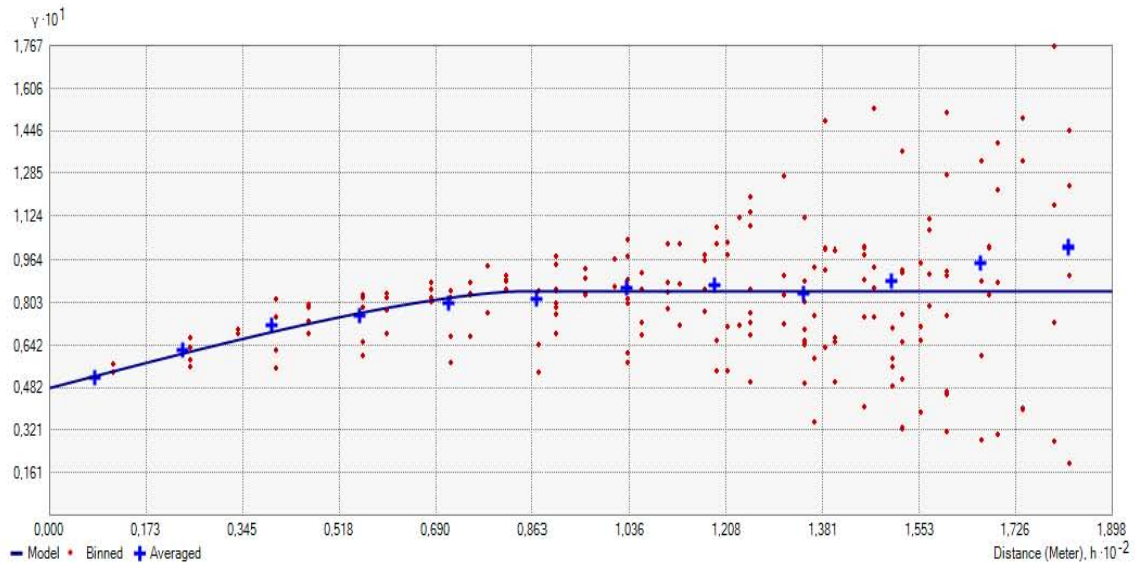


Figure 40. Variogramme du pH du sol dans la parcelle P1 (Circulaire)

Le variogramme ajusté au modèle circulaire (Fig. 40) est caractérisé par un palier de 0,084, une portée de 84,03 m et un effet de pépite de 0,048.

L'équation du modèle circulaire du pH du sol dans la parcelle P1 s'écrit de la manière suivante :

$$\gamma(h) = 0,04802 + 0,036469 \left(1 - \left(\frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{h}{84,026} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 84,026} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{84,026} \right)^2} \right)$$

La figure 41 montre le variogramme ajusté au modèle sphérique.

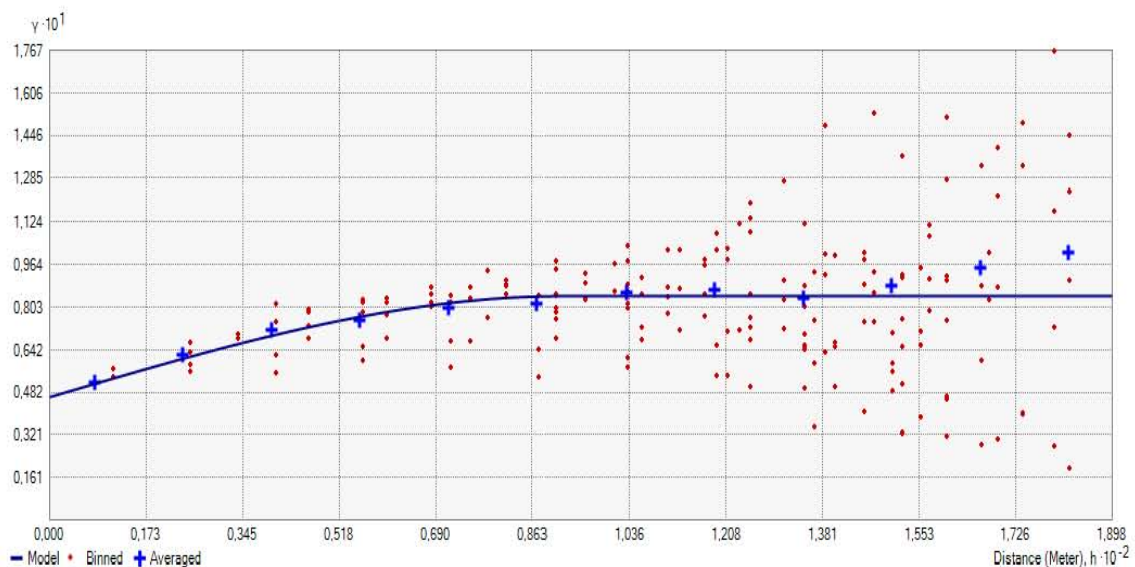


Figure 41. Variogramme du pH du sol dans la parcelle P1 (sphérique)

Le variogramme ajusté au modèle sphérique (Fig. 41) est caractérisé par un palier de 0,084, une portée de 91,99 m et un effet de pépite de 0,046.

L'équation du modèle sphérique du pH du sol dans la parcelle P1, s'écrit ainsi :

$$\gamma(h) = 0,046358 + 0,03811 \left(1,5 \left(\frac{h}{91,991} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{91,991} \right)^3 \right)$$

La figure 42 montre le variogramme ajusté au modèle exponentiel.

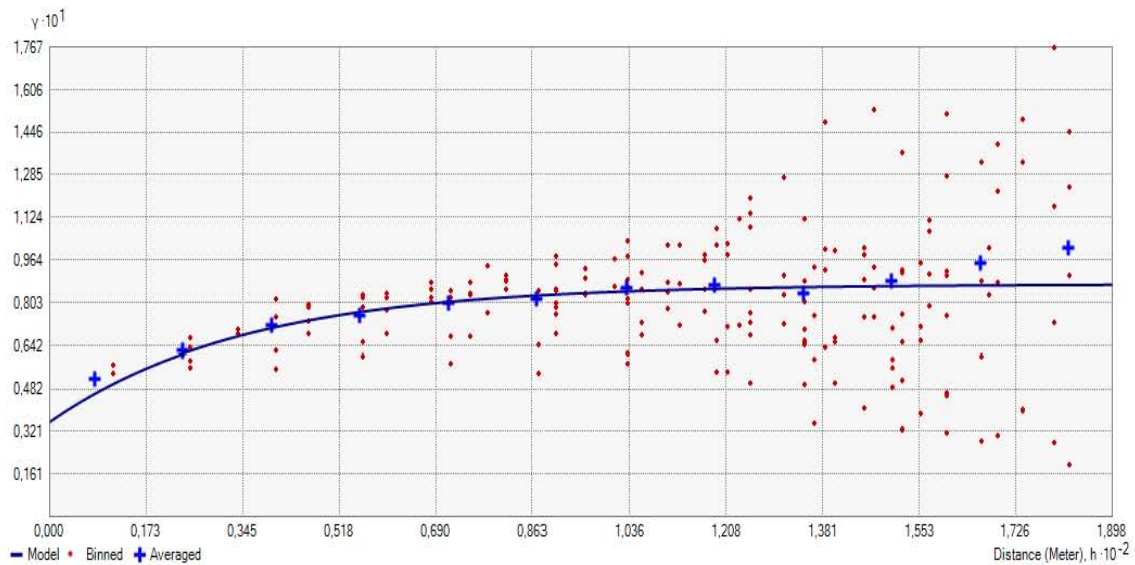


Figure 42. Variogramme du pH du sol dans la parcelle P1 (Exponentiel)

Le variogramme ajusté au modèle exponentiel (Fig. 42) est caractérisé par un palier de 0,087, une portée de 104,58 m et un effet de pépite de 0,036.

L'équation du modèle exponentiel du pH du sol dans la parcelle P1 s'écrit comme suit :

$$\gamma(h) = 0,03569 + 0,051447 \left(1 - \exp \left(- \frac{h}{104,58} \right) \right)$$

La figure 43 montre le variogramme ajusté au modèle Gaussien,

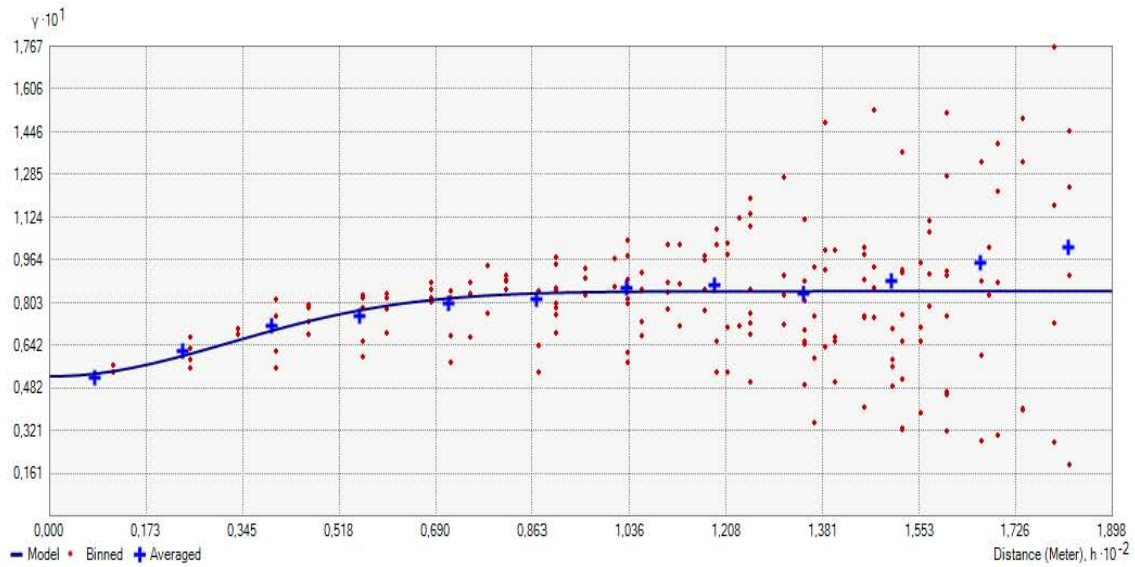


Figure 43. Variogramme du pH du sol dans la parcelle P1 (Gaussien)

Le variogramme ajusté au modèle Gaussien (Fig. 43) est caractérisé par un palier de 0,085, une portée de 78,51 m et un effet de pépite de 0,053.

L'équation du modèle gaussien du pH du sol dans la parcelle P1 s'écrit de la façon suivante :

$$\gamma(h) = 0,052505 + 0,032012 \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{78,508}\right)^2 \right)$$

2.2.1.2. Validation croisée

Le tableau 22 représente synthétiquement les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme du pH de sol dans la parcelle P1.

Tableau 22 : Validation croisée des variogrammes du pH de la parcelle P1

pH P1	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	100 of 100	100 of 100	100 of 100	100 of 100
Erreur moyenne de prédiction (ME)	-0,0012	-0,0013	-0,0017	-0,0014
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,2429	0,2427	0,2412	0,2443
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,0034	-0,0039	-0,0054	-0,0043
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	0,9814	0,9853	0,9920	0,9939
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	0,2478	0,2466	0,2434	0,2461

A partir du tableau 22, représentant les paramètres de la validation croisée des variogrammes expérimentaux du pH dans la parcelle P1, tous les modèles ont une erreur de prédiction moyenne et une erreur moyenne standardisée proche du 0 ainsi qu'une erreur quadratique moyenne standardisée proche du 1, ce qui signifie que les quatre modèles sont optimaux. Le modèle le plus fiable est le modèle gaussien car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche de l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

Le modèle gaussien fournira la meilleure interpolation possible par krigeage, et nous permettra de tracer la carte la plus fiable de variation du pH dans la parcelle de référence.

2.2.1.3. Cartographie par krigeage

Les résultats de la validation croisée ont montré que le modèle de variogramme le mieux adapté dans la parcelle P1 est le modèle gaussien. Ce modèle a été utilisé pour la réalisation de la carte de variabilité spatiale du pH par krigeage ordinaire.

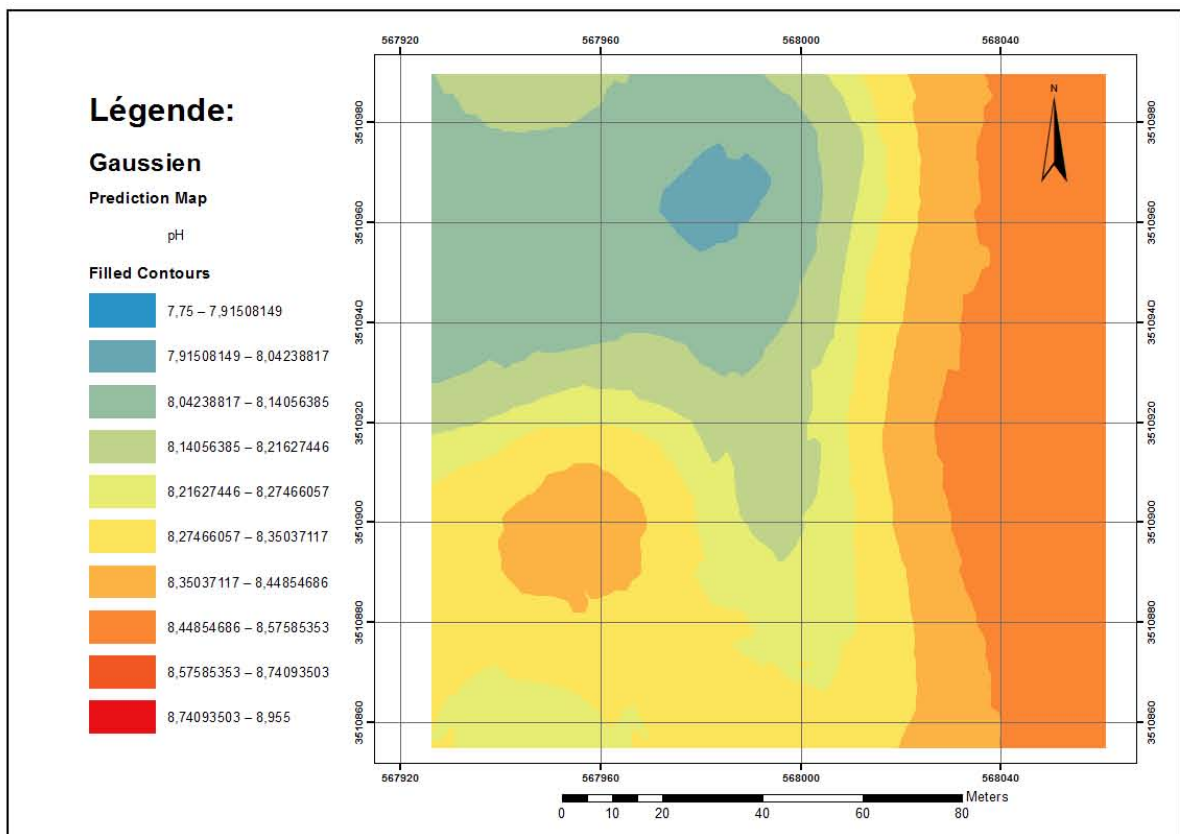


Figure 44. Carte de variabilité spatiale du pH dans la parcelle P1

La carte (Fig. 44) montre une variation faible du pH dans la parcelle P1, avec un coefficient de variation de 3.37 % selon l'échelle de NOLIN et *al.* (1997).

Les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans la partie est de la parcelle. Le pH varie d'alcalin (7,75) à très alcalin (8,96).

2.2.2. Modélisation géostatistique de la variabilité du pH dans la parcelle P2

2.2.2.1. Analyse variographique

La figure 45 montre le variogramme ajusté au modèle circulaire.

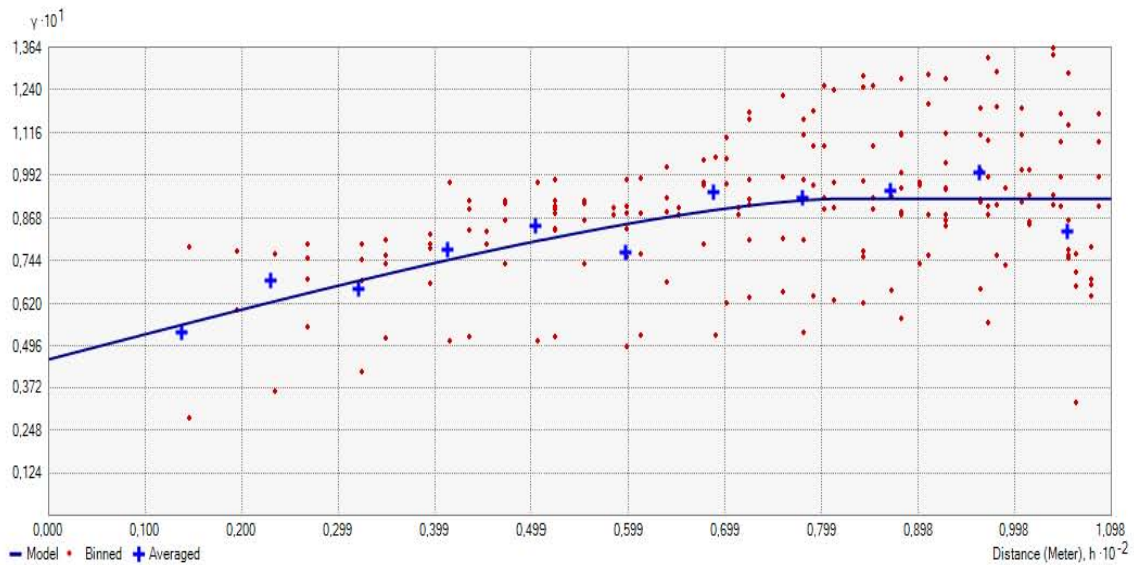


Figure 45. Variogramme du pH du sol dans la parcelle P2 (Circulaire)

Le variogramme ajusté au modèle circulaire (Fig. 45) est caractérisé par un palier de 0,092, une portée de 81,11 m et un effet de pépite de 0,046.

L'équation du modèle circulaire du pH du sol dans la parcelle P2 s'écrit de la manière suivante :

$$\gamma(h) = 0,045733 + 0,046594 \left(1 - \left(\frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{h}{81,105} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 81,105} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{81,105} \right)^2} \right)$$

La figure 46 montre le variogramme ajusté au modèle sphérique.

