

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار-عنابة

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE CHIMIE

## MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Magister* en *Chimie Analytique*

### Thème

***Pollution de l'environnement aquatique  
cas de la région d'El Hadjar***

Option:

***Chimie de l'Environnement***

**Présenté par : CHINI Zine Labidine**

***Ingénieur en Chimie***

**Devant le jury:**

<b>Président :</b>	M <sup>m<sup>c</sup></sup> . S. ALI MOKHNACHE	Professeur	U. B. M. Annaba.
<b>Rapporteur :</b>	M <sup>m<sup>c</sup></sup> . N. FERTIKH	M. C	U. B. M. Annaba.
<b>Examineur :</b>	M <sup>r</sup> . D. MESSADI	Professeur	U. B. M. Annaba.
<b>Invité :</b>	M <sup>r</sup> . N. ZENATI	C. C	C.U. Souk Ahras.

**Année 2009**

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار-عناية

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE CHIMIE

## MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Magistère en Chimie Analytique*

### Thème

***Pollution de l'environnement aquatique  
cas de la région d'El Hadjar***

Option:

***Chimie Analytique***

Présenté par : CHINI Zine Labidine

***Ingénieur en Chimie***

Année 2009



# Dédicaces

*Je dédie ce travail à*

*mes très chers parents;*

*mes grands parents;*

*mes sœurs et frères;*

*ma chère femme Mouna*

*et tout mes amis.*



*CHINI Zine Labidine*

# Remerciements

*Ce mémoire n'aurait pas vu le jour sans la confiance, la patience et la générosité du responsable de la P.G. Monsieur*

*le Professeur D. MESSADI que je remercie vivement.*

*Je voudrais aussi le remercier pour le temps et la patience qu'il m'a accordés tout au long de ces années et pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

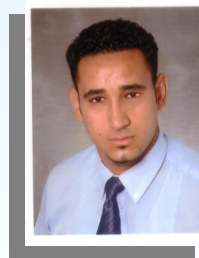
*Je tiens également à remercier :*

*Mme FERTIKH Nadia, pour la direction de ce travail ;*

*Mme ALI MOKHNACH Salima, pour avoir accepté la présidence de ce jury ;*

*Mr ZENATI Nour-eddine, pour avoir accepté l'invitation.*

*Enfin, je ne saurais oublier mes camarades de laboratoire et également tous ceux qui par leur présence ou par leur aide m'ont permis de mener à bien ce travail.*



*CHINI Zine Labidine*

## **Résumé :**

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer de quelle façon la vulnérabilité intrinsèque permet de prévoir le transfert d'un contaminant provenant de la surface du sol vers l'eau souterraine. Cette évaluation se base sur dix (10) critères inhérents aux caractéristiques du sol des zones non saturée et saturée.

L'utilisation de la géostatistique (logiciel ISATIS) a permis d'analyser la structure et la variabilité spatiale du coefficient de vulnérabilité intrinsèque. Ce dernier est obtenu par l'addition des notations de chacun de ces dix (10) critères.

Une application faite à la nappe superficielle de la plaine Ouest d'El Hadjar; plaine à vocation essentiellement agricole (7980 ha) et entourée par des sources de pollution naturelle « eau saline du lac Fetzara » et anthropiques « industries, décharge, eaux usées,... » ; donne une carte de vulnérabilité que ce distingue par trois types de sensibilités différentes, et pour la totalité de la plaine caractérisé par une sensibilité assez forte et forte.

## **Mots clés :**

Vulnérabilité intrinsèque, nappe, sol, pollution. Géostatistique.

## **Abstract:**

The principal objective of this study is to assess the intrinsic vulnerability that allows for the transfer of a contaminant from the surface to the groundwater. This assessment is based on ten (10) criteria for the characteristics of the soil, unsaturated zone and saturated.

The use of geostatistics (software ISATIS) analyzed the structure and spatial variability of the coefficient of intrinsic vulnerability. The latter is obtained by the summation of ratings of each of these ten (10) criteria.

An application was made to the surface water of the west plain of El Hadjar; plains primarily agricultural (7980 ha) and surrounded by natural polluted sources "saltwater lake Fetzara" and human "industries, landfills, sewage, ... " provides a map of vulnerability characterized by three types of different sensibility, and for all of plain characterized almost by high enough and high sensibility.

## **Key words:**

Intrinsic vulnerability, water, soil, pollution. Geostatistics.

### ملخص:

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تقييم الضعف الجوهري الذي يتيح نقل الملوثات من السطح إلى المياه الجوفية. هذا التقييم يستند إلى عشر (10) معايير لخصائص التربة، والمناطق الغير المشبعة والمشبعة. استخدام الإحصاءات الجيولوجية (برمجية ISATIS) التي تسمح لنا بالتحليل والتباين المكاني للمعامل الضعف الجوهري. هذا الأخير تم الحصول عليه بواسطة جمع درجات كل هذه العشر (10) معايير.

دراسة الحوض المائي السطحي للسهل الغربي للحجار؛ والتي هي من السهول الزراعية في المقام الأول (7980 هكتار) وتحيط بها مصادر تلوث طبيعية "البحيرة المالحة فنزارة" و البشرية "الصناعات، مقالب القمامة و الصرف الصحي ، ... " وتعطى لنا خريطة الضعف الجوهري التي تتسم بثلاثة أنواع مختلفة من الحساسية. درجتي حساسية شبه عالية إلى عالية على مستوى أغلبية سطح السهل.

### الكلمات الرئيسية:

الضعف الجوهري، حوض مائي، التربة، التلوث و الإحصاءات الجيولوجيا.

