



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la Terre

قسم البيولوجيا

Département de Biologie



مخبر الرياضيات والعلوم التطبيقية

N° d'enregistrement

/...../...../...../.....

## THÈSE

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat 3<sup>ème</sup> cycle L.M.D.

Domaine: Sciences de la Nature et de la Vie

Filière: Sciences biologiques

Spécialité: Ecologie saharienne

**Caractérisation et cartographie des propriétés physico-chimiques des sols de la région de Ghardaïa (Cas de la palmeraie de ZELFANA) Algérie.**

Soutenue publiquement le : 22/02/2023

Par  
HAMEL Imane

Devant le jury composé de:

HADDAD Soumia	M.C.A	Univ. Ghardaïa	Président
BENSLAMA Mohamed	Pr	Univ. Annaba	Directeur de thèse
BENBRAHIM Fouzi	M.C.A	E. N. S. Ouargla	Co- directeur de thèse
KARABI Mokhtar	M.C.A	Univ. Ouargla	Examineur
OUCI Houria	M.C.A	Univ. Ghardaïa	Examineur

Année universitaire : 2022 /2023

## *Dédicace*

*À Ma très chère mère pour tout son amour et son dévouement,*

*À mon très cher père qui a toujours été là pour moi et qui m'a  
donné un magnifique modèle de labeur et de Persévérance,*

*À Mon époux, pour son aide, sa compréhension et son  
soutien permanent,*

*À Ma chère fille Ichrak,*

*À Mes chères sœurs et frère,*

*À Toute ma famille et ma belle-famille,*

*À Tous mes amis,*

*Je dédie ce travail*

*Imane*

## **Remerciements**

*Parce que personne n'arrive jamais seul*

*Avant tout, nous remercions DIEU tout puissant, maître des cieux et de terre, qui nous a permis de mener à bien ce travail.*

*Au terme de ce travail, il m'est agréable de remercier vivement tous ceux qui, grâce à leur aide précieuse, ont permis la réalisation de ce travail.*

*Je dois remercier particulièrement :*

*Madame **HADDAD Soumia**, Maître de conférences « A » à l'université de Ghardaïa, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.*

*Mon directeur de thèse, Monsieur **BENSLAMA Mohamed** Professeur à l'Université Badji Mokhtar -Annaba et Directeur du laboratoire de recherche « Sols et développement durable », pour avoir assuré la direction et le suivi de cette thèse, sa disponibilité ainsi que l'attention qu'il a porté à ce travail qui ont été un atout précieux dans l'achèvement de cette étude. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère gratitude.*

*J'adresse tout particulièrement mes vifs remerciements à Monsieur **BENBRAHIM Fouzi**, Maître de conférence « A » à l'université de Ghardaïa, en tant que Co-promoteur, pour m'avoir épaulée à bien mener cette étude. Sa disponibilité durant toutes les étapes de ce travail, ses remarques pertinentes et ses suggestions ont sans cesse permis à l'amélioration de la qualité de ce document.*

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux examinateurs, **Mr. KARABI Mokhtar**, Maître de conférences « A » à l'université de Ouargla, **Melle. OUCI Houria** Maître de conférences « A » à l'université de Ghardaïa., qui m'ont fait l'honneur en tant qu'examineurs de cette thèse.*

*Toute ma gratitude à l'équipe des laboratoires de la faculté des sciences de la nature et de la vie de l'université de Ghardaïa. Avec qui j'ai réalisé une partie de cette thèse, en particulier l'ensemble des techniciens du laboratoire, **Mr. BENHAMOUDA HICHAM**,*

*MOULAI OMAR ALI, MESITFA NOUREDDINE., MOULAY ABDALLAH BACHIR, BELKOUZ CHIKH, DJEBRIT IMANE.*

*Mes vifs remerciements s'adressent également à l'équipe de jeunes chercheurs de l'université de Ghardaïa, ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail, HEROUINI Amel., DAREM Sabrina., CHIKHI Faredj., BENSLAMA Abdelraouf., G'UESSOUM Hafssa., ROUIDJI Ishak., ZERGAT Abdelmoumen., BIAD Radia., ROUARI Linda et Abdelmalek., ARABA Fatna., BENOUDINA Hamida.*

*Je tiens également à remercier tous les enseignants du département de biologie de l'université de Ghardaïa, qui ont contribué de près ou de loin à ma formation durant mon cursus, je citerai Mr. SADINE S, Mr. KRIMAT M, Mr. KEMASSI A, Mr. GUERGUEB E, Mr. BOUNE B Ch, Mr. BENSEMMOUNE Y, Mr. BELGHIT S, Mr. ALIOUA Y, Melle OUCI H, Mme. BENSANIA W, Mme. KEBEB L, Mme. HAMAM S, Mme. OUDINA I ...ETC.*

*Mes vifs remerciements vont aussi au personnel de l'administration du département de Biologie en particulier Melle. BOUMEHRASE A, Mr. BENAMAR W.*

*Je remercie enfin tous les membres de ma famille qui m'ont toujours soutenu en toutes circonstances, et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de cette thèse, qu'ils trouvent ici, l'expression de mon extrême reconnaissance.*

*A tous ceux que j'ai cité ou je n'ai pas pu citer, toutes mes excuses, que Dieu vous bénisse et vous récompense, Amine !*

---

## Caractérisation et cartographie des propriétés physicochimiques des sols de la région de Ghardaïa (Cas de la palmeraie de ZELFANA) Algérie.

Les agrosystèmes oasiens jouent un rôle important dans le développement des zones arides. L'eau est le facteur limitant pour l'amélioration de ces zones. Cependant, si la mise en valeur sous irrigation contribue à l'augmentation de la production agricole, son extension est accompagnée de sérieuses menaces sur la préservation de l'environnement surtout la qualité des sols, qui est déjà fragilisées par des conditions climatiques extrêmes. A ce titre, la variabilité spatiale des propriétés des sols irrigués est un moyen pour connaître l'états de cette dernière. Cette étude vise la détermination de la variabilité spatiale du carbone organique, salinité,  $pH_{EAU}$ ,  $pH_{KCL}$ , calcaire total et actif du sol par une approche géostatistique. La présente étude a été réalisée dans la région de Zelfana (Ghardaïa) située au Sahara central algérien. Nous avons opté pour une méthode d'échantillonnage aléatoire, où nous avons réalisés 15 profils. L'étude édaphique a été faite sur trois profondeurs (0-30cm, 30-60cm, 60-120cm). Les principaux résultats obtenus montrent que les eaux d'irrigation provenant de la nappe albienne ont une qualité moyenne à médiocre (C3 S1). Les résultats granulométriques montrent que la zone d'étude est caractérisée par une texture à prédominance sableux à sableux-argileuse. Les résultats analytiques montrent que les sols étudiés sont généralement très pauvres en carbone organique ( $CO < 1\%$ ) dans les trois niveaux. Le sol est peu salé à très salé, les valeurs de la CE à 25°C se situent entre 0,64 à 3,87 dS/m avec un profil salin ascendant. Le sol est peu à fortement calcaire, avec des valeurs de calcaire total qui varie de 2,08 à 30,94%. Le sol est alcalin avec un pH variant de 8,25 à 8,31. Les résultats de la répartition spatiale des paramètres étudiées, montre une variation élevée à très élevée du carbone organique, modérée à très élevée pour le calcaire, et élevée à modérée pour la salinité. Par contre, la variabilité spatiale du  $pH_{EAU}$  et  $pH_{KCL}$  est faible. L'effet de pépite est très faible pour tous les paramètres étudiés. Les résultats de la validation croisée ont abouti à la sélection des modèles de variogrammes les plus fiables à savoir, le circulaire, le sphérique, le gaussien et l'exponentiel, qui ont servis à la réalisation des cartes de variabilité spatiale par krigeage ordinaire.

**Mots clés :** variabilité spatiale, géostatistiques, carbone organique, salinité, pH, calcaire, Zelfana, Algérie.

## توصيف ورسم الخرائط للخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة في بستان النخيل بمنطقة غرداية- حالة زلفانة.

تلعب أنظمة الواحة الزراعية دورًا مهمًا في تحسين و استصلاح المناطق الفاحلة، والمياه هي العامل الأساسي والمؤثر لتحسين هذه المناطق. ولكن إذا كان الاستصلاح عن طريق الري يساهم في زيادة الإنتاج الزراعي ، فإن الإكثار منه يكون مصحوبًا بآثار سلبية. و للحفاظ على البيئة وجودة التربة التي ضعفت بالفعل بسبب الظروف المناخية القاسية، فإن التباين المكاني لخصائص التربة المسقية هو الوسيلة الناجعة لمعرفة هذه التربة. تهدف هذه الدراسة إلى تحديد التباين المكاني للكربون العضوي ، والملوحة ، ودرجة الحموضة، ونسبة الكلسية للتربة من خلال نهج جيو إحصائي. لقد أجريت هذه الدراسة في منطقة زلفانة (غرداية) الواقعة وسط الصحراء الجزائرية. واخترنا طريقة أخذ العينات عشوائيا، حيث جمعنا عينات التربة من 15 مقطع طولي. أجريت الدراسة على ثلاثة أعماق (30 – 0 سم ، 30 - 60 سم ، 60 - 120 سم). أظهرت النتائج الرئيسية التي تم الحصول عليها أن مياه الري من الخزان الجوفي ألبان ذات جودة متوسطة إلى رديئة. (C3 S1) ، بينما أظهرت نتائج حجم حبيبات التربة أن المنطقة المدروسة أغلبها من الرمال إلى القوام الرمل الطيني. كما أوضحت النتائج التحليلية أن التربة المدروسة فقيرة جدًا بشكل عام في الكربون العضوي (<1%) في المستويات الثلاثة. كما أن التربة تكون مالحة قليلاً إلى شديدة الملوحة، حيث تتراوح قيم الناقلية الكهربائية عند درجة الحرارة (25°C) من 0,64 إلى 3,87 dS/m ، وبالتالي فإن الملوحة تصاعديّة في المقطع الطولي. تكون التربة كلسية بشكل طفيف إلى قوي ، وتتراوح قيم الكلس من 2.08 إلى 30.94%، التربة قلوية مع درجة حموضة تتراوح من 8.25 إلى 8.31. نتائج التوزيع المكاني تظهر تباينًا جَدَّ كبير في الكربون العضوي بالإضافة إلى ذلك ، تم تسجيل تباين متوسط إلى مرتفع للغاية بالنسبة للكلس ، ولوحظ تباين مكاني مرتفع إلى متوسط للملوحة. من ناحية أخرى، تُظهر درجة الحموضة تباينًا مكانيًا منخفضًا. بين التحليل الفاربيوغرافي أن التشنُّر ضعيف جدًا لجميع المُعلّمت المدروسة. أدت نتائج التحليل المتبادل إلى اختيار نماذج الفاربيوغرام الأكثر موثوقية ، وهي الدائرية، الكروية، الجوسية والأسية ، والتي تم استخدامها لإنتاج خرائط التوزيع المكاني بواسطة الكريجينغ العادي.

**الكلمات الدالة :** التباين المكاني، الجيو إحصاء، الكربون العضوي، الملوحة، درجة الحموضة، الكلسية، زلفانة، الجزائر.

## **Characterisation and cartography of the physico-chemical properties of soils in the region of Ghardaïa (ZELFANA palm grove) Algeria.**

Oasis agrosystems play an important role in the development of arid lands. Water is the limiting factor for the improvement of these areas. However, if development under irrigation contributes to the increase of agricultural production, its extension is accompanied by serious threats to the preservation of the environment, especially the quality of the soil, which is already weakened by extreme climatic conditions. In this topic, the spatial variability of the properties of irrigated soils is a means of knowing the state of the latter. This study aims to determine the spatial variability of organic carbon, salinity,  $\text{pH}_{\text{WATER}}$ ,  $\text{pH}_{\text{KCL}}$ , total and active limestone in the soil using a geostatistical approach. The present study was carried out in the region of Zelfana (Ghardaïa) located in the Algerian central Sahara. We opted for a random sampling method, where we carried out 15 profiles. The edaphic study was done on three depths (0-30 cm, 30-60 cm, 60-120 cm). The main results obtained show that the irrigation water coming from the Albian aquifer has a medium to poor quality (C3 S1). The granulometric results show that the study area is characterised by a predominantly sandy to sandy-clay texture. The analytical results show that the soils studied are generally very poor in organic carbon ( $\text{CO} < 1\%$ ) in all three levels. The soil is low to very saline, with EC values at 25°C ranging from 0.64 to 3.87 dS/m with an ascending saline profile. The soil is slightly to highly calcareous, with total limestone values ranging from 2.08 to 30.94% 15.62%. The soil is alkaline with a pH ranging from 8.25 to 8.31. The results of the spatial distribution of the studied parameters show a high to very high variation of organic carbon, moderate to very high for limestone, and high to moderate for salinity. On the other hand, the spatial variability of  $\text{pH}_{\text{WATER}}$  and  $\text{pH}_{\text{KCL}}$  is low. The nugget effect is very low for all parameters studied. The results of the cross-validation led to the selection of the most reliable variogram models, namely the circular, spherical, gaussian and exponential, which were used to produce the spatial variability maps by ordinary kriging.

**Keywords:** spatial variability, geostatistics, organic carbon, salinity, pH, limestone, Zelfana, Algeria.

## *Liste des figures*

N°	Titre	Page
<b>Figure 01</b>	Limites administratives de la wilaya de Ghardaïa	<b>07</b>
<b>Figure 02</b>	Carte de la situation géographique de la région d'étude (Zelfana)	<b>08</b>
<b>Figure 03</b>	Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN de la région de Ghardaïa (1998-2018).	<b>11</b>
<b>Figure 04</b>	Etage bioclimatique de Ghardaïa selon climagramme d'EMBERGER (1998-2018)	<b>12</b>
<b>Figure 05</b>	Carte géomorphologique de la wilaya de Ghardaïa	<b>14</b>
<b>Figure 06</b>	Carte géologique de la région de Ghardaïa	<b>15</b>
<b>Figure 07</b>	Carte de la limite du système aquifère SASS	<b>17</b>
<b>Figure 08</b>	Localisation du site d'étude	<b>21</b>
<b>Figure 09</b>	Position des échantillons du sol	<b>22</b>
<b>Figure 10</b>	Variogramme	<b>27</b>
<b>Figure 11</b>	Classification des eaux d'irrigation dans la région d'étude (Diagramme de RIVERSIDE)	<b>34</b>
<b>Figure 12</b>	Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation dans la région d'étude (Diagramme de WILCOX)	<b>35</b>
<b>Figure 13</b>	Diagramme de PIPER pour les eaux d'irrigation de la région d'étude	<b>36</b>
<b>Figure 14</b>	Diagramme textural des sols de Zelfana horizon 01	<b>39</b>
<b>Figure 15</b>	Diagramme textural des sols de Zelfana horizon 02	<b>40</b>
<b>Figure 16</b>	Diagramme textural des sols de Zelfana horizon 03	<b>41</b>
<b>Figure 17</b>	Profil carbone du P1	<b>43</b>
<b>Figure 18</b>	Profil carbone du P2	<b>43</b>
<b>Figure 19</b>	Profil carbone du P3	<b>44</b>
<b>Figure 20</b>	Profil carbone du P4	<b>44</b>
<b>Figure 21</b>	Profil carbone du P5	<b>45</b>
<b>Figure 22</b>	Profil carbone du P6	<b>45</b>
<b>Figure 23</b>	Profil carbone du P7	<b>46</b>
<b>Figure 24</b>	Profil carbone du P8	<b>46</b>
<b>Figure 25</b>	Profil carbone du P9	<b>47</b>
<b>Figure 26</b>	Profil carbone du P10	<b>47</b>
<b>Figure 27</b>	Profil carbone du P11	<b>48</b>

<b>Figure 28</b>	Profil carbone du P12	<b>48</b>
<b>Figure 29</b>	Profil carbone du P13	<b>49</b>
<b>Figure 30</b>	Profil carbone du P14	<b>49</b>
<b>Figure 31</b>	Profil carbone du P15	<b>50</b>
<b>Figure 32</b>	Variogrammes expérimentaux du carbone organique horizon 1. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien	<b>51</b>
<b>Figure 33</b>	Carte de variabilité spatiale du carbone organique horizon 1	<b>53</b>
<b>Figure 34</b>	Variogrammes expérimentaux du carbone organique horizon 2. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien	<b>54</b>
<b>Figure 35</b>	Carte de variabilité spatiale du carbone organique horizon 2	<b>56</b>
<b>Figure 36</b>	Variogrammes expérimentaux du carbone organique horizon 3. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien	<b>57</b>
<b>Figure 35</b>	Carte de variabilité spatiale du carbone organique horizon 3	<b>59</b>
<b>Figure 38</b>	Profil salin P1	<b>65</b>
<b>Figure 39</b>	Profil salin P2	<b>66</b>
<b>Figure 40</b>	Profil salin P3	<b>66</b>
<b>Figure 41</b>	Profil salin P4	<b>67</b>
<b>Figure 42</b>	Profil salin P5	<b>68</b>
<b>Figure 43</b>	Profil salin P6	<b>68</b>
<b>Figure 44</b>	Profil salin P7	<b>69</b>
<b>Figure 45</b>	Profil salin P8	<b>70</b>
<b>Figure 46</b>	Profil salin P9	<b>70</b>
<b>Figure 47</b>	Profil salin P10	<b>71</b>
<b>Figure 48</b>	Profil salin P11	<b>72</b>
<b>Figure 49</b>	Profil salin P12	<b>72</b>
<b>Figure 50</b>	Profil salin P13	<b>73</b>
<b>Figure 51</b>	Profil salin P14	<b>74</b>
<b>Figure 52</b>	Profil salin P15	<b>74</b>
<b>Figure 53</b>	Variogrammes expérimentaux de la salinité dans l'horizon 1. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien	<b>75</b>
<b>Figure 54</b>	Carte de variabilité spatiale de la salinité dans l'horizon 1	<b>77</b>
<b>Figure 55</b>	Variogrammes expérimentaux de la salinité dans l'horizon 2. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien	<b>78</b>
<b>Figure 56</b>	Carte de variabilité spatiale de la salinité dans l'horizon 2	<b>80</b>
<b>Figure 57</b>	Variogrammes expérimentaux de la salinité dans l'horizon 3. (a) circulaire, (b)	<b>81</b>

	sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien	
<b>Figure 58</b>	Carte de variabilité spatiale de la salinité dans l'horizon 3	<b>83</b>
<b>Figure 59</b>	Profil calcaire total et actif du P1	<b>89</b>
<b>Figure 60</b>	Profil calcaire total et actif du P2	<b>89</b>
<b>Figure 61</b>	Profil calcaire total et actif du P3	<b>90</b>
<b>Figure 62</b>	Profil calcaire total et actif du P4	<b>90</b>
<b>Figure 63</b>	Profil calcaire total et actif du P5	<b>91</b>
<b>Figure 64</b>	Profil calcaire total et actif du P6	<b>91</b>
<b>Figure 65</b>	Profil calcaire total et actif du P7	<b>92</b>
<b>Figure 66</b>	Profil calcaire total et actif du P8	<b>93</b>
<b>Figure 67</b>	Profil calcaire total et actif du P9	<b>93</b>
<b>Figure 68</b>	Profil calcaire total et actif du P10	<b>94</b>
<b>Figure 69</b>	Profil calcaire total et actif du P11	<b>94</b>
<b>Figure 70</b>	Profil calcaire total et actif du P12	<b>95</b>
<b>Figure 71</b>	Profil calcaire total et actif du P13	<b>95</b>
<b>Figure 72</b>	Profil calcaire total et actif du P14	<b>96</b>
<b>Figure 73</b>	Profil calcaire total et actif du P15	<b>96</b>
<b>Figure 74</b>	Variogrammes expérimentaux du calcaire total dans l'horizon 1. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien	<b>97</b>
<b>Figure 75</b>	Carte de variabilité spatiale du calcaire total dans l'horizon 1	<b>99</b>
<b>Figure 76</b>	Variogrammes expérimentaux du calcaire actif dans l'horizon 1. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien	<b>100</b>
<b>Figure 77</b>	Carte de variabilité spatiale du calcaire actif dans l'horizon 1	<b>102</b>
<b>Figure 78</b>	Variogrammes expérimentaux du calcaire total dans l'horizon 2. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien.	<b>103</b>
<b>Figure 79</b>	Carte de variabilité spatiale du calcaire total dans l'horizon 2	<b>105</b>
<b>Figure 80</b>	Variogrammes expérimentaux du calcaire actif dans l'horizon 2. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien	<b>106</b>
<b>Figure 81</b>	Carte de variabilité spatiale du calcaire actif dans l'horizon 2	<b>108</b>
<b>Figure 82</b>	Variogrammes expérimentaux du calcaire total dans l'horizon 3. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien	<b>109</b>
<b>Figure 83</b>	Carte de variabilité spatiale du calcaire total dans l'horizon 3	<b>111</b>
<b>Figure 84</b>	Variogrammes expérimentaux du calcaire actif dans l'horizon 3. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien.	<b>112</b>
<b>Figure 85</b>	Carte de variabilité spatiale du calcaire actif dans l'horizon 3	<b>114</b>

<b>Figure 86</b>	Profil pH et $pH_{KCL}$ du P1	<b>120</b>
<b>Figure 87</b>	Profil pH et $pH_{KCL}$ du P2	<b>121</b>
<b>Figure 88</b>	Profil pH et $pH_{KCL}$ du P3	<b>121</b>
<b>Figure 89</b>	Profil pH et $pH_{KCL}$ du P4	<b>122</b>
<b>Figure 90</b>	Profil pH et $pH_{KCL}$ du P5	<b>122</b>
<b>Figure 91</b>	Profil pH et $pH_{KCL}$ du P6	<b>123</b>
<b>Figure 92</b>	Profil pH et $pH_{KCL}$ du P7	<b>123</b>
<b>Figure 93</b>	Profil pH et $pH_{KCL}$ du P8	<b>124</b>
<b>Figure 94</b>	Profil pH et $pH_{KCL}$ du P9	<b>124</b>
<b>Figure 95</b>	Profil pH et $pH_{KCL}$ du P10	<b>125</b>
<b>Figure 96</b>	Profil pH et $pH_{KCL}$ du P11	<b>125</b>
<b>Figure 97</b>	Profil pH et $pH_{KCL}$ du P12	<b>126</b>
<b>Figure 98</b>	Profil pH et $pH_{KCL}$ du P13	<b>126</b>
<b>Figure 99</b>	Profil pH et $pH_{KCL}$ du P14	<b>127</b>
<b>Figure 100</b>	Profil pH et $pH_{KCL}$ du P15	<b>127</b>
<b>Figure 101</b>	Variogrammes expérimentaux du $pH_{eau}$ dans l'horizon 1. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien	<b>128</b>
<b>Figure 102</b>	Carte de variabilité spatiale du $pH_{EAU}$ dans l'horizon 1	<b>130</b>
<b>Figure 103</b>	Variogrammes expérimentaux du $pH_{KCL}$ dans l'horizon 1. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien	<b>131</b>
<b>Figure 104</b>	Carte de variabilité spatiale du $pH_{KCL}$ dans l'horizon 1	<b>133</b>
<b>Figure 105</b>	Variogrammes expérimentaux du $pH_{EAU}$ dans l'horizon 2. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien	<b>134</b>
<b>Figure 106</b>	Carte de variabilité spatiale du $pH_{EAU}$ dans l'horizon 2	<b>136</b>
<b>Figure 107</b>	Variogrammes expérimentaux du $pH_{KCL}$ dans l'horizon 2. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien	<b>137</b>
<b>Figure 108</b>	Carte de variabilité spatiale du $pH_{KCL}$ dans l'horizon 2	<b>139</b>
<b>Figure 109</b>	Variogrammes expérimentaux du $pH_{EAU}$ dans l'horizon 3. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien	<b>140</b>
<b>Figure 110</b>	Carte de variabilité spatiale du $pH_{EAU}$ dans l'horizon 3	<b>142</b>
<b>Figure 111</b>	Variogrammes expérimentaux du $pH_{KCL}$ dans l'horizon 3. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien	<b>143</b>
<b>Figure 112</b>	Carte de variabilité spatiale du $pH_{KCL}$ dans l'horizon 3	<b>145</b>

## *Liste des tableaux*

N°	Titre	Page
<b>Tableau 01</b>	Dairates et communes de la Wilaya de Ghardaïa	<b>06</b>
<b>Tableau 02</b>	Données météorologiques de la Wilaya de Ghardaïa (1998-2018)	<b>09</b>
<b>Tableau 03</b>	Classes d'intensité de la variabilité	<b>25</b>
<b>Tableau 04</b>	Classification des eaux selon la conductivité électrique à 25°C et le danger d'alcalinisation	<b>32</b>
<b>Tableau 05</b>	Statistiques descriptives des analyses de l'eau d'irrigation	<b>33</b>
<b>Tableau 06</b>	Statistique descriptive des différentes fractions granulométriques du sol	<b>38</b>
<b>Tableau 07</b>	Statistiques descriptives de C %	<b>42</b>
<b>Tableau 08</b>	Validation croisée des variogrammes du carbone organique horizon 1	<b>53</b>
<b>Tableau 09</b>	Validation croisée des variogrammes du carbone organique horizon 2	<b>56</b>
<b>Tableau 10</b>	Validation croisée des variogrammes du carbone organique horizon 3	<b>59</b>
<b>Tableau 11</b>	Paramètres des modèles de variogramme les mieux adaptés pour le carbone organique	<b>62</b>
<b>Tableau 12</b>	Statistiques descriptives de C.E. (dS/m)	<b>64</b>
<b>Tableau 13</b>	Validation croisée des variogrammes de la salinité dans l'horizon 1	<b>76</b>
<b>Tableau 14</b>	Validation croisée des variogrammes de la salinité dans l'horizon 2	<b>79</b>
<b>Tableau 15</b>	Validation croisée des variogrammes de la salinité dans l'horizon 3	<b>82</b>
<b>Tableau 16</b>	Paramètres des modèles de variogramme les mieux adaptés pour la salinité	<b>85</b>
<b>Tableau 17</b>	Statistiques descriptives du taux de calcaire total	<b>87</b>
<b>Tableau 18</b>	Statistiques descriptives du taux de calcaire actif	<b>88</b>
<b>Tableau 19</b>	Validation croisée des variogrammes du calcaire total dans l'horizon 1	<b>98</b>
<b>Tableau 20</b>	Validation croisée des variogrammes du calcaire actif dans l'horizon 1	<b>101</b>
<b>Tableau 21</b>	Validation croisée des variogrammes du calcaire total dans l'horizon 2	<b>104</b>
<b>Tableau 22</b>	Validation croisée des variogrammes du calcaire actif dans l'horizon 2	<b>107</b>
<b>Tableau 23</b>	Validation croisée des variogrammes du calcaire total dans l'horizon 3	<b>110</b>
<b>Tableau 24</b>	Validation croisée des variogrammes du calcaire actif dans l'horizon 3	<b>113</b>

---

<b>Tableau 25</b>	Paramètres des modèles de variogramme les mieux adaptés pour le calcaire total et actif	<b>117</b>
<b>Tableau 26</b>	Statistiques descriptives de $\text{pH}_{\text{EAU}}$	<b>119</b>
<b>Tableau 27</b>	Statistiques descriptives de $\text{pH}_{\text{KCL}}$	<b>120</b>
<b>Tableau 28</b>	Validation croisée des variogrammes du $\text{pH}_{\text{EAU}}$ dans l'horizon 1	<b>129</b>
<b>Tableau 29</b>	Validation croisée des variogrammes du $\text{pH}_{\text{KCL}}$ dans l'horizon 1	<b>132</b>
<b>Tableau 30</b>	Validation croisée des variogrammes du $\text{pH}_{\text{EAU}}$ dans l'horizon 2	<b>135</b>
<b>Tableau 31</b>	Validation croisée des variogrammes du $\text{pH}_{\text{KCL}}$ dans l'horizon 2	<b>138</b>
<b>Tableau 32</b>	Validation croisée des variogrammes du $\text{pH}_{\text{EAU}}$ dans l'horizon 3	<b>141</b>
<b>Tableau 33</b>	Validation croisée des variogrammes du $\text{pH}_{\text{KCL}}$ dans l'horizon 3	<b>144</b>
<b>Tableau 34</b>	Paramètres des modèles de variogramme les mieux adaptés pour le $\text{pH}_{\text{EAU}}$ et $\text{pH}_{\text{KCL}}$	<b>147</b>

---

# **TABLE DES MATIERES**

**Dédicace**

**Remerciements**

**ملخص**

**Résumé**

**Abstract**

**Liste des tableaux**

**Liste des figures**

Introduction générale..... 01

## ***PREMIERE PARTIE. MATERIEL ET METHODES D'ETUDE***

### ***Chapitre I. Présentation de la région d'étude***

1. Situation géographique de la willaya de Ghardaïa.....	06
2. Situation géographique et administrative de la commune de Zelfana.....	07
3. Synthèse climatique.....	08
3.1. Climat.....	08
3.2. Température.....	09
3.3. Précipitation.....	09
3.4. Humidité relative.....	10
3.5. Evaporation.....	10
3.6. Insolation.....	10
3.7. Vent.....	10
4. Synthèse bioclimatique.....	10
4.1. Diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN.....	10
4.2. Climagramme d'EMBERGER.....	11
5. Géomorphologie.....	13
5.1. Chabka .....	13
5.2. Hamada.....	13
6. Géologie.....	14
7. Hydrogéologie.....	15
7.1. Système aquifère de Sahara septentrional (SASS).....	15
7.2. Nappe du continental intercalaire (CI).....	16
7.3. Nappe du complexe terminal (CT).....	16
7.4. Nappe phréatique.....	16

8. Pédologie.....	17
9. Flore.....	18
10. Agriculture.....	18
11. Tourisme.....	19

## ***Chapitre II. Matériel et méthodes d'étude*** 20

1. Choix du site d'étude.....	20
2. Présentation du site d'étude.....	20
3. Echantillonnage.....	21
4. Analyses au laboratoire.....	22
4.1. Analyses du sol.....	22
4.1.1. Granulométrie.....	22
4.1.2. Carbone organique.....	23
4.1.3. Mesure de la conductivité électrique.....	23
4.1.4. Mesure du pH.....	23
4.1.5. Dosage du calcaire total (CaCO <sub>3</sub> ).....	23
4.1.6. Dosage du calcaire actif.....	23
4.2. Analyses d'eau.....	24
5. Analyses statistiques.....	24
5.1. Statistiques descriptives.....	24
5.2. Coefficient de variation.....	24
6. Modélisation géostatistique.....	25
6.1. Variogramme expérimental.....	26
6.2. Validation croisée.....	28
6.3. Krigeage.....	29
6.4. Réalisation des cartes thématiques.....	30

## ***DEUXIEME PARTIE. RESULTATS ET DISCUSSIONS***

### ***Chapitre III. Caractéristiques des eaux d'irrigation*** 31

1. Critères de classification des eaux d'irrigation.....	31
2. Caractérisation de l'eau d'irrigation.....	33
3.1. Diagramme de RIVERSIDE (1954).....	33
3.2. Diagramme de Wilcox.....	34
3.3. Faciès chimiques.....	36

## ***Chapitre IV. Etude de la variabilité spatiale et verticale de carbone organique du sol***

1. Granulométrie.....	37
2. Etude de carbone organique.....	41
2.1. Etude de la variation verticale du carbone organique.....	42
3. Modélisation géostatistique de la variabilité spatiale du carbone organique.....	51
3.1. Modélisation géostatistique du carbone organique horizon 1.....	51
3.1.1. Analyse variographique.....	51
3.1.2. Validation croisée.....	52
3.1.3. Cartographie par krigeage.....	52
3.2. Modélisation géostatistique du carbone organique horizon 2.....	53
3.2.1. Analyse variographique.....	53
3.2.2. Validation croisée.....	55
3.2.3. Cartographie par krigeage.....	55
3.3. Modélisation géostatistique du carbone organique horizon 3.....	56
3.3.1. Analyse variographique.....	56
3.3.2. Validation croisée.....	58
3.3.3. Cartographie par krigeage.....	58
4. Discussions.....	59

## ***Chapitre V. Etude de la variabilité spatiale et verticale de la salinité du sol***

1. Etude de la salinité.....	64
1.1. Etude de la variation verticale de la salinité.....	65
2. Modélisation géostatistique de la variabilité spatiale de la salinité du sol.....	75
2.1. Modélisation géostatistique de la salinité dans l'horizon 1.....	75
2.1.1. Analyse variographique.....	75
2.1.2. Validation croisée.....	76
2.1.3. Cartographie par krigeage.....	76
2.2. Modélisation géostatistique de la salinité dans l'horizon 2.....	77
2.2.1. Analyse variographique.....	77
2.2.2. Validation croisée.....	79
2.2.3. Cartographie par krigeage.....	79
2.3. Modélisation géostatistique de la salinité dans l'horizon 3.....	80
2.3.1. Analyse variographique.....	80
2.3.2. Validation croisée.....	82

2.3.3. Cartographie par krigeage.....	82
3. Discussions.....	83

### ***Chapitre VI. Etude de la variabilité spatiale et verticale du calcaire total et actif du sol***

1. Etude du taux de calcaire total et actif du sol.....	87
1.1. Etude de la variation verticale du calcaire total et actif.....	88
2. Modélisation géostatistique de la variabilité spatiale du calcaire total et actif.....	96
2. 1. Modélisation géostatistique de la variabilité du calcaire total dans l’horizon 1.....	97
2.1.1. Analyse variographique.....	97
2.1.2. Validation croisée.....	98
2.1.3. Cartographie par krigeage.....	98
2. 2. Modélisation géostatistique de la variabilité du calcaire actif dans l’horizon 1.....	99
2.2.1. Analyse variographique.....	99
2.2.2. Validation croisée.....	100
2.2.3. Cartographie par krigeage.....	101
2. 3. Modélisation géostatistique de la variabilité du calcaire total dans l’horizon 2.....	102
2.3.1. Analyse variographique.....	102
2.3.2. Validation croisée.....	104
2.3.3. Cartographie par krigeage.....	104
2. 4. Modélisation géostatistique de la variabilité du calcaire actif dans l’horizon 2.....	105
2.4.1. Analyse variographique.....	105
2.4.2. Validation croisée.....	106
2.4.3. Cartographie par krigeage.....	107
2. 5. Modélisation géostatistique de la variabilité du calcaire total dans l’horizon 3.....	108
2.5.1. Analyse variographique.....	108
2.5.2. Validation croisée.....	109
2.5.3. Cartographie par krigeage.....	110
2. 6. Modélisation géostatistique de la variabilité du calcaire actif dans l’horizon 3.....	111
2.6.1. Analyse variographique.....	111
2.6.2. Validation croisée.....	112
2.6.3. Cartographie par krigeage.....	113
3. Discussions.....	114

### ***Chapitre VII. Etude de la variabilité spatiale et verticale de la réaction du sol***

1. Etude de la réaction du sol.....	119
-------------------------------------	-----

1.1. Etude de la variation verticale du $pH_{EAU}$ et $pH_{KCl}$ .....	120
2. Modélisation géostatistique de la variabilité spatiale de la réaction du sol.....	127
2. 1. Modélisation géostatistique de la variabilité du $pH_{eau}$ dans l'horizon 1.....	128
2.1.1. Analyse variographique.....	128
2.1.2. Validation croisée.....	129
2.1.3. Cartographie par krigeage.....	129
2. 2. Modélisation géostatistique de la variabilité du $pH_{KCl}$ dans l'horizon 1.....	130
2.2.1. Analyse variographique.....	130
2.2.2. Validation croisée.....	132
2.2.3. Cartographie par krigeage.....	132
2. 3. Modélisation géostatistique de la variabilité du $pH_{eau}$ dans l'horizon 2.....	133
2.3.1. Analyse variographique.....	133
2.3.2. Validation croisée.....	135
2.3.3. Cartographie par krigeage.....	135
2. 4. Modélisation géostatistique de la variabilité du $pH_{KCl}$ dans l'horizon 2.....	136
2.4.1. Analyse variographique.....	136
2.4.2. Validation croisée.....	138
2.4.3. Cartographie par krigeage.....	138
2. 5. Modélisation géostatistique de la variabilité du $pH_{EAU}$ dans l'horizon 3.....	139
2.5.1. Analyse variographique.....	139
2.5.2. Validation croisée.....	141
2.5.3. Cartographie par krigeage.....	141
2.6. Modélisation géostatistique de la variabilité du $pH_{KCl}$ dans l'horizon 3.....	142
2.6.1. Analyse variographique.....	142
2.6.2. Validation croisée.....	144
2.6.3. Cartographie par krigeage.....	144
3. Discussion .....	145
Discussion générale .....	149
Conclusion .....	155
Références bibliographiques .....	158
Annexe .....	182

---

# *Introduction*

---

## ***Introduction générale***

Le sol est l'épiderme vivant de notre planète terre. A l'interface entre l'atmosphère, l'eau, les roches et le monde du vivant, il participe aux grands cycles d'énergie d'eaux et d'éléments. Il joue un rôle essentiel dans le fonctionnement des écosystèmes terrestres, c'est une ressource importante qu'il convient de protéger compte tenu de l'accélération de sa dégradation liée, souvent aux activités humaines, parce qu'il est non renouvelable. Sa préservation constitue ainsi un enjeu majeur du développement durable. Cette ressource vitale et complexe est menacée : contamination, érosion, baisse de la matière organique, salinisation, perte de biodiversité (GIRARD *et al.*, 2011 ; GOBAT *et al.*, 2010).

La qualité d'un sol qui est définie simplement comme étant sa capacité à fonctionner, Il est donc logique de considérer la qualité du sol comme une division essentielle de la qualité des écosystèmes, c'est la résultante des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol permettant la croissance et le développement des cultures. Ainsi elle 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.). 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 (GROS, 2002 ; ARSHAD ET COEN, 1992 ; LARSON et PIERCE, 1992).

Les zones arides sont des régions où les précipitations sont moindres que l'évapotranspiration au moins durant une période plus ou moins longue de l'année (Robert, 1996). Elles se trouvent à des stades de dégradation alarmants. Ils sont sujets à une désertification qui se caractérise, sur le plan pédologique par une baisse notable de la fertilité de sol sur de multiples plans : physique, chimique et biologique (OUSTANI, 2016).

Les sols arides sont l'un des ordres des sols les plus répandus au monde, et les plus caractérisés par leurs carences en eau. Ce sont essentiellement des sols minéraux dans le sens où, en dehors des oasis, la fraction organique y est très faible, souvent inférieure à 0,1 % (DAOUD et HALITIM, 1994). Sur les topographies élevées, les sols sont rocaillieux ou sableux (Hamadas, regs, ergs). Dans les dépressions, la texture peut être fine, mais les sols sont salés (Sebkha et Chotts). Les sols arides sont caractérisés par un lessivage significatif des nutriments et une érosion intensive des minéraux. (KARABI, 2017). De même, ces sols se caractérisent aussi par des propriétés pédologiques défavorables (faible stabilité structurale) qui accentuent les risques de dégradation des terres. Malgré leurs mauvaises qualités et leurs faibles rendements, ces sols sont de plus en plus cultivés en raison de la disponibilité de l'eau d'irrigation (VINAS & JOUKOVE, 1974 ; LARBI, 2014).

En Algérie, la zone aride présente près de 95% du territoire nationale dont 80% dans le domaine hyperaride (HALITIM, 1988). Dans ces régions arides, les sols, d'une manière générale, posent d'énormes problèmes de mise en valeur. Ils présentent souvent des croûtes calcaires ou gypseuses et sont dans la plupart du temps salés et sujets à l'érosion et à une salinisation secondaire (AUBERT, 1960).

Les sols des zones arides sont insuffisamment connus. En Algérie, le Sahara occupe 2.000.000 Km<sup>2</sup> sur une superficie totale de 2.376.391 Km<sup>2</sup>. Malgré la grandeur des surfaces sahariennes, les études pédologiques restent limitées. De nombreuses études ont été publiées sur les sols des zones arides d'Algérie (DURAND, 1954 ; AUBERT, 1960 ; DEKKICHE, 1974 ; HALITIM, 1988), cependant, ces études sont en générale descriptive, cette étape est intéressante mais reste insuffisante (TIR, 2007).

La gestion des sols en agriculture est reconnue comme l'une des questions prioritaires pour assurer la durabilité des systèmes de production. Cette question concerne non seulement la production et la qualité des produits, mais aussi la protection de l'environnement (DIALLO, et *al* ; 2015). Dans le Sahara, l'agriculture est la principale activité et un facteur de stabilisation de la population ; l'État a donc encouragé le développement du sud, en visant un développement harmonieux des régions concernées (BOUKHALFA, 2013). Les sols agricoles soumis à l'intensification, à l'érosion, au surpâturage et à une utilisation inadéquate des outils de travail subissent une dégradation importante qui affecte les paramètres physiques, chimiques et biologiques de la qualité du sol. Par conséquent, dans ces sols, il y a une diminution de la teneur principale en matière organique, ce qui affecte diverses propriétés fonctionnelles du sol (LOVELAND et WEBB, 2003).

Les fractions organiques des sols sont reconnues de longue date pour leur contribution à la fertilité chimique, physique et biologique des sols, elles sont localisées principalement dans les horizons de surface. Sur le plan chimique, les matières organiques sont majoritairement composées de carbone (GIRARD et *al.*, 2011 ; ANNABI, 2009). Le rôle majeur du carbone dans l'écosystème terrestre justifie que l'on s'intéresse à son évolution face à des changements progressifs ou brutaux des milieux naturels, en termes de gestion durable des ressources du sol. Parmi les diverses fonctions de la matière organique, elles assurent la cohésion des constituants des sols notamment la structure et sa stabilité. Ce faisant, elles favorisent l'aération et l'infiltration de l'eau, la résistance du sol au compactage et à l'érosion. Les matières organiques contribuent également à la rétention de l'eau et des éléments minéraux (JOLIVET, 2000). Le manque de bilan organique dans les sols des régions arides est accentué par le climat aride inadaptée à l'accumulation de matière organique, le peu qui s'accumule est rapidement minéralisé et par la prédominance du sable, qui caractérise principalement la partie minéralogique de ces sols (OUSTANI, 2016).

L'oasis est un agrosystème, mais un agrosystème dont les fondements ne sont pas agricoles car les conditions existantes sont parmi les plus hostiles à une agriculture. Malgré ça, l'oasis avec son plante mythique le palmier dattier, constitue un lieu de vie et un modèle de résilience et d'adaptation aux conditions d'aridité (MASMOUDI, 2012 ; ABDELHAFID *et al.*, 2019). Le palmier dattier était autrefois la base de la vie de la population des oasis. Elle constitue une source de nourriture, de revenus commerciaux, de matériaux pour l'artisanat, et est utilisée dans la lutte contre l'ensablement. Alors que ces oasis sont caractérisées par la fragilité de leur écosystème, menacé de rupture en raison d'innombrables facteurs : le vieillissement des palmeraies, le non-respect de la densité de plantation, l'exploitation abusive sans restitution notable ou assolement et les facteurs sociaux (DADDI BOUHOUN, 2010 ; BOUMARAF, 2013).

Dans les zones arides, l'eau est le facteur limitant du développement de l'agriculture. Dans ces zones, le recours à l'irrigation ou à la collecte des eaux de ruissellement est impératif pour combler le déficit hydrique et assurer une production satisfaisante (ZARAI *et al.*, 2021). L'utilisation intensive des ressources en eau des aquifères profonds (Continental Intercalaire et Complexe Terminal) a été nécessaire pour faire face à l'augmentation des besoins en eau pour les usages agricoles. Cependant, l'accroissement important des débits utilisés, associé à un usage mal raisonné des ressources hydriques, a conduit à des gaspillages générant des quantités importantes d'eaux excédentaires qui ont provoqué la remontée des nappes superficielles (IDDER *et al.*, 2014). Il est bien connu que la mise en valeur agricole sous irrigation dans les zones semi-arides, et arides conduit le plus souvent à la dégradation de la qualité des sols (BOUALLA *et al.*, 2012).

La salinité des sols est un problème mondial majeur en raison de son impact négatif sur la productivité et la durabilité agricoles. Les problèmes de salinité surviennent dans toutes les conditions climatiques et peuvent résulter à la fois d'actions naturelles et induites par l'homme. D'une manière générale, les sols salins se trouvent dans les régions arides et semi-arides où les précipitations sont insuffisantes pour répondre aux besoins en eau des cultures et lessivent les sels minéraux hors de la zone racinaire. L'association entre les humains et la salinité existe depuis des siècles et les archives historiques montrent que de nombreuses civilisations ont échoué en raison de l'augmentation de la salinité des champs agricoles (ZAMAN, 2018).

L'extension de l'agriculture en irriguée et l'utilisation intense des ressources en eau dans un pays soumis à un climat chaud et sec entraîne inévitablement l'apparition du problème de salinité des sols et des eaux. La qualité de l'eau peut certainement influencer la qualité du sol, nuire à la plupart des cultures, et conduire à des sols inutilisables. La rareté de l'eau et la salinité des eaux souterraines utilisées pour l'irrigation sont les principales contraintes pour la production agricole dans les zones arides et semi-

arides (ABDENNOUR, 2020). Dans les régions sèches ou l'eau d'irrigation est souvent minéralisée, les risques de salinisation secondaire sont plus importants (F.A.O, 1972 ; IDDER, 2006). En effet, l'usage d'une eau d'irrigation trop chargée en solutés combiné avec un drainage déficient est susceptible de produire un enrichissement en sel du sol qui peut devenir insupportable pour la culture et remettre en la production (GIRARD, 2011).

À l'échelle mondiale, la perte estimée des terres arables par la salinisation et l'alcalinisation des sols s'élève à environ 10 millions d'hectare chaque année (JALALI 2007). En Algérie, de l'est à l'ouest, et de la côte au Sahara les sols agricoles sont dans leur forte majorité, affectés par les sels ou susceptible de l'être (DURAND, 1958 ; HALITIM, 1973). Les sols sont dits salés lorsqu'ils contiennent des quantités excessives de sels solubles dans le sol (BAIZE, 2000). D'après HALITIM (1988), la salinisation est un processus pédogénétique fréquent dans les sols d'Algérie. Les sels les plus fréquents dans cette région sont les chlorures et les sulfates de sodium, les sulfates de magnésium et à moindre degré les carbonates de sodium.

En Algérie, les sols salés occupent de grandes étendues (HALITIM, 1985). Selon Le HOUEROU (1993), les sols salés occupent de vastes superficies (3.2 millions d'hectares de la superficie totale). Près de 10 à 15 % de terres irriguées, sont concernées par ces problèmes. Ainsi 67% des terres irriguées sont irriguées par des eaux souterraines (ZEKTSER & EVERETT, 2004 ; AOUIDANE, 2017).

Les quantités importantes des sels solubles dans les sols arides s'accumulent et présentent des croûtes calcaires ou gypseuses ou les deux à la fois. Cette dernière pose d'énormes problèmes de mise en valeur (TIR, 2007). Le carbonate de calcium, cristallisé sous forme de calcite à symétrie rhomboédrique est le constituant essentiel des calcaires. C'est une roche sédimentaire principalement biochimique qui peut être d'origine détritique. Dans le sol se trouvent sous trois formes principales : diffuses, en concentration discontinues (amas, nodules...) ou en concentrations continues (croûtes, dalles...) (DJILI *et al.*, 1999). Les sols calcaires sont très fréquents dans les régions méditerranéennes et désertiques, notamment en Algérie, où on les rencontre aussi bien dans les régions semi-arides et arides (HALITIM, 1988). La présence de calcaire dans le sol entraîne une élévation de pH, sachant que dans un milieu carbonaté, le pH de la solution du sol peut atteindre localement des valeurs élevées de l'ordre de 8 à 10 unités (JAILLARD, 1980).

D'après HUANG *et al.* (2001), pour l'évaluation des pratiques de gestion agricoles il est nécessaire de connaître la variabilité spatiale du sol et les relations entre les propriétés du sol. La caractérisation de la variabilité spatiale des propriétés du sol est essentielle pour parvenir à une meilleure compréhension des relations complexes entre ces propriétés et les facteurs environnementaux (GOOVAERTS, 1998). La variabilité est une des caractéristiques intrinsèques des propriétés du sol. Au

sein d'un écosystème, les propriétés du sol présentent de vastes variations spatiales qui découlent principalement de facteurs et de processus de pédogenèse et d'utilisation des terres (ERSAHIN, 2003). La géostatistique est un outil utile pour analyser la structure de la variabilité spatiale, interpoler entre les observations ponctuelles et créer la carte des valeurs interpolées (SARMADIAN, 2010).

La variabilité spatiale des sols reste pourtant généralement mal connue : une grande partie des sols du monde n'a encore fait l'objet d'aucune cartographie détaillée. De même, on constate souvent que les agriculteurs connaissent assez mal la diversité des sols de leurs parcelles, car ils ne l'appréhendent qu'au travers du comportement de l'horizon de surface cultivé (GIRARD, 2011).

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail, qui portera sur l'évaluation de la variabilité spatiale et verticale des propriétés du sol dans une oasis dans la région de Zelfana (Ghardaïa), en adoptant les techniques de la géostatistique.

Le présent travail tient à répondre aux objectifs suivants :

- Caractérisation physico-chimique de la qualité des sols et des eaux souterraines de la région d'étude.
- La description de la répartition spatiale et verticale des paramètres du sol, par le biais de la cartographie renforcée par une analyse géostatistique des données de la région d'étude.

La présente thèse comporte deux parties :

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

Et nous terminons par une conclusion générale.

---

*Première partie*

---

*Matériel et Méthodes  
d'étude*

---

## Chapitre I. Présentation de la région d'étude

La Wilaya de Ghardaïa issue du découpage administratif du territoire Conformément à la loi n° 84-09 du 4 février 1984. Elle occupe une superficie totale de : 84.660,12 Km<sup>2</sup>.

En application à la loi n° : 19 - 12 du 12/11/2019 qui modifie et complète la loi n° 84-09 du 04/02/1984 relative à l'organisation territoriale du pays ; Le nouveau découpage comprend 58 wilayas et 1 541 communes.

Comme le stipule l'article 52 bis 9 : la création de la nouvelle wilaya d'Al-Ménéa, issue de la wilaya mère Ghardaïa. La nouvelle wilaya est constituée de 03 communes (Al-Ménéa, Hassi-El-F'Hel, Hassi-El-Gara) Sa superficie totale est de : 58,494,69 Km<sup>2</sup> (D.P.S.B, 2020).

### Situation géographique de la wilaya de Ghardaïa

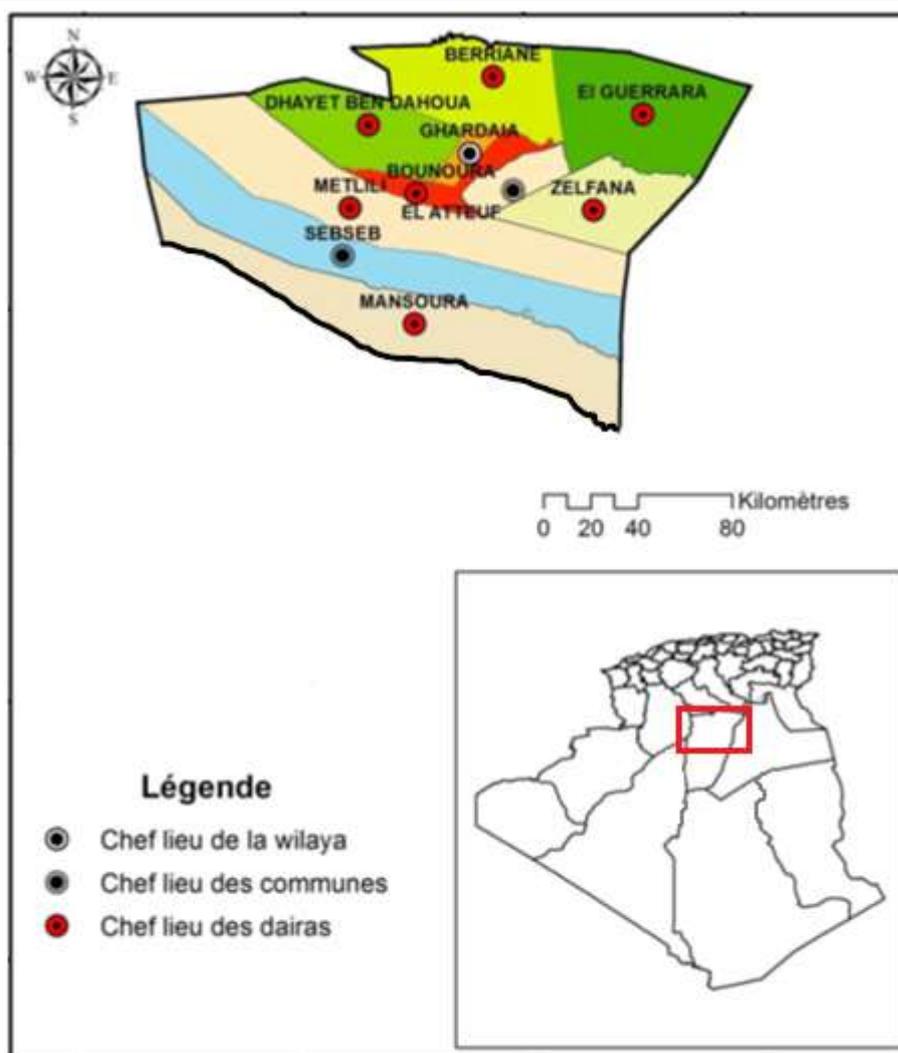
La wilaya de Ghardaïa se situe au centre de la partie nord du Sahara. Elle est issue du dernier découpage administratif du territoire de décembre 2019. Elle totalise une superficie de 26.165 Km<sup>2</sup> avec une population de plus de 409.660 habitants, est composée de 08 daïrates et 10 Communes (D.S.A, 2021).

La wilaya de Ghardaïa est limitée :

- Au Nord par la Wilaya de Laghouat (200Km)
- Au Nord Est par la Wilaya de Djelfa (300Km)
- A l'Est par la Wilaya d'Ouargla (200 Km)
- Au Sud par la Wilaya de Ménea (270Km)
- A l'Ouest par la Wilaya d'El-Bayadh (350Km)

**Tableau 01** : Daïrates et communes de la Wilaya de Ghardaïa (D.P.S.B, 2020).

<b>Daïrates</b>	<b>Nombre de communes</b>	<b>Communes</b>
<b>Ghardaïa</b>	01	Ghardaïa
<b>Metlili</b>	02	Metlili-Sebseb
<b>Berriane</b>	01	Berriane
<b>Guerrara</b>	01	Guerrara
<b>Bounoura</b>	02	Bounoura- El-Atteuf
<b>Daya</b>	01	Daya
<b>Zelfana</b>	01	Zelfana
<b>Mansoura</b>	01	Mansoura

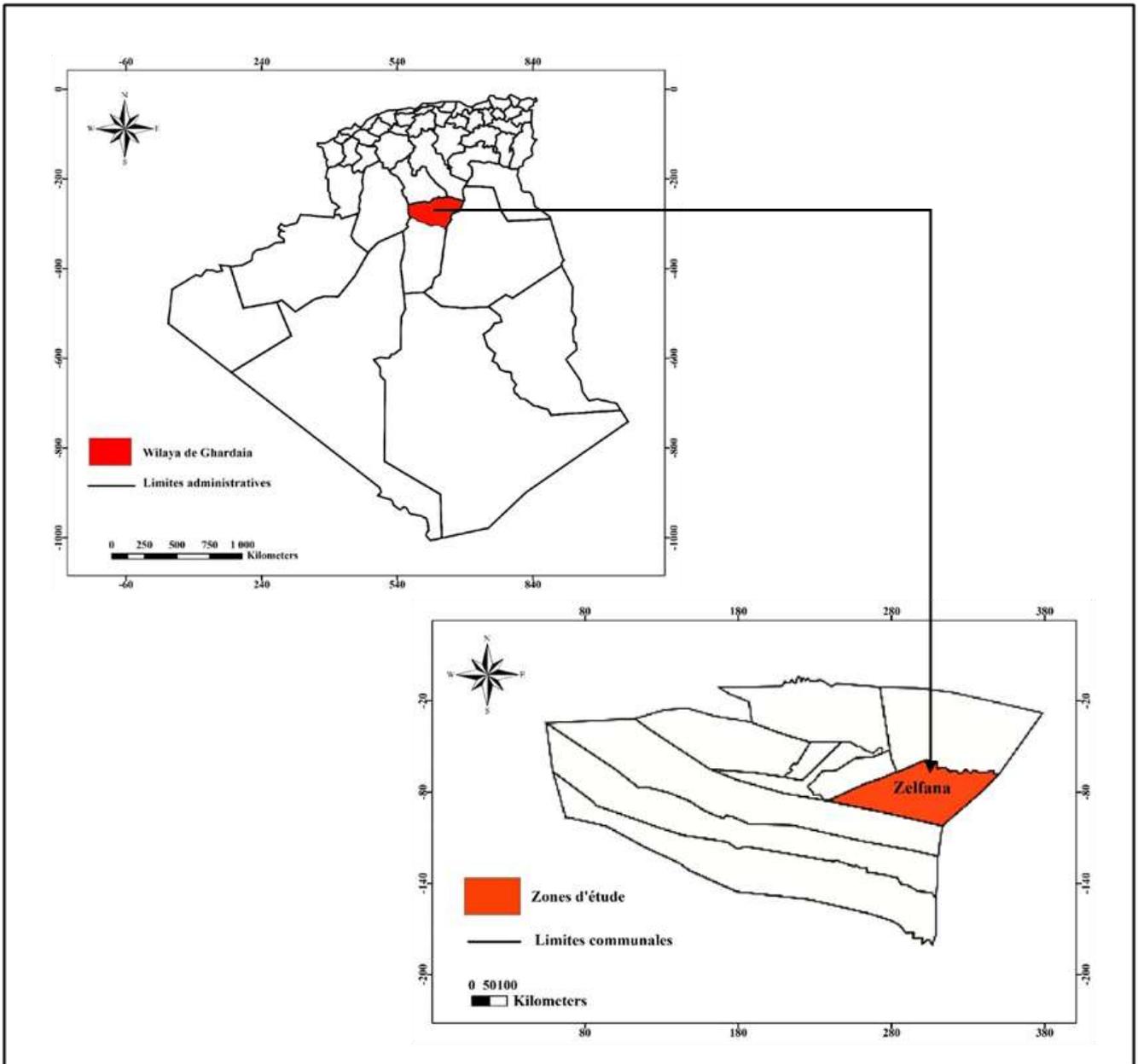


**Figure 01** : Limites administratives de la wilaya de Ghardaïa (KRAIMAT, 2019 ; modifiées)

### 1. Situation géographique et administrative de la commune de Zelfana

La région de Zelfana est située à 65 km au Nord de la wilaya de Ghardaïa et à 658 km au Sud d'Alger. Elle est à la latitude 32° 23' nord, 4° 13' Est et à une altitude de 355m. Elle couvre une superficie de 2220 km<sup>2</sup>. Elle est limitée :

- Au nord : Par la commune de Guerara
- Au sud : Par la commune de Metlili
- A l'ouest : Par la commune d'El Ateuf
- A l'est : Par la commune d'Ouargla (D.P.S.B, 2020).



**Figure 02 :** Carte de la situation géographique de la région d'étude (Zelfana) (HAMEL, 2022).

### 3. Synthèse climatique

#### 3.1. Climat

Les données climatiques sont fournies par la station météorologique de Ghardaïa. Nous avons pris en considération les moyennes mensuelles concernant une période s'étalant sur 20 ans (1998 à 2018), afin de mieux distinguer les variations climatiques de la région d'étude. D'après (YOUCEF, 2003), les données climatiques sont non seulement des éléments décisifs du milieu physique mais ont aussi des répercussions profondes sur les êtres vivants, animaux et végétaux.

Le climat de la région d'étude est typiquement saharien, se caractérise par deux saisons : une saison chaude et sèche (d'Avril à Septembre) et une autre tempérée (d'Octobre à Mars) et une grande différence entre les températures de l'Eté et de l'Hiver (A.N.R.H., 2012).

**Tableau 02** : Données météorologiques de la Wilaya de Ghardaïa (1998-2018) (O.N.M., 2019)

	Température (C°)			P	H	I	E	V.V
	Min	Max	Moy	(mm)	(%)	(h)	(mm)	(m/s)
<b>Janvier</b>	4.78	21.05	12,01	9.6	28.6	262	105	17.18
<b>Février</b>	5.93	23.02	13,87	8.6	25.4	256	128	19.29
<b>Mars</b>	9.22	28.29	18.24	7.3	21.5	293	183	19.68
<b>Avril</b>	13.15	33.67	31.73	6.1	26.1	310	263	21.36
<b>Mai</b>	17.80	37.69	28.31	2.7	36.6	338	313	22.27
<b>Juin</b>	23.08	42.58	32.93	2.5	43.6	355	370	22.15
<b>Juillet</b>	27.74	45.65	36.70	2.1	50.2	361	418	21.27
<b>Aout</b>	26.63	43.60	35.63	5.7	58.1	342	376	22.71
<b>Septembre</b>	21.70	38,79	30.88	16.6	53.3	282	281	21.03
<b>Octobre</b>	16.59	34.38	25.02	7.4	45.1	281	188	27.34
<b>Novembre</b>	8.93	26.96	17,54	5.5	38.3	262	127	17.27
<b>Décembre</b>	5.49	21.29	12,86	6.0	34.2	253	130	17.77
<b>Moyenne</b>	15.09	33.08	24.64	80.1*	38.4	3595*	2882*	20.78

**H** : Humidité relative

**T** : Température

**P** : Pluviométrie

**I** : Insolation

**V.V** : Vitesse de vent

**E** : Evaporation

**\*** : Cumulés annuelle

### 3.2. Température

La température moyenne annuelle est de 24,6 °C, avec, 36.70 °C en juillet pour le mois le plus chaud et 12.01 °C en Janvier pour le mois le plus froid (O.N.M., 2019).

### 3.3. Précipitation

Les précipitations sont très rares et irrégulières (irrégularité mensuelle et annuelle), leur répartition est marquée par une sécheresse presque absolue du mois de Mai jusqu'au mois de Juillet, et par un maximum de 16.6 mm au mois de Septembre. Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 80.1mm (O.N.M., 2019).

### 3.4. Humidité relative

L'humidité relative de l'air est très faible. Elle est de l'ordre de 21.5 % au mois de Mars, atteignant un maximum de 58.1 % en mois d'Aout et une moyenne annuelle de 38,4 % (O.N.M., 2019).

### 3.5. Evaporation

L'évaporation est très intense, surtout lorsqu'elle est renforcée par les vents chauds. Elle est de l'ordre de 2882 mm/an, avec un maximum mensuel de 418 mm au mois de Juillet et un minimum de 105 mm au mois de Janvier (O.N.M., 2019).

### 3.6. Insolation

L'ensoleillement est considérable à la région de Ghardaïa, car l'atmosphère présente une grande pureté durant toute l'année. La durée moyenne de l'insolation est de 299.6 heures/mois, avec un maximum de 361 heures au mois de Juillet et un minimum de 253 heures au mois de Décembre. La durée d'insolation moyenne annuelle entre 1998 et 2018 est de 3595 heures/an, soit approximativement 9.85 heures/jour (O.N.M., 2019).

### 3.7. Vent

Ils sont de deux types :

- Les vents de sables en Automne, Printemps et Hiver de direction Nord –Ouest.
- Les vents chauds (Sirocco) dominant en Eté, de direction Sud Nord ; sont très sec et entraînent une forte évapotranspiration, nécessitent des irrigations importantes (BENSAMOUNE, 2008). D'après les données de l'O.N.M. (2019) pour la période de 1998 - 2018, les vents sont fréquents sur toute l'année avec une moyenne annuelle de 20.78 m/s.

## 4. Synthèse bioclimatique

### 4.1. Diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN

Selon le tableau au-dessus (Tabl.02) qui se base sur l'enregistrement des données de précipitations et des données de températures mensuelles sur une période de 20 ans, on peut établir la courbe pluviométrique dont le but est de déterminer la période sèche.

Le diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN (1953) permet de suivre les variations saisonnières de la réserve hydrique. Il est représenté dans (Fig.03).

- ❖ Les mois de l'année sont représentés sur l'axe des abscisses.
- ❖ L'axe ordonné pour les précipitations en mm et les températures moyennes en °C.
- ❖ Une échelle de  $P=2T$ .
- ❖ L'aire comprise entre les deux courbes représente la période sèche. Dans la région de Ghardaïa nous remarquons que cette période s'étale sur toute l'année.

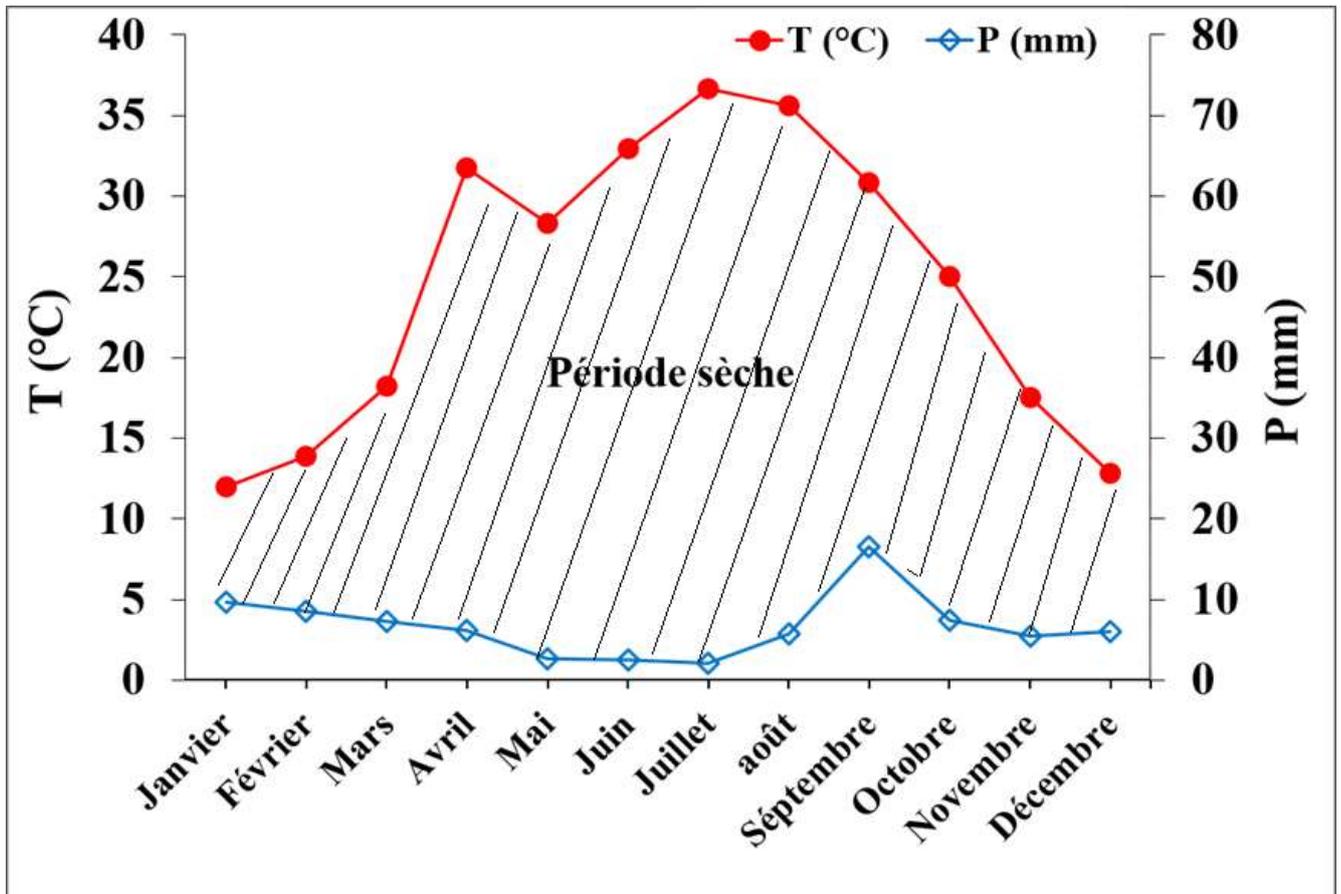


Figure 03 : Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN de la région de Ghardaïa (1998 - 2018).

#### 4.2. Climagramme d'EMBERGER

Il permet de connaître l'étage bioclimatique de la région d'étude. Il est représenté par :

- La moyenne des minimas du mois le plus froid est portée dans l'axe des abscisses.
- Le quotient pluviométrique (Q2) d'EMBERGER est représenté dans l'axe des ordonnées.

On a utilisé la formule de STEWART adapté pour l'Algérie, qui se calcule comme suit :

$$Q_2 = 3,43 \cdot \frac{P}{M - m}$$

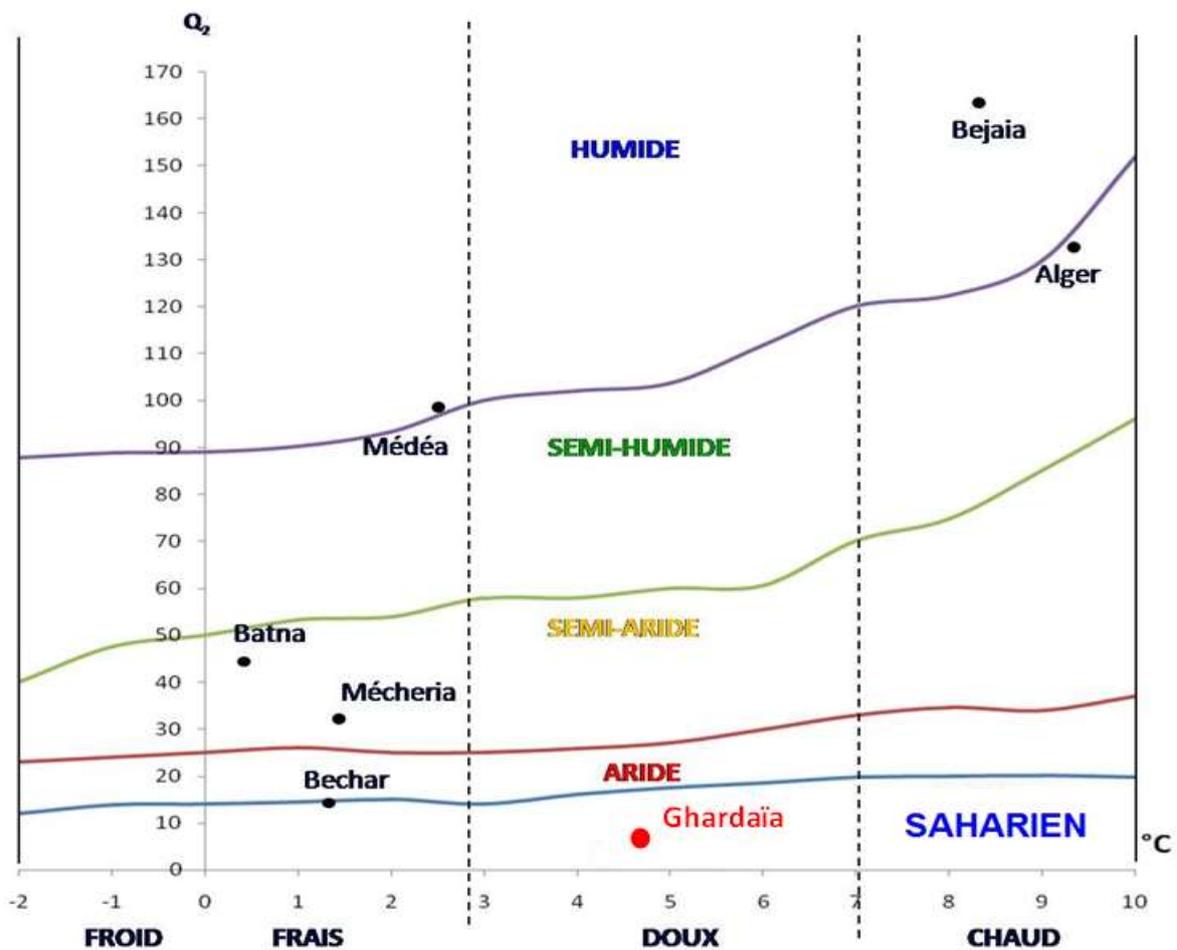
$Q_2$  : Quotient thermique d'EMBERGER

P : Précipitations moyennes annuelles en mm

M : La température maximale du mois le plus chaud en °C

m : La température minimale du mois le plus froid en °C

D'après la formule, la Wilaya de Ghardaïa se situe dans l'étage bioclimatique saharien à Hiver



doux et son quotient thermique ( $Q_2$ ) est de 6.72.

**Figure 04** : Etage bioclimatique de Ghardaïa selon climagramme d'EMBERGER (1998 – 2018).

## 5. Géomorphologie

Dans la région de Zelfana, on peut distinguer deux types de formations géomorphologiques (D.P.S.B., 2020).