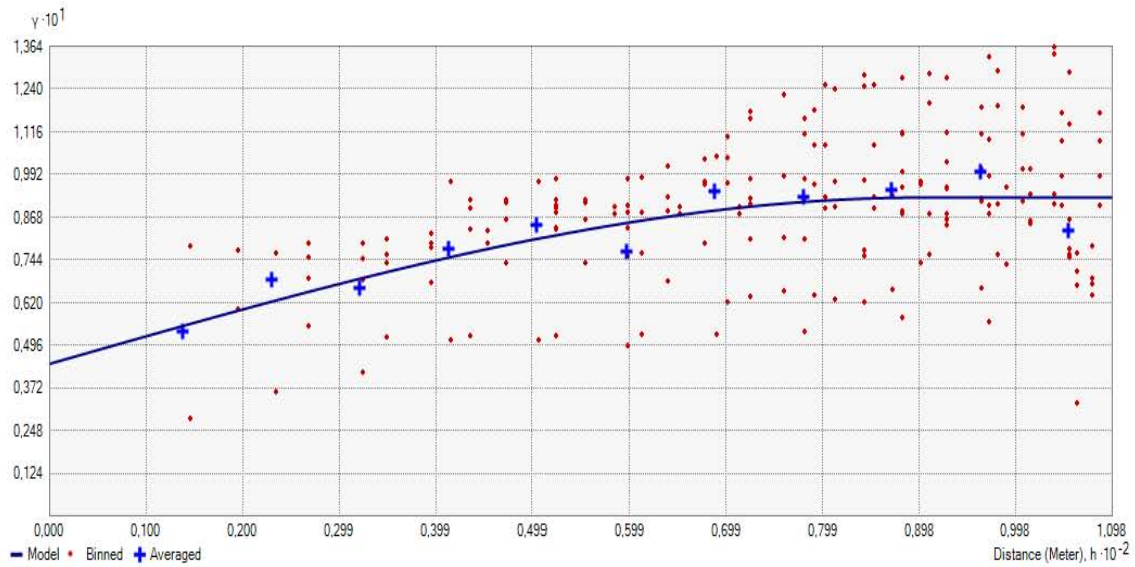


Figure 46. Variogramme du pH du sol dans la parcelle P2 (sphérique)

Le variogramme ajusté au modèle sphérique (Fig. 46) est caractérisé par un palier de 0,092, une portée de 90,03 m et un effet de pépite de 0,044.

L'équation du modèle sphérique du pH du sol dans la parcelle P2, s'écrit ainsi :

$$\gamma(h) = 0,044176 + 0,04826 \left(1,5 \left(\frac{h}{90,034} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{90,034} \right)^3 \right)$$

La figure 47 montre le variogramme ajusté au modèle exponentiel

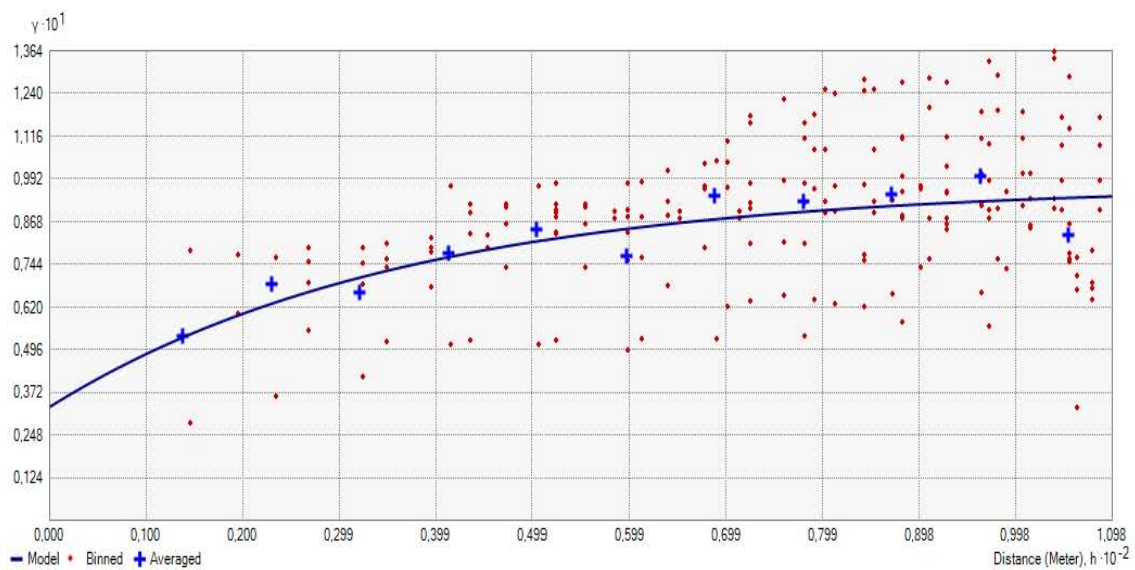


Figure 47. Variogramme du pH du sol dans la parcelle P2 (Exponentiel)

Le variogramme ajusté au modèle exponentiel (Fig. 47) est caractérisé par un palier de 0,097, une portée de 109,79 m et un effet de pépité de 0,033.

L'équation du modèle exponentiel du pH du sol dans la parcelle P2 s'écrit comme suit :

$$\gamma(h) = 0,032963 + 0,064319 \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{109,79}\right) \right)$$

La figure 48 montre le variogramme ajusté au modèle Gaussien,

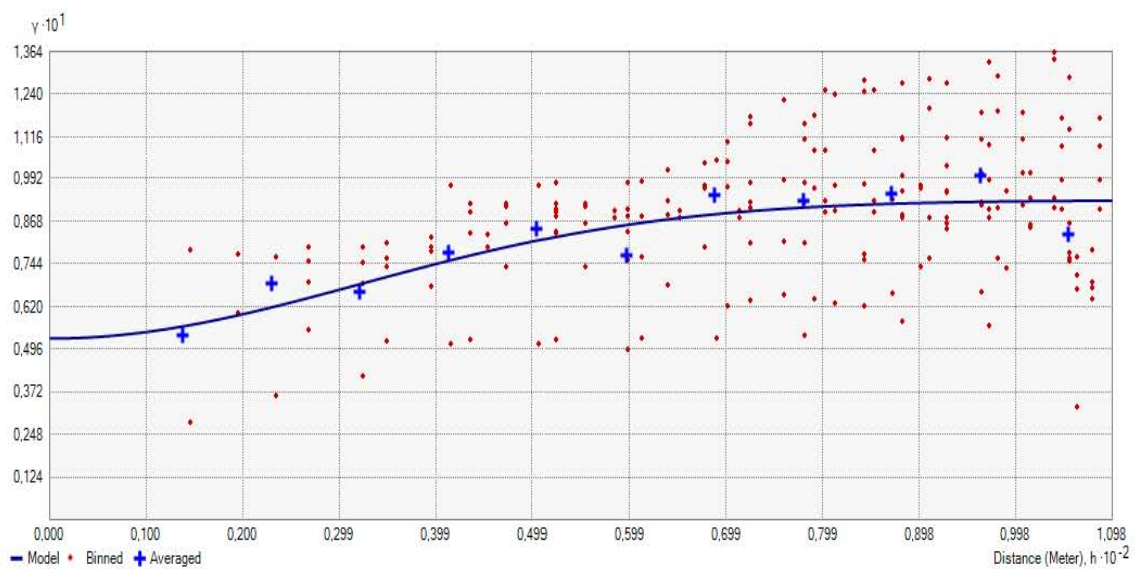


Figure 48. Variogramme du pH du sol dans la parcelle P2 (Gaussien)

Le variogramme ajusté au modèle Gaussien (Fig. 48) est caractérisé par un palier de 0,093, une portée de 78,60 m et un effet de pépité de 0,053.

L'équation du modèle gaussien du pH du sol dans la parcelle P2 s'écrit de la façon suivante :

$$\gamma(h) = 0,052625 + 0,040158 \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{78,604}\right)^2 \right)$$

2.2.2.2. Validation croisée

Le tableau 23 représente synthétiquement les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme du pH de sol dans la parcelle P2.

Tableau 23 : Validation croisée des variogrammes du pH de la parcelle P2

pH P2	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	100 of 100	100 of 100	100 of 100	100 of 100
Erreur moyenne de prédiction (ME)	-0,0019	-0,0020	-0,0024	-0,0019
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,2537	0,2540	0,2550	0,2549
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,0055	-0,0060	-0,0075	-0,0056
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	1,0183	1,0231	1,0373	1,0263
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	0,2486	0,2477	0,2450	0,2480

A partir du tableau 23, représentant les paramètres de la validation croisée des variogrammes expérimentaux du pH dans la parcelle P2, tous les modèles ont une erreur de prédiction moyenne et une erreur moyenne standardisée proche du 0 ainsi qu'une erreur quadratique moyenne standardisée proche du 1, ce qui signifie que les quatre modèles sont optimaux. Le modèle le plus fiable est le modèle circulaire car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche de l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

Le modèle circulaire fournira la meilleure interpolation possible par krigeage, et nous permettra de tracer la carte la plus fiable de variation du pH dans la parcelle de référence.

2.2.2.3. Cartographie par krigeage

Les résultats de la validation croisée ont montré que le modèle de variogramme le mieux adapté dans la parcelle P2 est le modèle circulaire. Ce modèle a été utilisé pour la réalisation de la carte de variabilité spatiale du pH par krigeage ordinaire.

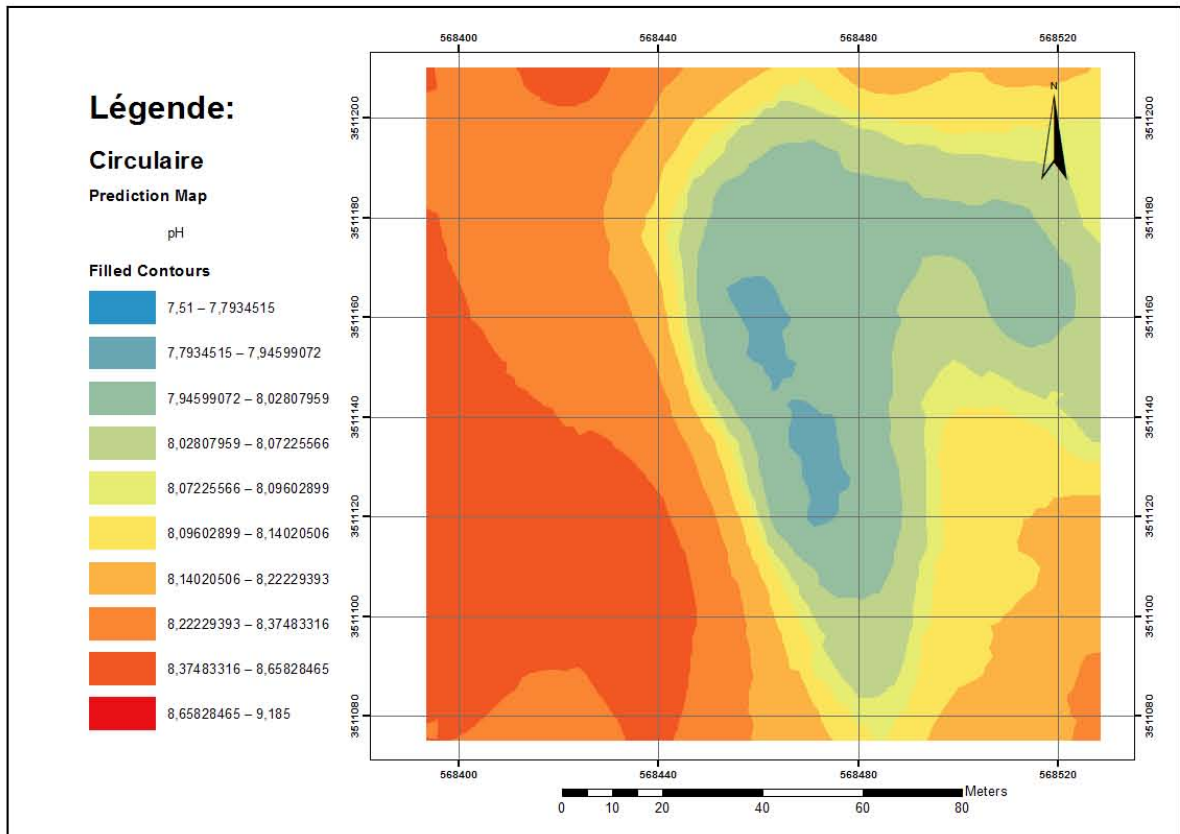


Figure 49. Carte de variabilité spatiale du pH dans la parcelle P2

La carte (Fig. 49) montre une variation faible du pH dans la parcelle P2, avec un coefficient de variation de 3,53 % selon l'échelle de NOLIN *et al.* (1997).

Les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans la partie ouest et sud-est de la parcelle. Le pH varie d'alcalin (7,51) à très alcalin (9,19).

3. Discussions

L'étude de la variabilité spatiale de la réaction du sol a été réalisée dans la station HOUTIA à Hassi Fehal. Les prélèvements ont été effectués sur une profondeur de 0 à 25 cm dans toutes les parcelles étudiées avec un nombre de 100 prélèvements par parcelle sur une maille régulière de 15 m x 15 m. Trois parcelles ont été échantillonnées de la même manière ; une parcelle de référence jamais exploitée et deux parcelles exploitées pendant 19 ans en céréaliculture intensive sous pivot.

Les résultats d'analyse du pH du sol dans la station HOUTIA, montrent que le sol est très alcalin avec des valeurs moyennes de pH de $8,81 \pm 0,19$ dans la parcelle de

référence, de $8,30 \pm 0,28$ dans la parcelle P1 et de $8,20 \pm 0,29$ dans la parcelle P2. Les valeurs enregistrées appartiennent à la gamme relative aux sols des régions arides qui s'étend d'un pH légèrement inférieur à 7 à un pH d'environ 9 (DURAND, 1958 ; BUCKMAN et BRADY, 1965 ; HALITIM, 1988 ; BOUZID, 1993 ; DAOUD et HALITIM, 1994 ; DJILI et *al.*, 2003 ; BENBRAHIM, 2001 ; BENBRAHIM et *al.*, 2016).

L'analyse du taux de variation annuelle de la réaction du sol a révélé une diminution très hautement significative du pH après 19 ans d'exploitation du sol, avec un TVA de $-0,027 \pm 0,017$ /an dans la parcelle P1 et de $-0,032 \pm 0,016$ /an dans la parcelle P2. La cause principale de cette diminution du pH est la lixiviation des cations alcalins et alcalino-terreux suite à l'irrigation (DUCHAUFFOUR, 1977).

D'autres causes peuvent contribuer à la diminution du pH dans le site d'études, à savoir l'utilisation des engrais surtout l'urée 46% qui présente un effet acidifiant sur le sol (MOUGHLI, 2000).

Malgré la diminution très hautement significative du pH, le sol demeure très alcalin en moyenne, cela est peut être liée à la présence du calcaire dans le sol. La teneur en calcaire total du sol varie de 5,11 à 46,88 % offrant au sol un pouvoir tampon vis-à-vis de la diminution du pH (DUCHAUFFOUR, 1984 ; GOBAT et *al.*, 2003). Le test de Tukey a révélé que les trois parcelles R, P1 et P2 appartiennent chacune à un groupe séparément, la différence dans les valeurs de pH entre les trois parcelles prises deux à deux étant significative, montrant ainsi que la réaction du sol est différente significativement entre les trois parcelles.

Le niveau d'intensité de la variabilité spatiale du pH est faible que ce soit dans les parcelles cultivées ou dans la parcelle de référence selon l'échelle de NOLIN et *al.* (1997). Les valeurs faibles du coefficient de variation du pH ont été trouvées par plusieurs chercheurs ; citons à titre d'exemple l'étude de CAMBARDELLA et *al.* (1994) avec un CV-pH de 13 %, de TESFAHUNEGN et *al.* (2011) avec un CV-pH de 8,6 %, de AL-OMRAN et *al.* (2013) avec un CV-pH variant de 2.3 à 7.2 %, DARWISH et *al.*, (2015) avec un CV-pH de 5.49 % et de USOWICZ et LIPIEC (2017) avec un CV-pH variant de 7.8 à 9.0 %.

L'exploitation du sol a provoqué une légère augmentation de l'intensité de variabilité spatiale de la réaction du sol dans les deux parcelles. Le CV qui était de 2,13 %

dans la parcelle de référence a légèrement augmenté dans les parcelles cultivées avec des valeurs de 3.37 % dans la parcelle P1 et 3,53 % dans la parcelle P2. Cette augmentation peut être justifiée par la diminution des valeurs minimum du pH qui passent du 8,27 dans la parcelle de référence à 7,75 dans la parcelle P1 et à 7,51 dans la parcelle P2.

La modélisation géostatistique a indiqué différents modèles de variabilité spatiale du pH, la validation croisée a montré que les modèles de variogrammes les plus fiables et les plus valides sont le circulaire pour la parcelle de référence et la parcelle P2 et le gaussien pour la parcelle P1 (Tabl. 24).

Tableau 24 : Modèles de variogramme les mieux adaptés et paramètres des modèles pour le pH du sol

	pH R (Circulaire)	pH P1 (Gaussien)	pH P2 (Circulaire)
Effet de pépite	0,020	0,053	0,046
Portée (m)	45,77	78,51	81,11
Palier	0,0335	0,085	0,092
Degré de dépendance spatiale (%) DDS	58,74 (modéré)	62,12 (modéré)	49,53 (modéré)

Les travaux sur la variabilité spatiale des propriétés du sol sur différents types de sol avec différents modes de culture ont abouti à une gamme de modèles de variogrammes très diversifiés, en effet, CAMBARDELLA *et al.* (1994) ont trouvé que le meilleur modèle de variogramme pour le pH était le sphérique. Dans l'étude de TESFAHUNEGN *et al.* (2011) c'était l'exponentiel. Le modèle gaussien a été le plus fiable pour les travaux de AL-OMRAN *et al.* (2013), DARWISH *et al.*, (2015), TOLA *et al.* (2017) et DENTON *et al.* (2017).

L'analyse des variogrammes a montré un effet de pépite très faible, indiquant une faible variation du pH à des distances inférieures au pas d'échantillonnage (15 m) dans les trois parcelles. Ces résultats se rapprochent de ceux trouvés pour le pH du sol par CAMBARDELLA *et al.* (1994), TESFAHUNEGN *et al.* (2011) ; SAFARI *et al.* (2013) et DARWISH *et al.* (2015). Dans les trois parcelles étudiées, la réaction du sol est modérément dépendante de l'espace, les valeurs du degré de dépendance spatiale sont de 58,74 % pour la parcelle de référence, de et 62,12 % pour la parcelle P1 et 49,53 % pour la parcelle P2.

CAMBARDELLA et *al.*, (1994) ont signalé que la dépendance modérée des propriétés du sol est contrôlée par des variations extrinsèques, RAO et WAGENET (1985) ont défini cette variabilité extrinsèque comme étant la variation imposée sur un champ dans le cadre de la pratique de l'agriculture. Cela suppose l'implication de toutes les pratiques culturelles telles que l'irrigation, la fertilisation et le labour.

Les valeurs de la portée varient dans les trois parcelles, la portée est de 45,77 mètres dans la parcelle de référence, de 78,51 mètres dans la parcelle P1 et de 81,11 mètres dans la parcelle P2.