## **Symboles et abréviations**

<b>C(h)</b>	Fonction de covariance.
<b>D</b>	Domaine d'étude.
<b>EAS</b>	Echantillonnage simple.
<b>h</b>	Vecteur reliant deux points dans D.
<b>m, <math>\mu</math> et E</b>	Moyenne ou espérance.
<b>N</b>	Points dans D.
<b>N(h)</b>	Nombre de paires dont les points sont espacés de h.
<b>N(h,<math>\theta</math>)</b>	Nombre de paires séparées de h dans la direction $\theta$ .
<b><math>R^2</math></b>	Domaine de définition des nombres réels
<b>x</b>	Vecteur de coordonnées spatiales.
<b><math>x_0</math></b>	Point arbitraire dans le domaine D.
<b><math>\gamma_e(\mathbf{h})</math>, <math>\gamma^*(\mathbf{h})</math> et <math>\hat{\gamma}(\mathbf{h})</math></b>	Variogramme estimer.
<b><math>\gamma(\mathbf{h})</math></b>	Variogramme.
<b>z</b>	Valeur de la quantité d'intérêt.
<b>Z</b>	Variables aléatoires.
<b>Z(<math>\mathbf{x}_a</math>)</b>	Variables aléatoires.
<b>Z(x)</b>	Fonction aléatoire.
<b>z(x)</b>	Fonction dans un domaine D.
<b><math>\hat{z}(x_0)</math></b>	Valeur prédie.
<b>Z(x + h)–Z(x)</b>	Variance des incréments.
<b><math>\mathcal{N}</math></b>	Voisinage de Krigeage.
<b><math>\hat{\mu}</math></b>	La moyenne estimer.
<b><math>\sigma_{KM}^2</math></b>	Variance d'estimation minimale.

## Liste des figures

<b>Figures</b>	<b>Titre de figure</b>	<b>Page</b>
<b>01</b>	L'ajustement d'un Variogramme Expérimental	<b>04</b>
<b>02</b>	Types de modèles théoriques	<b>06</b>
<b>02</b>	(Suite) Types de modèles théoriques	<b>07</b>
<b>03</b>	Exemple (2D) Anisotropie géométrique de rapport $a/b$ et d'angle $\theta$	<b>09</b>
<b>04</b>	Exemple (3D) Anisotropie zonale pure de directions verticales	<b>10</b>
<b>05</b>	Voisinage elliptique, divisé en octants	<b>16</b>
<b>06</b>	Estimation par Krigeage simple	<b>21</b>
<b>07</b>	Estimation par Krigeage ordinaire	<b>26</b>
<b>08</b>	Echantillonnage aléatoire simple	<b>32</b>
<b>09</b>	Variogrammes Expérimentaux des données des variables la plaine Ouest d'El Hadjar	<b>34</b>
<b>09</b>	(Suite) Variogrammes Expérimentaux des données des variables la plaine Ouest d'El Hadjar	<b>35</b>
<b>10</b>	Ajustement des Variogrammes Expérimentaux par des modèles théorique des données des variables de la plaine ouest d'El Hadjar	<b>37</b>
<b>10</b>	(Suite) Ajustement des Variogrammes Expérimentaux par des modèles théorique des données des variables de la plaine Ouest d'El Hadjar	<b>38</b>
<b>11</b>	Situation géographique et géologique des plaines de la région de Annaba-Bouteldja	<b>43</b>
<b>12</b>	Carte administrative de la plaine d'Annaba	<b>44</b>
<b>13</b>	Estimation du taux en argile par la méthode de Krigeage de la plaine Ouest d'El Hadjar	<b>48</b>
<b>14</b>	Estimation du pourcentage en limon (gros et fin) par la méthode de Krigeage de la plaine Ouest d'El Hadjar	<b>50</b>
<b>15</b>	Estimation du pourcentage en sable (gros et fin) par la méthode de Krigeage de la plaine Ouest d'El Hadjar	<b>52</b>
<b>16</b>	Estimation de perméabilité par la méthode de Krigeage de la plaine Ouest d'El Hadjar	<b>54</b>

<b>17</b>	Histogrammes des précipitations moyennes mensuelles (1977-2007)	<b>56</b>
<b>18</b>	La courbe des températures moyennes mensuelles (1977-2007)	<b>58</b>
<b>19</b>	Estimation de RFU par la méthode de Krigeage de la plaine Ouest d'El Hadjar	<b>61</b>
<b>20</b>	Représentations graphiques des bilans hydriques de Thornthwaite pour les trois stations de la plaine Ouest d'El Hadjar	<b>64</b>
<b>21</b>	Carte piézométrique	<b>68</b>
<b>22</b>	Estimation de profondeur par la méthode de Krigeage de la plaine Ouest d'El Hadjar	<b>70</b>
<b>23</b>	Estimation du coef. de vulnérabilité par la méthode de Krigeage de la plaine Ouest d'El Hadjar	<b>72</b>
<b>24</b>	Estimation des métaux lourds par la méthode de Krigeage de la plaine Ouest d'El Hadjar	<b>74</b>
<b>25</b>	Les 4 testes graphiques de la validation croisée pour le pourcentage en Argile	<b>77</b>
<b>26</b>	Les 4 testes graphiques de la validation croisée pour le pourcentage en Gros Limon	<b>78</b>
<b>27</b>	Les 4 testes graphiques de la validation croisée pour le pourcentage en Limon Fin	<b>79</b>
<b>28</b>	Les 4 testes graphiques de la validation croisée pour le pourcentage en Gros Sable	<b>80</b>
<b>29</b>	Les 4 testes graphiques de la validation croisée pour le pourcentage en Sable Fin	<b>81</b>
<b>30</b>	Les 4 testes graphiques de la validation croisée pour la profondeur	<b>82</b>
<b>31</b>	Les 4 testes graphiques de la validation croisée pour la perméabilité en $m/s 10^{-5}$	<b>83</b>
<b>32</b>	Les 4 testes graphiques de la validation croisée pour la RFU en mm	<b>84</b>
<b>33</b>	Les 4 testes graphiques de la validation croisée pour le coef. de vulnérabilité	<b>85</b>
<b>34</b>	Les 4 testes graphiques de la validation croisée pour la concentration du Fe en mg/l	<b>86</b>
<b>35</b>	Les 4 testes graphiques de la validation croisée pour la concentration du Mn en mg/l	<b>87</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableaux</b>	<b>Titre des tableaux</b>	<b>Page</b>
<b>01</b>	Statistiques monovariabiles des données de la région	<b>33</b>
<b>02</b>	Les valeurs de stabilisation du variogrammes expérimentaux des données des variables de la plaine ouest d'El Hadjar	<b>36</b>
<b>03</b>	Paramètres des variogrammes expérimentaux des données des variables de la plaine Ouest d'El Hadjar	<b>37</b>
<b>04</b>	Statistiques des Validations Croisée basées sur les données robustes des variables de la plaine Ouest d'El Hadjar	<b>39</b>
<b>05</b>	Bilans hydriques d'après la méthode de THORNTHWAITE pour les trois stations de la plaine Ouest d'El Hadjar	<b>41</b>
<b>06</b>	Résultats des ruissellements calculés par la méthode de TIXERON. BERKALOFF et ROMANTCHOUK	<b>65</b>
<b>07</b>	Résultats de l'infiltration pour les différentes stations	<b>65</b>