- La Chabka ;
- La Hamada ;

### 5.1. Chabka

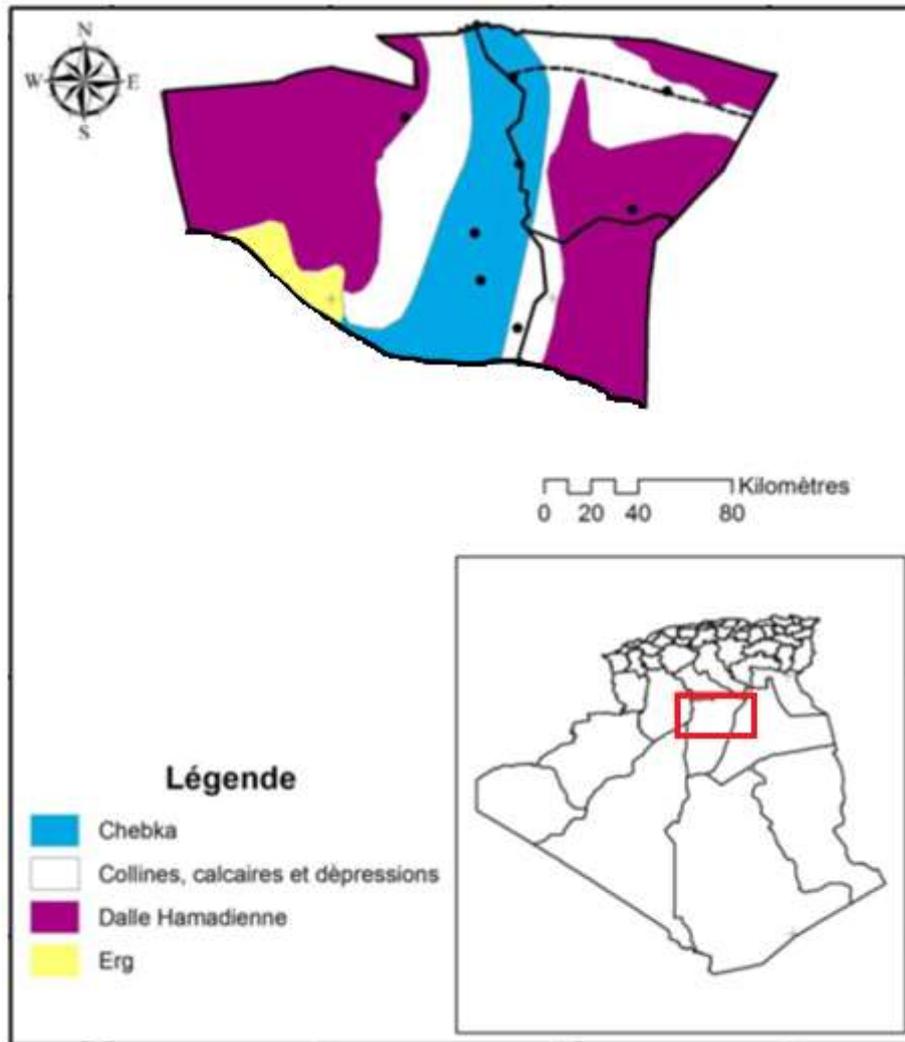
La Chabka est un plateau crétacé rocheux et découpé en tous les sens par de petites vallées irrégulières, qui semblent s'enchevêtrer les unes des autres. Ces vallées sont plus ou moins parallèles. Leur pente est dirigée vers l'Est (D.P.S.B. ,2020).

Dans la région de Ghardaïa Le plateau rocheux occupe une superficie d'environ 8000 Km<sup>2</sup>, représentant 21 % de la région du M'Zab (COYNE, 1989). Vers l'Ouest, il se lève d'une manière continue et se termine brusquement à la grande falaise d'El Loua, qui représente la coupe naturelle et oblique de ce bombement.

Mis à part, Zelfana et Guerrara, les neuf autres communes (Ghardaïa, Berriane, Daïa, Bounoura, El Ateuf, Metlili, Sebseb, Mansoura) sont situées en tout ou en partie sur ce plateau (A.N.R.H., 2013).

### 5.2. Hamada

La Hamada couvre la partie Est du territoire, le terrain est vaste à ondulations douces et amples et présente une légère pente vers l'Est, direction vers laquelle tendent toutes les vallées collectrices de la chebka, ici sans ramifications (HOUICHITI, 2009).



**Figure 05** : Carte géomorphologique de la wilaya de Ghardaïa (KRAIMAT, 2019 ; modifiées)

## 6. Géologie

Du point de vue géologique, la wilaya de Ghardaïa est située aux bordures occidentales du bassin sédimentaire secondaire du Sahara, sur un grand plateau subhorizontal de massifs calcaires d'âge Turonien appelé couramment "la dorsale du M'Zab" (A.N.R.H., 2009).

La région de Ghardaïa fait partie du bassin sédimentaire secondaire du Bas- Sahara. Dans l'aspect lithologique ces émergements sont de type (ANRH, 2016) :

- Argiles verdâtres et bariolées à l'Ouest et le Sud-Ouest attribués au Cénomaniens,
- Calcaires massifs durs ; blanc grisâtre au centre, attribués au Turonien,
- Calcaires marneux et argiles gypseuses à l'Est, attribués au Sénonien,
- Sables rougeâtre consolidés à Est et au Nord-Est attribués au Miopliocène,
- Alluvions quaternaires tapissant le fond des vallées des oueds.

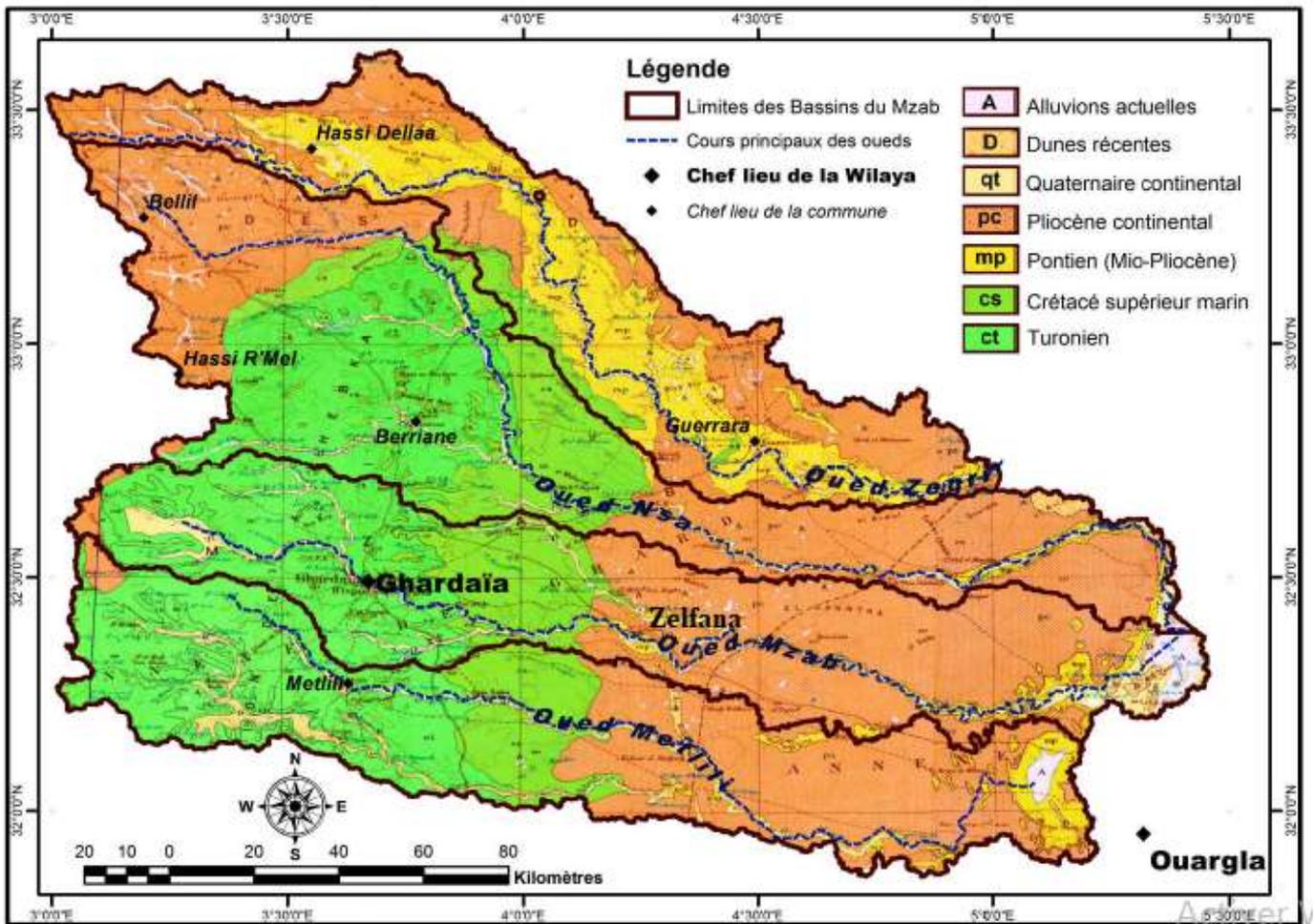


Figure 06 : Carte géologique de la région de Ghardaïa (BENSLAMA, 2021).

## 7. Hydrogéologie

Le bassin du Sahara septentrional est réputé par son immense aquifère, considéré parmi les plus grands réservoirs aquifères du monde. Depuis l'étude de SAVORNIN (1945) plusieurs auteurs ont contribué à la connaissance du fonctionnement hydraulique des nappes de ce grand bassin hydrogéologique (ACHOUR, 2014).

### 7.1. Système aquifère de Sahara septentrional (SASS)

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) s'étend sur une vaste zone dont les limites sont situées en Algérie, en Tunisie et en Lybie. Ce bassin renferme une série des couches aquifères qui ont été regroupées en deux réservoirs appelés : le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT).

Le domaine du SASS couvre une superficie d'environ 1 000 000 km<sup>2</sup> dont 70 % se trouve en Algérie, 24 % en Lybie et 6 % en Tunisie et s'étend du Nord au Sud, depuis l'Atlas Saharien jusqu'aux affleurements

de Tidikelt et du rebord méridional de Tihert et d'Ouest en Est depuis la vallée de Guire-Saoura jusqu'au graben d'Hun en Lybie (BENESSEDDIK, 2019).

### **7.2. Nappe du continental intercalaire (CI)**

Le continental intercalaire est défini comme l'aquifère le plus étendu du bassin, ses extensions déterminent également les limites qui ont été attribuées au domaine du SASS. Majoritairement, il comprend toutes les formations sablo-gréseuses et argilo-sableuses du Crétacé inférieur. Les épaisses séries argilo-évaporitiques du Cénomaniens constituent un toit imperméable de l'aquifère (ACHOUR, 2014).

### **7.3. Nappe du complexe terminal (CT)**

Le complexe terminal couvre une superficie de 665.000 km<sup>2</sup>, il regroupe plusieurs aquifères à formation géologiques différentes, d'âge Turonien, Sénonien, Eocène et Mio-pliocène. Interconnectés entre eux, l'ensemble forme un même système hydraulique. Ces limites d'affleurement sont :

- Au Nord, dans le sillon des chotts algéro-tunisiens.
- À l'Est, le long du flanc oriental du Dahar et du J. Nafusa en Tunisie.
- Au Sud, sur les plateaux de Tihert et de Tademaït.
- À l'Ouest, sur la dorsale du M'zab (calcaires du Turonien), considérée comme une zone d'alimentation du CT.

La nappe est jaillissante au centre du bassin et libre sur les bordures. Elle est alimentée essentiellement par infiltrations des pluies exceptionnelles dans les sables Mio-pliocènes, ainsi que par les fréquents ruissellements le long des oueds descendant de l'Atlas saharien au Nord, et de l'Ouest, par les écoulements des oueds de la chebka du M'zab. Avec une épaisseur moyenne de 342 mètres et une porosité efficace de 5%, les réserves du CT sont évaluées à environ de 11.000 x10<sup>9</sup> de m<sup>3</sup> (OULD BABASY, 2005). Etant la limite de la nappe du CT est située plus à l'Est de la région du M'zab, cette dernière n'est pas captée avec succès dans la région de Ghardaïa. De ce fait, nous n'abordons en détail que la nappe du CI (OULED SIDI AMOR, 2016).

### **7.4. Nappe phréatique**

D'une manière générale, les vallées des oueds de la région sont le siège de nappes phréatiques. L'eau captée par des puits traditionnels d'une vingtaine de mètres de profondeur en moyenne mais qui peuvent atteindre 50 m et plus, permet l'irrigation des cultures pérennes et en particulier des dattiers. L'alimentation et le comportement hydrogéologique sont liés étroitement à la pluviométrie.

La qualité chimique des eaux est comme suit :

- à l'amont, elle est bonne à la consommation. à l'aval, elle est mauvaise et impropre à la consommation, contaminée par les eaux urbaines (A.N.R.H., 2007).

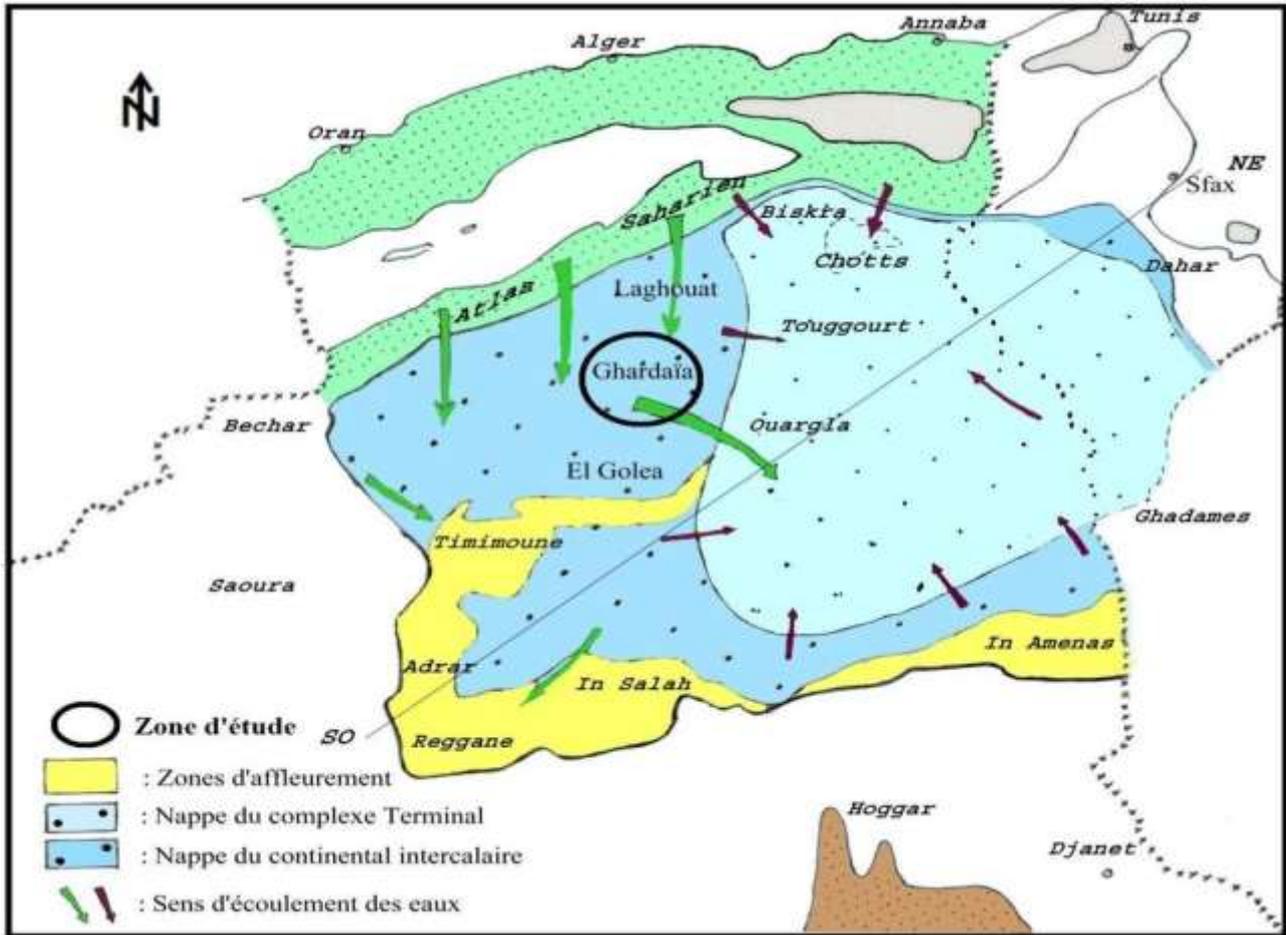


Figure 07 : Carte de la limite du système aquifère SASS (OULED SIDI AMOR,2016).

## 8. Pédologie

Dans le Sahara septentrional algérien, on trouve des sols dénudés par des mouvements éoliens violents laissant sur place des concentrations de matériaux grossiers d'ablation (reg) ou hamada.

Cet important agent morphogénétique qui est le vent, transporte les particules fines issues de l'altération mécanique des roches (fragmentation et ablation) pour former de vastes couvertures sableuses et des champs de dunes (erg) (BENSLAMA, 2021).

C'est le même processus qui se passe dans les sols des anciennes palmeraies de Zelfana qui sont des alluvions apportées par les crues de l'Oued M'Zab et mélangées avec les apports éoliens sévères. Ces sols sont peu à modérément calcaires, alcalins à fortement alcalins et présentent une faible teneur

en matière organique avec une couleur jaunâtre révèle la dominance d'un faciès gypseux et de plus ils sont le résultat des altérations géologiques du quaternaire et du mio-pliocène (BENSLAMA, 2021).

## 9. Flore

Au Sahara, la culture dominante est le palmier dattier ; l'Oasis est avant tout une palmeraie, entre ces palmiers dattiers on trouve les arbres fruitiers et les cultures maraîchères (OZENDA, 1983).

Ainsi on y rencontre des arbres de toutes espèces confondues sur les bandes vertes, les bosquets sont essentiellement comme brise vent dans les périmètres de mise en valeur ; parmi les espèces comptées on note *Casuarina equisetifolia*, *Schinus terebinthifolius*, *Eucalyptus globulus*, *Tamarix gallica* (dans les lits des oueds), *Pinus halepensis* et *Cupressus sempervirens* (BEN SEMAOUNE, 2008).

En dehors des palmeraies on peut rencontrer des peuplements floristiques constituant un cas particulier important dans cette zone subdésertique, citant *Aristida pungens*, *Retama retam*, *Calligonum comosum*., *Ephedra allata*., *Urginea noctiflora*, *Erodium glaucophyllum*, *Haloxylon scoparium*., *Astragalus gombo*, *Caparis spinosa*, *Zilla macroptera*, *Pistachia atlantica*, *Zyziphus lotus*, *Tamarix articulata*, *Populus euphratica* (OZENDA, 1983).

## 10. Agriculture

La superficie totale de la Wilaya s'étend sur 2.616.522 hectares et se répartit comme suit :

- Superficie Agricole Totale (SAT) : 724.612 ha
- Superficie Agricole Utile (SAU) : 23.946 ha - 100 % en irrigué
- Parcours : 700.541 ha.

L'activité agricole de la Wilaya de Ghardaïa est répartie en 02 secteurs :

- Un secteur traditionnel.
- Un secteur moderne regroupant :
  - La mise en valeur des terres (APFA + concession) : 20 681 ha (D.S.A, 2021)

La superficie totale de la commune de Zelfana s'étend sur 194623 hectares et se répartit comme suit (D.P.S.B,2020) :

- Superficie Agricole Utile (SAU) : 1310 ha
- Parcours : 9830 ha.

La région de de Zelfana est caractérisé par le système oasien de l'ancienne palmeraie qui est caractérisé par une forte densité de plantation, palmiers âgés, une irrigation traditionnelle par séguias et des exploitations mal structurées et fortement morcelées (0.5 à 1.5 ha) Ce système caractérisé par des cultures étagées de palmiers dattiers, arbres fruitiers, maraîchage et fourrages en intercalaire des activités d'élevages familiaux sont souvent pratiquées avec des cheptels de petites tailles (ROUAS & BENDANIA,2018).

## Chapitre II. Matériel et méthodes d'étude

L'étude de la couverture pédologique commence par le choix d'une zone d'étude, qui répond aux exigences des grands axes de thème de recherche, suivie par des travaux préliminaires déterminant le plan d'échantillonnage, en suite l'étude morphologique et analytique ainsi que la classification des sols, et enfin la réalisation d'esquisse d'une carte des sols (DJILI, 2004).

### 1. Choix de site d'étude

Nous avons sélectionné le site HASSI SUD situé à Zelfana (Fig.08) pour le déroulement de notre travail expérimental. Ce choix est fait pour les raisons suivantes :

- Le nombre d'années successives de mise en culture est de 62 ans, période relativement satisfaisante pour déduire l'effet de l'intensification agricole sur le sol.
- Utilisation de l'irrigation traditionnelle par submersion, ce qui permet de déduire l'impact de l'irrigation.

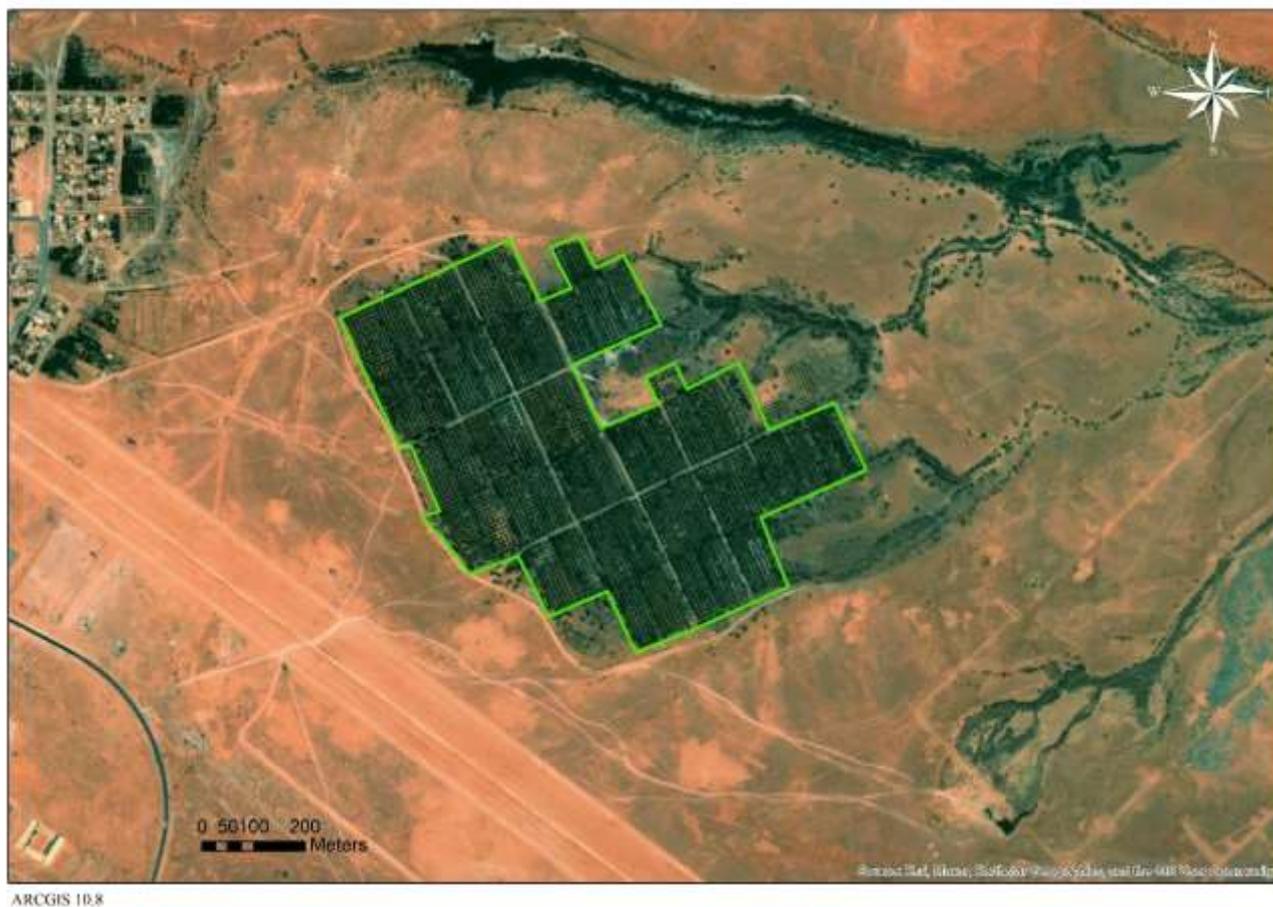
### 2. Présentation du site d'étude

Le terrain expérimental est situé dans une palmeraie (Hassi Sud) (32 2405,8000–32 24031,7900 de latitude nord ; 4 14037,40 ”–4 14041,70” de longitude est), Elle couvre une superficie totale de 42 ha. Elle a été créée en 1958 à la commune de zelfana à une distance d'environ 65 Km du chef-lieu de la wilaya de Ghardaïa. La commune s'étale sur une superficie de 2220 Km<sup>2</sup>.

Cette exploitation spécialisée en phoeniculture avec un effectif de 4230 pieds, comprenant trois variétés Deglat Nour, Degla-Beida et Ghars.

Les ressources hydriques au niveau du site proviennent d'un forage collectif. Les palmiers sont irrigués chaque 8 jours, la fertilisation est limitée au fumier organique.

La seule ressource en eau de la région de Zelfana est la nappe albienne, qui se caractérise par une salinité moyenne qui varie de 1,65 à 2,35 dS/m à 25°C avec une moyenne de 1,96±0,25 dS/m à 25°C. (OUALI et al., 2007).



**Figure 08 :** Localisation du site d'étude (HAMEL, 2022).

### 3. Echantillonnage

L'échantillonnage a été effectué dans la période d'mars à avril 2016. Nous avons adopté une méthode aléatoire stratifié, avec un nombre de 15 profils sur une profondeur de 0-120 cm divisés en trois horizons, de surface H1 (0-30cm), de sub-surface H2 (30-60cm) et l'horizon profond H3 (60-120cm) (fig. 09). Les prélèvements du sol ont été réalisés à l'aide d'une tractopelle. La zone échantillonnée a été irriguée pendant 62 ans.

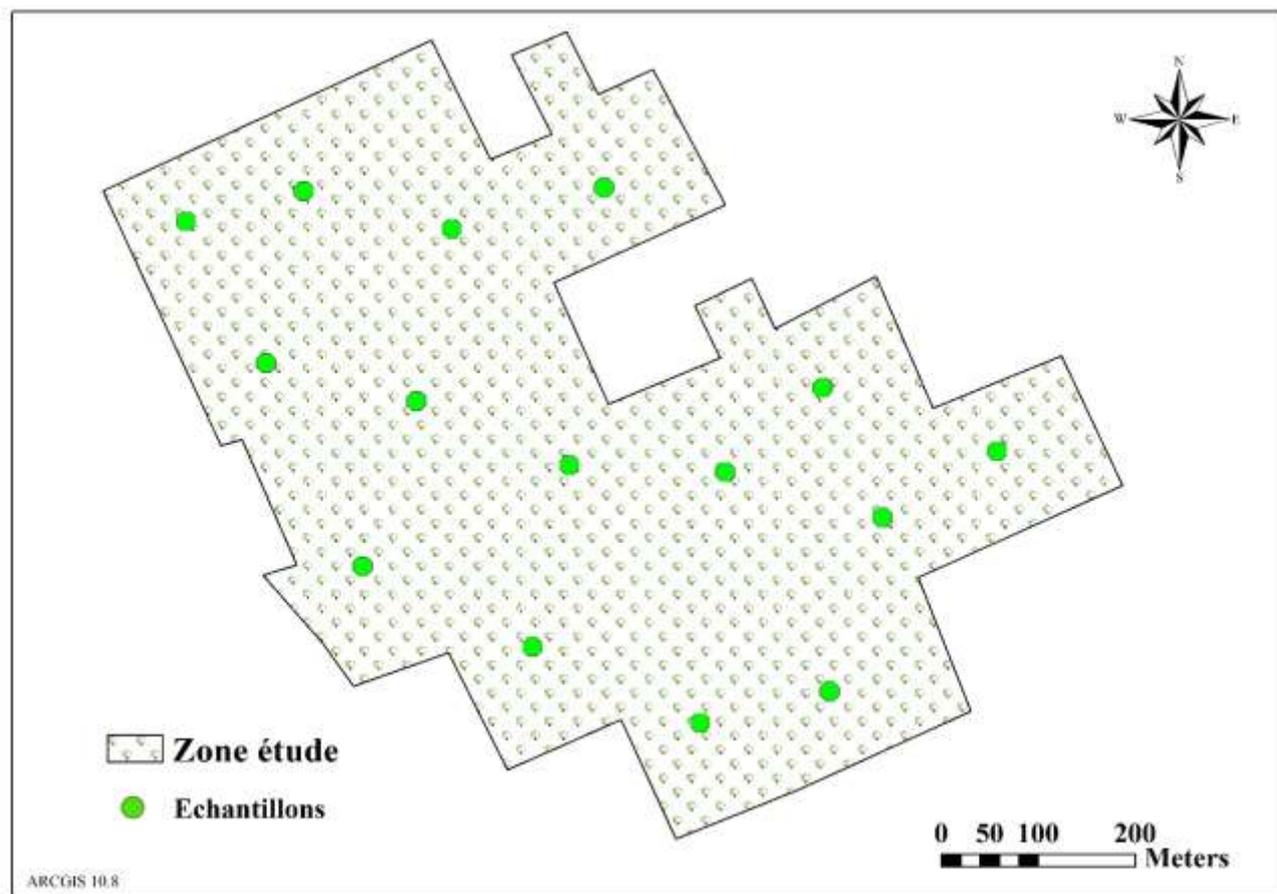


Figure 09 : position des échantillons du sol (HAMEL, 2022).

## 4. Analyses au laboratoire

### 4.1. Analyses du sol

Les échantillons de sol prélevés sont séchés à l'air libre dans un laboratoire bien aéré, tamisés à l'aide d'un tamis à mailles carrées de 2 mm. Les analyses du sol concernent, la granulométrie, le carbone organique, la salinité, le  $\text{pH}_{\text{EAU}}$ ,  $\text{pH}_{\text{KCL}}$ , le calcaire total et actif.

#### 4.1.1. Granulométrie

Plusieurs méthodes sont utilisées pour la détermination de la texture des sols. Dans notre cas on a suivi la méthode internationale à la pipette de Robinson, qui permet de connaître la répartition des particules minérales inférieures à (2mm), selon des classes de grosseurs, il s'agit de connaître ou de déduire la répartition des particules minérales d'un échantillon selon les différentes fractions granulométriques (BAIZE, 1988).

#### 4.1.2. Carbone organique

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

#### 4.1.3. Mesure de la conductivité électrique

La C.E (25°C) du sol a été mesurée par un conductimètre, l'extrait du sol d'un rapport : 1/5 de sol /eau (MATHIEU et PIELTAIN, 2009).

#### 4.1.4. Mesure du pH

- **pH<sub>EAU</sub>** : La mesure est effectuée à l'aide d'un pH mètre avec un rapport sol/eau (1/5) (MATHIEU et PIELTAIN, 2009).

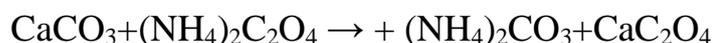
- **pH<sub>KCl</sub>** : Mesuré au pH mètre du rapport sol/solution KCl (1/5).

#### 4.1.5. Dosage du calcaire total (CaCO<sub>3</sub>)

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).

#### 4.1.6. Dosage du calcaire actif

Pour doser le calcaire actif, on a exploité la propriété de calcaire à se combiner aux oxalates pour précipiter sous forme d'oxalate de calcium. Alors le principe de dosage se résume comme suit :



L'oxalate précipité est déterminé par l'infiltration et l'oxalate en excès est dosé par manganimétrie.

Toutes les analyses ont été réalisées au laboratoire de Mathématique et Science Appliquée, Université de Ghardaïa.

## 4.2. Analyses d'eau

Les eaux des 04 forages sont prélevés et analysés au laboratoire. Les analyses d'eaux ont porté sur la conductivité électrique, le pH et le bilan ionique.

- Conductivité électrique (C.E.) à 25°C : Mesuré au conductimètre.
- pH : Mesuré au pH mètre à électrode en verre.
- Dosage des cations  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  : Par spectrophotométrie à absorption atomique.
- Dosage des cations  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  : Par spectrophotométrie à flamme.
- Dosage des chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) : Par la méthode argentométrique de MOHR, qui consiste a précipité les ions  $\text{Cl}^-$  sous forme de  $\text{AgCl}$  en présence de  $\text{AgNO}_3$ .
- Dosage des sulfates ( $\text{SO}_4^{--}$ ) : Par la méthode gravimétrique au  $\text{BaCl}_2$ , qui consiste a précipité les ions  $\text{SO}_4^{--}$  sous forme de sulfate de baryum en présence de  $\text{BaCl}_2$  à 10 %.
- Dosage des bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) : Par titrimétrie à  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Qui consiste a titré les bicarbonates en présence de méthylorange par l'acide sulfurique.

Les analyses sont réalisées au niveau de laboratoires de l'Algérienne des eaux de Ghardaïa (ADE).

## 5. Analyses statistiques

### 5.1. Statistiques descriptives

Cet outil d'analyse génère un rapport de statistique 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 concernant la moyenne, l'écart type, le minimum et le maximum.

### 5.2. Coefficient de variation

Le coefficient de variation représente le rapport de l'écart type à la moyenne, et 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 (NOLIN et al., 1997).

$$\text{CV (\%)} = 100.\sigma m$$

Cinq (5) classes, basées sur la valeur du CV, sont proposées par (NOLIN et al., 1997) pour qualifier l'intensité de la variabilité des sols (Tabl.03).

**Tableau 03** : 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

## 6. Modélisation géostatistique

MATHERON (1971), définit la géostatistique de la façon suivante : "la géostatistique est l'application du formalisme des fonctions aléatoires à la reconnaissance et à l'estimation des phénomènes naturels".

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).

La géostatistique se réfère aux méthodes d'analyse probabiliste pour étudier des phénomènes corrélés dans l'espace appelés phénomènes régionalisés. Techniquement, la géostatistique utilise également une combinaison linéaire des données observées, mais à la différence des méthodes classiques d'interpolation, elle tient compte à la fois de l'information relative à leur position et du caractère aléatoire du phénomène étudié. De plus, elle permet d'intégrer des informations auxiliaires dans l'estimation. Ces avantages font considérablement améliorer les estimations dans le contexte spatial (WILFRIED D,2006).

Daniel Kriege, géologue dans les mines d'or, proposa dans les années 60 une méthode statistique pour estimer la teneur d'un bloc de minerai à partir d'échantillons pris autour du bloc à exploiter. La théorie était formulée 10 ans plus tard par Georges Matheron qui introduisit un outil pour analyser la continuité spatiale des teneurs appelé " le variogramme " et une méthode d'estimation basée sur le variogramme appelée " le krigeage ".

## 6.1. Variogramme expérimental

Le variogramme est l'outil de base de la géostatistique. Il est indispensable à la mise en oeuvre et au choix du modèle d'interpolation par krigeage (BOUBAKER, 2011). C'est une forme simplifiée d'outils d'analyse exploratoire des données plus élaborés, tel le nuage variographique (GANDIN, 1963).

C'est un outil servant à décrire la continuité spatiale d'un phénomène. Il repose sur l'idée que deux observations séparées par une faible distance vont en moyenne se ressembler davantage que deux observations séparées par une plus grande distance (MESSAMEH, 2009)

Le variogramme est couramment utilisé pour analyser la dépendance des observations spatiales. Il permet de déterminer si la distribution du ou des paramètres étudiés est régionalisée (possède une structure spatiale), aléatoire ou périodique (PROVENCHER, 2003)

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 (linéaire, 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).

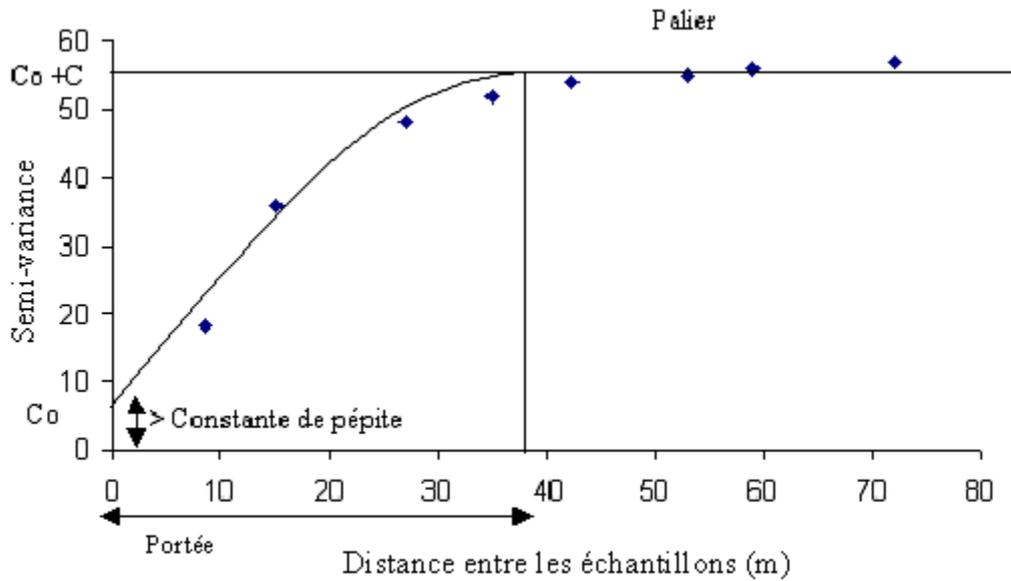
Le variogramme est défini de la manière suivante (GAETAN et GUYON, 2008) :

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

Où :

- $Z(\cdot)$  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 pépite (Fig. 10).



**Figure 10 :** Variogramme (PROVENCHER, 2003)

- Une portée : La distance à partir de laquelle deux observations ne se ressembleront plus en moyenne et qu'il n'y aura aucune corrélation qui les relie linéairement (covariance nulle).
- Palier  $C_0 + C$  : Cette partie du semivariogramme définit la variance moyenne de la variable aléatoire. Il est atteint généralement au niveau de la portée. Il correspond à la dissemblance maximale du modèle (la valeur de  $\gamma$  maximale).
- Effet de pépité  $C_0$  : Ceci représente la variation à très courte échelle et les erreurs lors de la prise de la mesure expérimentale. 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) (BEN SALAH, 2014 ; BENBRAHIM, 2018).

Le variogramme qui est l'outil généralement utilisé pour analyser la dépendance spatiale d'une propriété du sol, donne des informations sur la nature des processus spatiaux à l'origine d'un variable observé (WALTER, 2002 ; MATHIEU, 2009), le degré de dépendance spatiale 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). Selon BRADAI et *al.* (2016) : la dépendance spatiale peut être classée selon le % du rapport effet pépité / palier : un rapport  $< 25$  indique une forte dépendance spatiale, un rapport de 25-75% signifie une dépendance spatiale modérée, et un rapport  $> 75\%$  témoigne d'une dépendance spatiale faible.

Pour utiliser le variogramme en tant qu'interpolateur en krigeage, les quatre modèles standard (sphérique, exponentiel, gaussien et circulaire) ont été considérés pour ajuster les variogrammes des échantillons dans cette étude (BHADRA, 2012 ; BOUBAKER, 2011).

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 ; BENBRAHIM, 2018) :

- **Modèle circulaire** :  $\gamma(h) = c_0 + c \left( 1 - \left( \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{h}{a} \right) \right) + \frac{2h}{\pi a} \sqrt{1 - \left( \frac{h}{a} \right)^2} \right) \quad 0 < h \leq a$

$$\gamma(h) = c_0 + c \quad h > a$$

$$\gamma(h) = 0$$

- **Modèle sphérique** :  $\gamma(h) = c_0 + c \left( 1,5 \left( \frac{h}{a} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right) \quad 0 < h \leq a$

$$\gamma(h) = c_0 + c \quad h > a$$

$$\gamma(h) = 0$$

- **Modèle exponentiel** :  $\gamma(h) = c_0 + c \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{a} \right) \right) \quad h > 0$

$$\gamma(h) = 0$$

- **Modèle gaussien** :  $\gamma(h) = c_0 + c \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{a} \right)^2 \right) \quad h > 0$

$$\gamma(h) = 0$$

## 6.2. Validation croisée

D'après le rapport INERIS (2003), la validation croisée doit être réalisée avant d'entreprendre le krigeage. Elle fournit des critères statistiques de sélection dans le choix d'un modèle de variogramme (DESPAGNE, 2006).

Le critère de validation croisée mesure l'erreur d'un modèle en évaluant les performances prédictives de celui-ci. En effet, l'idée de la validation croisée est de ne pas utiliser l'ensemble des données pour construire le modèle. Certaines données sont retirées, un modèle est ajusté sous ces données réduites. L'écart entre les données retirées et leur prédiction par le modèle ajusté mesure la performance prédictive du modèle. Plus ce critère est petit et plus le modèle est efficace pour la prédiction (PIEUGUEU, 2016).

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 10.8. L'analyse et la détermination du meilleur modèle est réalisée par des calculs à l'Excel.

### 6.3. Krigeage

La théorie krigeage a été développée par un mathématicien français (G. Matheron) à partir des travaux de l'ingénieur minier sud-africain D. G. Krige. Dans les années 50, Krige a développé une série de méthodes statistiques empiriques afin de déterminer la distribution de minerais à partir d'un ensemble de forages (BOSSER,2012). Au cours des années 1980, on a utilisé le krigeage en cartographie numérique et en modélisation géométrique. À partir des années 1990, on a commencé à appliquer le krigeage dans divers domaines : pétrolier, environnemental et mécanique (BOURGEOIS, 2006). Le krigeage est une technique géostatistique de modélisation spatiale permettant, à partir de données dispersées, d'obtenir une représentation homogène des informations étudiées. L'idée de base du krigeage est de prévoir la valeur d'une variable régionalisée en un site non échantillonné par une combinaison linéaire des données ponctuelles adjacentes (HENNEQUI,2010).

L'avantage de cette méthode est qu'elle propose le meilleur estimateur linéaire au sens de la minimisation de la variance d'estimation. Les biais des échantillonnages préférentiels sont corrigés et les intervalles de confiance annoncés sont plus précis que ceux prédits par statistique classique (BERNARD-MICHEL,2006)

Le krigeage se caractérise par une interpolation non biaisée tout en conservant une variance minimale. Les poids des coefficients de krigeage dépendent de la localisation des observations et surtout de leurs structures de dépendance spatiale (BEN SALAH,2014).

Dix ans plus tard, Georges MATHERON développa un outil pour analyser la continuité spatiale des teneurs appelé le «variogramme» et une méthode d'estimation basée sur le variogramme appelé «Krigage» (MATHERON, 1976). Le krigeage repose fondamentalement sur la modélisation et l'estimation de la structure de dépendance spatiale. La description de cette dernière se fait couramment à l'aide d'outils statistiques tels que le variogramme (BOUALLA,2019).

Le krigeage est le plus approprié lorsque vous savez qu'il existe une distance corrélée dans l'espace ou un biais directionnel dans les données. Il est souvent utilisé dans les sciences du sol et la géologie (BENSLAMA,2021).

Il existe plusieurs types de Krigeage (KRESSE et DANKO, 2012), les plus connues 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).

#### **6.4. Réalisation des cartes thématiques**

La cartographie thématique fait partie de ce qu'on appelle plus généralement la représentation cartographique. Elle permet la réalisation d'images graphiques particulières qui traduisent les relations spatiales d'un ou plusieurs phénomènes, d'un ou plusieurs thèmes (ZANIN CHRISTINE 2006).

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 10.8.

---

*Deuxième partie*

---

*Résultats  
et  
Discussions*

---

### **Chapitre III. Caractéristiques des eaux d'irrigation**

En Algérie, les eaux d'irrigation sont plus ou moins chargées en sels solubles selon leur origine. La salinité des eaux des nappes phréatiques au Sahara est variable dans l'espace, elle se détériore du sud vers le nord à cause de changement dans la lithologie de l'aquifère (DAOUD et HALITIM ,1994). Ce sont des eaux riches en chlorure, en sodium et en sulfates. Il est à noter que les sels minéraux contenus dans l'eau ont un impact sur le sol et les plantes. En effet, les sels peuvent causer des changements dans la structure du sol (sur sa perméabilité et son aération), affectant directement le développement des plantes (PERSON, 1978 ; GOUAIDIA, 2012).

La seule ressource de l'eau dans la région de Zelfana est la nappe albienne, cette nappe est caractérisée par une salinité forte à très forte (DURAND,1958). La connaissance de la qualité des eaux d'irrigation est par conséquent indispensable avant toute mise en valeur des sols (BENBRAHIM, 2018).

#### **1. Critères de classification des eaux d'irrigation**

Les critères de la qualité d'une solution sont en général la conductivité électrique (CE) et le pourcentage de sodium adsorbé (SAR) (SERVANT, 1978) et le faciès chimique (SAFAR, 1983).

D'après l'U.S.S.L. (1954) et SERVANT (1978), La détermination de la qualité des eaux se base sur :

- La concentration totale en sels dissous ou résidu sec.
- La salinité de l'eau mesurée par la conductivité électrique à 25°C.
- La sodicité de l'eau exprimée par le S.A.R.
- La présence éventuelle de bore et d'autres éléments toxiques.
- Le faciès chimique des sels dominant, en générale les eaux du Sahara sont chlorurées.

**Tableau 04 :** Classification des eaux selon la conductivité électrique à 25°C et le danger d'alcalinisation (RICHARDS, 1954).

	<b>Salinité de l'eau</b>	<b>Danger d'alcalinisation du sol</b>
<b>C1</b>	CE < 0,25 dS/m : eaux non salines, utilisables pour l'irrigation de la plupart des cultures.	<b>S1</b> SAR de 0 à 10 : Eaux faiblement sodiques, utilisables pour l'irrigation de presque tous les sols avec peu de danger d'alcalinisation.
<b>C2</b>	0,25 < CE < 0,75 dS/m : eaux à salinité moyenne, utilisables avec un léger lessivage.	<b>S2</b> 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.
<b>C3</b>	0,75 < CE < 2,25 dS/m : eaux à forte salinité, inutilisables pour les sols à drainage restreint.	<b>S3</b> SAR de 18 à 26 : Eaux fortement sodiques, pouvant provoquer l'apparition d'une sodicité dangereuse dans la plupart des sols.
<b>C4</b>	2,25 < CE < 5 dS/m : eaux à très forte salinité, inutilisables normalement pour l'irrigation.	<b>S4</b> SAR > 30 : Eaux très fortement sodiques, le danger d'alcalinisation est très fort.

## 2. Caractérisation de l'eau d'irrigation

Les résultats d'analyses d'eau d'irrigation de la palmeraie de Zelfana sont représentés dans le tableau 05.

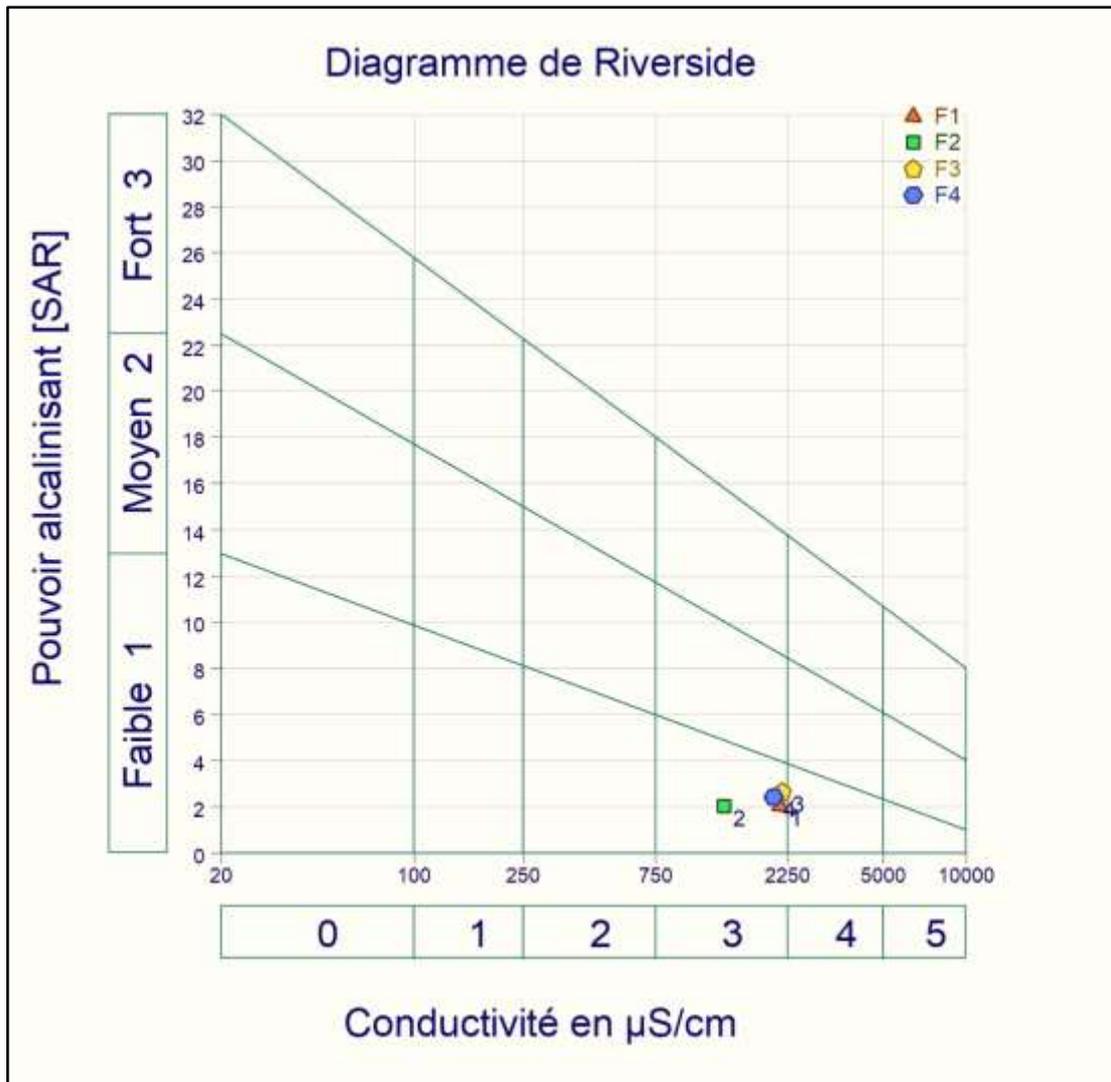
**Tableau 05** : Statistiques descriptives des analyses de l'eau d'irrigation.

	Moyenne	Max	Min	E-type	CV%	Médian
<b>pH</b>	7,6	7,9	7,3	0,31	4,1	7,6
<b>EC(<math>\mu</math>S/cm)</b>	1897	2150	1320	389	20,5	2058
<b>Salinité (mg/l)</b>	911	1191	980	305	33,4	971
<b>Na<sup>+</sup> (meq/l)</b>	6,1	6,5	5,67	0,4	6,1	6,2
<b>Ca<sup>2+</sup> (meq/l)</b>	9,1	12,5	6,41	2,7	29,4	8,8
<b>Mg<sup>2+</sup> (meq/l)</b>	5,6	7,5	4,6	1,3	22,5	5,2
<b>K<sup>+</sup> (meq/l)</b>	0,4	0,4	0,4	0,1	6,0	0,4
<b>Cl<sup>-</sup> (meq/l)</b>	10,4	12,9	8,6	1,8	17,2	10,1
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (meq/l)</b>	0,4	0,5	0,2	0,1	30,7	0,4
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (meq/l)</b>	2,9	3,0	1,9	0,5	18,6	2,5
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (meq/l)</b>	3,41	3,65	3,19	0,21	6,22	3,4
<b>SAR</b>	2,25	2,41	2,06	0,25	10,4	2,4

D'après les statistiques descriptives des analyses des eaux illustrées dans le tableau 05, l'eau d'irrigation présente un pH neutre à légèrement alcalin, une forte salinité avec une conductivité électrique de 1,90 dS/m à 25°C (appartenant à la classe de salinité C3) et un risque de sodicité (SAR) faible. La concentration moyenne mesurée des principaux cations et anions dans les échantillons est de l'ordre de grandeur : Ca<sup>2+</sup> > Na<sup>+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup> > HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

### 2.1 Diagramme de RIVERSIDE (1954)

Selon la classification de laboratoire de Riverside qui sert à évaluer la qualité de l'eau d'irrigation. Le diagramme de Riverside basé sur la conductivité électrique (EC) et le taux d'absorption du sodium (SAR), prend en compte l'équilibre entre ces deux variables, dont l'une influence l'autre. Le risque de sodicité dû au DAS est atténué en présence d'une forte salinité (RICHARDS, 1954).



**Figure 11 :** Classification des eaux d'irrigation dans la région d'étude (Diagramme de RIVERSIDE)

Après avoir reporté tous les points d'eau des eaux d'irrigations sur le diagramme de Riverside (Fig.11), réalisé par le logiciel DIAGRAMME 6.5, selon la conductivité électrique et la valeur de SAR, on a pu dégager la présence de la classe C3 : risque élevé salinité, S1 : risque faible alcalinité (Qualité moyenne à médiocre). Alors ce sont des eaux à utiliser avec précaution et nécessite un drainage avec doses de lessivage et/ou apports de gypse.

## 2.2. Diagramme de Wilcox

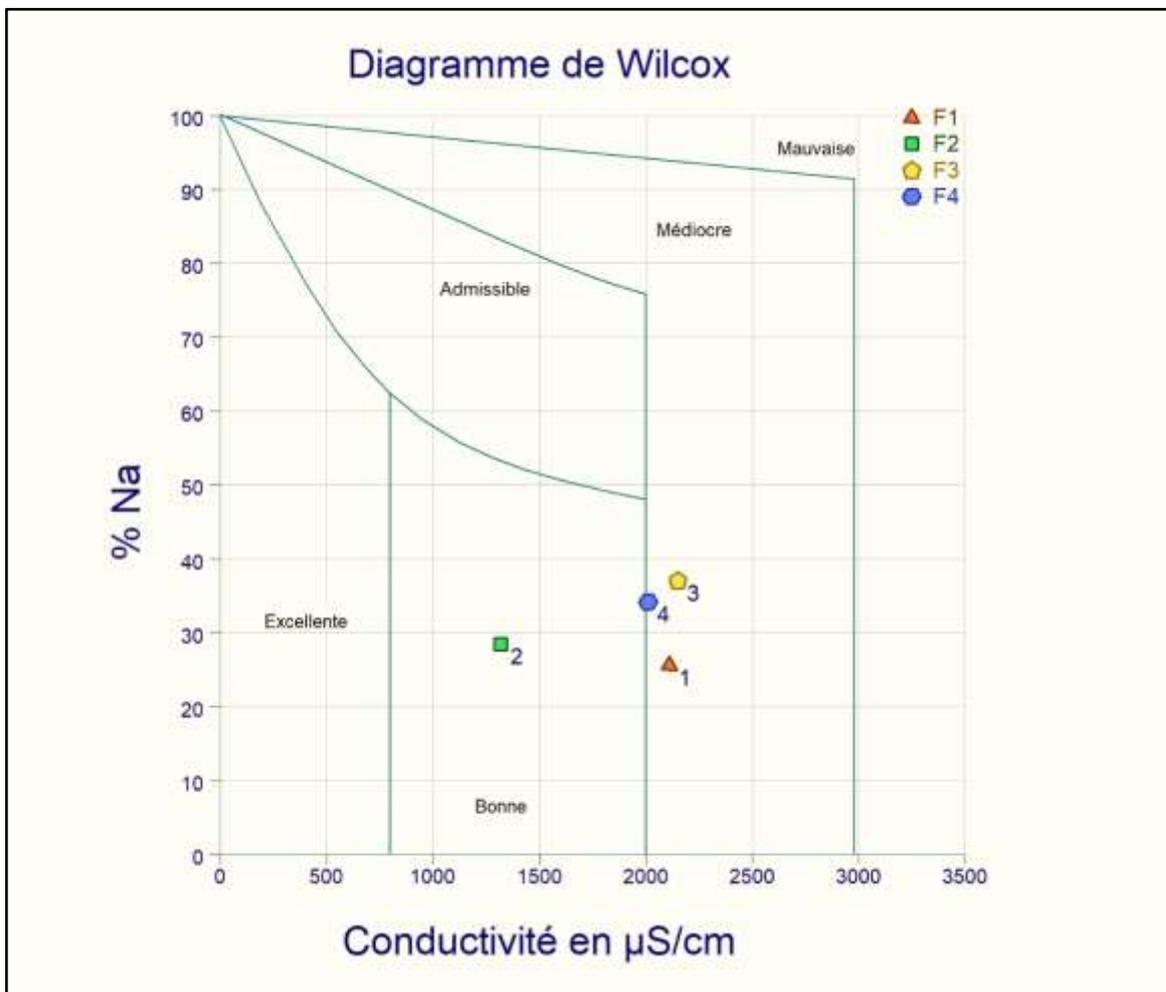
Les concentrations élevées de sodium dans une eau d'irrigation limitent souvent son utilisation en irrigation. Il est adsorbé dans des sites d'échange de cations dans le sol et cause la dispersion des agrégats. Ainsi, les pores se trouvent scellés et, en conséquence, la perméabilité du sol est réduite, en particulier pour les sols argileux (BRADAI, 2017). Wilcox (1948) a proposé une méthode pour évaluer

les eaux d'irrigation, basée sur le pourcentage de sodium et la conductivité électrique, est définie par la relation suivante, ce qui a donné 5 classes de d'eau d'irrigation (Figure 12) :

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

A partir du diagramme de WICOX (Fig12), deux classes d'eau sont distinguées :

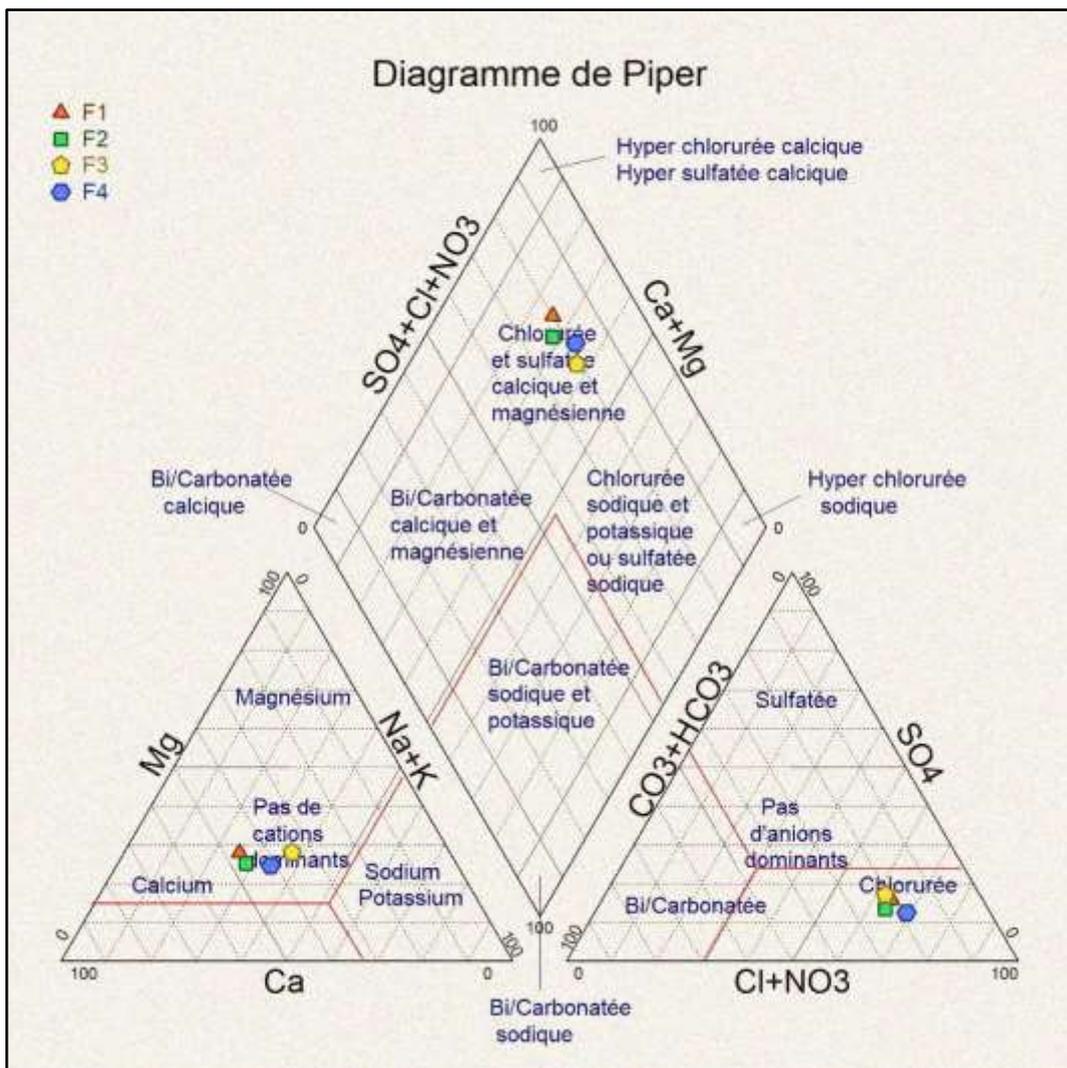
- La classe « Bonne » pour l'eau du forage F2.
- La classe « Médiocre » pour les trois forages F1, F3 et F4.



**Figure 12 :** Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation dans la région d'étude (Diagramme de WILCOX)

### 2.3. Faciès chimiques

La représentation graphique des résultats d'analyses est un outil important pour identifier les faciès chimiques et pour donner une idée des aspects qualitatifs des eaux d'irrigation. Pour atteindre cet objectif, on a eu recours au diagramme de Piper. La réalisation de ce diagramme a été faite en utilisant le logiciel DIAGRAMMES 6.5 (Simler, 2012). Il est composé de deux triangles, l'un pour le faciès cationique et l'autre pour le faciès anionique.



**Figure 13 :** Diagramme de PIPER pour les eaux d'irrigation de la région d'étude

Les données de nos échantillons sont projetées dans le diagramme de Piper (Fig.13). La première constatation est que le faciès chimique global des eaux d'irrigations est Chlorurée sodique et magnésienne. Le faciès des anions des quatre forages est chloruré. Les échantillons analysés ne présentent pas de cation dominant.

## Chapitre IV. Etude de la variabilité spatiale et verticale de carbone organique du sol

Le sol est considéré comme un milieu poreux triphasique rempli partiellement d'eau (phase liquide) et d'air, ou de vapeur d'eau (phase gazeuse). Il est composé d'un ensemble des particules solides, de tailles, de formes et de natures diverses, formant ce que l'on appelle la matrice. La répartition en taille de ces particules permet de déterminer la texture (ou granulométrie) du sol (BENAHMED, 2017).

### 1. Granulométrie

La granulométrie, ou texture, correspond à la répartition des minéraux par catégorie de grosseur indépendamment de la nature et de la composition de ces minéraux. Elle fournit donc un renseignement précieux sur la pédogenèse (DUCHAUFOR, 2001). Selon BAIZE. (2000), L'analyse granulométrique a pour but de quantifier les particules minérales élémentaires groupées en classe et définir la composition granulométrique d'un sol. C'est une étape fondamentale pour la classification d'un sol.

Les fractions granulométriques sont de l'ordre de trois. Les sables, qui sont généralement siliceux, forment des grains de quartz et sont résistants et durables, les limons résultent, comme les sables, de la décomposition physique de la roche. Les limons, tout comme les sables, sont issus de la décomposition physique de la roche, et enfin les argiles granulométriques sont considérées comme la fraction dont la taille est inférieure à 2 microns et sont principalement constituées d'argile minéralogique (HENIN et *al*, 1976).

L'analyse granulométrique a été effectuée selon le protocole standardisé des fractionnements granulométriques suivant la méthode internationale de la pipette Robinson (AFNOR, 2003). Après destruction de la matière organique par l'eau oxygénée (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) et la chaleur du bain de sable. Les particules sont dispersées à l'aide d'un hexamétaphosphate de sodium. Cependant, il est nécessaire de détruire le calcaire s'il est présent dans le sol (attaque par HCl), Après la sédimentation, les particules tombent avec des vitesses constantes, d'autant plus grandes qu'elles sont plus grosses. Ainsi la fraction fine (argile et limon) a été prélevée par la pipette de Robinson et la fraction grossière (sable) a été obtenus par tamisages successifs (BENAHMED, 2017 ; DUCHAUFOR, 2001 ; OUSTANI, 2016).

D'après BAIZE (2000), on peut résumer les classes granulométriques du sol en fonction des diamètres des particules en argile (<2 µm), limon fin (2 – 20 µm), limon grossier (20-50 µm), sable fin (50-200 µm) et sable grossier (200 µm -2mm) pour la terre fine et graviers 2-20 mm et cailloux (>20mm).

Il est possible de regrouper les textures dans trois catégories principales (DUCHAUFOR, 2001)

- **Texture sableuse** : sol bien aéré, facile à travailler, pauvre en réserves d'eau et éléments nutritifs, faibles CEC.
- **Texture limoneuse** : l'excès de limon et l'insuffisance d'argile peuvent provoquer la formation d'une structure massive, accompagnée de mauvaises propriétés physiques.
- **Texture argileuse** : sol chimiquement riche, mais à mauvaises propriétés physiques ; milieu imperméable et mal aéré, formant obstacle à la pénétration des racines ; travail du sol difficile.

Cette composition granulométrique est généralement représentée par l'appartenance à une classe texturale située dans un diagramme triangulaire (RICHER *et al.*, 2008).

Les résultats des analyses statistiques descriptives des fractions granulométriques du sol prélevé dans les trois couches sont résumés dans le tableau 06.

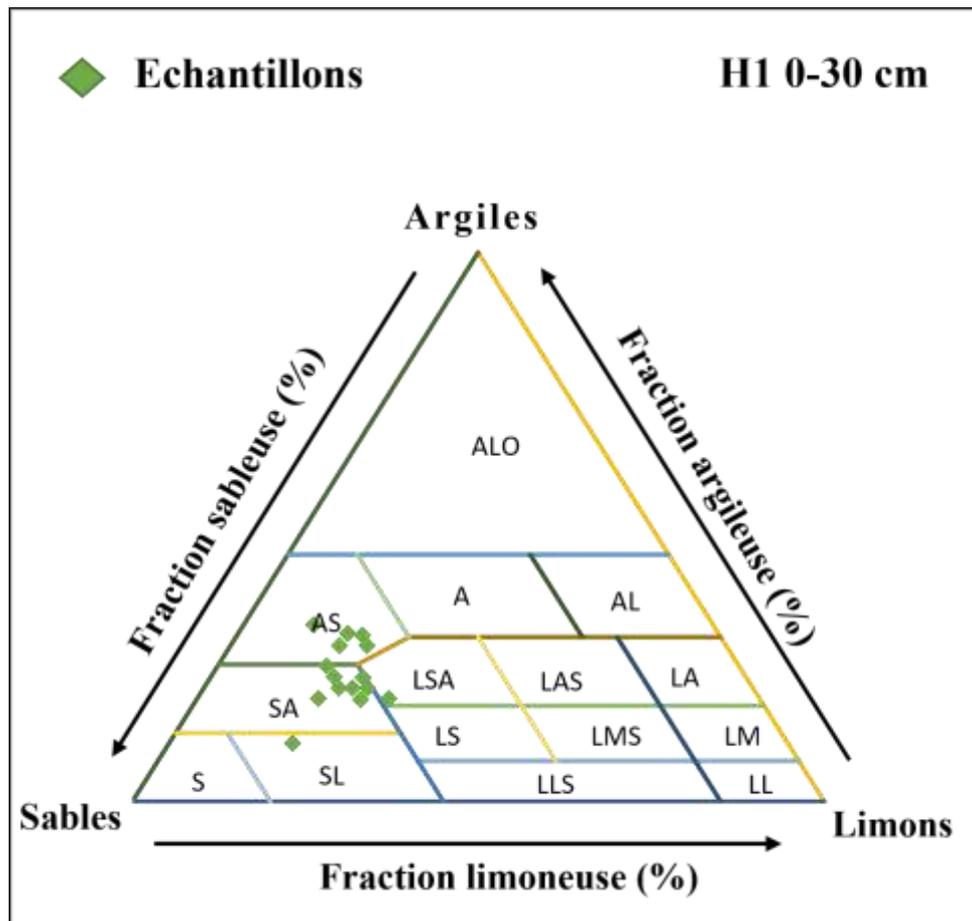
**Tableau 06** : statistique descriptive des différentes fractions granulométriques du sol

	H1 : 0-30 cm			H2 : 30-60 cm			H3 : 60-120 cm		
	A %	L %	S %	A %	L %	S %	A %	L %	S %
<b>Nb. d'échantillons</b>	15	15	15	15	15	15	15	15	15
<b>Moyenne</b>	23,28	19,07	57,65	10,32	23,65	66,02	9,63	13,15	77,21
<b>Max</b>	32,28	27,62	71,51	18,57	33,67	71,53	16,35	19,70	80,00
<b>Min</b>	10,64	10,07	51,57	4,64	13,69	51,56	2,50	7,56	73,74
<b>Écart-type</b>	5,68	4,1	4,88	4,75	5,53	5,07	4,30	3,90	2,00
<b>CV%</b>	24,40	21,48	8,47	45,99	23,38	7,68	44,66	29,68	2,60

D'après le tableau 06, nous remarquons que la répartition des fractions granulométriques montre que la majorité des sols de la région d'étude présentent des teneurs en sable élevées par rapport aux deux autres fractions. En effet, le sol étudié présente une teneur en sable  $57,65 \pm 4,88$  %, limons  $19,07 \pm 4,1$  % et un taux d'argile  $22,28 \pm 5,68$  % dans la première couche. Tandis que dans la deuxième couche les teneurs en sable  $66,02 \pm 5,07$  %, limons  $23,65 \pm 5,53$  %, l'argile  $10,32 \pm 4,75$  %. En plus, dans la couche profonde du sol, les sables, les limons et les argiles ont respectivement des teneurs de  $77,21 \pm 2,00$  %,  $13,15 \pm 3,90$  % et  $9,63 \pm 4,30$  %. Nous avons observé une grande variabilité des fractions de texture. Le coefficient de variabilité pour le sable est faible ( $CV < 15$  %). Pour les limons les trois couches présentent des coefficients de variabilité modérés ( $21,48\% < CV < 29,68\%$ ). Pour les argiles ce sont les couches (30-

60 cm et 60-120 cm) qui présentent des coefficients de variabilité élevés ( $44,66\% < CV < 45,99\%$ ), alors que pour l'horizon de surface, la variabilité est modérée ( $CV < 24,40\%$ ).

Selon le triangle texturale (fig.14, 15, 16) la plupart des sols de la zone d'étude ont une texture sablo- argileuse, sablo-limoneuse et argilo-sableuse. En général, le sous-sol a une proportion de sable plus importante que la couche arable. Le sol est perméable donc nécessite des grandes quantités d'eau pour l'irrigation.



**Figure 14 :** Diagramme textural des sols de Zelfana horizon 01.

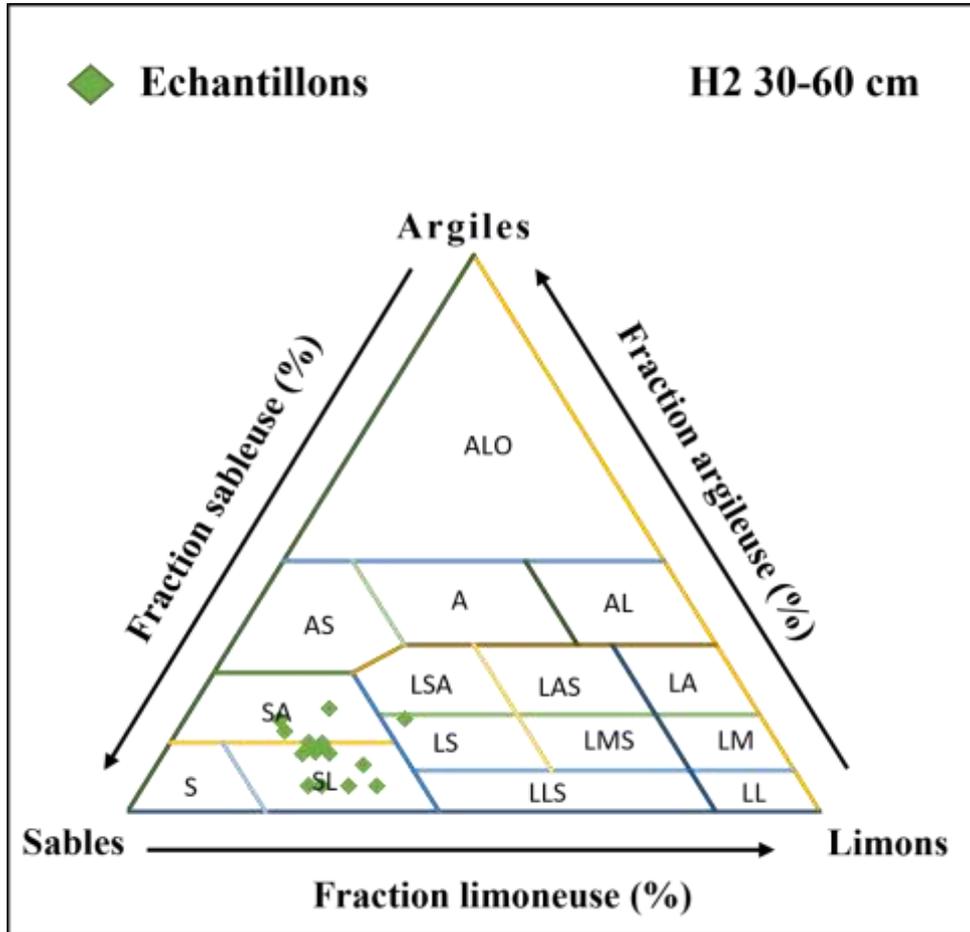


Figure 15 : Diagramme textural des sols de Zelfana horizon 02.