Les valeurs de portée trouvées dans notre étude sont incluses dans la fourchette signalée par la plupart des auteurs. Cette fourchette varie de 28,18 mètres (TOLA et *al.*, 2017) à 1745 mètres (SAFARI et *al.*, 2013) en passant par des valeurs de 116 mètres (TESFAHUNEGN et *al.*, 2011), 117 mètres (CAMBARDELLA et *al.*, 1994) et de 50,6 à 530 mètres (AL-OMRAN et *al.*, 2013)

L'utilité de la portée réside dans la détermination du pas d'échantillonnage dans les futurs travaux sur la réaction du sol. Ce pas d'échantillonnage doit être inférieur ou égal à la portée trouvée dans cette étude (de 45,77 à 81,11 mètres). TESFAHUNEGN et *al.* (2011) rajoute qu'il faut prendre en considération dans le plan d'échantillonnage, le coût de la collecte et de l'analyse des échantillons.

Les modèles les plus fiables ont servi à la réalisation des cartes de variabilité spatiale du pH par krigeage ordinaire ; les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans les deux extrémités est et ouest pour la parcelle de référence, dans la partie est de la parcelle P1 et dans la partie ouest et sud-est de la parcelle P2.

Chapitre VI. Etude de la variabilité spatiale du calcaire total

L'étude de la variabilité spatiale du taux de calcaire total déterminé par la méthode de calcimètre de Bernard est effectuée sur des échantillons prélevés à une profondeur de 0 à 25 cm dans toutes les parcelles étudiées avec un nombre de 100 prélèvements par parcelle pris selon un maillage systématique de 15m x 15m.

1. Etude du taux de calcaire total du sol

Les résultats d'analyse du taux de calcaire total dans les parcelles étudiées sont présentés synthétiquement dans le tableau 25.

Tableau 25. Résultats d'analyse du taux de calcaire total

CaCO ₃ (%)	R	P1	P2
Nombre d'échantillons	100.00	100.00	100.00
Moyenne	18.03	8.24	9.43
Écart-type	7.78	2.12	3.07
Minimum	7.98	5.11	5.54
Maximum	46.88	22.96	21.63
Coefficient de variation (%)	43.15	25.71	32.56
TVA (%/an)	-	-0,52±0,42	-0,46±0,46

Dans la parcelle de référence R, le taux du calcaire total varie de 7,98 (modérément calcaire) à 46,88 % (fortement calcaire) avec une moyenne de 18,03±7,78 %.

Dans la parcelle P1, le taux du calcaire total varie de 5,11 à 22,96 % avec une moyenne de 8,24±2,12 %, le sol est modérément calcaire.

Dans la parcelle P2, le taux du calcaire total varie de 5,54 à 21,63 % avec une moyenne de 9,43±3,07 %, le sol est modérément calcaire.

L'analyse du taux de variation annuelle montre que le taux du calcaire total du sol a diminué dans la parcelle P1 après 19 ans d'irrigation, avec une évolution moyenne annuelle de -0,52±0,42 %/an, et dans la parcelle P2 avec une évolution moyenne annuelle de -0,46±0,46 %/an. L'analyse de variance a montré que cette diminution (Fig.50) est très hautement significative ($F^{2,297} = 114,94$, $P < 0,0001$, T.H.S.).

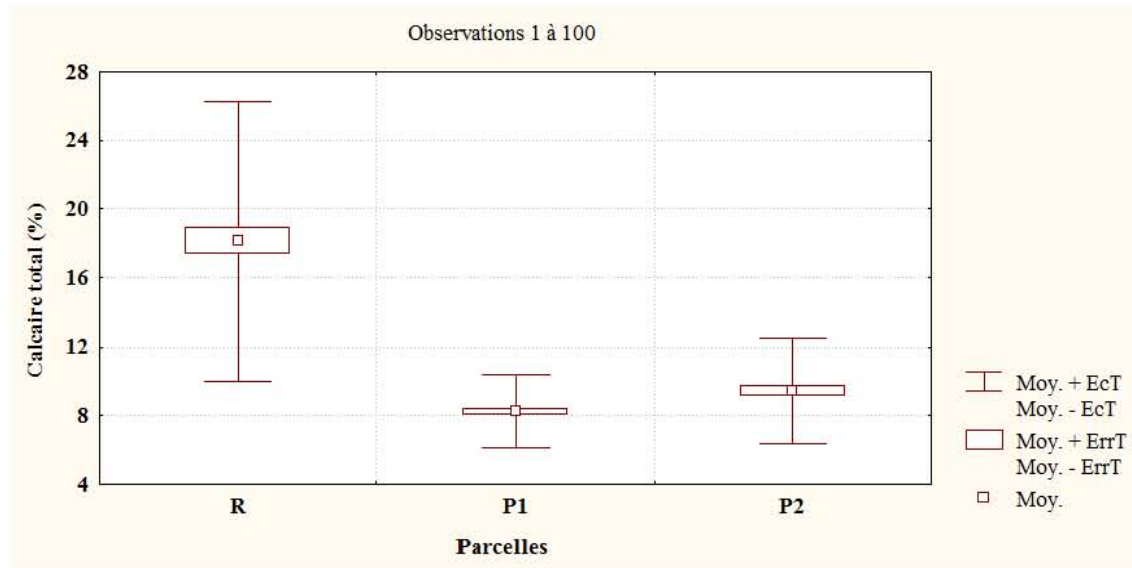


Figure 50. Boite à moustaches de la variation du calcaire total dans la station 03

Le test de Tukey des données du calcaire total du sol met en évidence des différences significatives entre la parcelle de référence R et la parcelle pivot P1 et entre la parcelle de référence R et la parcelle pivot P2. Aucune différence significative n'a été enregistrée entre la parcelle pivot P1 et la parcelle pivot P2, ces deux parcelles appartiennent au même groupe (Tabl. 26).

Tableau 26. Test de Tukey du calcaire total dans la station 03

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
R vs P1	9.789	13.895	2.344	< 0.0001	Oui
R vs P2	8.596	12.202	2.344	< 0.0001	Oui
P2 vs P1	1.192	1.692	2.344	0.208	Non
Valeur critique du d de Tukey :			3.314		

Modalité	Moyenne estimée	Groupes	
R	18.031	A	
P2	9.435		B
P1	8.242		B

2. Modélisation géostatistique de la variabilité spatiale du calcaire total

L'analyse variographique a été effectuée sur quatre modèles les plus fréquemment utilisés : circulaire, sphérique, exponentiel et gaussien, suivie d'une validation croisée afin

de choisir le modèle le plus performant de variogramme qui sera utilisé par la suite dans la réalisation des cartes de variabilité spatiale par krigeage.

2.1. Modélisation géostatistique de la variabilité du calcaire total dans la parcelle de référence

2.1.1. Analyse variographique

La figure 51 montre le variogramme ajusté au modèle circulaire,

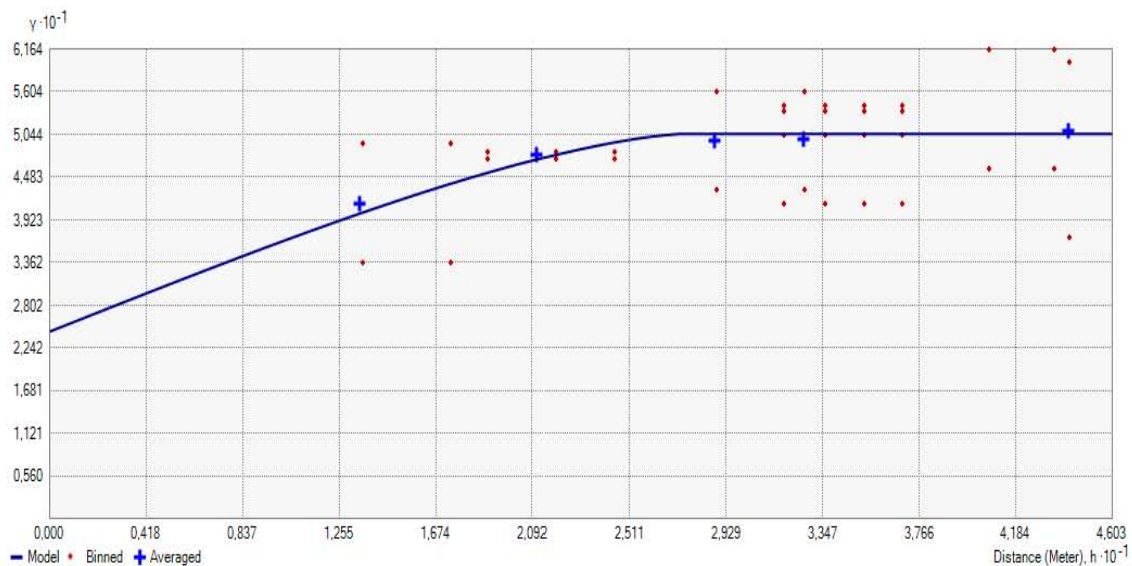


Figure 51. Variogramme du calcaire total dans la parcelle R (Circulaire)

Le variogramme ajusté au modèle circulaire (Fig. 51) est caractérisé par un palier de 50,50, une portée de 27,50 m et un effet de pépité de 24,54.

L'équation du modèle circulaire du calcaire total dans la parcelle de référence s'écrit de la manière suivante :

$$\gamma(h) = 24,545 + 25,96 \left(1 - \left(\frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{h}{27,5} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 27,5} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{27,5} \right)^2} \right)$$

La figure 52 montre le variogramme ajusté au modèle sphérique.

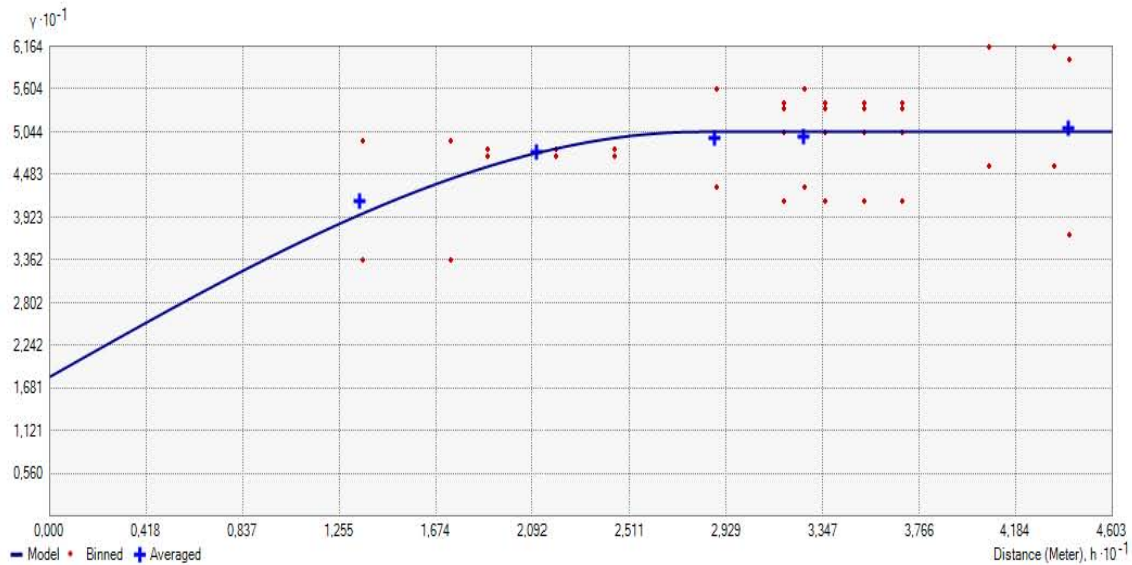


Figure 52. Variogramme du calcaire total dans la parcelle R (sphérique)

Le variogramme ajusté au modèle sphérique (Fig. 52) est caractérisé par un palier de 50,42, une portée de 28,17 m et un effet de pépite de 18,25.

L'équation du modèle sphérique du calcaire total du sol dans la parcelle de référence, s'écrit ainsi :

$$\gamma(h) = 18,253 + 32,166 \left(1,5 \left(\frac{h}{28,172} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{28,172} \right)^3 \right)$$

La figure 53 montre le variogramme ajusté au modèle exponentiel

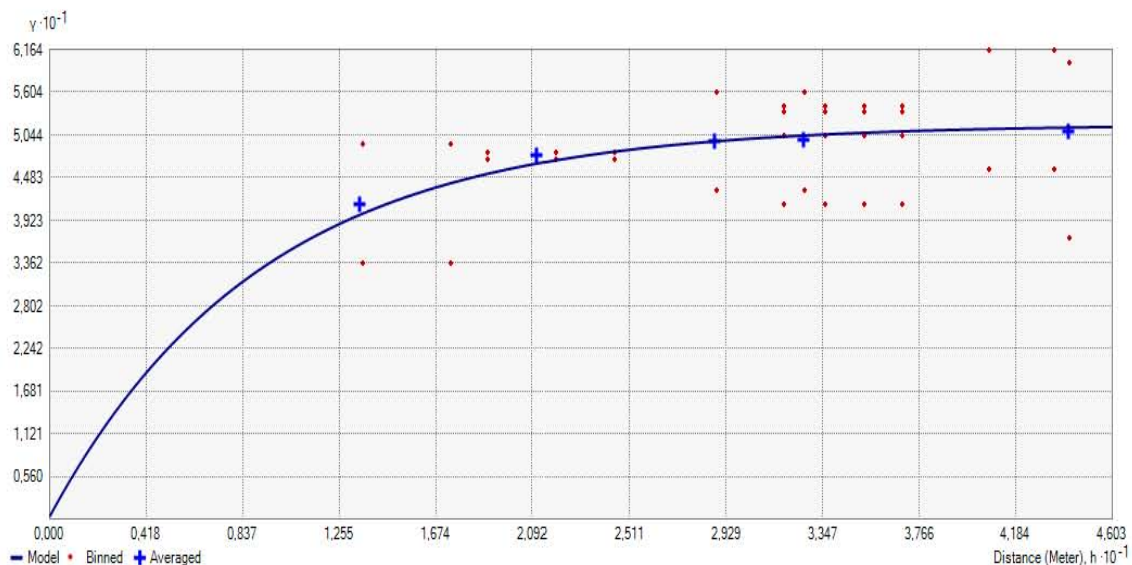


Figure 53. Variogramme du calcaire total dans la parcelle R (Exponentiel)

Le variogramme ajusté au modèle exponentiel (Fig. 53) est caractérisé par un palier de 51,81, une portée de 27,50 m et un effet de pépité de 0,35.

L'équation du modèle exponentiel du calcaire total du sol dans la parcelle de référence s'écrit comme suit :

$$\gamma(h) = 0,35164 + 51,458 \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{27,5}\right) \right)$$

La figure 54 montre le variogramme ajusté au modèle Gaussien,

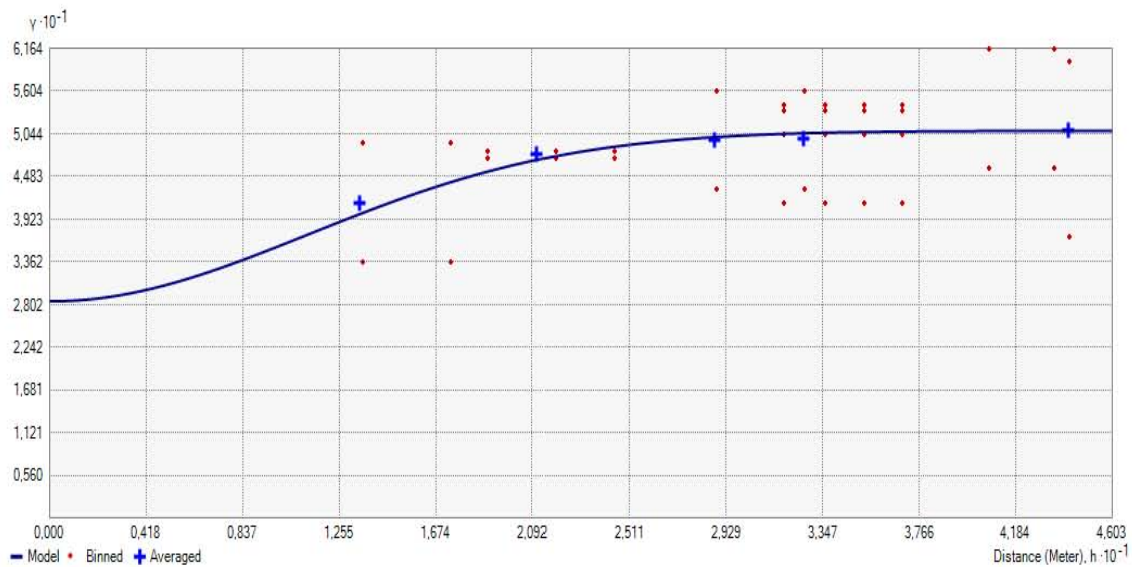


Figure 54. Variogramme du calcaire total dans la parcelle R (Gaussien)

Le variogramme ajusté au modèle Gaussien (Fig. 54) est caractérisé par un palier de 50,82, une portée de 27,50 m et un effet de pépité de 28,43.

L'équation du modèle gaussien du calcaire total du sol dans la parcelle de référence s'écrit de la façon suivante :

$$\gamma(h) = 28,43 + 22,394 \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{27,5}\right)^2 \right)$$

2.1.2. Validation croisée

Le tableau 27 représente une synthèse des résultats de la validation croisée des modèles de variogramme du taux de calcaire total dans la parcelle de référence.

Tableau 27 : Validation croisée des variogrammes du calcaire total de la parcelle de référence

Calcaire total R	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	100 of 100	100 of 100	100 of 100	100 of 100
Erreur moyenne de prédiction (ME)	-0,1691	-0,1665	-0,1724	-0,1697
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	6,8888	6,8879	6,8972	6,8908
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,0215	-0,0212	-0,0220	-0,0216
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	0,9982	0,9992	0,9983	0,9985
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	6,8872	6,8806	6,8947	6,8871

A partir du tableau 27, représentant les paramètres de la validation croisée des variogrammes du calcaire total dans la parcelle de référence, tous les modèles ont une erreur de prédiction moyenne et une erreur moyenne standardisée proche du 0 ainsi qu'une erreur quadratique moyenne standardisée proche du 1, ce qui signifie que les quatre modèles sont optimaux. Le modèle le plus fiable est le modèle circulaire car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche de l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

Le modèle circulaire fournira la meilleure interpolation possible par krigeage, et nous permettra de tracer la carte la plus fiable de variation du calcaire total dans la parcelle de référence.

2.1.3. Cartographie par krigeage

Les résultats de la validation croisée ont montré que le modèle de variogramme le mieux adapté pour la parcelle de référence est le modèle circulaire. Ce modèle a été utilisé pour la réalisation de la carte de variabilité spatiale du calcaire total par krigeage ordinaire.