# Sommaire

<u>Résumé</u>	I
<u>Abstract</u>	II
<u>ملخص</u>	III
<u>Symboles et abréviations</u>	IV
<u>Liste des figures</u>	V
<u>Liste des tableaux</u>	VII
<u>Sommaire</u>	VIII
<u>Introduction générale</u>	XIII

## PARTIE THEORIQUE

### CHAPITRE -I-

#### LE VARIOGRAMME

<u>1. INTRODUCTION</u>	
<u>2. VARIOGRAMME</u> .....	03
<u>3. ESTIMATION DU VARIOGRAMME</u> .....	05
<u>4. MODELISATION</u> .....	06
<u>4.1.Types de modèles théoriques</u> .....	06
<u>4.2.1. Effet de pépité</u> .....	06
<u>4.2.2. Sphérique</u> .....	06
<u>4.2.3. Gaussien</u> .....	07
<u>4.2.4. Exponentiel</u> .....	07
<u>4.2.5. Puissance</u> .....	07
<u>5. VARIATION ISOTROPIQUE ET ANISOTROPIQUE</u> .....	08
<u>5.1.Isotropie</u> .....	08
<u>5.2.Anisotropie</u> .....	08
<u>5.2.1. Anisotropie géométrique</u> .....	09
<u>5.2.2. Anisotropie zonale</u> .....	09
<u>6. CONCLUSION</u>	

## **CHAPITRE -II-**

### **LE KRIGEAGE**

<b><u>1. INTRODUCTION</u></b>	
<b><u>2. CHOIX DU VOISINAGE DE KRIGEAGE</u></b> .....	14
<b><u>2.1.Voisinage unique</u></b> .....	14
<b><u>2.2.Voisinage glissant</u></b> .....	14
<b><u>2.2.1. Taille du voisinage</u></b> .....	14
<b><u>2.2.2. Forme du voisinage</u></b> .....	15
<b><u>3. Méthodes d'interpolation spatiale</u></b> .....	17
<b><u>5.1.La méthode de l'inverse des distances (I.D.)</u></b> .....	17
<b><u>5.2.Les méthodes du Krigeage</u></b> .....	17
<b><u>3.2.1. Le krigeage à moyenne connue (Krigeage simple "KS")</u></b> .....	17
3.2.1.1. <i>Linéarité</i> .....	18
3.2.1.2. <i>Autorisation</i> .....	18
3.2.1.3. <i>Non-biais</i> .....	18
3.2.1.4. <i>Optimalité</i> .....	18
3.2.1.5. <i>Exemple important ; cas d'un effet de pépite pur</i> .....	21
<b><u>3.2.2. Le Krigeage à moyenne inconnue (Krigeage ordinaire "KO")</u></b> .....	22
3.2.2.1. <i>Linéarité</i> .....	22
3.2.2.2. <i>Autorisation</i> .....	23
3.2.2.3. <i>Non-biais</i> .....	23
3.2.2.4. <i>Optimalité</i> .....	23
3.2.2.5. <i>Exemple important ; cas d'un effet de pépite pur</i> .....	26
<b><u>4. Méthode statistique</u></b> .....	27
<b><u>5.3.Validation croisée</u></b> .....	27
<b><u>5. CONCLUSION</u></b>	

### **PARTIE PRATIQUE**

<b><u>I. Techniques d'échantillonnage</u></b> .....	31
<b><u>Echantillonnage aléatoire simple (EAS)</u></b> .....	31
<b><u>II.Simulation avec ISATIS</u></b> .....	32