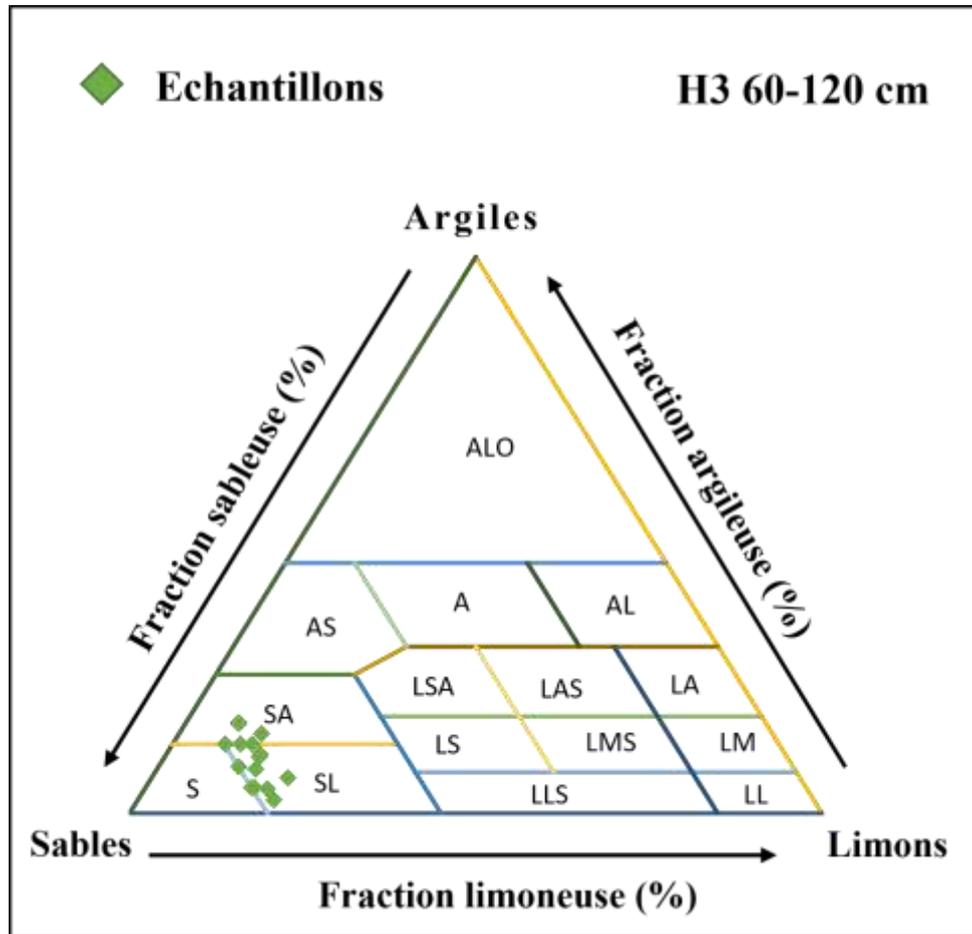


Figure 16 : Diagramme textural des sols de Zelfana horizon 03.

## 2. Etude de carbone organique

Dans les régions arides, la matière organique existe mais elle est très faible, voire inexistante. Les conditions climatiques (hautes températures, faible humidité...) défavorisent l'accumulation de la matière organique, et le peu qui s'accumule est rapidement décomposé sous l'action unique des paramètres physiques et chimiques (KOULL, 2007).

L'étude de carbone organique du sol par la méthode de (WALKLEY et BLACK) est effectuée sur une profondeur de 0-120 cm divisés en trois horizons avec un nombre de 15 profils.

L'analyse statistique consiste essentiellement à la détermination de la loi de distribution des variables non uniforme et homogènes et de leurs principaux paramètres statistiques, à savoir la moyenne, l'écart type et le coefficient de variation.

Les résultats relatifs à C % sont présentés dans le tableau 07.

**Tableau 07 :** Statistiques descriptives de C %

<b>C %</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>H3</b>
<b>Nombre d'échantillons</b>	15	15	15
<b>Maximum</b>	0,49	0,20	0,39
<b>Minimum</b>	0,04	0,05	0,01
<b>Moyenne</b>	0,19	0,11	0,09
<b>Écart-type</b>	0,14	0,04	0,09
<b>Coefficient de variation</b>	71,15	42,06	93,72

En fonction de la couche de sol considérée, le tableau 07 montre que les taux de carbone organique varient entre 0,01 et 0,05 pour les valeurs minimales et entre 0,20 et 0,49 pour les valeurs maximales. Ceci traduit une variabilité spatiale élevée à très élevée de ce paramètre dans les sols étudiés avec un coefficient de variation varie entre 42,06 à 71,15. Les valeurs moyennes du C quant à elles varient entre 0,09 et 0,19. Ce résultat signifie que le sol est très pauvre en carbone organique.

## **2.1. Etude de la variation verticale du carbone organique**

### **2.1.1. Dynamique de C dans le profil P1**

L'analyse de carbone organique du sol des horizons du profil P1 a montré que les horizons du profil sont très pauvres en carbone organique avec un pourcentage de 0,09 % dans l'horizon P1H1, de 0,07 % pour l'horizon P1H2 et de 0,11% pour l'horizon P1H3. Le profil carbone est caractérisé par un maximum en profondeur. L'allure du profil C P1est montrée dans la figure (17).

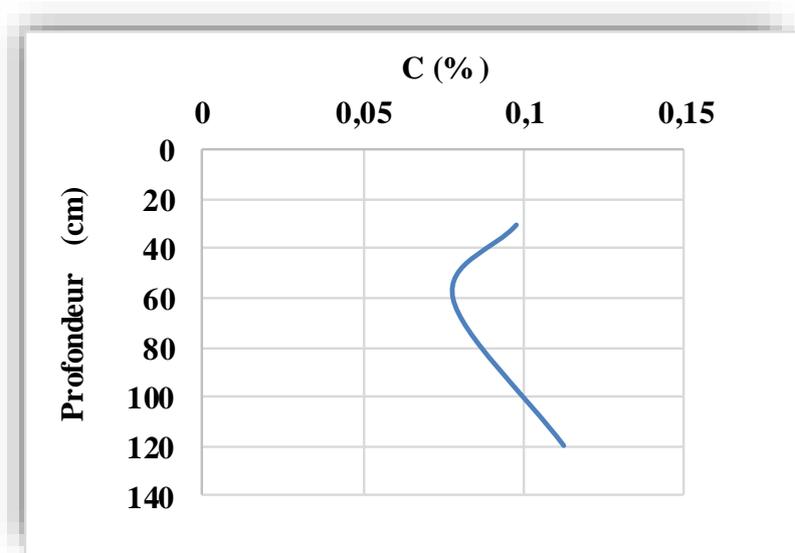


Figure 17 : Profil carbone du P1

### 2.1.2. Dynamique de C dans le profil P2

D'après la figure (18), le profil carbone est caractérisé par un maximum superficiel. Le sol appartenant à ce profil est très pauvre en carbone organique dans les trois horizons (0.1%, 0.1%, 0.07%).

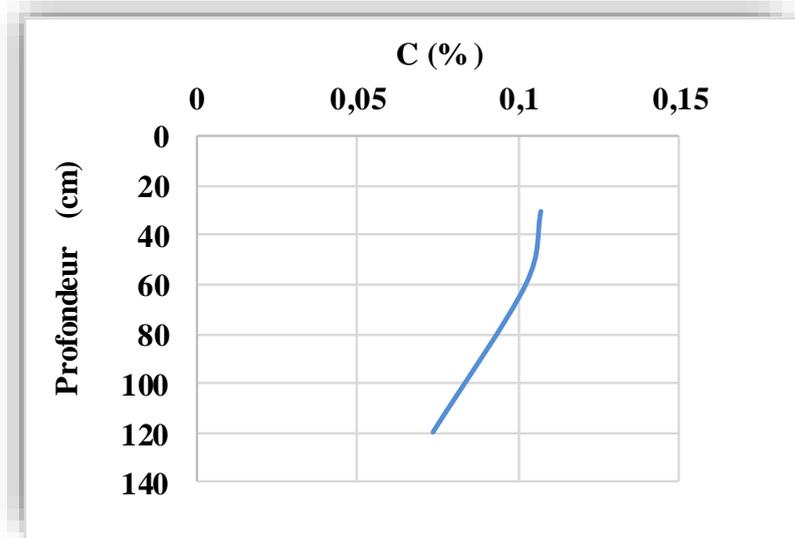


Figure 18 : Profil carbone du P2

### 2.1.3. Dynamique de C dans le profil P3

La figure (19), montre que le sol est très pauvre en matière organique dont le taux est 0.07%, 0.1%, 0.04% dans les trois horizons, caractérisé par un maximum de carbone dans la couche médiane.

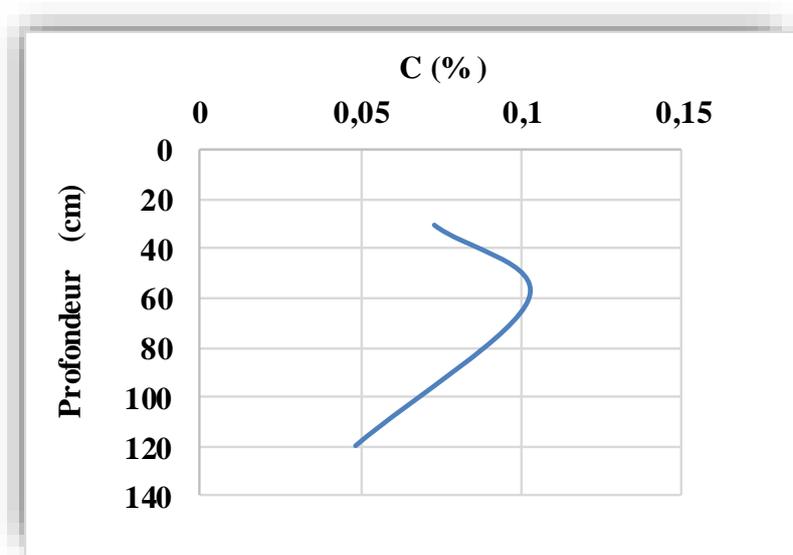


Figure 19 : Profil carbone du P3

#### 2.1.4. Dynamique de C dans le profil P4

Au vu des résultats de la figure (20), il ressort que le profil carbone est caractérisé par un maximum en couche médiane. L'analyse de carbone organique du sol des horizons du profil P4 a montré que les horizons du profil sont très pauvres en carbone organique avec une teneur de 0.07 % de l'horizon P1H1, de 0.1 % pour l'horizon P1H2 et de 0.09% pour l'horizon P1H3.

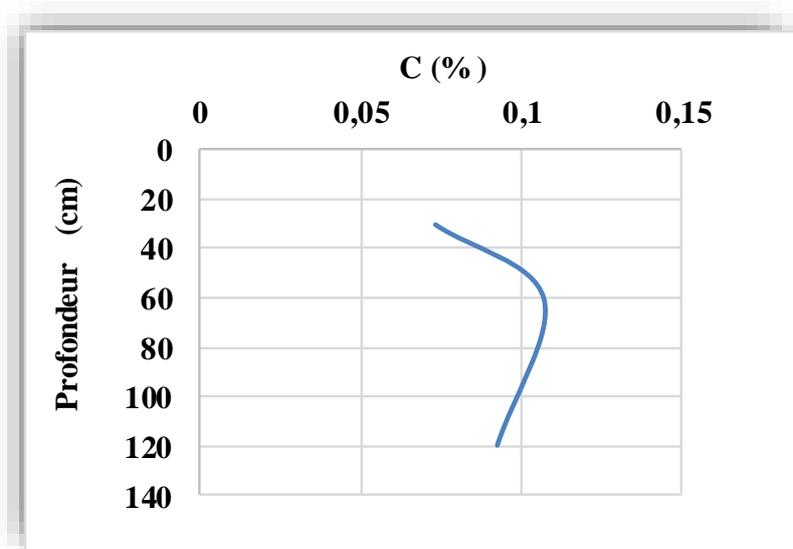


Figure 20 : Profil carbone du P4

### 2.1.5. Dynamique de C dans le profil P5

D'après la figure (21), le profil carbone est de type ascendant spécifié par un maximum en surface. La teneur du carbone dans les trois horizons est de 0.1%, 0.07%, 0.07% respectivement, ce qui exprime que le sol est très pauvre en carbone organique.

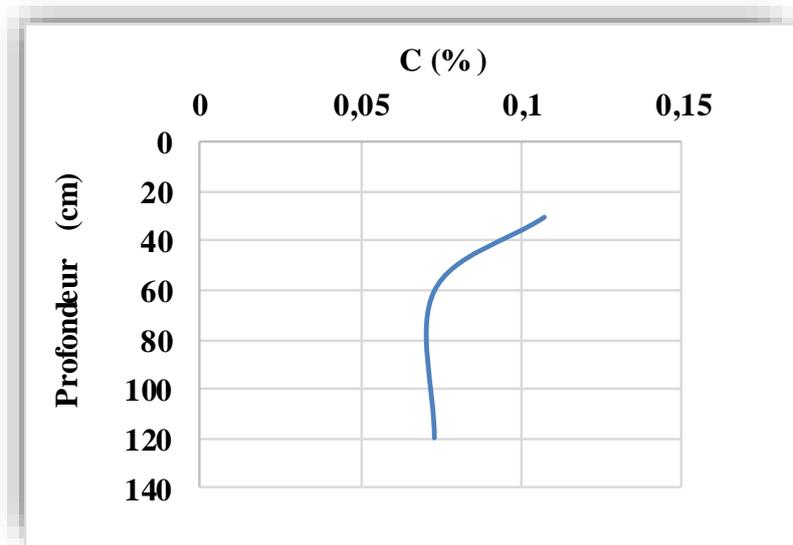


Figure 21 : Profil carbone du P5

### 2.1.6. Dynamique de C dans le profil P6

Selon la figure (22), le profil carbone est de type ascendant qui est caractérisé par un maximum dans la couche superficielle. Le sol appartenant à ce profil est très pauvre en carbone organique dans les trois horizons (0.1%, 0.07%, 0.05%).

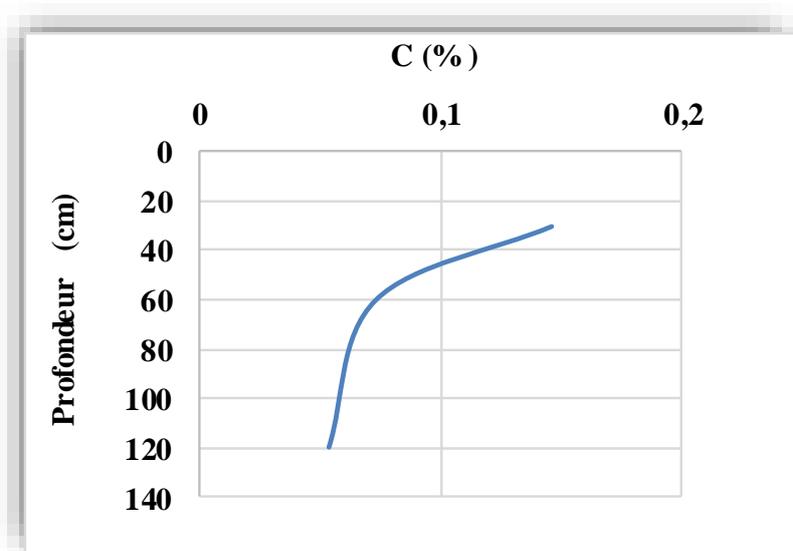


Figure 22 : Profil carbone du P6

### 2.1.7. Dynamique de C dans le profil P7

Au vu des résultats de la figure (23), il ressort que le profil carbone est de type ascendant qui est caractérisée par un maximum superficiel. Le sol du profil caractéristique est très pauvre en carbone organique dans les trois horizons (0.2%, 0.04%, 0.01%),

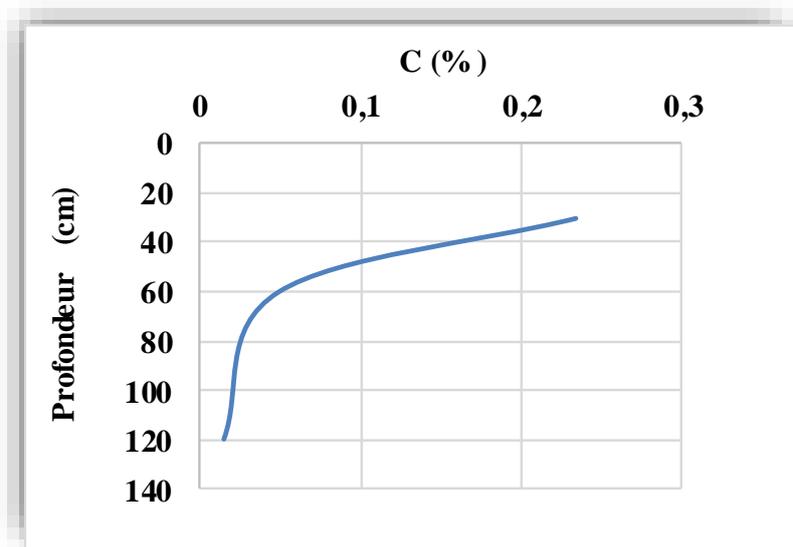


Figure 23 : Profil carbone du P7

### 2.1.8. Dynamique de C dans le profil P8

L'analyse de carbone organique du sol des horizons du profil P8 a montré que les horizons du profil sont très pauvres en carbone organique avec une 0,48 % à l'horizon P8H1, de 0,19 % à l'horizon P8H2 et de 0,10 % à l'horizon P8H3. Le profil est caractérisé par un maximum de carbone dans la couche superficielle. L'allure du profil carbone P8 est montrée dans la figure (24).

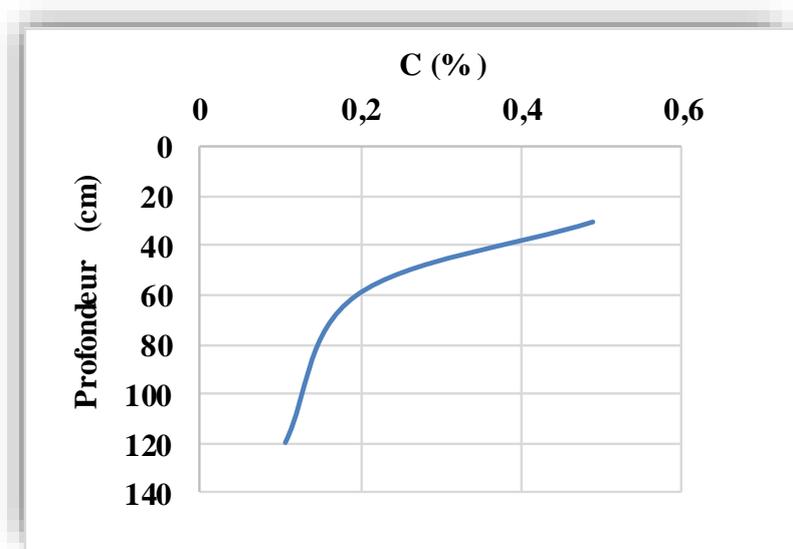


Figure 24 : Profil carbone du P8

### 2.1.9. Dynamique de C dans le profil P9

Selon la figure (25), le profil carbone est de type ascendant qui est caractérisé par un maximum dans la couche superficielle. Le sol appartenant à ce profil est très pauvre en carbone organique dans les trois horizons (0.3%, 0.1%, 0.02%).

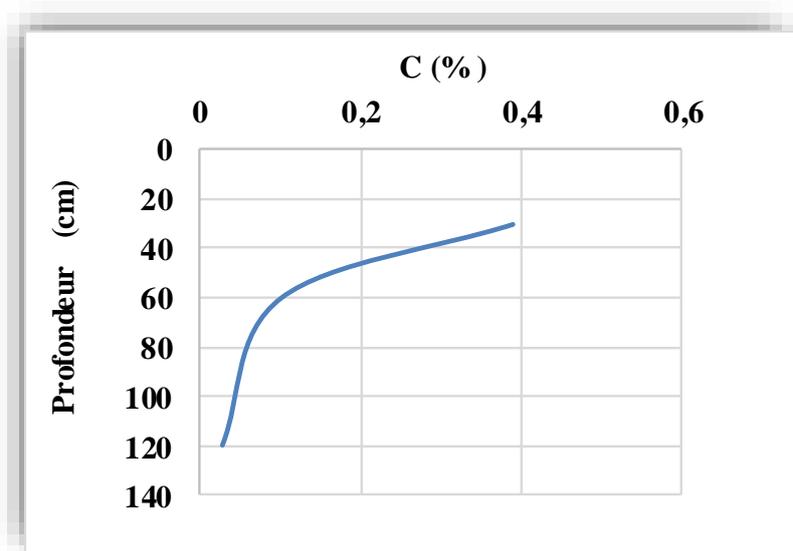


Figure 25 : Profil carbone du P9

### 2.1.10. Dynamique de C dans le profil P10

Au vu des résultats de la figure (26), il ressort que le profil carbone est de type ascendant qui est caractérisée par un maximum superficiel. Le sol du profil caractéristique est très pauvre en carbone organique dans les trois horizons (0.3%, 0.2%, 0.04%),

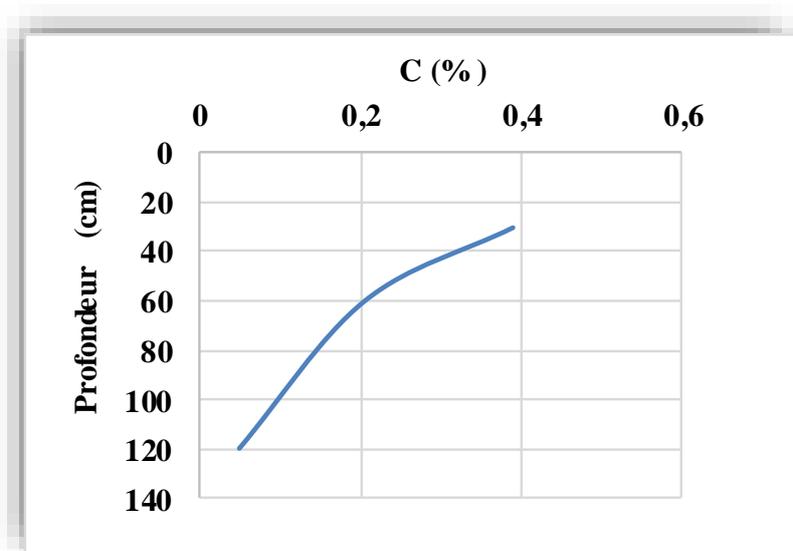


Figure 26 : Profil carbone du P10

### 2.1.11. Dynamique de C dans le profil P11

D'après la figure (27), le profil carbone est de type ascendant spécifié par un maximum en surface. La teneur du carbone dans les trois horizons est de 0.18%, 0.10%, 0.12% respectivement, ce qui exprime que le sol est très pauvre en carbone organique.

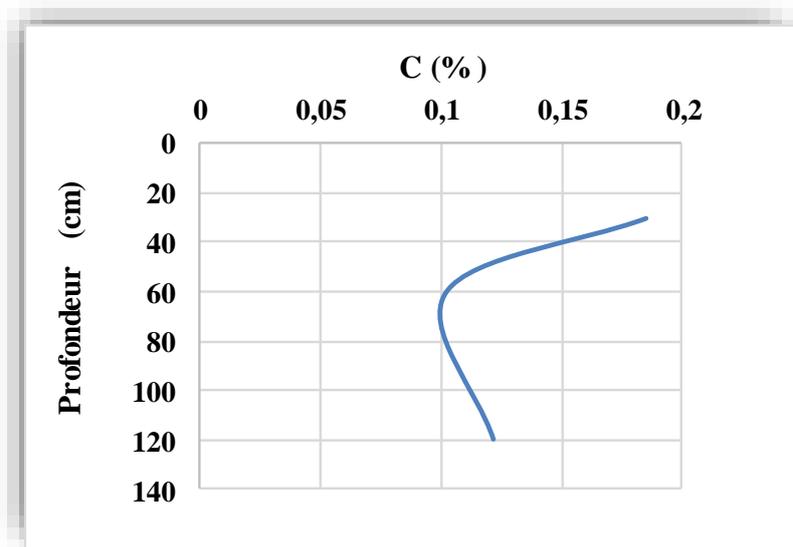


Figure 27 : Profil carbone du P11

### 2.1.12. Dynamique de C dans le profil P12

L'analyse de carbone organique du sol des horizons du profil P8 a montré que les horizons du profil sont très pauvres en carbone organique avec une 0,2 % à l'horizon P12H1, de 0,07 % à l'horizon P12H2 et de 0,04 % à l'horizon P12H3. Le profil est caractérisé par un maximum de carbone dans la couche superficielle. L'allure du profil carbone P8 est montrée dans la figure (28).

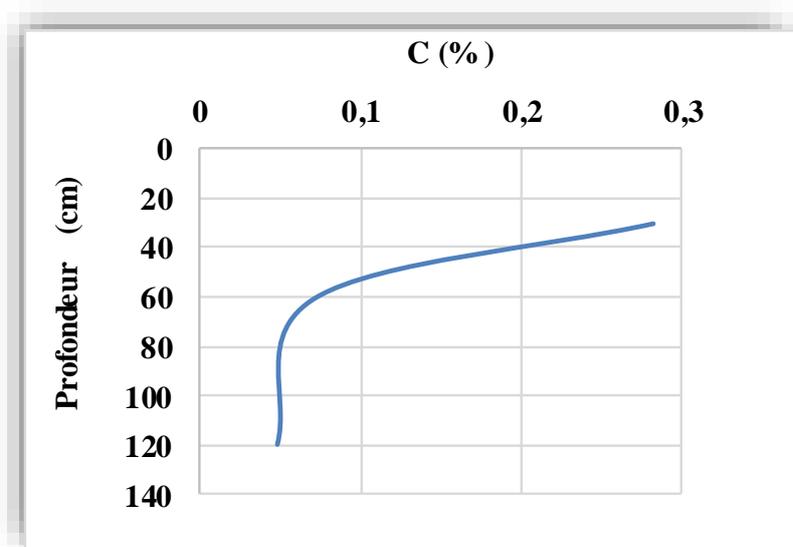


Figure 28 : Profil carbone du P12

### 2.1.13. Dynamique de C dans le profil P13

D'après la figure (29), le profil carbone est caractérisé par un maximum superficiel. Le sol appartenant à ce profil est très pauvre en carbone organique dans les trois horizons (0.19%, 0.16%, 0.08%).

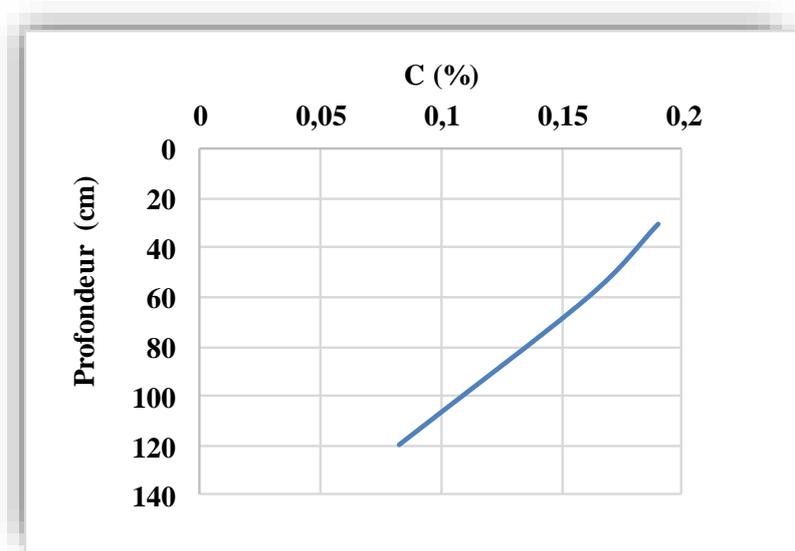


Figure 29 : Profil carbone du P13

### 2.1.14. Dynamique de C dans le profil P14

L'analyse de carbone organique du sol des horizons du profil P14 a montré que les horizons du profil sont très pauvres en carbone organique avec une 0.04 % de l'horizon P14H1, de 0.07 % pour l'horizon P14H2 et de 0.11% pour l'horizon P14H3. le profil carbone caractérisé par un maximum en profondeur. L'allure du profil C P14 est montrée dans la figure (30).

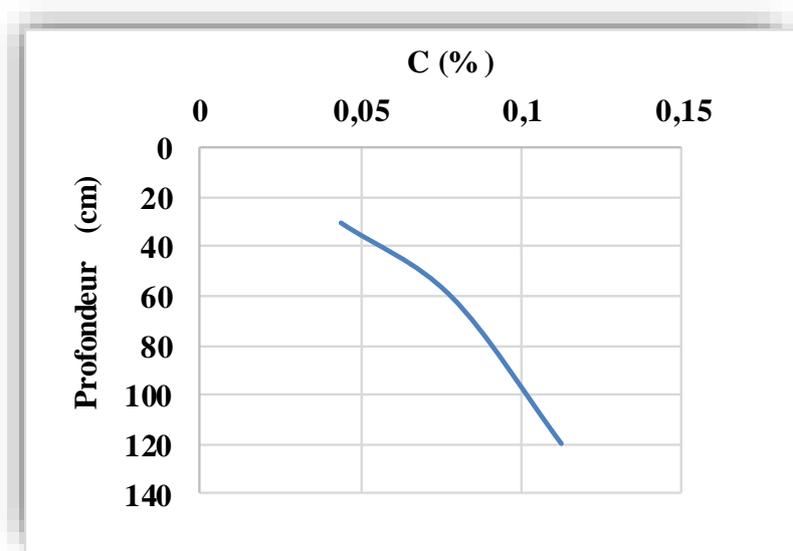


Figure 30 : Profil carbone du P14

### 2.1.15. Dynamique de C dans le profil P15

D'après la figure (31), le profil carbone est de type descendant spécifié par un maximum en profondeur. La teneur du carbone dans les trois horizons est de 0,08%, 0,12%, 0,3% respectivement, ce qui exprime que le sol est très pauvre en carbone organique.

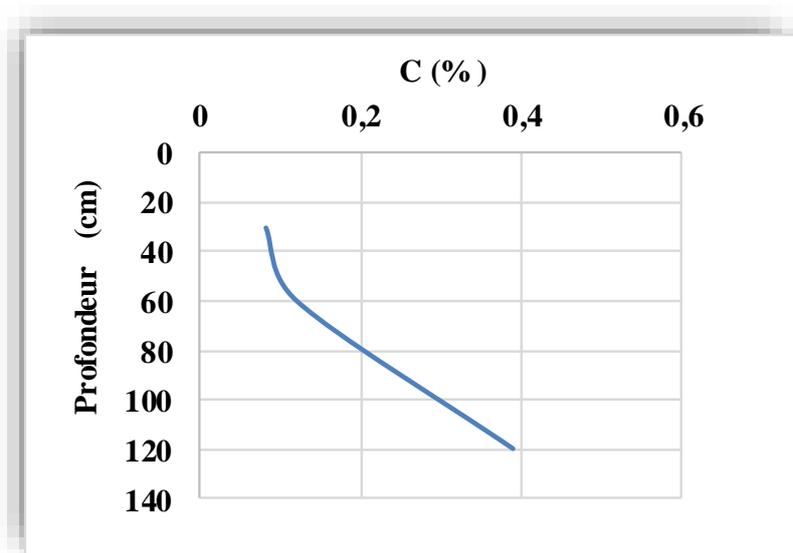


Figure 31 : Profil carbone du P15

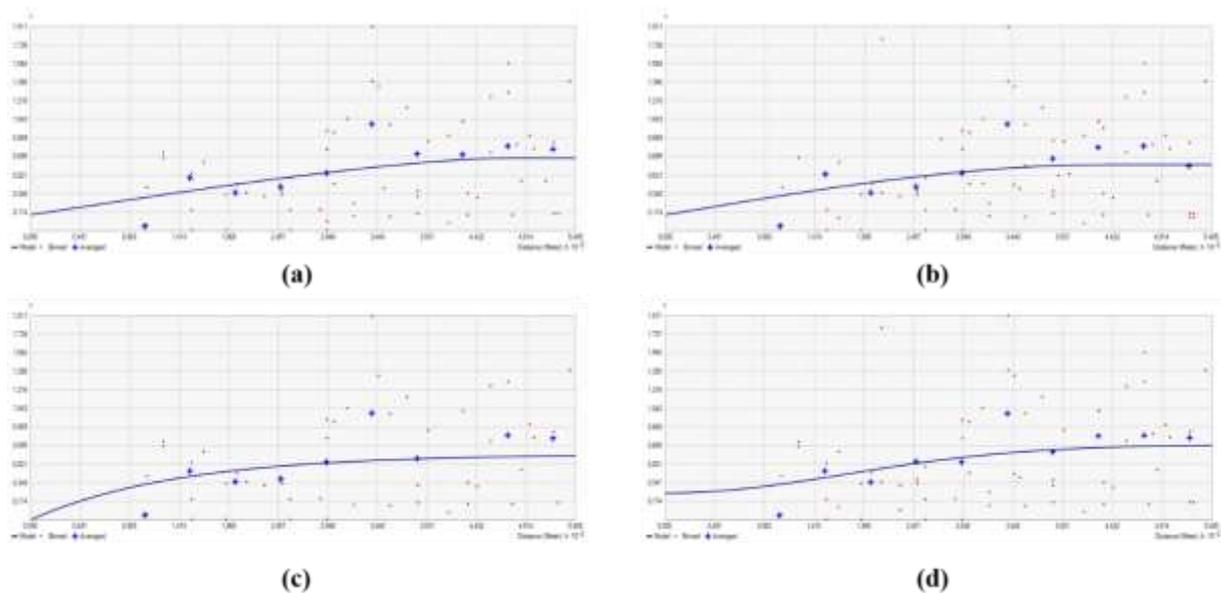
### 3. Modélisation géostatistique de la variabilité spatiale du carbone organique

Pour appliquer l'interpolation par krigeage, il est nécessaire d'explorer la structure spatiale des données afin de vérifier si celles-ci sont bien autocorrélées. L'analyse variographique va nous permettre de mener cette étude à bien (HENNEQUI,2010). Quatre modèles sont utilisés : circulaire, sphérique, exponentiel et gaussien suivie d'une validation croisée afin de choisir le meilleur modèle de variogramme qui sera utilisé pour la réalisation des cartes de variabilité spatiale par krigeage.

#### 3.1. Modélisation géostatistique du carbone organique horizon 1

##### 3.1.1. Analyse variographique

La figure 32, montre les variogrammes ajustés aux modèles (circulaire, sphérique, exponentiel et gaussien).



**Figure 32 :** Variogrammes expérimentaux du carbone organique horizon 1. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien.

D'après la figure 32, Le variogramme ajusté au model circulaire a un palier de 0,531 et une portée de 438,65 m, avec un effet de pépite de l'ordre de 0,149. Le model sphérique à un palier de 0,471, une portée de 438,65 m et un effet de pépite de 0,149. La représentation de l'exponentiel a révélé un palier de 0,615 et une portée de 438,65 m et ne présente pas d'effet de pépite. Tandis que, le variogramme gaussien présente un palier de 0,451, une portée de 438,65 m avec un effet de pépite de 0,251.

Les équations des modèles des variogramms expérimentaux de carbone organique du sol de l'horizon 1, sont écrits de la façon suivante :

- ✓ **Circulaire** :  $\gamma(h) = 0,149 + 0,382 \left( 1 - \left( \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{h}{438,65} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 438,65} \sqrt{1 - \left( \frac{h}{438,65} \right)^2} \right)$
- ✓ **Sphérique** :  $\gamma(h) = 0,149 + 0,322 \left( 1,5 \left( \frac{h}{438,65} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{438,65} \right)^3 \right)$
- ✓ **Exponentiel** :  $\gamma(h) = 0,615 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{438,65} \right) \right)$
- ✓ **Gaussien** :  $\gamma(h) = 0,251 + 0,2 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{438,65} \right)^2 \right)$

### 3.1.2. Validation croisée

Le tableau 08, représente synthétiquement les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme du carbone organique de sol horizon 1.

**Tableau 08** : Validation croisée des variogrammes du carbone organique horizon 1.

C H1	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	15	15	15	15
Erreur moyenne de prédiction (ME)	-0,00032	-0,00018	-0,00033	-0,00028
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,11193	0,11845	0,12345	0,11682
Erreur moyenne standardisée (MSE)	0,03939	0,03364	0,02427	0,03126
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	0,71408	0,72815	0,74882	0,72664
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	0,15496	0,16205	0,16357	0,16314

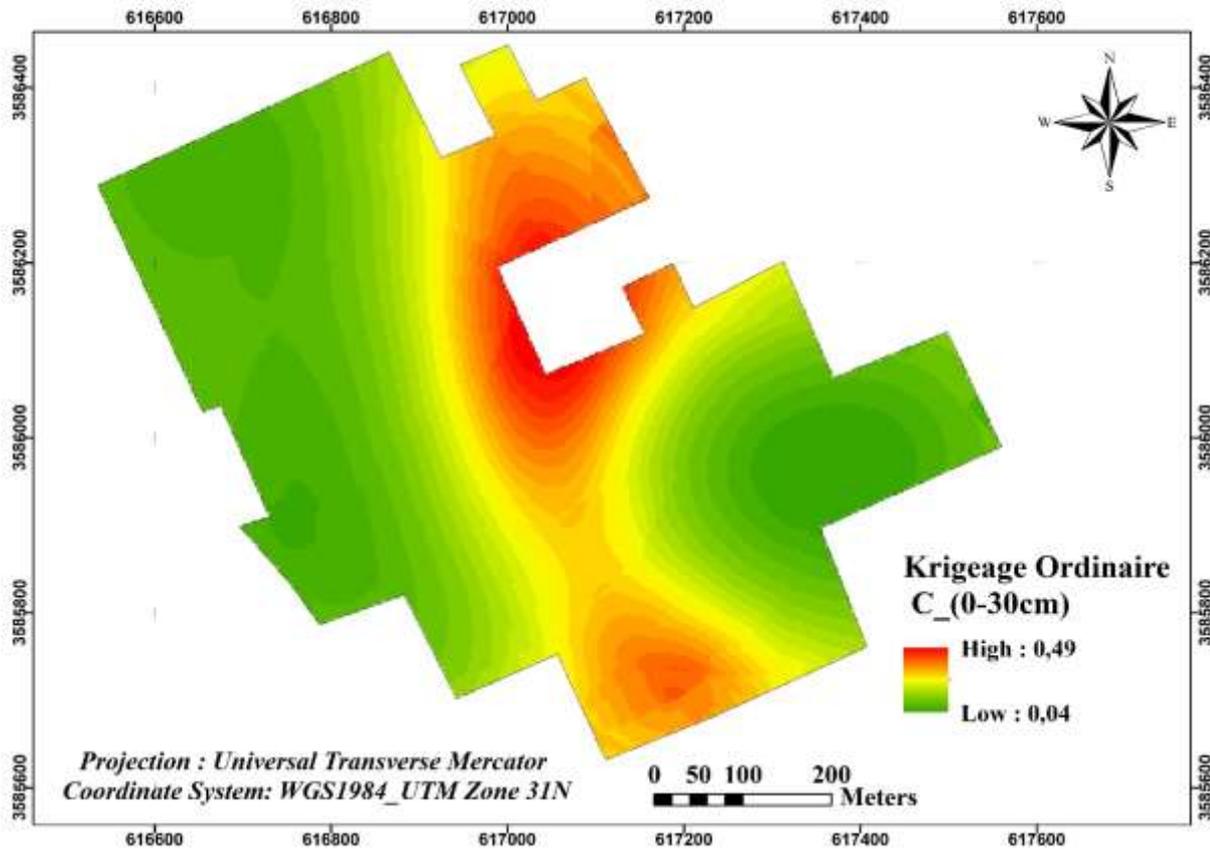
Selon le tableau (08) ci-dessus, les valeurs de la validation croisée sont raisonnables ce qui signifie que les quatre modèles sont optimaux, tous les modèles ont :

- Une erreur moyenne de prédiction (ME) proche du 0
- Une erreur moyenne standardisée (MSE) proche du 0
- Une erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE) proche du 1

Le modèle le plus fiable est le modèle exponentiel car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche à l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

### 3.1.3. Cartographie par krigeage

Les résultats de la validation croisée ont montrés que le modèle exponentiel est le meilleur model d'interpolation spatiale. Ce modèle a été utilisée pour établir la carte de la variabilité spatiale du carbone organique dans l'horizon 1 par krigeage.



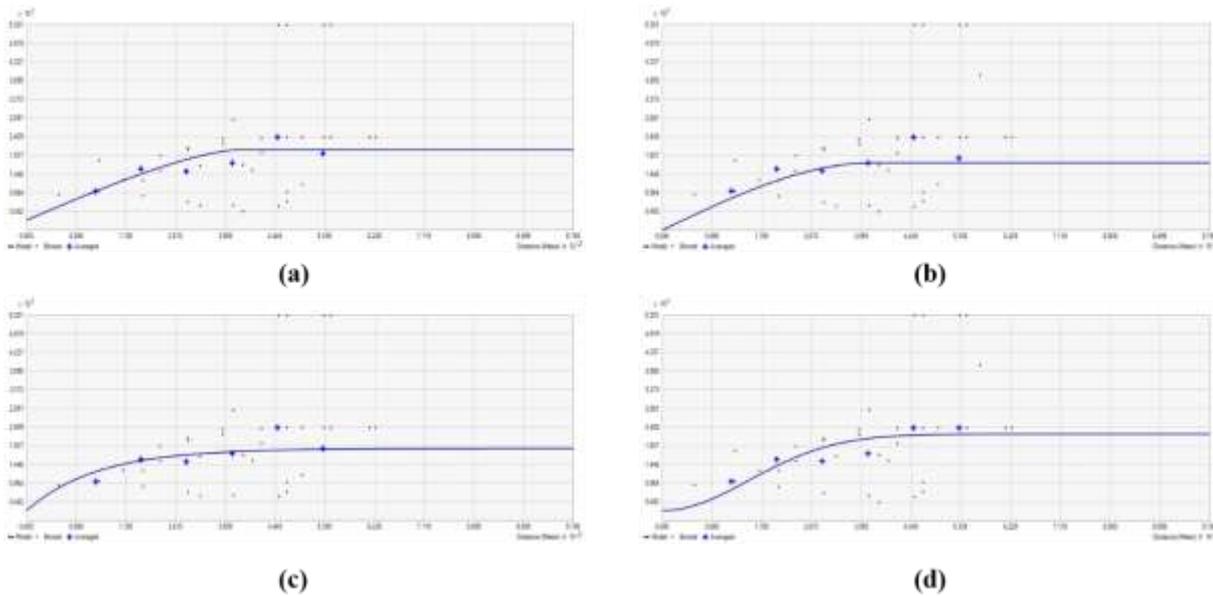
**Figure 33 :** Carte de variabilité spatiale du carbone organique horizon 1.

La carte (Fig. 33) montre la variation du carbone organique dans l'horizon 1 augmente suivant un gradient sud-nord, les valeurs les plus élevée sont enregistrés dans la partie nord de la palmeraie. Le sol est très pauvre en carbone organique dans tout l'horizon avec des valeurs variant de 0.04 à 0.49. La variation du carbone organique dans l'horizon 1 est très élevée, avec un coefficient de variation de 71,15%.

### 3.2. Modélisation géostatistique du carbone organique horizon 2

#### 3.2.1. Analyse variographique

La figure 34, montre les variogrammes ajustés aux modèles (circulaire, sphérique, exponentiel et gaussien).



**Figure 34 :** Variogrammes expérimentaux du carbone organique horizon 2. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien.

D'après la figure 34, Le variogramme ajusté au model circulaire a un palier de 0,181 et une portée de 378,12 m, avec un effet de pépité est de l'ordre de 0,026. Le model sphérique à un palier de 0,174, une portée de 378,12 m et ne présente pas un effet de pépité. La représentation de l'exponentiel a révélé un palier de 0,160 et une portée de 378,12 m et un effet de pépité de 0,026. Tandis que, le variogramme gaussien présente un palier de 0,197, une portée de 338,12 m avec un effet de pépité de 0,026.

Les équations des modèles des variogramms expérimentaux de carbone organique du sol de l'horizon 2, sont écrits de la façon suivante :

✓ **Circulaire** :  $\gamma(h) = 0,026 + 0,155 \left( 1 - \left( \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{h}{378,12} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 378,12} \sqrt{1 - \left( \frac{h}{378,12} \right)^2} \right)$

✓ **Sphérique** :  $\gamma(h) = 0,174 \left( 1,5 \left( \frac{h}{378,12} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{378,12} \right)^3 \right)$

✓ **Exponentiel** :  $\gamma(h) = 0,026 + 0,134 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{378,12} \right) \right)$

✓ **Gaussien** :  $\gamma(h) = 0,026 + 0,171 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{378,12} \right)^2 \right)$

### 3.2.2. Validation croisée

Le tableau 09, représente synthétiquement les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme du carbone organique de sol horizon 2.

**Tableau 09 :** Validation croisée des variogrammes du carbone organique horizon 2.

C H2	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	15	15	15	15
Erreur moyenne de prédiction (ME)	-0,00277	-0,00411	-0,00102	-0,00507
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,05638	0,05764	0,05016	0,06093
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,21405	-0,31054	-0,08405	-0,42221
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	1,34683	1,61731	1,06848	1,84558
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	0,04354	0,03808	0,04728	0,03665

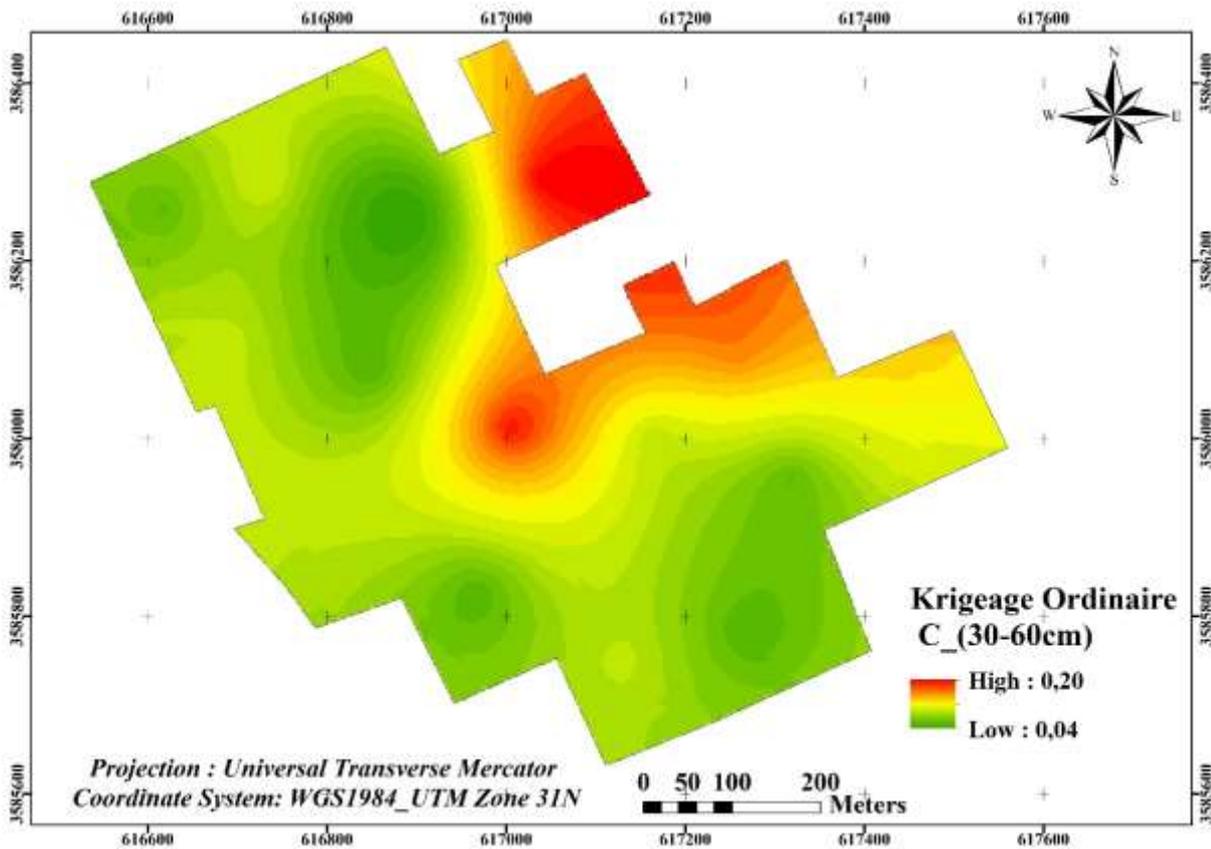
Selon le tableau (09) ci-dessus, les valeurs de la validation croisée sont raisonnables ce qui signifie que les quatre modèles sont optimaux, tous les modèles ont :

- Une erreur moyenne de prédiction (ME) proche du 0
- Une erreur moyenne standardisée (MSE) proche du 0
- Une erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE) proche du 1

Le modèle le plus fiable est le modèle exponentiel car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche à l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

### 3.2.3. Cartographie par krigeage

Les résultats de la validation croisée ont montrés que le modèle exponentiel est le meilleur model d'interpolation spatiale. Ce modèle a été utilisée pour établir la carte de la variabilité spatiale du carbone organique dans l'horizon 2 par krigeage.



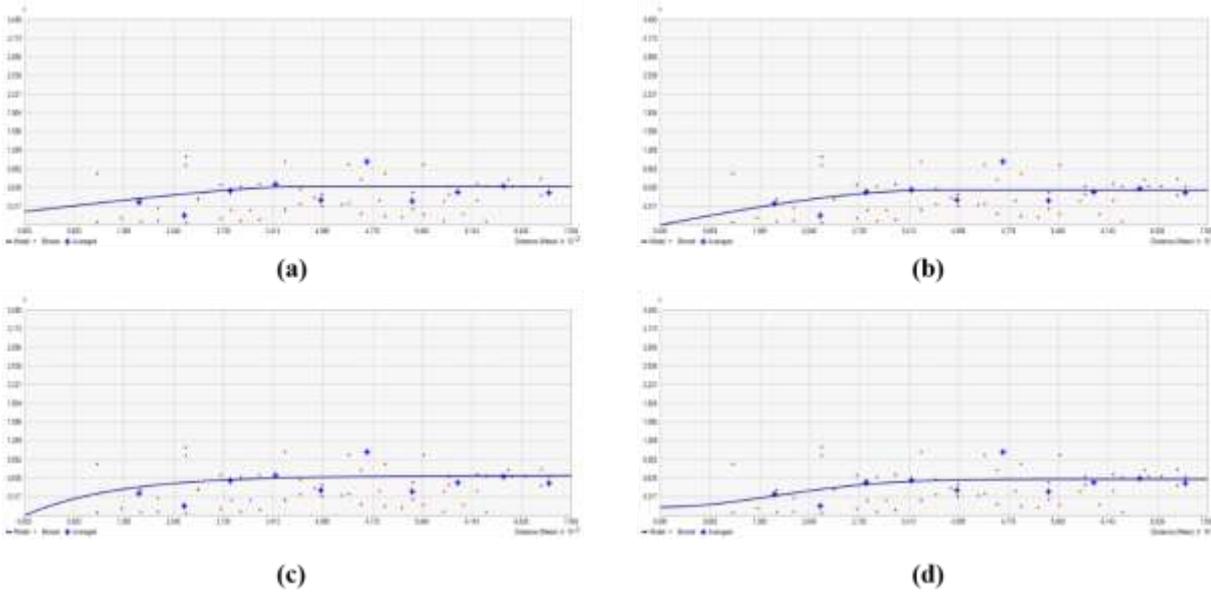
**Figure 35 :** Carte de variabilité spatiale du carbone organique horizon 2.

La carte (Fig.35) montre le carbone organique dans l’horizon 2 varie de 0,04 à 0,20, ce qui signifie que le sol est très pauvre. Les valeurs les plus élevés se trouvent dans le centre et le nord de la palmeraie. Le coefficient de variation est de l’ordre de 42,06% dans la palmeraie, ce qui montre une variation spatiale élevée.

### 3.3. Modélisation géostatistique du carbone organique horizon 3

#### 3.3.1. Analyse variographique

La figure 36, montre les variogrammes ajustés aux modèles (circulaire, sphérique, exponentiel et gaussien).



**Figure 36 :** Variogrammes expérimentaux du carbone organique horizon 3. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien.

D'après la figure 36, Le variogramme ajusté au model circulaire a un palier de 0,432 et une portée de 378,12 m, avec un effet de pépite est de l'ordre de 0,227. Le model sphérique a un palier de 0,591, une portée de 378,12 m et ne présente pas un effet de pépite. La représentation de l'exponentiel a révélé un palier de 0,678 et une portée de 378,12 m, sans aucun effet de pépite. Tandis que, le variogramme gaussien présente un palier de 0,476, une portée de 338,12 m avec un effet de pépite de 0,141.

Les équations des modèles des variogramms expérimentaux de carbone organique du sol de l'horizon 3, sont écrits de la façon suivante :

✓ **Circulaire :**  $\gamma(h) = 0,227 + 0,205 \left( 1 - \left( \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{h}{378,12} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 378,12} \sqrt{1 - \left( \frac{h}{378,12} \right)^2} \right)$

✓ **Sphérique :**  $\gamma(h) = 0,591 \left( 1,5 \left( \frac{h}{378,12} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{378,12} \right)^3 \right)$

✓ **Exponentiel :**  $\gamma(h) = 0,678 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{378,12} \right) \right)$

✓ **Gaussien :**  $\gamma(h) = 0,141 + 0,335 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{378,12} \right)^2 \right)$

### 3.3.2. Validation croisée

Le tableau 10, représente synthétiquement les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme du carbone organique de sol horizon 3.

**Tableau 10 :** Validation croisée des variogrammes du carbone organique horizon 3.

C H3	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	15	15	15	15
Erreur moyenne de prédiction (ME)	-0,00277	-0,00642	-0,00187	-0,00699
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,08331	0,08436	0,08266	0,08433
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,00581	-0,0974	0,00922	-0,10908
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	0,77655	0,99257	0,73759	1,02585
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	0,08629	0,06893	0,09072	0,06645

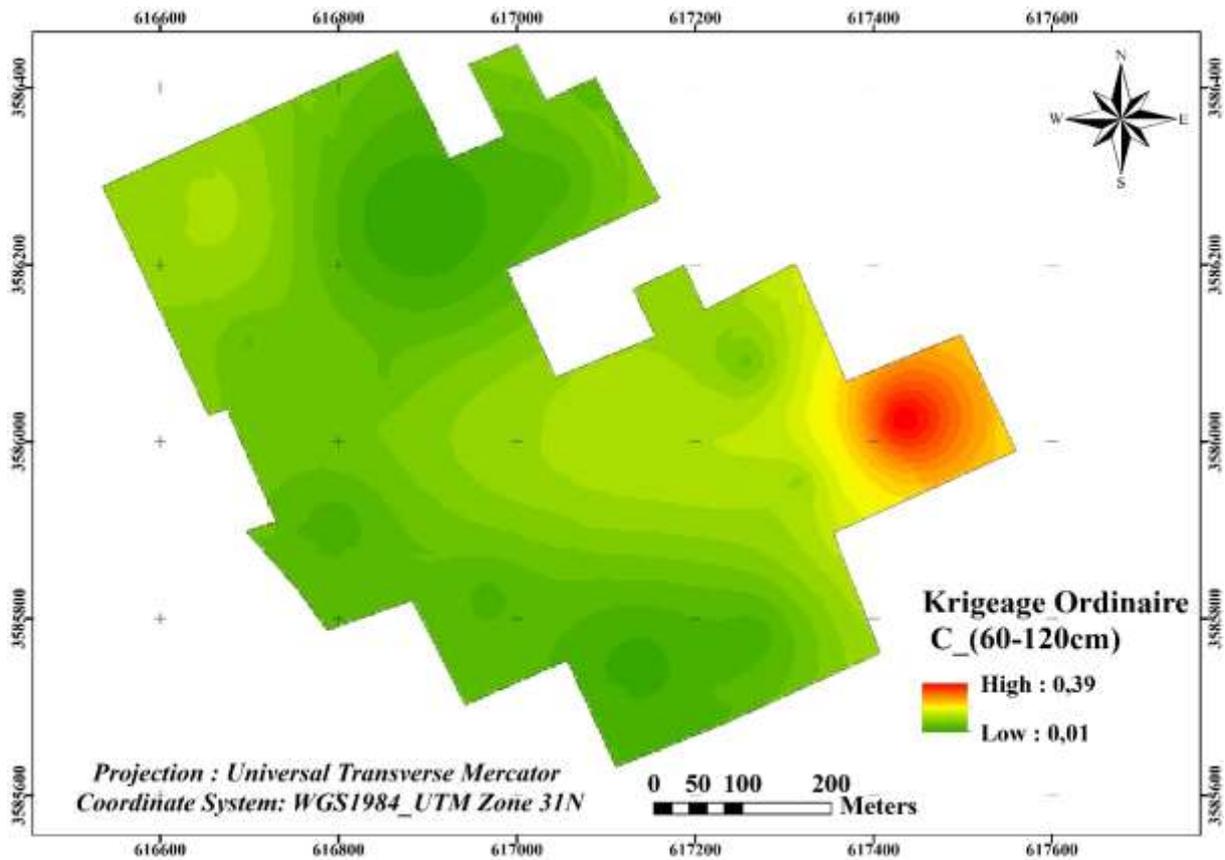
Selon le tableau (10) ci-dessus, les valeurs de la validation croisée sont raisonnables, ce qui signifie que les quatre modèles sont optimaux, tous les modèles ont :

- Une erreur moyenne de prédiction (ME) proche du 0
- Une erreur moyenne standardisée (MSE) proche du 0
- Une erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE) proche du 1

Le modèle le plus fiable est le modèle circulaire car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche à l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

### 3.3.3. Cartographie par krigeage

Les résultats de la validation croisée ont montrés que le modèle circulaire est le meilleur model d'interpolation spatiale. Ce modèle a été utilisée pour établir la carte de la variabilité spatiale du carbone organique dans l'horizon 3 par krigeage.



**Figure 37.** Carte de variabilité spatiale du carbone organique horizon 3.

La carte (Fig.37) montre le carbone organique se concentre essentiellement dans la partie est de la palmeraie avec des valeurs variant de 0,01 à 0,39 (très pauvre). La variation spatiale est très élevée dans l'horizon 3 avec un coefficient de variation de 93,72 %.

#### 4. Discussions

Les sols sahariens sont réputés pour être, dans leur ensemble pauvre en matière organique et en éléments minéraux indispensables aux végétaux. La teneur en MO de ces sols est souvent inférieure à 1% (DURAND, 1954 ; DUTIL, 1971 ; DAOUD et HALITIM, 1994 ; HALILAT, 1998). Cette faible teneur résulte de la rareté de la végétation et de la faible biomasse (HALITIM, 1988).

La caractérisation analytique des profils, illustre que le sol est très pauvre en carbone organique. La teneur en carbone des horizons étudiés varie de 0,09 à 0,19 %, ce résultat se rapproche des travaux réalisés sur les sols sahariens (OUSTANI et *al.*, 2018 ; BERKAL, 2006). Cette pauvreté en carbone organique peut être justifier, d'une part, par les conditions climatiques extrêmes des régions sahariennes, en particulier la température et la pluviométrie (CITEAU et *al.*, 2008 ; SOCO, 2009). D'autre part, l'intensification agricole y compris l'irrigation peut être considérés comme un incubateur des conditions optimales (humidité et température) pour la dégradation de la matière organique du sol des régions méditerranéennes (LAURENCE, 1998 ; BADRAOUI 2000).

Selon les profils de carbone organique (P2, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13), nous observons que les concentrations en carbone organique sont élevées en surface (0-30cm), par ce que l'essentiel de la matière organique provient de la litière déposée à la surface du sol (NACRO,1997). Ainsi (WANG et *al.*, 2021) et (SHEIKH et *al.*, 2009) ont montré qu'a été causée par la décomposition des résidus végétaux, qui étaient principalement distribué sur ou près de la surface du sol. Des teneurs plus élevées en carbone organique ont été également trouvées dans la couche arable ailleurs dans le monde, comme dans les terres cultivées écosystèmes du sud-est de l'Allemagne (WIESMEIER et *al.*, 2013), un bassin versant forestier subalpin sur le mont Taiyue, en Chine (WANG et *al.*, 2017), dans l'est de l'Australie (HOBLEY et *al.*, 2015), Ceci suggère que le sol de surface participe plus activement dans la séquestration du carbone (LI et *al.*, 2013).

On constate que le carbone diminue avec la profondeur, les teneurs en CO sont principalement influencées par la distribution verticale des racines. NAMAM et *al.* (2001), PARADIS. (2016) obtiennent des résultats similaires. La quantité de matière organique présente à un moment donné dans le sol est la résultante de deux processus : les apports de composés organiques, et les processus de décomposition (MOUGHILI, 2000).

Le suivie de carbone organique du sol dans les profils (P3, P4) indique la présence de CO dans les couches médianes (30-60cm), le transport du carbone organique ver l'horizon 2, peut s'expliquer par l'infiltration de l'eau et bioturbation par les vers de terre (DON et *al.* 2007).

Contrairement aux profils (P1, P14, P15), nous remarquons une augmentation du carbone organique avec la profondeur (60-120cm), cela montre une accumulation du carbone organique dans les horizons profonds. Cette dynamique descendante est à cause de phénomène de lixiviation par l'effet de l'irrigation. Plusieurs études montrent comment les diverses utilisations du sol (pratiques agricoles, plantations, etc.) influencent les teneurs en CO du sol (RODRIGUEZ-MURILLO, 2001 ; CONANT et *al.*, 2003 ; EVRENDILEK et *al.*, 2004 ; HARING et *al.*, 2013 ; WIESMEIER et *al.*, 2013). Ainsi DESJARDINS. (1991) montre que les quantités totales de carbone organique, leur répartition dans le profil paraissent varier assez largement sous l'influence de la texture, puisque le carbone organique dans les sols sableux est non protégé, donc plus facilement distribuée que dans les autres types de sol.

Il est à signalé que les concentrations les plus élevées du carbone organique situé au nord-est de la palmeraie, il est attribué à la disposition géographique et topographique des profils, dont la supposition de migration du carbone organique de l'amont vers l'aval. Plusieurs études ont montré l'effet de la topographie sur la variation des stocks en carbone dans les sols. En effet, les travaux de AVILES-

HERNANDEZ et *al.*, (2009) sur la détermination de la variation et l'estimation du carbone, ont montré que le stock de carbone augmente avec le gradient de pente (BOUNOUARA, 2018).

La modélisation géostatistique a indiqué les meilleurs modèles théoriques ajusté pour les trois profondeurs du carbone organique du sol ainsi que différents niveaux de dépendance spatiale. La validation croisée a montré que les modèles de variogrammes les plus fiables sont l'exponentiel pour l'horizon 1 et 2, ce résultat se rapproche de celui trouvé par (WANG et *al.*, 2021) dans le désert steppes du corridor Hexi en Chine. Le modèle circulaire est le mieux pour l'horizon 3, ce qui est en accord avec l'étude de (ADDISE et *al.*, 2022) (Tableau 11).

**Tableau 11** : Paramètres des modèles de variogramme les mieux adaptés pour le carbone organique

	Modèle	Pépite (C0)	Seuil (C0+C)	Portée (m)	Rapport %
C H1	Exponentiel	0	0,651	438,65	0
C H2	Exponentiel	0,026	0,160	378,12	16,25
C H3	Circulaire	0,149	0,531	378,12	28,06

Selon Cambardella, et al. (1994), le rapport pépite/palier peut être utilisé comme un indicateur de dépendance spatiale. Dans l'horizon 1 et 2 du profil du carbone organique, la dépendance spatiale était dans la classe ( $\leq 25\%$ ), ce qui correspond à une dépendance spatiale forte, Cela peut être attribué à des différences de topographie et géomorphologie ainsi que les différences dans la taille de la zone d'étude (WANG et *al.*, 2021). Tandis que, dans l'horizon 3, le carbone organique est modérément dépendant de l'espace (25% - 75%). Ce résultat est similaire à celui trouvé dans les forêts de bambous Moso en Chine subtropicale avec une dépendance spatiale modérée du carbone organique du sol dans les couches profondes du sol (TANG et *al.*, 2017).

L'effet de pépite reflète la variabilité spatiale à des distances plus court que la plus petite distance entre les mesures (WEBSTER, 1985), ainsi que l'erreur expérimentale liée à l'échantillonnage. Les grands effets de pépite peuvent suggérer la nécessité d'un échantillonnage supplémentaire à de plus petites distances (ARSLAN et *al.*, 2013). L'analyse variographique a révélé un effet de pépite très faible, ce qui signifie qu'il existe une variation du carbone organique à des distances inférieures au pas d'échantillonnage (200 m). On signale que l'effet de pépite de l'horizon 1 est 0, ce qui indiquent la fiabilité du pas d'échantillonnage. Les valeurs de la portée pour les trois horizons sont de 438.65 à 378,12 mètres. La portée exprime que les emplacements des échantillons séparés par des distances plus proches que la portée sont spatialement autocorrélés, alors que les emplacements plus éloignés que la portée ne le sont pas (ESRI, 2019). Ce résultat a révélé que la portée est supérieure au pas d'échantillonnage (200 m),

alors que les points échantillonnés sont spatialement dépendantes. La portée servira dans la détermination de la distance entre les échantillons dans les futurs plans d'échantillonnage (BENBRAHIM, 2018).

La variation spatiale du carbone organique du sol dans l'horizon 1 et 3 est très élevée avec un CV de 71,15%, 93,72%, respectivement. Tandis que la couche médiane a un coefficient de variation élevée 42,06%. Ce qui est naturel dans les régions arides, vu que la végétation est rare et clairsemée et que la distribution des déchets d'animaux de parcours est très éparpillée. Selon les cartes de la distribution spatiale du carbone à l'aide de l'interpolation par krigeage ordinaire, les valeurs les plus élevés du carbone organique dans les trois couches sont principalement observée dans les parties nord-est de la zone d'étude, cela est probablement due à l'eau d'irrigation. L'allure des profils carbone montre une dynamique ver l'aval par la présence d'un réseau de drainage naturel. Par conséquent, il existe généralement une relation étroite entre les propriétés du sol et les variables topographiques (WANG et *al.*, 2021).

## Chapitre V. Etude de la variabilité spatiale et verticale de la salinité du sol

En Algérie, de l'Est à l'Ouest et de la côte au Sahara, les sols agricoles sont, dans leur majorité, affectés par la salinité ou susceptible de l'être (DURAND, 1958 ; HALITIM, 1973).

D'après DAOUD et HALITIM (1994), la majorité des eaux d'irrigation du Sahara contiennent des quantités excessives de sels solubles. Utilisées en irrigation, ces eaux provoquent des phénomènes de dégradation des sols par salinisation, alcalinisation et sodisation (CHEVERRY et ROBERT, 1998), et par conséquence la faiblesse des rendements des cultures (DAOUD et HALITIM, 1994).

Selon AUBERT (1978), un sol est considéré salé lorsque la conductivité électrique de son extrait dilué 1/5 est supérieur ou égale à 2 dS/m.

L'étude de la salinité du sol par l'analyse de la conductivité électrique est effectuée sur une profondeur de 0-120 cm divisés en trois horizons avec un nombre de 15 profils.

### 1. Etude de la salinité

Les résultats d'analyses de la salinité sont représentés synthétiquement dans le tableau 12.

**Tableau 12** : Statistiques descriptives de C.E. (dS/m)

<b>C.E. à 25°C (dS/m)</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>H3</b>
<b>Nombre d'échantillons</b>	15	15	15
<b>Maximum</b>	3,87	2,23	2,35
<b>Minimum</b>	1	0,64	0,90
<b>Moyenne</b>	2,43	1,73	1,91
<b>Écart-type</b>	0,89	0,52	0,38
<b>Coefficient de variation</b>	36,50	29,96	20,22

Le tableau (12) révèle que les valeurs minimales de la salinité varient entre 1 dS/m en surface et 0,90 dS/m en profondeur, pour les valeurs maximales, la salinité varie entre 2,23 dS/m en surface et 3,87 dS/m en profondeur. Ceci traduit une variabilité spatiale modéré a élevée de ce paramètre dans les sols étudiés avec un coefficient de variation varie entre 20,22 à 36,50. Les valeurs moyennes de la salinité quant à elles varient entre 1,73 et 2,43. Ce résultat montre que le sol étudié est peu salé à salé. La classification de la salinité du sol a été réalisée en fonction de l'échelle d'AURBERT (1978).

## 1.1. Etude de la variation verticale de la salinité

### 1.1.1. Dynamique des sels dans le profil P1

L'analyse de la conductivité électrique du sol des horizons du profil P1 a montrée que la salinité du sol varie de très salé pour l'horizon P1H1 (3,45 dS/m), peu salé pour l'horizon P1H2 (1,72 dS/m) à salé pour l'horizon P1H3 (2,24 dS/m). L'allure du profil salin P1 est montrée dans la figure (38).

Selon la classification des profils salins de SERVANT (1978), le profil salin P1 est de type (A), caractérisé par un maximum de salinité dans la couche superficielle.

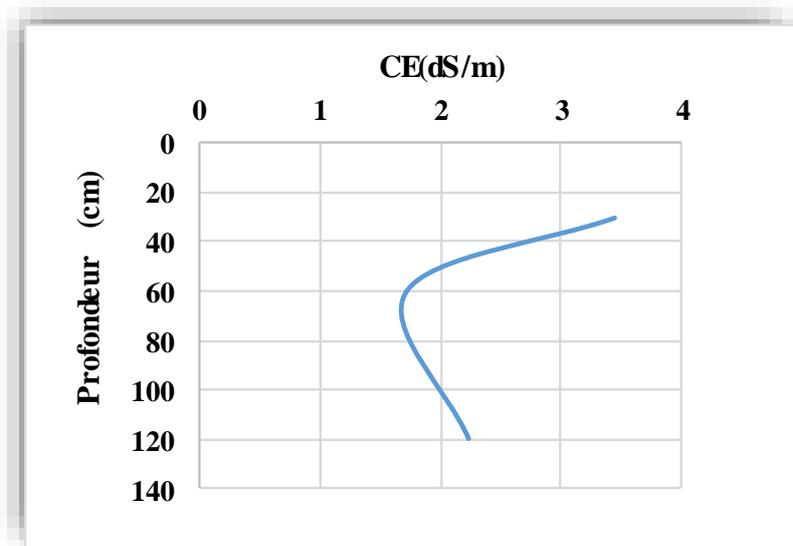


Figure 38 : Profil salin P1

### 1.1.2. Dynamique des sels dans le profil P2

La figure (39), illustre que le sol est très salé dans le premier horizon 3,87 dS/m et peu salé pour le deuxième et le troisième horizon 0,82 dS/m, 1,85 dS/m.

Selon la classification des profils salins de SERVANT (1978), le profil salin P2 est de type (A), caractérisé par un maximum de salinité dans la couche superficielle.

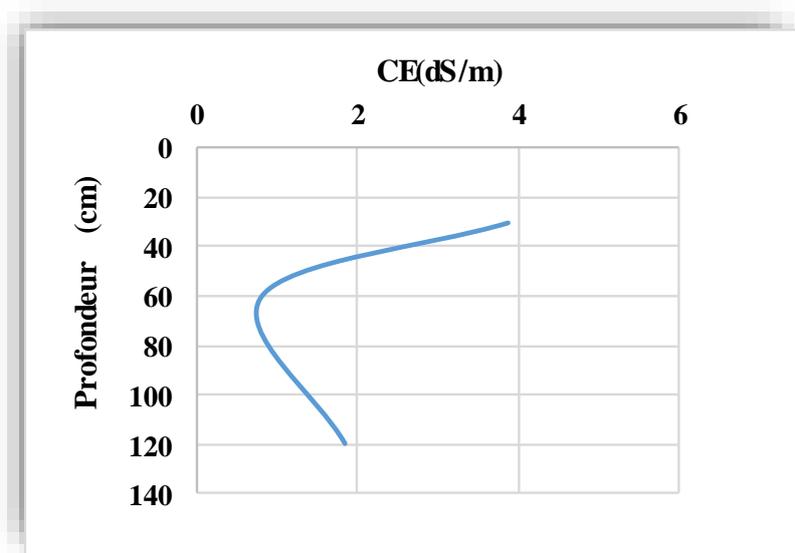


Figure 39 : Profil salin P2

### 1.1.3. Dynamique des sels dans le profil P3

D'après la figure 40, la teneur de la salinité dans le deuxième horizon est de 2,19 dS/m ce qui exprime que le sol est salé. Il est peu salé dans les deux autres horizons (1,65 dS/m. 1,93 dS/m).

Selon la classification des profils salins de SERVANT (1978), le profil salin P3 est de type (B), caractérisé par un maximum de salinité dans la couche médiane.

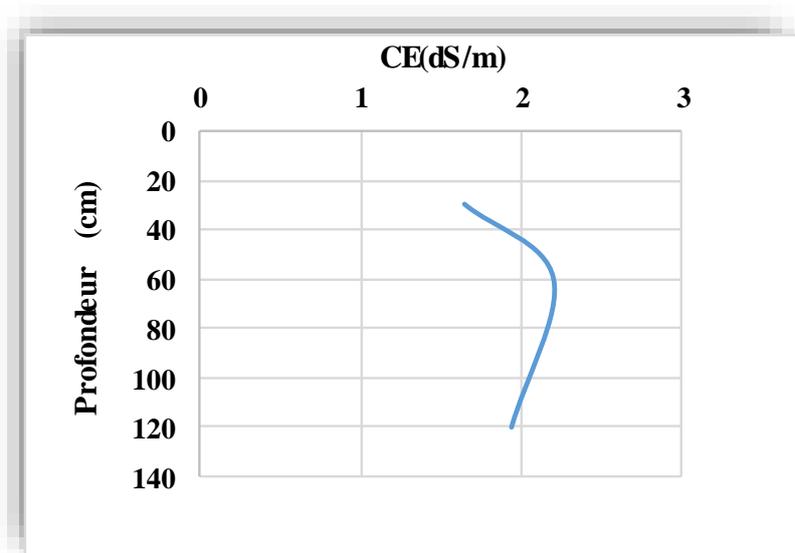


Figure 40 : Profil salin P3

### 1.1.4. Dynamique des sels dans le profil P4

L'analyse de la conductivité électrique du sol des horizons du profil P4 a montré que les horizons du profil sont peu salés avec une CE à 25°C de 1,98 dS/m à l'horizon P4H1, de 1,92 dS/m à l'horizon P43H2 et de 1,96 dS/m à l'horizon P4H3. L'allure du profil salin P4 est montrée dans la figure (41).

Selon la classification des profils salins de SERVANT (1978), le profil salin P4 est de type (A), caractérisé par un maximum de salinité dans la couche superficielle.

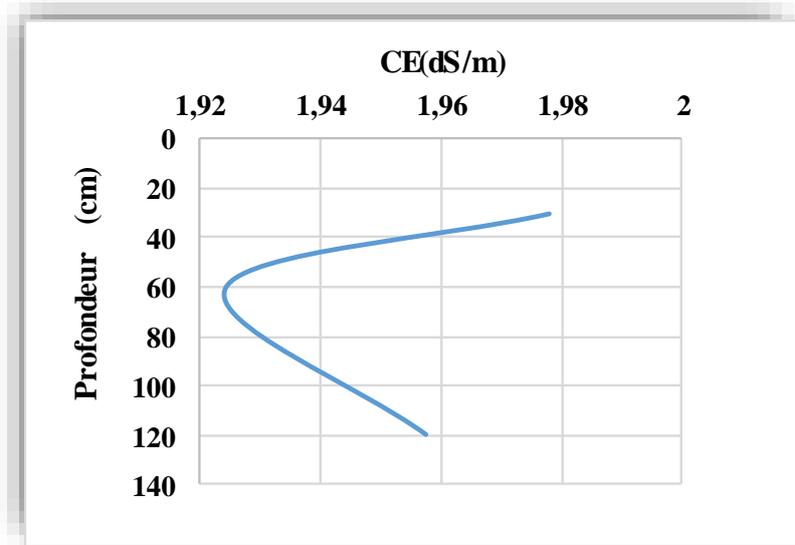


Figure 41 : Profil salin P4

### 1.1.5. Dynamique des sels dans le profil P5

Au vu des résultats de la figure (42), il ressort que les trois horizons sont peu salés (1,21 dS/m, 0,64 dS/m, 0,90 dS/m) respectivement.