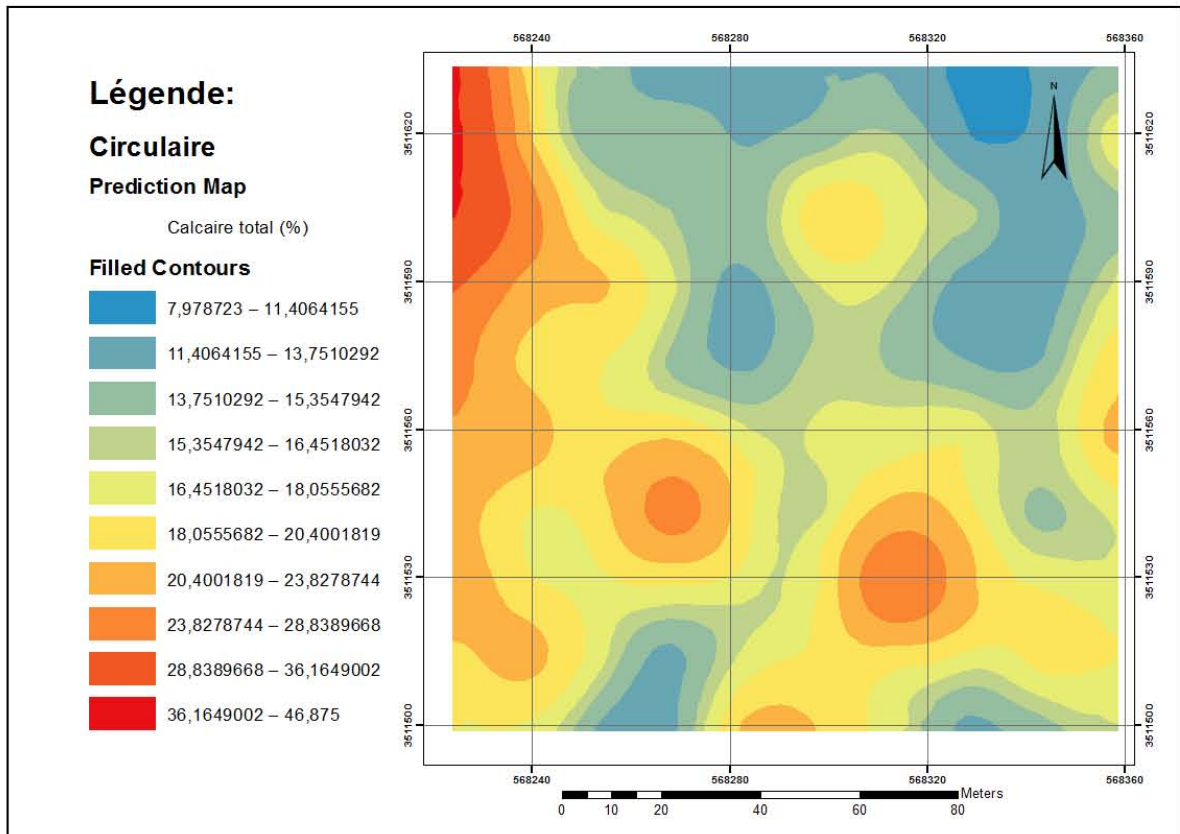


Figure 55. Carte de variabilité spatiale du calcaire total dans la parcelle R

La carte (Fig. 55) montre une variation élevée du calcaire total dans la parcelle de référence, avec un coefficient de variation de 43,15% selon l'échelle de NOLIN et *al.* (1997).

Les valeurs les plus élevées sont enregistrées au nord-ouest de la parcelle où le sol est fortement calcaire avec des valeurs supérieures à 25 % (BAIZE, 1988). Le sol est modérément calcaire dans le reste de la parcelle avec quelques endroits fortement calcaire dans le sud de la parcelle. Le taux de calcaire varie d'un minimum de 7,98 % à un maximum de 46,88 %.

2.2. Modélisation géostatistique de la variabilité du calcaire total dans les parcelles cultivées

2.2.1. Modélisation géostatistique de la variabilité du calcaire total dans la parcelle P1

2.2.1.1. Analyse variographique

La figure 56 montre le variogramme ajusté au modèle circulaire,

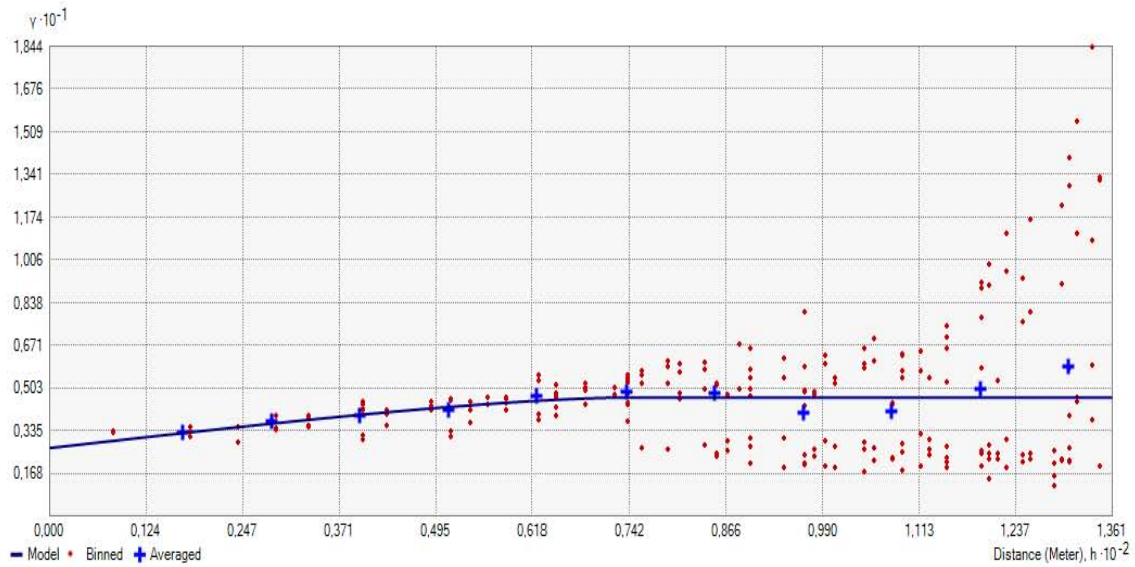


Figure 56. Variogramme du calcaire total dans la parcelle P1 (Circulaire)

Le variogramme ajusté au modèle circulaire (Fig. 56) est caractérisé par un palier de 4,647, une portée de 72,89 m et un effet de pépité de 2,67.

L'équation du modèle circulaire du calcaire total dans la parcelle P1 s'écrit de la manière suivante :

$$\gamma(h) = 2,667 + 1,98 \left(1 - \left(\frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{h}{72,982} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 72,982} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{72,982} \right)^2} \right)$$

La figure 57 montre le variogramme ajusté au modèle sphérique,

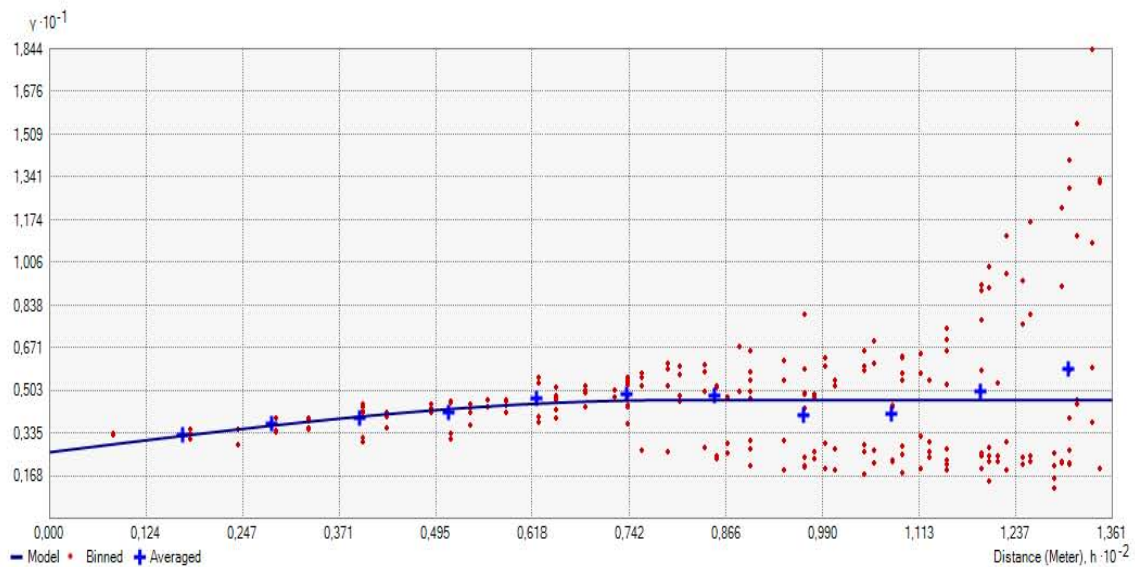


Figure 57. Variogramme du calcaire total dans la parcelle P1 (sphérique)

Le variogramme ajusté au modèle sphérique (Fig. 57) est caractérisé par un palier de 4,646, une portée de 80,31 m et un effet de pépite de 2,60.

L'équation du modèle sphérique du calcaire total du sol dans la parcelle P1, s'écrit ainsi :

$$\gamma(h) = 2,5989 + 2,0474 \left(1,5 \left(\frac{h}{80,313} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{80,313} \right)^3 \right)$$

La figure 58 montre le variogramme ajusté au modèle exponentiel

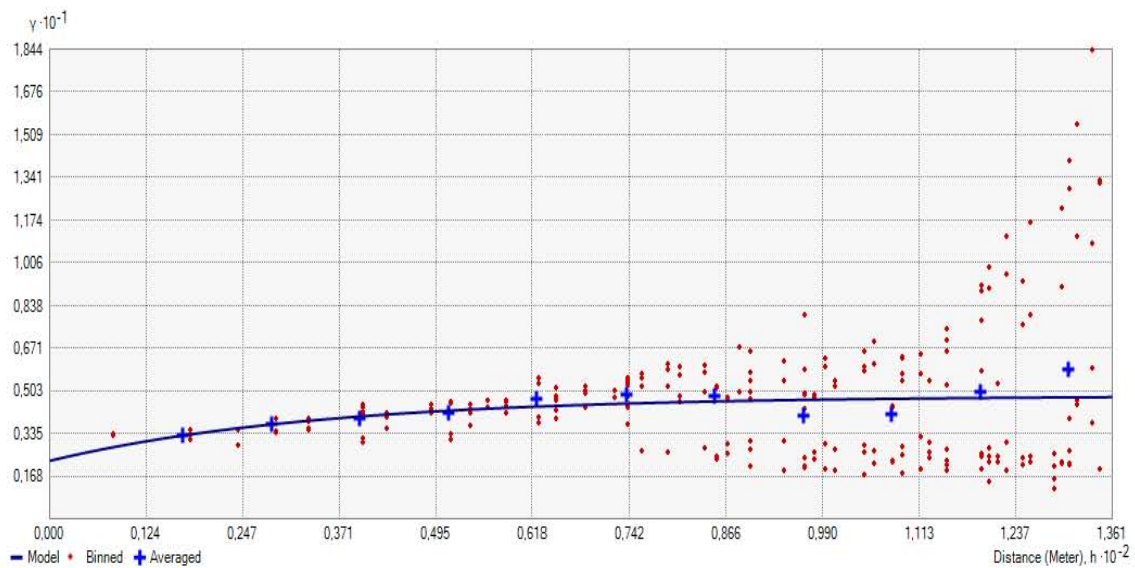


Figure 58. Variogramme du calcaire total dans la parcelle P1 (Exponentiel)

Le variogramme ajusté au modèle exponentiel (Fig. 58) est caractérisé par un palier de 4,826, une portée de 103,59 m et un effet de pépite de 2,28.

L'équation du modèle exponentiel du calcaire total du sol dans la parcelle P1 s'écrit comme suit :

$$\gamma(h) = 2,2776 + 2,5484 \left(1 - \exp \left(- \frac{h}{103,59} \right) \right)$$

La figure 59 montre le variogramme ajusté au modèle Gaussien,

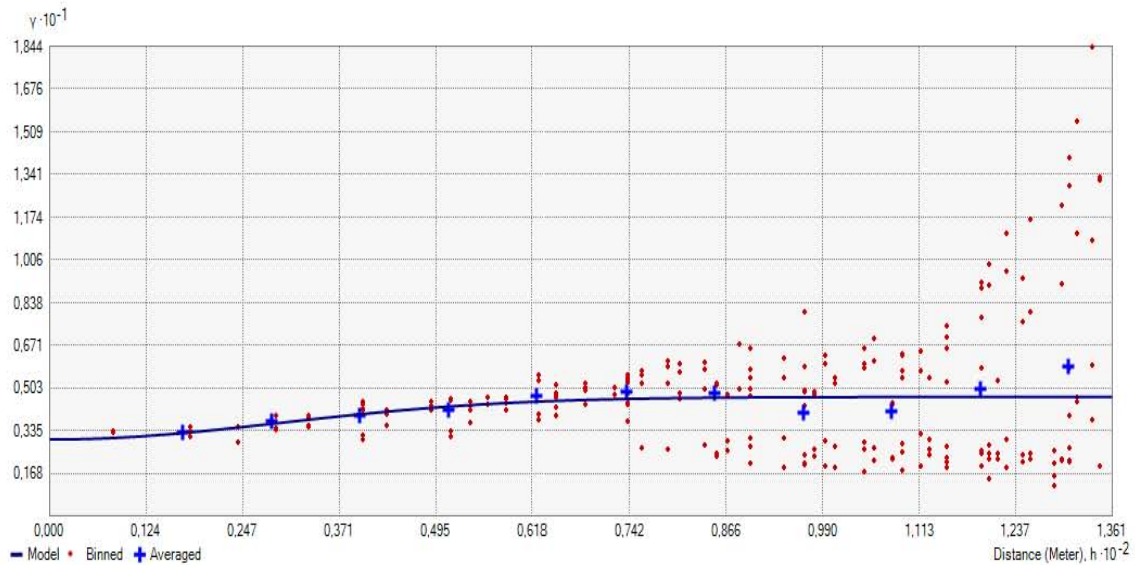


Figure 59. Variogramme du calcaire total dans la parcelle P1 (Gaussien)

Le variogramme ajusté au modèle Gaussien (Fig. 59) est caractérisé par un palier de 4,669, une portée de 72,45 m et un effet de pépite de 3,00.

L'équation du modèle gaussien du calcaire total du sol dans la parcelle P1 s'écrit de la façon suivante :

$$\gamma(h) = 3 + 1,669 \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{72,451}\right)^2 \right)$$

2.2.1.2. Validation croisée

Les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme du taux de calcaire total dans la parcelle P1 sont présentés synthétiquement dans le tableau 28.

Tableau 28 : Validation croisée des variogrammes du calcaire total de la parcelle P1

Calcaire total P1	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	100 of 100	100 of 100	100 of 100	100 of 100
Erreur moyenne de prédiction (ME)	-0,013	-0,014	-0,019	-0,013
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	2,008	2,008	2,011	2,008
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,005	-0,005	-0,008	-0,005
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	1,069	1,070	1,066	1,068
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	1,865	1,862	1,873	1,867

A partir du tableau 28, représentant les paramètres de la validation croisée des variogrammes du calcaire total dans la parcelle de référence, tous les modèles ont une erreur de prédiction moyenne et une erreur moyenne standardisée proche du 0 ainsi qu'une erreur quadratique moyenne standardisée proche du 1, ce qui signifie que les quatre modèles sont optimaux. Le modèle le plus fiable est le modèle exponentiel car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche de l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

Le modèle exponentiel fournira la meilleure interpolation possible par krigeage, et nous permettra de tracer la carte la plus fiable de variation du calcaire total dans la parcelle de référence.

2.2.1.3. Cartographie par krigeage

Les résultats de la validation croisée ont montré que le modèle de variogramme le mieux adapté pour la parcelle P1 est le modèle exponentiel. Ce modèle a été utilisé pour la réalisation de la carte de variabilité spatiale du calcaire total par krigeage ordinaire.

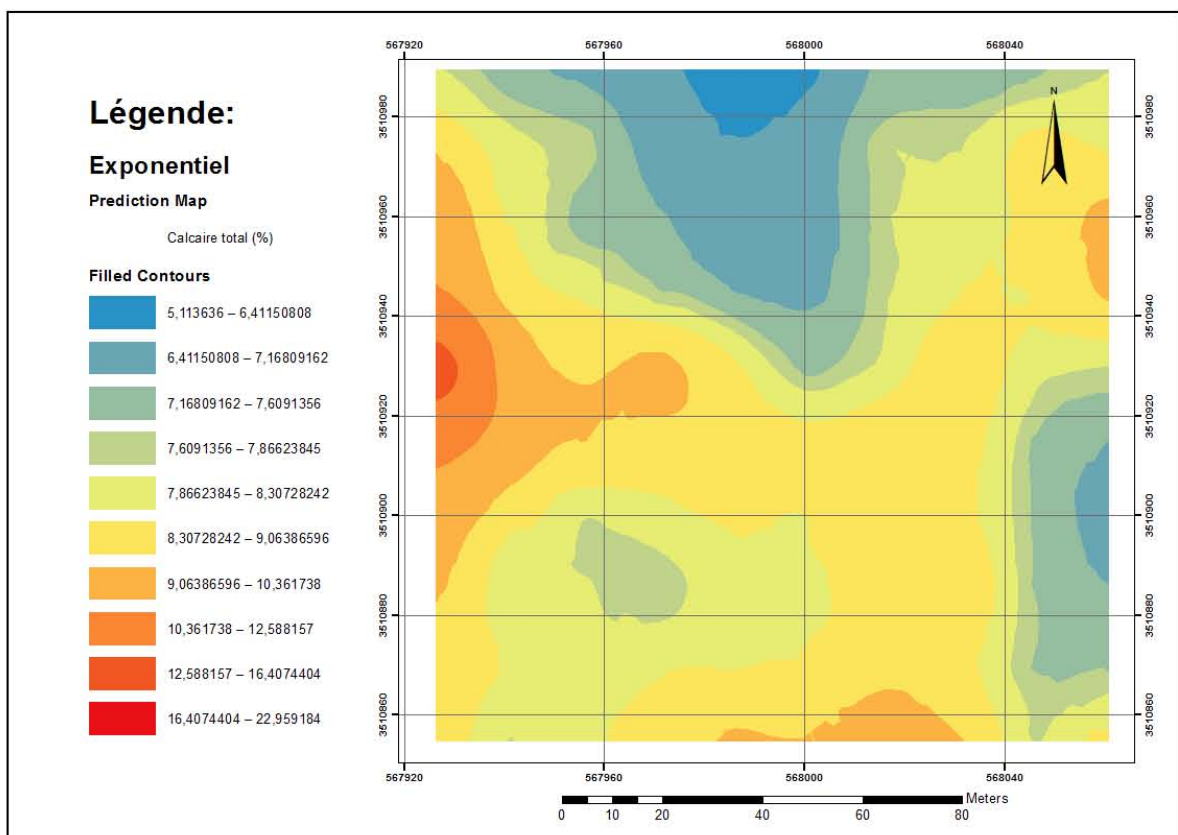


Figure 60. Carte de variabilité spatiale du calcaire total dans la parcelle P1

La carte (Fig. 60) montre une variation modérée du calcaire total dans la parcelle de P1, avec un coefficient de variation de 25,71 % selon l'échelle de NOLIN et *al.* (1997).