<b><u>II.1.</u></b>	<b><u>Description des données</u></b> .....	<b>32</b>
<b><u>II.2.</u></b>	<b><u>Etude de la corrélation des données</u></b> .....	<b>33</b>
<b><u>II.3.</u></b>	<b><u>Ajustement du variogramme</u></b> .....	<b>36</b>
<b><u>II.4.</u></b>	<b><u>Validation du modèle de variogramme</u></b> .....	<b>40</b>
<b><u>II.5.</u></b>	<b><u>Krigeage</u></b> .....	<b>42</b>
<b><u>A. Etude hydrogéologique</u></b>		
<b><u>A.I.</u></b>	<b><u>APERÇU GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE</u></b> .....	<b>42</b>
	<b><u>Cadre Géomorphologique</u></b> .....	<b>45</b>
<b><u>A.II.</u></b>	<b><u>PEDOLOGIE</u></b> .....	<b>46</b>
<b><u>A.II.1.</u></b>	<b><u>Les différentes classes de sols</u></b> .....	<b>46</b>
	<b><u>A.II.1.a. Les sols peu évolués: d'origine non climatique (SPE)</u></b> .....	<b>46</b>
	<b><u>A.II.1.b. Les vertisols (SV)</u></b> .....	<b>46</b>
	<b><u>A.II.1.c. Les sols hydromorphes (SH)</u></b> .....	<b>46</b>
	<b><u>A.II.1.d. Les sols halomorphes (SHA)</u></b> .....	<b>46</b>
	<b><u>A.II.1.e. Les sols calcimagnésiques (SC)</u></b> .....	<b>46</b>
	<b><u>A.II.1.f. Sols minéraux bruts (SMB)</u></b> .....	<b>46</b>
<b><u>A.II.2.</u></b>	<b><u>Les caractéristiques physiques des sols</u></b> .....	<b>47</b>
	<b><u>A.II.2.a. La texture</u></b> .....	<b>47</b>
	<b><u>A.II.2.a.i. Argile</u></b> .....	<b>47</b>
	<b><u>A.II.2.a.ii. Limon</u></b> .....	<b>49</b>
	<b><u>A.II.2.a.iii. Sable</u></b> .....	<b>51</b>
	<b><u>A.II.2.b. La perméabilité K (m/s)</u></b> .....	<b>53</b>
<b><u>A.III.</u></b>	<b><u>HYDROCLIMATOLOGIE</u></b> .....	<b>55</b>
<b><u>A.III.1.</u></b>	<b><u>Etude des éléments essentiels du climat</u></b> .....	<b>55</b>
	<b><u>A.III.1.a. Les précipitations</u></b> .....	<b>55</b>
	<b><u>A.III.1.b. Température</u></b> .....	<b>57</b>
<b><u>A.III.2.</u></b>	<b><u>Le Bilan hydrique</u></b> .....	<b>59</b>
	<b><u>A.III.2.a. L'évapotranspiration</u></b> .....	<b>59</b>
	<b><u>A.III.2.a.i. Evapotranspiration potentielle: "formule de THORNTHWAITE "</u></b> .....	<b>59</b>
	<b><u>A.III.2.a.ii. Evapotranspiration réelle par la méthode de C. W. THORNTHWAITE</u></b> .....	<b>59</b>
	<b><u>A.III.2.b. Calcul de la réserve facilement utilisable (RFU)</u></b> .....	<b>60</b>

<u>A.III.2.c. Interprétation du bilan hydrique</u> .....	62
<u>A.III.2.d. Répartition des précipitations</u> .....	62
<u>A.III.2.b.i. Détermination de ruissellement [R (mm)]</u> .....	62
<u>A.III.2.b.ii. Détermination de l'infiltration [I (mm)]</u> .....	65
<u>A.IV. HYDROGEOLOGIE</u> .....	66
I. <u>L'aquifère étudié (nappe superficielle)</u> .....	66
II. <u>Piézométrie de la nappe superficielle</u> .....	66
III. <u>La profondeur</u> .....	69
 <i><u>B. Partie spéciale</u></i> 	
<u>B.I Le coefficient de vulnérabilité</u> .....	71
<u>B.II Les métaux lourds</u> .....	73
<u>Conclusion générale</u>	
<u>Bibliographie</u>	
<u>Annexe</u> .....	81

# Introduction générale

## **Introduction générale :**

Au cours des dernières années, la géostatistique a prouvé sa primauté en tant que méthode d'estimation des réserves dans de nombreux types de mines (métaux précieux, fer, métaux de base etc.). Son application à l'industrie du pétrole est plus récente, mais a cependant prouvé son utilité, tout particulièrement pour établir la topographie des sites et pour modéliser et simuler l'hétérogénéité interne des réservoirs et des aquifères. Malgré ce succès, certains secteurs de l'industrie minière, tel que l'exploitation du charbon, n'ont montré de l'intérêt pour la géostatistique que très tardivement. L'attention grandissante portée à la protection de l'environnement et le besoin d'avoir plus de précision pour l'estimation quantitative et qualitative des réserves incitent beaucoup d'entreprises à remettre en cause leurs procédés d'estimation.

L'augmentation dynamique de la production industrielle et agricole avait évidemment amélioré la vie de l'homme en lui fournissant le confort et le rendement, mais il a malheureusement conduit à la détérioration rapide de sa première Source de vie **"l'eau"**.

A cause de sa vocation industrielle et agricole, qui favorise l'exode rural continu, la ville d'Annaba est devenue une très grande consommatrice d'eau, une eau qui ne cesse de perdre sa bonne qualité.

Dans ce travail nous avons essayé de faire une étude générale sur l'état de la pollution de la nappe phréatique de la plaine Ouest d'El Hadjar, par les rejets sidérurgiques de l'usine ARCELOR MITTAL, ces derniers sont versée directement dans l'Oued Meboudja, qui menace directement la nappe superficielle.

Dans le premier chapitre nous avons présenté des généralités sur le variogramme et ses propriétés théoriques (portée, palier et l'effet de pépite), ainsi que sa modélisation et ses variations isotropique et anisotropique.