Selon la classification des profils salins de SERVANT (1978), le profil salin P5 est de type (A), caractérisé par un maximum de salinité dans la couche superficielle.

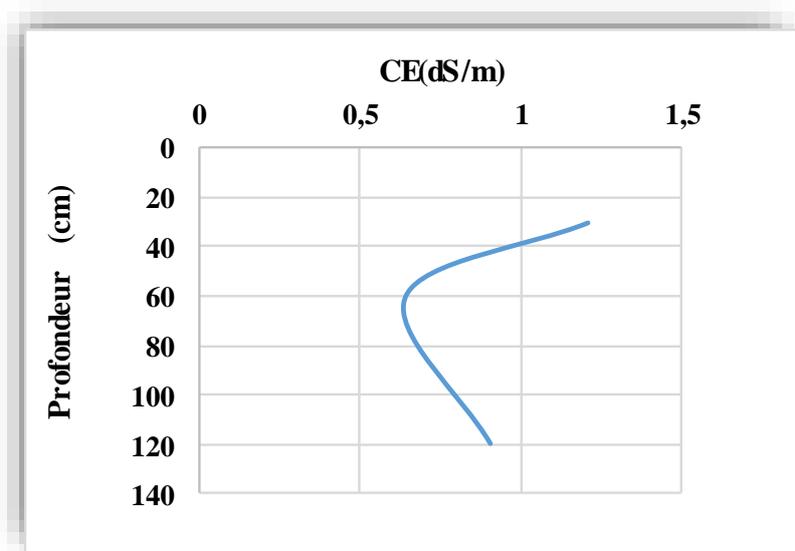


Figure 42 : Profil salin P5

### 1.1.6. Dynamique des sels dans le profil P6

La salinité décroît de la surface vers la profondeur (Fig. 43), il atteint son maximum dans le premier horizon 2,60 dS/m.

Selon la classification des profils salins de SERVANT (1978), le profil salin P6 est de type (A), caractérisé par un maximum de salinité dans la couche superficielle.

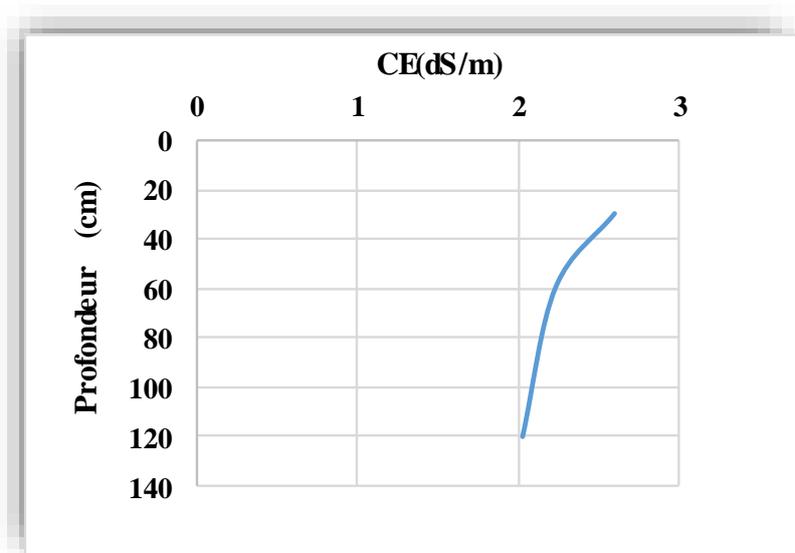


Figure 43 : Profil salin P6

### 1.1.7. Dynamique des sels dans le profil P7

Selon la figure 44, le sol des horizons du profil P7 a montré que la salinité du sol varie de peu salé pour l'horizon P7H2 (1,12 dS/m), est salé pour les horizons P7H1 (2,34 dS/m), P7H3 (2,01 dS/m).

Selon la classification des profils salins de SERVANT (1978), le profil salin P7 est de type (A), caractérisé par un maximum de salinité dans la couche superficielle.

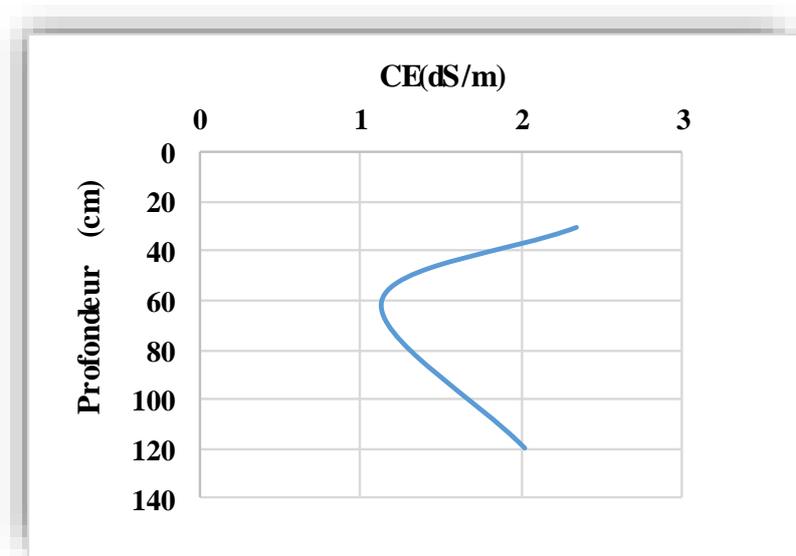


Figure 44 : Profil salin P7

### 1.1.8. Dynamique des sels dans le profil P8

L'analyse de la conductivité électrique du sol des horizons du profil P8 a montré que la salinité du sol varie de très salé pour l'horizon P8H1 (3,67 dS/m), salé pour l'horizon P8H2 (1,18 dS/m) à peu salé pour l'horizon P8H3 (1,97 dS/m). L'allure du profil salin P8 est montrée dans la figure (45).

Selon la classification des profils salins de SERVANT (1978), le profil salin P8 est de type (A), caractérisé par un maximum de salinité dans la couche superficielle.

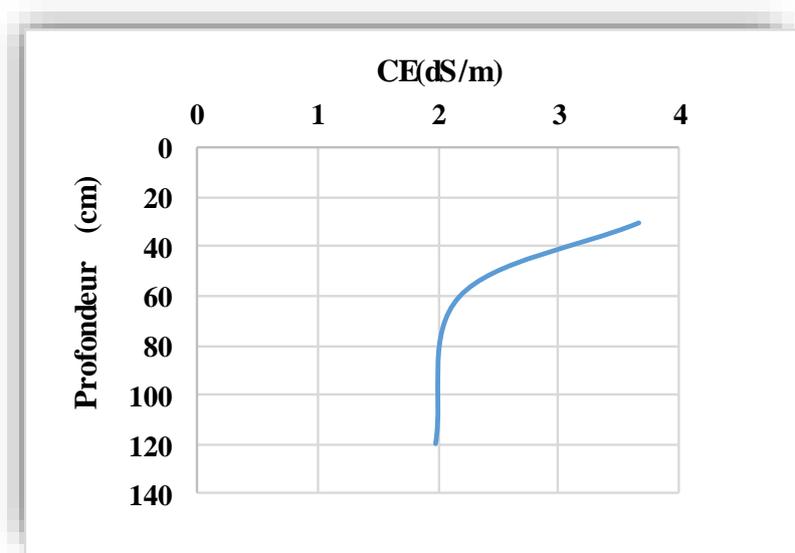


Figure 45 : Profil salin P8

### 1.1.9. Dynamique des sels dans le profil P9

La teneur de la salinité dans le premier horizon est de 2,51 dS/m ce qui exprime que le sol est très salé. Peu salé dans le deuxième horizon 1,68 dS/m. Il est salé dans le troisième horizon 2,35 dS/m (Fig. 46).

Selon la classification des profils salins de SERVANT (1978), le profil salin P9 est de type (A), caractérisé par un maximum de salinité dans la couche superficielle.

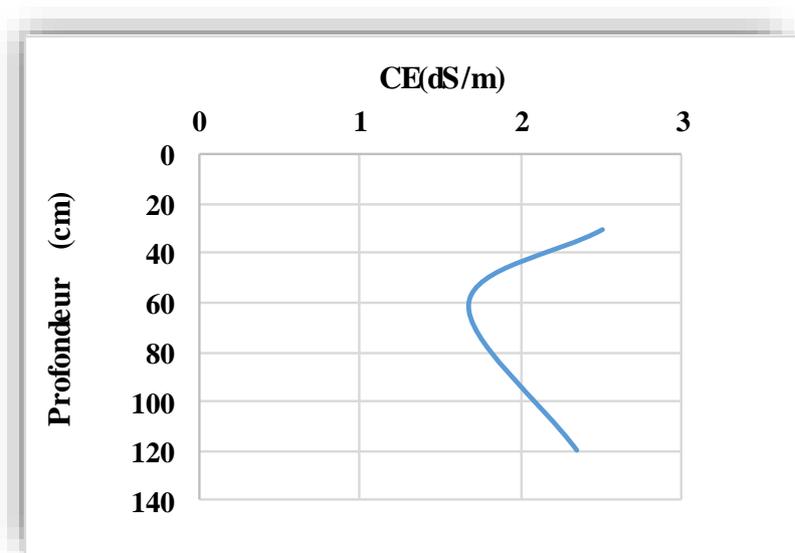


Figure 46 : Profil salin P9

### 1.1.10. Dynamique des sels dans le profil P10

D'après la figure 47, Le sol du profil P10 est peu salé dans l'horizon P10H1(1,49 dS/m). Il est salé dans les deux autres horizons P10H2 (2,15 dS/m), P10H3 (2,12 dS/m).

Selon la classification des profils salins de SERVANT (1978), le profil salin P2 est de type (B), caractérisé par un maximum de salinité dans la couche médiane.

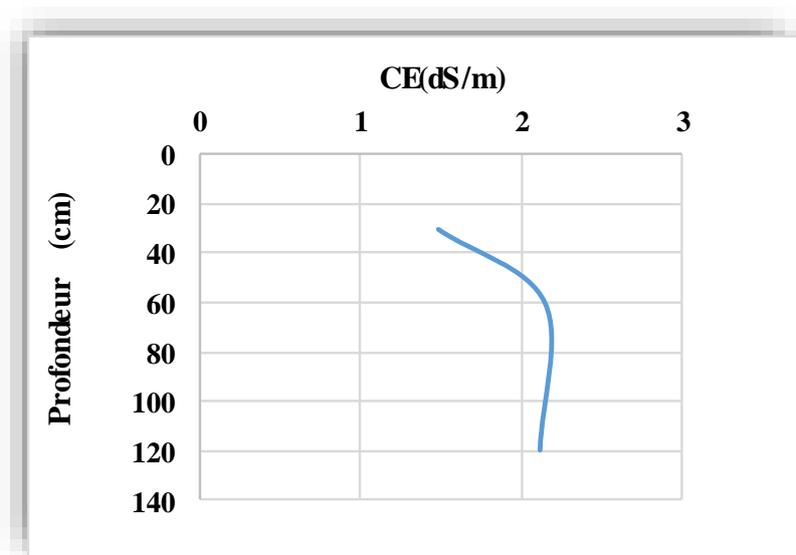


Figure 47 : Profil salin P10

### 1.1.11. Dynamique des sels dans le profil P11

Au vu des résultats de la figure (48), il ressort que le sol appartenant à ce profil est salé dans les deux premier les horizons (2,15 dS/m, 2,05 dS/m). Il est peu salé dans le troisième horizon (1,93 dS/m).

Selon la classification des profils salins de SERVANT (1978), le profil salin P9 est de type (A), caractérisé par un maximum de salinité dans la couche superficielle.

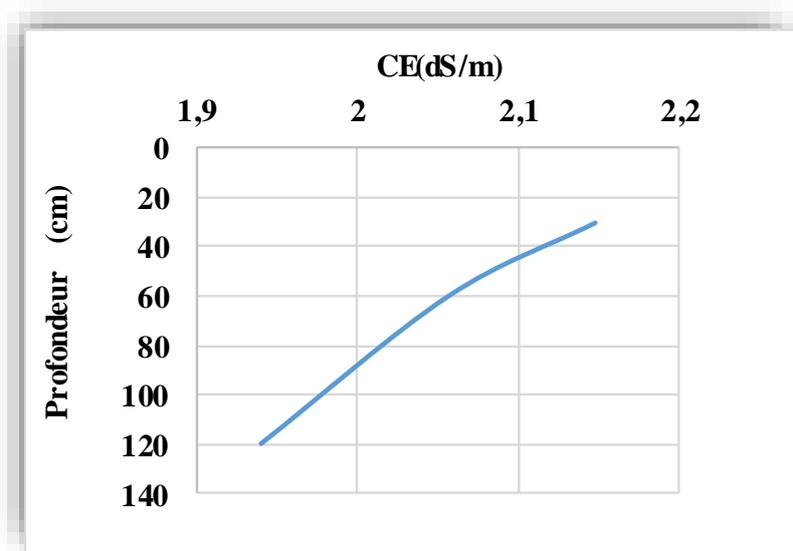


Figure 48 : Profil salin P11

### 1.1.12. Dynamique des sels dans le profil P12

L'analyse de la conductivité électrique du sol des horizons du profil P12 a montré que la salinité du sol varie de peu salé pour les horizons P12H1 (1 dS/m), P12H2 (1,33 dS/m) à salé pour l'horizon P12H3 (2,17 dS/m). L'allure du profil salin P12 est montrée dans la figure (49).

Selon la classification des profils salins de SERVANT (1978), le profil salin P1 est de type (D), caractérisé par un maximum de salinité en profondeur

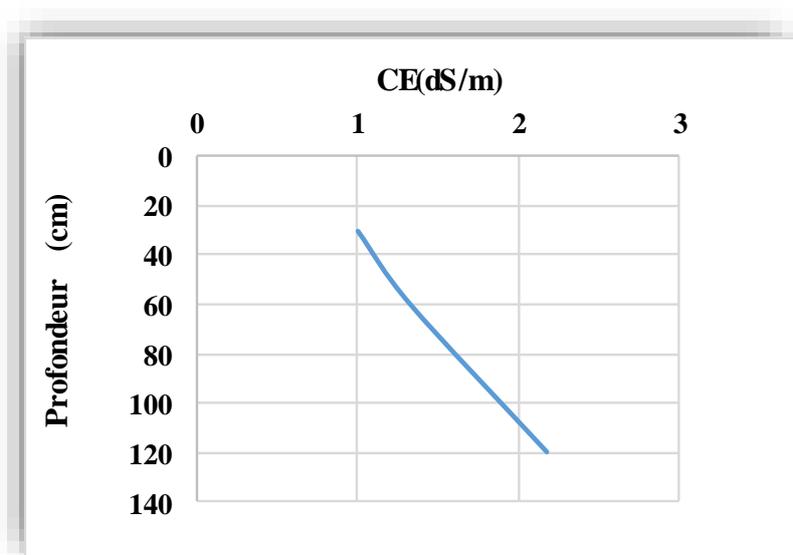


Figure 49 : Profil salin P12

### 1.1.13. Dynamique des sels dans le profil P13

Au vu des résultats de la figure (50), il ressort que le premier horizon est de 2,44 dS/m ce qui exprime que le sol est très salé à peu salé pour le deuxième et le troisième horizon (1,77 dS/m. 1,91 dS/m).

Selon la classification des profils salins de SERVANT (1978), le profil salin P3 est de type (A), caractérisé par un maximum de salinité dans la couche superficielle.

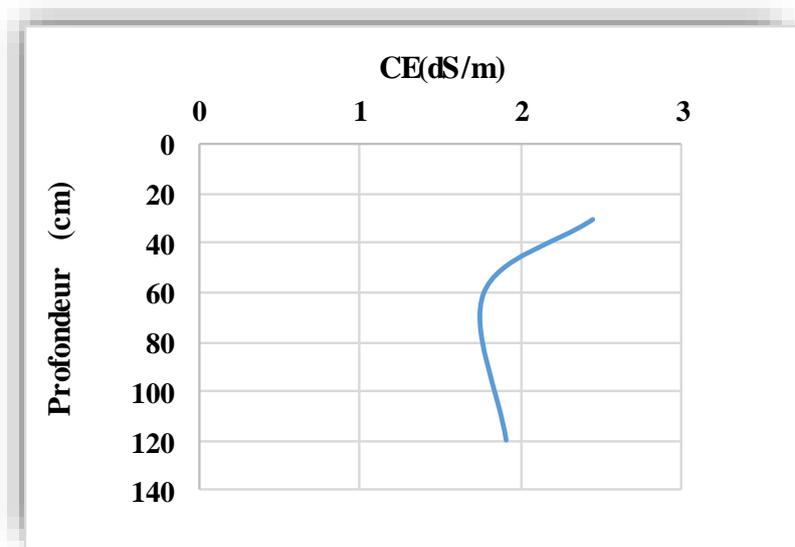


Figure 50 : Profil salin P13

### 1.1.14. Dynamique des sels dans le profil P14

L'analyse de la conductivité électrique du sol des horizons du profil P14 a montré que l'horizons P14H1 est très salés avec une CE à 25°C de 20,65 dS/m. salé pour l'horizon P14H2, 1,77 dS/m. peu salé pour l'horizon P14H3 1,91 dS/m. L'allure du profil salin P14 est montrée dans la figure (51).

Selon la classification des profils salins de SERVANT (1978), le profil salin P14 est de type (A), caractérisé par un maximum de salinité dans la couche superficielle.

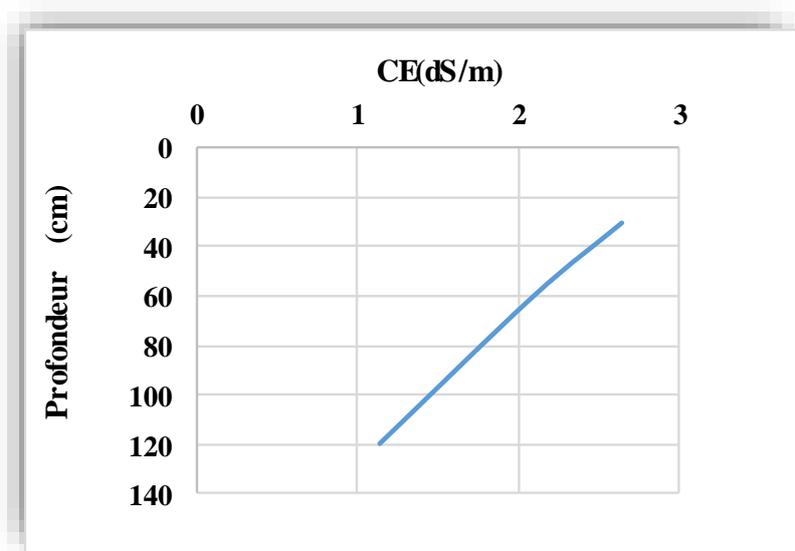


Figure 51 : Profil salin P14

### 1.1.15. Dynamique des sels dans le profil P15

Selon la figure 52, le sol des horizons du profil P15 a montré que la salinité du sol varie de très salé pour l'horizon P15H1 (3,41 dS/m), est salé pour les horizons P15H2 (2,03 dS/m), P15H3 (2,06 dS/m).

Selon la classification des profils salins de SERVANT (1978), le profil salin P15 est de type (A), caractérisé par un maximum de salinité dans la couche superficielle.

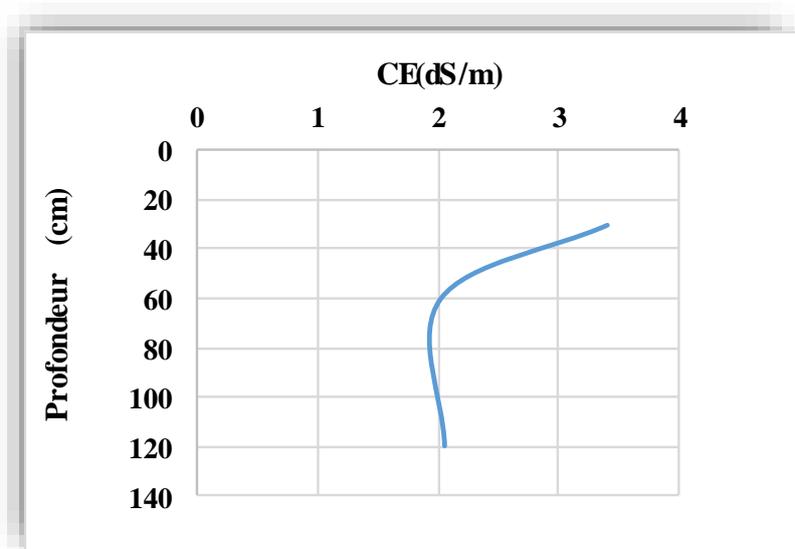


Figure 52 : Profil salin P15

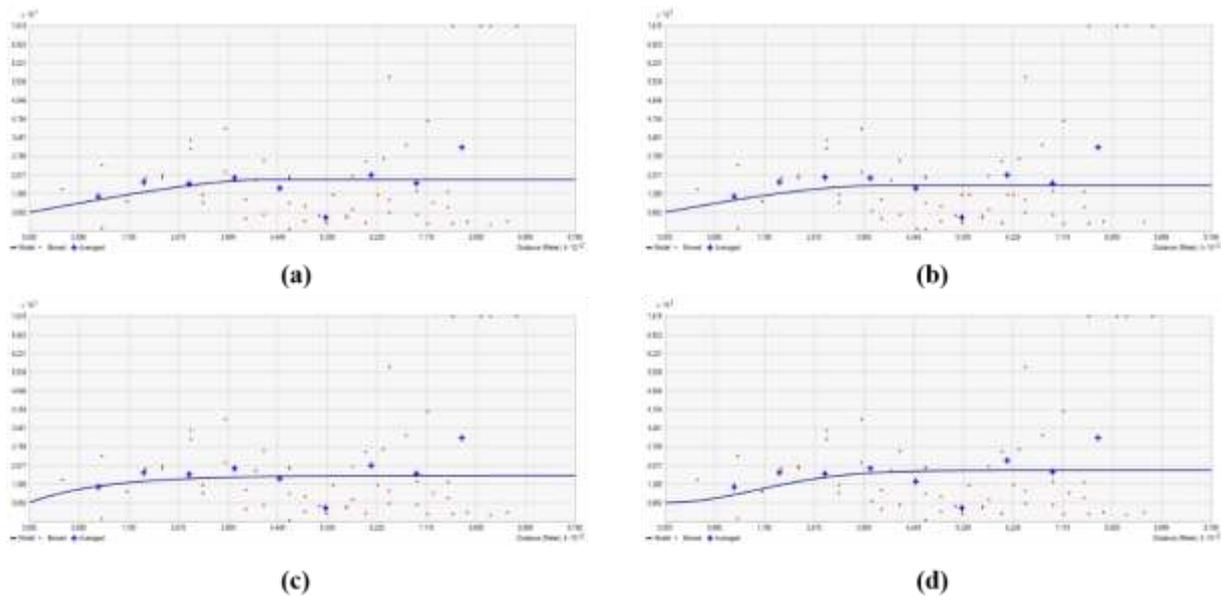
## 2. Modélisation géostatistique de la variabilité spatiale de la salinité du sol

Quatre modèles sont utilisés : circulaire, sphérique, exponentiel et gaussien suivie d'une validation croisée afin de choisir le meilleur modèle de variogramme qui sera utilisé pour la réalisation des cartes de variabilité spatiale par krigeage.

### 2. 1. Modélisation géostatistique de la salinité dans l'horizon 1

#### 2.1.1. Analyse variographique

La figure 53, montre les variogrammes ajustés aux modèles (circulaire, sphérique, exponentiel et gaussien).



**Figure 53 :** Variogrammes expérimentaux de la salinité dans l'horizon 1. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien.

D'après la figure 53, Le variogramme ajusté au model circulaire a un palier de 0,121 et une portée de 400 m, avec un effet de pépité est de l'ordre de 0,071. Le model sphérique à un palier de 0,099, une portée de 400 m et un effet de pépité égal à 0,071. La représentation de l'exponentiel a révélé un palier de 0,111, une portée de 400 m et un effet de pépité de 0,071. Tandis que, le variogramme gaussien présente un palier de 0,121, une portée de 400 m avec un effet de pépité de 0,071.

Les équations des modèles des variogramms expérimentaux de la salinité du sol dans l'horizon 1, sont écrits de la façon suivante :

- ✓ **Circulaire** :  $\gamma(h) = 0,071 + 0,05 \left( 1 - \left( \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{h}{400} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 400} \sqrt{1 - \left( \frac{h}{400} \right)^2} \right)$
- ✓ **Sphérique** :  $\gamma(h) = 0,071 + 0,028 \left( 1,5 \left( \frac{h}{400} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{400} \right)^3 \right)$
- ✓ **Exponentiel** :  $\gamma(h) = 0,071 + 0,04 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{400} \right) \right)$
- ✓ **Gaussien** :  $\gamma(h) = 0,071 + 0,05 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{400} \right)^2 \right)$

### 2.1.2. Validation croisée

Le tableau 13, représente synthétiquement les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme de la salinité du sol dans l'horizon 1.

**Tableau 13** : Validation croisée des variogrammes de la salinité dans l'horizon 1.

CE H1	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	15	15	15	15
Erreur moyenne de prédiction (ME)	0,00027	-0,00311	-0,00293	0,00079
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	1,08803	1,09524	1,06767	1,13983
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,11232	-0,11808	-0,08745	-0,17046
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	1,09513	1,11013	1,00695	1,27727
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	1,02698	1,01618	1,06233	0,96545

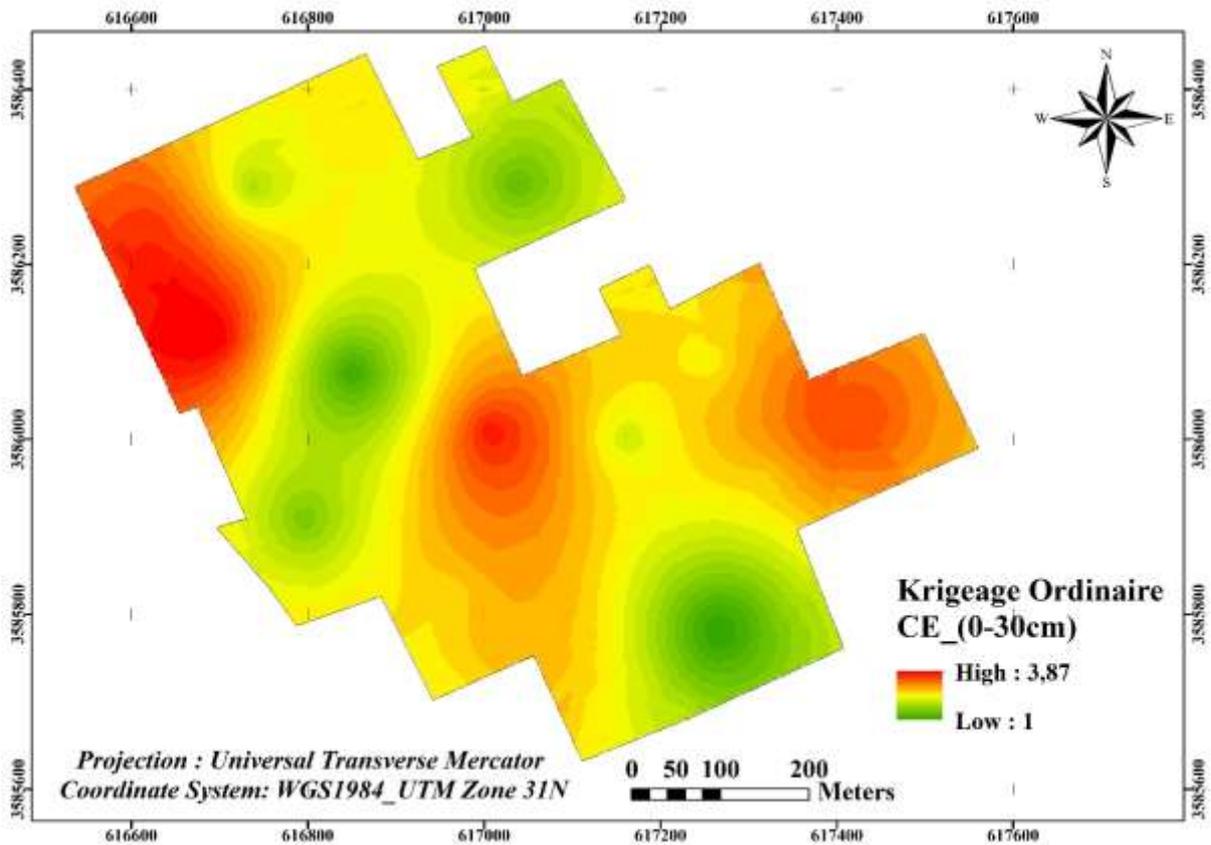
Selon le tableau (13) ci-dessus, les valeurs de la validation croisée sont raisonnables ce qui signifie que les quatre modèles sont optimaux, tous les modèles ont :

- Une erreur moyenne de prédiction (ME) proche du 0
- Une erreur moyenne standardisée (MSE) proche du 0
- Une erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE) proche du 1

Le modèle le plus fiable est le modèle exponentiel car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche à l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

### 2.1.3. Cartographie par krigeage

Les résultats de la validation croisée montrent que le modèle exponentiel est le meilleur choix. Ce modèle a été utilisée pour établir la carte de la variabilité spatiale de la salinité du sol dans l'horizon 1 par krigeage.



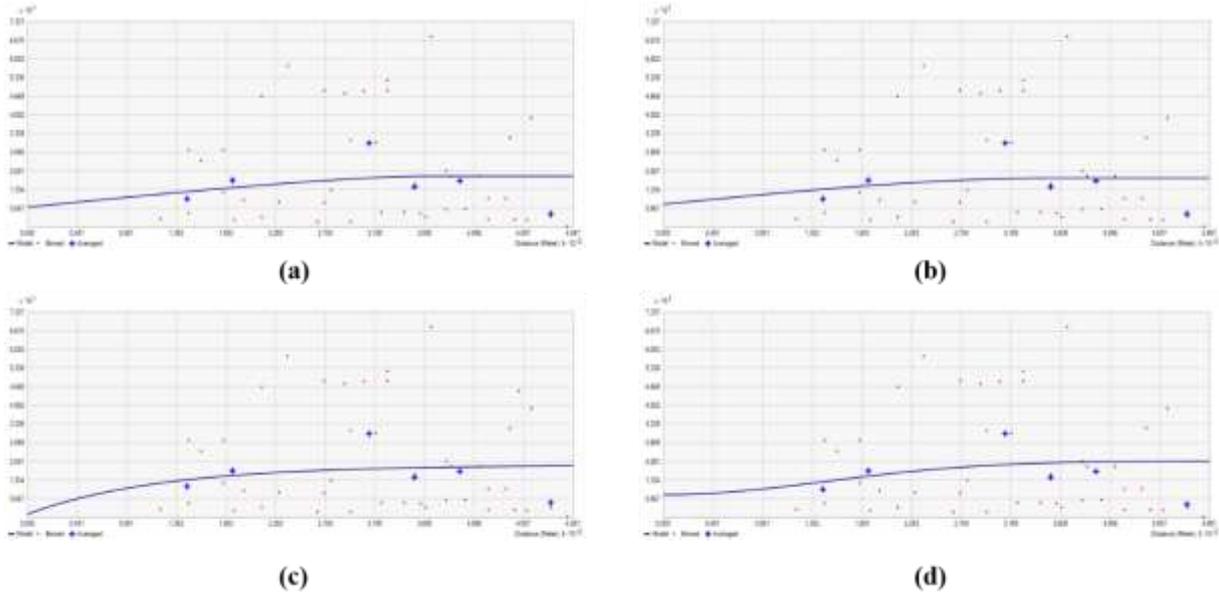
**Figure 54 :** Carte de variabilité spatiale de la salinité dans l'horizon 1.

La carte (Fig. 54) montre une distribution spatiale plus hétérogène de la salinité du sol dans l'horizon 1. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans les deux extrémités est et ouest aussi au centre de la palmeraie. Le sol est peu salé à très salé dans tout l'horizon avec des valeurs variant de 1 à 3,87 dS/m. La variation de la salinité du sol dans l'horizon 1 est élevée, avec un coefficient de variation de 36,50%.

## 2.2. Modélisation géostatistique de la salinité dans l'horizon 2

### 2.2.1. Analyse variographique

La figure 55, montre les variogrammes ajustés aux modèles (circulaire, sphérique, exponentiel et gaussien).



**Figure 55 :** Variogrammes expérimentaux de la salinité dans l’horizon 2. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien.

D’après la figure 55, Le variogramme ajusté au model circulaire a un palier de 0,111 et une portée de 360,52 m, avec un effet de pépité est de l’ordre de 0,071. Le model sphérique (palier de 0,094, une portée de 360,52 m et un effet de pépité égal à 0,081. La représentation de l’exponentiel a révélé un palier de 0,175, une portée de 360,52 m et un effet de pépité de 0,012. Tandis que, le variogramme gaussien présente un palier de 0,121, une portée de 360,52 m avec un effet de pépité de 0,081.

Les équations des modèles des variogramms expérimentaux de la salinité du sol dans l’horizon 2, sont écrits de la façon suivante :

✓ **Circulaire :**  $\gamma(h) = 0,071 + 0,04 \left( 1 - \left( \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{h}{360,52} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 360,52} \sqrt{1 - \left( \frac{h}{360,52} \right)^2} \right)$

✓ **Sphérique :**  $\gamma(h) = 0,081 + 0,013 \left( 1,5 \left( \frac{h}{360,52} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{360,52} \right)^3 \right)$

✓ **Exponentiel :**  $\gamma(h) = 0,012 + 0,163 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{360,52} \right) \right)$

✓ **Gaussien :**  $\gamma(h) = 0,081 + 0,04 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{360,52} \right)^2 \right)$

### 2.2.2. Validation croisée

Le tableau 14, représente synthétiquement les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme de la salinité du sol dans l'horizon 2.

**Tableau 14 :** Validation croisée des variogrammes de la salinité dans l'horizon 2.

CE H2	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	15	15	15	15
Erreur moyenne de prédiction (ME)	-0,00719	-0,00114	-0,00281	-0,00858
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,56821	0,58103	0,59931	0,55281
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,06268	-0,05942	-0,07335	-0,05486
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	0,85353	0,83243	0,86586	0,84136
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	0,73802	0,76768	0,75377	0,73409

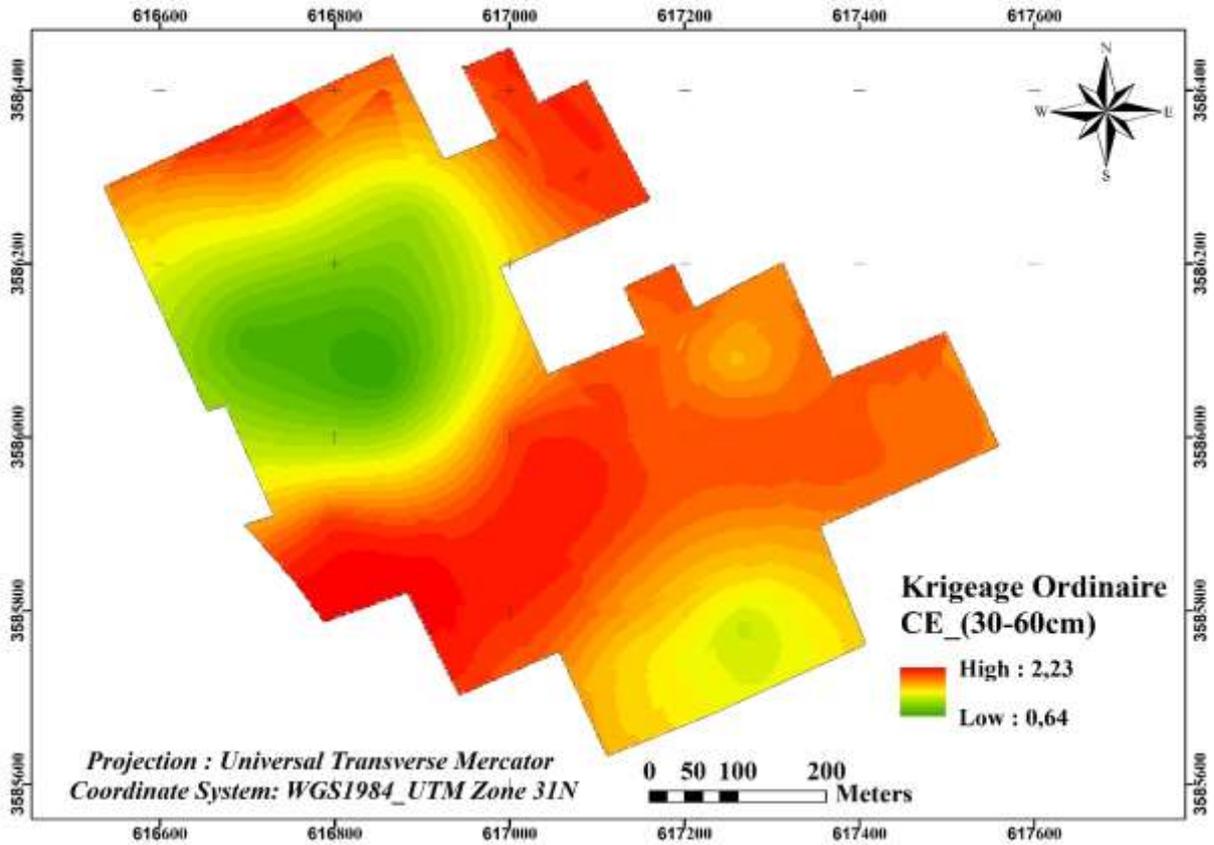
Selon le tableau (14) ci-dessus, les valeurs de la validation croisée sont raisonnables ce qui signifie que les quatre modèles sont optimaux, tous les modèles ont :

- Une erreur moyenne de prédiction (ME) proche du 0
- Une erreur moyenne standardisée (MSE) proche du 0
- Une erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE) proche du 1

Le modèle le plus fiable est le modèle exponentiel car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche à l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

### 2.2.3. Cartographie par krigeage

Les résultats de la validation croisée montrent que le modèle exponentiel est le meilleur choix. Ce modèle a été utilisée pour établir la carte de la variabilité spatiale de la salinité du sol dans l'horizon 2 par krigeage.



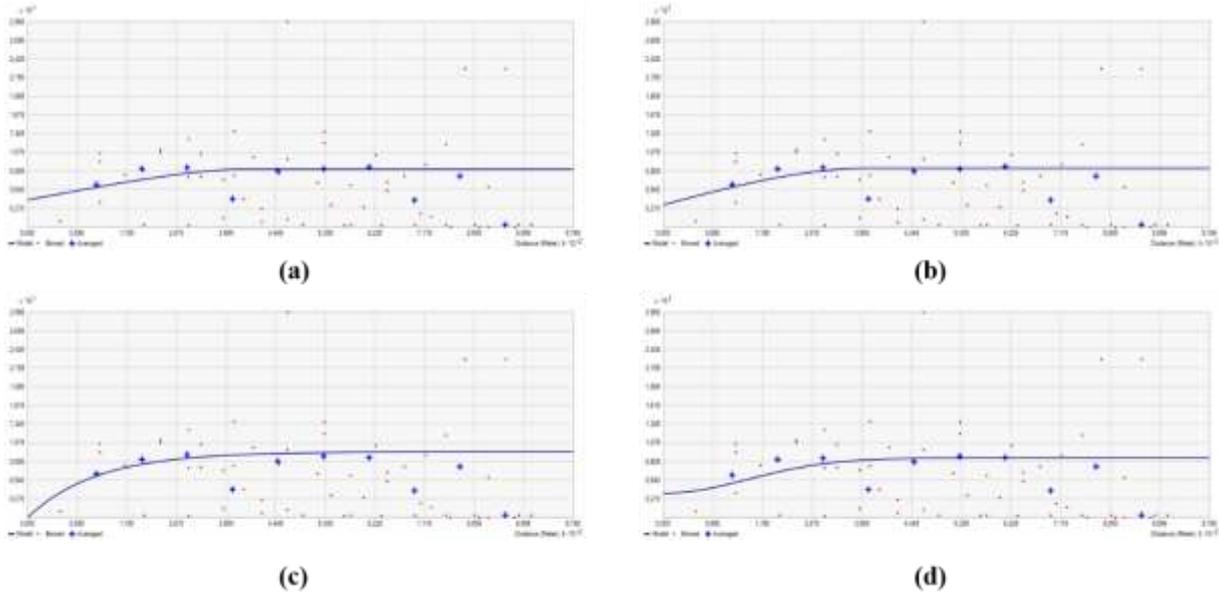
**Figure 56 :** Carte de variabilité spatiale de la salinité dans l'horizon 2.

La carte (Fig. 56) montre une variation modérée de la salinité dans l'horizon 2, avec un coefficient de variation de 29,96 %. Le sol est peu salé à salé dans l'horizon, la conductivité électrique varie de 0,64 à 2,23 dS/m avec une forte concentration de la salinité autour de toute la palmeraie. Les valeurs les plus faibles sont situées dans l'ouest.

## 2. 3. Modélisation géostatistique de la salinité dans l'horizon 3

### 2.3.1. Analyse variographique

La figure 57, montre les variogrammes ajustés aux modèles (circulaire, sphérique, exponentiel et gaussien).



**Figure 57 :** Variogrammes expérimentaux de la salinité dans l’horizon 3. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien.

D’après la figure 57, Le variogramme ajusté au model circulaire a un palier de 0,044 et une portée de 370,27 m, avec un effet de pépite est de l’ordre de 0,039. Le model sphérique (palier de 0,053, une portée de 370,27 m et un effet de pépite égal à 0,032. La représentation de l’exponentiel a révélé un palier de 0,095, une portée de 370,27 m et ne présente pas un effet de pépite. Tandis que, le variogramme gaussien présente un palier de 0,051, une portée de 370,27 m avec un effet de pépite de 0,035.

Les équations des modèles des variogramms expérimentaux de la salinité du sol dans l’horizon 3, sont écrits de la façon suivante :

✓ **Circulaire** :  $\gamma(h) = 0,039 + 0,005 \left( 1 - \left( \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{h}{370,27} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 370,27} \sqrt{1 - \left( \frac{h}{370,27} \right)^2} \right)$

✓ **Sphérique** :  $\gamma(h) = 0,032 + 0,021 \left( 1,5 \left( \frac{h}{370,27} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{370,27} \right)^3 \right)$

✓ **Exponentiel** :  $\gamma(h) = 0,095 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{370,27} \right) \right)$

✓ **Gaussien** :  $\gamma(h) = 0,035 + 0,016 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{370,27} \right)^2 \right)$

### 2.3.2. Validation croisée

Le tableau 15, représente synthétiquement les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme de la salinité du sol dans l'horizon 3.

**Tableau 15** : Validation croisée des variogrammes de la salinité dans l'horizon 3.

CE H3	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	15	15	15	15
Erreur moyenne de prédiction (ME)	-0,02519	-0,02521	-0,02686	-0,03192
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,44081	0,44141	0,43971	0,43945
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,05835	-0,06003	-0,06319	-0,07421
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	0,74025	0,73417	0,76551	0,80134
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	0,57457	0,57691	0,56071	0,54088

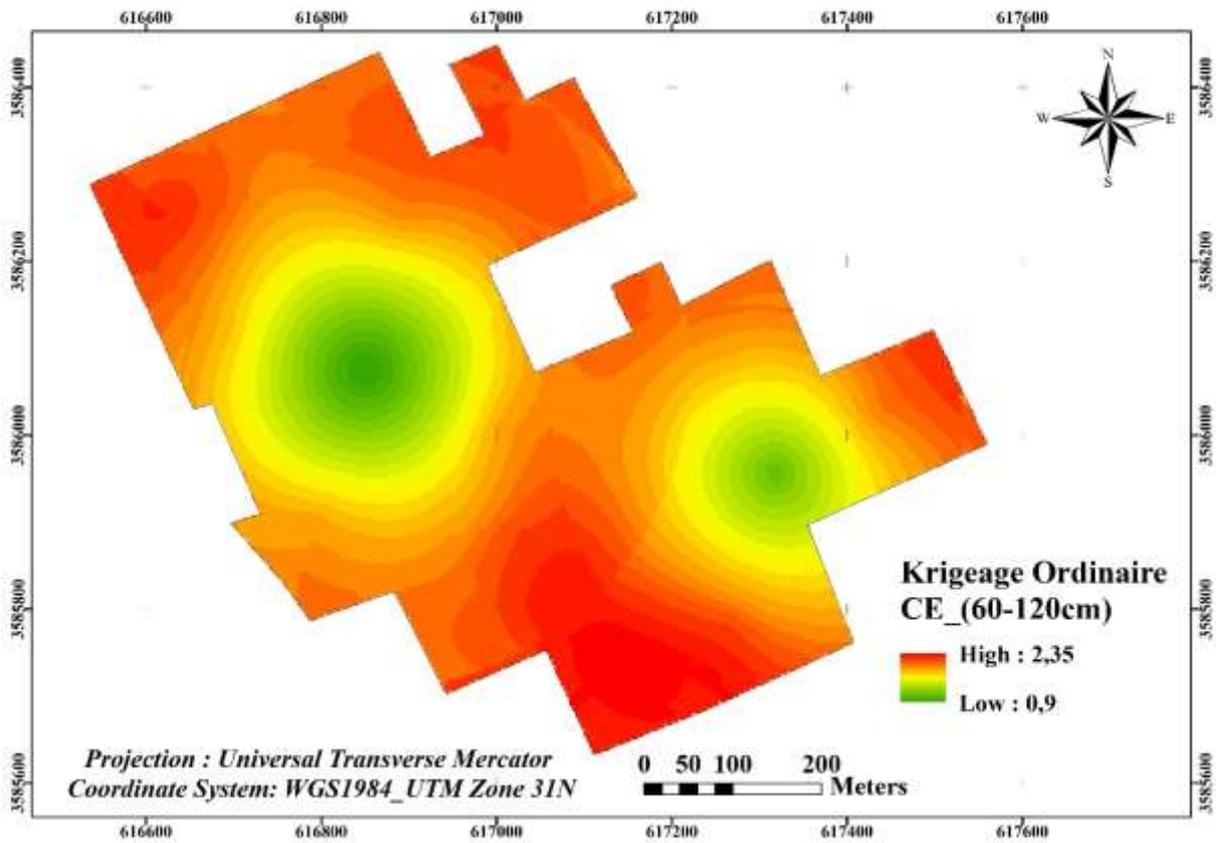
Selon le tableau (15) ci-dessus, les valeurs de la validation croisée sont raisonnables ce qui signifie que les quatre modèles sont optimaux, tous les modèles ont :

- Une erreur moyenne de prédiction (ME) proche du 0
- Une erreur moyenne standardisée (MSE) proche du 0
- Une erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE) proche du 1

Le modèle le plus fiable est le modèle gaussien car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche à l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

### 2.3.3. Cartographie par krigeage

Les résultats de la validation croisée montrent que le modèle gaussien est le meilleur choix. Ce modèle a été utilisée pour établir la carte de la variabilité spatiale de la salinité du sol dans l'horizon 3 par krigeage.



**Figure 58 :** Carte de variabilité spatiale de la salinité dans l'horizon 3.

La carte (Fig. 58) montre les valeurs les plus faibles de la salinité sont enregistrées dans le centre et l'est de la palmeraie. Tandis que les valeurs les plus élevés sont enregistrées autour toute la palmeraie. Le sol est peu salé a salé dans toute l'horizon avec des valeurs variant de 0,9 à 2,35 dS/m. Le coefficient de variation est de l'ordre de 20,22 % dans l'horizon 3, ce qui montre une variation spatiale modérée.

### 3. Discussions

Les régions climatiques désertiques sont idéales pour l'extension des caractères de salinité des sols. Ainsi, les sols de la zone saharienne d'Algérie contiennent des quantités importantes de sels solubles (BOUMARAF, 2013). D'après HALITIM (1988), dans les régions arides, les sols salés représentent environ 25% de la surface cartographiée.

L'analyse des profils salins montre que les différents sols de l'oasis appartiennent aux classes des sols peu salés à très salés. La conductivité électrique présente des valeurs varie de 1 à 3,87 dS/m dans l'horizon superficiel, de 0,64 à 2,23 dS/m dans l'horizon de moyenne profondeur et de 0,90 à 2,35 dS/m dans L'horizon profond. Ce qui est due principalement à l'action de l'irrigation continue par une eau salée, sachant que la salinité de ce dernier varie de 1,65 à 2,35 dS/m à 25°C dans la région de Zelfana (Ouali et al., 2007). Ces eaux appartiennent à la classe C3, caractérisées par une forte salinité. Elles sont

inutilisables même avec un bon drainage (DURAND, 1958). Ces résultats sont comparables à ceux trouvés dans les sols du périmètre irrigué (MASMOUDI, 2012 ; BENBRAHIM, 2006 ; DEKHINAT et *al.*, 2010 ; HAMEL, 2013 ; GUESSOUM, 2020 ; NADHEM et *al.*, 2021). La salinité de l'eau d'irrigation influence l'accumulation des sels solubles dans le sol (GHASSEMI et *al.*, 1995 ; WARRENCE et *al.*, 2003 ; ZIZA, 2006). Plusieurs chercheurs signalent que cette salinité provienne essentiellement de l'eau d'irrigation (AUBERT, 1975 ; HULLIN, 1983 ; BOIVIN et *al.*, 1989 ; DAOUD et HALITIM, 1994 ; CHERVERRY et ROBERT, 1998 ; CONDOM, 2000).

Les profils salins réalisés présentent des allures diverses. Selon la classification des profils salins de SERVANT. (1975), la majorité des profils (P1, P2, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P11, P13, P14, P15) sont ascendants, ce type de profil à gradient de salinité dirigé vers le haut avec un maximum en surface. Cette concentration se justifie par l'accumulation croissante des sels par l'irrigation avec des eaux salées dans les couches supérieures (SINGH, 1994 ; SAIDI, 2004 ; ZIZA, 2006). Des situations pareilles ont été signalées en Algérie à Ouargla par IDDER et *al.* (2014), en Chine par YANG et *al.* (2019) et en Tunisie par HACHICHA et *al.* (1997). Les flux hydriques et la diffusion ionique en phase liquide sont les principaux vecteurs de déplacement de sels dans et sur les sols (GRÜNBERGER, 2015). La montée des sels à la surface est liée à la très forte évapotranspiration en milieu saharien avec le sol sableux qui facilite la mobilisation des sels par remontée capillaire (SERVANT, 1978 ; BERKAL, 2006).

D'autre part, les profils (P3, P10) sont de type B, caractérisés par un maximum de salinité dans la couche médiane (SERVANT, 1975). Il s'agit dans notre cas d'une alternance entre une dynamique ascendante et descendante des sels, c'est à dire une désalinisation temporaire suite à l'entraînement des sels par l'irrigation et la remontée capillaire de ces derniers après irrigation. D'après DUCHAUFFOUR (1977), l'accumulation des sels dans les horizons sub-surface est probablement due à une dynamique descendante (lixiviations) des sels dans les couches de surfaces sous l'action de l'irrigation (BENBRAHIM, 2006). L'allure de profil salin (P12) montre une dynamique descendante (type D), caractérisé par un maximum en profondeur, cela est forcément due à lixiviation des sels par l'eau d'irrigation (MASSOUMI, 1968 ; SERVANT, 1975). Ce résultat se rapproche de celui trouvé par ASKRI et BOUHLILA (2010) en Tunisie.

On note que les fortes concentrations de salinité sont enregistré dans les profils (P1, P2, P8, P15), cela se traduit par la proximité de ces derniers au drainage. En outre, la faible salinité observée au centre et à l'ouest de la palmeraie pourrait être expliquée par le fait que cette partie est plus proche du drainage. Aussi à la différence d'altitude de l'amont à l'aval, ou la salinité a été observée au Sud-est qui ont mis en relation avec la sens d'écoulement des eaux d'irrigation et la présence d'un cours naturel de drainage combiné avec une pente légère du terrain.

La modélisation géostatistique a indiqué les meilleurs modèles théoriques ajustés pour les trois profondeurs de la salinité du sol ainsi que différents niveaux de dépendance spatiale. La validation croisée a montré que les modèles des variogrammes les plus fiables sont l'exponentiel pour l'horizon 1 et 2, Ce résultat se rapproche de celui trouvé par (YANG *et al.*, 2011 ; ABDENNOUR, 2021 ; GUNAL, 2021 ; KILIC *et al.*,2012). Le modèle gaussien est le mieux pour l'horizon 3, ce qui est en accord avec l'étude de (MASHAYEKHI *et al.*, 2007 ; GUNAL, 2021) (Tabl. 16).

**Tableau 16 :** paramètres des modèles de variogramme les mieux adaptés pour la salinité

	<b>Modèle</b>	<b>Pépite (C0)</b>	<b>Seuil (C0+C)</b>	<b>Portée (m)</b>	<b>Rapport %</b>
<b>CE H1</b>	Exponentiel	0,071	0,111	400	63,96
<b>CE H2</b>	Exponentiel	0,012	0,175	360,52	6.86
<b>CE H3</b>	Gaussien	0,035	0,051	370,27	68,63

La dépendance spatiale de profil salin dans l'horizon 1 et 3 est modéré (25% - 75%), ce résultat est similaire à celui trouvé par EMADI *et al.* (2008) et BENBRAHIM, (2018). Tandis que la salinité dans l'horizon 2 est fortement dépendant de l'espace ( $\leq 25\%$ ). Cela indique que la variation était principalement contrôlée par des facteurs structurels ou internes, tels que le climat, la roche-mère, la topographie et la géologie, et que la partie profonde du sol, en particulier, n'est pas soumise à l'influence anthropique (AOUIDANE, 2017). Ainsi AKIŞ (2014) et BENBRAHIM (2018) ont montré que la dépendance spatiale faible de la salinité du sol est liée à un effet de pépite élevée, donc la dépendance spatiale forte de la salinité est liée à un effet de pépite faible, sachant que l'effet de pépite est de 0,012 et est relativement plus petit de celui des autres horizons.

L'analyse des variogrammes a montré un effet de pépite très faible, indiquant une faible variation de la salinité à des distances inférieures au pas d'échantillonnage (200 m) dans les trois horizons. Ces résultats se rapprochent de ceux trouvés pour la salinité du sol par (YANG *et al.*, 2011 ; GUNAL, 2021). Un échantillonnage supplémentaire à de plus petites distances dans la palmeraie, choses qui sont négligeables dans la variation de la salinité du sol (BENBRAHIM, 2018). Toutes les valeurs de la portée ont été supérieures à 200 m pour les trois couches de la salinité du sol (tableau 15), ce qui montre que les mesures de la conductivité électrique sont statistiquement dépendantes. D'après LIU *et al.* (2011) ; RANJBAR et JALALI (2016), les échantillons séparés par des distances plus proches de la portée sont spatialement liés.

L'analyse de la variabilité spatiale de la conductivité électrique de chaque couche révèle des coefficients de variations élevée pour l'horizon 1(36,50%). Les autres couches (2,3) ont des CV plus modéré (29,96%, 20,22%). La carte d'interpolation pour la distribution des valeurs de salinité dans

chaque couche de sol montre des schémas assez similaires. La salinisation des sols était élevée dans le nord-ouest, le nord-est et le sud-est de la zone d'étude, alors qu'elle était relativement faible dans le coin sud-ouest. L'accumulation de sels dans la zone d'étude peut être attribuée à la direction de la pente dominante dans la zone d'étude (AKRAMKHANOV et *al.*, 2011 ; GUNAL, 2021), Aussi par la proximité ou l'éloignement des profils au réseau de drainage.

## Chapitre VI. Etude de la variabilité spatiale et verticale du calcaire total et actif du sol

Les sols calcaires sont très fréquents dans les régions méditerranéennes et désertiques, notamment en Algérie, où on les rencontre aussi bien dans les régions semi-arides et arides (Halitim, 1988).

Le constituant essentiel du calcaire est le carbonate de calcium, cristallisé sous forme de calcite à symétrie rhomboédrique (DEO SHORTA, 1979 ; DJILI et DAOUD, 1999 ; DJILI, 2000). Un sol calcaire est un sol qui contient surtout ou une partie de son épaisseur, du carbonate du calcium libre dans la terre fine ou pour le moins dans la fraction grossière, le calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ) doit être en quantité suffisante pour présenter une effervescence visible, sous l'action de l'acide chlorhydrique à froid (TIR, 2007)

Les sols calcaires contenant du calcaire actif, le calcaire actif est la fraction du calcaire total susceptible de se dissoudre facilement et rapidement dans la solution du sol. La présence de calcaire actif peut provoquer un risque de chlorose ferrique en horticulture (fraise), en arboriculture ou en viticulture si les sols sont pauvres en fer libre (INRA, 2012).

L'étude de la variabilité spatiale du taux du calcaire total déterminé par la méthode de calcimètre de Bernard, le taux du calcaire actif par la propriété de l'oxalate de calcium est effectuée sur une profondeur de 0-120 cm divisés en trois horizons avec un nombre de 15 profils.

### 1. Etude du taux de calcaire total et actif du sol

Les résultats d'analyses du taux de calcaire total dans la zone étudiée sont présentés synthétiquement dans le tableau 17.

**Tableau 17** : Statistiques descriptives du taux de calcaire total

<b>CaCO3 total (%)</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>H3</b>
<b>Nombre d'échantillons</b>	15	15	15
<b>Maximum</b>	15,62	30,94	27,71
<b>Minimum</b>	5,10	9,37	2,08
<b>Moyenne</b>	11,52	18,51	10,5
<b>Écart-type</b>	3,01	5,90	8,18
<b>Coefficient de variation</b>	26,10	31,85	77,94

Le tableau 17 montre que les taux de calcaire total extrêmes se situent entre 2,08 à 9,37 % pour les minima et 15,62 à 30,94 % pour le maxima. Les taux moyens de calcaire total varient entre 10,5 à 18,51. Ces résultats montrent que les sols étudiés sont modérément calcaires et que la distribution de ce

paramètre est hétérogène dans l'espace et dans le profil, le coefficient de variation est modéré à très élevée ( $26,10 < CV \% < 77,94$ ).

Les résultats d'analyses du taux de calcaire actif dans la zone étudiée sont présentés synthétiquement dans le tableau 18.

**Tableau 18** : Statistiques descriptives du taux de calcaire actif

CaCO3 actif (%)	H1	H2	H3
Nombre d'échantillons	15	15	15
Maximum	9,5	10,62	10,5
Minimum	2,25	4,87	2,25
Moyenne	6	6,92	6,86
Écart-type	2,06	1,60	2,62
Coefficient de variation	34,31	23,09	38,20

Le tableau 18 montre que les taux de calcaire actif extrêmes se situent entre 9,5 à 10,62 % pour les maxima et 2,25 à 4,87 % pour le minima. Les taux moyens de calcaire actif varient très peu dans le profil, ils sont compris entre 6 et 6,92 %. Ces résultats suggèrent que les sols étudiés sont modérément calcaires et que la distribution spatiale de ce paramètre est modérée à élevée dans l'espace et dans le profil, avec un Coefficient de variation de ( $23,09 < CV \% < 38,20$ ).

## 1.1. Etude de la variation verticale du calcaire total et actif

### 1.1.1. Dynamique du calcaire total et actif dans le profil P1

La figure (59), illustre que le profil calcaire total et actif est caractérisée par un maximum dans la couche médiane.

Le sol appartenant à ce profil est modérément calcaire dans les trois horizons (14,89%, 15,94%, 6,25%), La teneur du calcaire actif dans le deuxième horizon est de 5,25% ce qui exprime que le sol est modérément calcaire. Le sol est peu calcaire dans les deux autres horizons (4,62%, 2,25%).

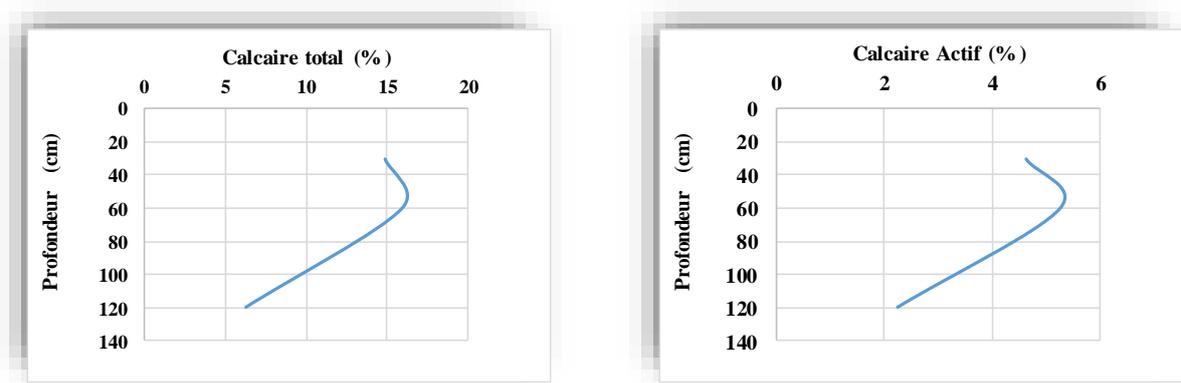


Figure 59 : Profil calcaire total et actif du P1

### 1.1.2. Dynamique du calcaire total et actif dans le profil P2

Au vu des résultats de la figure (60), il ressort que les deux profils suivent des allures différentes dont le profil calcaire total est spécifié par un maximum dans la couche médiane et le profil calcaire actif caractérisé par un maximum en profondeur.

Les trois horizons sont modérément calcaires (7,81%, 9,37%, 8,54%). La teneur du calcaire actif dans le premier horizon est de 2,25 % ce qui exprime que le sol est peu calcaire. Il est modérément calcaire dans les deux autres horizons (5,5%, 9,5%).

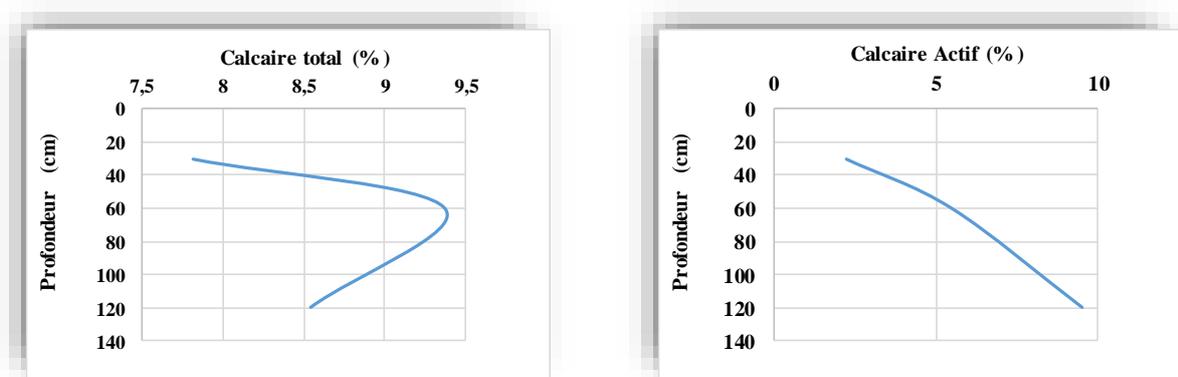


Figure 60 : Profil calcaire total et actif du P2

### 1.1.3. Dynamique du calcaire total et actif dans le profil P3

Selon la figure (61), le profil calcaire total et actif est caractérisé par un maximum dans la couche médiane.

Le sol est modérément calcaire avec un taux de 5,10% dans le premier horizon, de 9,58% dans l'horizon moyen et de 5,31% dans le troisième horizon. La teneur du calcaire actif dans le premier

horizon est de 4,5%, ce qui montre que le sol est peu calcaire. Il est modérément calcaire dans les deux autres horizons (6% et 5,75% respectivement).

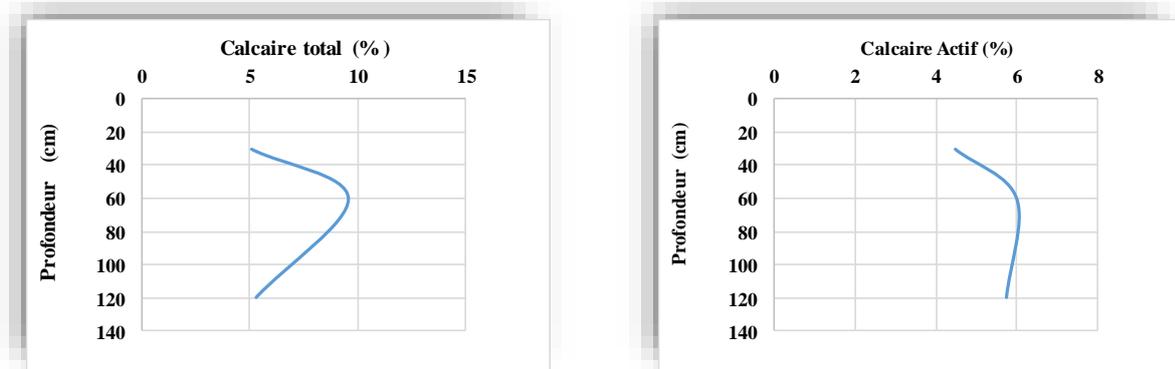


Figure 61 : Profil calcaire total et actif du P3

#### 1.1.4. Dynamique du calcaire total et actif dans le profil P4

D'après la figure (62), le profil calcaire total est caractérisé par un maximum dans la couche médiane, or que le profil calcaire actif est de type descendant caractériser par un maximum en profondeur.

Le sol est modérément calcaire avec un taux de 11,87% et de 16,56% dans les deux premiers horizons, peu calcaire dans le troisième horizon H2,08%. De point de vue calcaire actif, le sol est modérément calcaire avec des taux de l'ordre de 7%, 8%, 8,37% respectivement.

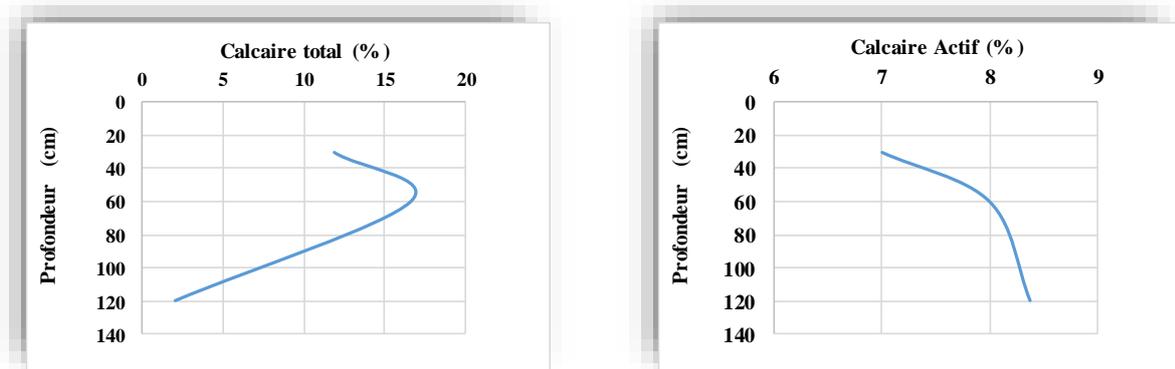


Figure 62 : Profil calcaire total et actif du P4

### 1.1.5. Dynamique du calcaire total et actif dans le profil P5

Selon la figure (63), le profil calcaire total et actif sont de type descendant, caractérisés par un maximum en profondeur.

Le sol appartenant à ce profil est modérément calcaire dans les trois horizons (13,75%, 16,77%, 19,48%). La teneur du calcaire actif dans le premier horizon est de 4,87% ce qui montre que le sol est peu calcaire. Il est modérément calcaire dans les deux autres horizons (5,25%. 5,62%).

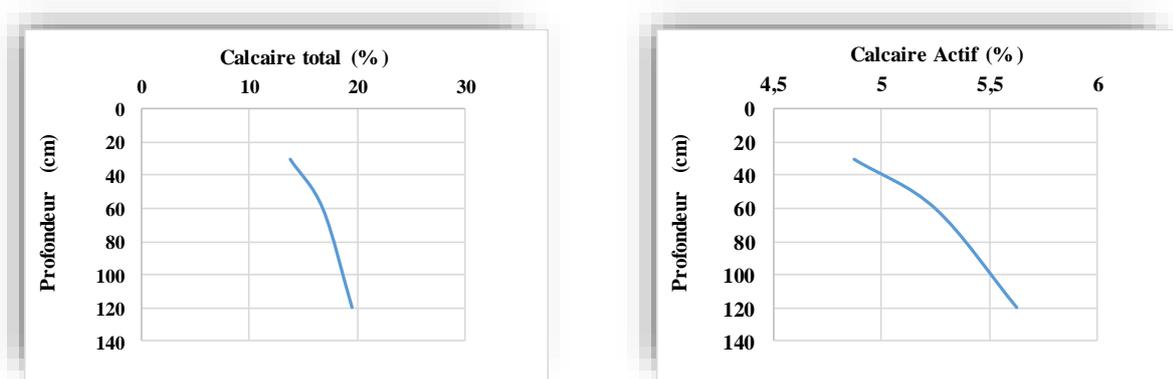


Figure 63 : Profil calcaire total et actif du P5

### 1.1.6. Dynamique du calcaire total et actif dans le profil P6

La figure (64), illustre que le profil calcaire total et actif est caractérisée par un maximum dans la couche médiane.

Les valeurs de calcaire total montrent que le sol est modérément calcaire dans les deux premiers horizons (15,62%, 20%) et peu calcaire dans le troisième horizon (3,64%). Le calcaire actif est modéré dans tous les horizons ( $9\% \leq \text{CaCO}_3 \leq 10,62\%$ ).

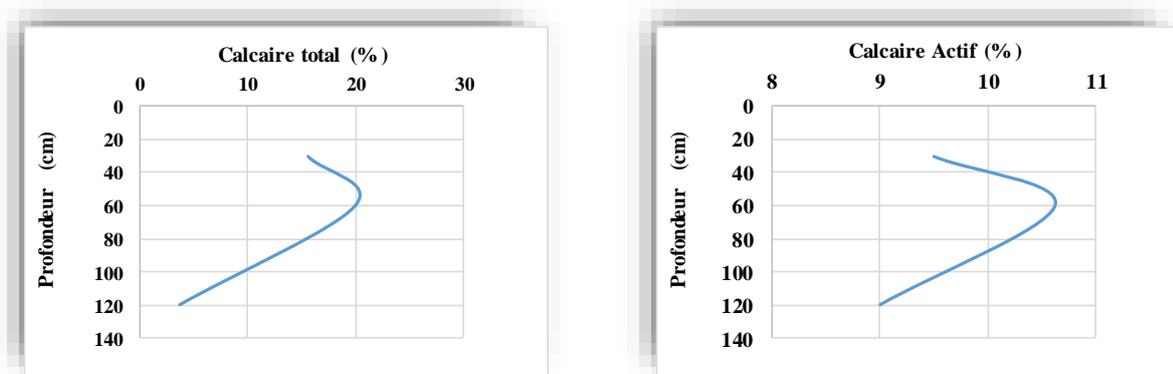


Figure 64 : Profil calcaire total et actif du P6

### 1.1.7. Dynamique du calcaire total et actif dans le profil P7

Au vu des résultats de la figure (65), il ressort que les deux profils suivent des allures différentes dont le profil calcaire total est spécifié par un maximum dans la couche médiane et le profil calcaire actif caractérisé par un maximum en profondeur.

Les trois horizons sont modérément calcaires (8,33%, 20,10%, 11,46%). Ils ont un calcaire actif modéré d'ordre 7,12%, 8,87%, 10,5% respectivement.

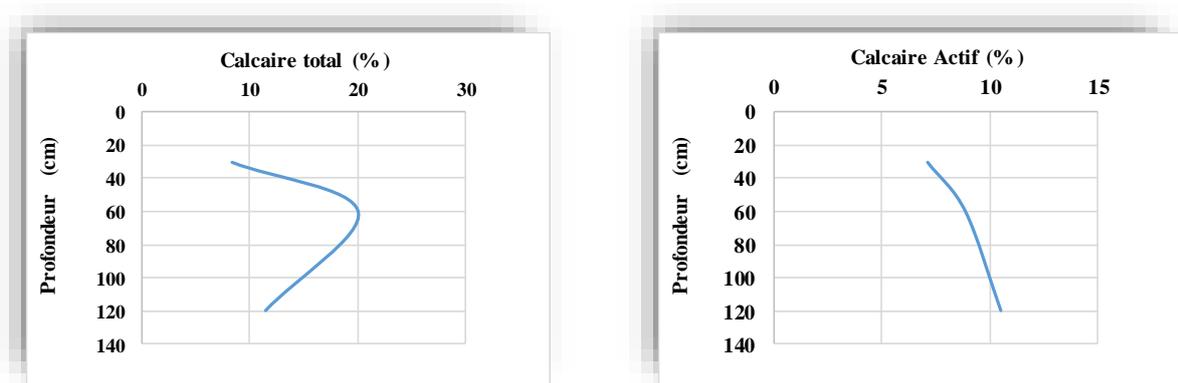


Figure 65 : Profil calcaire total et actif du P7

### 1.1.8. Dynamique du calcaire total et actif dans le profil P8

D'après la figure (66), le profil calcaire total et actif sont caractérisés par un maximum dans la couche médiane.

La teneur du calcaire total dans les deux premiers horizons est de (10,62%, 13,12%) ce qui montre que le sol est modérément calcaire. Il est peu calcaire dans le troisième horizon avec un taux de 3,44%. Le calcaire actif est modérément calcaire dans les deux premiers horizons (7,12%, 7, 13% respectivement). Il est peu calcaire dans l'horizon profond avec un taux de 4,5%.