Les valeurs les plus élevées sont enregistrées à l'ouest de la parcelle. Les valeurs du taux de calcaire total du sol varient de 5,11 à 22,96 %. Le sol est modérément calcaire dans toute la parcelle.

2.2.2. Modélisation géostatistique de la variabilité du calcaire total dans la parcelle P2

2.2.2.1. Analyse variographique

La figure 61 montre le variogramme ajusté au modèle circulaire,

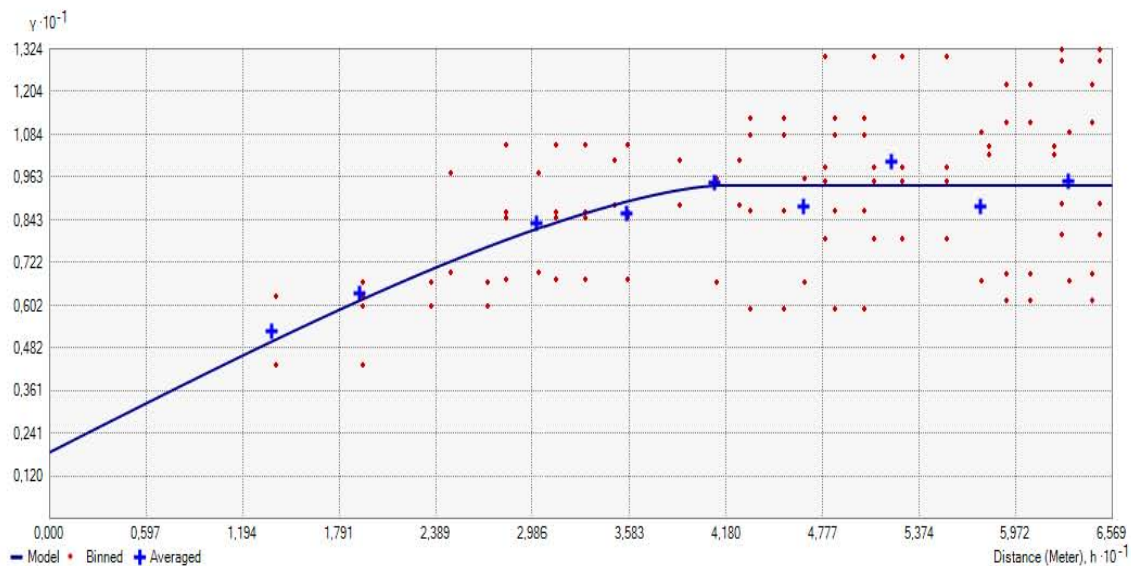


Figure 61. Variogramme du calcaire total dans la parcelle P2 (Circulaire)

Le variogramme ajusté au modèle circulaire (Fig. 61) est caractérisé par un palier de 9,39, une portée de 41,36 m et un effet de pépite de 1,87.

L'équation du modèle circulaire du calcaire total dans la parcelle P2 s'écrit de la manière suivante :

$$\gamma(h) = 1,8692 + 7,5226 \left(1 - \left(\frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{h}{41,36} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 41,36} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{41,36} \right)^2} \right)$$

La figure 62 montre le variogramme ajusté au modèle sphérique,

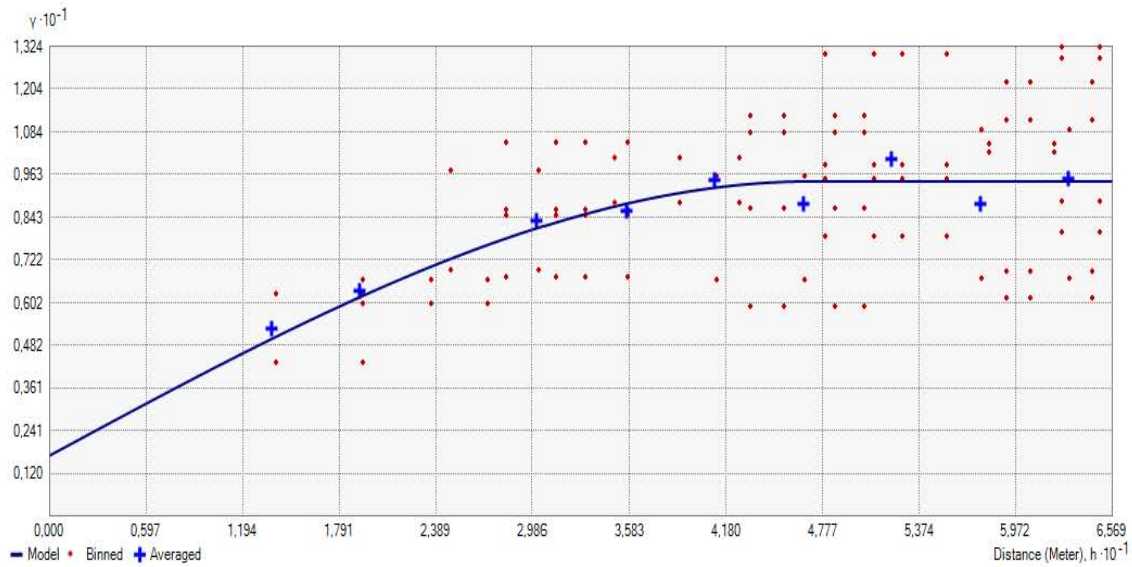


Figure 62. Variogramme du calcaire total dans la parcelle P2 (sphérique)

Le variogramme ajusté au modèle sphérique (Fig. 62) est caractérisé par un palier de 9,43, une portée de 47,07 m et un effet de pépite de 1,70.

L'équation du modèle sphérique du calcaire total du sol dans la parcelle P2, s'écrit ainsi :

$$\gamma(h) = 1,7048 + 7,7297 \left(1,5 \left(\frac{h}{47,067} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{47,067} \right)^3 \right)$$

La figure 63 montre le variogramme ajusté au modèle exponentiel

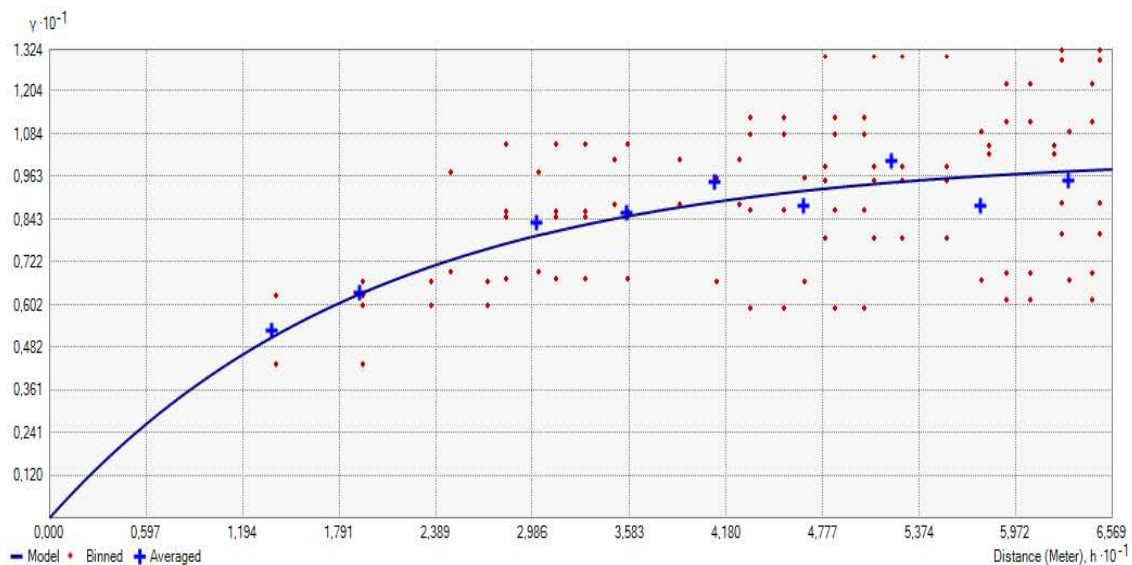


Figure 63. Variogramme du calcaire total dans la parcelle P2 (Exponentiel)

Le variogramme ajusté au modèle exponentiel (Fig. 63) est caractérisé par un palier de 10,20, une portée de 59,72 m et ne présente pas un effet de pépite.

L'équation du modèle exponentiel du calcaire total du sol dans la parcelle P2 s'écrit comme suit :

$$\gamma(h) = 10,202 \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{59,72}\right) \right)$$

La figure 64 montre le variogramme ajusté au modèle Gaussien,

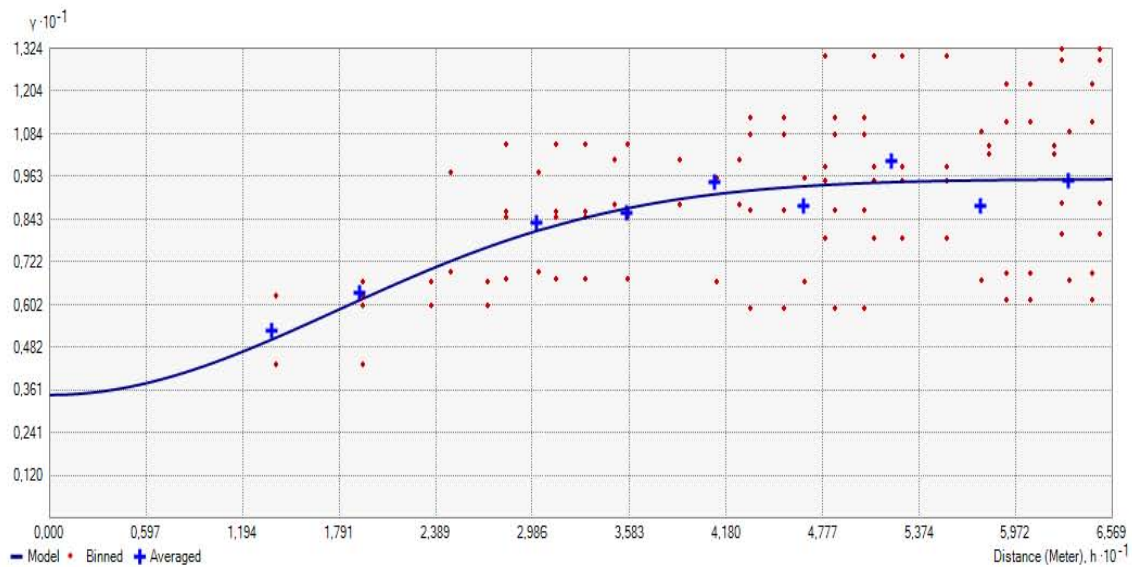


Figure 64. Variogramme du calcaire total dans la parcelle P2 (Gaussien)

Le variogramme ajusté au modèle Gaussien (Fig. 64) est caractérisé par un palier de 9,55, une portée de 43,67 m et un effet de pépite de 3,47.

L'équation du modèle gaussien du calcaire total du sol dans la parcelle P2 s'écrit de la façon suivante :

$$\gamma(h) = 3,4684 + 6,0863 \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{43,674}\right)^2 \right)$$

2.2.2.2. Validation croisée

Les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme du taux de calcaire total dans la parcelle P2 sont présentés synthétiquement dans le tableau 29.

Tableau 29 : Validation croisée des variogrammes du calcaire total de la parcelle P2

Calcaire total P2	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	100 of 100	100 of 100	100 of 100	100 of 100
Erreur moyenne de prédiction (ME)	0,027	0,017	0,022	0,032
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	2,284	2,287	2,281	2,279
Erreur moyenne standardisée (MSE)	0,011	0,007	0,008	0,013
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	1,012	1,003	0,971	0,997
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	2,300	2,318	2,382	2,323

A partir du tableau 29, représentant les paramètres de la validation croisée des variogrammes du calcaire total dans la parcelle P2, tous les modèles ont une erreur de prédiction moyenne et une erreur moyenne standardisée proche du 0 ainsi qu'une erreur quadratique moyenne standardisée proche du 1, ce qui signifie que les quatre modèles sont optimaux. Le modèle le plus fiable est le modèle circulaire car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche de l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

Le modèle circulaire fournira la meilleure interpolation possible par krigeage, et nous permettra de tracer la carte la plus fiable de variation du calcaire total dans la parcelle P2.

2.2.2.3. Cartographie par krigeage

Les résultats de la validation croisée ont montré que le modèle de variogramme le mieux adapté pour la parcelle P2 est le modèle circulaire. Ce modèle a été utilisé pour la réalisation de la carte de variabilité spatiale du calcaire total par krigeage ordinaire.

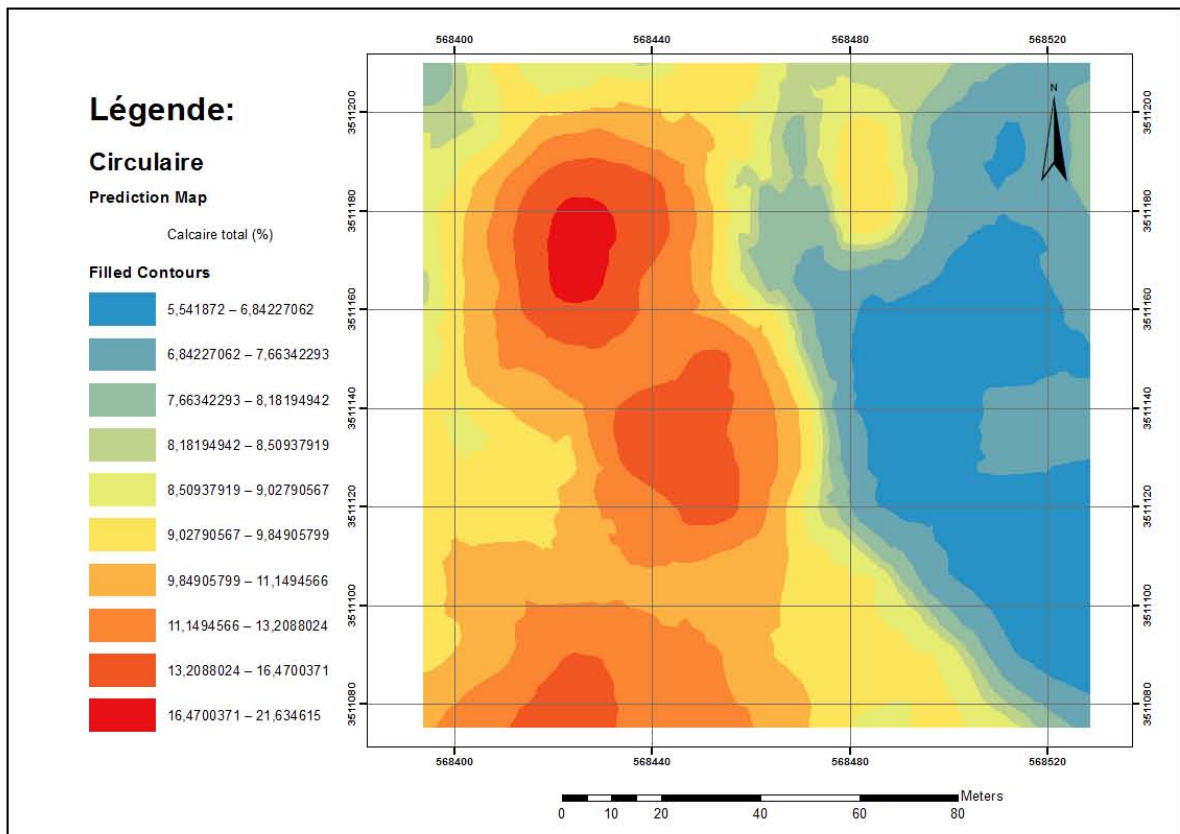


Figure 65. Carte de variabilité spatiale du calcaire total dans la parcelle P2

La carte (Fig. 65) montre une variation modérée du calcaire total dans la parcelle P2, avec un coefficient de variation de 32,56% selon l'échelle de NOLIN *et al.* (1997).

Les valeurs les plus élevées sont enregistrées à l'ouest de la parcelle. Les valeurs du taux de calcaire total du sol varient de 5,54 à 21,63 %. Le sol est modérément calcaire dans toute la parcelle.

3. Discussions

L'étude de la variabilité spatiale du calcaire total du sol a été réalisée dans la station HOUTIA à Hassi Fehal. Les prélèvements ont été effectués sur une profondeur de 0 à 25 cm dans toutes les parcelles étudiées avec un nombre de 100 prélèvements par parcelle sur une maille régulière de 15 m x 15 m. Trois parcelles ont été échantillonnées de la même manière ; une parcelle de référence non cultivée et deux parcelles exploitées pendant 19 ans en céréaliculture intensive sous pivot.

Les résultats d'analyse, montrent que le taux de calcaire total varie de 7,98 à 46,88 % dans la parcelle de référence, le sol est modérément à fortement calcaire. Dans les deux parcelles cultivées, le sol est modérément calcaire avec une variation de 5,11 à 22,96 % dans la parcelle P1 et de 5,54 à 21,63 % dans la parcelle P2.

Le sol a évolué de modérément calcaire à fortement calcaire dans la parcelle de référence à modérément calcaire dans les parcelles P1 et P2 avec un taux de variation annuelle de $-0,52 \pm 0,42$ %/an et de $-0,46 \pm 0,46$ %/an respectivement. L'analyse de variance a montré que cette diminution est très hautement significative.

Cette diminution peut être le résultat de la lixiviation du calcaire de l'horizon de surface vers la profondeur suite à l'irrigation. Les sols contenant des carbonates (calcaires et dolomitiques) sont soumis à un type particulier de lixiviation qui est la décarbonatation qui se produit généralement à la suite de l'action du CO_2 dissous (DUCHAUFOR, 1977 ; BONNEAU et SOUCHIER, 1979 ; POUGET, 1980)

Le test de Tukey a révélé une différence significative entre les valeurs du calcaire total dans la parcelle de référence et ceux des deux parcelles cultivées. Le test a révélé aussi que la différence entre les deux parcelles cultivées est non significative, ces deux parcelles appartiennent au même groupe, ce qui signifie que le calcaire total évolue d'une manière semblable dans les deux parcelles.

Le niveau de l'intensité de variabilité spatiale du calcaire total est élevé dans la parcelle de référence et modéré dans les parcelles cultivées selon l'échelle de NOLIN *et al.* (1997).

L'intensité élevée de variabilité enregistrée dans la parcelle de référence est liée à la répartition naturelle du calcaire dans le sol. TIMLELT (2007) a signalé une variation élevée du calcaire total dans la région de Tlemcen avec un CV de 49.04 %. Selon SILVA et ALEXANDRE (2005), les principales sources de la variabilité sont liées à la formation du sol.

L'intensification agricole a provoqué une diminution considérable de l'intensité de variabilité spatiale du calcaire total dans les deux parcelles. Le CV qui était de 43,15 % dans la parcelle de référence a diminué dans les deux parcelles cultivées avec des taux de 25.71 % dans la parcelle P1 et 32,56 % dans la parcelle P2.

Dans les sols cultivés, une intensité modérée a été signalée par AL-OMRAN et *al.* (2013) en Arabie Saoudite avec des coefficients de variations qui varient de 16.74 à 19.96%, par NAJAFIAN et *al.* (2012) et SAFARI et *al.* (2013) en Iran avec des CV de 28 et 30,29 % respectivement et par DARWISH et *al.* (2015) en Egypte avec un CV de 26,53%.