Le troisième chapitre résume la partie expérimentale qui compose essentiellement de :

- ✓ Une technique d'échantillonnage ;
- ✓ Une description statistique monovariante des données de notre champ d'étude ;

- ✓ Une étude de la corrélation des données par l'analyse variographique des variables régionalisées de la plaine étudiée ;
- ✓ Un ajustement des variogrammes expérimentaux par des modèles théoriques ;
- ✓ La validation croisée qui permet de comparer l'impact du choix du modèle sur les résultats de l'estimation ;
- ✓ Le Krigeage englobe une étude hydrogéologique et une partie spéciale dans la quelle nous déterminons le degré de contamination de la nappe phréatique de la plaine Ouest d'El Hadjar.

Une conclusion en finalité ainsi qu'une annexe qui caractérise les testes graphiques de validation croisée.

PARTIE  
THEORIQUE

# CHAPITRE

## Le variogramme:

- 1. INTRODUCTION.**
- 2. VARIOGRAMME.**
- 3. ESTIMATION DU VARIOGRAMME.**
- 4. MODELISATION.**
  - 4.1. Condition d'admissibilité des modèles.
  - 4.2. Types de modèles théoriques.
- 5. VARIATION ISOTROPIQUES ET ANISOTROPIQUE.**
  - 5.1. Isotropie.
  - 5.2. Anisotropies.
- 6. CONCLUSION.**

# **LE VARIOGRAMME**

## **1. INTRODUCTION:**

Le variogramme c'est l'outil fondamental en géostatistique pour analyser et modéliser la structure spatiale de la variable régionalisée. Il est défini aussi bien dans le cadre stationnaire d'ordre 2 que dans le cadre strictement intrinsèque. Il représente la variabilité moyenne des concentrations entre deux points en fonction de la distance  $h$  qui les sépare.

Dans ce chapitre on a la première partie qui comporte une définition du variogramme et ses propriétés théoriques (portée, pallier et l'effet de pépite), et nous avons présenté aussi une étude sur l'estimation, la modélisation et les modèles théorique courants. Et on terminera ce chapitre par une deuxième partie comporte une définitions de variation isotropique et anisotropie.

## 2. VARIOGRAMME: [1-3]

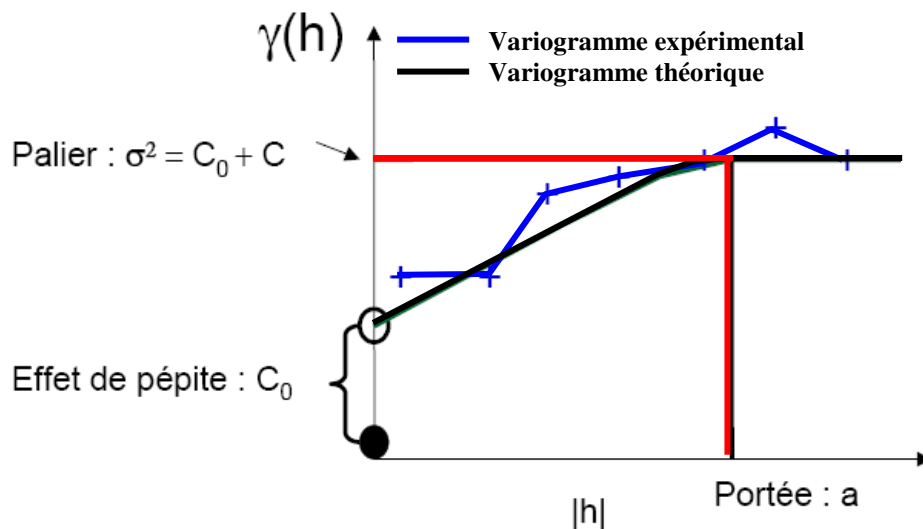
Nous allons mesurer la variabilité à différentes échelles d'une variable régionalisée  $z(\mathbf{x})$  tout simplement en calculant une mesure de dissemblance entre deux données  $z_1$  et  $z_2$  situées en deux points  $\mathbf{x}_1$  et  $\mathbf{x}_2$  d'un domaine spatial. Cette dissemblance entre deux valeurs, désignée par  $\gamma$ , vaudra

$$\gamma = (z_2 - z_1)^2/2 \quad (1)$$

c'est-à-dire la moitié du carré de la différence entre deux valeurs.

On fait dépendre la dissemblance  $\gamma$  de la distance et de l'orientation d'une paire de points, décrits par le vecteur  $\mathbf{h} = \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1$ , indifféremment de la position de la paire dans le domaine étudié

$$\gamma(\mathbf{h}) = 1/2 [z(\mathbf{x}_1+\mathbf{h}) - z(\mathbf{x}_1)]^2 \quad (2)$$



**Figure 1:** L'ajustement d'un Variogramme Expérimental

**Portée (a):** Distance où deux observations ne se ressemblent plus du tout en moyenne, elles ne sont plus liées (covariance nulle) linéairement. À cette distance, la valeur du variogramme correspond à la variance de la variable aléatoire.

**Palier** ( $\sigma^2 = C_0 + C$ ): Variance de la valeur **Var** (**Z(x)**)

**Effet de pépite** ( $C_0$ ): Variation à très courte échelle, erreurs de localisation, erreurs d'analyse et précision analytique.

### **3. ESTIMATION DU VARIOGRAMME**

On estime le variogramme à l'aide de

$$\gamma_e(h) = \frac{1}{2 N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

où **N(h)** nombre de paires dont les points sont espacés de **h**.

On peut aussi calculer le variogramme selon certaines directions spécifiques:

$$\gamma_e(h, \theta) = \frac{1}{2 N(h, \theta)} \sum_{i=1}^{N(h, \theta)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (4)$$

où **N(h,θ)** : nombre de paires séparées de **h** dans la direction **θ**.