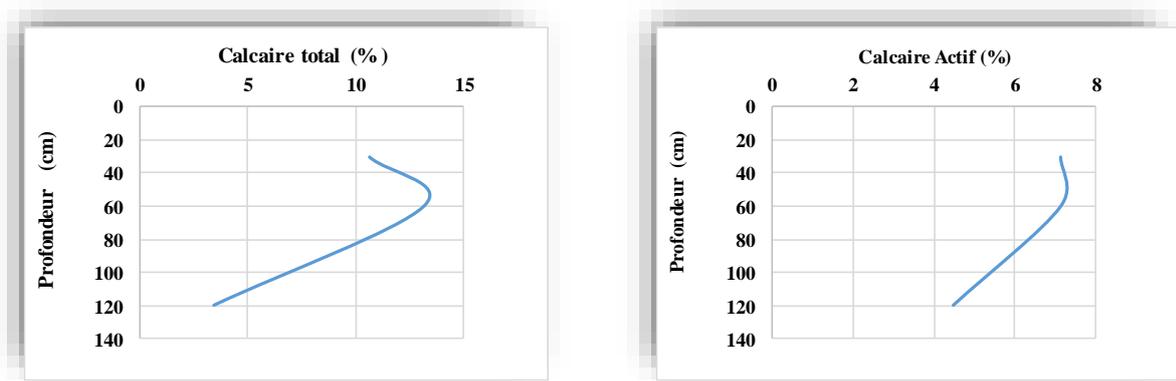


Figure 66 : Profil calcaire total et actif du P8

### 1.1.9. Dynamique du calcaire total et actif dans le profil P9

Au vu des résultats de la figure (67), il ressort que les deux profils suivent des allures différentes dont le profil calcaire total est caractérisé par un maximum dans la couche médiane et celui du calcaire actif par un maximum en profondeur.

Le sol du profil est modérément calcaire dans les trois horizons (13,96%, 17,5%, 10%), avec un taux modéré en calcaire actif variant de 7,75% à 9,5%.

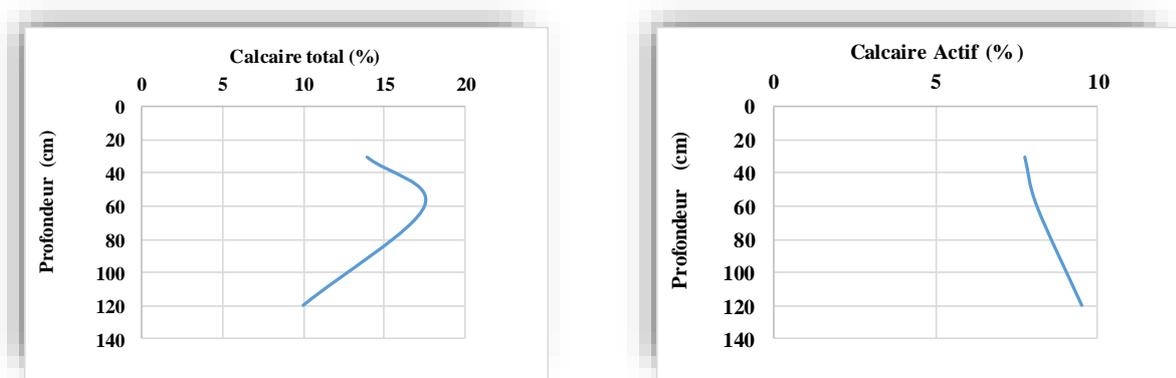


Figure 67 : Profil calcaire total et actif du P9

### 1.1.10. Dynamique du calcaire total et actif dans le profil P10

D'après la figure (68), le profil calcaire total est caractérisé par un maximum en profondeur, contrairement au profil calcaire actif qui est de type ascendant caractérisé par un maximum en surface.

Le sol appartenant à ce profil est modérément calcaire dans l'horizon P10H1 (13,44%) et l'horizon P10H2 (20% et 10% respectivement). Le sol est fortement calcaire dans l'horizon P10H3 (27,71%), avec un taux modéré en calcaire actif ; fluctuant entre 6,25% et 7,75%.

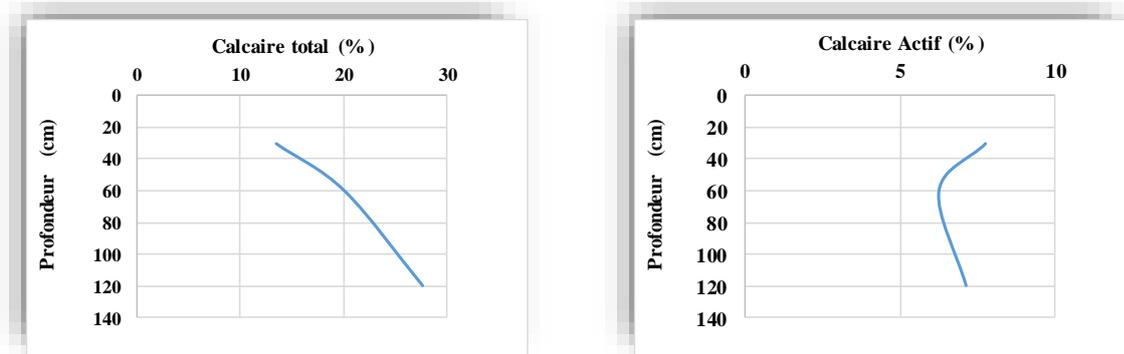


Figure 68 : Profil calcaire total et actif du P10

### 1.1.11. Dynamique du calcaire total et actif dans le profil P11

Selon la figure (69), le profil calcaire total et actif sont caractérisés par un maximum dans la couche médiane.

La teneur du calcaire total dans le deuxième horizon est de 30,94%, ce qui montre que le sol est fortement calcaire. Il est modérément calcaire dans les deux autres horizons (11,67%, 13,85%). Ils ont un taux en calcaire actif modéré de l'ordre de 5,75%, 6,62% et 5,37% respectivement.

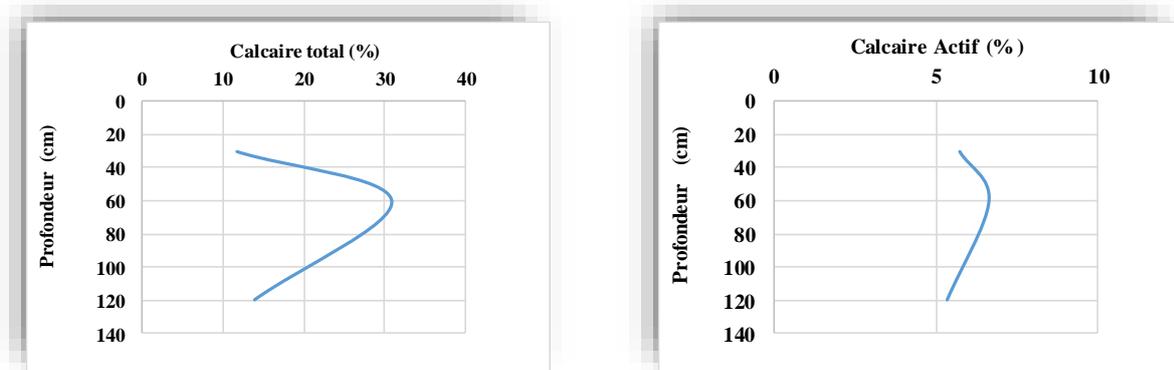


Figure 69 : Profil calcaire total et actif du P11

### 1.1.12. Dynamique du calcaire total et actif dans le profil P12

La figure (70), montre que le profil calcaire total et actif est caractérisé par un maximum dans la couche médiane.

Le sol appartenant à ce profil est modérément calcaire dans les trois horizons (14,58%, 24,79% et 11,77% respectivement). La teneur en calcaire actif dans le premier et le deuxième horizon est de 5% et

7,12% respectivement, ce qui montre que le sol est modérément calcaire. Il est peu calcaire dans le troisième horizon (4,75%).

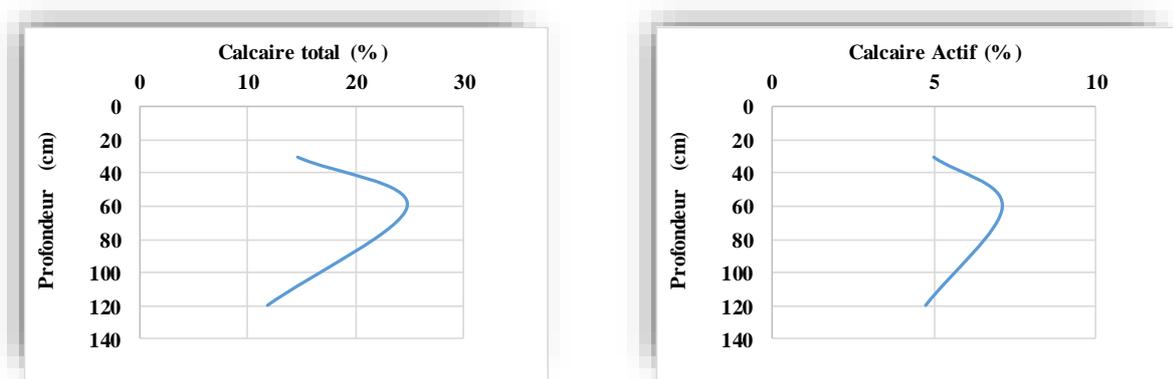


Figure 70 : Profil calcaire total et actif du P12

### 1.1.13. Dynamique du calcaire total et actif dans le profil P13

La figure (71), illustre que le profil calcaire total et actif sont caractérisés par un maximum dans la couche médiane.

Le sol est modérément calcaire avec des taux de 9,79%, 21,77% et 5,21% dans l'horizon de surface, de moyenne profondeur et profond respectivement, avec un calcaire actif peu variant de 2,75% à 4,87%.

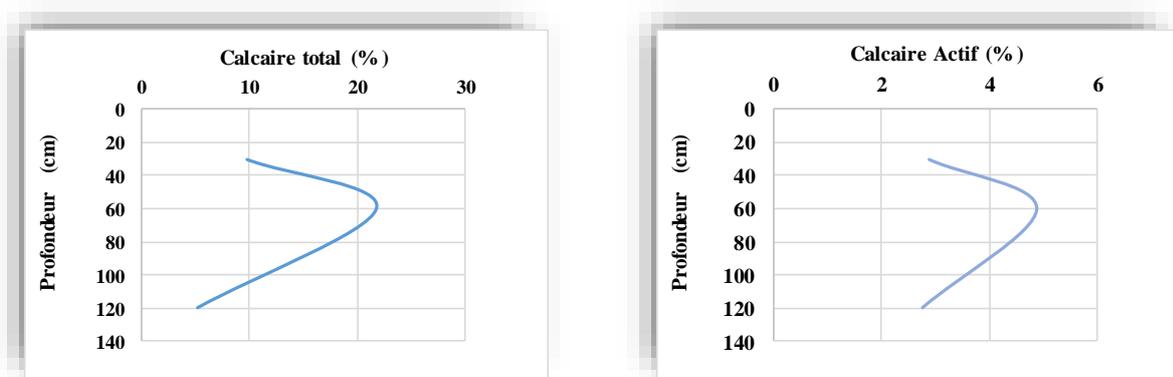


Figure 71 : Profil calcaire total et actif du P13

### 1.1.14. Dynamique du calcaire total et actif dans le profil P14

La teneur en calcaire total et actif du sol est plus élevée en profondeur. Le sol est modérément calcaire avec un taux de l'ordre de 9,27% dans le premier horizon, de 11,67% dans l'horizon moyen et fortement calcaire avec un taux de 26,04% pour le troisième horizon. La teneur en calcaire actif est modérée dans le profil et variant de 5,37% à 8,62% (Fig. 72).

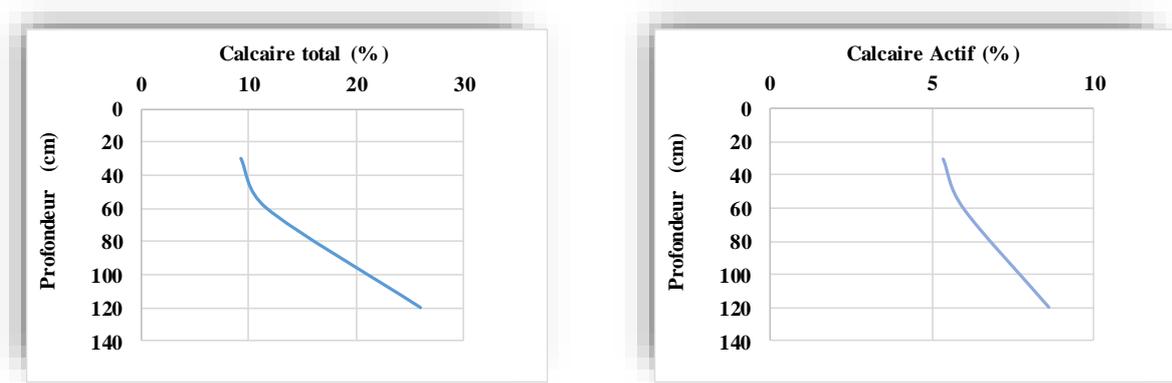


Figure 72 : Profil calcaire total et actif du P14

### 1.1.15. Dynamique du calcaire total et actif dans le profil P15

La figure (73), illustre que le profil du calcaire actif est de type descendant caractérisé par un maximum en profondeur, or que le profil calcaire total est caractérisée par un maximum dans la couche médiane.

La teneur en calcaire total dans les deux premiers horizons est de 12,08% et 15,10% respectivement, ce qui montre que le sol est modérément calcaire. Le sol est peu calcaire dans le troisième horizon avec un taux de 2,71%. La teneur en calcaire actif est modérée dans les trois horizons, elle atteint son maximum dans le troisième horizon (9,25%).

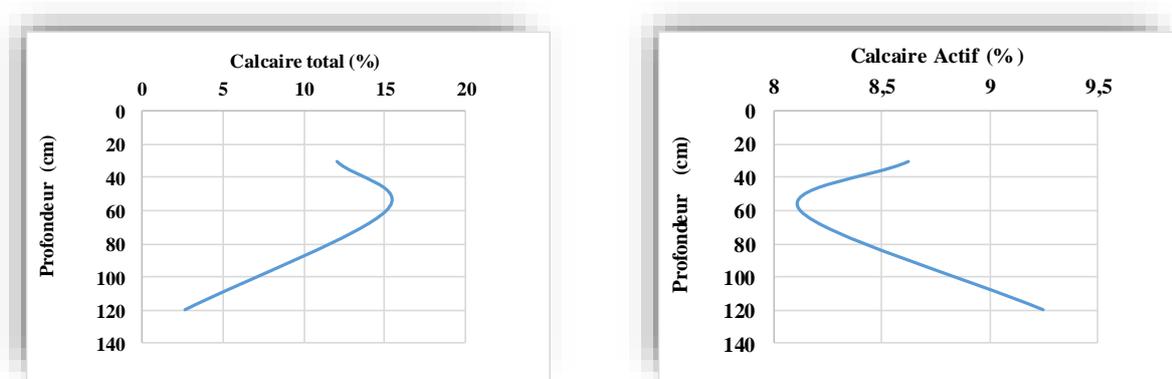


Figure 73 : Profil calcaire total et actif du P15

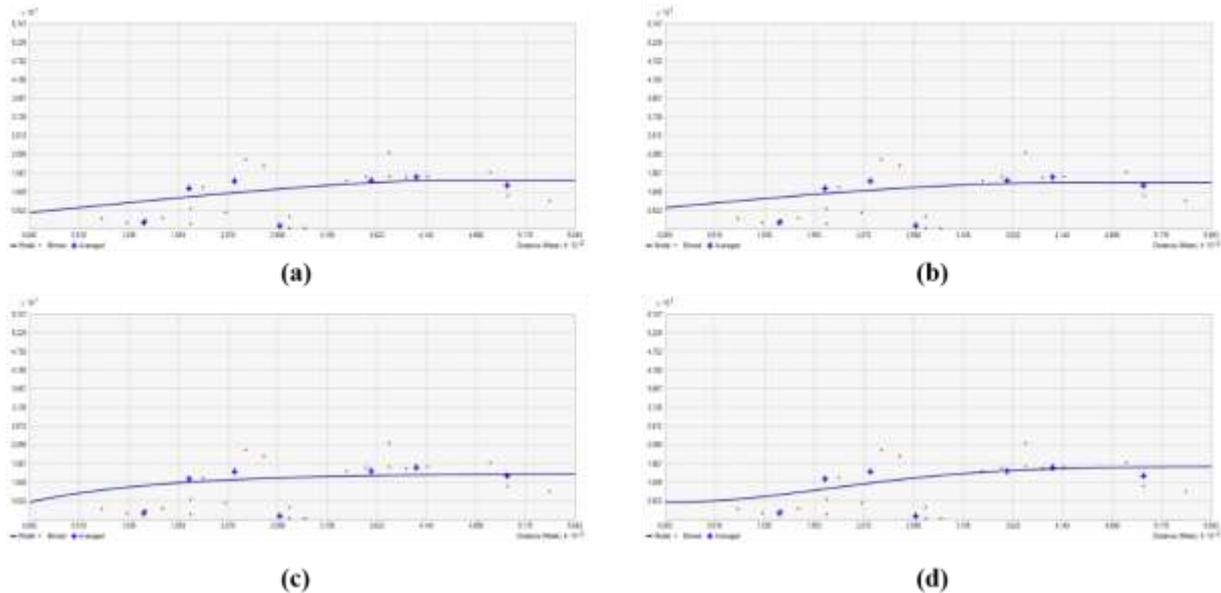
## 2. Modélisation géostatistique de la variabilité spatiale du calcaire total et actif

Quatre modèles sont utilisés : circulaire, sphérique, exponentiel et gaussien suivie d'une validation croisée afin de choisir le meilleur modèle de variogramme qui sera utilisé pour la réalisation des cartes de variabilité spatiale par krigeage.

## 2. 1. Modélisation géostatistique de la variabilité du calcaire total dans l'horizon H1

### 2.1.1. Analyse variographique

La figure 74, montre les quatre variogrammes ajustés aux modèles circulaire, sphérique, exponentiel et gaussien.



**Figure 74 :** Variogrammes expérimentaux du calcaire total dans l'horizon H1. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien.

D'après la figure 74, le variogramme ajusté au modèle circulaire a un palier de 0,091 et une portée de 420,15 m, avec un effet de pépité est de l'ordre de 0,046. Le modèle sphérique présente un palier de 0,071, une portée de 420,15 m avec un effet de pépité égal à 0,061. La représentation de l'exponentiel a révélé un palier de 0,081, une portée de 420,15 m et un effet de pépité de 0,049. Tandis que, le variogramme ajusté au modèle gaussien présente un palier de 0,101, une portée de 420,15 m avec un effet de pépité de 0,048.

Les équations des modèles des variogrammes expérimentaux du calcaire total dans l'horizon H1, sont écrites de la façon suivante :

- ✓ **Circulaire :**  $\gamma(h) = 0,046 + 0,045 \left( 1 - \left( \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{h}{420,15} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 420,15} \sqrt{1 - \left( \frac{h}{420,15} \right)^2} \right)$
- ✓ **Sphérique :**  $\gamma(h) = 0,061 + 0,01 \left( 1,5 \left( \frac{h}{420,15} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{420,15} \right)^3 \right)$
- ✓ **Exponentiel :**  $\gamma(h) = 0,049 + 0,032 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{420,15} \right) \right)$

$$\checkmark \text{ Gaussien : } \gamma(h) = 0,048 + 0,053 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{420,15} \right)^2 \right)$$

### 2.1.2. Validation croisée

Le tableau 19, représente synthétiquement les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme du calcaire total dans l'horizon H1.

**Tableau 19 :** Validation croisée des variogrammes du calcaire total dans l'horizon H1.

Calcaire total H1	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	15	15	15	15
Erreur moyenne de prédiction (ME)	-0,00038	-0,00105	-0,00777	-0,00287
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	3,68995	3,67041	3,59267	4,07575
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,07481	-0,06548	-0,05494	-0,13633
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	0,99805	0,91981	0,86664	1,19457
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	3,92987	4,16323	4,24228	3,77147

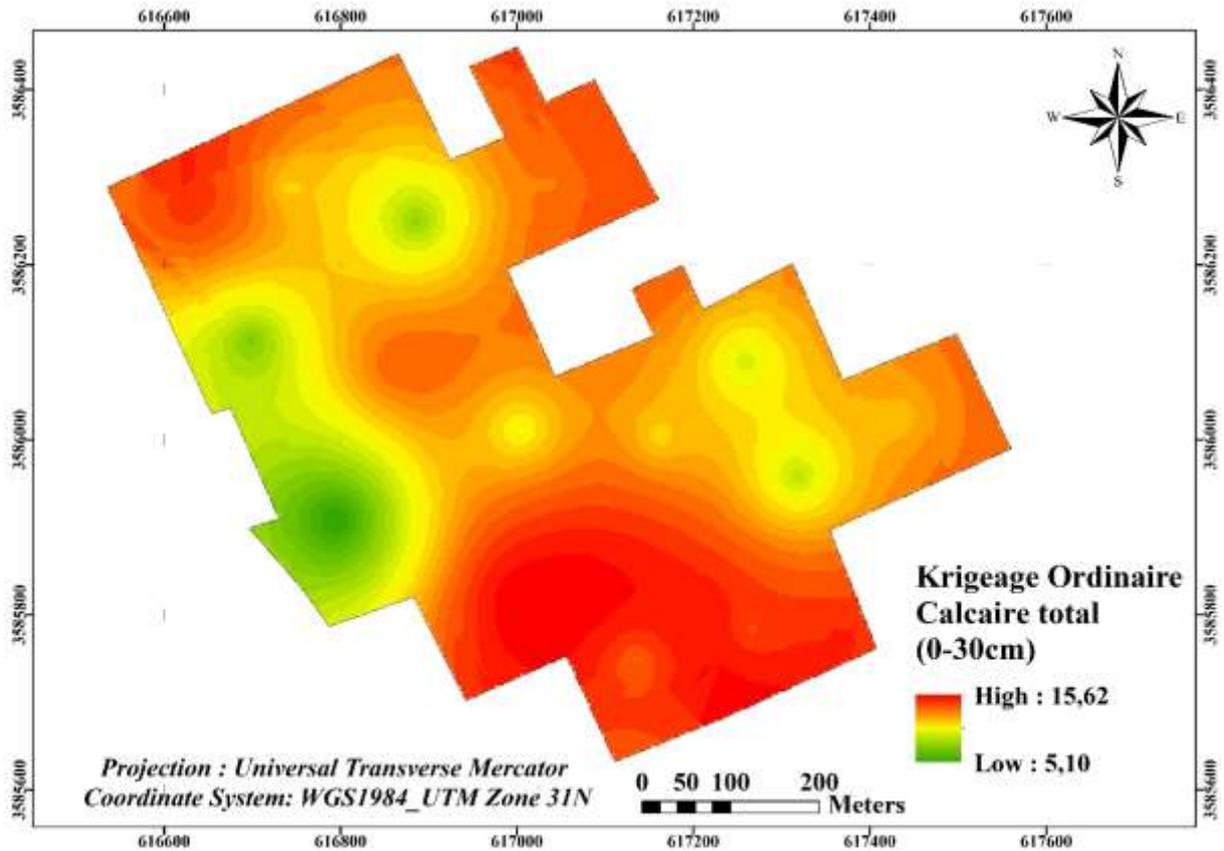
Selon le tableau (19) ci-dessus, les valeurs de la validation croisée montrent que les quatre modèles sont optimaux, tous les modèles ont :

- Une erreur moyenne de prédiction (ME) proche du 0
- Une erreur moyenne standardisée (MSE) proche du 0
- Une erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE) proche du 1

Le modèle le plus fiable est le modèle circulaire car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche à l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

### 2.1.3. Cartographie par krigeage

Les résultats de la validation croisée ont montrés que le modèle circulaire est le meilleur modèle d'interpolation. Ce modèle a été utilisé pour établir la carte de la variabilité spatiale du calcaire total dans l'horizon H1 par krigeage.



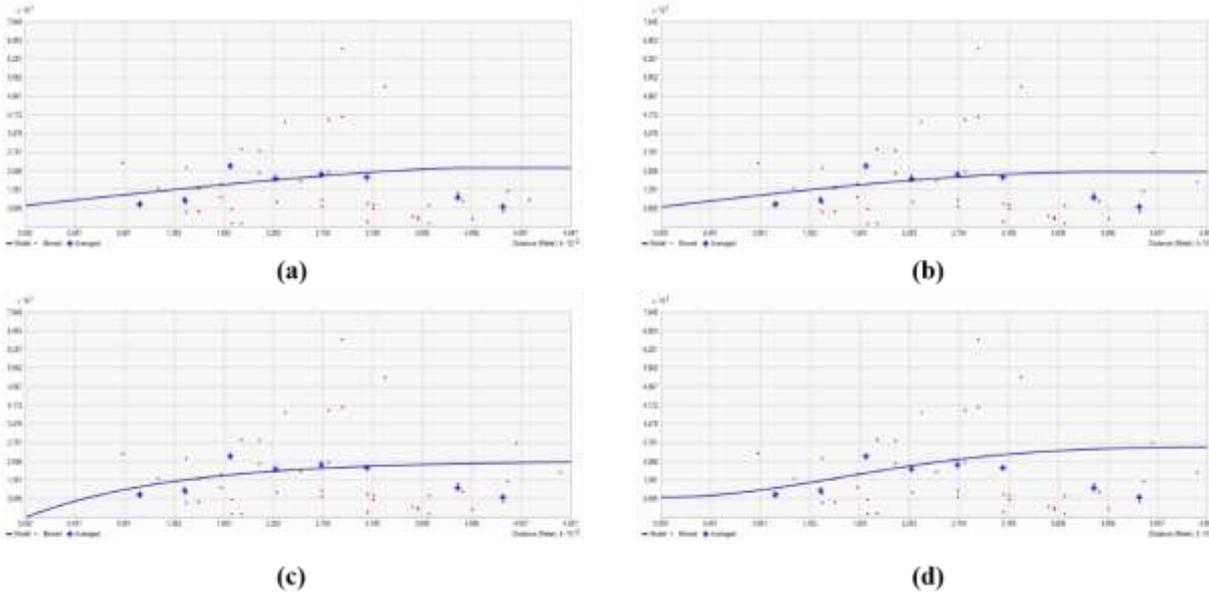
**Figure 75 :** Carte de variabilité spatiale du calcaire total dans l'horizon H1.

La carte (Fig. 75) montre une variation spatiale homogène du calcaire total dans l'horizon H1 qui varie entre 5.10 et 15.62 %. Les valeurs montrent que le sol est modérément calcaire, avec des valeurs maximales situées en majorité dans le côté nord-est et sud-est. Le coefficient de variation est de l'ordre de 26,10 % dans la parcelle cultivée, ce qui montre une variation spatiale modérée.

## 2. 2. Modélisation géostatistique de la variabilité du calcaire actif dans l'horizon H1

### 2.2.1. Analyse variographique

La figure 76, montre les quatre variogrammes ajustés aux modèles circulaire, sphérique, exponentiel et gaussien.



**Figure 76 :** Variogrammes expérimentaux du calcaire actif dans l’horizon H1. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien.

D’après la figure 76, Le variogramme ajusté au model circulaire a un palier de 0,141 et une portée de 400,73 m, avec un effet de pépite de l’ordre de 0,081. Le model sphérique est caractérisé par un palier de 0,131, une portée de 400,73 m et un effet de pépite de 0,075. La représentation de l’exponentiel a révélé un palier de 0,211, une portée de 400,73 m avec absence d’effet de pépite. Tandis que, le variogramme gaussien présente un palier de 0,191, une portée de 400,73 m avec un effet de pépite de 0,075.

Les équations des modèles des variogrammes expérimentaux du calcaire actif dans l’horizon H1, sont écrites de la façon suivante :

- ✓ **Circulaire :**  $\gamma(h) = 0,081 + 0,06 \left( 1 - \left( \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{h}{400,73} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 400,73} \sqrt{1 - \left( \frac{h}{400,73} \right)^2} \right)$
- ✓ **Sphérique :**  $\gamma(h) = 0,075 + 0,056 \left( 1,5 \left( \frac{h}{400,73} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{400,73} \right)^3 \right)$
- ✓ **Exponentiel :**  $\gamma(h) = 0,211 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{400,73} \right) \right)$
- ✓ **Gaussien :**  $\gamma(h) = 0,075 + 0,116 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{400,73} \right)^2 \right)$

### 2.2.2. Validation croisée

Le tableau 20, représente synthétiquement les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme du calcaire actif dans l’horizon H1.

**Tableau 20** : Validation croisée des variogrammes du calcaire actif dans l’horizon H1.

<b>Calcaire actif H1</b>	<b>Circulaire</b>	<b>Sphérique</b>	<b>Exponentiel</b>	<b>Gaussien</b>
Echantillons	15	15	15	15
Erreur moyenne de prédiction (ME)	-0,00313	-0,00714	-0,00933	-0,00646
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	2,12717	2,18734	2,22563	2,05381
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,02152	-0,03012	-0,03456	-0,02305
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	0,78659	0,80343	0,82087	0,78702
Erreur standard moyenne d’interpolation « ASE »	2,74479	2,74406	2,71329	2,68278

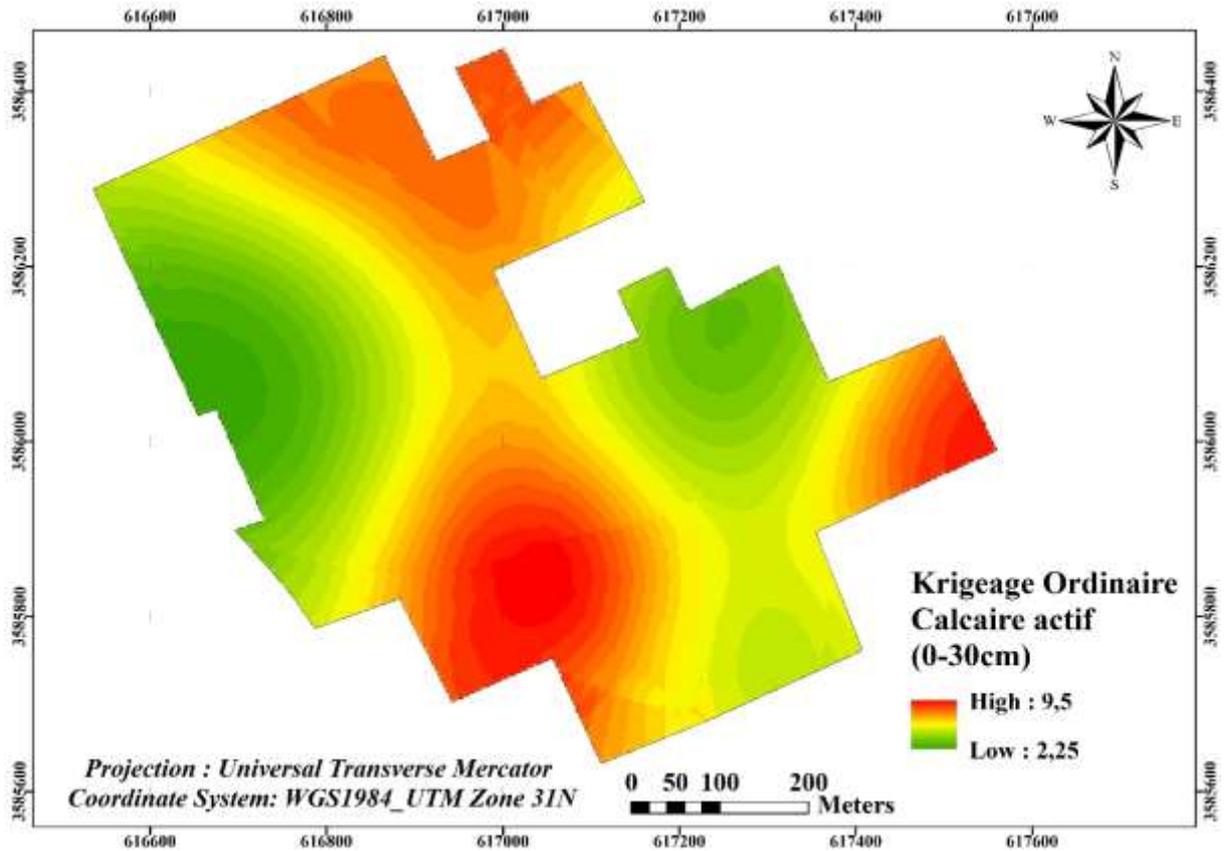
Selon le tableau (20) ci-dessus, les valeurs de la validation croisée montrent que les quatre modèles sont optimaux, tous les modèles ont :

- Une erreur moyenne de prédiction (ME) proche du 0
- Une erreur moyenne standardisée (MSE) proche du 0
- Une erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE) proche du 1

Le modèle le plus fiable est le modèle exponentiel car l’erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche à l’erreur standard moyenne d’interpolation (ASE).

### 2.2.3. Cartographie par krigeage

Les résultats de la validation croisée montrent que le modèle exponentiel est le meilleur modèle d’interpolation. Ce modèle a été utilisé pour établir la carte de la variabilité spatiale du calcaire actif dans l’horizon H1 par krigeage.



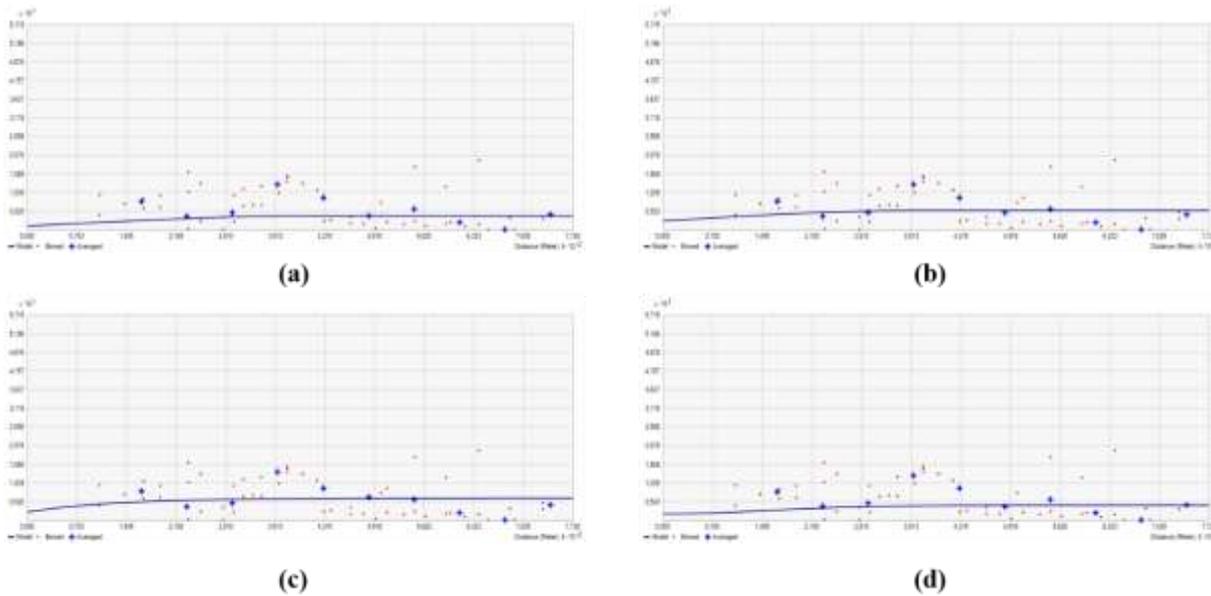
**Figure 77 :** Carte de variabilité spatiale du calcaire actif dans l'horizon H1.

La carte (Fig. 77) montre la variation spatiale du calcaire actif dans l'horizon H1. Les valeurs sont comprises entre 2,25 % et de 9,5 % avec une forte concentration et accumulation du calcaire actif au nord-sud et dans la partie est dans la palmeraie. Le coefficient de variation montre une variabilité spatiale modérée avec un CV de 34,31 %.

## 2. 3. Modélisation géostatistique de la variabilité du calcaire total dans l'horizon H2

### 2.3.1. Analyse variographique

La figure 78, montre les quatre variogrammes ajustés aux modèles circulaires, sphérique, exponentiel et gaussien.



**Figure 78 :** Variogrammes expérimentaux du calcaire total dans l’horizon H2. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien.

D’après la figure 78, Le variogramme ajusté au model circulaire a un palier de 0,028 et une portée de 360,52 m, avec un effet de pépite est de l’ordre de 0,011. Le model sphérique est caractérisé par un palier de 0,029, une portée de 360,52 m et un effet de pépite de 0,025. La représentation de l’exponentiel a révélé un palier de 0,039, une portée de 360,52 m et un effet de pépite de 0,023. Tandis que, le variogramme gaussien présente un palier de 0,024, une portée de 360,52 m avec un effet de pépite de 0,018.

Les équations des modèles des variogrammes expérimentaux du calcaire total dans l’horizon H1, sont écrites de la façon suivante :

✓ **Circulaire :**  $\gamma(h) = 0,011 + 0,017 \left( 1 - \left( \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{h}{360,52} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 360,52} \sqrt{1 - \left( \frac{h}{360,52} \right)^2} \right)$

✓ **Sphérique :**  $\gamma(h) = 0,025 + 0,004 \left( 1,5 \left( \frac{h}{360,52} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{360,52} \right)^3 \right)$

✓ **Exponentiel :**  $\gamma(h) = 0,023 + 0,016 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{360,52} \right) \right)$

✓ **Gaussien :**  $\gamma(h) = 0,018 + 0,006 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{360,52} \right)^2 \right)$

### 2.3.2. Validation croisée

Le tableau 21, représente synthétiquement les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme du calcaire total dans l'horizon H2.

**Tableau 21 :** Validation croisée des variogrammes du calcaire total dans l'horizon H2.

Calcaire total H2	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	15	15	15	15
Erreur moyenne de prédiction (ME)	-0,00881	-0,00124	-0,009447	-0,00038
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	5,50558	5,53282	5,48757	5,57123
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,05886	-0,05611	-0,03265	-0,07279
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	1,17614	1,17604	1,05845	1,26237
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	4,59466	4,59689	4,98961	4,36321

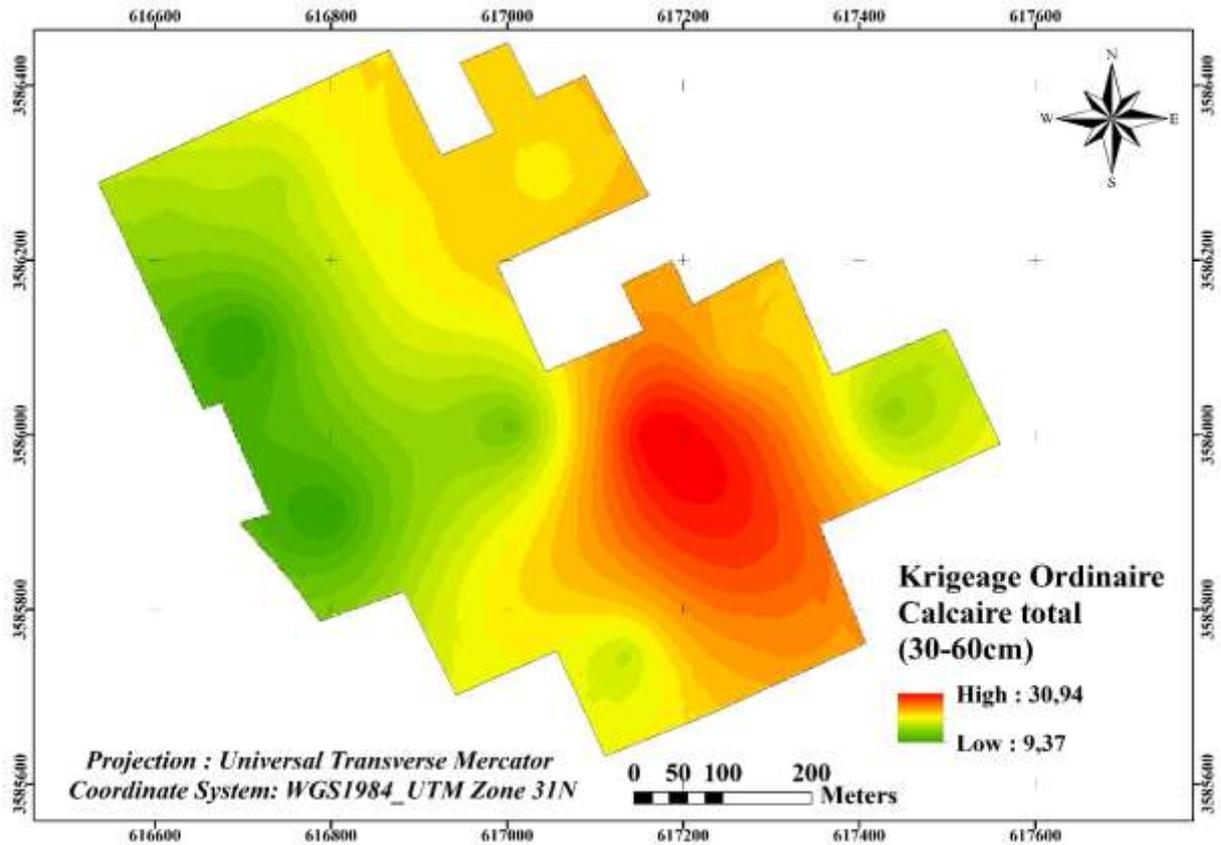
Selon le tableau (21) ci-dessus, les valeurs de la validation croisée montrent que les quatre modèles sont optimaux, tous les modèles ont :

- Une erreur moyenne de prédiction (ME) proche du 0
- Une erreur moyenne standardisée (MSE) proche du 0
- Une erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE) proche du 1

Le modèle le plus fiable est le modèle exponentiel car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche à l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

### 2.3.3. Cartographie par krigeage

Les résultats de la validation croisée montrent que le modèle exponentiel est le meilleur modèle d'interpolation. Ce modèle a été utilisé pour établir la carte de la variabilité spatiale du calcaire total dans l'horizon H2 par krigeage.



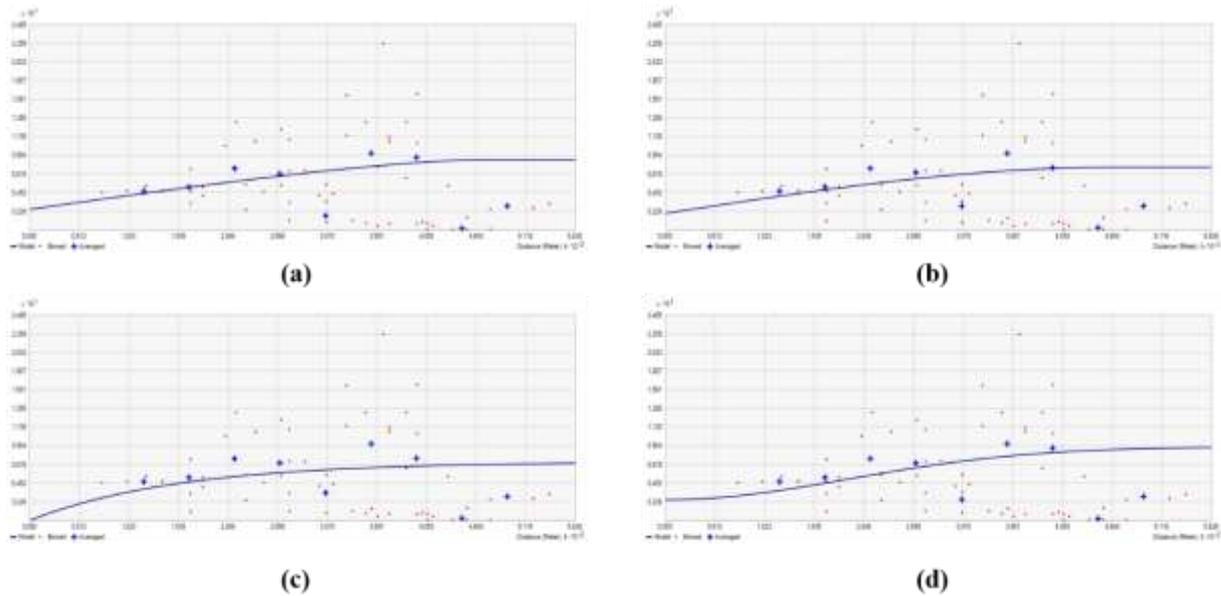
**Figure 79 :** Carte de variabilité spatiale du calcaire total dans l'horizon H2.

La carte (Fig. 79) montre une variation modérée du calcaire total dans l'horizon H2 avec un coefficient de variation de 31,85 %. Les valeurs élevées se concentrent dans la partie sud-est où le sol est fortement calcaire avec des valeurs supérieures à 25 %, or que le sol est modérément calcaire dans le reste de la palmeraie.

## 2. 4. Modélisation géostatistique de la variabilité du calcaire actif dans l'horizon H2

### 2.4.1. Analyse variographique

La figure 80, montre les quatre variogrammes ajusté aux modèles circulaires, sphérique, exponentiel et gaussien.



**Figure 80 :** Variogrammes expérimentaux du calcaire actif dans l'horizon H2. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien.

D'après la figure 80, Le variogramme ajusté au model circulaire a un palier de 0,061 et une portée de 462,77 m, avec un effet de pépité est de l'ordre de 0,025. Le model sphérique est caractérisé par un palier de 0,056, une portée de 462,77 m et un effet de pépité de 0,021. La représentation de l'exponentiel a révélé un palier de 0,071, une portée de 462,77 m et ne présente pas un effet de pépité. Tandis que, le variogramme gaussien présente un palier de 0,064, une portée de 462,77 m avec un effet de pépité de 0,025.

Les équations des modèles des variogrammes expérimentaux du calcaire actif dans l'horizon H2, sont écrites de la façon suivante :

- ✓ **Circulaire :**  $\gamma(h) = 0,025 + 0,036 \left( 1 - \left( \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{h}{462,77} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 462,77} \sqrt{1 - \left( \frac{h}{462,77} \right)^2} \right)$
- ✓ **Sphérique :**  $\gamma(h) = 0,021 + 0,035 \left( 1,5 \left( \frac{h}{462,77} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{462,77} \right)^3 \right)$
- ✓ **Exponentiel :**  $\gamma(h) = 0,071 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{462,77} \right) \right)$
- ✓ **Gaussien :**  $\gamma(h) = 0,025 + 0,039 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{360,52} \right)^2 \right)$

#### 2.4.2. Validation croisée

Le tableau 22, représente synthétiquement les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme du calcaire actif dans l'horizon H2.

**Tableau 22 :** Validation croisée des variogrammes du calcaire actif dans l’horizon H2.

Calcaire actif H2	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	15	15	15	15
Erreur moyenne de prédiction (ME)	-0,00245	-0,00059	-0,00083	-0,00052
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	1,62997	1,60226	1,60859	1,56637
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,02269	-0,01761	-0,01424	-0,02249
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	0,95212	0,95705	0,98012	0,99025
Erreur standard moyenne d’interpolation « ASE »	1,74881	1,69839	1,65957	1,59971

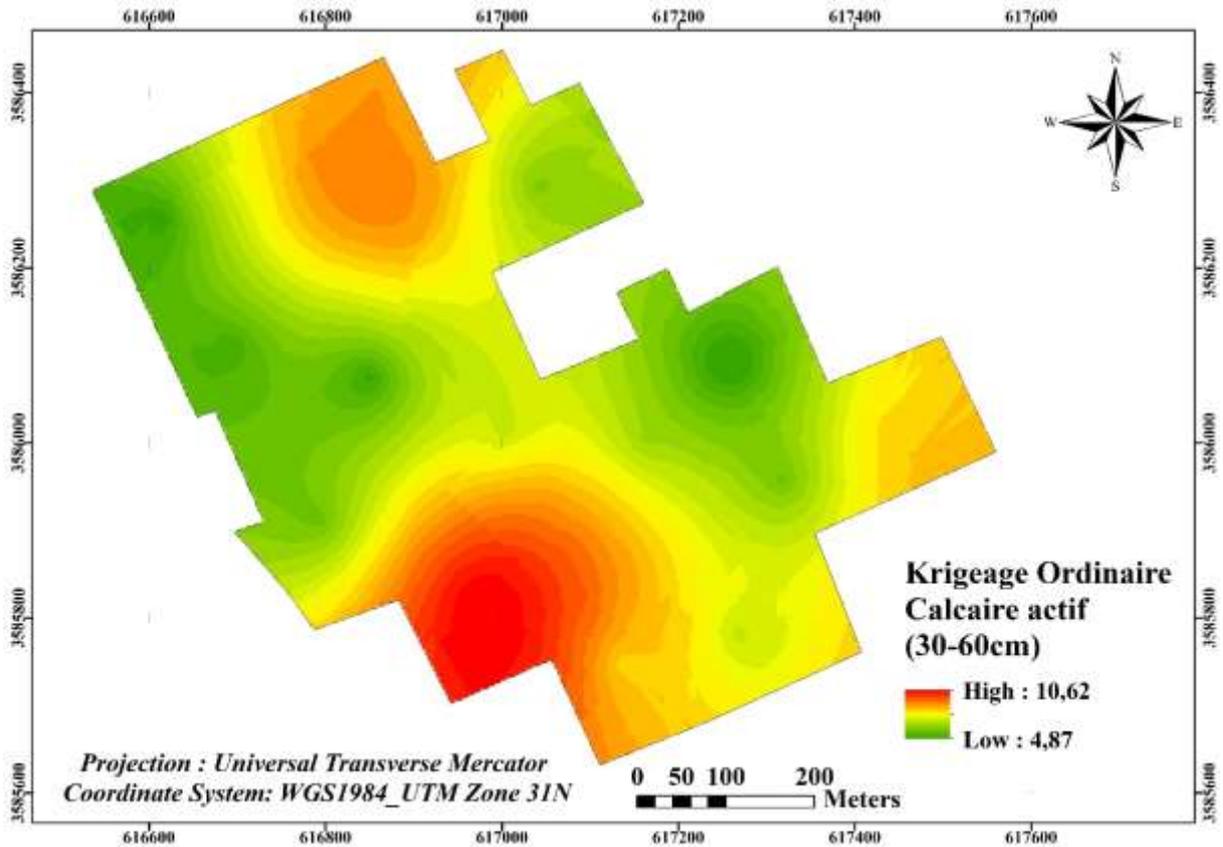
Selon le tableau (22) ci-dessus, les valeurs de la validation croisée montrent que les quatre modèles sont optimaux, tous les modèles ont :

- Une erreur moyenne de prédiction (ME) proche du 0
- Une erreur moyenne standardisée (MSE) proche du 0
- Une erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE) proche du 1

Le modèle le plus fiable est le modèle gaussien car l’erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche à l’erreur standard moyenne d’interpolation (ASE).

### 2.4.3. Cartographie par krigeage

Les résultats de la validation croisée montrent que le modèle gaussien est le meilleur modèle d’interpolation. Ce modèle a été utilisé pour établir la carte de la variabilité spatiale du calcaire actif dans l’horizon H2 par krigeage.



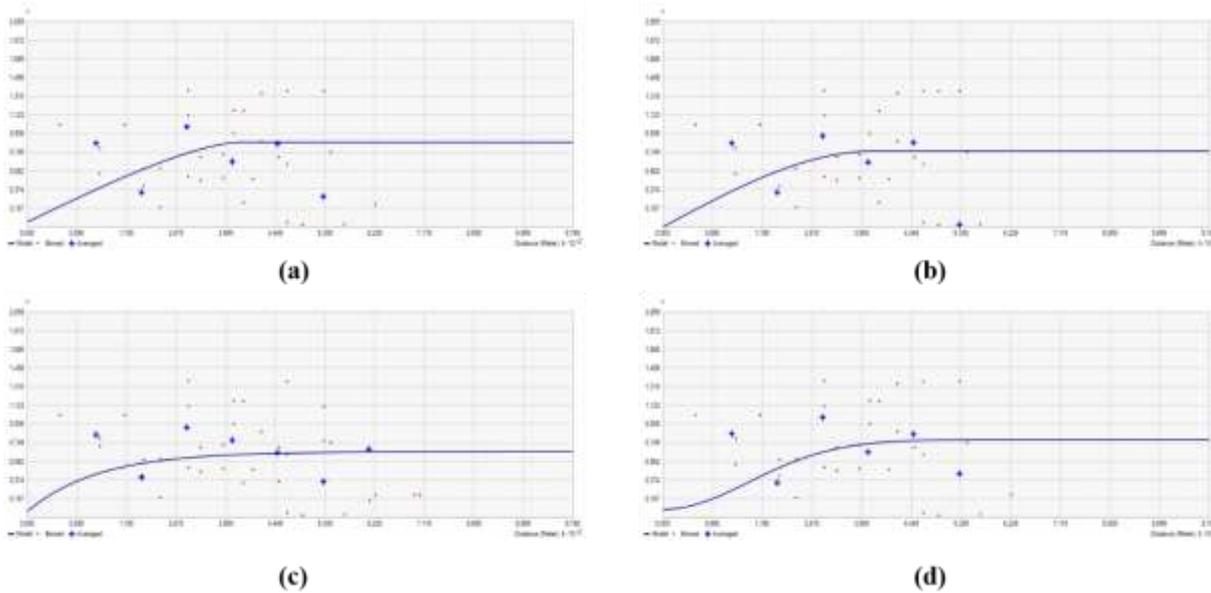
**Figure 81 :** Carte de la variabilité spatiale du calcaire actif dans l’horizon H2.

La carte (Fig. 81) montre que les valeurs les plus élevées sont enregistrés dans les deux extrémités nord et sud. Les valeurs sont comprises entre 4,87 % et de 10,62 %, la variation du calcaire actif est modérée avec un coefficient de variation de 23,09 %.

## 2. 5. Modélisation géostatistique de la variabilité du calcaire total dans l’horizon H3

### 2.5.1. Analyse variographique

La figure 82, montre les quatre variogrammes ajusté aux modèles circulaires, sphérique, exponentiel et gaussien.



**Figure 82 :** Variogrammes expérimentaux du calcaire total dans l’horizon H3. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien.

D’après la figure 82, Le variogramme ajusté au model circulaire a un palier de 0,801 et une portée de 378,12 m, avec un effet de pépité est de l’ordre de 0,051. Le model sphérique est caractérisé par un palier de 0,761, une portée de 378,12 m et un effet de pépité de 0,0008. La représentation de l’exponentiel a révélé un palier de 0,601, une portée de 378,12 m et un effet de pépité de 0,061. Tandis que, le variogramme gaussien présente un palier de 0,701, une portée de 378,12 m avec un effet de pépité de 0,081.

Les équations des modèles des variogrammes expérimentaux du calcaire total dans l’horizon H3, sont écrites de la façon suivante :

- ✓ **Circulaire :**  $\gamma(h) = 0,051 + 0,75 \left( 1 - \left( \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{h}{378,12} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 378,12} \sqrt{1 - \left( \frac{h}{378,12} \right)^2} \right)$
- ✓ **Sphérique :**  $\gamma(h) = 0,0008 + 0,7602 \left( 1,5 \left( \frac{h}{378,12} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{378,12} \right)^3 \right)$
- ✓ **Exponentiel :**  $\gamma(h) = 0,061 + 0,54 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{378,12} \right) \right)$
- ✓ **Gaussien :**  $\gamma(h) = 0,081 + 0,62 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{378,12} \right)^2 \right)$

### 2.5.2. Validation croisée

Le tableau 23, représente synthétiquement les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme du calcaire total dans l’horizon H3.

**Tableau 23** : Validation croisée des variogrammes du calcaire total dans l'horizon H3.

<b>Calcaire total H3</b>	<b>Circulaire</b>	<b>Sphérique</b>	<b>Exponentiel</b>	<b>Gaussien</b>
Echantillons	15	15	15	15
Erreur moyenne de prédiction (ME)	-0,07873	-0,00492	-0,00453	-0,08637
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	9,41155	9,58294	9,56782	9,93261
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,25781	-0,26311	-0,17855	-0,46908
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	1,24655	1,25914	1,05951	1,76137
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	10,32004	10,25671	10,57751	8,62046

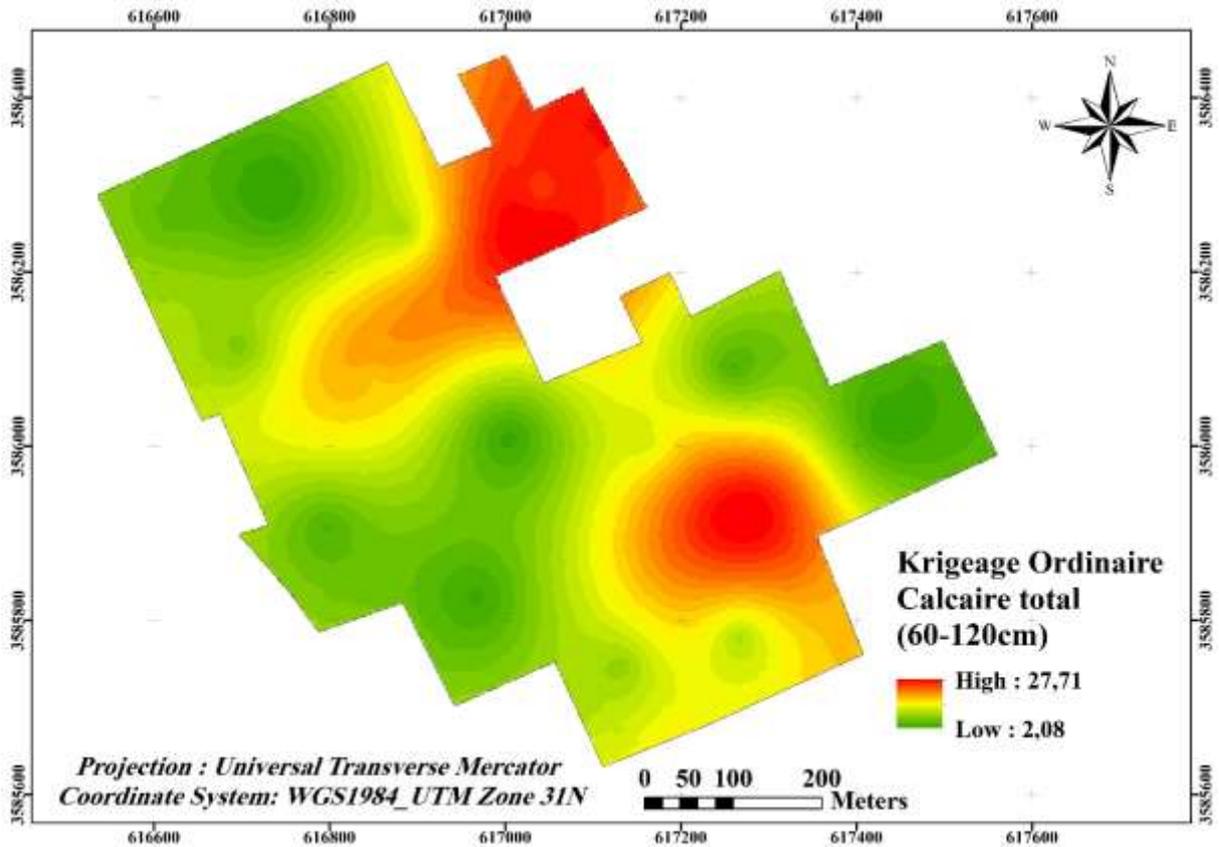
Selon le tableau (23) ci-dessus, les valeurs de la validation croisée montrent que les quatre modèles sont optimaux, tous les modèles ont :

- Une erreur moyenne de prédiction (ME) proche du 0
- Une erreur moyenne standardisée (MSE) proche du 0
- Une erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE) proche du 1

Le modèle le plus fiable est le modèle sphérique car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche à l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

### 2.5.3. Cartographie par krigeage

Les résultats précédents montrent que le modèle sphérique est le meilleur modèle d'interpolation. Ce modèle a été utilisé pour établir la carte de la variabilité spatiale du calcaire total dans l'horizon H3 par krigeage.



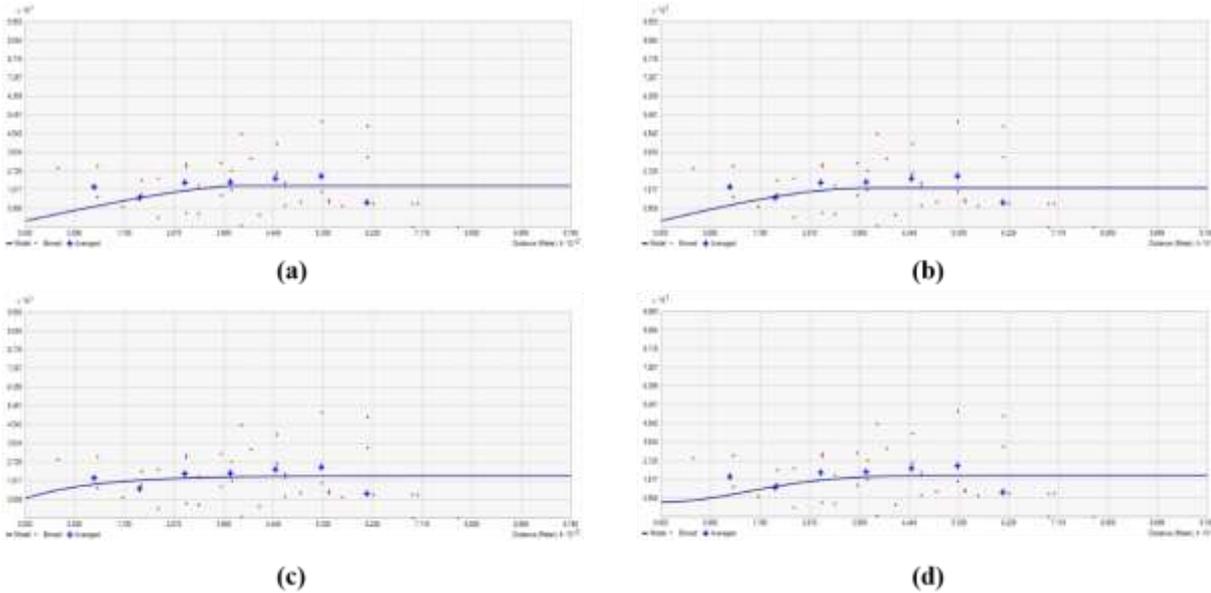
**Figure 83 :** Carte de variabilité spatiale du calcaire total dans l'horizon H3.

La carte (Fig. 83) montre que le sol est fortement calcaire dans la partie nord et sud-est avec des valeurs supérieures à 25 %. Le sol est peu calcaire dans le reste de la palmeraie. Le calcaire varie d'un minimum de 2,08 % à un maximum de 27,71 %. Le coefficient de variation montre une variabilité spatiale très élevée avec un CV de 77,94 %.

## 2. 6. Modélisation géostatistique de la variabilité du calcaire actif dans l'horizon H3

### 2.6.1. Analyse variographique

La figure 84, montre les quatre variogrammes ajusté aux modèles circulaires, sphériques, exponentiels et gaussiens.



**Figure 84 :** Variogrammes expérimentaux du calcaire actif dans l’horizon H3. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien.

D’après la figure 84, Le variogramme ajusté au model circulaire a un palier de 0,171 et une portée de 378,12 m, dont, l’effet de pépité est de l’ordre de 0,031. Le model sphérique (palier de 0,161, une portée de 378,12 m) à un effet de pépité égal à 0,031. La représentation de l’exponentiel a révélé un palier de 0,111, une portée de 378,12 m et un effet de pépité de 0,095. Tandis que, le variogramme gaussien présente un palier de 0,131, une portée de 378,12 m avec un effet de pépité de 0,071.

Les équations des modèles des variogrammes expérimentaux du calcaire actif dans l’horizon H3, sont écrites de la façon suivante :

✓ **Circulaire** :  $\gamma(h) = 0,031 + 0,14 \left( 1 - \left( \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{h}{378,12} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 378,12} \sqrt{1 - \left( \frac{h}{378,12} \right)^2} \right)$

✓ **Sphérique** :  $\gamma(h) = 0,031 + 0,13 \left( 1,5 \left( \frac{h}{378,12} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{378,12} \right)^3 \right)$

✓ **Exponentiel** :  $\gamma(h) = 0,095 + 0,016 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{378,12} \right) \right)$

✓ **Gaussien** :  $\gamma(h) = 0,071 + 0,06 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{378,12} \right)^2 \right)$

### 2.6.2. Validation croisée

Le tableau 24, représente synthétiquement les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme du calcaire actif dans l’horizon H3.

**Tableau 24 :** Validation croisée des variogrammes du calcaire actif dans l'horizon H3.

<b>Calcaire actif H3</b>	<b>Circulaire</b>	<b>Sphérique</b>	<b>Exponentiel</b>	<b>Gaussien</b>
Echantillons	15	15	15	15
Erreur moyenne de prédiction (ME)	-0,00043	-0,00182	-0,00496	-0,00427
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	3,40998	3,34621	3,20659	3,37472
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,21258	-0,17959	-0,09295	-0,18465
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	1,29044	1,19893	0,92799	1,21004
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	2,77877	2,88564	3,40298	2,87663

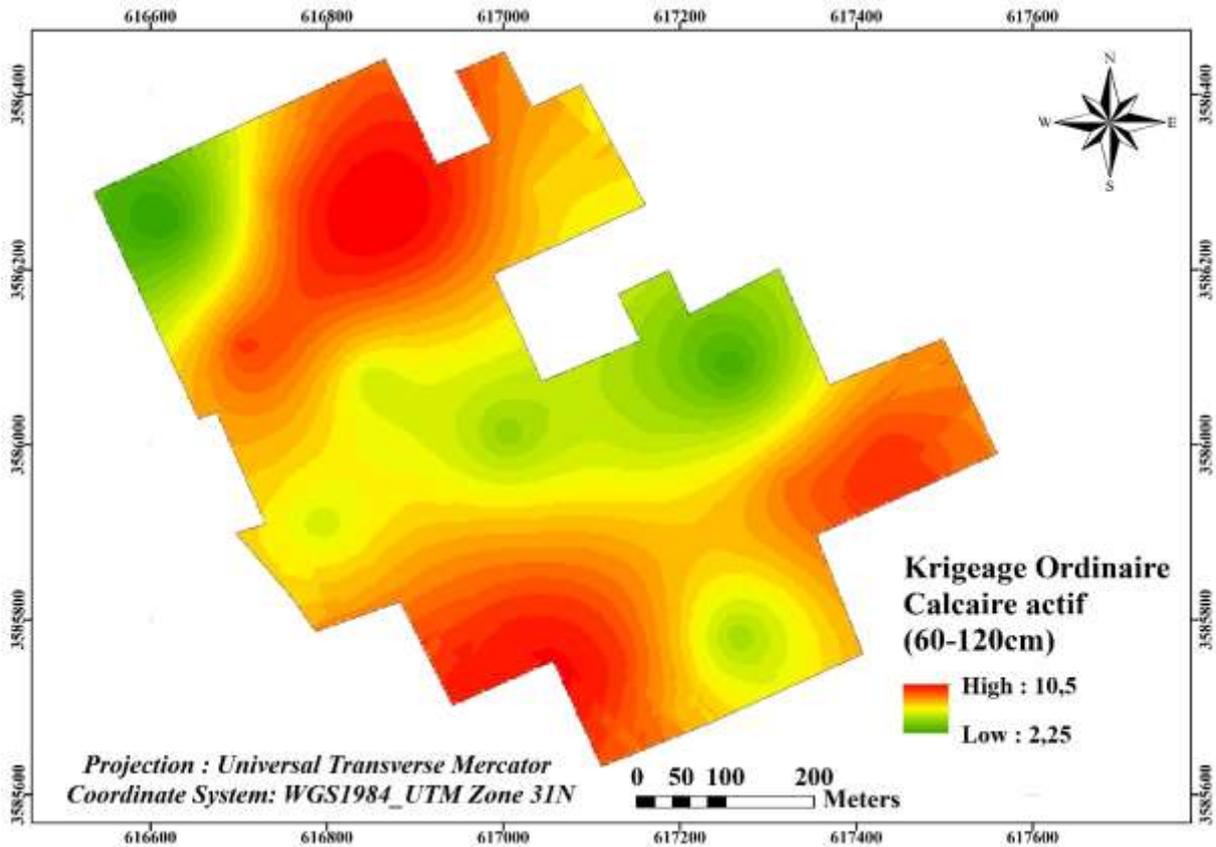
Selon le tableau (24) ci-dessus, les valeurs de la validation croisée montrent que les quatre modèles sont optimaux, tous les modèles ont :

- Une erreur moyenne de prédiction (ME) proche du 0
- Une erreur moyenne standardisée (MSE) proche du 0
- Une erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE) proche du 1

Le meilleur modèle est l'exponentiel, car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche à l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

### 2.6.3. Cartographie par krigeage

Les résultats de la validation croisée montrent que le modèle exponentiel est le meilleur modèle d'interpolation. Ce modèle a été utilisé pour établir la carte de la variabilité spatiale du calcaire actif dans l'horizon H3 par krigeage.



**Figure 85 :** Carte de variabilité spatiale du calcaire actif dans l'horizon H3.

La carte (Fig. 85) montre une distribution spatiale hétérogène du calcaire actif dans l'horizon H3. Dans la partie nord-ouest, sud-ouest et est de la palmeraie, la teneur en calcaire actif est élevée, alors que dans le reste de la parcelle, les teneurs sont plus faibles. Les valeurs sont comprises entre 2,25% et 10,5%. La variabilité spatiale du calcaire actif est élevée avec un CV de 38,20 %.

### 3. Discussions

Dans les sols méditerranéens, le calcaire est très souvent un élément fondamental de description et de classification : c'est en grande partie d'après sa présence ou son absence dans un ou plusieurs horizons, d'après sa répartition verticale dans un profil, ou horizontale dans une chaîne de sols, d'après les formes sous lesquelles il peut apparaître, que l'on classe bien des sols et que l'on émet des hypothèses sur leurs formations.

Il y'a une certaine distribution climatique des carapaces calcaires qui semblent localisées dans les régions à climat méditerranéen et surtout dans l'aride et le semi-aride (RUELLAN, 1967). Les horizons calcaires sont communs dans les climats arides et semi-arides, à la fois dans les sols calcaires et non calcaires (RABENHORST et al., 1991 ; EMADI et al., 2008).

Les taux moyens de calcaire total varient entre 10,5 à 18,51%, ce qui signifie que le sol est modérément calcaire. Ce résultat se rapproche des travaux réalisés en l'Algérie (ZIZA, 2012 ; BENAHMED, 2017 ; MEZANI, 2021). Ainsi qu'à l'échelle internationale par SARMADIAN et *al.* (2010) à l'Iran, MEDDICH et *al.* (2015) au Maroc, UMER et *al.* (2020) en Iraq et GUNAL. (2021) en Turkey. Les résultats obtenus révèlent que le taux du calcaire dans la région de Zelfana est hétérogène dans les horizons. La teneur en calcaire total des horizons étudiés varie de 2,08 à 30,94%. La teneur en calcaire total varie de 5,10 à 15,62% (modérément calcaire) dans l'horizon superficiel, de 9,37 à 30,94% (modérément a fortement calcaire) dans l'horizon de moyenne profondeur et de 2,08 à 27,71% (peu a fortement calcaire) dans l'horizon profond, tandis que la teneur en calcaire actif des horizons étudiés varie de 2,25 à 10,62%. Le taux de calcaire actif varie de 2,25 à 9,5% (faible à assez faible) dans l'horizon superficiel, de 4,87 à 10,62% (faible à élevé) dans l'horizon de moyenne profondeur et de 2,25 à 10,5% (faible à élevé) dans l'horizon profond.

En effet, la présence du calcaire provient essentiellement de la roche mère, en particulier dans les régions arides, dont les roches sont fréquemment carbonatées (calcaire et dolomie), ou simplement riche en calcium, c'est le cas de basalte (RUELLAN, 1976 ; DJILI et DAOUD, 1999 ; DJILI, 2000 ; DJILI et *al.*, 1999 ; TIR, 2007) ou de la précipitation de carbonates de calcium secondaire (RUELLAN, 1971 ; DUCHAUFOR et SOUCHIER, 1977). Plusieurs auteurs ont étudié la distribution des taux de calcaire dans les sols (AUBERT, 1947 ; DURANT, 1959 ; BOULAIN, 1961 ; BELOUAM, 1976 ; VOGT, 1979 ; POUGET, 1980 ; HALITIM et *al.*, 1988 ; AYACHE, 1996 ; DJILI, 1983 et DJILI, 2000). Ils ressortent que les sols d'Algérie sont généralement bien pourvus en calcaire, allant des concentrations diffuses aux formes discontinues et continues (SALAH, 2011). Selon HAGIN et TUCKER (1982), les sols peuvent également devenir calcaires après une longue période d'irrigation avec de l'eau contenant du  $\text{CaCO}_3$ . Les carbonates de calcium secondaires se forment dans des conditions climatiques arides et semi-arides lorsque la concentration de carbonate dans la solution du sol reste élevée (TAALAB et *al.*, 2019).

Selon (SAMUEL et *al.*, 2013 ; UMER et *al.*, 2020), les sols des régions arides et semi-arides sont étroitement liés à leurs substrats rocheux dans la plupart des propriétés minéralogiques. La roche calcaire est le substrat rocheux prédominant dans ces zones et même avec un excès lessivant une quantité considérable de  $\text{CaCO}_3$  restera dans les horizons du sol et peut atteindre plus de 30 %. La distribution du carbonate de calcium dans le profil est régie particulièrement par la pluviométrie annuelle (DJILI, 2000). Ces résultats rejoignent ceux de RUELLAN (1979), de POUGET (1980) et de HALITIM (1988) qui ont mis l'accent sur la dynamique verticale et latérale du carbonate de calcium même dans les zones arides dont la pluviosité annuelle oscille entre 100 et 200 mm.