La modélisation géostatistique a indiqué différents modèles de variabilité spatiale du calcaire total, la validation croisée a montré que les modèles de variogrammes les plus fiables et les plus adaptés sont le circulaire pour la parcelle de référence et la parcelle P2 et l'exponentiel pour la parcelle P1 (Tabl. 30).

Tableau 30: Modèles de variogramme les mieux adaptés et paramètres des modèles pour le taux du calcaire total

	Calcaire total R (Circulaire)	Calcaire total P1 (Exponentiel)	Calcaire total P2 (Circulaire)
Effet de pépité	24,54	2,28	1,87
Portée (m)	27,50	103,59	41,36
Palier	50,50	2,55	9,39
Degré de dépendance spatiale (%) DDS	48,60 (modéré)	47,19 (modéré)	19,90 (Forte)

Notre étude se joint aux travaux réalisés sur la variabilité spatiale du calcaire total dans le monde. Plusieurs modèles théoriques ont été ajustés et jugés fiables. En effet, AL-OMRAN et *al.* (2013) ont trouvé trois modèles différents de variogrammes du calcaire total dans trois parcelles en Arabie Saoudite, ces modèles étaient l'exponentiel, le gaussien et le sphérique. En Iran, le modèle sphérique était le modèle le plus adapté sur trois profondeurs différentes (SAFARI et *al.*, 2013), ainsi que le modèle sphérique dans l'horizon de surface dans l'étude de NAJAFIAN et *al.* (2012). En Egypte, c'était le modèle gaussien qui offrait la meilleure interpolation des valeurs du calcaire total (DARWISH et *al.*, 2015).

L'analyse des variogrammes a montré un effet de pépité élevé dans la parcelle de référence et faible dans les parcelles P1 et P2 (tableau), indiquant une variabilité importante à des distances inférieures au pas d'échantillonnage (15 m) dans la parcelle de référence et faible dans les parcelles exploitées. Des résultats similaires d'effet de pépité élevé ont été trouvés par SAFARI et *al.* (2013) avec une valeur de 26.972 dans l'horizon de surface (0-30 cm) et par NAJAFIAN et *al.* (2012) avec une pépité de 27.6.

DARWISH *et al.* (2015), ont signalé une valeur beaucoup plus élevée de pépite (104.9). Les valeurs faibles trouvées dans les parcelles cultivées se rapprochent des travaux d'Al-OMRAN *et al.* (2013) qui ont signalé des valeurs de pépite variant de 0,01 à 11,66.

Dans la parcelle de référence et la parcelle P1, le taux du calcaire total est modérément dépendant de l'espace, les valeurs du degré de dépendance spatiale sont de 48,60 % pour la parcelle de référence, de et 47,19 % pour la parcelle P1. Les travaux de NAJAFIAN *et al.* (2012), SAFARI *et al.* (2013) et DARWISH *et al.* (2015) ont signalé des résultats similaires, avec des degrés de dépendance spatiale de 44.13%, 35.95% et 49.98% respectivement. Selon CAMBARDELLA *et al.*, (1994), la dépendance spatiale modérée est contrôlée par des variations extrinsèques telles que le labour, l'irrigation, et la fertilisation.

Dans la parcelle P2, le taux du calcaire total est fortement dépendant de l'espace avec une valeur du degré de dépendance spatiale de 19,90 %. Ce résultat se rapproche de celui trouvé par Al-OMRAN *et al.* (2013) avec des valeurs de DDS de 0,03 et de 0,04 %. La forte dépendance spatiale d'une propriété du sol peut être contrôlée par des variations intrinsèques des caractéristiques du sol comme la texture et la minéralogie (CAMBARDELLA *et al.*, 1994).

En ce qui concerne la portée, les valeurs de cette dernière varient de de 27,50 mètres dans la parcelle de référence à 103,59 mètres dans la parcelle P1 avec une valeur intermédiaire de 41,36 mètres dans la parcelle P2.

Le travail d'Al-OMRAN *et al.* (2013) a abouti à une portée de 23.20 mètres, celui de NAJAFIAN *et al.* (2012) a une portée de 151 mètres et de 2157 mètres pour l'étude de SAFARI *et al.* (2013). Nos résultats en matière de distance en deçà de laquelle les valeurs de calcaire total sont spatialement dépendant (portée), se trouvent dans la fourchette signalée par la plupart des auteurs à l'échelle mondiale.

Ces valeurs serviront de référence lors de la préparation des plans d'échantillonnage futurs pour l'étude du calcaire total du sol. La fourchette trouvée dans notre étude favorisera l'extension du plan d'échantillonnage et permettra l'augmentation du pas de ce dernier afin de couvrir une superficie plus grande avec un coût plus réduit.

Conclusion

L'étude de la variabilité spatiale de la qualité du sol dans les agrosystèmes du Sahara algérien, en prenant la céréaliculture sous pivot comme modèle de l'agriculture intensive dans ces régions, a été réalisée dans trois stations, l'une à Ouargla et deux à Ghardaïa.

Trois stations ont été choisies pour le déroulement de l'étude, la station ERIAD à Hassi Ben Abdellah-Ouargla, les stations BENHAMOUDA et HOUTIA à Hassi Fehal-Ghardaïa avec l'adoption de deux méthodes d'échantillonnage, le systématique en diagonale pour la station ERIAD et BENHAMOUDA et le systématique sur maille régulière de 15x15 m pour la station de HOUTIA.

Les propriétés du sol étudié concernent la salinité du sol exprimée par la conductivité électrique dans les trois stations, le pH et le calcaire total du sol dans la station HOUTIA uniquement.

Les résultats ont été exprimés statistiquement en générant un rapport de statistiques descriptives, une analyse de variance et un test de TUKEY. Les taux de variation annuelle des propriétés étudiées ont été aussi évalués.

Une approche géostatistique a été adoptée afin de caractériser la variabilité spatiale des paramètres de l'étude avec une analyse variographique suivie de la validation croisée et enfin la réalisation des cartes thématiques par krigeage ordinaire avec l'utilisation du modèle le plus fiable fourni par la validation croisée.

Les résultats d'analyses ont révélé :

- Les eaux d'irrigation appliquée appartiennent à trois classes : la classe « excellente pour l'irrigation » pour l'eau du forage albien de la station BENHAMOUDA avec un faciès sulfaté calcique et magnésien, la classe « bonne pour l'irrigation » pour les deux forages albien de la station HOUTIA avec un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien et la classe « mauvaise pour l'irrigation » pour l'eau de forage miopliocène de la station ERIAD avec un faciès chloruré calcique et magnésien.

- Une augmentation significative de la salinité dans la parcelle POGX après 4 ans de mise en culture, avec un taux de variation annuelle de la salinité de 0.06 ± 0.02 dS/m/an, une diminution non significative de la salinité du sol dans la station de BENHAMOUDA avec un taux de variation annuelle de -0.01 ± 0.04 dS/m/an et une augmentation très hautement significative de la salinité après 19 ans d'exploitation du sol dans la station HOUTIA sans que la classe de salinité soit affectée, avec un taux de variation annuelle de $0,004 \pm 0,0064$ dS/m/an et $0,003 \pm 0,0060$ dS/m/an dans les parcelles P1 et P2 respectivement.
- Une diminution très hautement significative du pH dans la station HOUTIA après 19 ans d'exploitation du sol, avec un TVA de $-0,027 \pm 0,017$ /an dans la parcelle P1 et de $-0,032 \pm 0,016$ /an dans la parcelle P2.
- Une diminution très hautement significative du taux de calcaire total, qui passe du fortement à modérément calcaire avec un taux de variation annuelle de $-0,52 \pm 0,42$ %/an et de $-0,46 \pm 0,46$ %/an respectivement.

De point de vue répartition spatiale des propriétés étudiées, les résultats ont montré :

- Une variation modérée de la salinité du sol dans la station ERIAD, avec une diminution du CV qui passe de 31,64 % à 18,73 % après 04 ans de culture. La classe d'intensité de variation spatiale de la salinité est passée de variation très élevée à variation élevée dans les deux stations de Hassi Fehal, avec une diminution du CV de 66,44% à 36.20 % dans la station de BENHAMOUDA et de 75,18% à 47,47 % et 46,65 % dans les parcelles P1 et P2 respectivement dans la station de HOUTIA.
- Une variation faible du pH avec une légère augmentation du CV qui varie de 2,13 % dans la parcelle de référence à 3.37 % dans la parcelle P1 et 3,53 % dans la parcelle P2.
- Une variation modérée à élevée du calcaire total, avec une diminution du CV du 43,15% dans la parcelle de référence à 25.71 % et 32,56 % dans les parcelles P1 et P2 respectivement.

La modélisation géostatistique à travers l'analyse des variogrammes et leurs ajustements aux modèles théorique a révélé les résultats suivants :

- Les modèles de variogrammes de la salinité du sol les plus fiables étaient l'exponentiel pour la parcelle de référence et la parcelle P1 et le gaussien pour la parcelle P2, le circulaire pour la parcelle de référence et la parcelle P2 et le gaussien pour la parcelle P1 quant au pH et le circulaire pour la parcelle de référence et la parcelle P2 et l'exponentiel pour la parcelle P1 pour le calcaire total du sol.
- L'analyse variographique a montré que l'effet de pépité est très faible pour la salinité et le pH. Pour le calcaire total, l'effet de pépité est élevé dans la parcelle de référence et faible dans les parcelles P1 et P2.

En ce qui concerne le degré de dépendance spatiale des variables étudiées, les résultats ont mis en évidence que :

- la salinité est modérément dépendante de l'espace dans les parcelles R et P1 avec des DDS de 46,42 % et 34,26 % respectivement, et faiblement dépendante de l'espace dans la parcelle P2 avec un DDS de 92,56 %.
- la réaction du sol est modérément dépendante de l'espace, avec des DDS de 58,74 % dans la parcelle de référence, de 62,12 % dans la parcelle P1 et 49,53 % dans la parcelle P2.
- le taux de calcaire total est modérément dépendant de l'espace dans la parcelle de référence et la parcelle P1 avec des DDS de 48,60 % et 47,19 % respectivement. Il est fortement dépendant de l'espace dans la parcelle P2 avec un DDS de 19,90 %.

L'analyse variographique a permis de ressortir des distances de dépendance spatiales différentes (portée), Les valeurs de portée ressorties dans le présent travail sont :

- Une portée de 27,5 mètres pour la salinité du sol, des portées variant de 45,77 mètres dans la parcelle de référence à 78,51 et 81,11 mètres dans les parcelles P1 et P2 respectivement pour le pH du sol. Pour le calcaire total, les valeurs de

la portée varient de 27,50 mètres dans la parcelle de référence à 41,36 et 103,59 mètres dans les parcelles P2 et P1 respectivement.

Ces résultats confirment la validité du pas d'échantillonnage choisi dans le présent travail et permettent d'optimiser les plans d'échantillonnage des futures études afin de minimiser par conséquent leurs coûts. Un échantillonnage optimisé dans la région se fera avec un pas d'échantillonnage inférieur ou égal à la portée trouvée dans la présente étude.

Les cartes réalisées par krigeage montrent la distribution spatiale des paramètres étudiés et offrent les valeurs de ces propriétés aux endroits non échantillonnés.

L'étude de la variabilité de la salinité, du pH et du calcaire total a permis de diagnostiquer l'état actuel des teneurs de ces variables, de simuler leurs taux de variation annuelle et de modéliser leurs distribution spatiale avec une approche combinée analytique, statistique et géostatistique.

Les résultats obtenus renseignent sur l'intensité de dégradation du sol par salinité dans la région de Ouargla résultant de l'utilisation d'une eau qualifiée mauvaise pour l'irrigation et l'opportunité qu'offre la région de Hassi Fehal au développement de cette spéculation suite au maintien «relatif» du niveau de la salinité après une période d'exploitation relativement élevée.

Les résultats de la diminution du pH et du calcaire total sont encourageants, du fait des avantages de cette diminution sur la nutrition minérale des plantes cultivées, cependant, l'étude de la variation verticale de ces paramètres demeure d'importance cruciale.

Ce travail, le premier dans son genre adoptant une approche géostatistique dans la région de Ghardaïa, ouvre une porte sur les possibilités qu'offre cette technique dans la caractérisation et la cartographie des sols dans les régions arides et en Algérie d'une manière générale, domaine de recherche vierge et méritant une attention particulière.

Afin d'assurer une production suffisante aux populations actuelles sans compromettre celle des générations futures, en préservant les ressources en eau et en sol, l'étude des sols demeure indispensable. Cette dernière offre la possibilité de cartographier les zones à risque et de tracer les cartes d'aptitude à la culture, en tenant compte des

principaux facteurs de la production végétale à savoir, le sol, l'eau, le climat, le végétal et le facteur économique bien entendu.

L'étude sur la variabilité spatiale s'avère intéressante à une bonne compréhension de la situation actuelle des sols agricoles en vue d'une meilleure gestion, maintien et amélioration de leur productivité.

Au terme de ce travail, nous suggérons la poursuite de cette étude en tenant compte des éléments suivants :

- L'extension de l'étude sur d'autres paramètres et dans d'autres stations.
- L'étude de la variabilité verticale des propriétés du sol, afin de comprendre le devenir de chaque propriété dans le profil.
- L'utilisation de la géostatistique dans le diagnostic de la variabilité spatiale de la distribution de l'eau d'irrigation dans le sol, sous irrigation par pivot et l'interaction entre cette distribution et la variabilité des propriétés du sol, afin d'améliorer l'efficacité de l'irrigation du système pivot.

Références

- ABDELHAFID Y., 2010-** Cartographie de la salinité des sols par induction électromagnétique: cas de la zone est du périmètre irrigué de la Mina. Mémoire de magister, I.N.A., Alger, 102p.
- ABDESSELAM S., 1998 -** Contribution à l'étude des sols gypseux au Nord-est du Sahara algérien: Caractérisation et genèse. Cas des oasis de Tolga (région des Zibans). Mémoire de magister. I.N.A., Alger, 147p.
- ADAMCHUK V. I., MORGAN M. T., LOWENBERG-DEBOER J. M., 2004-** A model for agro-Economic analysis of soil pH mapping. Precision Agriculture, 5, pp.111–129.
- ADHIKARI P., SHUKLA M.K., MEXAL J.G., 2011-** Spatial variability of electrical conductivity of desert Soil irrigated with treated wastewater: Implications for Irrigation Management. Applied and Environmental Soil Science, pp.1-11.
- AGRAWAL O.P., RAO K.V.G.K., CHAUHAN H.S., KHANDELWAL M.K., 1995 -** Geostatistical analysis of soil salinity improvement with subsurface drainage system. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 38 (5), pp.1427–1433.
- AKIŞ R., 2014-** Spatial variability of soil solute and saturated hydraulic conductivity affected by undrained water table conditions. Precision Agriculture, 16(3), PP.330-359.
- AKRAMKHANOV A., MARTIUS C., PARK S.J., HENDRICKX J.M.H., 2011-** Environmental factors of spatial distribution of soil salinity on flat irrigated terrain. Geoderma, 163(1-2), pp.55-62.
- AL-OMRAN A.M., AL-WABEL M.I., EL-MAGHRABY S.E., NADEEM M.E., AL-SHARANI S., 2013-** Spatial variability for some properties of the wastewater irrigated soils. Journal of the Saudi society of agricultural sciences, 12(1), pp.167–175.
- ARSHAD M.A., COEN G.M., 1992 -** Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. American Journal of Alternative Agriculture (7) 1, pp. 25-32.

- ASKIN T., KIZILKAYA R., 2006-** Assessing spatial variability of soil enzyme activities in pasture topsoils using geostatistics. *European Journal of Soil Biology*, 42(4), pp.230-237.
- ASKRI B., BOUHLILA R., 2010-** Evolution de la salinité dans une oasis moderne de la Tunisie. *Etude et gestion des sols*, 17(3-4), pp.197-212.
- ATTALAH S., 2000** – Evaluation de la performance de l’irrigation par pivot dans une région saharienne (cas de Ouargla). Mémoire de magister, I.N.A., Alger, 54p.
- AUBERT G., 1975** - Les sols sodiques en Afrique du Nord. *Annales de l’I.N.A. Alger* 6 (1), pp. 185-195.
- BADRAOUI M., SOUDI B., FARHAT A., 1998** - Variation de la qualité des sols : une base pour l’évaluation de la durabilité de la mise en valeur agricole sous irrigation par pivot au Maroc, *Etude et gestion des sols* 5(4), 1998, pp. 227-234.
- BAILLARGEON S., 2005-** Le krigeage : revue de la théorie et application à l’interpolation spatiale de données de précipitations. Thèse de Maîtrise, université Laval, Ste-Foy (Québec), Canada, 137p.
- BAIT A., CHETTOUH C., GUESMIA S. 1977-** Possibilités de développement de la palmeraie de Guerrara. Mémoire d’ingénieur d’Etat, I.T.A., Mostaganem, 82p.
- BAIZE D., 1988** - Guide des analyses courantes en pédologie (choix- expression - présentation- interprétation). I.N.R.A., Paris, 172p.
- BARADAI L., 2014** - Inventaire et bio écologie des Terfez dans quelques régions du Sahara septentrional (Oued M’ya, Oued Righ et Ghardaïa). Thèse de doctorat, Université de Ouargla, 124p.
- BELAMRI R., 1999** - Contribution à l'étude de comportement d'une culture d'orge sous centre pivot dans la région de Hassi Ben Abdellah (Wilaya de Ouargla). Mémoire d’ingénieur d’Etat, I.A.S., Ouargla, 35 p.
- BELKESSAM L., LEMIERE B., 2006-** Stratégie et technique d'échantillonnage des sols pour l'évaluation des pollutions. *Etude RECORD n°04-0510/1A. CNRSSP*, 321p.

- BENAZZOZ M.S., 2011-** Étude comparative entre la géostatistique et les méthodes déterministes pour la cartographie des types de sols. Thèse de maîtrise, Université d'Ottawa, 82p.
- BENBRAHIM F., 2001 -** Etude de l'effet saisonnier de la nappe phréatique sur la dynamique des sels solubles dans un sol cultivé et non cultivé dans la cuvette de Ouargla (Cas de l'exploitation de l'I.A.S.). Mémoire d'ingénieur d'Etat, I.A.S., Ouargla, 115p.
- BENBRAHIM F., BENSLAMA M., KEMASSI A., DAREM S., HAMEL I., CHIKHI F., HALILAT M. T., 2016-** Evaluation de la durabilité de la céréaliculture sous pivot par l'étude de la salinisation du sol dans la région d'Ouargla. *Ciência e Técnica Vitivinícola*, 31(5), pp.107-123.
- BENSAID R., 1999 –** Les sols à accumulation gypso- calcaire de la région de Ain Ben Naoui (Biskra). *Annales de l'I.N.A.*, Alger, 20(1 et 2), pp.1-8.
- BENZAHI Y., 1994 -** Contribution à l'étude de la dynamique des sels dans un sol irrigué sous palmeraie. Mémoire d'ingénieur d'Etat, I.N.F.S.A.S., Ouargla, 111p.
- BHADRA A., RAGHUWANSHI N. S., SINGH R., 2012-** Generation of monthly irrigation maps for India using spatial interpolation techniques. *Sustainable irrigation and drainage IV*. Wessex institute of technology, pp.291-302.
- BOIS B., 2007-** Cartographie agro-climatique à méso-échelle : méthodologie et application à la variabilité spatiale du climat en Gironde viticole. Conséquences pour le développement de la vigne et la maturation du raisin. Thèse de doctorat, Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 210p.
- BONNEAU M., SOUCHIER B., 1979-** Pédologie, 2. Constituants et propriétés du sol. Edition Masson, Paris, 459p.
- BOUMAARAF B., 2003-** Contribution à l'étude de la répartition spatiale des propriétés physico-chimiques et minéralogiques des sols dans la vallée de l'Oued Righ. Mémoire de magister. Institut d'agronomie de Batna, 162p.