En pratique on s'accorde une tolérance sur **h** et sur **θ** afin d'avoir suffisamment de paires pour chaque **h** et chaque **θ**. Pour chacune des classes ainsi formées, on calcule la distance moyenne séparant les extrémités des paires (abscisse) et on évalue le variogramme expérimental pour chaque classe. On obtient donc une série de points expérimentaux auxquels on cherche à ajuster un modèle permettant de déduire la covariance entre deux points quelconque en fonction de leur espacement géographique (et, éventuellement, de la direction qu'ils définissent). Une fois le modèle adopté, toute la suite des calculs se fait avec les valeurs obtenues du modèle et non avec les valeurs expérimentales.

## 4. MODELISATION: [4-6]

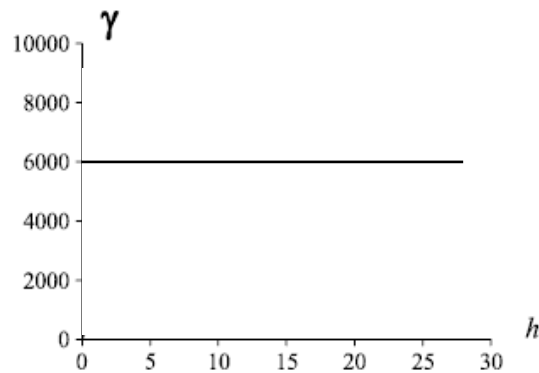
Les modèles sont des expressions analytiques que l'on tente d'ajuster le mieux possible aux points des variogrammes expérimentaux.

### 4.1. Types de modèles théoriques:

En géologie, les modèles les plus courants sont :

#### 4.2.1. Effet de pépite.

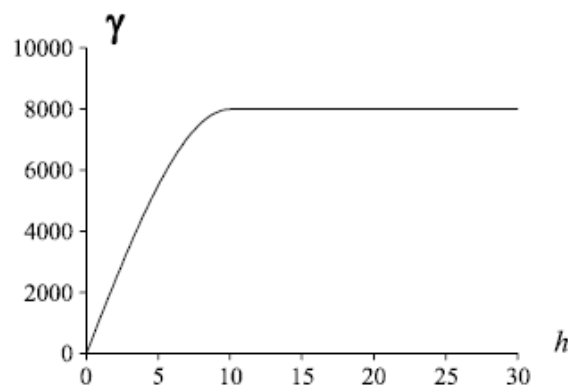
$$\begin{aligned} \gamma(h) &= 0 && \text{si } h = 0 \\ C_0 & && \text{si } h > 0 \end{aligned}$$



**Effet de pépite**

#### 4.2.2. Sphérique.

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C [1.5 h/a - 0.5 (h/a)^3] && \text{si } 0 < h < a \\ C & && \text{si } h \geq a \end{aligned}$$

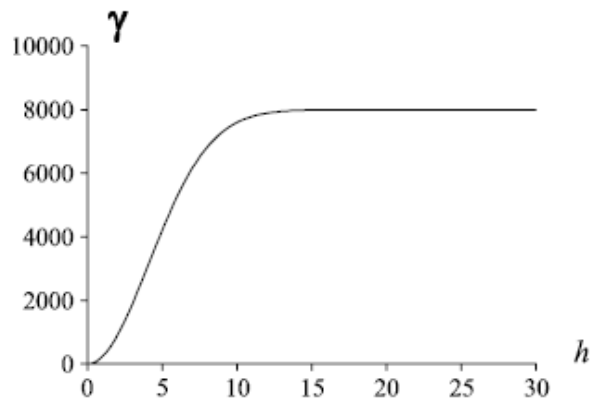


**Sphérique**

**Figure 2:** Types de modèles théoriques

**4.2.3. Gaussien.**

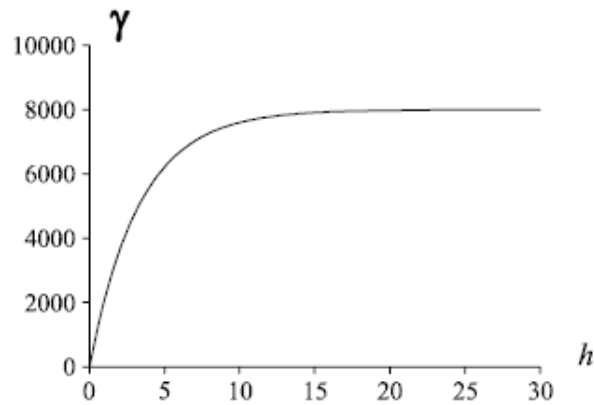
$$\gamma(h) = C [1 - \exp(-3(h/a)^2)]$$



Gaussien

**4.2.4. Exponentiel.**

$$\gamma(h) = C [1 - \exp(-3h/a)]$$

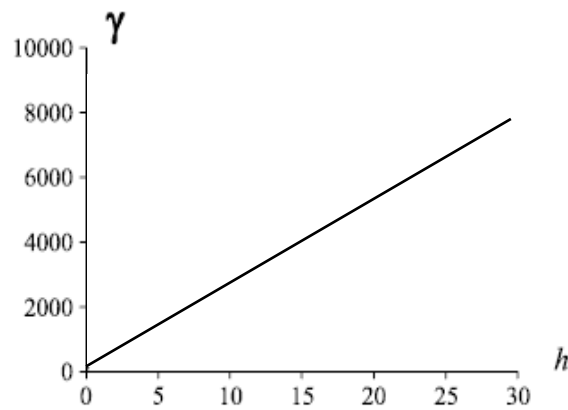


Exponentiel

**4.2.5. Puissance**

$$\gamma(h) = C h^b$$

$0 < b < 2$  (linéaire :  $b=1$ )