Nous observons une accumulation du calcaire total dans la couche médiane pour la majorité des solums (P1, P2, P3, P4, P6, P7, P8, P9, P11, P12, P13, P15). Ce résultat se rapproche de celui trouvé par (SALIM et TESSIER, 1998 ; EMADI *et al.*, 2008). DJILI (2000), a signalé que dans les zones arides ( $P < 300$  mm) l'accumulation de calcaire semble être homogène dans tout le profil, mais avec un pourcentage de calcaire légèrement plus élevé dans les horizons de sub-surface. Cette concentration peut être le résultat de la lixiviation du calcaire de l'horizon de surface vers la profondeur suite à l'irrigation (BENBRAHIM, 2018). FAO (1973) a confirmé que dans la partie médiane des sols se trouve un horizon où la teneur en carbonate de calcium est plus élevée que dans ceux situés au-dessus et au-dessous, c'est un horizon d'accumulation de carbonate de calcium. L'humectation du sol suite à l'irrigation favorise la mobilisation du calcaire (dissolution, formation de suspension des particules fine). La phase dessiccation favorise la précipitation, puis la consolidation et enfin la cristallisation sous forme de calcite du calcaire mobilisé ; c'est donc la forte évapotranspiration potentiel qui intervient dans cette deuxième phase (DUCHAUFOR, 2001). Le calcaire actif est la fraction du calcaire total susceptible de se dissoudre facilement et rapidement dans la solution du sol (INRA, 2012), donc, les causes de l'accumulation du calcaire actif sont les mêmes du calcaire total. Les profils du calcaire actif qui contiennent des concentrations dans les couches médianes sont (P1, P3, P6, P8, P11, P12, P13). La diminution du taux de calcaire dans l'horizon de la profondeur est due à l'acidification du milieu par la racine qui excrète des ions  $H^+$  et des acides organiques qui dissolvent le  $CaCO_3$  (JAILLARD, 1992).

La présence du calcaire total et actif dans les horizons profonds, (p5, p10, p14), (p2, p4, p5, p7, p9, p14, p15) respectivement, est due à l'augmentation de la quantité d'eau d'irrigation, ce qui met en évidence un gradient de décarbonatation (BAIZE, 2000 et DUCHAUFOR, 1977). Ainsi, (RUELLAN, 1984 et HALITIM, 1988) ont montré que l'accumulation du calcaire est accentuée beaucoup plus dans les horizons de profondeur. Aussi, le carbonate de calcium a été lessivé des horizons supérieurs et accumulé dans les horizons B ou C (BRADY et WEIL, 1999 ; TAALAB *et al.*, 2019). BENCHETRIT (1956) et MEZANI (2021), ont enregistré que 70 à 80% du sol algérien est légèrement à modérément rempli d'horizons calcaires en profondeur par rapport à la surface. Ce résultat est similaire à celui trouvé par SALAH (2011).

Concernant le profil (P10) de calcaire actif, il montre une dynamique ascendante résulte d'une attaque du complexe adsorbant par le gaz carbonique de l'eau, fixant le calcaire dissous qui précipite ensuite d'une sécheresse trop grande du milieu et d'une forte température (BENCHETRIT, 1956). Les couches inférieures de  $CaCO_3$  peuvent être ramenées à la surface après une culture profonde du sol (BRADY et WEIL, 1999 ; TAALAB *et al.*, 2019). Ce résultat est confirmé par (MORLAT, 1976).

Nous remarquons que les fortes concentrations du calcaire ont été observées dans les profils qui sont situés en aval. Cette tendance à l'accumulation du calcaire a été observée au Sud et au Nord-est, ce qui est en relation avec la direction des eaux d'irrigation et la présence d'un cours naturel de drainage combiné avec une pente légère du terrain. La topographie devrait donc agir sur le lessivage du calcaire (RUELLAN, 1967).

La modélisation géostatistique a indiqué les meilleurs modèles théoriques ajustés pour les trois profondeurs du calcaire total et actif ainsi que différents niveaux de dépendance spatiale, la validation croisée a montré que les modèles des variogrammes les plus fiables de calcaire total sont le circulaire pour l'horizon H1, l'exponentiel pour l'horizon H2 et le sphérique pour l'horizon H3, Ce résultat se rapproche de celui trouvé par (GOMEZ *et al.*, 2012 ; MUHAIMEED & SALEH, 2013 ; AKBAS, 2014 ; SURUCU *et al.*, 2019). Concernant le calcaire actif les modèles des variogrammes les plus fiables sont l'exponentiel pour l'horizon H1 et 3 et le gaussien pour l'horizon H2. (Tabl. 25).

**Tableau 25** : paramètres des modèles de variogramme les mieux adaptés pour le calcaire total et actif

	<b>Modèle</b>	<b>Pépite (C0)</b>	<b>Seuil (C0+C)</b>	<b>Portée (m)</b>	<b>Rapport %</b>
<b>Calcaire total</b>					
<b>H1</b>	Circulaire	0,046	0,091	420,15	50,55
<b>H2</b>	Exponentiel	0,023	0,039	360,52	58,97
<b>H3</b>	Sphérique	0,0008	0,761	378,12	0,10
<b>Calcaire actif</b>					
<b>H1</b>	Exponentiel	0	0,211	400,73	0
<b>H2</b>	Gaussien	0,025	0,064	462,77	40,98
<b>H3</b>	Exponentiel	0,095	0,111	378,12	85,58

Dans des études sur la variabilité spatiale du calcaire, différents modèles ont été signalés comme étant les plus fiables, en effet, le modèle sphérique seul a été adopté par (SARMADIAN *et al.*, 2010 ; SHEK, 2010 ; NAJAFIAN, 2012 ; SAFARI *et al.*, 2013). GUNAL. (2021) a trouvés trois modèles différents de variogrammes du calcaire total, ces modèles étaient, l'exponentiel, le gaussien et le sphérique.

Dans l'horizon H1 et 2, le taux du calcaire total est modérément dépendant de l'espace, Les travaux de NAJAFIAN *et al.* (2012) et SAFARI *et al.* (2013) ont signalés des résultats similaires. Dans l'horizon H3 le taux du calcaire total est fortement dépendant de l'espace. Ce résultat se rapproche de celui trouvé par (MUHAIMEED & SALEH, 2013 ; AKBAS, 2014 ; GUNAL, 2021 ; SURUCU, 2019). Tandis que le calcaire actif est fortement dépendant de l'espace dans l'horizon H1 et modéré dans

l'horizon H2, par contre à la couche profonde, les valeurs de rapport pépite/palier montrant une faible dépendance spatiale. Selon CAMBARDELLA *et al.*, (1994), la dépendance spatiale modérée est contrôlée par des variations extrinsèques telles que le labour, l'irrigation, et la fertilisation. Aussi 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.

L'analyse variographique a révélé un effet de pépite très faible, ce qui signifie que la variation du calcaire total et actif à des distances inférieures au pas d'échantillonnage (200 m) est faible dans les trois couches. Des résultats similaires d'effet de pépite faible ont été trouvés par (MUHAIMEED & SALEH, 2013 ; AKBAS, 2014 ; GUNAL, 2021). En ce qui concerne la portée, les valeurs de cette dernière varient de de 420,15 mètres à 360,52 mètres pour le calcaire total. Les valeurs du calcaire actif varient de de 462,77 à 378,12 mètres. Toutes les valeurs de la portée ont été supérieures à 200 m, ce qui indique que la distance d'échantillonnage > 200 m sera suffisante pour explorer la variabilité spatiale du calcaire dans le sol.

La variation spatiale du calcaire dans le sol est modérée dans l'horizon H1 et H2 (CV=26,10%), (CV=31,85%) respectivement, et très élevée dans l'horizon3 (CV=77,94%), cela est dû à l'homogénéisation de la variabilité de ce paramètre suite à l'impact des pratiques agricoles surtout l'irrigation (DAREM, 2013).

## Chapitre VII. Etude de la variabilité spatiale et verticale de la réaction du sol

Le pH est un élément clé de la composition chimique du sol et détermine la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes et les microorganismes du sol (DOUCET, 2006 ; BORAH et *al.*, 2010).

L'acidité du sol est déterminée par la concentration en ion  $H^+$ . L'acidité effective qui correspond à la concentration en ion  $H^+$  libre existant dans la solution du sol (c'est le pH-eau) (BENMAHDI, 2008). Le pH-KCL correspond à l'acidité potentielle, quand tous les ions  $Al^{3+}$ ,  $H^+$  et  $Mn^{2+}$ , porteurs d'acidité, sont déplacés du complexe argilo-humique par les ions  $K^+$  de la solution saline de KCl, il donne donc une idée de l'acidité contenue dans la solution du sol (pH-eau) et de l'acidité adsorbée sur les particules du sol (complexe argilo-humique). Il est toujours plus bas que le pH-eau (INRA, 2012).

L'étude de la variabilité de la réaction du sol par la détermination du pH et pH KCL est effectuée sur une profondeur de 0-120 cm divisés en trois horizons avec un nombre de 15 profils.

### 1. Etude de la réaction du sol

Les résultats d'analyses du pH du sol dans la zone étudiée sont présentés synthétiquement dans le tableau 26.

**Tableau 26** : Statistiques descriptives de  $pH_{EAU}$

$pH_{EAU}$	H1	H2	H3
<b>Nombre d'échantillons</b>	15	15	15
<b>Maximum</b>	8,75	8,75	8,7
<b>Minimum</b>	8	7,95	7,95
<b>Moyenne</b>	8,25	8,26	8,31
<b>Écart-type</b>	0,19	0,27	0,21
<b>Coefficient de variation</b>	2,37	3,28	2,56

Le tableau 26, présente les données relatives au pH. Les résultats indiquent que tous les horizons sont basiques avec des valeurs extrêmes qui se situent entre 7,95 et 8,75. Les valeurs moyennes du pH, quant à elles, varient entre 8.25 et 8.31. Ce résultat signifie que le pH moyen des sols étudiés est homogène. Ce résultat est confirmé par les CV qui sont tous faibles ( $CV < 15 \%$ ).

Les résultats d'analyses du  $pH_{KCL}$  du sol dans la zone étudiée sont présentés synthétiquement dans le tableau 27.

**Tableau 27** : Statistiques descriptives de  $pH_{KCL}$

$pH_{KCL}$	H1	H2	H3
<b>Nombre d'échantillons</b>	15	15	15
<b>Maximum</b>	7,9	8,1	7,75
<b>Minimum</b>	7,25	7,2	7
<b>Moyenne</b>	7,52	7,5	7,33
<b>Écart-type</b>	0,18	0,26	0,19
<b>Coefficient de variation</b>	2,39	3,50	2,62

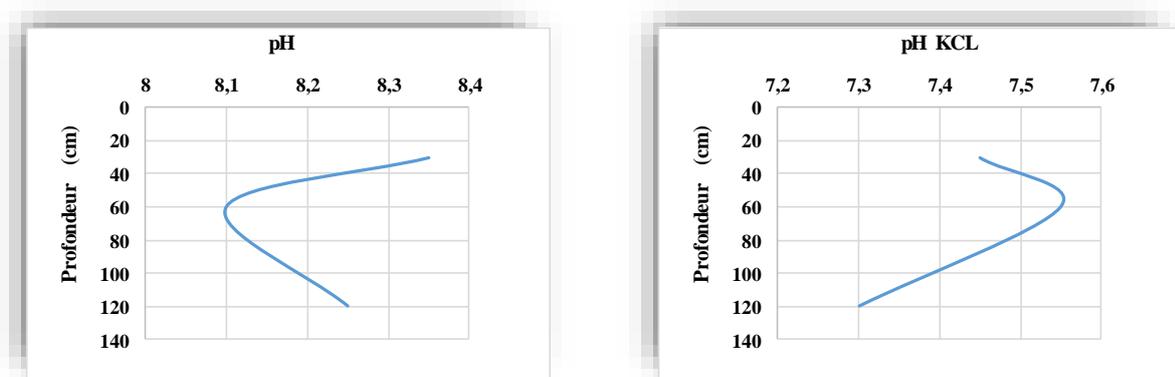
Le tableau 27, représente les données relatives au  $pH_{KCL}$ . Les résultats indiquent que tous les horizons sont neutres à basiques avec des valeurs extrêmes qui se situent entre 7 et 8,1. Les valeurs moyennes du  $pH_{KCL}$ , quant à elles, varient entre 7,33 et 7,52. Ce résultat signifie que le  $pH_{KCL}$  moyen des sols étudiés est homogène. Ce résultat est confirmé par les CV qui sont tous faibles ( $CV < 15\%$ ).

### 1.1. Etude de la variation verticale du $pH_{EAU}$ et $pH_{KCL}$

#### 1.1.1. Dynamique du $pH_{EAU}$ et $pH_{KCL}$ dans le profil P1

La figure (86), illustre que le profil du pH est de type ascendant caractérisé par un maximum en surface, or que le profil  $pH_{KCL}$  est caractérisée par un maximum dans la couche médiane.

Le pH est alcalin d'ordre 8,35 dans le premier horizon, 8,1 dans l'horizon moyen et 8,25 pour le troisième horizon. La teneur du  $pH_{KCL}$  dans le deuxième horizon est de 7,55 ce qui exprime que le sol est alcalin. Il est neutre dans les deux autres horizons (7,45. 7,3).



**Figure 86** : Profil pH et  $pH_{KCL}$  du P1

### 1.1.2. Dynamique du $pH_{EAU}$ et $pH_{KCL}$ dans le profil P2

Selon la figure (87), le profil pH est caractérisé par un maximum en profondeur, contrairement au profil  $pH_{KCL}$  qui est de type ascendant caractérisé par un maximum en surface.

La teneur du pH dans le premier et le deuxième horizon est de 8,08. 8,45 ce qui exprime que le sol est alcalin. Il est très alcalin dans le troisième horizon (8,7). Le  $pH_{KCL}$  est alcalin dans les deux premier horizons (7,55.7,55) et neutre pour le troisième horizon (7,2).

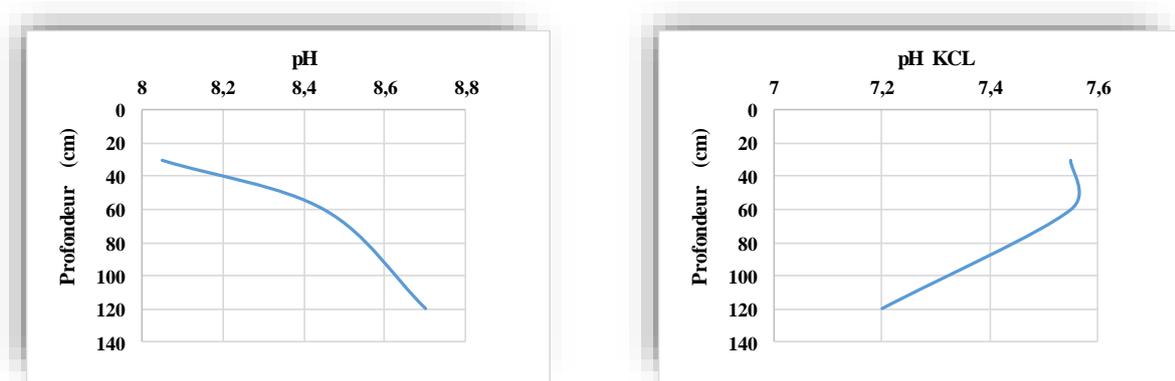


Figure 87 : Profil pH et  $pH_{KCL}$  du P2

### 1.1.3. Dynamique du $pH_{EAU}$ et $pH_{KCL}$ dans le profil P3

La figure (88), illustre que le profil du pH est de type descendant caractérisé par un maximum en profondeur, or que le profil  $pH_{KCL}$  est caractérisée par un maximum dans la couche médiane.

Les trois horizons sont alcalins (8,35.8. 8,5). Ils ont un  $pH_{KCL}$  neutre d'ordre 7,25. 7,3. 7,15 respectivement.

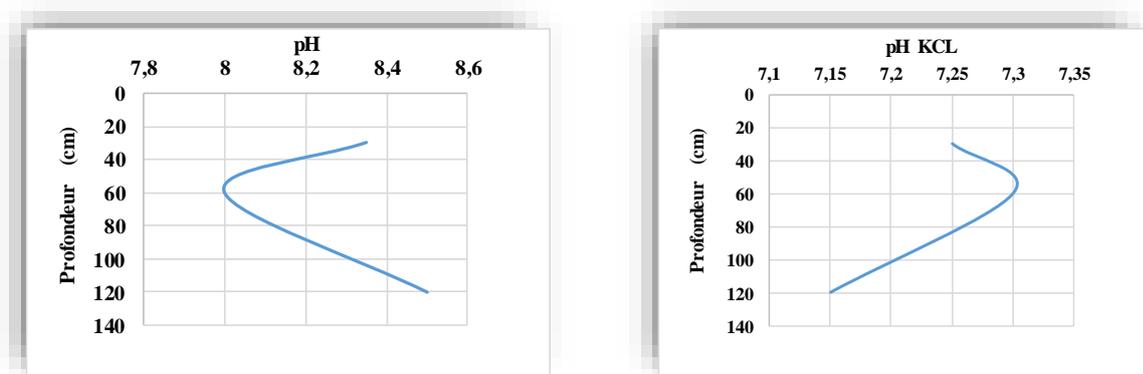


Figure 88 : Profil pH et  $pH_{KCL}$  du P3

### 1.1.4. Dynamique du $pH_{EAU}$ et $pH_{KCL}$ dans le profil P4

Selon la figure (89), le profil pH et  $pH_{KCL}$  sont de type ascendant, caractérisés par un maximum en surface.

Le sol est alcalin dont le taux est 8,4, 7,95, 8,05 dans les trois horizons. Avec un  $pH_{KCL}$  neutre variant de 7,25 à 7,4.

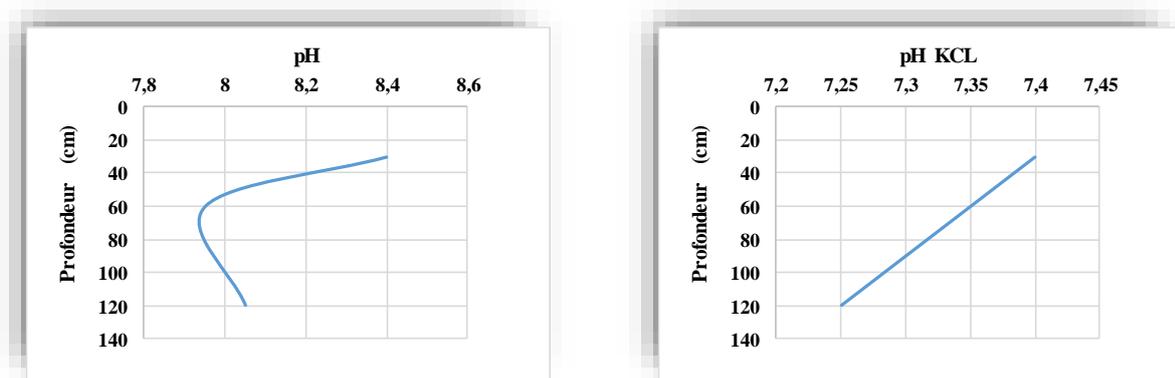


Figure 89 : Profil pH et  $pH_{KCL}$  du P4

### 1.1.5. Dynamique du $pH_{EAU}$ et $pH_{KCL}$ dans le profil P5

La valeur du pH et  $pH_{KCL}$  du sol est plus élevée en profondeur, celle du pH varie de 8,25 à 8,35 ce qui montre que le sol est alcalin. Le  $pH_{KCL}$  est neutre à très alcalin, compris entre 7,45 et 7,75 (Fig. 90).

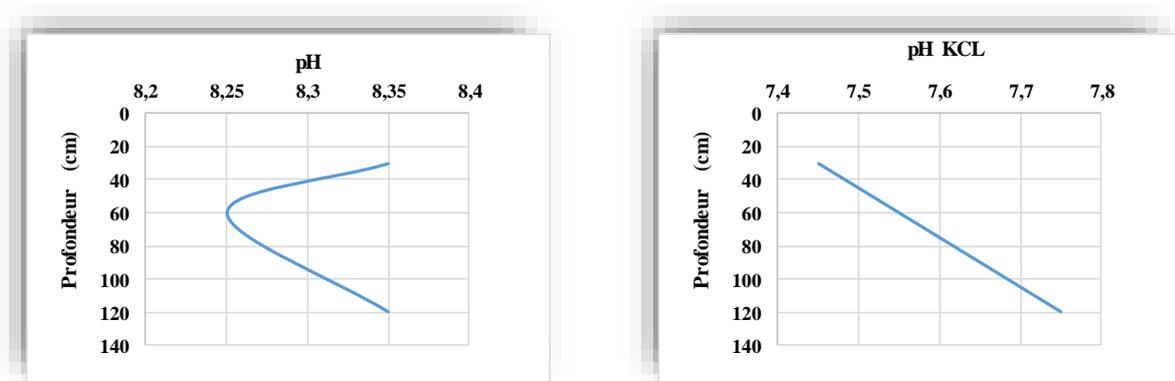


Figure 90 : Profil pH et  $pH_{KCL}$  du P5

### 1.1.6. Dynamique du $pH_{EAU}$ et $pH_{KCL}$ dans le profil P6

Selon la figure (91), le profil pH est caractérisé par un maximum en profondeur, contrairement au profil  $pH_{KCL}$  qui est de type ascendant spécifié par un maximum en surface.

Le pH est alcalin d'ordre 8,1 dans le premier horizon, 8,15 dans l'horizon moyen et 8,15 pour le troisième horizon. Ils ont un  $pH_{KCL}$  neutre d'ordre 7,45. 7,35. 7,35 respectivement.

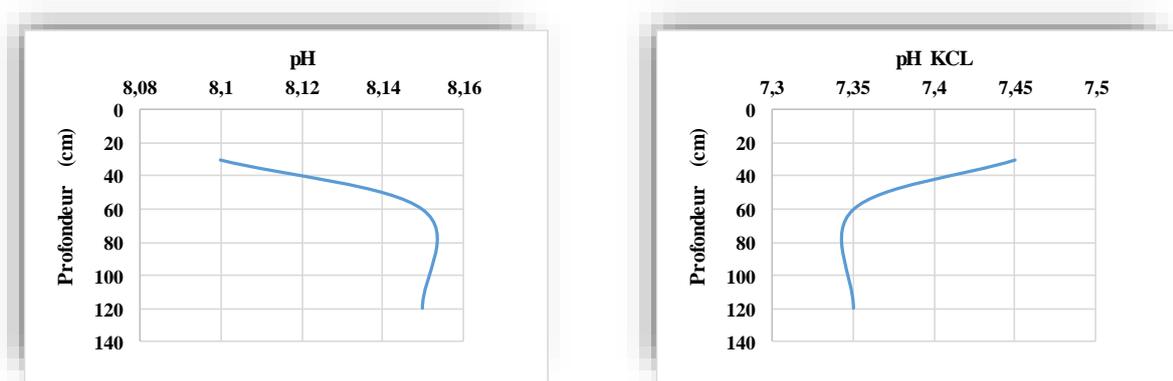


Figure 91 : Profil pH et  $pH_{KCL}$  du P6

### 1.1.7. Dynamique du $pH_{EAU}$ et $pH_{KCL}$ dans le profil P7

La figure (92), illustre que le profil du pH est de type descendant caractérisé par un maximum en profondeur, or que le profil  $pH_{KCL}$  est caractérisée par un maximum dans la couche médiane.

Les trois horizons sont alcalins (8,1. 8,3. 8,4). La teneur du  $pH_{KCL}$  dans le deuxième horizon est de 7,55 ce qui exprime que le sol est alcalin. Il est neutre dans les deux autres horizons (7,3. 7,35).

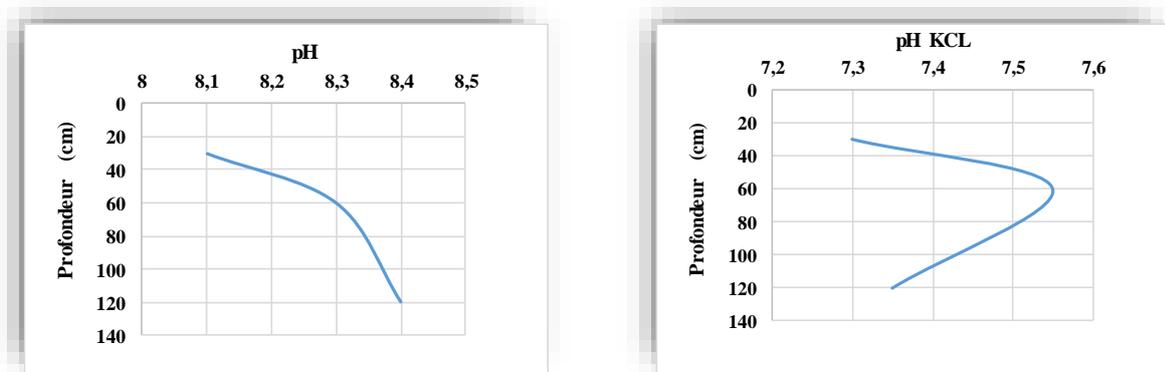


Figure 92 : Profil pH et  $pH_{KCL}$  du P7

### 1.1.8. Dynamique du $pH_{EAU}$ et $pH_{KCL}$ dans le profil P8

Au vu des résultats de la figure (93), il ressort que les deux profils suivent des allures différentes dont le profil pH est spécifié par un maximum en profondeur et le profil  $pH_{KCL}$  caractérisé par un maximum superficiel.

Le sol appartenant à ce profil est alcalin dans les trois horizons (8,05.8,05.8,4), avec un  $pH_{KCL}$  neutre fluctuant dans l'intervalle 7,15-7,45.

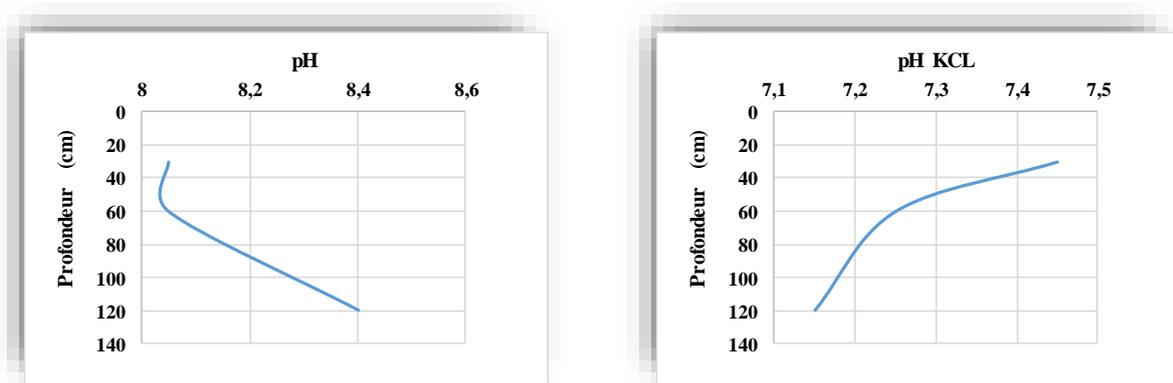


Figure 93 : Profil pH et  $pH_{KCL}$  du P8

### 1.1.9. Dynamique du $pH_{EAU}$ et $pH_{KCL}$ dans le profil P9

Selon la figure (94), le profil pH et  $pH_{KCL}$  sont caractérisés par un maximum dans la couche médiane.

Le sol est alcalin dont le taux est 8, 8,5, 8,15 dans les trois horizons. Avec un  $pH_{KCL}$  neutre variant de 7 à 7,45.

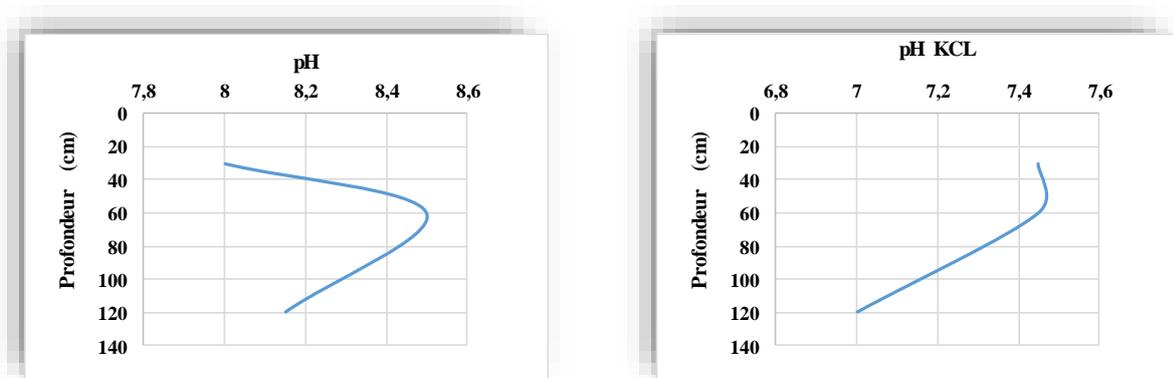


Figure 94 : Profil pH et  $pH_{KCL}$  du P9

### 1.1.10. Dynamique du $pH_{EAU}$ et $pH_{KCL}$ dans le profil P10

La figure (95), montre que le profil pH est caractérisé par un maximum en profondeur, contrairement au profil  $pH_{KCL}$  qui est de type ascendant spécifié par un maximum en surface.

La teneur du pH dans les trois horizons est de 8,3. 8,2. 8,35 ce qui exprime que le sol est alcalin. Le  $pH_{KCL}$  est alcalin dans le premier horizon (7,65) et neutre pour le deuxième et le troisième horizon (7,3.7,45).

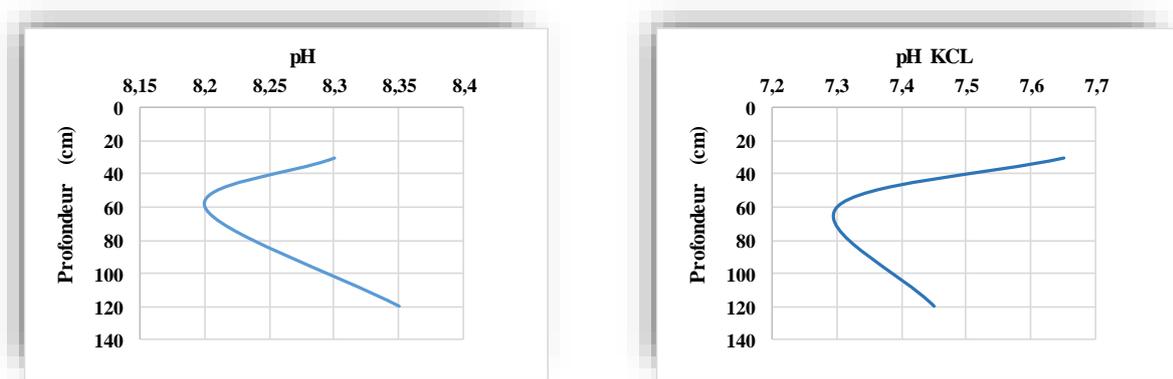


Figure 95 : Profil pH et  $pH_{KCL}$  du P10

### 1.1.11. Dynamique du $pH_{EAU}$ et $pH_{KCL}$ dans le profil P11

La valeur du pH et  $pH_{KCL}$  du sol est plus élevée en surface, celle du pH varie de 7,95 à 8,25 ce qui montre que le sol est alcalin. Le  $pH_{KCL}$  est neutre, compris entre 7,2 et 7,5 (Fig.96).

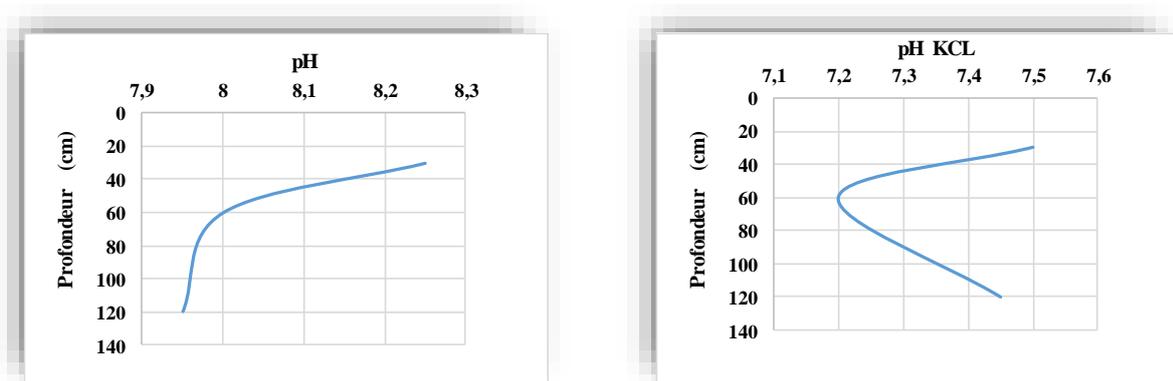


Figure 96 : Profil pH et  $pH_{KCL}$  du P11

### 1.1.12. Dynamique du $pH_{EAU}$ et $pH_{KCL}$ dans le profil P12

La figure (97), illustre que le profil du pH est de type descendant caractérisé par un maximum en profondeur, or que le profil  $pH_{KCL}$  est caractérisée par un maximum dans la couche médiane.

Les trois horizons sont alcalins (8,4.8,45. 8,45). Ils ont un  $pH_{KCL}$  alcalin d'ordre 7,85. 8,1. 7,55 respectivement.

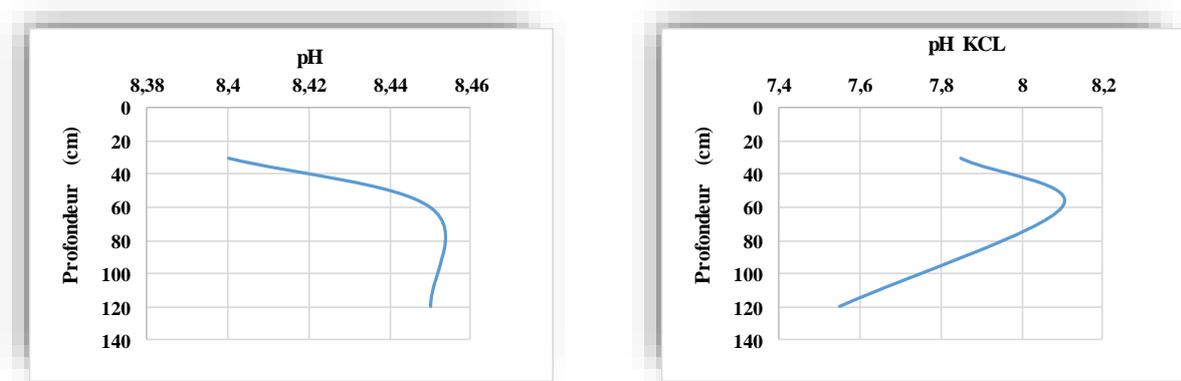


Figure 97 : Profil pH et  $pH_{KCL}$  du P12

### 1.1.13. Dynamique du $pH_{EAU}$ et $pH_{KCL}$ dans le profil P13

Selon la figure (98), le profil pH et  $pH_{KCL}$  sont caractérisés par un maximum dans la couche médiane.

Le sol est alcalin dans le premier et le troisième horizon (8,1. 8,6). Il est très alcalin dans le deuxième horizon (8,75). Avec un  $pH_{KCL}$  alcalin dans les deux premier horizons (7,65.8,05), neutre dans le troisième horizon (7,3).

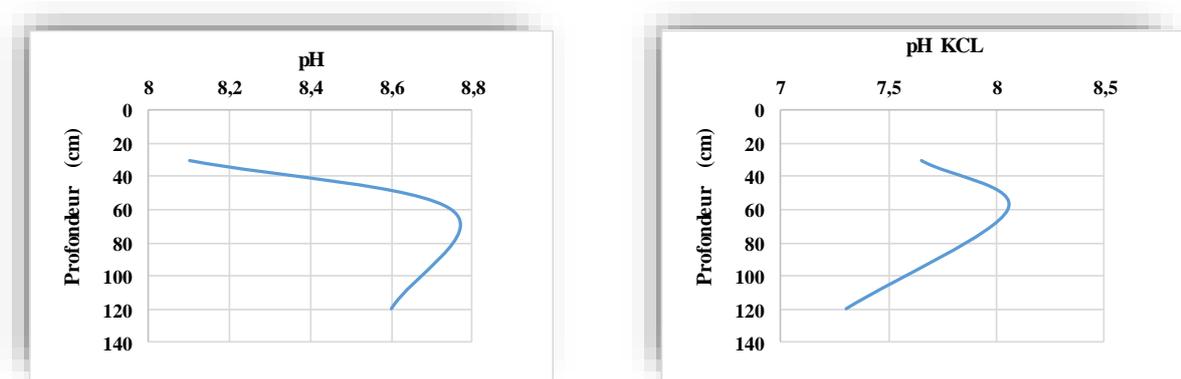


Figure 98 : Profil pH et  $pH_{KCL}$  du P13

### 1.1.14. Dynamique du $pH_{EAU}$ et $pH_{KCL}$ dans le profil P14

D'après la figure (99), le profil pH et  $pH_{KCL}$  sont de type ascendant, caractérisés par un maximum en surface.

La teneur du pH dans les deux premiers horizons est de 8.75 ce qui exprime que le sol est très alcalin. Il est alcalin dans le troisième horizons (8,35). Le  $pH_{KCL}$  est alcalin d'ordre 7,9 dans le premier horizon, 7,55 dans l'horizon moyen et 7.5 pour le troisième horizon.

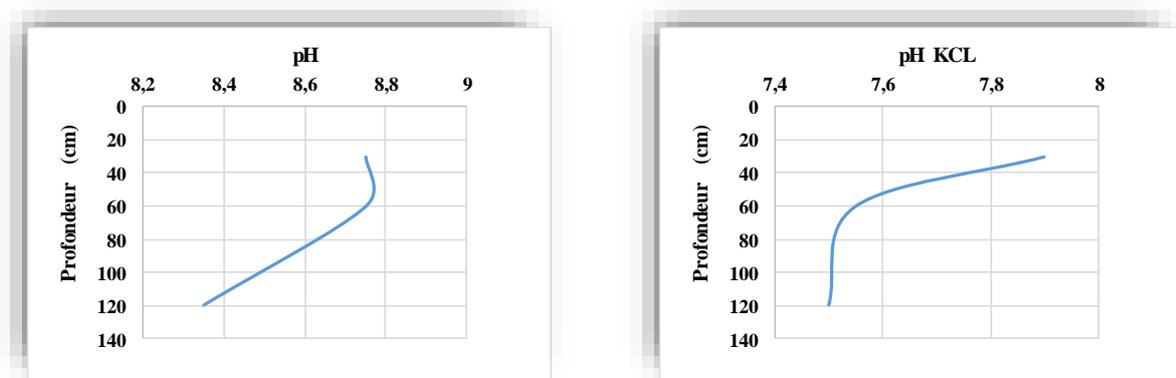


Figure 99 : Profil pH et  $pH_{KCL}$  du P14

### 1.1.15. Dynamique du $pH_{EAU}$ et $pH_{KCL}$ dans le profil P15

La valeur du pH et  $pH_{KCL}$  du sol est plus élevée en surface, celle du pH varie de 8,05 à 8,25 ce qui montre que le sol est alcalin. Le  $pH_{KCL}$  est neutre, compris entre 7,15 et 7,45 (Fig.100).

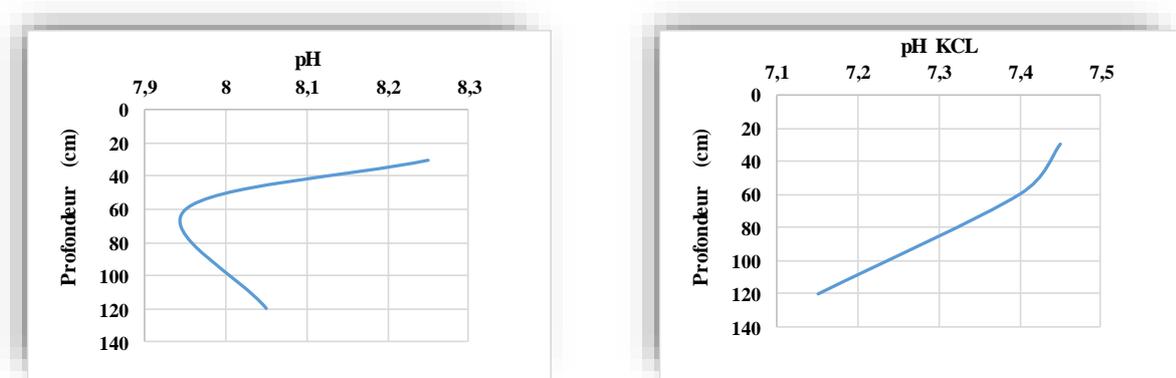


Figure 100 : Profil pH et  $pH_{KCL}$  du P15

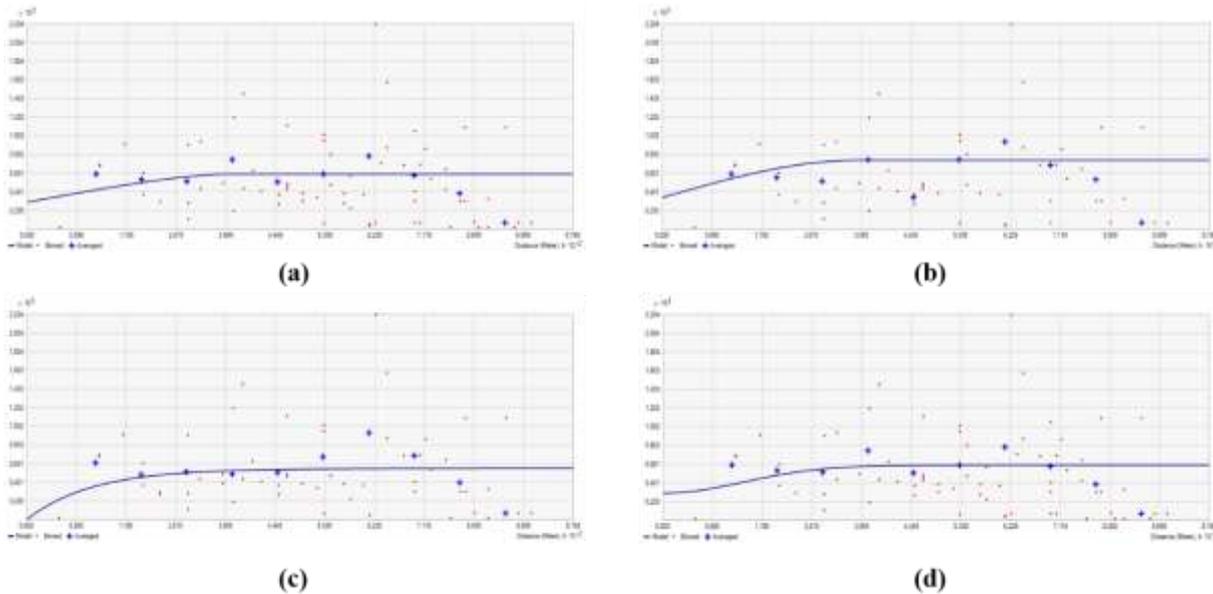
## 2. Modélisation géostatistique de la variabilité spatiale de la réaction du sol

Quatre modèles sont utilisés : circulaire, sphérique, exponentiel et gaussien suivie d'une validation croisée afin de choisir le meilleur modèle de variogramme qui sera utilisé pour la réalisation des cartes de variabilité spatiale par krigeage.

## 2. 1. Modélisation géostatistique de la variabilité du pH<sub>eau</sub> dans l'horizon 1

### 2.1.1. Analyse variographique

La figure 101, montre les quatre variogrammes ajustés aux modèles (circulaire, sphérique, exponentiel et gaussien).



**Figure 101 :** Variogrammes expérimentaux du pH<sub>eau</sub> dans l'horizon 1. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien.

D'après la figure 101, Le variogramme ajusté au modèle circulaire a un palier de 0,0003 et une portée de 350,11 m, dont, l'effet de pépité est de l'ordre de 0,0002. Le modèle sphérique (palier de 0,0004, une portée de 350,11 m) a un effet de pépité égal à 0,0003. La représentation de l'exponentiel a révélé un palier de 0,0005, une portée de 350,11 m et ne présente pas un effet de pépité. Tandis que, le variogramme gaussien présente un palier de 0,0003, une portée de 350,11 m avec un effet de pépité de 0,0002.

Les équations des modèles des variogrammes expérimentaux du pH<sub>eau</sub> dans l'horizon 1, sont écrites de la façon suivante :

✓ **Circulaire** :  $\gamma(h) = 0,0002 + 0,0001 \left( 1 - \left( \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{h}{350,11} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 350,11} \sqrt{1 - \left( \frac{h}{350,11} \right)^2} \right)$

✓ **Sphérique** :  $\gamma(h) = 0,0003 + 0,0001 \left( 1,5 \left( \frac{h}{350,11} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{350,11} \right)^3 \right)$

✓ **Exponentiel** :  $\gamma(h) = 0,0005 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{350,11} \right) \right)$

✓ **Gaussien** :  $\gamma(h) = 0,0002 + 0,0001 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{350,11} \right)^2 \right)$

### 2.1.2. Validation croisée

Le tableau 28, représente synthétiquement les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme du pH<sub>EAU</sub> dans l'horizon 1.

**Tableau 28** : Validation croisée des variogrammes du pH<sub>EAU</sub> dans l'horizon 1.

pH <sub>EAU</sub> H1	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	15	15	15	15
Erreur moyenne de prédiction (ME)	-0,00241	-0,00084	-0,00011	-0,00096
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,22233	0,22342	0,22619	0,22433
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,01929	-0,01379	-0,01509	-0,01515
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	1,04001	1,02154	1,25156	1,07813
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	0,21717	0,22269	0,18419	0,21193

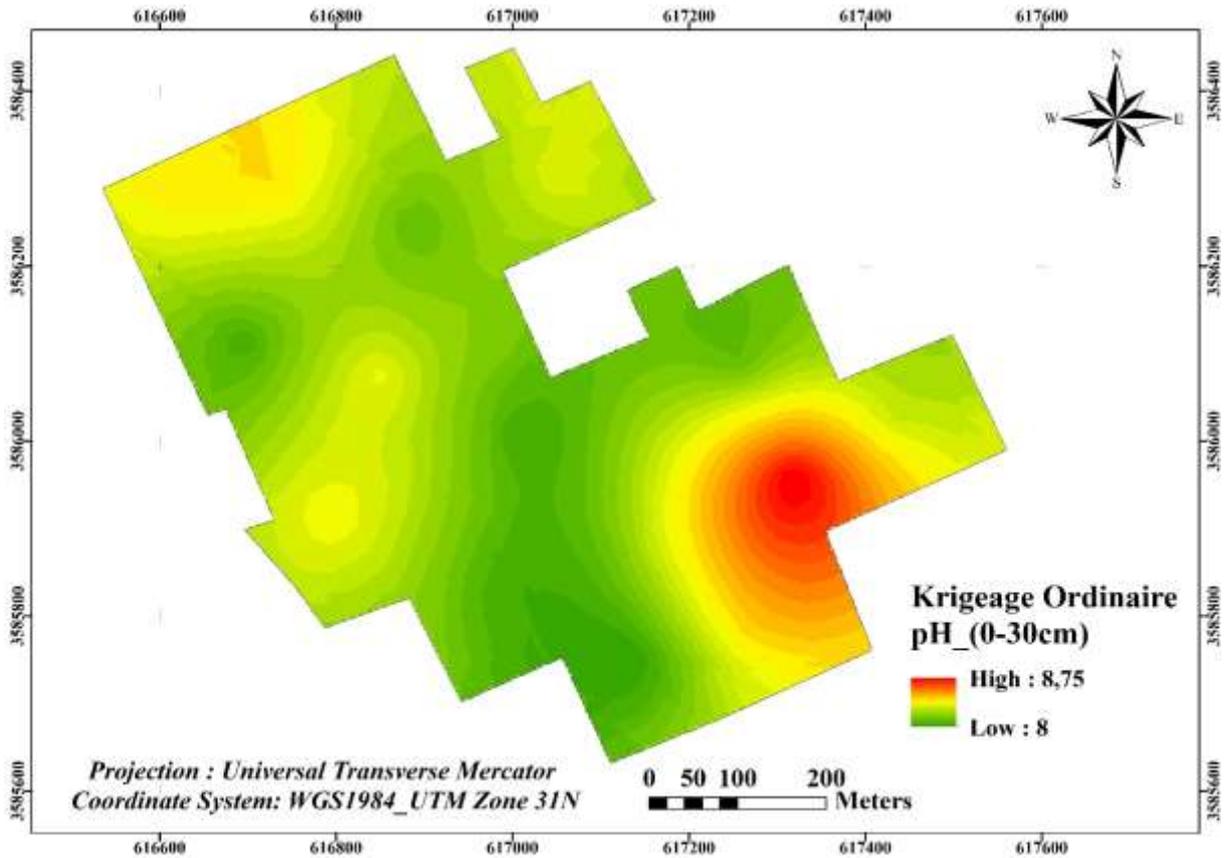
Selon le tableau (28) ci-dessus, les valeurs de la validation croisée sont raisonnables ce qui signifie que les quatre modèles sont optimaux, tous les modèles ont :

- Une erreur moyenne de prédiction (ME) proche du 0
- Une erreur moyenne standardisée (MSE) proche du 0
- Une erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE) proche du 1

Le modèle le plus fiable est le modèle sphérique car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche à l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

### 2.1.3. Cartographie par krigeage

Les résultats précédents montrent que le modèle sphérique est le meilleur choix. Ce modèle a été utilisée pour établir la carte de la variabilité spatiale du pH<sub>eau</sub> dans l'horizon 1 par krigeage.



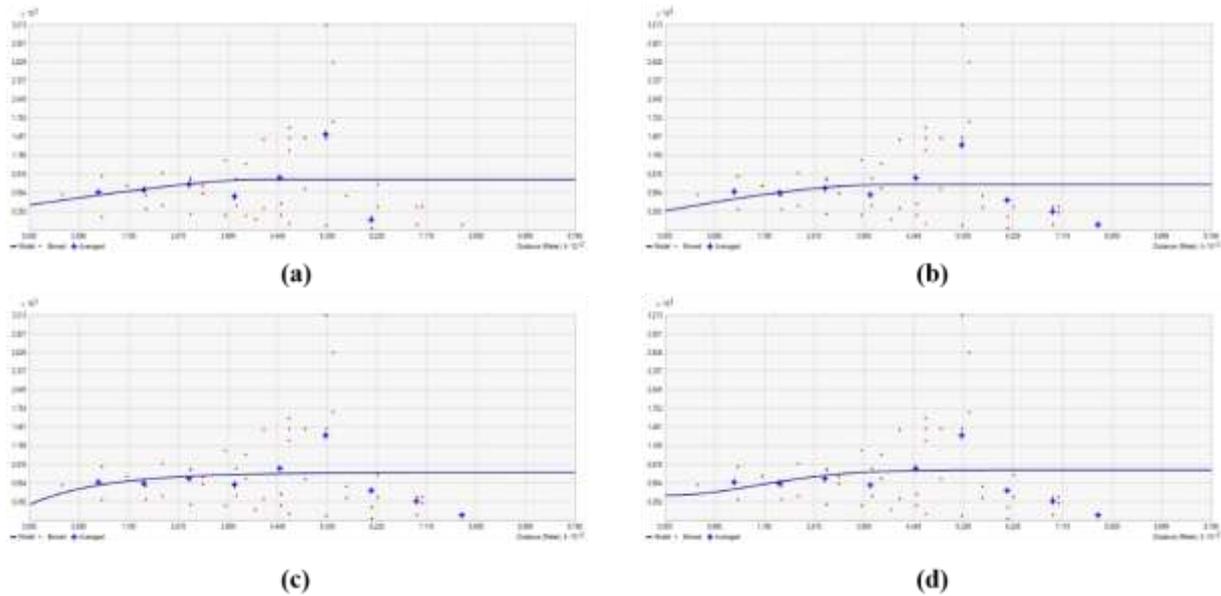
**Figure 102 :** Carte de variabilité spatiale du  $pH_{EAU}$  dans l'horizon 1.

La carte (Fig.102) montre une variation spatiale homogène du  $pH_{EAU}$  dans l'horizon 1. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans la partie sud-est de la palmeraie. Le sol est alcalin à très alcalin dans tout l'horizon avec des valeurs variant de 8 à 8,75. Cette variation est considérée comme faible avec un coefficient de variation de 2,37 %.

## 2. 2. Modélisation géostatistique de la variabilité du $pH_{KCL}$ dans l'horizon 1

### 2.2.1. Analyse variographique

La figure 103, montre les quatre variogrammes ajustés aux modèles (circulaire, sphérique, exponentiel et gaussien).



**Figure 103 :** Variogrammes expérimentaux du  $\text{pH}_{\text{KCL}}$  dans l'horizon 1. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien.

D'après la figure 103, Le variogramme ajusté au model circulaire a un palier de 0,0004 et une portée de 400,22 m, dont, l'effet de pépite est de l'ordre de 0,0003. Le model sphérique (palier de 0,0004, une portée de 400,22 m) à un effet de pépite égal à 0,0003. La représentation de l'exponentiel a révélé un palier de 0,0005, une portée de 400,22 m et un effet de pépite de 0,0002. Tandis que, le variogramme gaussien présente un palier de 0,0004, une portée de 400,22 m avec un effet de pépite de 0,0003.

Les équations des modèles des variogramms expérimentaux du  $\text{pH}_{\text{KCL}}$  dans l'horizon 1, sont écrits de la façon suivante :

- ✓ **Circulaire** :  $\gamma(h) = 0,0003 + 0,0001 \left( 1 - \left( \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{h}{400,22} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 400,22} \sqrt{1 - \left( \frac{h}{400,22} \right)^2} \right)$
- ✓ **Sphérique** :  $\gamma(h) = 0,0003 + 0,0001 \left( 1,5 \left( \frac{h}{400,22} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{400,22} \right)^3 \right)$
- ✓ **Exponentiel** :  $\gamma(h) = 0,0002 + 0,0003 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{400,22} \right) \right)$
- ✓ **Gaussien** :  $\gamma(h) = 0,0003 + 0,0001 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{400,22} \right)^2 \right)$

### 2.2.2. Validation croisée

Le tableau 29, représente synthétiquement les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme du  $pH_{KCL}$  dans l'horizon 1.

**Tableau 29** : Validation croisée des variogrammes du  $pH_{KCL}$  dans l'horizon 1.

$pH_{KCL}$ H1	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	15	15	15	15
Erreur moyenne de prédiction (ME)	0,00065	0,00071	0,00012	0,00086
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,17926	0,17909	0,17588	0,17829
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,00615	-0,00715	-0,00766	-0,00554
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	0,86341	0,91886	0,85966	0,87781
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	0,20415	0,19141	0,20153	0,19955

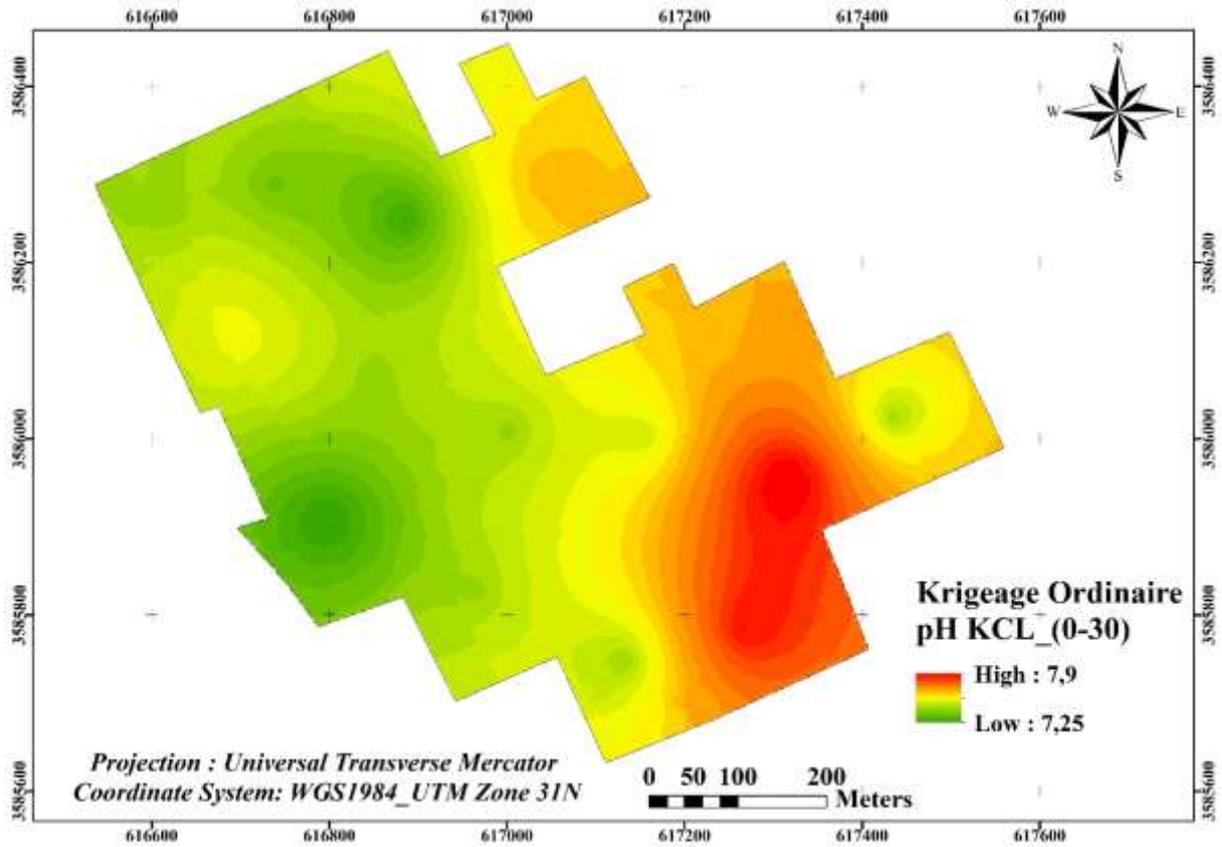
Selon le tableau (29) ci-dessus, les valeurs de la validation croisée sont raisonnables ce qui signifie que les quatre modèles sont optimaux, tous les modèles ont :

- Une erreur moyenne de prédiction (ME) proche du 0
- Une erreur moyenne standardisée (MSE) proche du 0
- Une erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE) proche du 1

Le modèle le plus fiable est le modèle sphérique car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche à l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

### 2.2.3. Cartographie par krigeage

Les résultats précédents montrent que le modèle sphérique est le meilleur choix. Ce modèle a été utilisée pour établir la carte de la variabilité spatiale  $pH_{KCL}$  dans l'horizon 1 par krigeage.



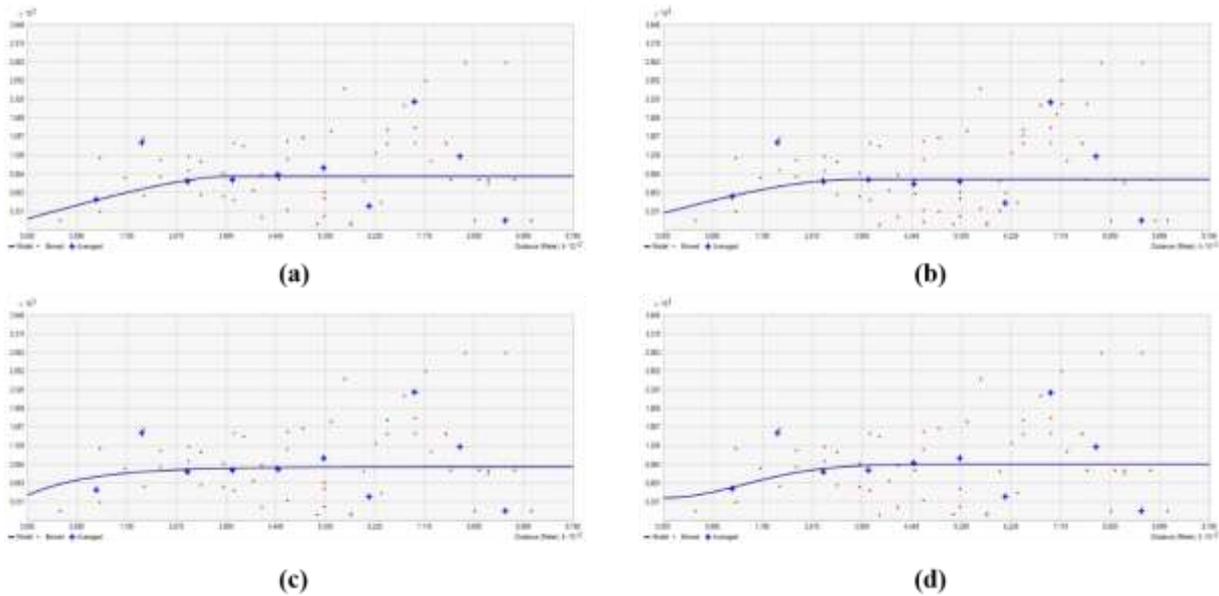
**Figure 104 :** Carte de variabilité spatiale du  $pH_{KCL}$  dans l'horizon 1.

La carte (Fig.104) montre une variation spatiale homogène du  $pH_{KCL}$  dans l'horizon 1. Le  $pH_{KCL}$  varie de modérément à fortement alcalin (7,25-7,9). Les valeurs qui présentent une alcalinité sont situées au sud-est de la palmeraie. La variation du  $pH_{KCL}$  est faible avec un CV de 2,39 %.

### 2. 3. Modélisation géostatistique de la variabilité du $pH_{eau}$ dans l'horizon 2

#### 2.3.1. Analyse variographique

La figure 105, montre les quatre variogrammes ajustés aux modèles (circulaire, sphérique, exponentiel et gaussien).



**Figure 105 :** Variogrammes expérimentaux du  $pH_{EAU}$  dans l'horizon 2. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien.

D'après la figure 105, Le variogramme ajusté au model circulaire a un palier de 0,0007 et une portée de 350,11 m, dont, l'effet de pépite est de l'ordre de 0,0002. Le model sphérique (palier de 0,0006, une portée de 350,11 m) à un effet de pépite égal à 0,0003. La représentation de l'exponentiel a révélé un palier de 0,0005, une portée de 350,11 m et un effet de pépite de 0,0004. Tandis que, le variogramme gaussien présente un palier de 0,0006, une portée de 350,11 m avec un effet de pépite de 0,0004.

Les équations des modèles des variogramms expérimentaux du  $pH_{EAU}$  dans l'horizon 2, sont écrits de la façon suivante :

✓ **Circulaire** :  $\gamma(h) = 0,0002 + 0,0005 \left( 1 - \left( \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{h}{350,11} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 350,11} \sqrt{1 - \left( \frac{h}{350,11} \right)^2} \right)$

✓ **Sphérique** :  $\gamma(h) = 0,0003 + 0,0003 \left( 1,5 \left( \frac{h}{350,11} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{350,11} \right)^3 \right)$

✓ **Exponentiel** :  $\gamma(h) = 0,0004 + 0,0001 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{350,11} \right) \right)$

✓ **Gaussien** :  $\gamma(h) = 0,0004 + 0,0002 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{350,11} \right)^2 \right)$

### 2.3.2. Validation croisée

Le tableau 30, représente synthétiquement les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme du  $pH_{EAU}$  dans l'horizon 2.

**Tableau 30** : Validation croisée des variogrammes du  $pH_{EAU}$  dans l'horizon 2.

$pH_{EAU}$ H2	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	15	15	15	15
Erreur moyenne de prédiction (ME)	-0,00618	-0,00864	-0,00809	-0,00538
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,31042	0,30863	0,30908	0,31098
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,04627	-0,04565	-0,05072	-0,04181
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	1,22343	1,03029	1,18347	1,17212
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	0,25176	0,29717	0,25927	0,26337

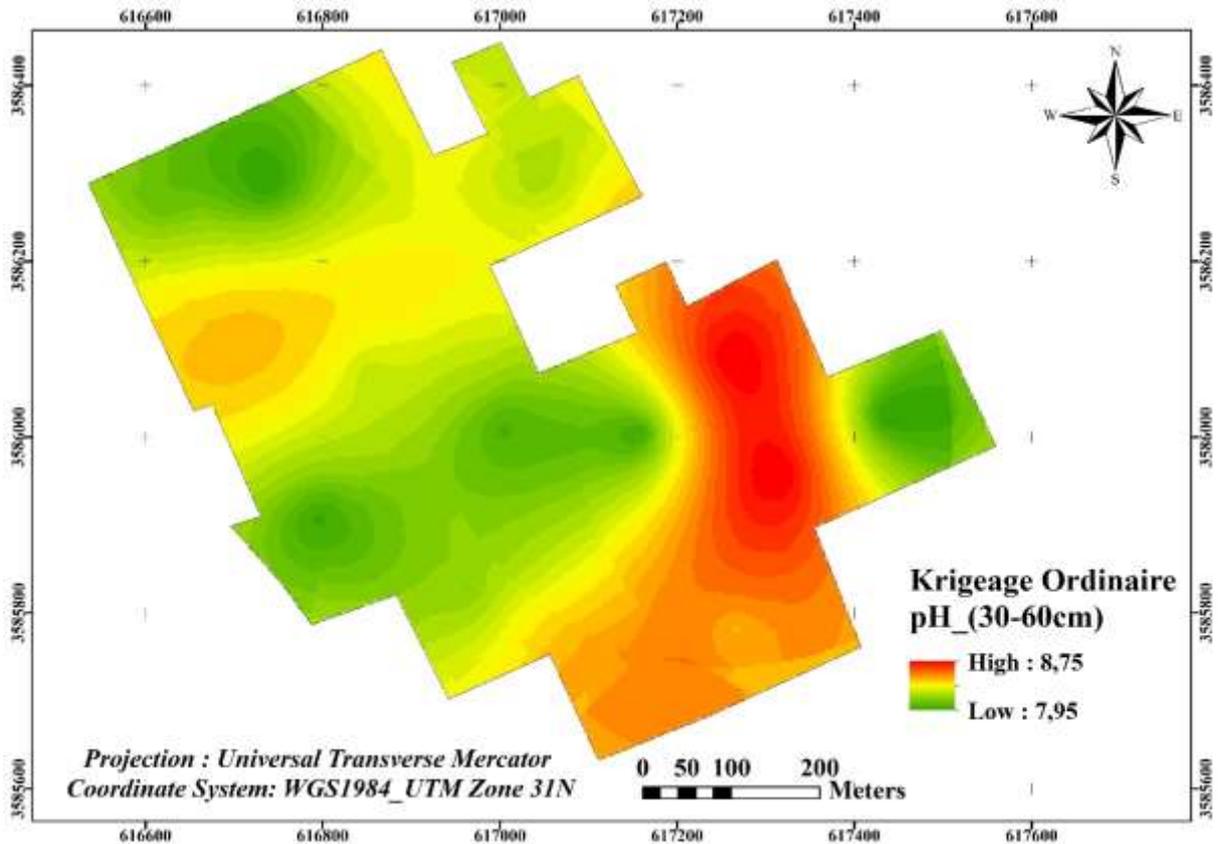
Selon le tableau (30) ci-dessus, les valeurs de la validation croisée sont raisonnables ce qui signifie que les quatre modèles sont optimaux, tous les modèles ont :

- Une erreur moyenne de prédiction (ME) proche du 0
- Une erreur moyenne standardisée (MSE) proche du 0
- Une erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE) proche du 1

Le modèle le plus fiable est le modèle sphérique car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche à l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

### 2.3.3. Cartographie par krigeage

Les résultats précédents montrent que le modèle sphérique est le meilleur choix. Ce modèle a été utilisée pour établir la carte de la variabilité spatiale du  $pH_{EAU}$  dans l'horizon 2 par krigeage.



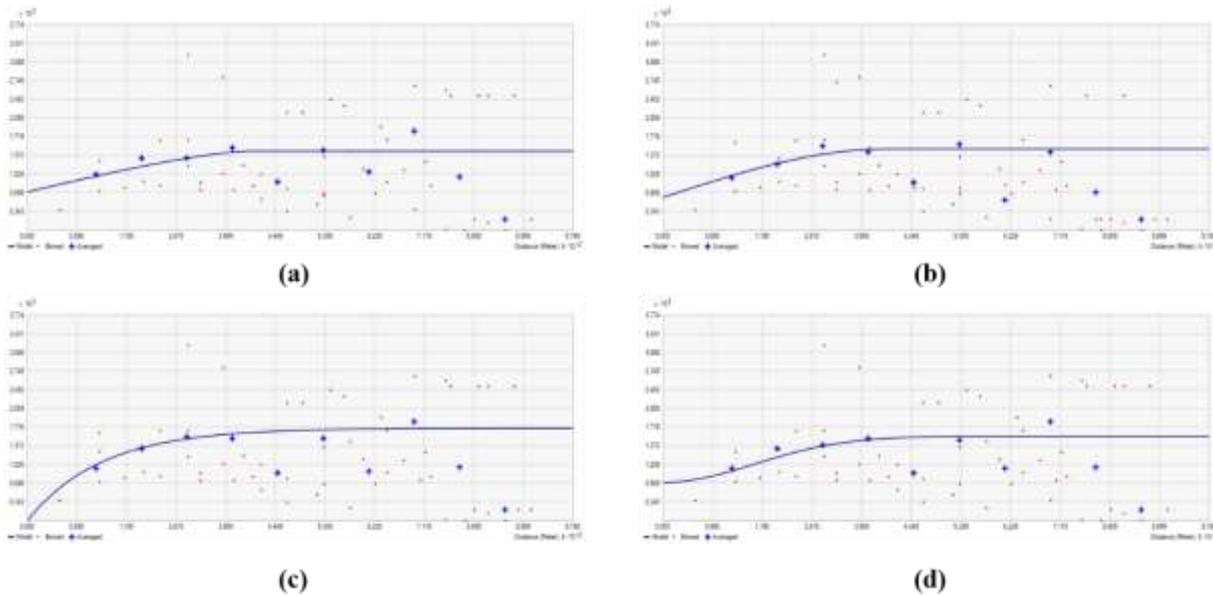
**Figure 106 :** Carte de variabilité spatiale du  $pH_{EAU}$  dans l'horizon 2.

La carte (Fig. 106) montre une variation faible du  $pH_{EAU}$  dans l'horizon 2, avec un coefficient de variation de 3,28 %. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans la partie ouest et sud-est de la palmeraie. Le  $pH_{EAU}$  varie d'alcalin (7,95) à très alcalin (8,75).

## 2. 4. Modélisation géostatistique de la variabilité du $pH_{KCL}$ dans l'horizon 2

### 2.4.1. Analyse variographique

La figure 107, montre les quatre variogrammes ajustés aux modèles (circulaire, sphérique, exponentiel et gaussien).



**Figure 107 :** Variogrammes expérimentaux du  $pH_{KCL}$  dans l'horizon 2. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien.

D'après la figure 107, Le variogramme ajusté au model circulaire a un palier de 0,0008 et une portée de 400,22 m, dont, l'effet de pépité est de l'ordre de 0,0007. Le model sphérique (palier de 0,0008, une portée de 400,22 m) à un effet de pépité égal à 0,0006. La représentation de l'exponentiel a révélé un palier de 0,001, une portée de 400,22 m et ne présente pas un effet de pépité. Tandis que, le variogramme gaussien présente un palier de 0,0008, une portée de 400,22 m avec un effet de pépité de 0,0007.

Les équations des modèles des variogramms expérimentaux du  $pH_{KCL}$  dans l'horizon 2, sont écrits de la façon suivante :

✓ **Circulaire** :  $\gamma(h) = 0,0007 + 0,0001 \left( 1 - \left( \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{h}{400,22} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 400,22} \sqrt{1 - \left( \frac{h}{400,22} \right)^2} \right)$

✓ **Sphérique** :  $\gamma(h) = 0,0006 + 0,0002 \left( 1,5 \left( \frac{h}{400,22} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{400,22} \right)^3 \right)$

✓ **Exponentiel** :  $\gamma(h) = 0,001 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{400,22} \right) \right)$

✓ **Gaussien** :  $\gamma(h) = 0,0007 + 0,0001 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{400,22} \right)^2 \right)$

### 2.4.2. Validation croisée

Le tableau 31, représente synthétiquement les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme du  $pH_{KCL}$  dans l'horizon 2.

**Tableau 31 :** Validation croisée des variogrammes du  $pH_{KCL}$  dans l'horizon 2.

$pH_{KCL}$ H2	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	15	15	15	15
Erreur moyenne de prédiction (ME)	-0,00307	-0,00295	-0,00183	-0,00027
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,30525	0,30801	0,30968	0,31483
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,02582	-0,02608	-0,02244	-0,02017
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	1,13276	1,12486	1,09904	1,19777
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	0,27043	0,27507	0,28409	0,26436

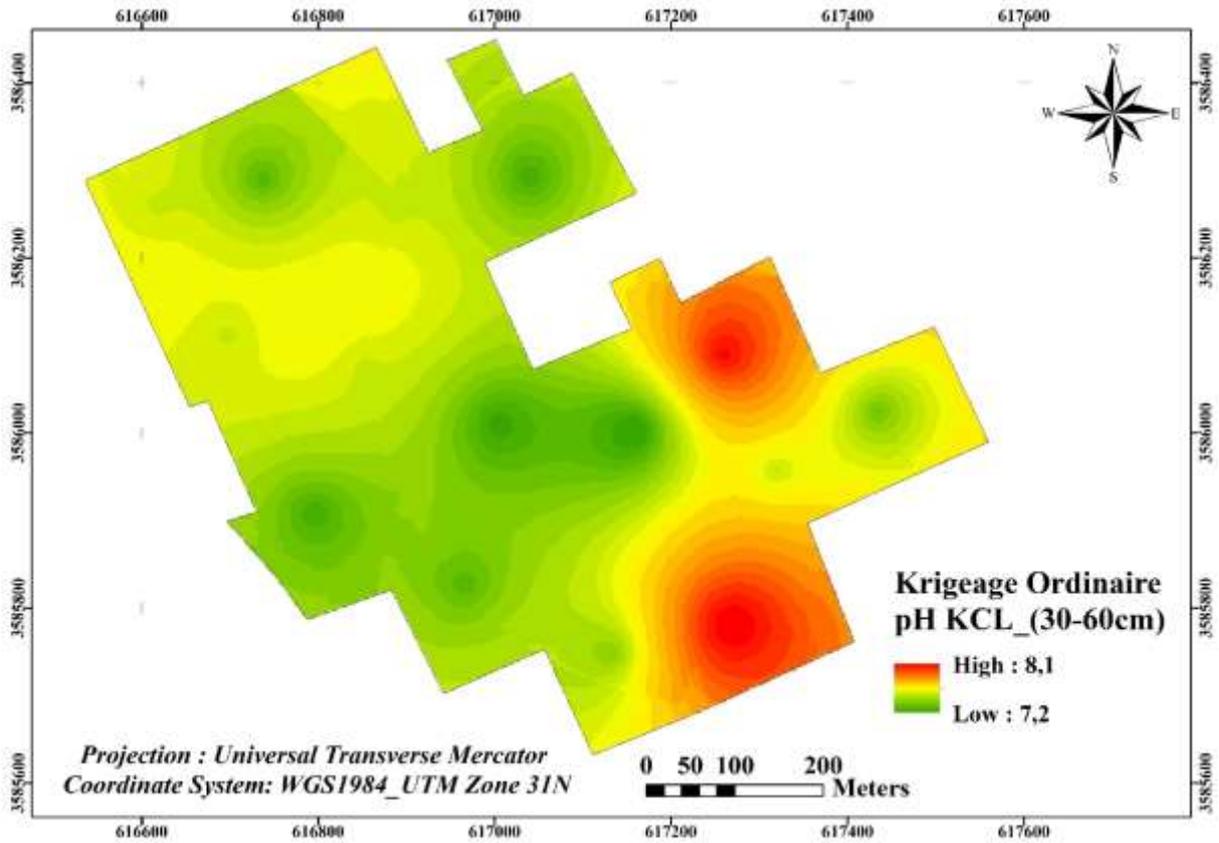
Selon le tableau (31) ci-dessus, les valeurs de la validation croisée sont raisonnables ce qui signifie que les quatre modèles sont optimaux, tous les modèles ont :

- Une erreur moyenne de prédiction (ME) proche du 0
- Une erreur moyenne standardisée (MSE) proche du 0
- Une erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE) proche du 1

Le modèle le plus fiable est le modèle exponentiel car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche à l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

### 2.4.3. Cartographie par krigeage

Les résultats précédents montrent que le modèle exponentiel est le meilleur choix. Ce modèle a été utilisée pour établir la carte de la variabilité spatiale  $pH_{KCL}$  dans l'horizon 2 par krigeage.