- BOUMAARAF B., 2013-** Caractéristiques et fonctionnement des sols dans la vallée d'Oued Righ, Sahara nord oriental, Algérie. Thèse de doctorat, université de Reims Champagne-Ardenne, France, 97p.
- BOUZID H., 1993 -** Contribution à l'étude de la dynamique de la salinité dans un sol sableux sous irrigation par pivot (Gassi Touil). Mémoire d'ingénieur d'Etat, I.N.F.S.A.S., Ouargla, 46p.
- BRADAÏ A., DOUAOUI A.E.K., MARLET S., 2009-** Qualité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols dans la plaine du Bas-Cheliff, Algérie. Economies d'eau en systèmes irrigués au Maghreb. Actes du quatrième atelier régional du projet Sirma, Mostaganem, 26-28 mai 2008, pp. 1-7.
- BRADSHAW T.K., MÜLLER B., 1998-** Impacts of rapid urban growth on farmland conversion: application of new regional land use policy models and geographical information systems. *Rural sociology*, 63(1),pp.1-25.
- BRETZ, F., HOTHORN, T., WESTFALL P., 2011-** Multiple comparisons using R. Edition Taylor and Francis Group, LLC, Boca Raton, U.S.A., 182p.
- BUCKMAN H.O., BRADY N.C., 1965-** The nature and properties of soils. The Macmillan Company, New York, U.S.A., 653p.
- BURGESS T. M., WEBSTER R., McBRATNEY A. B., 1981-** Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. IV Sampling strategy. *Journal of Soil Science*, 32, pp.643-659.
- CADOT Y., 2010-** Influence de la date de vendange sur les composés phénoliques de la baie de raisin ; conséquences pour la typicité du vin, France. Thèse de doctorat, centre international d'études supérieures en sciences agronomiques, Montpellier, France, 269 pp.
- CAMBARDELLA C.A., MOORMAN T.B., PARKIN T.B., KARLEN D.L., NOVAK J.M., TURCO R.F., KONOPKA A.E., 1994-** Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil science society of America journal*, 58(5), pp.1501-1511.

- CHELOUFI H., BOUAMMAR B., 2010** - La céréaliculture sous centre-pivot dans les régions sahariennes : cas de la région de Ouargla. Workshop sur l'agriculture saharienne : Enjeux et perspectives Université de Ouargla, p.25.
- CONDOM N., 2000** - Analyse et modélisation couplée des processus hydrogéochimiques de la salinisation des sols. Application aux sols rizicoles irrigués de l'Office du Niger (Mali). Thèse de doctorat, école nationale supérieure agronomique. Montpellier, 189p.
- CORSTANJE R., GRUNWALD S., REDDY K.R., OSBORNE T.Z., NEWMAN S., 2006**- Assessment of the spatial distribution of soil properties in a northern Everglades marsh. *Journal of Environmental Quality*, 35(3), pp.938-49.
- CRESSIE N. A. C., 1993**- *Statistics for Spatial Data*. Revised Edition, Wiley, New York, 900p..
- DAGNELIE P., 1975**- *Théorie et méthodes statistiques : applications agronomiques* Volume 2 : les méthodes de l'inférence statistique. Edition des presses agronomiques de Gembloux, Belgique, 464p.
- DAJOZ R., 1970**- *Précis d'écologie*. Edition Dunod, Paris, 357p.
- DAJOZ R., 1971** - *Précis d'écologie*. Edition Bordas. Paris, 434p.
- DAJOZ R., 1983** - *Précis d'écologie*. Edition Dunod, Paris, 503p.
- DAJOZ R., 1985** - *Précis d'écologie*. Edition Dunod, Paris, 505p.
- DAJOZ R., 2003**- *Précis d'écologie*. Edition Dunod, Paris, 615p.
- DAOUD Y., HALITIM A., 1994** - Irrigation et salinisation au Sahara algérien. *Sécheresse* 5(3), pp.151-160.
- DARWISH K.M., RASHAD M., MOHAMED S.Z., GAD A., 2015**.- Spatial distribution analysis of soil variables for agronomic development in El-Omayed Area, North-Coastal of Egypt. *Environmental earth sciences*, 74(1), pp.889-901.
- DAUPHINE A., VOIRON-CANICIO C., 1988**- *Variogrammes et structures spatiales*. Collection Reclus Modes d'Emploi n°12. Edition Montpellier : Gip Reclus, 56p.

- DEKHINAT S., BENSÂÏD R., BENSID Z., KOREIB F., MOUNA Y., 2010-** Analyse de la variabilité spatiale de la salinité des sols dans une palmeraie algérienne (Biskra, Algérie). *Sciences & technologie D* n° 31, pp.9-14.
- DELHOMME J. P., 1976-** Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. Thèse de Docteur Ingénieur, Paris VI, 160p.
- DENTON O.A., ADURAMIGBA-MODUPE V.O., OJO A.O., ADEYOYOLANU O.D., ARE K.S., ADELANA A.O., OYEDELE A.O., ADETAYO A.O., OKE A.O., TEJADA MORAL M., 2017-** Assessment of spatial variability and mapping of soil properties for sustainable agricultural production using geographic information system techniques (GIS). *Cogent Food & Agriculture*, 3(1), pp.1-12.
- DHUNNA M., DIXIT J.B., 2010-** Information technology in business management, university science Press, Bangalore, 797p.
- DING J., YU D., 2014.-** Monitoring and evaluating spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the Werigan–Kuqa Oasis, China, using remote sensing and electromagnetic induction instruments. *Geoderma*, 235-236, pp.316-322.
- DJILI K., DAOUD Y., GAOUAR A., BELDJOUÏ Z., 2003 -** La salinisation secondaire des sols au Sahara. Conséquences sur la durabilité de l'agriculture dans les nouveaux périmètres de mise en valeur. *Sécheresse* 14(4), pp. 241-246.
- DOUAOUI A.E.K., NICOLAS H., WALTER C., 2006-** Detecting salinity hazards within a semiarid content by means of combining soil and remote-sensing data. *Geoderma*, 134, pp.217–230.
- DUCHAUFOR P., 1977 –** Pédologie : Pédogenèse et classification. Tome I. Edition Masson, Paris, 477p.
- DUCHAUFOR P., 1984 –** Abrégés de pédologie. Edition Masson, Paris, 214p.
- DUFFERA M., WHITE J.G., WEISZ R., 2007-** Spatial variability of southeastern u.s. coastal plain soil physical properties: implications for site-specific management. *Geoderma*, 137(3-4), pp.327-339.

- DURAND J.H., 1958** - Les sols irrigables : Etude pédologique. Edition Imbert, Alger, 190p.
- DURAND J.H., 1983** - Les sols irrigables : Etude pédologique. Edition Imprimerie Boudin, Paris, 339p.
- EMADI M., BAGHERNEJAD M., PAKPARVAR M., KOWSAR S.A., 2010**- An approach for land suitability evaluation using geostatistics, remote sensing, and geographic information system in arid and semiarid ecosystems. *Environmental Monitoring and Assessment*, 164(1-4), pp.501-511.
- EMADI MO., BAGHERNEJAD M., EMADI ME., MAFTOUN M., 2008**- Assessment of some soil properties by spatial variability in saline and sodic Soils in Arsanjan plain, southern Iran. *Pakistan journal of biological sciences*, 11(2), pp.238-243.
- FAMIGLIETTI J.S., WOOD E.F., 1995**- Effects of spatial variability and scale on areally averaged evapotranspiration. *Water resources research*, 31(3), pp.699-712.
- FERNÁNDEZ-AVILÉS G., MONTERO J.M., PORCU E., SCHLATHER M., 2012**- Space-time processes and geostatistics. *Lecture notes in Statistics 207. Advances and challenges in space-time modelling of natural events*. Springer-Verlag, Berlin, pp.1-23.
- FRONTIER S., PICHOD-VIALE D., LEPRÉTRE A., DAVOULT D., LUCZAK C., 2004**- Ecosystèmes, Structure, Fonctionnement, Evolution. 3^{ème} édition. Editions Dunod, Paris, 549p.
- GAETAN C., GUYON X., 2008**- Modélisation et statistique spatiales. *Mathématiques et Applications 63*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 321p.
- GANDIN L., 1963**- Objective analysis of meteorological fields (Leningrad :Gidromet). Traduction en anglais, 242p.
- GAUTIER M., GOUSKOV M. N., 1951**- Le forage de Guerrara. Deuxième sondage d'étude et premier grand sondage d'exploitation de la nappe Albienne jaillissant dans le Bas-Sahara. *Terre et Eaux*, Alger, pp38-42.

- GOBAT J. M., ARAGNO M., MATTHEY W., 2003** - Le sol vivant : Deuxième édition revue et augmentée. Presses polytechniques et universitaires romandes, France, 568p.
- GODARD V., 1994** - Apport de l'analyse variographique pour déterminer la taille et l'espacement des unités d'échantillonnage lors d'un inventaire d'occupation du sol en milieu naturel tropical. Bulletin SFPT, 1994-4 (136). France, pp.33-44.
- GOOVAERTS P., 1998**- Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. *Biology and Fertility of Soils*, 27, pp.315–334.
- GRATTON Y., 2002**- Le Krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale. Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique, INRS-Eau-Terre-Environnement. Québec, Canada, 4p.
- GUEKIE SIMO A.T., MARACHE A., LASTENNET R., BREYSSE, D., 2015**- Geostatistical investigations for suitable mapping of the water table: the Bordeaux case (France). *Hydrogeology Journal*, 24(1), pp.231-248.
- HALILAT M.T., 1993** - Etude de la fertilisation azotée et potassique sur le blé dur (variété aldura) en zones sahariennes (région de Ouargla). Mémoire de magister, université de Batna, 130p.
- HALILAT M.T., 1998** - Etude expérimentale de sable additionnée d'argile. Comportement physique et organisation en conditions salines et sodiques. Thèse de doctorat, INA-PG Paris, 229p.
- HALITIM A., 1988** - Sols des régions arides d'Algérie. Edition O.P.U., Alger, 384 p.
- HAMDI-AISSA B., 2001**- Fonctionnement actuel et passé des sols du Nord du Sahara (cuvette de Ouargla). Approches micro-morphologique, géochimique et minéralogique et variabilité spatiale. Thèse de doctorat, I.N. A., Paris-Grignon, 308p.
- HE B., CAI Y., RAN W., ZHAO X., JIANG H., 2015**- Spatiotemporal heterogeneity of soil salinity after the establishment of vegetation on a coastal saline field. *Catena*, 127, pp.129-134.

- HOUICHITI R., 2009-** Caractérisation d'un agrosystème saharien dans une perspective de développement durable : Cas de l'Oasis de Sebseb (Wilaya de Ghardaïa). Mémoire de magister Université de Ouargla, 90p.
- HU W., SHAO M.A., WAN L., SI B.C., 2014-** Spatial variability of soil electrical conductivity in a small watershed on the Loess Plateau of China. *Geoderma*, 230-231, pp.212-220.
- HULLIN M., 1983-** Cours de drainage. Partie consacrée aux sols salés. Volume 3, I.N.A., Alger, 139p.
- IDDER T., 1998-** La dégradation de l'environnement urbain liée aux excédents hydriques au Sahara algérien. Impact des rejets d'origine agricole et urbaine et techniques de remédiation proposées. L'exemple de Ouargla. Thèse de doctorat, université d'Angers, 325p.
- IDDIR M.E.A., 2006-** Evalutaion de la salinité par induction électromagnétique: Exemple d'une parcelle cultivée de la plaine de la Macta (Wilaya de Mascara). Mémoire de magister, I.N.A., Alger, 96p.
- IRIS J.M., 1986-** Analyse et interprétation de la variabilité spatiale de la densité apparente dans trois matériaux ferrallitiques. *Sciences du sol*, 24(3), pp.245-256.
- JINFU Z., KELONG C., SHENGKUI C., LIANG C., YANPENG W., BAOLIANG L., YONGSHENG W., 2011-** Spatial variability analysis of soil salt and its component ions in Qinghai lake region. *Procedia environmental sciences*, 10, pp.2431-2436.
- KILIC K., KILIC S., KOCYIGIT R., 2012-** Assessment of spatial variability of soil properties in areas under different land use. *Bulgarian journal of agricultural science*, 18(5), pp.722-732.
- KOULL N., 2007-** Effets de la matière organique sur les propriétés physiques et chimiques des sols sableux de la région de Ouargla. Mémoire de magister, université de Ouargla, 99p.

- KRESSE W., DANKO D., 2012-** Springer Handbook of Geographic Information, Springer, New York, USA, 1120p.
- LARSON W.E., PIERCE F.J., 1992 -** Conservation and enhancement of soil quality In: Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World, Vol. 2: Technical papers. Bangkok, Thailand: International Board for Research and Management. IBSRAM Proceedings No. 12(2). pp.175-203.
- LAURENT J. Y., ROSSI J. P., 1997-** Stratégies d'échantillonnage au champ : détermination du nombre et de la disposition spatiale des points de prélèvements. Collection colloques et séminaires. L'échantillonnage : du prélèvement à l'analyse. Edition Rambaud Dominique, ORSTOM, Paris, pp.43-52.
- LE HOUEROU H. N., 1990-** Définition et limites bioclimatiques du Sahara. Sècheresse 1(4), pp.246-259.
- LI X. M., YANG J. S., LIU M. X., LIU G. M., YU M., 2012-** Spatiotemporal changes of soil salinity in arid areas of south Xingjian using electromagnetic induction. Journal of integrative agriculture, 11(8), pp.1365-1376.
- LIU D.W., WANG Z.M., ZHANG B., SONG K.S., LI X.Y., LI J.P., LI F., DUAN H.T., 2006-** Spatial distribution of soil organic carbon and analysis of related factors in croplands of the black soil region, Northeast China. Agriculture Ecosystems and Environment, 113, pp.73–81.
- LIU J., PATTEY E., NOLIN M.C., MILLER J.R., KA, O., 2008-** Mapping within-field soil drainage using remote sensing, DEM and apparent soil electrical conductivity. Geoderma, 143(3-4), pp.261-272.
- LÓPEZ-GRANADOS F., JURADO-EXPÓSITO M., ATENCIANO S., GARCIA-FERRER A., SANCHEZ DE LA ORDEN M., GARCIA-TORRES L., 2002-** Spatial variability of agricultural soil parameters in southern Spain. Plant and Soil, 246, pp.97-105.
- MAACHI L., 2005 -** Etude du comportement d'une céréale à grains sous centre pivot dans la région de Ouargla : évaluation de l'efficience de l'irrigation et de la fertilisation azotée. Mémoire d'ingénieur d'Etat, I.A.S. Ouargla. 91p.

- MAAS E.V., HOFFMAN G.J., 1977-** Crop salt tolerance - current assessment. Journal of the irrigation and drainage division. American society of civil engineers 103(2): 115-134.
- MARBEAU J. P., 1976-** Géostatistique forestière. Etat actuel et développements nouveaux pour l'aménagement en forêts tropicales. Thèse de doctorat, école nationale supérieure des mines de Paris, 180p.
- MATHERON G., 1963-** Principles of geostatistics. Economic geology, 58, pp.1246-1266.
- MATHERON G., 1976-** Les concepts de base et l'évolution de la géostatistique minière. Advanced geostatistics in the mining industry. NATO Advanced Study Institutes Series (Series C- Mathematical and Physical Sciences). GUARASCIO M., DAVID M., HUIJBREGTS C. (eds), Springer, Dordrecht, vol 24, pp.3-10.
- MATHIEU C., PIELTAIN F., 2009-** Analyse chimique des sols : méthodes choisies. Editions Tec & doc, Paris, France, 388p.
- McBRATNEY A.B., WEBSTER R., 1986-** Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. Journal of soil science, 37, pp.617-639.
- MESKINE M. 1992 -** Contribution à l'étude hydrique, paramètres hydrodynamiques d'un sol salé et drainé (un cas à Ouargla). Mémoire d'ingénieur d'Etat, I.N.F.S.A.S., Ouargla, 57p.
- Microsoft Corporation, 1993-** Microsoft Excel: user's guide : version 5.0. Edition Microsoft Corporation, université du Michigan, U.S.A., 786p.
- MONOD T., 1992 –** Du Désert. Sécheresse, 3(1), pp.7–24.
- MOUGHLI L., 2000 –** Les engrais minéraux, caractéristiques et utilisations. Bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA N° 72, septembre 2000. Transfert de technologie en agriculture. Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Maroc, 4p.
- MOULIAS D., 1927-** L'eau dans les oasis sahariennes : (Organisation hydraulique, régime juridique). Thèse de doctorat, université d'Alger, 305p.

- MYERS D. E., 1994-** Spatial interpolation: an overview. *Geoderma*, 62, pp.17-28
- MZUKU M., KHOSLA R., REICH R., INMAN D., SMITH F., MACDONALD L., 2005-** Spatial variability of measured soil properties across site-specific management zones. *Soil Science Society of America Journal*, 69(5), pp.1572-1579.
- NADJAH A., 1971-** Les Oasis du Souf. Edition Maison du livre, Algérie.174p.
- NAJAFIAN A., DAYANI M., MOTAGHIAN H.R., NADIAN H., 2012-** Geostatistical assessment of the spatial distribution of some chemical properties in calcareous Soils. *Journal of integrative agriculture*, 11(10), pp.1729-1737.
- NOLIN M.C., 2000-** Variabilité et structure d'organisation spatiale des sols. 1^{er} colloque sur la géomatique agricole et l'agriculture de précision, 23-24 Juillet 2000. Ste-Hyacinthe (Québec, Canada), pp.143-169.
- NOLIN M.C., CAILLIER M.J., WANG C., 1991-** Variabilité des sols et stratégie d'échantillonnage dans les études pédologiques détaillées de la plaine de Montréal. *Canadian journal of soil science*, 71, pp.439-451.
- NOLIN M.C., CAMBOURIS A.N., SIMARD R.R., 1997-** La variabilité des sols: son origine et sa gestion. Actes du Colloque : Nouvelles technologies en agriculture, campus du fort St-Jean, pp.35-77.
- NUR AINI I., EZRIN M.H., AIMRUN W., 2014-** Relationship between soil apparent electrical conductivity and pH value of Jawa series in oil palm plantation. *Agriculture and agricultural science procedia*, 2, pp.199-206.
- O.N.M., 2016-** Données météorologiques de Ouargla et de Ghardaïa.
- OLIVER M.A., WEBSTER R., 1990-** Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International journal of geographical information systems*, 4(3), pp.313-332.
- OLIVER, M.A., 2010.** *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*. Springer Netherlands. 331p.