Puissance

**Figure 2:** (suit) Types de modèles théoriques

## **5. VARIATION ISOTROPIQUES ET ANISOTROPIQUE: [7, 8]**

### **5.1. Isotropie:**

On dit qu'il y a isotropie, les variogrammes expérimentaux dans les différentes directions se chevauchent et la carte variographique dessine des cercles, ou des sphères dans le cas tridimensionnel. Donc l'isotropie est défini le variogramme ne dépend que du module du vecteur  $\mathbf{h}$  -qui relie les points  $\mathbf{x}$  et  $\mathbf{x} + \mathbf{h}$ - et non de son orientation, la norme de ce vecteur mesure la distance entre ces deux points, c'est à dire le variogramme ne dépend pas de l'orientation de ce vecteur, comme les modèles théoriques de variogrammes sont définis dans le cas isotrope, nous devons examiner les transformations qui permettent le passage à des modèles anisotropes.

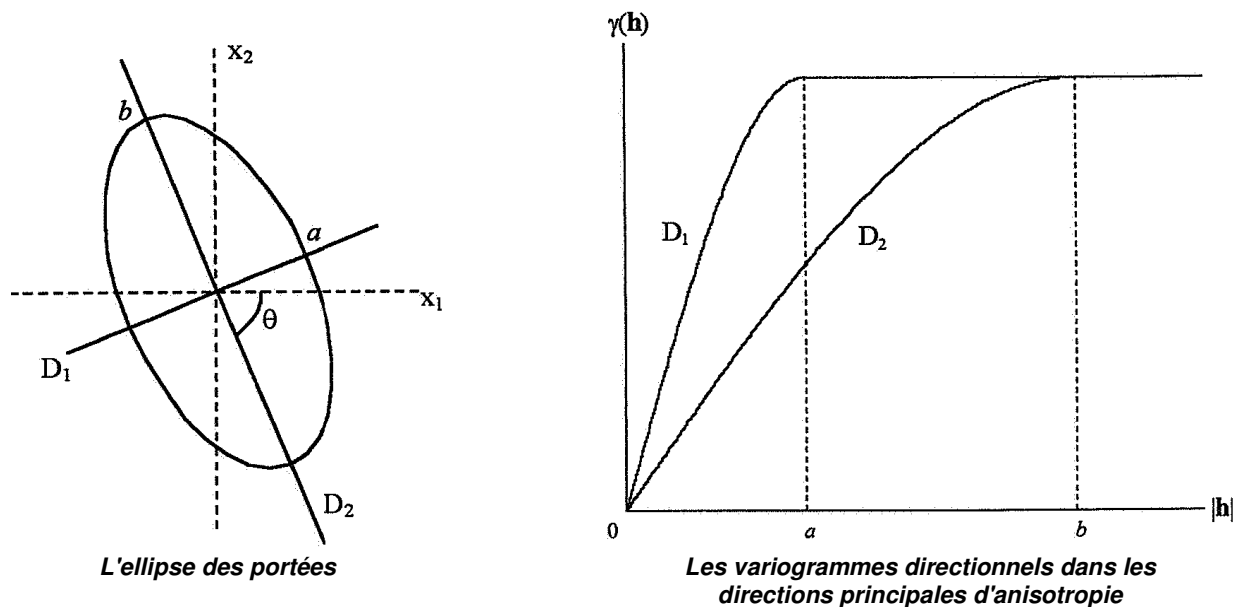
### **5.2. Anisotropies:**

Dans le cas contraire, on est en présence d'une anisotropie, qui se manifeste lorsque le comportement du variogramme diffère selon les directions de l'espace. En pratique les anisotropies s'identifient en comparant les variogrammes expérimentaux calculés le long de plusieurs directions, par exemple, dans le cas bidimensionnel, le long des directions orientées de  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  et  $135^\circ$  par rapport à l'axe des abscisses. On complète souvent cet examen en dessinant la "carte variographique", c'est-à-dire la carte des isovaleurs du variogramme expérimental en fonction du vecteur  $\mathbf{h}$  (donc de son module et de sa direction).

On distingue plusieurs types d'anisotropie, notamment l'**anisotropie géométrique** et l'**anisotropie zonale**.

### 5.2.1. Anisotropie géométrique

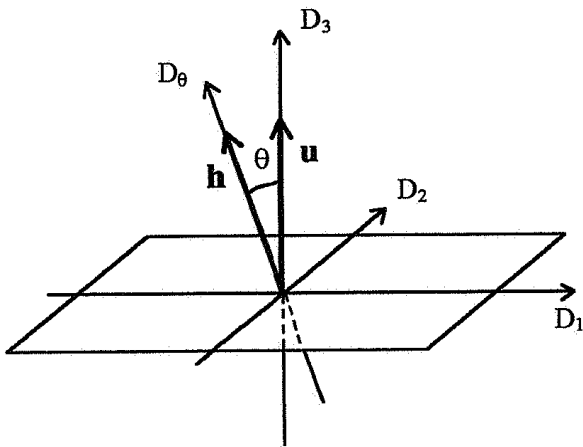
Une anisotropie est dite géométrique lorsque la carte variographique dessine des ellipses, ou des ellipsoïdes dans le cas tridimensionnel, concentriques. Les variogrammes directionnels ont la même forme mais ont des portées différentes (cadre stationnaire: variogrammes à paliers) ou des pentes différentes (cadre intrinsèque strict : variogrammes non bornés).