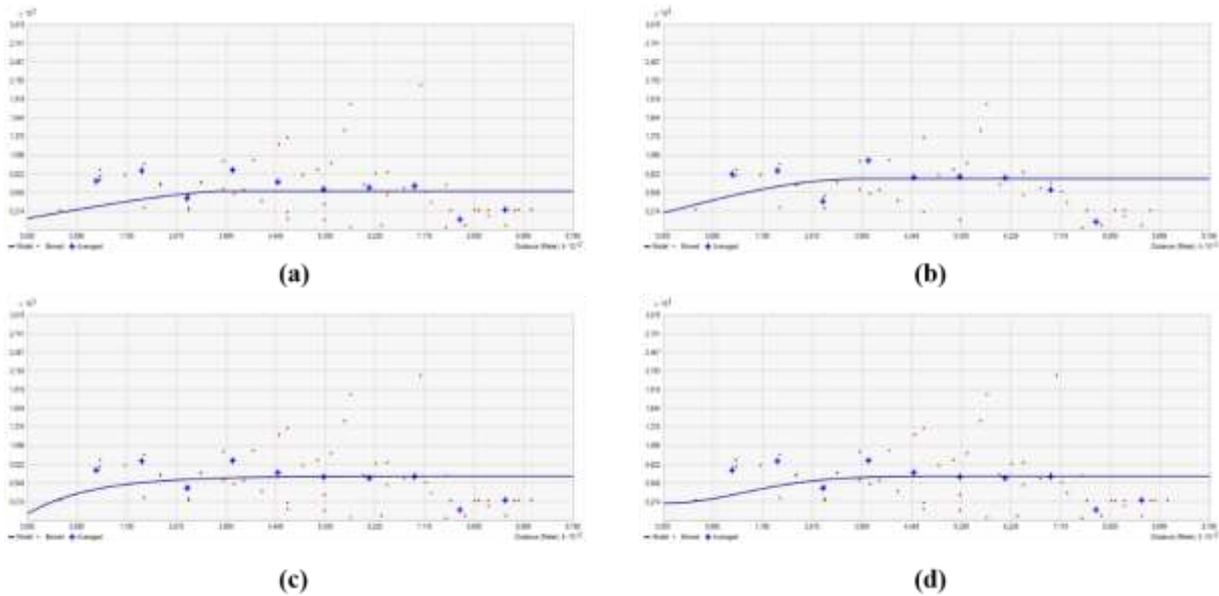
**Figure 108 :** Carte de variabilité spatiale du pH<sub>KCL</sub> dans l'horizon 2.

La carte (Fig. 108) montre une variation spatiale claire du pH<sub>KCL</sub> dans l'horizon 2 qui varie entre 7,2 et 8,1. Les fortes concentrations du pH<sub>KCL</sub> sont observés dans la partie sud-est de la palmeraie. Le sol est alcalin. Cette variation est considérée comme faible avec un coefficient de variation de 3,50 %.

## 2. 5. Modélisation géostatistique de la variabilité du pH<sub>EAU</sub> dans l'horizon 3

### 2.5.1. Analyse variographique

La figure 109, montre les quarte variogrammes ajusté au modèles (circulaire, sphérique, exponentiel et gaussien).



**Figure 109 :** Variogrammes expérimentaux du  $pH_{EAU}$  dans l'horizon 3. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien.

D'après la figure 109, Le variogramme ajusté au modèle circulaire a un palier de 0,0004 et une portée de 350,11 m, dont, l'effet de pépite est de l'ordre de 0,0001. Le modèle sphérique (palier de 0,0005, une portée de 350,11 m) a un effet de pépite égal à 0,0002. La représentation de l'exponentiel a révélé un palier de 0,0005, une portée de 350,11 m et un effet de pépite de 0,0001. Tandis que, le variogramme gaussien présente un palier de 0,0004, une portée de 350,11 m avec un effet de pépite de 0,0002.

Les équations des modèles des variogrammes expérimentaux du  $pH_{EAU}$  dans l'horizon 3, sont écrites de la façon suivante :

✓ **Circulaire** :  $\gamma(h) = 0,0001 + 0,0003 \left( 1 - \left( \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{h}{350,11} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 350,11} \sqrt{1 - \left( \frac{h}{350,11} \right)^2} \right)$

✓ **Sphérique** :  $\gamma(h) = 0,0002 + 0,0003 \left( 1,5 \left( \frac{h}{350,11} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{350,11} \right)^3 \right)$

✓ **Exponentiel** :  $\gamma(h) = 0,0001 + 0,0004 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{350,11} \right) \right)$

✓ **Gaussien** :  $\gamma(h) = 0,0002 + 0,0002 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{350,11} \right)^2 \right)$

### 2.5.2. Validation croisée

Le tableau 32, représente synthétiquement les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme du  $pH_{EAU}$  dans l'horizon 3.

**Tableau 32 :** Validation croisée des variogrammes du  $pH_{EAU}$  dans l'horizon 3.

$pH_{EAU}$ H3	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	15	15	15	15
Erreur moyenne de prédiction (ME)	-0,00017	-0,00047	-0,00016	-0,00029
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,27128	0,26207	0,24739	0,27197
Erreur moyenne standardisée (MSE)	-0,0161	-0,01201	-0,00901	-0,01489
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	1,53927	1,21085	1,20785	1,45047
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	0,17931	0,2193	0,20679	0,19101

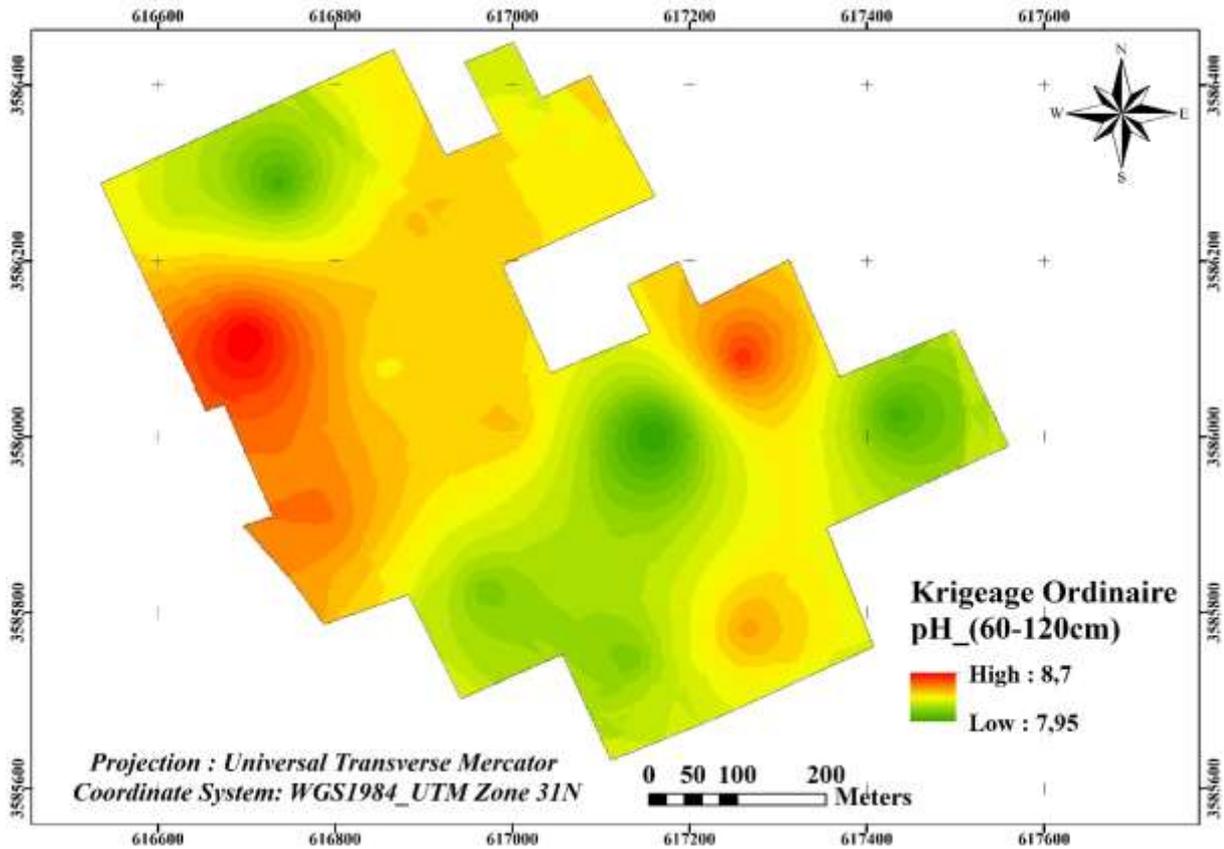
Selon le tableau (32) ci-dessus, les valeurs de la validation croisée sont raisonnables ce qui signifie que les quatre modèles sont optimaux, tous les modèles ont :

- Une erreur moyenne de prédiction (ME) proche du 0
- Une erreur moyenne standardisée (MSE) proche du 0
- Une erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE) proche du 1

Le modèle le plus fiable est le modèle exponentiel car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche à l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

### 2.5.3. Cartographie par krigeage

Les résultats précédents montrent que le modèle exponentiel est le meilleur choix. Ce modèle a été utilisée pour établir la carte de la variabilité spatiale du  $pH_{eau}$  dans l'horizon 3 par krigeage.



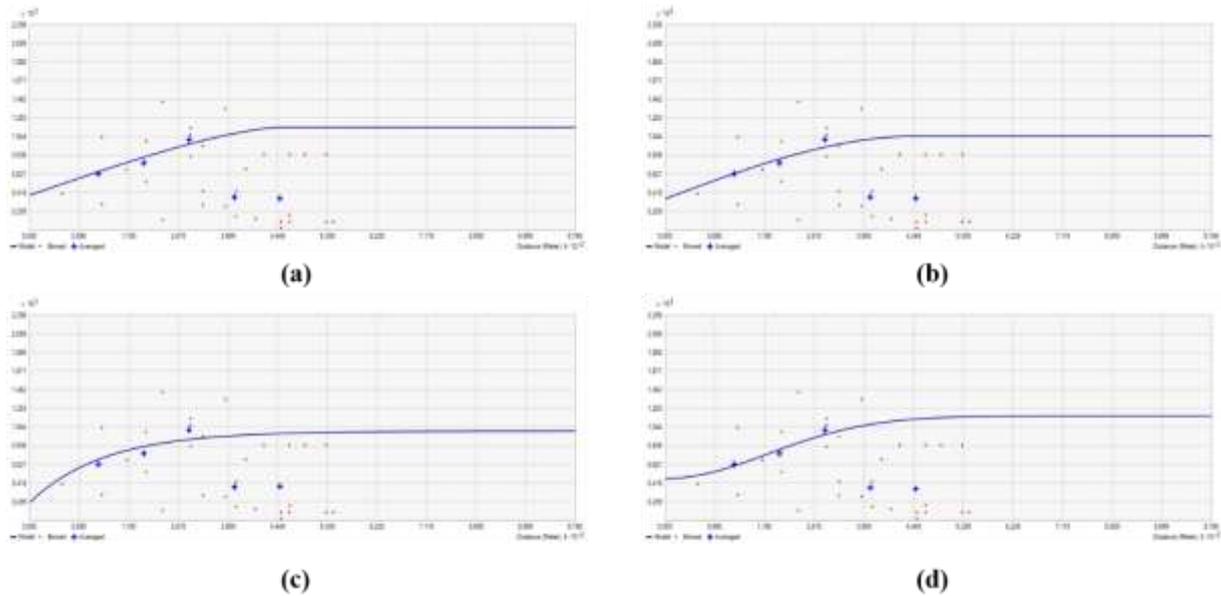
**Figure 110 :** Carte de variabilité spatiale du  $pH_{EAU}$  dans l'horizon 3.

La carte (Fig. 110) montre une variation spatiale hétérogène du  $pH_{EAU}$  dans l'horizon 3. Le  $pH_{EAU}$  varie d'alcalin (7,95) à très alcalin (8,7). Les valeurs qui présentent une alcalinité sont situées à l'est, au centre et dans la partie ouest de la palmeraie. Le coefficient de variation est de l'ordre de 2,56 %, ce qui montre une variation spatiale faible.

## 2.6. Modélisation géostatistique de la variabilité du $pH_{KCL}$ dans l'horizon 3

### 2.6.1. Analyse variographique

La figure 111, montre les quatre variogrammes ajustés aux modèles (circulaire, sphérique, exponentiel et gaussien).



**Figure 111 :** Variogrammes expérimentaux du  $\text{pH}_{\text{KCL}}$  dans l'horizon 3. (a) circulaire, (b) sphérique, (c) exponentiel, (d) gaussien.

D'après la figure 111, Le variogramme ajusté au modèle circulaire a un palier de 0,0007 et une portée de 450,1 m, dont, l'effet de pépité est de l'ordre de 0,0003. Le modèle sphérique (palier de 0,0007, une portée de 450,1 m) à un effet de pépité égal à 0,0003. La représentation de l'exponentiel a révélé un palier de 0,0008, une portée de 450,1 m et un effet de pépité de 0,0002. Tandis que, le variogramme gaussien présente un palier de 0,0007, une portée de 450,1 m avec un effet de pépité de 0,0004.

Les équations des modèles des variogrammes expérimentaux du  $\text{pH}_{\text{KCL}}$  dans l'horizon 3, sont écrites de la façon suivante :

✓ **Circulaire :**  $\gamma(h) = 0,0003 + 0,0004 \left( 1 - \left( \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{h}{450,1} \right) \right) + \frac{2h}{\pi 450,1} \sqrt{1 - \left( \frac{h}{450,1} \right)^2} \right)$

✓ **Sphérique :**  $\gamma(h) = 0,0003 + 0,0004 \left( 1,5 \left( \frac{h}{450,1} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{450,1} \right)^3 \right)$

✓ **Exponentiel :**  $\gamma(h) = 0,0002 + 0,0006 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{450,1} \right) \right)$

✓ **Gaussien :**  $\gamma(h) = 0,0004 + 0,0003 \left( 1 - \exp \left( -\frac{h}{450,1} \right)^2 \right)$

### 2.6.2. Validation croisée

Le tableau 33, représente synthétiquement les résultats de la validation croisée des modèles de variogramme du  $pH_{KCL}$  dans l'horizon 3.

**Tableau 33** : Validation croisée des variogrammes du  $pH_{KCL}$  dans l'horizon 3.

$pH_{KCL}$ H3	Circulaire	Sphérique	Exponentiel	Gaussien
Echantillons	15	15	15	15
Erreur moyenne de prédiction (ME)	0,00926	0,00761	0,00789	0,00851
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,24351	0,24645	0,23622	0,25495
Erreur moyenne standardisée (MSE)	0,01957	0,01273	0,01754	0,01311
Erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE)	1,13929	1,16524	1,07086	1,22941
Erreur standard moyenne d'interpolation « ASE »	0,21666	0,21433	0,22186	0,21095

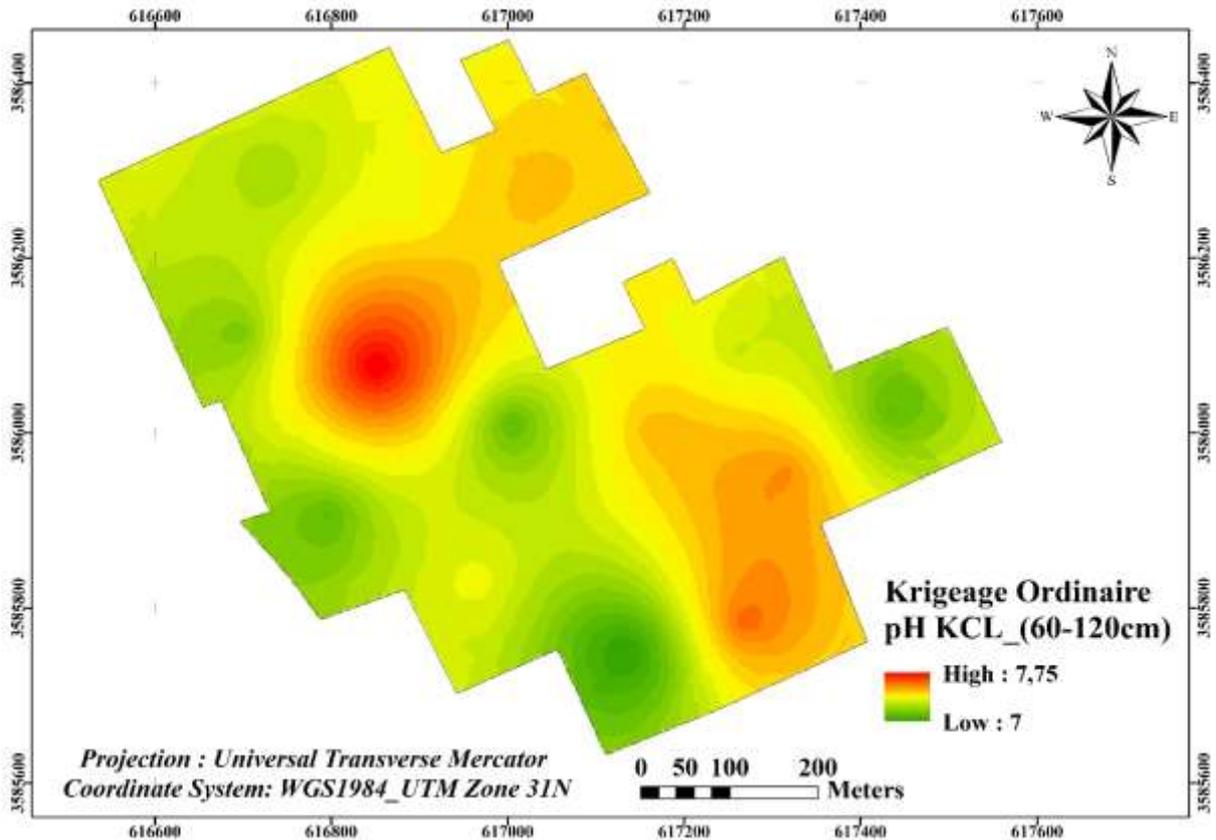
Selon le tableau (33) ci-dessus, les valeurs de la validation croisée sont raisonnables ce qui signifie que les quatre modèles sont optimaux, tous les modèles ont :

- Une erreur moyenne de prédiction (ME) proche du 0
- Une erreur moyenne standardisée (MSE) proche du 0
- Une erreur quadratique moyenne standardisée (RMSSE) proche du 1

Le modèle le plus fiable est le modèle exponentiel car l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la plus proche à l'erreur standard moyenne d'interpolation (ASE).

### 2.6.3. Cartographie par krigeage

Les résultats précédents montrent que le modèle exponentiel est le meilleur choix. Ce modèle a été utilisée pour établir la carte de la variabilité spatiale du  $pH_{KCL}$  dans l'horizon 3 par krigeage.



**Figure 112 :** Carte de variabilité spatiale du  $pH_{KCL}$  dans l'horizon 3.

La carte (Fig. 112) montre une variation faible dans l'horizon 3, avec un coefficient de variation de 2,62 %. Les valeurs les plus élevées sont concentrées au centre et dans la partie sud-est de la palmeraie. Le  $pH_{KCl}$  est alcalin dans tout l'horizon avec des valeurs variant de 7 à 7,75.

### 3. Discussion

Le pH exprime la réaction acide, neutre ou basique d'un corps selon qu'il renferme beaucoup ou peu d'ions  $H^+$  libres en solution. Au niveau du sol, le pH est variable et il influe sur les propriétés du sol. Ces variations sont cependant limitées car si, en chimie, le pH varie de 0 à 14 (7 étant la neutralité), le pH des sols a pour extrêmes 4,5 à 5 pour les sols plus acides et 8 pour les terres très basiques (PREVOST, 2006). Le pH du sol se trouve en relation directe avec les cations et les anions échangeables. Il joue un rôle important dans le mécanisme de rétention ou de libération des éléments nutritifs (FARAH et al., 1979). D'après (DAOUD et HALITIM, 1994), les sols des régions arides sont caractérisés généralement par des pH alcalins ( $7,5 < pH < 8,5$ ).

Les résultats d'analyses du pH du sol dans la zone d'étude, montrent que le sol est alcalin dans tous les horizons avec des valeurs moyennes de  $pH_{EAU}$  de  $8,25 \pm 0,19$  dans l'horizon H1, de  $8,26 \pm 0,27$  dans l'horizon H2 et de  $8,31 \pm 0,21$  dans l'horizon H3. Tandis que les valeurs du  $pH_{KCL}$  sont de  $7,52 \pm 0,18$

dans l'horizon H1, de  $7,5\pm 0,26$  dans l'horizon H2 et de  $7,33\pm 0,19$  dans l'horizon H3. Ces valeurs appartiennent à la gamme relative au sol des régions arides qui s'étend avec un pH légèrement inférieur à 7 allant à un pH d'environ 9 (DURAND, 1958 ; BUCKMAN & BRADY, 1965 ; BACI, 1982 ; HALITIM, 1988 ; BOUZID, 1993, DAOUD & HALITIM, 1994 ; BENBRAHIM, 2001 ; DJILI *et al.*, 2003 ; BENBRAHIM *et al.*, 2016). Ce résultat se rapproche des travaux réalisés en Algérie (OMOURI, 2009 ; OUSTANI, 2016 ; ABDENNOUR, 2021). Ainsi qu'à l'échelle internationale, Par SALIM et TESSIER (1998) en Syrie, MOUSSA *et al.* (2004) au Tunisie et ARAKRAK *et al.* (2006) au Maroc. La basicité des sols dans la région d'étude peut être expliquée par la présence de calcaire. PERNES-DEBUYSER et TESSIER (2002), ont signalé que les traitements basiques comme les amendements calcaires et les engrais apportant du calcium augmentent le pH du sol. Les travaux de DJILI et DAOUD (1999), ont montré que des teneurs en carbonates de calcium de l'ordre 2,5 % suffisent à tamponner le pH à un niveau relativement alcalin. Dans les sols calcaires, ce sont les carbonates qui contrôlent le pH (CALLOT *et al.*, 1982).

Le suivi de l'allure du profil pH montre une variabilité dans les profils avec la présence des trois grandes catégories de profil  $pH_{EAU}$  et  $pH_{KCL}$ , caractérisé par un maximum en surface, un maximum en moyenne profondeur et un maximum en profondeur. La majorité des profils  $pH_{KCL}$  sont de type ascendant caractérisé par un maximum superficiel, (P2, P4, P6, P8, P10, P11, P14, P15). Tandis que cinq profils de  $pH_{EAU}$  (P1, P4, P11, P14, P15) montrent une concentration dans l'horizon de surface. Ce résultat se rapproche de celui trouvé par (MOUSSA *et al.*, 2004 ; AOUIDANE, 2017 ; ABDENNOUR *et al.*, 2020). La présence des valeurs élevée du pH dans la couche superficielle est dû aux teneurs élevées en calcaire dans cet horizon. Selon KARABI (2016) Le pH augmente généralement avec les teneurs en calcaire dans le sol. Aussi la réaction du sol est influencée par la nature des sels. Alors que certains sels sont neutres ( $CaSO_4$ ,  $MgSO_4$ ), d'autres sont alcalinisant ( $NaHCO_3$ ,  $CaCO_3$ ,  $NaCO_3$ ) (OUSTANI, 2006). L'accumulation des sels alcalinisant provienne essentiellement de l'eau d'irrigation et de l'eau de la nappe (BENBRAHIM, 2001). Ainsi que, BENBRAHIM (2018), signale que cette dernière est probablement engendrée par une insuffisance en doses de lessivage appliqué, à cause des fortes évapotranspirations.

Cependant, des valeurs élevées des  $pH_{EAU}$  et  $pH_{KCL}$  a été enregistrée dans l'horizon de moyenne profondeur (P9, P13), (P1, P3, P7, P9, P12, P13) ; ceci est dû à l'alternance entre le phénomène de lixiviation et de la remontée capillaire de la nappe phréatique ou par l'entraînement des sels surtout alcalinisant en profondeur suite à l'irrigation (lixiviation) (DEMELON, 1966 ; DUCHAUFFOUR, 1977).

Concernant les horizons profonds, la plus parts des profils  $pH_{EAU}$  sont de type descendant (P2, P3, P5, P6, P7, P8, P10, P12), or que le  $pH_{KCL}$  montre un seul profil caractérisé par un maximum en profondeur (P5). La cause principale est la lixiviation des cations alcalins et alcalino-terreux suite à l'irrigation (DUCHAUFFOUR, 1977).

Il est à signalé que les valeurs élevées de pH sont enregistrées de l'amont vers l'aval. La situation géographique et topographique des palmeraies, dont la topographie a un impact sur la circulation des sels alcalinisant entre l'amont et l'aval (GUESSOUM, 2020).

La modélisation géostatistique a indiqué les meilleurs modèles théoriques ajusté pour les trois profondeurs, ainsi que différents niveaux de dépendance spatiale, la validation croisée a montré que les modèles de variogrammes les plus fiables pour le  $pH_{EAU}$  sont le sphérique pour l'horizon 1 et 2, Ce résultat se rapproche de celui trouvé par (CAMBARDELLA *et al.*, 1994 ; YANG, 2011 ; NAJAFIAN, 2012 ; AOUIDANE, 2017), et l'exponentiel pour l'horizon 3. Concernent le  $pH_{KCL}$  le modèle de variogramme le plus fiable est le sphérique pour l'horizon 1 et l'exponentiel pour les deux couches profondes.

**Tableau 34 :** paramètres des modèles de variogramme les mieux adaptés pour le  $pH_{EAU}$  et  $pH_{KCL}$

	Modèle	Pépite (C0)	Seuil (C0+C)	Portée (m)	Rapport %
<b><math>pH_{EAU}</math></b>					
<b>H1</b>	Sphérique	0,0002	0,0007	350,11	28,57
<b>H2</b>	Sphérique	0,0003	0,0006	350,11	50
<b>H3</b>	Exponentiel	0,0001	0,0005	350,11	20
<b><math>pH_{KCL}</math></b>					
<b>H1</b>	Sphérique	0,0003	0,0004	400,22	75
<b>H2</b>	Exponentiel	0	0,001	400,22	0
<b>H3</b>	Exponentiel	0,0002	0,0008	450,1	25

La dépendance spatiale « pépite/palier » pour le  $pH_{EAU}$  dans l'horizon H1 et H2 se situait dans la classe (<75%), ce qui correspond à une dépendance spatiale modérée, Ce résultat est similaire à celui trouvé par (AOUIDANE, 2017). La réaction du sol est fortement dépendante de l'espace dans l'horizon H3, Les travaux de CAMBARDELLA *et al.* (1994), YANG *et al.* (2011), et NAJAFIAN *et al.* (2012) ont signalés des résultats similaires. Tandis que le  $pH_{KCL}$  est modérément dépendant de l'espace dans la première couche, par contre aux deux couches profondes, les valeurs de rapport pépite/palier montrant une forte dépendance spatiale. Généralement a attribué une forte dépendance spatiale à des facteurs

naturels tels que le matériau parental, la topographie ou le type de sol alors qu'ils considéraient qu'une dépendance spatiale faible était davantage liée à des effets anthropiques, par exemple des pratiques de gestion des sols telles que la fertilisation et les pratiques agricoles (SHI et al., 2007 ; BILGILI., 2013).

L'analyse des variogrammes a montré un effet de pépite très faible, indiquant une faible variation du  $pH_{EAU}$  et  $pH_{KCL}$  à des distances inférieures au pas d'échantillonnage (200 m) dans les trois couches. Ces résultats se rapprochent de ceux trouvés pour le pH du sol par YANG et al. (2011), NAJAFIAN et al. (2012) et AKBAS. (2014). En outre, Toutes les valeurs de la portée ont été supérieures à 200 m pour le  $pH_{EAU}$  et  $pH_{KCL}$  du sol. Le travail d'AKBAS et al. (2014) a abouti à une portée de 358 mètres, celui de NIKPEY et al. (2017) a une portée de 533 mètres. Les grandes valeurs de la portée ont montré que le pH du sol avait une corrélation spatiale dans une large gamme de distances dans la zone d'étude, ce qui indique que la distance d'échantillonnage > 200 m sera suffisant pour explorer la variabilité spatiale.

La carte d'interpolation pour la distribution des valeurs de pH dans chaque couche de sol affichait des schémas assez similaires. Le pH du sol était élevé dans le nord, le nord-est et le sud-est de la zone d'étude, alors qu'il était relativement faible dans le coin sud-ouest. Le niveau d'intensité de la variabilité spatiale du pH est faible dans les trois couches que ce soit le  $pH_{EAU}$  ou le  $pH_{KCL}$  selon l'échelle de NOLIN et al. (1997). Les valeurs faibles du coefficient de variation du pH ont été trouvés par plusieurs chercheurs, citant à titre d'exemple l'étude de CAMBARDELLA et al. (1994) avec un CV-pH de 13 %, de NIKPEY et al. (2011) avec un CV-pH de 0,38 %, AKBAS. (2014) avec un CV-pH de 1,3 %, et de GUNAL. (2021) avec un CV-pH variant de 4,33 à 5,78 %.

## Discussion générale

Les sols en zones arides ont été longtemps considérés comme des milieux qui ne représentent aucun intérêt du point de vue pédologique, car ils sont des sols minéraux bruts, très peu évolués, ne sont jamais très riches en matière organique (AUBERT, 1960). Du même, les sols du Sahara algérien sont aussi caractérisés par une évaporation prédominant et une rareté de pluie (HAMDI, 2001), qui influence directement sur les paramètres physico-chimiques de ces sols tel que l'oxydation rapide, l'accumulation de sels à la surface des sols et une production médiocre de matières organiques (OMM, 2005).

L'étude de la variabilité spatiale des paramètres du sol (carbone organique, conductivité électrique, pH, pH<sub>KCL</sub> calcaire total et actif), a été réalisée dans une palmeraie âgée de 64 ans dans la région de Zelfana (Ghardaïa). Les prélèvements ont été réalisés sur une profondeur de (0-30cm), (30-60cm) et (60-120cm) avec un nombre de 15 prélèvements (profils). Les sols étudiés sont particulièrement sableux-argileux et très peu organiques ( $0,09 < \text{CO} \% < 0,19$ ). Tous ces sols sont modérément calcaires ( $10,5 < \text{CaCO}_3 \% < 18,51$ ), alcalins ( $8,25 < \text{pH} < 8,31$ ), en revanche, ils sont relativement salés ( $1,73 < \text{CE} < 2,43 \text{ dS/m}$ ).

Les résultats des analyses montrent que la majorité des horizons analysés sont pauvres en carbone organique, ce qui est peut être expliqué par l'influence de climat aride de notre région d'étude ; sachant que dans les régions désertiques, la fraction organique est très faible, généralement inférieure à 1% (Halitim, 1988 ; Robert, 1996). La combinaison des facteurs pédoclimatiques spécifiques dans ces régions (températures élevées, humidité faible, fort potentiel d'oxydation, texture grossière, etc.) accélère la minéralisation (OUSTANI, 2016), En effet. La teneur en carbone organique du sol élevée est due à l'accumulation de résidus organiques dans les horizons de surface <30 cm provenant du palmier et des espèces herbacées (BOUNOUARA, 2018). D'autres chercheurs expliquent cette teneur en carbone organique dans les couches superficielles, par l'effet de la salinité, qui joue un rôle limitant et inhibiteur de la minéralisation rapide de la matière organique (NADHEM, 2021). Cependant, la faible teneur en carbone organique dans les autres horizons est peut être expliquée par l'utilisation intensive des terres, Les zones agricoles cultivées avec des espèces annuelles contribuent relativement peu au stockage du carbone dans les sols, en raison de leur moindre restitution de carbone et du travail du sol (BERNOUX et al., 2006). En revanche, Les sols touchés par la salinité se caractérisent par une forte concentration de sels solubles et de faibles niveaux de matière organique (LODHI et al., 2009 ; MANCER et al., 2020). En plus, La présence de calcaire dans le sol inhibe la polymérisation des substances humiques (AUBERT, 1960), ce qui conduit à une augmentation de la matière organique soluble (DEBECHE & KHEMISSI, 2017).

Il est largement reconnu que les sols des zones arides dans lesquelles l'agriculture irriguée est pratiquée, présentent un risque important de salinisation (ABDENNOUR,2021) cette dernière est d'abord primaire, comme pour la plupart des sols d'Afrique du nord (Aubert, 1976). En Algérie, le développement récent de l'agriculture dans le Sahara est totalement dépendant des ressources en eaux souterraines pompées (Kuper et al., 2016). Le degré de la salinité des sols est déterminé par la conductivité électrique « CE ». Les résultats d'analyses de la conductivité électrique montrent une variabilité importante de CE dans la couche arable des sols (0-30 cm), car les valeurs oscillent entre 1 à 3,87 dS/m avec une moyenne de 2,43 dS/m, la deuxième couche de prélèvement (30-60 cm) présente des valeurs oscillant entre 0,64 à 2,23 dS/m et une moyenne de 1,73 dS/m, la couche profonde présente des valeurs oscillant entre 0,90 à 2,35 dS/m avec une moyenne de 1,91 dS/m. Concernant la répartition verticale de la salinité, nous observons que les profils salins de type ascendant (A) sont dominants dans la palmeraie. Selon DJILI et al. (2003), l'irrigation par des eaux diversement minéralisées provoque la salinisation des sols, et en particulier dans les horizons de surfaces. Ainsi, HARTANI et al. (2007), ont signalé que la salinité de l'eau d'irrigation est un facteur avéré de la salinisation notamment pendant les années climatiques où le lessivage par les pluies ne peut se produire. Aussi dans les zones arides, les sels se concentrent à la surface des sols sous l'effet des remontées capillaires et de l'évaporation. La qualité de l'eau peut certainement influencer la qualité du sol, nuire à la plupart des cultures, et conduire à des sols inutilisables. En effet, la rareté de l'eau et la salinité des eaux souterraines utilisées pour l'irrigation sont les principales contraintes pour la production agricole dans les zones arides et semi-arides (ABDENNOUR,2020). Par ailleurs, Le carence en carbone organique (MO) entraîne une augmentation de la salinité, parce que la matière organique améliore la stabilité structurale et par conséquent facilite le lessivage des sels (KOULL & HALILAT, 2016).

La mesure du pH d'un sol permet de définir son état d'acidité ou d'alcalinité. Le pH du sol a souvent été appelé variable maitre des sols et affecte grandement de nombreuses réactions et processus chimiques du sol (SPARKS, 2014 ; AOUIDANE, 2017). Le pH (KCl) a été choisi puisqu'il permet d'obtenir des valeurs plus stables que le pH eau (DARAB, 1975). Le  $pH_{EAU}$  et le  $pH_{KCL}$  des sols de la zone d'étude sont situés autour d'une moyenne de 8,25 pour le  $pH_{EAU}$  et 7,52 pour le  $pH_{KCL}$  dans la couche superficielle du sol, alors que dans la couche moyennement profonde, la moyenne de  $pH_{EAU}$  et  $pH_{KCL}$  est 8,26-7,5 respectivement. La troisième couche, la plus profonde présente des valeurs moyenne de  $pH_{EAU}$  (8,31),  $pH_{KCL}$  (7,33). Les valeurs moyennes de  $pH_{EAU}$  et  $pH_{KCL}$  des échantillons sont comparables d'un niveau à l'autre. Traduisant un pH alcalin pour les trois couches de profil. La plupart des valeurs se situent dans les limites qu'Aubert (1983) avait proposées comme seuils de dégradation des sols irrigués (pH ; 8,0-9,0) (ABDENNOUR,2021). Ces valeurs étaient dues à la forte teneur en sel

des couches de sol provenant de l'eau d'irrigation et à la remontée capillaire des eaux souterraine. Ainsi que l'alcalinité des sols dans la région de Zelfana est expliquée par la présence de calcaire.

Les concentrations les plus élevées de pH sont observées dans les échantillons de la partie sud-est de la région d'étude, cela à cause de l'affleurement du calcaire. Ainsi que le pH de 8,4 à 8,5 indique la présence en quantité appréciable de sodium échangeable, dans un milieu riche en carbonate de calcium (GAUCHER, 1968 ; SALIM & TESSIER, 1998). Le profil de  $pH_{EAU}$  à un gradient descendant, où les concentrations sont très élevés dans les horizons de profondeur que celle superficielle, Tandis que pour le profil de  $pH_{KCL}$  dans les échantillons du sol, les concentrations sont très élevées dans l'horizon superficiel. Ces fluctuations après irrigation mettent en évidence une dynamique continue des sels alcalinisant, cela peut s'expliquer par l'effet associé de trois facteurs climatiques par lixiviation et la remontée capillaire des eaux de la nappe, accentuée par une évapotranspiration intense. En outre, il est bien connu que l'apport de la matière organique fait diminuer le pH, pour cela l'élévation de pH est due principalement aux faibles teneurs en carbone organique (OUSTANI, 2016).

Les sols calcaires sont définis comme des sols contenant des quantités de carbonate de calcium affectant distinctement les propriétés du sol liées à la croissance des plantes, qu'elles soient physiques, telles que les relations sol-eau et l'encroûtement du sol, ou chimiques telles que la disponibilité des éléments nutritifs des plantes (RASHA, 2005). Les sols calcaires sont répandus dans les régions arides et semi-arides, Le pH de ces sols est généralement supérieur à 7 et peut atteindre 8,5 (TAALAB et *al.*, 2019). Le taux du calcaire actif est plus important à connaître parce que c'est la forme de calcaire qui peut passer dans la solution du sol sous l'action de l'eau (GROS, 1979). Les résultats obtenus montrent que les valeurs des carbonates de calcium dans les sols de Zelfana sont variables. Cependant le taux de calcaire total varie de 2,08% à 30,94% avec une moyenne de 13,51%, tandis que le calcaire actif varie de 2,25% à 10,62% avec une moyenne de 6,59% pour la totalité d'échantillons. Ajoutent à cela, la répartition verticale des taux du calcaire montre une concentration élevée dans la couche médiane. A cause d'une alternance entre une dynamique ascendante et descendante de calcaire, c'est à dire un entrainement de calcaire par l'irrigation et la remontée capillaire de ces derniers après irrigation. La moitié du calcaire de ces sols appartient à une fraction relativement soluble qui est distribué par solubilisation et lixiviation par les eaux d'irrigation (LARBI,2014).

En analyse statistique classique, le coefficient de variation est souvent utilisé pour décrire et étudier la variabilité des propriétés physicochimiques des sols (AOUIDANE, 2017). Le suivi des variations spatiales des caractéristiques des sols est essentiel pour une meilleure gestion des parcelles agricoles (GUERIF et KING, 2007 ; KRAIMAT, 2019). En plus, La caractérisation de la variabilité spatiale du sol est essentielle pour parvenir à une meilleure compréhension des relations complexes entre

les propriétés du sol et les facteurs environnementaux (NOUFAL, 2010). Cette dernière est inhérente aux facteurs du milieu, essentiellement la topographie, le climat et l'itinéraire technique réalisé (IQBAL et al., 2005 ; MZUKU, 2005 ; ZIZA, 2006). De plus, l'activité humaine (travail du sol, fertilisation, amendement, aménagement, pollution) se surimpose souvent de façon prédominante à l'effet des conditions naturelles et est susceptible de modifier profondément les sols (GIRARD et al., 2011). NOLIN et al., 1997 a classé les valeurs de CV comme suit : faible variabilité, < 15% ; variabilité modérée, 15-35% ; variabilité élevée, 35-50% et très élevée 50-100%. L'étude de la variabilité spatiale au niveau des trois horizons étudiés, enregistre une différence pour l'ensemble des paramètres du sol analysés ; les plus fortes variations sont enregistrées pour le carbone organique dans l'horizon (H1= 71,15%), (H3= 93,72%) et le calcaire total dans l'horizon (H3=77,94%), Cette distribution était directement liée aux matériaux parents du sol et la gestion des terres (SHAHANDEH et al. 2005). En outre, le coefficient de variation de la couche médiane du profil du carbone est élevé (H2=42,06%). Un CV modérée a été observé dans l'horizon (H1=26,10%) et (H2= 31,85%) pour le calcaire. En revanche, la salinité présente une variabilité spatiale élevée dans l'horizon (H1= 36,50%). Tandis que, les deux profondeurs (H2 et H3) sont modérées. Par contre le  $pH_{EAU}$  et  $pH_{KCL}$  présentent des variabilités spatiales faible avec des coefficients de variations > 15%. Les causes de cette variabilité sont l'impact des pratiques agricoles particulièrement l'irrigation par submersion continue de la palmeraie et aussi le manque de réseaux de drainage pour drainer les eaux chargées. L'influence de la topographie sur la distribution spatiale se manifeste par la concentration des paramètres du sol dans les zones basses (de l'amont vers l'aval).

La géostatistique est utilisée pour cartographier les caractéristiques de la surface terrestre à partir d'échantillons de données limités (BENSLAMA, 2021). La principale application de la géostatistique en science du sol a été l'estimation et la cartographie des propriétés du sol dans des zones non échantillonnées (JOHNSTON et al. 2001 ; WU et al. 2002). Le krigeage est la base de la cartographie numérique adoptée et, est une technique d'interpolation pouvant s'effectuer avec différents types de krigeage selon la structure spatiale de la variable à cartographier (BRADAĬ et al., 2016). Pour cela nous avons utilisé dans notre travail le krigeage ordinaire, la forme la plus simple et la plus employée (GIRARD, 2011). La première étape d'une analyse géostatistique est la définition de la structure de la variation spatiale par variogramme estimation (SAFARBEIRANVND et al., 2018). La variographie et le krigeage sont les deux constituants clés pour une meilleure analyse géostatistique (ABDENNOUR, 2020). Les données ont été ajustées à l'aide de différents modèles : circulaire, sphérique, gaussien et exponentiel. Pour la meilleure sélection, les performances prédictives des modèles ajustés ont été vérifiées sur la base de tests de validation croisée. Les valeurs d'erreur moyenne (ME), erreur

standardisée moyenne (MSE), erreur quadratique moyenne (RMSE), erreur standard moyenne (ASE) et erreur standardisée quadratique moyenne (RMSSE) ont été estimées pour vérifier la performance des modèles développés. Il serait préférable que ME et MSE soient plus proches de zéro, RMSE devient plus petit, ASE est plus proche de RMSE et RMSSE est plus proche de 1 (TONG, 2015). L'effet pépité reflète la variabilité spatiale à des distances plus courte que la plus petite distance entre les mesures. Ainsi que l'erreur expérimentale liée à l'échantillonnage. Les grands effets de pépité peuvent suggérer la nécessité d'un échantillonnage supplémentaire des propriétés pertinentes à de plus petites distances (ARSLAN, 2013). Les effets de pépité des paramètres du sol étudié sont généralement faibles. Les faibles valeurs de l'effet pépité (C0) indiquent faibles erreurs de mesure (VIEIRA, 2000). Le calcaire total et actif présent un effet de pépité qui augmente avec la profondeur, Nous remarquons aussi que les effets de pépité de carbone organique, salinité,  $pH_{EAU}$ ,  $pH_{KCL}$  était généralement important dans la couche médiane. Toutes les valeurs de la portée ont été supérieures à 200 m pour tous les paramètres du sol, ce qui signifie la corrélation spatiale des paramètres étudié à des distances inférieures au pas d'échantillonnage. Selon DURDEVIC et al. (2019), Une grande portée indique un bon échantillonnage pour la cartographie dans la zone étudiée. KERRY et OLIVER (2004), ont signalé que l'intervalle d'échantillonnage doit être inférieur à la moitié de la portée du variogramme. Nos données confirment que l'intervalle d'échantillonnage était approprié pour mesurer la variabilité spatiale des paramètres du sol. La dépendance spatiale de tous les paramètres a été calculée par le rapport effet de pépité et le palier ( $C0 / (C0+C)$ ). La variable est considérée comme ayant une forte dépendance spatiale lorsque le ratio est inférieur à 25 % ; une dépendance spatiale modérée lorsque le rapport est compris entre 25 % et 75 % et une faible dépendance spatiale lorsque le rapport est supérieur à 75 % (GUNAL, 2021). La forte dépendance spatiale des variables du sol peut être contrôlée par des variations intrinsèques des caractéristiques du sol (CAMBARDELLA et al., 1994 ; CEMEK et al., 2007). Par contre une dépendance spatiale faible était plus liée aux effets anthropiques, par exemple des pratiques de gestion des sols telles que la fertilisation et les pratiques agricoles (SHI et al., 2007 ; BILGILI, 2013 ; AOUIDANE, 2017). Le rapport effet de pépité /palier variait pour tous les paramètres et dans les différents niveaux. La majorité des paramètres dans l'horizon profond présentent une forte dépendance spatiale, donc est probablement contrôlée par des facteurs intrinsèques, tels que les matériaux parentaux, la topographie, la texture et le climat. En outre, la dépendance spatiale est modérée dans les couches superficielles, ceci est peut-être dû à des facteur extrinsèques (pratique culturelle, labour, irrigation, fertilisation, etc.).

La représentation cartographique par la méthode de krigeage ordinaire nous renseigne sur la répartition spatiale des paramètres du sol. Les cartes krigées pour les paramètre physique-chimique du

sol ont montré une structure spatiale hétérogène. Une répartition spatiale des concentrations considérable dans la partie nord et sud-est de la région d'étude a été clairement observée pour les six paramètres. La répartition spatiale des teneurs dans la zone d'étude indique une forte concentration en carbone organique,  $pH_{EAU}$  et  $pH_{KCL}$  localisée au nord et sud-est dans les trois niveaux, alors qu'ils ont relativement faible dans l'extrême ouest. Par contre le  $pH_{EAU}$  de l'horizon profond (60-120) est plus élevé dans la partie ouest de la palmeraie. Les cartes de la conductivité électrique obtenue montrent clairement la dominance de la classe des sols salé a très salé pour les trois couches selon la classification de AUBERT (1978). Ainsi ces sols sont répartis autour de toute la palmeraie. Les cartes d'interpolation pour la distribution spatiale des valeurs de  $CaCO_3$  total et actif dans chaque couche de sol affichait des schémas assez similaires. Le calcaire des sols était élevé dans le nord, le nord-est, sud-est et au centre de la zone d'étude, alors qu'elle était relativement faible dans la partie ouest, sauf dans la couche profonde (60-120) où le calcaire actif est accumulé dans l'ouest. En général, la distribution spatiale par le krigeage ordinaire montre que les paramètres du sol sont essentiellement situés dans la partie nord et sud-est. Cela prouve l'effet des facteurs intrinsèques en particulier la topographie qui intervient par l'intensité de la pente (BISSONNAIS et *al.*, 2002), ce qui est liée à la direction du débit d'eau d'irrigation de l'amont vers l'aval ainsi à la texture et les facteurs formant le sol, s'ajoutant, les facteurs extrinsèques telle que les pratiques agricole, la fertilisation, le drainage et les systèmes d'irrigation.

La dégradation de la qualité des sols, conséquence de l'irrigation, constitue une menace sérieuse pour la durabilité de système d'utilisation des terres. Il est bien connu que le développement de l'agriculture irriguée dans les zones arides entraîne le plus souvent une dégradation de la qualité des sols (MATHIEU et RUELLAN, 1980 ; LARSON et PIERCE, 1991 ; ROBERT, 1992 ; 1996 ; UMALI, 1993 ; BADRAOUI et MERZOUK, 1994 ; FARHAT, 1995 ; BADRAOUI et *al.*, 1998 a ; 1998 b). Ainsi que l'intensification agricole en zones arides a influencé quantitativement et qualitativement la teneur et la variabilité spatiale des propriétés du sol (BENBRAHIM, 2018). Parmi les principaux impacts de cette dernière : La salinisation secondaires, les réalimentations de la nappe par les eaux de drainage et les pertes de matière organique.

---

# *Conclusion*

---

## Conclusion générale

L'objectif de base de ce travail est de caractériser l'état des principales propriétés physico-chimiques des sols de la palmeraie de Zelfana et de cartographier la distribution spatiale et verticale de ces paramètres avec une approche géostatistique.

Quinze profils pédologiques ont été sélectionnés couvrant toute la superficie de la palmeraie avec l'adoption de la méthode d'échantillonnage aléatoire. Les paramètres du sol analysés étaient le carbone organique, la salinité exprimée en conductivité électrique, le  $pH_{EAU}$ , le  $pH_{KCL}$ , le calcaire total et le calcaire actif. Les résultats ont été exprimés statistiquement en générant un rapport de statistiques descriptives, une analyse variographique est d'abord réalisée afin d'identifier la structure spatiale des paramètres sur sols, suivie d'une interpolation de ces dernières par la méthode de Krigeage ordinaire, basant sur l'erreur de prédiction.

D'après les résultats obtenus, il est possible de retenir les points essentiels suivants :

La caractérisation physique et chimique des eaux d'irrigation montre qu'elles appartiennent à la classe des eaux à salinité élevée (C3), avec un ratio du sodium appartenant à la classe (S1) qui représente les eaux faiblement sodiques, utilisables pour l'irrigation de presque tous les sols avec peu de danger d'alcalinisation (Qualité moyenne à médiocre), le faciès chimique global des eaux d'irrigations est chlorurée sodique et magnésienne.

Les résultats d'analyses physicochimiques des sols dans la région de Zelfana, montrent la dominance de la texture sablo-argileuse dans la majorité des sols de la région d'étude. Les résultats analytiques des profils présentent une faible teneur en carbone organique qui varie de 0,04 à 0,49 en surface, de 0,05 à 0,20 dans la couche médiane et de 0,01 à 0,39 en profondeur, le carbone organique se concentre dans la majorité des profils en surface. Tandis que, La conductivité électrique présente des valeurs qui varie de 1 à 3,87 dS/m dans l'horizon superficiel, de 0,64 à 2,23 dS/m dans l'horizon de moyenne profondeur et de 0,90 à 2,35 dS/m dans L'horizon profond, le sol est peu salé à très salé. La plupart des profils salins sont de type ascendant, caractérisés par un maximum en surface. Par ailleurs, les résultats d'analyses du pH, montrent que le sol est alcalin dans tous les horizons avec des valeurs moyennes de  $pH_{EAU}$  de  $8,25 \pm 0,19$  dans l'horizon H1, de  $8,26 \pm 0,27$  dans l'horizon H2 et de  $8,31 \pm 0,21$  dans l'horizon H3. Tandis que les valeurs du  $pH_{KCL}$  sont de  $7,52 \pm 0,18$  dans l'horizon H1, de  $7,5 \pm 0,26$  dans l'horizon H2 et de  $7,33 \pm 0,19$  dans l'horizon H3. La teneur en calcaire total varie de 5,10 à 15,62% (modérément calcaire) dans l'horizon superficiel, de 9,37 à 30,94% (modérément a fortement calcaire) dans l'horizon de moyenne profondeur et de 2,08 à 27,71% (peu a fortement calcaire) dans L'horizon profond, tandis que la teneur en calcaire actif des horizons étudiés varie de 2,25 à 10,62%. Le taux de

calcaire actif varie de 2,25 à 9,5% (faible a Assez faible) dans l'horizon superficiel, de 4,87 à 10,62% (faible a élevé) dans l'horizon de moyenne profondeur et de 2,25 à 10,5% (faible a élevé) dans l'horizon profond.

Les résultats de la distribution spatiale des paramètres étudiées, montre une variation très élevée du carbone organique dans l'horizon superficiel et profond avec un CV de 71,15% et 93,72% respectivement et une variation élevée dans la couche médiane (CV=42,06%). En outre, une variation élevée a été enregistrer dans la couche superficielle de la salinité (CV= 36,50%), avec une variabilité spatiale modérée dans les deux couches profondeurs (H2 et H3) de la salinité CV= 29,96% et 20,22%. Le calcaire total présente une distribution spatiale modérée dans les deux premières couches CV H1=26,10% et CV H2= 31,85% et une variation très élevée dans l'horizon 3 (CV=77,94%). Par contre le  $pH_{EAU}$  et  $pH_{KCL}$  présentent des variabilités spatiales faible dans les trois horizons avec des coefficients de variations  $> 15\%$ .

L'analyse variographique a révélé les résultats suivants :

- Le circulaire est le plus fiable pour le calcaire total H1, calcaire actif H2 et le carbone organique H3.
- Le sphérique est le plus fiable pour le  $pH_{EAU}$  H1 et H2,  $pH_{KCL}$  H1 et le calcaire total H3.
- L'exponentiel est le plus fiable pour le carbone organique H1 et H2, le  $pH_{EAU}$  H3,  $pH_{KCL}$  H2, H3, la salinité H1 et H2, le calcaire total H2, le calcaire actif H1 et H3.
- Le gaussien est le plus fiable pour la salinité H3, le calcaire actif H2.

L'effet de pépite est très faible pour tous les paramètres étudiés. 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.

Les cartes réalisées par krigeage montrent des concentrations considérables des paramètres étudiés dans la partie nord et sud-est de la région d'étude. Ces cartes prédisent les valeurs de ces derniers aux endroits non échantillonnés.

Les analyses géostatistiques fournissent un outil rationnel pour interpréter et évaluer la variabilité spatiale du sol à différentes échelles. Elle permet de mieux résoudre les problèmes d'estimation d'un paramètre donné et d'évaluation de la précision obtenue. Ainsi elle peut par ailleurs être précieuse pour évaluer si les échantillonnages réalisés sont suffisants pour apprécier la continuité dans l'espace des différentes propriétés du sol analysé. On peut aussi l'utiliser pour déterminer la position optimale d'éventuels échantillons supplémentaires.

Nous pouvons dire que les cartes réalisées constituent des sources d'information utiles pour une gestion meilleure des sols. Ainsi l'information géographique numérique est facile à partager et à exploitée. Elle devient une information essentielle dans de nombreuses organisations qui l'utilisent comme cadre de référence pour tout acte de décision ou de prévision.

La pression anthropique croissante sur les ressources naturelles et les conditions climatiques difficiles génèrent des dysfonctionnements des écosystèmes terrestres. Ces effets sont amplifiés par une utilisation inappropriée des ressources naturelles existantes, entraînant ainsi la dégradation des sols, la diminution des apports en eau, et donc la désertification et la réduction de la diversité animale et végétale. L'amélioration de ces sols dépend de leurs propriétés physico-chimiques d'une part, et de la répartition de ces propriétés dans la région d'autre part.

L'analyse spatiale de la couverture pédologique permet de restituer une information spatiale pertinente et fiable. Elle constitue de ce fait, un support indispensable pour l'aide à la décision en matière de gestion durable des territoires.

A la lumière des résultats de nos travaux de recherche et au terme de cette contribution, les palmeraies de la région de Zelfana (Ghardaïa) semblent souffrir d'une dégradation de leur environnement. Ils sont menacés par une gamme variée de contraintes, la mauvaise qualité de l'eau d'irrigation, la fluctuation d'une nappe phréatique, la salinisation, l'épuisement de la fertilité et l'accumulation des croûtes gypso-calcaires-salins.

Cette étude est parmi les premières de ce genre à utiliser des méthodes géostatistiques dans la région de Ghardaïa. Nous signalons que les paramètres analysés sont insuffisants pour étudier une surface assez grande comme la région de Ghardaïa. Au terme de cette recherche, il est souhaitable de compléter ce travail par les éléments suivants :

- Etendre l'échantillonnage sur d'autres sites et pour d'autres paramètres.
- Le suivi de la variation saisonnière des paramètres du sol et étudier leur variation temporelle, pour bien gérer l'évolution de ces derniers.
- Combiner l'étude géostatistiques avec la télédétection afin de mieux gérer l'échantillonnage et mieux comprendre les relations entre les propriétés du sol, que ce soit à petit ou à grande échelle.

---

*Références  
Bibliographiques*

---

***Références bibliographiques***

- A.N.R.H., 2007-** Rapport de l'Agence National Des Ressources Hydriques, Ghardaïa.
- A.N.R.H., 2009.** Note relative aux ressources en eau souterraines de la wilaya de Ghardaïa. Ed. Agen. Nati. Alg. Ress. Hydr. (A.N.R.H.), 19 p.
- A.N.R.H., 2012.** Note relative aux ressources en eau souterraines de la wilaya de Ghardaïa. Ed. Agen. Nati. Alg. Ress. Hydr. (A.N.R.H.), 19 p.
- A.N.R.H., 2013–** Note relative aux ressources en eau souterraines de la wilaya de Ghardaïa. Ed. Agen. Nati. Alg. Ress. Hydr. (A.N.R.H.), 20 p.
- A.N.R.H., 2016.** Le rapport de l'Agence nationale des ressources hydrauliques ‘secteur de Ghardaïa’.
- ABDELHAFID Y., 2010.** Cartographie de la salinité des sols par induction electromagnetique. Thèse de magister, institut national agronomique EL Harrach, 102p.
- ABDELHAFID Y., RECHACHI M.Z., HALITIM A., 2019.** Caractérisation géochimique des eaux d'irrigation de la palmeraie d'Oumache (oasis des Ziban, sud-est de l'Algérie). Revue des sciences de l'eau / journal of water science, 32(1), 69–81.
- ABDENNOUR M.A., 2020.** Application of two different spatial interpolation approaches to mapping the spatial variability of groundwater salinity and their effects on the quality of irrigated soils in Biskra, se Algeria. International journal of sciences and research, vol. 76, no 5/1.
- ABDENNOUR M.A., 2021.** Variabilité spatio-temporelle de la salinisation des sols du périmètre irrigué du Ziban (Biskra)–Apport de la géostatistique et de la télédétection. 2021. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider de Biskra.
- ABDENNOUR M.A., DOUAOUI A., BARRENA., PULIDO M., BRADAI A., BENNACER5 A., PICCINI C., TORREN A.A., 2020.** Geochemical characterization of the salinity of irrigated soils in arid regions (Biskra, SE Algeria). Acta Geochimica, vol. 40, no 2, p. 234-250.
- ACHOUR M., 2014.** Vulnérabilité et protection des eaux souterraines en zone aride -cas la vallée de M'Zab (Ghardaïa, Algérie), mémoire Magister, université Kasdi Merbah – Ouargla,140p.
- ADDISE T., BEDADI B., REGASSA A., WOGI L., FEYISSA S., 2022.** Spatial Variability of Soil Organic Carbon Stock in Gurje Subwatershed, Hadiya Zone, Southern Ethiopia. Applied and Environmental Soil Science, 2022, vol. 2022.

- AFNOR., 2003.** Norme NF X31-107. Détermination de la distribution granulométrique des particules du sol- Méthode à la pipette. Paris, 20p.
- AKBAS F., 2014.** Spatial variability of soil color parameters and soil properties in an alluvial soil. African Journal of Agricultural Research, vol. 9, no 12, p. 1025-1035.
- 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): 55–62.
- ANNABI M., BAHRI H., LATIRI K., 2009.** Statut organique et respiration microbienne des sols du nord de la Tunisie. Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 13(3), 401-408.
- AOUIDANE L., 2017.** Origines de la salinisation des eaux et des sols d'une zone à climat semi-aride : Cas de Remila (W. Khenchela). Thèse de doctorat, université Mohamed Khider-Biskra, 215p.
- ARAKRAK A., FROSSARD E., JACQUIN F., 2006.** Adsorption du phosphore dans les sols calcaires. COVAPHOS II, vol. 3, p. 159-169.
- 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.
- ARSLAN H., GÜLER M., CEMEK B., 2013.** Spatial estimation of the risky areas for drainage and salinity in suluoova plain, turkey using geostatistical methods. Fresenius Environ Bull, 22(10), 2916-2924.
- 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.
- AUBERT G., 1947.** Les sols à croûtes calcaires. C.R. Conf. Méditer. Montpellier- Alger, Publ. Ass. Franc. Et. Sol, Paris, 330-337.
- AUBERT G., 1960.** Les sols de la zone aride, étude de leur formation, de leur caractère, de leur utilisation et de leur conservation. Ed. OROSTOM, Paris.127p.
- AUBERT G., 1976.** Les sols sodiques en Afrique du Nord. ORSTOM, pp. 185-196.
- AUBERT G., 1978.** Méthodes d'analyse des sols. Ed. C.R.D.P., Marseille, 189 p.

**AVILES-HERNANDEZ V., VELAZQUEZ-MARTINEZ A., ANGELES-PEREZ G., ETCHEVERS-BARRA J., SANTOS-POSADAS H., LOS., LLANDERAL T., 2009.** Variation in soil carbon stocks in a topo sequence. *Agrociencia (Montecillo)* Vol. 43 No. 5 pp. 457-464.

**AYACHE N., 1996.** Contribution à la création d'une banque de données pédologiques des sols calcaires de l'Algérie du nord. *Mem. Ingénieur, I.N.A. El Harrach*, 70 p.

**BACI L., 1982.** Contribution à l'étude de la salinisation des sols de Hodna (Wilaya de M'Sila). *Mémoire d'Ingénieur, I.N.A Paris*, 172p.

**BADRAOUI M., AGBANI M., SOUDI B., 2000.** Evolution de la qualité des sols sous mise en valeur intensive au Maroc. Séminaire 'Intensification agricole et qualité des sols et des eaux', Rabat, Maroc, 6-7.

**BADRAOUI M., MERZOUK A., 1994.** Changes of soil qualities under irrigation: the effect of salt accumulation on water retention by Vertisols. In *CIHEAM ed., farm water management techniques*, Rabat, Morocco.

**BADRAOUI M., SOUDI B., LAHLOU M., KABBASSI M., ANIBA K., 1998a.** Evaluation de la salinité des sols dans le périmètre irrigué des Doukkala: Suivi et diagnostic dans les zones vulnérables. In *Soudi B. ed., Etude de l'impact de l'intensification de la mise en valeur agricole sur la qualité des sols et des eaux: proposition de pratiques rationnelles. Projet d'initiatives propres, AGCD-UCL-IAV.*

**BADRAOUI M., SOUDI B., MERZOUK A., FARHAT A., M'HAMDI A. 1998b.** Changes of soil qualities under irrigation in the Bahira region of Morocco: Salinization. *Advances in GeoEcology* 31.

**BAGNOULS F., GAUSSEN H., 1953.** Saison sèche xérothermique, Volume I. *Carte des productions végétales*, art. 8, Toulouse, 47p.

**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.

**BAIZE, D., 2000.** Guide des analyses en pédologie, choix-expression, présentation interprétation. 2eme Ed *INRA, Paris*, 257p.

**BELOUAM N., 1976.** Caractéristiques macromorphologiques et micromorphologiques de quelques sols à accumulation calcaire du Hodna. *Ann. de l'I.N.A. El Harrach*, Vol. VI, 1, 53-79.

**BEN SALAH F., 2014.** Modélisation de la propagation des incertitudes des mesures sur l'aube d'une turbine hydraulique par Krigeage et simulations stochastiques. *Thèse de doctorat, école de technologie supérieure*, 155p.

- BEN SEMAOUNE Y., 2008.** Les parcours sahariens dans la nouvelle dynamique spatiale : contribution à la mise en place d'un schéma d'aménagement et de gestion de l'espace (S.A.G.E.). Thèse de magistère, Univ. Ouargla, 105 p.
- BENAHMED M., 2017.** Effet des précipitations sur la distribution du Zn et du Pb issus de retombées atmosphériques dans le sol : cas de la fonderie de Tiaret (ALFET). Thèse de doctorat, université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, 174p.
- 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., 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., 2006.** Evaluation de la durabilité de la céréaliculture sous pivot par l'étude de la salinisation du sol dans la région de Ouargla (Cas de Hassi Ben Abdellah). Mém. Magister, Ouargla, 111 p.
- BENBRAHIM F., 2018.** Variabilité spatiale de la qualité du sol dans les agrosystèmes du sahara algérien. Thèse de doctorat, université Badji mokhtar-annaba, 140p.
- BENCHETRIT M., 1956.** Les sols d'Algérie. Revue de géographie alpine. Tome 44 N°4. Persée, pp 749-761.
- BENESSEDDIK A., 2019.** Étude hydrogéologique de la région de Metlili (Ghardaïa). Mémoire de master académique, université Kasdi Merbah – Ouargla, 68p.
- BENMAHDI F., 2008.** Etude de la rétention d'un herbicide dans un sol agricole. Mémoire de doctorat. Batna, Université El Hadj Lakhdar, 116p.
- BENSLAMA A., 2021.** Qualité des eaux d'irrigation et salinisation des sols dans une palmeraie dans la région de Ghardaïa – cas de Zelfana. Thèse de doctorat, université de ghardaïa, 144p.
- BERKAL I., 2006.** Contribution à la connaissance des sols du Sahara d'Algérie. De la base de données à la valorisation des paramètres pédologiques. Mém. Mag. INA El Harrach, 118p.
- BERNARD-MICHEL C., 2006.** Indicateurs géostatistiques de la pollution des cours d'eau. 2006. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 194p.

- BERNOUX M., CERRI C.C., CERRI C.E.P., SIQUEIRANETO M., METAY A., PERRIN A.S., SCOPEL E., RAZAFIMBELO T., BLAVET D., PICCOLO M.C., PAVEI M., MILNE E., 2006.** Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil, a review. *Agronomy for Sustainable Development* 26, 1-8.
- 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.
- BILGILI A.V., 2013.** Spatial assessment of soil salinity in the Harran Plain using multiple kriging techniques. *Environ Monit Assess* (2013) 185 :777–795.
- BISSONNAIS Y., THORETTE J., BARDET C., DAROUSSIN J., 2002.** L'érosion hydrique des sols en France. Rapport INRA, IFEN, 106.
- BOIVIN P., HACHICHA M., JOB J.O., LOYER J. Y., 1989.** Une méthode de cartographie de la salinité des sols Conductivité électromagnétique et interpolation par krigeage. *ORSTOM Fonds Documentaire, Tunis* 27(1) pp 69-72.
- BORAH K.K., BHUYAN B., SARMA H.P., 2010.** Lead, arsenic, fluoride, and iron contamination of drinking water in the tea garden belt of Darrang district, Assam, India. *Environmental monitoring and assessment* 169, 347-352.
- BOSSER P., 2012.** Interpolation spatiale. *Ecole Nationale des Sciences Géographiques*, 55p.
- BOUALLA N., BENZIANE A., DERRICH Z., 2012.** Origine de la salinisation des sols de la plaine de M'léta (bordure sud du bassin sebkha Oran). *Journal of Applied Biosciences* 53 : PP 3787 – 3796.
- BOUALLA N., 2019.** Cours de géostatistique. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 32p.
- BOUBAKER Z., BELLATRECHE M., MOUSSOUNI A., 2011.** Apport de la géostatistique à la prédiction de la diversité Avienne dans le parc national de Gouraya (Algérie). *Revue d'Ecologie, Terre et Vie*, vol. 66, no 3, p. 215-229.
- BOUKHALFA I., 2013.** L'effet de la gestion de l'irrigation sur la salinisation du sol (cas de palmeraie de l'Oued Righ). *Mémoire d'ingénieur d'Etat, université Kassdi-Merbah Ouargla*, 67p.
- BOULAIN J., 1961.** Observations sur les carapaces du piémont saharien. *Trav. Inst. Rech. Sahar.*, 20, 79-90.

- 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, 131p.
- BOUNOUARA Z., 2018.** Origine et évolution de la matière organique dans les sols des zones sub-humide cas de la région de SKIKDA. Thèse de doctorat. Université de Batna 1-Hadj Lakhder.149p.
- BOURGEOIS J., 2006.** « Le krigeage comme méthode d'approximation pour l'optimisation ». École polytechnique de Montréal, 155 p.
- 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., 2017.** Evolution de la qualité géochimique des eaux souterraines utilisées dans l'irrigation et leur impact sur la dégradation des sols de la plaine du bas-Chelif. Thèse de doctorat, université Hassiba Benbouali de Chlef, 164P.
- BRADAÏ A., DOUAOUI A., BETTAHAR N., YAHIAOUI I., 2016.** Improving the prediction accuracy of groundwater salinity mapping using indicator Kriging method. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 142, 04016023.
- BRADAÏ A., DOUAOUI A., BETTAHAR N., YAHIAOUI I., 2016.** Improving the prediction accuracy of groundwater salinity mapping using indicator Kriging method. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 142, 04016023.
- BRADY N., WEIL R., 1999.** The Nature and Properties of Soils 12 Edition. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey.
- 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.
- CALLOT G., CHAMAYOU H., MAERTENS C., SALSAC L., 1982.** Les interactions sol-racine : incidence sur la nutrition minérale. Édition INRA, Paris, 325 p.
- 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.
- CEMEK B., GÜLER M., KILIÇ K., DEMIR Y., ARSLAN, H., 2007.** Assessment of spatial variability in some soil properties as related to soil salinity and alkalinity in Bafra plain in northern Turkey. Environmental monitoring and assessment, 124(1), 223-234.

**CHEVERRY C.L., ROBERT M., 1998.** La dégradation des sols irrigués et ressource en eau : une menace pour l'avenir de l'agriculture et pour l'environnement des pays au sud de la méditerranée. *Etude et gestion des sols* 5(4), pp. 217-226.

**CITEAU L., BISPO A., KING D., 2008.** Gestion durable des sols. Ed Quae, France, 320 p.

**CONANT R.T., SMITH G.R., PAUSTIAN K., 2003.** "Spatial Variability of Soil Carbon in Forested and Cultivated Sites: Implications for Change Detection". *Journal of Environmental Quality* 32: 278-286.

**CONDOM N., 2000.** analyse et modélisation couplée des processus hydrogéochemiques de la salinisation des sols. Application aux sols rizicoles de l'office du Niger (mali). Thèse. Doct. École nationale supérieure agronomique, Montpellier, 189p.

**COYNE A., 1989.** Le M'Zab Ed. Adolphejourdon, Algérie, 41p.

**CRESSIE N. A. C., 1993.** Statistics for Spatial Data. Revised Edition, Wiley, New York, 900p.

**D.P.S.B., 2020.** Direction de la programmation et du suivi budgétaires. Annuaire statistique de la wilaya de Ghardaïa.

**DADDI BOUHOUN M., 2010.** Contribution à l'étude de l'impact de la nappe phréatique et des accumulations gypso-salines sur l'enracinement et la nutrition du palmier dattier dans la cuvette de Ouargla (sud-est Algérien). Thèse de doctorat, université Badji Mokhtar Annaba, 393p.

**DAOUD Y., HALITIM, A. 1994.** Irrigation et salinisation au Sahara Algérien. *Sécheresse* 5(3), pp. 151-160.

**DARAB K., 1975.** Laboratory analyses of soils related to the prognosis and monitoring of salinity and alkalinity. In : FAO, Rome (Italy). Expert Consultation on Prognosis of Salinity and Alkalinity. Rome (Italy). 3 Jun.

Darab K., Csillag J., Pinter I., 1980. Studies on the ion composition of salt solutions and of

**DAREM S., 2013.** Impact de l'intensification agricole (Phoéniculture) sur la variation du pH et du taux de calcaire total du sol dans la région de Ghardaïa (cas de Zelfana). Mém de Master Sciences de l'environnement. Univ de Ghardaïa. P 78.

**DEBECHE S., KHEMISSI F.Z., 2017.** Caractérisation de la matière organique du sol salé de M'sila. Mémoire de master. Université Mohamed BOUDIAF de M'Sila.

**DEKHINAT S., BENSALD 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, Sciences de la terre*, 9-14.

- DEKKICHE B., 1974.** Contribution a l'étude des sols du Hodna et corrélation géochimique des eaux de nappe. Thèse Univ, Gant, Belgique, 210p.
- DEMELON A., 1966.** Dynamique du sol. Tome I. 5ème Edition. Dunod, Paris, 520 p.
- DEO SHORTA J.C., 1979.** Les encroûtements calcaires et les encroûtements gypseux en géotechnique routière. Bet. Labo, mécanique des sols, 105p.
- DESJARDINS T., 1991.** Variations de la distribution de la matière organique (carbone total et [exposant 13] C) dans les sols ferrallitiques du Brésil. Modifications consécutives à la déforestation et à la mise en culture en amazonie orientale. 1991. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré-Nancy 1.
- DESPAGNE W., 2006.** Méthodes géostatistique pour l'interpolation et la modélisation en 2D/3D des données spatiales. Rapport de stage, université de Bretagne sud, 68p.
- DHUNNA M., DIXIT J.B., 2010.** Information technology in business management, university science Press, Bangalore, 797p.
- DIALLO M.D., NDIAYE O., MAHAMAT S.M., TINE.A., DIOP.A., GUISSÉ. A., 2015.** Étude comparative de la salinité de l'eau et des sols dans la zone nord des niayes (senegal), africancrop science journal, vol. 23, no. 2, pp. 101 – 111.
- DJILI K., 1983.** Cartographie des sols en milieu steppique calcaire. Thèse de magister, I.N.A. El harrach, 195 p.
- DJILI K., 2000.** Contribution à la connaissance des sols du Nord de l'Algérie. Thèse doc. INA, Alger, 243p.
- DJILI K., DAOUD Y., AYACHE N., 1999.** Analyse de la distribution verticale et spatiale du calcaire dans les sols de l'Algérie septentrionale. Etude et gestion des sols, vol. 6, no 3, p. 201-213.
- DJILI K., DAOUD Y., GAOUAR A., BELDJOUZI 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.
- DJILI K., DAOUD, Y., 1999.** Distribution latérale et vertical de l'ESP des sols du Nord de l'Algérie compte rendu de la semaine nationale sur la salinisation des terres agricoles. C.R.S.T.R.A. Chélif le 1 et 2 Juin, n° 99, pp : 25-44.
- DON A., SCHUMACHER M., SCHERER-LORENZEN T., SCHOLTEN., SCHULZE., 2007.** "Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites – Implications for measuring soil carbon stocks". Geoderma 141(3-4): 272-282.