- OMEIRI N., 1994** - Contribution à l'étude de la dynamique saisonnière des sels solubles dans la cuvette de Ouargla. Mémoire d'ingénieur d'Etat, I.N.F.S.A.S., Ouargla, 72p.
- OSAMA M., FUKUMARA K., ISHIDA T., YOSHINO K., 2005**- Assessment of spatial variability of soil and canopy properties in a cassava field. Journal of Japan society of hydrology and water resources, 18(5), pp.501–509.
- OULED MOUSSA A., 1999** : Contribution à l'étude de l'uniformité des pluies et les pertes d'eau par un système pivot de 16 ha dans la région de Hassi Ben Abdellah (Wilaya de Ouargla). Mémoire d'ingénieur d'Etat, I.A.S., Ouargla. 53p.
- OZENDA P., 1982**- Flore du Sahara. Edition du centre national des recherches scientifiques, Paris, 39p.
- OZENDA P., 1991**- Flore du Sahara. Edition du centre national des recherches scientifiques, Paris, 662p.
- PARFITT J. M. B., TIMM L. C., PAULETTO E. A., DE SOUSA R. O., CASTILHOS D. D., DE ÁVILA, C. L., RECKZIEGEL N. L., 2009**- Spatial variability of the chemical, physical and biological properties in lowland cultivated with irrigated rice, Revista Brasileira de Ciência do Solo, 33, pp.819–830.
- PASSAGER P., 1958** - Metlili des Chaâmba, Sahara Algérois. Archives de l'Institut Pasteur d'Algérie. pp.508-574.
- PIPER A. M., 1944**- A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analysis. Transactions, American Geophysical Union, 25, pp.914-923.
- POUGET, M., 1980**- Les sols à croûte calcaire dans les steppes algériennes : Quelques aspects morphologiques et esquisse d'une évolution actuelle. Cahier ORSTOM, série pédologie, XVIII(3-4), pp.235-246.
- QUENUM M., 2009**- Cartographie à l'échelle de la parcelle agricole de variables indicatrices de la capacité des sols à fixer le phosphore à l'aide de la télédétection et des nouvelles technologies, thèse de Philosophiae Doctor (PhD), université de Québec, , Canada, 206p.

- RAMADE F., 1984-** Eléments d'écologie -écologie fondamentale-. Edition Dunod, Paris, 397p.
- RAO P.S.C., WAGENET R.J., 1985 -** Spatial variability of pesticides in field soils: methods for data analysis and consequences. *Weed Science*, 33(S2), pp.18-24.
- RECHACHI M. Z., 2017-** Impact de la qualité des eaux d'irrigation sur la salinisation des sols en régions arides et semi arides : cas de la région des Ziban. Thèse de doctorat, université de Biskra, 379p.
- RICHARDS L. A., 1954-** Diagnosis and Improvement of saline and alkali soils. Agriculture Handbook N° 60. United states department of agriculture, Washington, U.S.A., 159p.
- ROUVILLOIS-BRIGOL M., 1975-** Le pays de Ouargla (Sahara algérien). Variations et organisation d'un espace rural en milieu désertique. Publications du département de géographie de l'université de la Sorbonne, Paris, 389p.
- SADINE S., BISSATI S., 2014-** La faune scorpionique des palmeraies algériennes. 1er congrès international sur le milieu aride« Ressources, Biodiversité, Environnement ». 09-11 décembre 2014, Ghardaïa. Algérie.
- SAFAR T., 1983-** Pédologie et géochimie des milieux salés. Contribution à l'étude de la dynamique des sels dans une plaine alluviale irriguée et non drainée. Thèse de docteur ingénieur, E.N.S.A.I.A., Nancy, 200p.
- SAFARI Y., ESFANDIARPOUR-BOROUJENI I., KAMALI A., SALEHI M.H., BAGHERI-BODAGHABADI M., 2013-** Qualitative land suitability evaluation for main irrigated crops in the Shahrekord plain, Iran: A geostatistical approach compared with conventional method. *Pedosphere*, 23(6), pp.767-778.
- SAHLIN P. J., 2014-** Modélisation et interpolation spatiale 3D pour l'étude de l'écosystème pélagique marin. Mémoire de maîtrise en sciences géomatiques, université Laval, Quebec, Canada, 109p.

- SALDANA A., STEIN A., ZINCK J.A., 1998-** Spatial variability of soil properties at different scales within three terraces of the Henare River (Spain). *Catena*, 33, pp.139–153.
- SALIM S., TESSIER D., 1998-** Evolution des propriétés physiques et physico-chimiques de sols salés de la basse vallée de l’Euphrate (Syrie). *Etude et gestion des sols* 5(4), 1998, pp.277-288.
- SALLAM G. A., YOUSSEF T., EMBABY M. E., SHALTOT F., 2011-** Using Geographic information system to infollow the fertilizers pollution migration. *Handbook of research on hydroinformatics: technologies, theories and applications*. Information science reference. Hershey, New York, pp.456-477.
- SAUER T.J., MEEK D.W., 2003-** Spatial variation of plant available phosphorus in pastures with contrasting management. *Soil Science Society of America Journal*, 67, pp.826–836.
- SEPASKHAH A.R., AHMADI S.H., NIKBAKHT SHAHBAZI A.R., 2005-** Geostatistical analysis of sorptivity for a soil under tilled and no-tilled conditions. *Soil and Tillage Research*, 83, pp.237–245.
- SERVANT J.M., 1978 -** La salinité dans le sol et les eaux : caractérisation et problèmes d’irrigation drainage. *Bulletin B.R.G.M., Section N°2*, pp.123-142.
- SEVERINO G., SCARFATO M., TORALDO, G., 2016-** Mining geostatistics to quantify the spatial variability of certain soil flow properties. *Procedia Computer Science*, 98, pp.419-424.
- SHI Z., LI Y., WANG R.C., MAKESCHINE F., 2005-** Assessment of temporal and spatial variability of soil salinity in a coastal saline field. *Environmental Geology*, 48(2), pp.171-178.
- SILVA A.J., ALEXANDRE C., 2005-** Spatial variability of irrigated corn yield in relation to field topography and soil chemical characteristics. *Precision Agriculture*, 6, pp.453–466.

- SRIVASTAVA R.M., PARKER H.M., 1989-** Robust measures of spatial continuity. Proceedings of the third international geostatistics congress, 5-9 septembre, Avignon, France. Edition Springer, Dordrecht, pp.295-308.
- STEWART P., 1969-** Quotient pluviothermique et dégradation biosphérique. Quelques réflexions. Bulletin I.N.A. Alger, 24-25pp.
- SULLIVAN D.G., SHAW J.N., RICKMAN D., 2005-** IKONOS imagery to estimate surface soil property variability in two Alabama physiographies. Soil Science Society of America Journal, 69, pp.1789-1798.
- TESFAHUNEGN G. B., TAMENE L., VLEK P. L. G., 2011-** Catchment scale spatial variability of soil properties and implications on site-specific soil management in northern Ethiopia, Soil and tillage research, 117, pp.124–139.
- TIMLELT F., 2007-** Valorisation des données pédologiques en Algérie. Mémoire de magister, I.N.A., Alger, 131p.
- TOLA E., AL-GAADI K.A., MADUGUNDU R., ZEYADA A.M., KAYAD A.G., BIRADAR, C.M., 2017-** Characterization of spatial variability of soil physicochemical properties and its impact on Rhodes grass productivity. Saudi journal of biological sciences, 24(2), pp.421-429.
- TOUTAIN G., 1979-** Eléments d'agronomie saharienne, de la recherche au développement. Edition I.N.R.A., Paris. 276p.
- TRANGMAR B.B., YOST R.S., UEHARA G., 1986-** Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. Advances in agronomy, 38, pp.45-94.
- TRAORE D, 1995 -** Suivi de l'irrigation d'une culture de blé dur sous pivot et étude de l'évolution de la salinité. Mémoire d'ingénieur d'Etat, I.N.F.A.S., Ouargla, 44p.
- U.S.D.A., 1999 -** Soil quality test kit guide. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Natural Resources Conservation Service, Soil Quality Institute, 82p.

- URBATIA, 1996**– Plan Directeur de l'Aménagement Urbain (PDAU) de la commune de Sebseb. Rapport d'orientation, Phase finale. Bureau d'Etudes pour l'urbanisme et le bâtiment URBATIA, agence de Ghardaïa. 75p.
- USOWICZ B., LIPIEC J., 2017** - Spatial variability of soil properties and cereal yield in a cultivated field on sandy soil, *Soil and tillage research*, 174, pp.241-250.
- VAUCLIN M., 1982**- Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol. Colloque S.H.F.- I.N.R.A., Avignon, pp.9-45.
- WALTER C. 2002**- Analyse spatiale des sols en vue de leur gestion précise et de leur surveillance. Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université Henri Poincaré, Nancy I. ENSA-INRA Rennes, 83p.
- WALTER C., MCBRATNEY A. B., DOUAOUI A.E.K., MINASNY B., 2001**- Spatial prediction of topsoil salinity in the Chelif Valley, Algeria, using local ordinary kriging with local variograms versus whole-area variogram. *Australian journal of soil research* 39, pp.259–272.
- WANG Y., LI Y., XIAO D., 2008**- Catchment scale spatial variability of soil salt content in agricultural oasis, Northwest China. *Environmental geology*, 56(2), pp.439-446.
- WEBSTER R., CURRAN P. J., MUNDEN J. W., 1989**- Spatial correlation in reflected radiation from the ground and its implications for sampling and mapping by ground-based radiometry. *Remote sensing of environment*, 29, pp.67-78.
- WEBSTER R., OLIVER M., 2007**- *Geostatistics for Environmental Scientists. Statistics in practice. Second Edition*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, Royaume-Uni, 315p.
- WILCOX L. V., 1948**- *The Quality of water for irrigation use*. United States department of agriculture, Washington. Technical bulletin n° 962, 40p.
- YAN T., YAN Y., XINGBANG H., LI H., 2015**- Performance analysis of different kriging interpolation methods based on air quality index in Wuhan. Sixth international conference on intelligent control and information processing (ICICIP), Wuhan, China, 26-28 Novembre, pp.331-335.

- YOUCEF F., 2003-** Mise au point d'une étude climatique du Sahara septentrional algérien (Ouargla, Touggourt, Ghardaïa). Mémoire d'ingénieur d'Etat, université de Ouargla, 88p.
- ZANOLIN A., DE FOUQUET C., GRANIER J., RUELLE P., NICOULLAUD B., 2007-** Geostatistical simulation of the spatial variability of an irrigated maize farm plot. *Comptes rendus Geoscience*, 339(6), pp.430-440.
- ZERGOUN M., 1997 -** Contribution à l'amélioration de l'efficacité des installations type pivot en régions sahariennes. Mémoire d'ingénieur d'Etat, I.H.A.S., Ouargla
- ZHAO Y., PETH S., KRÜMMELBEIN J., HORN R., WANG Z., STEFFENS M., HOFFMANN C., PENG X., 2007-** Spatial variability of soil properties affected by grazing intensity in Inner Mongolia grassland. *Ecological modelling*, 205, pp.241-254.
- Zuo, X., Zhao, H., Zhao, X., Zhang, T., Guo, Y., Wang, S., Drake, S., 2008.** Spatial pattern and heterogeneity of soil properties in sand dunes under grazing and restoration in Horqin Sandy Land. Northern China. *Soil & tillage research*, 99, pp.202–212.
- جون راين، جورج إسطفان، عبد الرشيد، 2003 –** دليل مختبري لتحليل التربة والنبات. الإصدار الأول باللغة العربية. نشر بشكل مشترك من قبل المركز الدولي للبحوث الزراعية في المناطق الجافة (إيكاردا) والمؤسسة الوطنية للبحوث الزراعية. حلب، سوريا. 172 ص.
- Décret exécutif n°92-289 de 6 juillet 1992** fixant les conditions de cession et les modalités d'acquisition de terres sahariennes dans les périmètres de mise en valeur. *Journal officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire*, n°55 du 19 Juillet 1992, p.1237.
- Loi n° 83-18 du 13 août 1983** relative à l'accession à la propriété foncière agricole. *Journal officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire*, n°34 du 16 Août 1983, p.1373.

Variabilité spatiale de la qualité du sol dans les agrosystèmes du Sahara algérien

La productivité des sols sahariens dépend de la variabilité de ses propriétés à l'échelle du champ. Cette étude vise la détermination de la variabilité spatiale de la salinité, du pH et du calcaire total du sol par une approche géostatistique.

La présente étude a été réalisée au Sahara septentrional algérien, les échantillons ont été prélevés sur une profondeur de 0 à 25 cm et analysés pour la salinité du sol, le pH et le calcaire total.

Les eaux d'irrigation proviennent de deux nappes : miopliocène et albiène, leur qualité varie de mauvaise à excellente. Les sols sont non salés, d'un pH alcalin et modérément à fortement calcaire.

L'analyse couplée de la variance et du taux de variation annuelle des paramètres étudiés a montré une augmentation significative de la salinité dans les stations ERIAD et HOUTIA et une diminution non significative de la salinité du sol dans la station BENHAMOUDA ainsi qu'une diminution très hautement significative du pH et du calcaire total dans la station HOUTIA.

L'analyse géostatistique a révélé divers modèles et niveaux de distribution spatiale des propriétés étudiées. Les résultats ont montré une dépendance spatiale faible à modérée pour la salinité, modérée pour le pH et modérée à forte pour le calcaire total.

L'analyse variographique a montré que l'effet de pépite est très faible pour la salinité et le pH et varie de faible à élevé pour le calcaire total. La portée varie de 27,5 mètres pour la salinité à 103,59 mètres pour le calcaire total, confirmant ainsi la validité de l'échantillonnage adopté et permettant l'optimisation des plans d'échantillonnage futurs.

Les résultats de la validation croisée ont abouti à la sélection des modèles de variogrammes les plus fiables à savoir, le circulaire, le gaussien et l'exponentiel, qui ont servi à la réalisation des cartes de variabilité spatiale par krigeage ordinaire.

Collectivement, les résultats indiquent que l'intensification agricole en zones arides a influencé quantitativement et qualitativement la teneur et la variabilité spatiale des propriétés du sol, résultat qui doit être pris en considération pour une gestion intégrée et durable des terres dans des régions similaires.

Mots clés : Sahara, géostatistiques, salinité, pH, calcaire total.

التباين المكاني لنوعية التربة في النظم الزراعية في الصحراء الجزائرية

تعتمد إنتاجية التربة الصحراوية على التوزيع المكاني لخصائص التربة على مستوى الحقل. تهدف هذه الدراسة إلى تحديد التباين المكاني لملوحة التربة، ودرجة الحموضة ونسبة الكلس وفقاً لنهج جيواحصائي.

أجريت هذه الدراسة في الصحراء الشمالية الجزائرية، وتم جمع عينات التربة من عمق 0 إلى 25 سم وتحليلها لملوحة التربة، ودرجة الحموضة ونسبة الكلسية. مياه السقي مستقدمة من طبقتين جوفيتين: ميوبليوسين و ألبان، ونوعيتها تختلف من سيئة إلى ممتازة. التربة غير مالحة، قلوية، ومعتدلة إلى عالية الكلسية. أظهر التحليل المتقارن للتباين ومعدل التغير السنوي للخصائص المدروسة زيادة دالة في الملوحة في محطتي الرياض وحوثيه وانخفاض دال في ملوحة التربة في محطة بن حمودة، إضافة إلى انخفاض عالي الدلالة في الأسم الهيدروجيني والكلسية في محطة حوثيه.

كشفت التحليل الجيو إحصائي عن نماذج ومستويات مختلفة للتوزيع المكاني للخصائص المدروسة. وأظهرت النتائج اعتماد مكاني من منخفض إلى معتدل للملوحة، معتدل لدرجة الحموضة ومتوسط إلى مرتفع للكلسية.

بين التحليل الفارويغرافي أن التشنر منخفض جداً بالنسبة للملوحة ودرجة الحموضة ويختلف من منخفض إلى مرتفع للكلسية. ويتراوح مدى التأثير من 27.5 متر للملوحة إلى 103.59 متر للكلسية، مما يؤكد صحة خطة أخذ العينات المعتمدة ويسمح بتحسين خطط أخذ العينات مستقبلاً.

أدت نتائج التحليل المتبادل إلى اختيار النماذج الأكثر موثوقية، وهي النماذج الدائرية، الجوسية والأسيية، والتي استخدمت لإنجاز خرائط التوزيع المكاني بواسطة الكريجينغ العادي.

تشير النتائج مجتمعة إلى أن التكثيف الزراعي في الأراضي الجافة قد أثر كميًا ونوعيًا على المحتوى والتغير المكاني لخصائص التربة، وهو أمر يلزم النظر فيه من أجل تسيير متكامل ومستدام للأراضي في مناطق مماثلة.

الكلمات الدالة : الصحراء، الجيو إحصاء، الملوحة، درجة الحموضة، الكلسية

Spatial variability of soil quality in agrosystems of the Algerian Sahara

Productivity of Saharan soils depends on the variability of these properties at field scale. This study aimed at determining the spatial variability of soil salinity, pH and soil calcareous by a geostatistical approach.

The present study was carried out in the Algerian northern Sahara, soil samples were collected from a depth of 0 to 25 cm and analyzed for soil salinity, pH and calcareous.

The irrigation water comes from two aquifers: Miopliocene and Albian, their quality varies from bad to excellent. Soils are non-saline, alkaline, and moderately to strongly calcareous.

The coupled analysis of variance and annual rate of variation of the studied parameters showed a significant increase of salinity in the ERIAD and HOUTIA stations and a non-significant decrease of soil salinity in BENHAMOUDA station as well as a very highly significant decrease in pH and calcareous containing in the HOUTIA station.

Geostatistical analysis revealed various models and levels of spatial distribution of studied properties. The results showed a low to moderate spatial dependence for salinity, moderate for pH and moderate to high for calcareous.

Variographic analysis showed that nugget effect is very low for salinity and pH and varies from low to high for calcareous. The range varies from 27.5 meters for salinity to 103.59 meters for calcareous, confirming the validity of the sampling adopted and allowing the optimization of future sampling plans.

Results of cross-validation led to the selection of the most reliable variograms models namely, circular, Gaussian and exponential, which were used for realization of spatial variability maps by ordinary kriging.

Collectively, the results indicate that agricultural intensification in dry lands has quantitatively and qualitatively influenced the content and spatial variability of soil properties, result that needs to be considered for integrated and durably land management in similar regions.

Key words: Sahara, geostatistics, salinity, pH, calcareous.