- DOUCET R., 2006.** Le climat et les sols agricoles. ed. Berger, Eastman, Québec, xv, 443.
- DSA., 2021.** Direction des services agricoles. Rapport des cultures en wilaya.
- DUCHAUFOR P. 2001.** Introduction à la science du sol. Sol, végétation, environnement. 6<sup>e</sup> édition, DUNOD, Paris, France, 331p.
- DUCHAUFOR P., 1977.** Pédologie. Pédogénèse et classification. Tome I, Edition Masson, Paris, p 477.
- DUCHAUFOR P., SOUCHIER B., 1977.** Pédologie 1. Pédogénèse et classification. Masson, Paris.
- DURAND J.H., 1958.** Recherche sur les sels apportés au sol par les pluies. Travaux des sections pédologie et agrologie. Bull. n° 4 et Gén. N° 5, SES, Birmouradrais.
- DURAND J.H., 1959.** Les sols rouges et les croûtes en Algérie. Serv. Etud. Sci. Pédol. n°7, 188 p.
- DURANT J. H., 1954.** Les sols d'Algérie. S.E.S. Alger, 244 p.
- DURDEVIC B., JUG I., JUG D., BOGUNOVIC I., VUKADINOVIC V., STIPESVIC B., BROZOVIC B. 2019.** Spatial variability of soil organic matter content in Eastern Croatia assessed using different interpolation methods. International Agrophysics, 2019, vol. 33, no 1.
- DUTIL P., 1971.** Contribution à l'étude des sols et des paléosols du Sahara. Thèse. Doctorat. Univ, Strasbourg. 346 p.
- 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.
- 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.
- ERSAHIN S., 2003.** Comparing Ordinary Kriging and Cokriging to Estimate Infiltration Rate. Soil Science Society of America Journal, 67(6), 1848-1855.
- ESRI., 2019.** "Environmental Systems Research Institute ". ArcGIS desktop.
- EVRENDILEK F., CELIK., KILIC S., 2004.** "Changes in soil organic carbon and other physical soil properties along adjacent Mediterranean forest, grassland, and cropland ecosystems in Turkey". Journal of Arid Environments 59(4): 743-752.
- F.A.O., 1972.** La salinité. Doc. F.A.O. N ° 7, Rome, 272p.

- FAO., 1973.** calcareous soils. FAO soil bulletin N° 21, 253p.
- FARHAT A., 1995.** Effets de l'irrigation par pivot sur la qualité des sols dans la Bahira: situation actuelle et perspectives de développement. Thèse de 3ème cycle, IAV Hassan II, Département Sci. Sol, Rabat, Maroc.
- FARRAH H., PICKERING W.F., 1979.** pH effects in the adsorption of heavy metal ions by clays. Chemical Geology, 1979, vol. 25, no 4, p. 317-326.
- 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.
- GAUCHER G., 1968.** Traite de pédologie agricole, le sol et ses caractéristiques agronomiques. DUNNOD, Paris, 368p.
- GHASSEMI F., JAKEMAN A.J., NIX H.A., 1995.** Salinisation of land and water Resources. Human causes, Extent, Management and case studies. Centre for resource and environmental Studies. The Australian National University. CanberraACT 0200 Australia.
- GIRARD M.C., SCHVARTZ C., JABIOL B., 2011.** Étude des sols. Description, cartographie, utilisation, Dunod, Paris, 404p.
- GIRARD M.C., WALTER C., REMY J.C., BERTHELIN J., MOREL J.L., 2011.** Sols est environnement: deuxième édition, Dunod, Paris, 881p.
- GOBAT J. M., ARAGNO M., MATTHEY W., 2010.** Le sol vivant, bases de pédologie-biologie des sols : troisième édition revue et augmentée. Presses polytechniques et universitaires romandes, France, 817p.
- 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.
- GOMEZ C., LAGACHERIE P., COULOUMA G., 2012.** Regional predictions of eight common soil properties and their spatial structures from hyperspectral Vis–NIR data. Geoderma, 2012, vol. 189, p. 176-185.
- GOOVAERTS P., 1998.** Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. Biology and Fertility of soils, vol. 27, no 4, p. 315-334.

- GOUAIDIA L., GUEFAIFIA O., BOUDOUKHA A., HEMILA ML., 2012.** Évaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols : exemple de la plaine de Meskiana (Nord-Est Algérien). *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, 2012, no Volume 6, p. 141-160.
- 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.
- GROS A., 1979.** Guide pratique de la fertilisation. La maison rustique. Paris.
- GROS R., 2002.** Fonctionnement et qualité des sols soumis à des perturbations physiques et chimiques d'origines anthropiques : réponses du sol, de la flore et de la microflore bactérienne tellurique. Thèse de doctorat, université de Savoie, 243p.
- GRÜNBERGER O., 2015.** Dynamiques salines des sols des milieux arides et semi-arides. Thèse de doctorat. Université de Montpellier. 133p.
- GUERIF M. KING D., 2007.** Agriculture de précision. Ed. Quae, Versailles, France, 276p.
- GUESSOUM H., 2020.** Relation qualité des eaux et propriétés des sols dans les palmeraies de la région de Ghardaïa (cas de Sebseb). Thèse de doctorat, université Badji Mokhtar – Annaba, 136p.
- GÜNAL E., 2021.** Delineating reclamation zones for site-specific reclamation of saline-sodic soils in Dushak, Turkmenistan. *Plos one*, 2021, vol. 16, no 8, p. e0256355.
- HACHICHA M., M'HIRI A., BOUKSILA F., BACH HAMBAL L., 1997.** Variabilité et répartition de l'argile et de la salinité dans le périmètre de Kalaât Landalous (Tunisie). *Etude et Gestion des sols*, 1997, vol. 4, no 1, p. 53-66.
- HAGIN J., TUCKER B., 1982.** Secondary and Micronutrients. In: *Fertilization of Dryland and Irrigated Soils*. Springer, Berlin, Heidelberg. p. 120-140.
- HALILAT M.T., 1998.** Etude expérimentale de sable additionné d'argile. Comportement physique et organisation en conditions salines et sodiques (Doctoral dissertation, Institut National Agronomique Paris Grignon).
- HALITIM A., 1973.** Etude expérimentale de l'amélioration des sols sodiques d'Algérie en vue de leur mise en culture. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle. Univ de Renne, 176 p.
- HALITIM A., 1985.** Contribution à l'étude des sols des zones arides (hautes plaines steppiques de l'Algérie): morphologie, distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Supérieure Agronomique).
- HALITIM A., 1988.** Les sols des régions arides d'Algérie. Ed. O. P. U, Alger. 384p.

- HAMDI A.B., 2001.** Le fonctionnement actuel et passé de sol du sud Sahara (cuvette d'Ouargla) approche micro morphologique, géochimique, minéralogique et organisation spatiale. Thèse doctorat. I.N.A Paris Grignon. 281 p.
- HAMEL I., CHIKHIF F., REZZAG H., 2013.** Etude de l'impact de l'activité agricole sur la salinité du sol dans la région du Ghardaïa (cas de la palmeraie de Zelfana). Mém licence, Université de Ghardaïa, 95p.
- HÂRING V., FISCHER H., CADISCH G., STAHR K., 2013.** "Implication of erosion on the assessment of decomposition and humification of soil organic carbon after land use change in tropical agricultural systems». *Soil Biology and Biochemistry* 65: 158-167.
- HARTANI T., DOUAOUI A., KUPER M., HASSANI F., 2007.** Stratégies de gestion individuelle de la salinité dans le périmètre irrigué du Bas Chelif: cas du périmètre de Ouarizane. In : Troisième atelier régional du projet Sirma. Cirad. p. 16 p.
- HENIN S., HALIMI A., GOBAT A et ARDOUIN A., 1976.** Cours de physique des sols. Paris. ARSTOM. Sn.
- HENNEQUI M., 2010.** Spatialisation des données de modélisation par Krigeage. Master Statistique et Applications, Université de Strasbourg, 75p.
- HOBLEY E., WILSON B., WILKIE A., GRAY J., KOEN T. 2015.** Drivers of Soil Organic Carbon Storage and Vertical Distribution in Eastern Australia. *Plant Soil* 390 (1-2), 111–127.
- HOUICHITI R., 2009.** Caractérisation d'un agrosystème saharien dans une perspective de développement durable : Cas de l'Oasis de SEBSEB (Wilaya de GHARDAIA). Mémoire magister d'Agronomie Saharienne, Option Gestion des agrosystèmes Sahariens. Université de Ouargla, Département de Science agronomique. 105p.
- HUANG X., SKIDMORE E.L., TIBKE G., 2001.** Spatial variability of soil properties along a transect of CRP and continuously cropped land. *Sustaining the Global Farm*, p. 24-29.
- HULLIN M., 1983.** Cours de drainage. Partie consacrée aux sols salés. Cours photocopié, Vol. 3, I.N.A., Alger, 139 p.
- IDDER T., IDDER A., TANKAR I DAN -BA DJO A., BENZIDA A., MERABET S., NEGAIS H., SERRAYE A., 2014.** Les oasis du Sahara algérien, entre excédents hydriques et salinité. L'exemple de l'oasis de Ouargla. *Revue des Sciences de l'Eau* 27(2) 155-164.

**IDDIR M.A., 2006.** Evaluation de la salinité par induction électromagnétique : exemple d'une parcelle cultivée de la plaine de la Macta (Wilaya de Mascara). Thèse de magister, institut national agronomique EL Harrach, Alger, 102p.

in soils: a case study of Changxing, China. *Environmental Geology*, 52, 1–10.

**INERIS., 2003.** Guide d'utilisation des méthodes de la géostatistique linéaire. Rapport INERIS, LCSQA (laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air).

**INRA., 2012.** Rapport sur l'étude du sol de la région d'Aigrefeuille-sur-Maine (Loire-Atlantique) à partir de la base de données des analyses de terre. INRA. France, p5.

**IQBAL J ., THOMASSON J.A ., JENKINS J.N., OWENS P.R ., WHISTER F.D., 2005.** Spatial Variability Anays of soil properties of alluvial soils. *Soil Sci . Am. J.* 69 : 1338 - 1350.

**JAILLARD B., 1980.** Fonctionnement hydrique d'un sol Carbonaté. Incidence sur la chlorose ferrique. Thèse de 3' cycle, U.S.T.L., Montpellier, 13 nov. 1980, 132 p.

**JAILLARD B., 1992.** Calcification des cellules corticales des racines en milieu calcaire. *Bulletin de la Société Botanique de France. Actualités Botaniques*, dvol. 139, no 1, p. 41-46.

**JALALI M., 2007.** Salinization of groundwater in arid and semi-arid zones: an example from Tajarak, Western Iran. *Environ Geol* 52 :1133–1149.

**JOHNSTON K., VER HOEF J.M., KRIVORUCHKO K., LUCAS N., 2001.** Using ArcGIS Geostatistical Analyst. ESRI, Redlands, CA. p. 306.

**JOLIVET C., 2000.** Le carbone organique des sols des Landes de Gascogne. Variabilité spatiale et effets des pratiques sylvicoles et agricoles. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 320p.

**KARABIM., 2017.** Fonctionnement microbiologique des sols oasiens. Cas de quelques sols de la région de Ouargla. Thèse de doctorat, université de Ouargla, 221p.

**KERRY R., OLIVER M.A., 2004.** Average variograms to guide soil sampling. *Int J Appl Earth Obs*, 5 (4), 307-325.

**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 (Doctoral dissertation, Ouargla, Université de Kasdi Merbah. Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur), 100 p.

- KOULL N., HALILAT M.T.,** Effets de la matière organique sur les propriétés physiques et chimiques des sols sableux de la région d'Ouargla (Algérie). *Etude et Gestion des sols*, 2016, vol. 23, p. 9-23.
- KRAIMAT M., 2019.** Réponses adaptatives de quelques populations d'arachide locales (*arachis hypogaea* l.) à la déficience en phosphore : approches agro-morphologique, physiologique et biochimique. Thèse de doctorat, université Kasdi Merbah-Ouargla, 189p.
- KRESSE W., DANKO D., 2012.** Springer Handbook of Geographic Information, Springer, New York, USA, 1120p.
- KUPER M., FAYSSE N., HAMMANI A., HARTANI T., MARLET S., HAMAMOUCHE M.F., AMEUR F., 2016.** Liberation or anarchy? The Janus nature of groundwater use on North Africa's new irrigation frontiers. *Integrated groundwater management*. Springer, Cham, pp. 583-615.
- LARBI B., 2014.** Évolution d'un sol sableux soumis à l'irrigation en milieu saharien. Mémoire de magister, Ecole Nationale Supérieure Agronomique El Harrach – Alger, 143p.
- 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.
- LAURENCE W., 1998.** Dynamique et biomasse des fragments de la forêt amazonienne. *Actualités des Forêts tropicales, Bulletin de l'OIBT*, 6 : pp 12-13.
- 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., 1993.** Salt-tolerant plants for the arid regions of the Mediterranean isoclimatic zone. In : *Towards the rational use of high salinity tolerant plants*. Springer, Dordrecht, 1993. p. 403-422.
- LI M., ZHANG X., PANG G., HAN F., 2013.** The estimation of soil organic carbon distribution and storage in a small catchment area of the loess plateau. *Catena* 101, 11-16.
- 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 W., Su Y., Yang R., Yang Q., Fan G., 2011.** Temporal and spatial variability of soil organic matter and total nitrogen in a typical oasis cropland ecosystem in arid region of Northwest China. *Environ. Earth Sci.* 64, 2247–2257.
- LODHI A., ARSHAD M., AZAM F., SAJJAD M., 2009.** Changes in mineral and mineralizable N of soil incubated at varying salinity, moisture and temperature regimes. *Pakistan J Bot* ; 41 (2): 967-980.
- LOVELAND P., WEBB J., 2003.** Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. *Soil and Tillage Research* 70, 1-18.
- MASHAYEKHI K., ASADI Z., NAEINI S. A. R. M., HAJRASULIHA S., 2007.** Salinity regionalization with geostatistic method in a wet soil in Southern Lenjanisfahan (Iran). *Indian Journal of Agricultural Research*, 41(1), 1.
- MANCER H., BETTICHE F., CHAIB W., N DEKKI S. BENAOUN M.Z. RECHACHI., 2020.** Influence de la salinité des eaux d’irrigation sur la minéralisation du carbone organique dans le sol. *Journal Algérien des Régions Arides (JARA)*, 2020, vol. 14, no 1, p. 48-55.
- MASMOUDI A., 2012.** Problèmes de la salinité liés à l’irrigation dans la région Saharienne : Cas des Oasis des Ziban. Thèse de doctorat, université Mohamed Khider – Biskra, 139p.
- MASSOUMI A.M., 1968.** Caractérisation et amélioration des sols sales et a alcalis. O.R.S.T.O.M., paris, 39p.
- MATHERON G., 1971.** La théorie des variables régionalisées et ces applications. *Les cahiers de CMM5*. Paris ENSMP, 212p.
- 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., FRANCOISE P., 2009.** Analyse chimique des sols. Méthodes choisies. Ed ; TEC et DOC. Paris. 23-139 p.
- MATHIEU C., RUELLAN A., 1980.** Evolution morphologique des sols irrigués en région méditerranéenne semi aride. *Cahier ORSTOM, Série pédologie*, 13, 3-25.l
- 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.
- MCWILLIAM J. R., 1986.** The national and international importance of drought and salinity effects on agricultural production. *Functional plant biology*, vol. 13, no 1, p. 1-13.

- MEDDICH A., HAFIDI M., AIT EL MOKHTAR M., BOUMEZZOUGH A., 2015.** Caractérisation des paramètres physicochimiques et des potentialités mycorhizogènes des sols salés de la palmeraie Nord-est de Marrakech. *J. Mater. Environ. Sci*, vol. 6, no 9, p. 2469-2475.
- MESSAMEH A.H., LABORDE J.P., BENMEBAREK S., 2009.** Modélisation géostatistique de la salinité des eaux souterraines : cas de la nappe des sables de Biskra. Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, N°09, Mars 2009, pp.49-56.
- MESSEN N., GAOUAR A., HAMDI-AISSA B., HACINI M., YUCEF-ETTOUMI F., 2004.** Etude du climat paléolithique dans un bassin sédimentaire du sud Algérien. *Journal Algérien pour les Zones Arides*.
- MEZANI S., ADJABI A., SIDI H., BOUNAR R., REZA NASERI H., 2021.** Analysis of calcareous soils for two various facies within the nature reserve of El-Mergueb (M'sila, Algeria). *Ekológia*, 2021, vol. 40, no 4, p. 337-347.
- MICROSOFT CORPORATION., 1993.** Microsoft Excel : user's guide : version 5.0. Edition Microsoft Corporation, université du Michigan, U.S.A., 786p.
- MORLAT R., 1976.** Observations sur la chlorose ferrique dans les sols viticoles calcaires du Saumurois. 1976. Institut National de la Recherche Agronomique, Angers (France), *Connaissance Vigne Vin* 1976, 10, N° 4, 359-367.
- MOUGHLI L., 2000.** Transfert de technologie en agriculture, Les engrais minéraux caractéristiques et utilisations, N° 72, Rabat, 4 p.
- MOUSSA M., SOLE-BENET A., DOMEN R., VIDAL P., 2004.** Suivi de l'humidité et de la salinité du sol dans les oasis littorales tunisiennes, pour une meilleure gestion de l'irrigation et du drainage *Revue des Régions Arides*, p. 370-377.
- MUHAMEED A.S., SALEH A.M., 2013.** Spatial Variability Analysis of Selected Soil Properties at Musayab, Babil, Iraq. *Journal of Agriculture and Veterinary Science*, vol. 6, no 3, p. 72-79.
- 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), 1572-1579.
- NACRO H.B., 1997.** Hétérogénéité fonctionnelle de la matière organique dans un sol de savane humide (Iamto, Côte d'Ivoire) : caractérisation chimique et étude in vitro des activités microbiennes de minéralisation du carbone et de l'azote. Thèse de doctorat. Paris 6. 328p.

- NADHEM B., KARBOUT N., DHAOUADI L., BOUAJILA A., 2021.** Global Landscape of Organic Carbon and Total Nitrogen in the Soils of Oasis Ecosystems in Southern Tunisia. *Agronomy*, 2021, vol. 11, no 10, p. 1903.
- 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.
- NAMAM F., SOUDI B., ET CHIANG C., 2001.** Impact de l'intensification agricole sur le statut de la matière organique des sols en zone irriguées semi-aride au Maroc. *Etude et gestion des sols*, volume 8,4, page 269 à 277.
- NIKPEY M., SEDIGHKIA M., NATEGHI M.B., ROBATJAZI J., 2017.** Comparison of spatial interpolation methods for mapping the qualitative properties of soil. *Adv. Agric*, 2017, vol. 5, p. 1-15.
- NOLIN M.C., CAMBOURIS A.N., SIMARD R.R., 1997.** La variabilité des sols : son origine et sa gestion. *Actes du Colloque : Nouvelle technologie en agriculture*, campus du fort St-Jean, pp.35-77.
- NOUFAL E.H., EL-NAHRY A.H., SALEM H.M., ZAHRA W.R., 2010.** Mapping and modeling soil characteristics to evaluate precision farming. *Annals of Agric. Sci., Moshtohor*. Vol. 48(4) (2010), 129-135.
- O.N.M., 2019.** Données climatiques de la région de Ghardaïa. Ed. Office National de la Météorologie, 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.
- OMM., 2005.** Le climat et la dégradation des sols. *Organisation météorologique mondiale*, pp. 10-20.
- OMOURI O., 2009.** Contribution à l'étude de la réhabilitation au laboratoire des sols salso-diques des palmeraies de la région d'In Salah par l'utilisation du phosphogypse. Thèse de magister, Ecole Nationale Supérieure Agronomique El Harrach – Alger, 78p.
- 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.
- OUALI S., MEHMAH B., MALEK A. 2007.** Etude de faisabilité d'utilisation des eaux thermales de Zelfana Dans la Production d'Hydrogène. Centre de Développement des Energies Renouvelables. Algérie.

- OULD BABA SY. M., 2005.** Recharge et paléo recharge du système aquifère du Sahara Septentrional, Thèse doctorat, université El MANAR de Tunis, 261p.
- OULED SIDI AMOR T., 2016.** Vulnérabilité a la pollution des eaux de la nappe superficielle de la vallée du m'zab. Mémoire master, université Kasdi Merbah – Ouargla, 71p.
- OUSTANI M., 2006.** Contribution à l'étude de l'influence des amendements organique sur les propriétés microbiologiques des sols sableux non salé et salé dans les régions sahariennes (cas de Ouargla ).Thèse Magister .Université .Ouargla187p .
- OUSTANI M., 2016.** Influence des fertilisants organiques sur la réactivité physico-chimique et le fonctionnement microbologique d'un sol sableux non salé et sableux salé en conditions d'irrigation par des eaux chargées en sels. Thèse de doctorat, université de Ouargla, 285p.
- OZENDA P., 1983** – Flore du Sahara. Ed. Centre national de la recherche scientifique (C.N.R.S.), Paris, 622 p.
- PARADIS R., 2016.** Distribution spatiale du carbone organique et de l'azote dans les sols en fonction des zones de récurrence d'inondation. Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières.124p. Paris 07 SP. ISBN 92-9220-007-0. 342 p.
- PERNES-DEBUYSER A. ESSIÉR D., 2002.** Influence du pH sur les propriétés des sols : l'essai de longue durée des 42 parcelles à Versailles. Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science, 2002, vol. 15, p. 27-39.
- PERSON J., 1978.** Irrigation et drainage en Tunisie : problème posé par la salinité des sols et des eaux. Bull. BRGM (2ème série) section III, 2 : 143-151.
- PIEUGUEU R., 2016.** Critère de validation croisée pour le choix des modèles des petits domaines au niveau des unités.université Laval, Québec, Canada, 93p.
- POUGET M., 1980.** Les sols à croûtes calcaires dans les steppes algériennes. Quelques aspects morphologiques et esquisse d'une évolution actuelle. Cah. ; ORSTOM Sec. Pedol. 18,3.4, 235-236 p.
- PREVOST P., 2006.** Les bases de l'agriculture. 3ème Ed. TEC – DOC, Lavoisier, 290 p.
- PROVENCHER M., 2003.** Évaluation spatiale de l'efficacité agronomique du LIOR dans la pomme de terre. Université Laval.
- RABENHORST M.C., WEST L.T., WILDING L.P., 1991.** Genesis of calcic and petrocalcic horizons in soils over carbonate rocks. Occurrence, characteristics, and genesis of carbonate, gypsum, and silica accumulations in soils, 1991, vol. 26, p. 61-74.

- RANJBAR F., JALALI M., 2016.** The combination of geostatistics and geochemical simulation for the site-specific management of soil salinity and sodicity. *Computers and Electronics in Agriculture* 121 (2016) 301–312. Doi.org/10.1016/j.compag.2015.12.010
- RASHA E.A., 2005.** The relation between active calcium carbonate and some properties of calcareous
- RICHARDS L.A., 1954.** Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S.D.A, Handbook N° 60, Washington, 160 p.
- RICHER DE FORGES A., FELLER C., JAMAGNE M., ARROUAYS D., 2008.** Perdus dans le triangle des textures. *Étude et Gestion des Sols*, Volume 15, 2. 97-111.
- ROBERT M., 1992.** Le sol, une ressource naturelle à préserver pour la production et l'environnement. *Cahier Agriculture*, 1: 20-34.
- ROBERT M., 1996.** Le sol : interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Masson, Paris, 241p.
- RODRIGUEZ-MURILLO C., 2001.** "Organic carbon content under different types of land use and soil in peninsular Spain". *Biol Fertil Soils* 33: 53-61.
- ROUAS A., BENDANIA M.L., 2018.** Étude hydrogéologique de la région de HASSI LAFHEL bounauber(Ghardaïa). Mémoire de master académique, université Kasdi Merbah – Ouargla, 74p.
- RUELLAN A., 1967.** Individualisation et accumulation du calcaire dans les sols et les dépôts quaternaires du Maroc. *Cah. ORSTOM*, sér. Pédol, 1967, vol. 5, no 4.
- RUELLAN A., 1971.** Les Sols à profil calcaire différencié des plaines de la basse Moulouya:(Maroc oriental). *ORSTOM*, Office de la recherche scientifique et technique outre-mer, n° 54, 302p.
- RUELLAN A., 1976.** Caractéristiques morphologiques des sols calcaires *Ann.Agro.INA*, El- Harrach. Vol. IV, n°1, pp : 31-54.
- RUELLAN A., 1984.** Les sols calcaires : les principaux travaux des pedologues francais. *Livre Jubilaire du Cinquenaire AFES*, Paris, p. 111-121.
- 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.
- SAFARBEIRANVND M., AMANIPOOR H., BATTLEB-LOOIE S., GHANEMI K., EBRAHIMI B.J.W.R.M., 2018.** Quality evaluation of groundwater resources using geostatistical methods (case study: Central Lorestan Plain, Iran). 32, 3611-3628.

- SAFARI Y., ESFANDIARPOUR-BOROJENI 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.
- SAIDI J., 2004.** Influence de la phase saline sur les propriétés physiques des matériaux argileux du bas Cheliff. Thèse de Doctorat d'Etat en Science Agronomiques, Spécialité : Science du Sol. 181p.
- SALAH D., 2011.** Morphologie et propriétés des Calcisols références des hautes plaines sétifiennes. Thèse de magister, I.N.A. El harrach, 74 p.
- SALIM S., TESSIER D., 1998.** Evolution des propriétés physiques et physico-chimiques de sols salées 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.
- SAMUEL R., DINIZ D., MIGUEL P., 2013.** Building predictive models of soil particle-size distribution. *R. Bras. Ci. Solo*, 37; 422-430.
- SARMADIAN F., KESHAVARZI A., MALEKIAN A., 2010.** continuous mapping of topsoil calcium carbonate using geostatistical techniques in a semi-arid region. *Australian Journal of Crop Science*, vol. 4, no 8, p. 603-608.
- SARMADIAN F., KESHAVARZI A., MALEKIAN A., 2010.** Continuous mapping of topsoil calcium carbonate using geostatistical techniques in a semi-arid region. *Australian Journal of Crop Science*, vol. 4, no 8, p. 603-608.
- saturation extracts of salt-affected soils. *Geoderma*, 23, 95–111.
- SAVORNIN J., 1947.** Le plus grand appareil hydraulique du Sahara (nappe artésienne dit de l'Albien). *Travaux I.R.S*, p 25-66.
- SERVANT J.M., 1975.** Etude pédologique des sols halomorphes. Thèse. Doct. Uni, Montpellier, 194p.
- 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.
- SERVANT J.M., 1978.** La salinité dans le sol et les eaux : caractérisation et problèmes d'irrigation drainage. *Bull. B.R.G.M., Section. III, N°2*, pp. 123-142.

- SHAHANDEH H., WRIGHT A.L., HONS F.M., LASCANO R.J., 2005.** Spatial and temporal variation of soil nitrogen parameters related to soil texture and corn yield. *Agronomy Journal*, **97**, 772-782.
- SHEIKH M. A., KUMAR M., BUSSMANN R. W., 2009.** Altitudinal Variation in Soil Organic Carbon Stock in Coniferous Subtropical and Broadleaf Temperate Forests in Garhwal Himalaya. *Carbon Balance Manag.* 4 (1), 6.
- SHEK D.S. 2010.** Application de la technique géostatistique pour estimer le gisement de calcaire de Soalara, sud-ouest de Madagascar. (MSTGA), université D'antananarivo.
- SHI J., WANG H., XU J., WU J., LIU X., ZHU H., YU C., 2007.** Spatial distribution of heavy metals in soils: a case study of Changxing, China. *Environmental Geology*, 52, 1–10.
- SHI J., WANG H., XU J., WU J., LIU X., ZHU H., YU C., 2007.** Spatial distribution of heavy metals
- SIMLER R., 2012.** Manuel pour DIAGRAMMES. Présentation du logiciel à partir de données importées d'un tableur, création de diagrammes spécifiques à l'hydrogéologie et validation des données analytiques. Université Avignon. Laboratoire d'Hydrogéochimie d'Avignon 21-6-2012. 40p.
- SINGH R.B., MINHAS P.S., CHAUHAN C.P.S., GUPTA R.K., 1994.** Salt leaching with Monsoons and yield on Indian Mustard as affected by saline Irrigation waters of varying  $Cl/ SO_4^{-2}$  ration. *Journal of Indian Society of Soil Science*, 42, 3 : 436-441.
- SOCO., 2009.** Réduction du taux de matière organique, l'agriculture durable et la conservation des sols : Processus de dégradation des sols, N°: 3, 4 p.
- soils in North Africa. M. Sc. Thesis Cairo, Univ. of Ins. of African Res. and studies Dep. Of Natural Resources.
- 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.
- SÜRÜCÜ A., TAVAN K.A., GÜNAL E., BUDAK M., 2019.** Spatial variability of some soil properties in an agricultural field of Halabja City of Sulaimani Governorate, Iraq.
- TAALAB A.S., AGEEB G.W., HANAN S., SIAM AND SAFAA A., MAHMOUD., 2019.** Some Characteristics of Calcareous soils. A review AS Taalab1, GW Ageeb2, Hanan S. Siam1 and Safaa A. Mahmoud1. *Middle East J*, vol. 8, no 1, p. 96-105.

- TANG X., XIA M., PEREZ-CRUZADO C., GUAN F., FAN S., 2017.** Spatial distribution of soil organic carbon stock in Moso bamboo forests in subtropical China. *Scientific Reports*, vol. 7, no 1, p. 1-13.
- TIR C., 2007.** Genèse des sols à accumulation gypso-calcaire et salines dans la région de Ain Ben Noui-Biskra, approche minéralogique et morpho scopique. Thèse de magister, institut national agronomique EL Harrach, 128p.
- TONG Y., YU Y., HU X., HE L., 2015.** Performance analysis of different kriging interpolation methods based on air quality index in wuhan. In 2015 Sixth International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP) (pp. 331-335). IEEE.
- 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.
- U.S.S.L., 1954.** Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U. S. Salinity Laboratory U.S.D.A, Handbook N° 60, Washington, 160 p.
- UMALI D.L., 1993.** Irrigation-induced salinity. A growing problem for development and the environment. World Bank technical paper 215, p.78.
- UMER M.I., RAJAB S.M., ISMAIL H.K., 2020.** Effect of CaCO<sub>3</sub> form on soil inherent quality properties of calcareous soils. In: *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd. p. 459-467.
- VIEIRA S.R., 2000.** Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In Novais, R. F., Alvarez, V. H., Schaefer, G. R. (Eds.), *Temas em Ciência do Solo*. Vigosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1 (pp. 1–54).
- VINAS A., JOUKOV B., 1974.** Etude agro-pédologique du Touat-Gourar, direction des études de milieu et de la recherche hydraulique. La sous-direction des ressources en sol, Alger, 103p.
- VOGT T., 1979.** Microsilicification dans des croûtes calcaires de milieu aride. Quelques remarques. *Rech. Géogr. A Strasbourg*, n° 12, 81-86.
- 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.
- WANG L., OKIN G.S., CAYLOR K.K., MACKO S.A., 2009.** Spatial Heterogeneity and Sources of Soil Carbon in Southern African Savannas. *Geoderma* 149 (3), 402–408.

- WANG T., KANG F., CHENG X., HAN H., BAI Y., MA J., 2017.** Spatial Variability of Organic Carbon and Total Nitrogen in the Soils of a Subalpine Forested Catchment at Mt. Taiyue, China. *Catena* 155, 41–52.
- WANG X., LI Y., DUAN Y., Lilong W., Yayi N., Xiaohui L., Meng Y., 2021.** Spatial variability of soil organic carbon and total nitrogen in desert steppes of northwest China. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, p. 471.
- WARRENCE N.J., BAUDER J.W., PEARSON K.E., 2003.** Water Quality & Irrigation Management: Basics of Salinity and Sodicity effects on soil Physical Properties. Department of land Ressources and Environmental Science.
- WEBSTER R., 1985.** Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Advances in Soil Science* 3, 1–70.
- 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 groundbased 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.
- WIESMEIER M., HÜBNER R., BARTHOLD F., SPÖRLEIN P., GEUB U., HANGEN E., REISCHL A., SCHILLING B., VON LÜTZOW M., KÖGEL-KNABNER L, 2013.** Amount, distribution and driving factors of soil organic carbon and nitrogen in cropland and grassland soils of southeast Germany (Bavaria). *Agric. Ecosys. Environm.* 176, 39-52.
- WILCOX L.V., 1948.** The quality of water for irrigation use. Edit. US department of agriculture, technical bulletin, vol. 962, Washington (USA), 40p.
- WU J., NORVELL W.A., HOPKINS D.G, WELCH R.M., 2002.** Spatial variability of grain cadmium and soil characteristics in a durum wheat field. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 268-275.
- 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.
- YANG F., ZHANG G., YIN X., LIU Z., 2011.** Field-scale spatial variation of saline-sodic soil and its relation with environmental factors in Western Songnen Plain of China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2011, vol. 8, no 2, p. 374-387.

**YANG X.D., ALI A., XU Y.L., JIANG L.M., LV G.H., 2019.** Soil moisture and salinity as main drivers of soil respiration across natural xeromorphic vegetation and agricultural lands in an arid desert region. *Catena*, 177, 126-133.

**YOUCEF F., 2003.** Mise au point d'une étude climatique du Sahara Septentrionale Algérien (Ouargla, Touggourt, Ghardaïa), Mém. Ing., Université de Ouargla, 88p.

**ZAMAN M., SHAHID S. A., HENG L., 2018.** Guideline for salinity assessment, mitigation and adaptation using nuclear and related techniques. Springer Nature.

**ZANIN CH., 2006.** Cartographie thématique. Hypergeo, no article 377, p. 8 pages.

**ZARAI B., WALTER C., MICHOT D., MONTOROI J.P HACHICHA M., 2021.** Soil salinization monitoring method evolution at various spatial and temporal scales in arid context: a review. *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 14, no 4, p. 1-12.

**ZEKTSER I.S., EVERETT L.G., 2004.** Resources of the word and their use. UNESCO 2004, 75352

**ZIZA F.Z., 2006.** Evolution de la salinité des sols irrigués dans une région saharienne. Thèse de magister. INA.121p.

**ZIZA F.Z., DAOUD Y., LABOUDI A., BRADAI R., ZOUAHRA A., 2012.** Evolution de la salinité dans les périmètres de mise en valeur et conséquences sur la diminution des rendements du blé dans une région saharienne : Cas de la région d'Adrar. *Algerian Journal of Arid Environment "AJAE"*, 2012, vol. 2, p. 4-15.

**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.

---

# *Annexe*

---

---

## *Annexes*

### **Annexes I : Echelles utilisées à l'interprétation des résultats du sol.**

**Tableau 01 :** Echelles d'interprétation de la Matière organiques (I.T.A, 1975)

<b>M.O. (%)</b>	<b>Sol</b>
$\leq 1$	<b>Très pauvre</b>
$1 < \text{M.O.} \leq 2$	<b>Pauvre</b>
$2 < \text{M.O.} \leq 4$	<b>Moyenne</b>
$> 4$	<b>Riche</b>

**Tableau 02 :** Échelle d'interprétation de la salinité en fonction de la conductivité électrique de l'extrait dilué 1/5 (AUBERT, 1978)

<b>C.E. (dS/m à 25°c)</b>	<b>Degré de salinité</b>
$\leq 0,6$	<b>Sol non salé</b>
$0,6 < \text{C.E.} \leq 2$	<b>Sol peu salé</b>
$2 < \text{C.E.} \leq 2,4$	<b>Sol salé</b>
$2,4 < \text{C.E.} \leq 6$	<b>Sol très salé</b>
$> 6$	<b>Sol extrêmement salé</b>

**Tableau 03 :** Valeurs du pH en cas d'un horizon pédologique (BAIZE, 1988)

<b>Valeurs de pH</b>	<b>Signification</b>
$< 3,5$	<b>Hyper-acide</b>
3,5- 5	<b>Très acide</b>
5-6,5	<b>Acide</b>
6,5-7,5	<b>Neutre</b>
7,5-8,5	<b>Basique</b>
$> 8,5$	<b>Très basique</b>

---

**Tableau 04 : Classe du calcaire total (BAIZE, 1988)**

<b>CaCO<sub>3</sub> (%)</b>	<b>Sol</b>
<b>≤ 1</b>	<b>Non calcaire</b>
<b>1 &lt; CaCO<sub>3</sub> ≤ 5</b>	<b>Peu calcaire</b>
<b>5 &lt; CaCO<sub>3</sub> ≤ 25</b>	<b>Modérément calcaire</b>
<b>25 &lt; CaCO<sub>3</sub> ≤ 50</b>	<b>Fortement calcaire</b>
<b>50 &lt; CaCO<sub>3</sub> ≤ 80</b>	<b>Très calcaire</b>
<b>&gt; 80</b>	<b>Excessivement calcaire</b>

**Tableau 05 : Echelle d'interprétation des résultats de calcaire actif (INRA 2012).**

<b>CaCO<sub>3</sub> actif en (%)</b>	<b>Horizon</b>
<b>0 à 5</b>	<b>Faible</b>
<b>5 à 10</b>	<b>Assez faible</b>
<b>10 à 20</b>	<b>Elevé</b>
<b>&gt; 20</b>	<b>Très élevé</b>

**Annexe II : publications**

## Spatial Variability of Soil Properties in Palm Groves of the Central Algerian Sahara (Case of Zelfana)

HAMEL Imane<sup>1,a)</sup>, BENSLAMA Mohamed<sup>2</sup>, BENBRAHIM Fouzi<sup>3</sup>, KRAIMAT Mohamed<sup>4</sup>, CHIKHI Faredj<sup>1</sup>, DAREM Sabrina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Ghardaia, Faculty of Natural and Life Sciences and Earth Sciences, Department of Biology, Laboratory of Mathematics and Applied Sciences, B.P.455 Ghardaia 47000, Algeria.

<sup>2</sup>University of Badji Mokhtar, Faculty of Natural and Life Sciences, Department of Biology, Soil and Sustainable Development Research Laboratory, Annaba, P.O. Box 12, 23000 Annaba, Algeria.

<sup>3</sup>École Normale Supérieure de Ouargla, BP 398, Hai Ennasr, Ouargla 30000, Algérie.

<sup>4</sup>University of Kasdi Merbah, Faculty of Natural Sciences and Life, Department of Agronomy, Saharan Bioresources Laboratory, 1st November Avenue, Ouargla 30000, Algeria.

<sup>a)</sup> Corresponding Author: [hamel\\_imne@yahoo.com](mailto:hamel_imne@yahoo.com)

Received : 9/2/2022

Acceptance : 13/3/2022

Available online: 1/6/2022

**Abstract.** Monitoring soil quality in irrigated areas is essential for assessing the sustainability of production systems. In this respect, the spatial variability of the properties of irrigated soils is a mean to know the evolution of the latter. This study aims to determine the spatial variability of soil organic matter, salinity, pH and active limestone using a geostatistical approach. The present study was carried out in the region of Zelfana located in the Algerian central Sahara, the samples were collected from a depth of 0 to 30 cm and analysed for organic matter, salinity, pH and active limestone. The analytical results show that the soil is very poor in organic matter, very salty, alkaline to very alkaline and moderately calcareous. The geostatistical analysis revealed various patterns and levels of spatial distribution of the studied properties. The results showed a weak spatial dependence for organic matter, moderate for pH and salinity and strong for active limestone. The variographic analysis showed that the nugget effect is weak for organic matter and pH, moderate for salinity, while active limestone does not show a nugget effect. The range varies from 75 meters for salinity to 299 meters for organic matter, confirming the validity of the adopted sampling and allowing the optimization of future sampling plans. The Arcgis autoKriging function was used to select the best theoretical variogram model from those most commonly used in geostatistics (Gaussian, spherical, exponential and circular). This model was used to produce the spatial variability maps using ordinary kriging. Spatial variability of soil properties is influenced by agricultural intensification, something that must be taken into consideration for integrated and sustainable land management in similar regions.

**Keywords.** Geostatistics, Spatial variability, Organic matter, Salinity, pH, Active limestone.

### I. INTRODUCTION

Soils in arid zones have been considered for a long time as an environment that does not represent any interest from a pedological perspective, because they are raw mineral soils, very little evolved, and very poor in organic matter [1]. Similarly, the soils of the Algerian Sahara are also characterized by a predominant evaporation and a scarcity of rain [2], which directly influences their physico-chemical properties, such as rapid oxidation, accumulation of salts on the surface of the soil and a poor production of organic matter [3].

The cultivation of these soils is only possible with irrigation [4], which consists in pouring water down to the soil profile, thus increasing the yield of certain crops and prolonging the vegetation period in dry seasons [5]. The irrigation technique can cause considerable modifications to the soil properties by the introduction of important quantities of soluble salts [4,6] and thus provokes phenomena of soil degradation by alkalization, salinization and sodization [7].

Our work is a contribution to the study of the spatial variability of some physico-chemical properties of the irrigated soil in the palm grove, in the city of Zelfana (Central Algeria), a potentially date-producing area by an area of 1241,9149 ha and an annual production of 64658.48 quintals of dates [8]. This perspective takes into consideration the parameters: pH, organic matter (OM), electrical conductivity (EC) and active limestone (CaCO<sub>3</sub>) through geostatistical methods such as ordinary kriging and statistical analysis (descriptive analysis and PCA).

## II. MATERIAL AND METHODS

### • Study Area

The study has been carried out in the palm groves in the city of Zelfana (central Algeria) created in 1958 (fig.1). The experimental site covers a total area of 42 ha (latitude 32° 23' north, 4° 13' east and at an altitude of 355m).

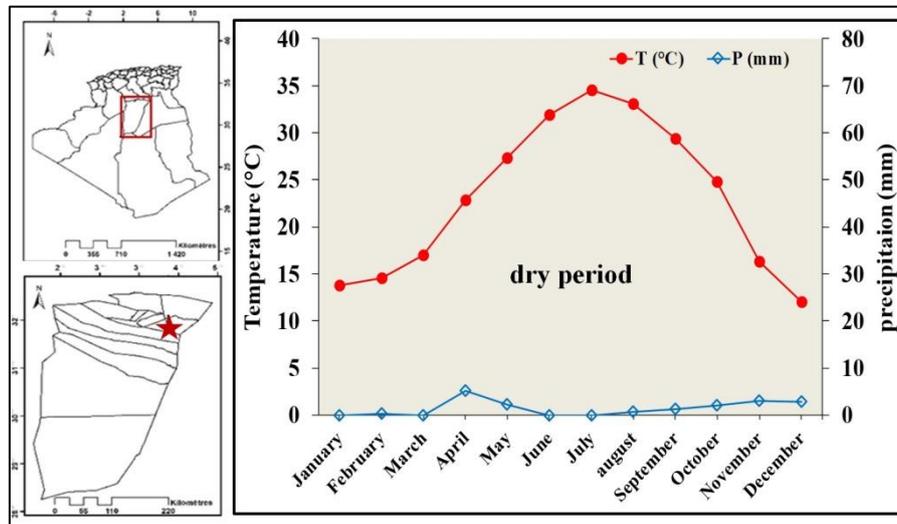


FIGURE 1. Location of the study area of Zelfana (Algeria).

The climate of the study area is typically Saharan, characterized by two seasons: a hot and dry season (from April to September) and a moderate season (from October to March) with a large difference between summer and winter temperatures and an extreme temperature that can reach to 50°C in July. Annual rainfall is low ranging from 100 to 200 mm/year [9].

The soil structure in Zelfana belongs to the domain of the Saharan platform, mostly covered by recent age formations, represented mainly by calcareous gypsum crusts and alluvial deposits [10].

It should be noted that these palm groves are irrigated by water of Albian origin, characterized by a salinity that varies from 1.65 to 2.35 dS/m at 25°C with an average of  $1.96 \pm 0.25$  dS/m at 25°C [11].

### • Soil Sampling and Analysis

Soil sampling was carried out randomly to a depth of 0-30 cm using an auger. The distribution of the sampled points is shown in Figure 2.

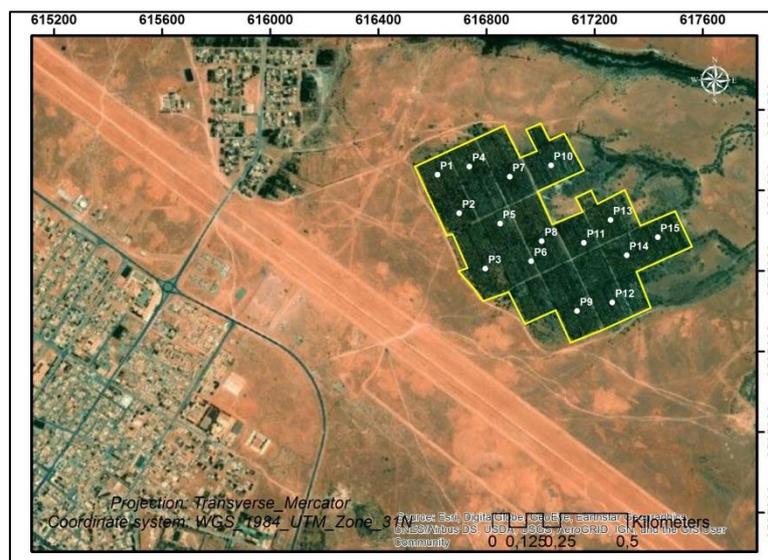


FIGURE 2. Spatial distribution of sampled points.

The samples were air-dried, then sieved with a 2mm square mesh sieve then transferred to the laboratory for the determination of organic matter content, according to the method of WALKLEY and BLACK. The electrical conductivity

and the pH were measured at a temperature of 25°C on a soil to water ratio of 1/5. The determination of active limestone is carried out according to the method of Drouineau-Galet.

• C. Statistical Analysis

The results were subjected to a descriptive analysis in which, the various descriptive parameters were calculated. The Principal Component Analysis (PCA) was also established for the quantitative variables using R software (v3.5.3).

The spatial data was interpolated according to the kriging method using the "AUTOKRIGE" function of the "AUTOMAP" package under R v3.5.3. In fact, the "AUTOKRIGE" function aims to choose the best theoretical model of a variogram among those most used in geostatistics (Gaussian, spherical, exponential and circular) [12,13]. The geostatistical models generated were subsequently run on ArcGIS v10.3 to obtain thematic variability maps for each parameter studied. The coefficient of variation (intensity of variability) is interpreted according to the scale of Nolin et al. (1997): CV (%) =  $100 \cdot \sigma / m$ , including: CV < 15% low, 15% < CV < 35% moderate, 35% < CV < 50% high, 50% < CV < 100 very high.

### III. RESULTS AND DISCUSSIONS

The results related to the study of soil parameters in the palm grove of Zelfana are summarized in the following table.

TABLE 1. The values of the physico-chemical properties of the soil of the palm grove of Zelfana (Algerian center).

Parameters	Maximum	Minimum	mean	standard deviation	CV %
OM (%)	0.45	0.13	0.23	0.09	43.54
pH	8.62	8.07	8.27	0.15	1.88
EC (dS/m)	2.61	0.92	2.02	0.42	20.66
active (CaCO <sub>3</sub> )	9.71	3.5	6.59	1.8	27.66

Table 1, shows that the studied soil has an organic matter content between 0.13 and 0.45 % with an average of 0.23±0.09 %, which reflects a poverty of this soil in organic matter. The pH value is high in the order of 8.27±0.15, indicating a very alkaline reaction of the studied soil. While, electrical conductivity (EC) presents a maximum of 2.61 dS/m which classifies the studied soil as salty to very salty. The average value of active limestone is 6.59 ± 1.8 % indicates that the Zelfana palm grove has a moderately calcareous soil.

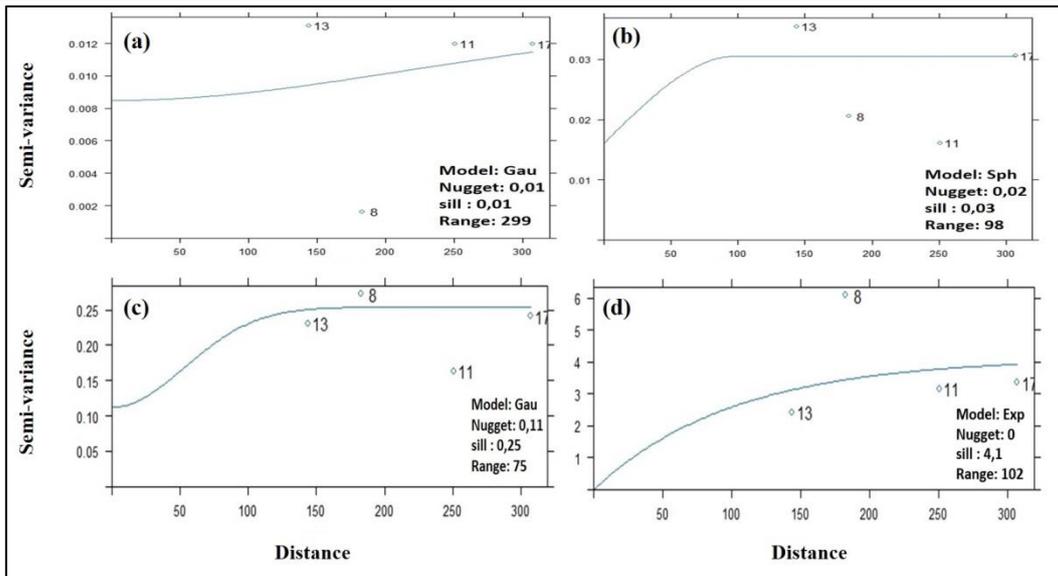
The coefficient of variation for the parameters studied shows little spatial variation in organic matter (43.54%), electrical conductivity (20.66%) and active limestone (27.37%). However, the pH values seem homogeneous (1.88%).

In order to analyze the spatial dependence of these parameters, we used the Variogram tool with the "AUTOKRIGE" function for a better choice of the theoretical model. The obtained results are detailed in the table 2 and graphically represented by figure 3.

TABLE 2. Best-fit variogram models.

	Best-Fit Model	Nugget (C0)	Sill (C0+C)	Range (m)	Ratio %
OM	Gaussian	0.01	0.01	299	> 75 % (Low)
pH	spherical	0.02	0.03	98	25-75 % (Moderate)
EC	Gaussian	0.11	0.25	75	25-75 % (Moderate)
Active CaCO <sub>3</sub>	Exponential	0	4.1	102	< 25 % (High)

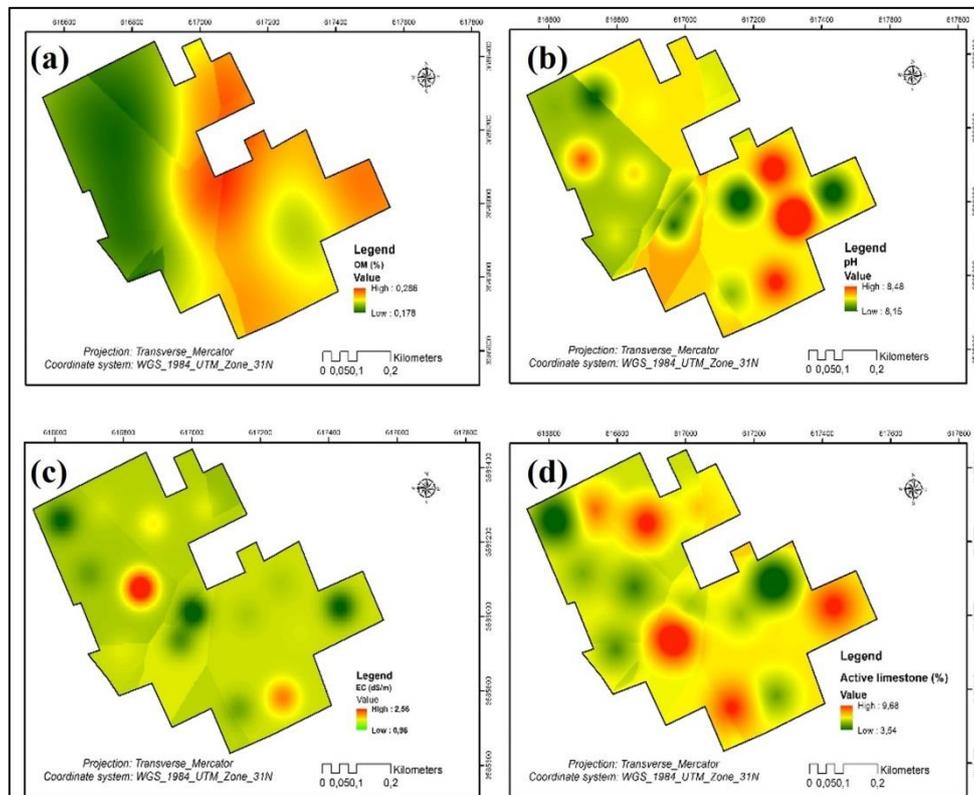
The autoKrige function showed that the most reliable model to represent the organic matter and electrical conductivity data is the Gaussian model. The spherical model is the most reliable model for pH and the exponential model for active limestone.



**FIGURE 3.** Experimental variograms of the studied parameters, (a) Organic matter, (b) pH (spherical), (c) electrical conductivity (Gaussian), (d) active limestone (exponential).

According to Figure 3, the variogram representing organic matter has a step of 0.01 and a range of 299 m, of which, the nugget effect is in the order of 0.01. That of EC (step of 0.25, a range of 75 m) has a nugget effect equal to 0.11. The representation of pH revealed a step of 0.03 and a range of 98 m with a nugget effect of 0.02. Whereas, the active limestone variogram has a step of 4.1, a range of 102 m and does not show a nugget effect.

Based on the best variogram models obtained, the spatial variation maps of different studied parameters are presented in Figure 4.

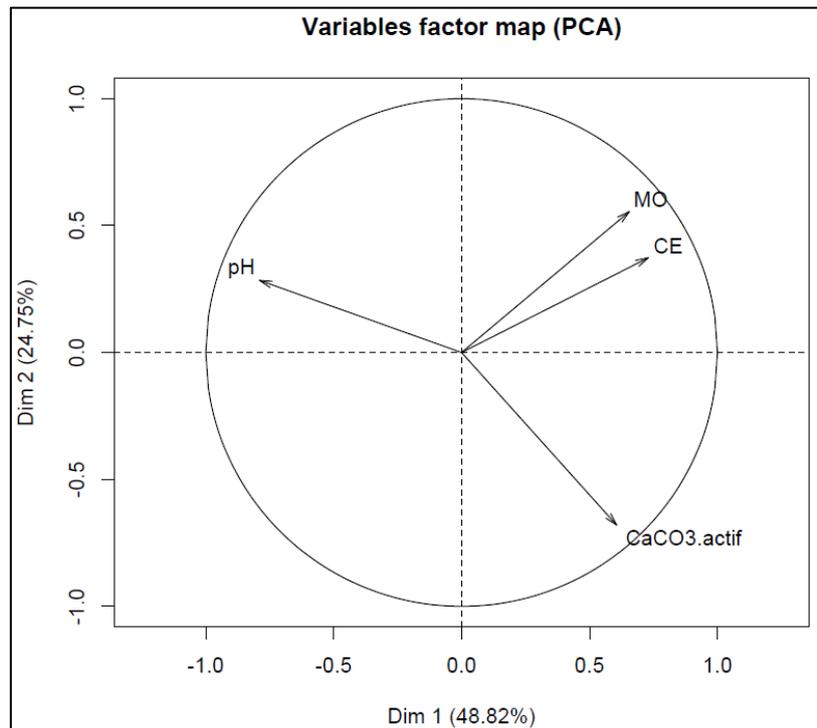


**FIGURE 4.** Map of spatial variability of the studied parameters, (a) organic matter, (b) pH, (c) electrical conductivity, (d) active limestone.

Figure 4, shows a high variation of organic matter in the studied plot with a coefficient of variation of 43.54%. A moderate variation is observed for electrical conductivity and active limestone with a coefficient of 20.66% and 27.37%

respectively. For pH, the coefficient of variation of about 1.88% shows a low variation.

Principal component analysis (PCA) is applied to check for possible correlations between the studied soil parameters. The results obtained are summarized in Figure 5.



**FIGURE 5.** Principal component analysis (PCA) between the soil parameters studied.

According to figure 5, the contribution rate of axis 1 is 48.82%, that of axis 2 is 24,75, reflecting a good representation of the variables studied on the factorial plan with 73.57% of total inertia.

Axis 1 represents a positive correlation between the parameters MO, EC and negative with pH. Axis 2 shows a negative correlation of the pH factor with the active limestone factor. In general, we found that the two parameters MO and EC are negatively correlated with the other two parameters (pH and active  $\text{CaCO}_3$ ).

#### IV. DISCUSSION

Soil analyses of the palm grove of Zelfana (Central Algeria) revealed that the soil is very poor in organic matter with an average content of  $0.23 \pm 0.09\%$ . Several authors have reported that the Algerian Sahara soils are known to be, as a whole, poor in organic matter which is often less than 0.1% [14,15,6,16].

This poverty in OM can be justified, on one hand, by the extreme climatic conditions of the Saharan regions, in particular temperature and rainfall [17,18]. On the other hand, agricultural intensification including irrigation can be considered as an incubator of optimal conditions (humidity and temperature) for the degradation of soil organic matter in Mediterranean regions [19,20].

The results of soil pH analysis in the study area show that the soil is alkaline to very alkaline with an average pH value of about  $8.27 \pm 0.15$ . The values recorded are within the range for soils in arid regions, from a pH slightly below 7 to a pH of around 9 [21-24,6, 25,4,26]. Inside the soil, when roots take up mineral elements in the state of anions, such as nitrate  $\text{NO}^{-3}$  they releases  $\text{OH}^{-}$  which induces an alkalization of the soil [27].

The soil of the palm grove in Zelfana is salty to very salty with an average electrical conductivity of  $2.02 \pm 0.42$  dS/m. The salts accumulated in the soil come mainly from irrigation water, knowing that the salinity of the latter varies from 1.65 to 2.35 dS/m at  $25^\circ\text{C}$  in the region of Zelfana [11]. These waters belong to class C3, characterized by a high salinity. They are unusable even with good drainage [21]. These results are similar to those obtained by [28]. The accumulation of salts in the Saharan areas is due to the scarcity of rainfall that does not penetrate deeply into the soil to cause appreciable infiltration [16]. The rise of salts to the surface and soil desiccation are due to high evaporation rates [29].

The results show that the soil is moderately calcareous. The active limestone content of the study area varies from 3.5 to 9.71%. This moderate fraction may be the result of leaching of limestone from the surface horizon to the horizon down below

following irrigation, which highlights a decarbonation gradient [30-33,21,34,35]. Since active limestone dissolves rapidly in soil solutions [36], the accumulation of limestone in the soil (limestone profile) becomes higher in depth [37,38].

The results of the multiple correlation study showed no significant correlation between the different parameters studied ( $P > 0.05$ ). Nevertheless, the most important positive correlation was noted between organic matter (OM) and electrical conductivity (EC) ( $R=0.43$ ). The electrical conductivity increases with the contribution of organic matter, the organic matter increased the salinity of the soil through the mineralization of these organic compounds [39].

Other negative correlations were similarly recorded between pH and active limestone ( $R=-0.45$ ), on one hand, and between pH and electrical conductivity on the other ( $R=-0.3751$ ). The pH increases when the calcium concentration in the solution decreases [40]. The decrease in pH is related to the presence of limestone in the soil [41]. For the electrical conductivity, this result is close to the work of [42], the study of the relationship between pH and EC shows a negative correlation.

The variographic analysis revealed a low nugget effect, which means that the variation of organic matter, pH and salinity at distances less than the sampling step (150 m), the nugget effect of active limestone is (0) which signified the reliability of sampling step. Indeed, the nugget effect can be defined as an indicator of continuity at close distances [43]. A significant nugget effect requires additional sampling of properties at smaller distances in order to detect spatial dependence [44].

Spatial dependence is determined by the ratio between the nugget and the bearing and is expressed as a percentage [45]. The spatial dependence of organic matter is low with a value of 100%, salinity and pH are moderately spatially dependent, the nugget to step ratio values are 44% and 66.67% respectively. Active limestone is in the class ( $<25\%$ ), which is consistent with strong spatial dependence (Table 2).

After selecting the best performing variogram models, spatial variability maps were made by ordinary kriging. These maps show that the highest values are recorded as follows: organic matter in the east of the study area, pH in the southeast, salinity in the west and active limestone in the northeast.

## CONCLUSION

The study of spatial variability of soil properties in the Zelfana palm grove (central Algerian Sahara) was carried out by random sampling of fifteen (15) profiles. The results obtained revealed that the studied soil is very poor in organic matter and alkaline to very alkaline. We also recorded that the soil is very salty and moderately calcareous.

The study of multiple correlations showed no significant correlation between the different parameters studied ( $P > 0.05$ ). Nevertheless, the most important positive correlation was noted between OM and EC and other negative correlations were similarly recorded between pH and active  $\text{CaCO}_3$ . The spatial variation of organic matter is high with a CV of 43.54%, moderate for electrical conductivity and active limestone with a CV of 20.66% and 27.37% respectively. While that of pH is low with a CV of 1.88%. The most reliable variogram models of the studied parameters are the Gaussian model for organic matter and electrical conductivity, the spherical model for pH and the exponential model for active limestone. Organic matter is weakly space dependent, salinity and pH are moderately space dependent, and active limestone has strong space dependence. The study on spatial variability is interesting for a good understanding of the current situation of agricultural soils in order to better manage, maintain and improve their productivity.

## REFERENCES

- [1] Aubert, G.1960. Les sols de la zone aride. Colloque général sur les problèmes de la zone aride. Paris, p.4.
- [2] Hamdi, A.B. 2001. Le fonctionnement actuel et passé de sol du sud Sahara (cuvette d'Ouargla) approche micro morphologique, géochimique, minéralogique et organisation spatiale. Thèse doctorat. I.N.A Paris Grignon. 281 p.
- [3] OMM. 2005. Le climat et la dégradation des sols. Organisation météorologique mondiale, pp. 10-20.
- [4] 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, 111p.
- [5] Frenken K. 1997. Irrigation potential in Africa : A basin approach (Vol. 4). Food & Agriculture Org.
- [6] Daoud, Y., Halitim, A. 1994. Irrigation et salinisation au Sahara Algérien. Sécheresse 5(3), pp. 151-160.
- [7] Cheverry, C.L., Robert, M. 1998. La dégradation des sols irrigués et ressource en eau : une menace pour l'avenir de l'agriculture et pour l'environnement des pays au sud de la méditerranée. Etude et gestion des sols 5(4), pp. 217-226.
- [8] DSA. 2021. Direction des services agricoles. Rapport des cultures en wilaya.
- [9] O.N.M. 2020. Données climatiques de la région de Ghardaïa. Ed. Office National de la Météorologie, Ghardaïa.
- [10] D.P.A.T. 2005. Atlas de la Wilaya de Ghardaïa. Ed. El Alamia - 142 P.
- [11] Ouali, S., Mehmah, B., Malek, A. 2007. Etude de faisabilité d'utilisation des eaux thermales de Zelfana Dans la Production d'Hydrogène. Centre de Développement des Energies Renouvelables. Algérie.
- [12] 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.

- [13] Dauphine, A., Voiron-cancio, C. 1988. Variogrammes et structures spatiales. Collection Reclus Modes d'Emploi n°12. Edition Montpellier: Gip Reclus, 56p.
- [14] Durant, J. H. 1954. Les sols d'Algérie. S.E.S. Alger, 244 p.
- [15] Dutil, P. 1971. Contribution à l'étude des sols et des paléosols du Sahara. Thèse. Doctorat. Univ, Strasbourg. 346 p.
- [16] Halilat, M. T. 1998. Etude expérimentale de sable additionné d'argile. Comportement physique et organisation en conditions salines et sodiques (Doctoral dissertation, Institut National Agronomique Paris Grignon).
- [17] Citeau, L., Bispo, A., King, D. 2008. Gestion durable des sols. Ed Quae, France, 320 p.
- [18] Soco. 2009. Réduction du taux de matière organique, l'agriculture durable et la conservation des sols : Processus de dégradation des sols, N°: 3, 4 p.
- [19] Laurence, W. 1998. Dynamique et biomasse des fragments de la forêt amazonienne. Actualités des Forêts tropicales, Bulletin de l'OIBT, 6 : pp 12-13.
- [20] Badraoui, M., Agbani, M., Soudi, B. 2000. Evolution de la qualité des sols sous mise en valeur intensive au Maroc. Séminaire 'Intensification agricole et qualité des sols et des eaux', Rabat, Maroc, 6-7.
- [21] Durand, J.H. 1958. Les sols irrigables : Etude pédologique. Edition Imbert. Alger, 190 p.
- [22] Buckman, H.O., Brady, N.C. 1965. The nature and properties of soils. The Macmillan Company. New York, U.S.A, 653 p.
- [23] Halitim, A. 1988. Sols des régions arides d'Algérie. Edition O.P.U. Alger, 384 p.
- [24] 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, 46 p.
- [25] Djili, K., Daoud, Y., Gaouar, A., Beldjoudi, 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.
- [26] 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.
- [27] Perry, R. S., Adams, J. B. 1978. Desert varnish: evidence for cyclic deposition of manganese. Nature, 276(5687), 489-491.
- [28] Dekhinat, S., Bensaid, 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, Sciences de la terre, 9-14.
- [29] Meddich, A., Hafidi, M., El Mokhtar, M. A., Boumezzough, A. 2015. Characterization of physicochemical parameters and mycorrhizal potential of salt soils of North-east date palm grove of Marrakesh [Caractérisation des paramètres physicochimiques et des potentialités mycorrhizogènes des sols salés de la palmeraie Nord-est de Marrakech]. Journal of Materials and Environmental Science, 6(9), 2469-75.
- [30] Baize, D. 2000. Guide des analyses courantes en pédologie, 2ème édition revue et augmentée. I.N.R.A. Paris, 257p.
- [31] Djili, K., Daoud, Y., Ayache, N. 1999. Analyse de la distribution verticale et spatiale du calcaire dans les sols de l'Algérie septentrionale. Etude et gestion des sols, 6(3), 201-213.
- [32] Djili, K., Daoud, Y. 1999. Distribution latérale et verticale de l'ESP des sols du Nord de l'Algérie compte rendu du séminaire national sur la salinisation des terres agricoles. CRSTRA. Chélif. Le 01 02 juin, n° 99, pp : 25- 44.
- [33] Duchaufour, P. 1977. Pédologie. Pédogénèse et classification. Tome I, Ed. Masson. Paris, 477p.
- [34] Durand, J.H. 1983. Les sols irrigables. Etude pédologique. Ed. Imprimerie Boudin. Paris, 339 p.
- [35] Pouget, M. 1980. Les sols à croûtes calcaires dans les steppes algériennes. Quelques aspects morphologiques et esquisse d'une évolution actuelle. Cah. ; ORSTOM Sec. Pedol. 18,3,4, 235-236 p.
- [36] INRA. 2012. Rapport sur l'étude du sol de la région d'Aigrefeuille-sur-Maine (Loire-Atlantique) à partir de la base de données des analyses de terre. INRA. France, 5 p.
- [37] El Idrissi Raghni, M. 1992. Différenciations des sols du plateau de meknes. Relations avec le modèle et le substrat calcaire (Doctoral dissertation, Paris 6).
- [38] Ruellan, A. 1973. Morphologie et répartition des sols calcaires dans des régions méditerranéennes et désertiques. soils bulletin n°21, rapport of the FAO UNDP régional science ou réclamation and ravagèrent of calcareuse soils. Cairo. Egypte, pp 272-300.
- [39] Koull, N., Halilat, M. T. 2016. Effets de la matière organique sur les propriétés physiques et chimiques des sols sableux de la région d'Ouargla (Algérie). Etude et Gestion des sols, 23, 9-23.
- [40] Brady, N. C., Weil, R. R. 1990. The Nature and Properties of Soils, Macmillan Publishing Company. New york.
- [41] Benbrahim, F. 2018. Variabilité spatiale de la qualité du sol dans les agrosystèmes du sahara algérien. Thèse de doctorat. Université badji mokhtar-annaba, 140p.
- [42] Koull, N. 2007. Effets de la matière organique sur les propriétés physiques et chimiques des sols sableux de la région de Ouargla (Doctoral dissertation, Ouargla, Université de Kasdi Merbah. Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur), 100 p.
- [43] Al-omran, A.M., Al-wabel, M.I., El-maghraby, S.E., Nadeem, M.E., Alsharani, 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.
- [44] Arslan, H., Güler, M., Cemek, B. 2013. Spatial estimation of the risky areas for drainage and salinity in suluova plain, turkey using geostatistical methods. Fresenius Environ Bull, 22(10), 2916-2924.
- [45] 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.

## Evaluation soil changes under agricultural management and irrigation in an arid region: the case of Ghardaïa (Zelfana)

Faredj Chikhi<sup>1,\*</sup>, Mohamed Benslama<sup>2</sup>, Fouzi Benbrahim<sup>3</sup>, Abderraouf Benslama<sup>1,4</sup>, Sabine Darem<sup>2</sup>, Imane Hamel<sup>1</sup> and Jose Navarro-Pedreño<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de mathématiques et sciences appliquée, Université de Ghardaïa, BP 455 Ghardaïa 47000, Algeria

<sup>2</sup>Laboratory of Soils and Sustainable Development, Badji Mokhtar University-Annaba, P.O.Box 12 Annaba, Algeria

<sup>3</sup>Ecole normale supérieure de Ouargla, BP 398, Haç Ennasr, Ouargla 30000, Algeria

<sup>4</sup>Department of Agrochemistry and Environment, University Miguel Hernández of Elche, 03202-Elche, Alicante, Spain

(Received 5 November, 2021; accepted 27 December, 2021)

### ABSTRACT

The sustainability of soils is a major concern as they provide multiple functions such as agricultural production, water filtration and biotope for living organisms. Crop sustainability in an arid environment requires the study of the components of this environment. Our work carried out in the region of Zelfana (Sahara Desert), 60 km far from the capital of Ghardaïa province, aims to diagnose and characterize the soil changes produced due to the cultivation of palm trees. For this purpose, systematic sampling was carried out and soil data measured on plots cultivated for 60 years, comparing with those of an uncultivated area (control). The undisturbed soils have coarse textured, low organic matter content, are moderately to highly calcareous, and present low to high salinity and alkaline. The results of the cultivated topsoil and the annual rate of change showed that there was a highly significant decrease in total limestone and pH, and a highly significant increase in electrical conductivity and organic matter due to the cropping system. These changes are justified by the effect of the years of cultivation and the farmers' management (i.e. addition of organic manure and the flood irrigation).

*Key words:* Irrigation, Palm tree, Sahara Desert, Salinity, Soil organic matter

## Evaluation de la durabilité de la céréaliculture sous pivot par l'étude de la salinisation du sol dans la région d'Ouargla

Benbrahim Fouzi<sup>(1,2)</sup>, Benslama Mohamed<sup>1</sup>, Kemassi Abdellah<sup>2,3</sup>, Darem Sabrina<sup>(1,2)</sup>, Hamel Imen<sup>(1,2)</sup>, Chikhi Faradj<sup>(1,2)</sup>, and Halilat Mohamed Tahar<sup>(4,5)</sup>

- 1- Département de biologie Université Baji-Mokhtar- Annaba. Algérie.
- 2- Département de biologie Université de Ghardaïa, BP 455 Ghardaïa 47000 Algérie 3- Laboratoire de Protection des Ecosystèmes en Zones Arides et Semi-arides. Université Kasdi Merbah, Ouargla, BP 511 Ouargla 3000 Algérie.
- 4- Laboratoire de bio-ressources sahariennes : Préservation et Valorisation, Université Kasdi Merbah, Ouargla, BP 511 Ouargla 3000 Algérie.
- 5- Département de biologie université de M'sila Algérie

### Résumé-

La céréaliculture sous pivot dans les régions sahariennes est confrontée à plusieurs contraintes qui s'opposent à son développement. Ce travail réalisé dans la région de Hassi Ben Abdellah (Ouargla), s'inscrit dans le domaine des contraintes techniques et porte sur un facteur limitant de développement de la céréaliculture dans les régions arides. Ce facteur est la salinité du sol qui a été suspectée responsable des chutes des rendements et jugée comme critère d'évaluation de la mise en valeur agricole dans ces régions. Les résultats analytiques montrent que le sol est d'une texture grossière avec un faible taux de matière organique et d'azote et une faible capacité d'échange cationique. Le sol est modérément calcaire, non salé à faiblement salé, alcalin et non sodique. Les eaux d'irrigation appartiennent à la classe C4S2, caractérisée par un degré de salinisation élevé et un danger d'alcalinisation appréciable. L'analyse couplée de la variance et du taux de variation annuelle des paramètres étudiés a montré une augmentation très hautement significative de la salinité en fonction du nombre de campagne agricole donc de la quantité d'eau appliquée. Avec une intensité de salinisation plus prononcée dans l'horizon de sub-surface. L'évaluation de la durabilité de la céréaliculture sous pivot a montré que d'ici 48 à 70 ans, le site n'aura plus l'aptitude à produire des céréales à cause de la salinisation. Cette variation est en fonction de l'espèce, de l'état actuelle de la salinité et du taux d'évolution annuelle de cette dernière. Elle est relative et conditionnée par plusieurs facteurs, essentiellement l'itinéraire technique, les facteurs édapho-climatiques et économiques.

**Mots clés :** Régions sahariennes, céréaliculture, eau, sol, salinité, durabilité.