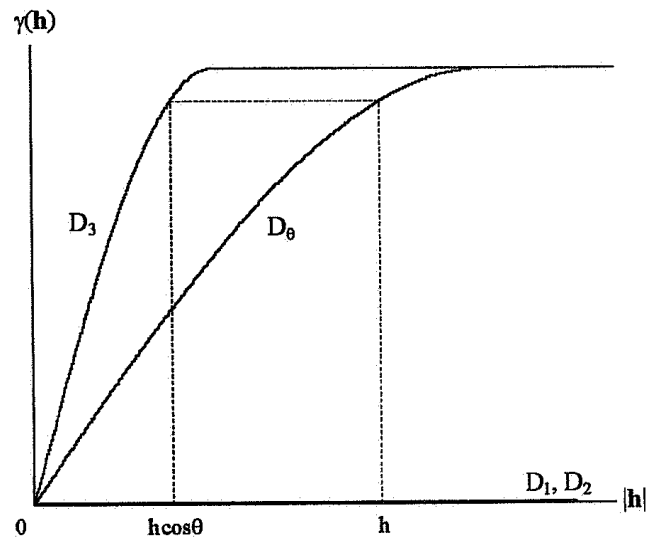
**Figure 3:** Exemple (2D) Anisotropie géométrique de rapport  $a/b$  et d'angle  $\theta$

### 5.2.2. Anisotropie zonale

Parfois, une simple correction géométrique ne suffit pas à rendre les modèles isotropes. C'est le cas par exemple si l'on observe des paliers différents ou si les portées ne décrivent pas une ellipse. On peut alors tenter d'ajuster les variogrammes expérimentaux directionnels à l'aide d'une somme (ou éventuellement d'un produit de covariances) de modèles isotropes ou avec anisotropie géométrique. Parfois la physique du phénomène peut aider à déterminer le modèle. Ainsi, en hydrogéologie, la charge hydraulique est une quantité anisotrope par sa nature même; en effet, dans le sens de l'écoulement on observe les variations maximales alors que perpendiculairement à l'écoulement la charge est constante.



L'ellipse des portées



Les variogrammes directionnels dans les directions horizontales ( $D_1, D_2$ ), Verticale ( $D_3$ ) et une directions intermédiaire

**Figure 4:** Exemple (3D) Anisotropie zonale pure de directions verticale

## **6. CONCLUSION:**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une revue générale sur le variogramme et ces propriétés (Palier " $\sigma^2$ ", Portée " $a$ " et l'Effet de pépite " $C_0$ ") et l'estimation du variogramme avec une tolérance sur les distances ( $h$ ) et sur les angles ( $\theta$ ).

Ainsi on distingue dans la deuxième partie de ce chapitre la modélisation du variogramme structural avec l'ajustement le mieux possible aux points des variogrammes expérimentaux avec des modèles théoriques. Nous avons montré aussi les types des modèles théoriques utilisés en géologie (Effet de pépite, Sphérique, Gaussien, Exponentiel et Puissance). On conclure que la variation isotropique définie que la variogramme ne change pas avec la direction, par contre la variation anisotropiques est définie lors de la comparaison des variogrammes expérimentaux calculés le long de plusieurs directions orientées de  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  et  $135^\circ$  par rapport à l'axe des abscisses, et nous avons distingue plusieurs types d'anisotropie, notamment l'anisotropie géométrique et l'anisotropie zonale.

# CHAPITRE

## Le krigeage:

- 1. INTRODUCTION.**
- 2. CHOIX DU VOISINAGE DE KRIGEAGE.**
  - 2.1. Voisinage unique.**
  - 2.2. Voisinage glissant.**
- 3. Méthodes d'interpolation spatiale.**
  - 3.1. La méthode de l'inverse des distances (I.D.).**
  - 3.2. Les méthodes du Krigeage.**
- 4. Méthode statistique.**
  - 4.1. Validation croisée.**
- 5. CONCLUSION.**

# **LE KRIGEAGE**

## **1. INTRODUCTION:**

Dans ce chapitre, nous allons étudier le Krigeage, méthode qui permet d'estimer la valeur d'un site à partir des valeurs observées sur les sites avoisinants, en prenant en compte leur configuration géométrique et la structure spatiale de la régionalisation:

Le Krigeage s'appuie sur l'interprétation de la variable régionalisée comme la réalisation d'une fonction aléatoire, dont on a modélisé la fonction de covariance ou le variogramme. Il s'agit de rechercher, parmi les estimateurs formés par les combinaisons linéaires pondérées des données, celui qui présente les "meilleures" propriétés (en l'occurrence absence de biais et variance d'erreur minimale, qui constitue le critère de précision choisi).

Le Krigeage présente plusieurs avantages sur les techniques d'interpolation déterministes (méthode de l'inverse des distances). D'une part, il fournit une estimation précise et sans biais de la grandeur recherchée, qui prend en compte non seulement les informations de nature géométrique (nombre et configuration des sites de données), mais également les informations structurales contenues dans le modèle variographique. D'autre part, il permet d'apprécier quantitativement la précision de l'estimation, à l'aide d'une variance d'estimation, ce qui n'est pas possible sans le recours à un modèle stochastique. Signalons dès à présent qu'il ne faut pas confondre cette variance avec un intervalle de confiance sur l'estimation, auquel on a l'habitude de se référer.

## **2. CHOIX DU VOISINAGE DE KRIGEAGE: [9-11]**

Contrairement aux problèmes globaux, les problèmes d'estimation locale ne mettent pas en jeu la totalité du champ et, en général, n'utilisent pas l'ensemble des données disponibles. On définit le voisinage de Krigeage comme le domaine de l'espace qui contient le support de la grandeur à estimer et les données utilisées dans l'estimation. Plusieurs possibilités sont offertes à l'utilisateur.

### **3.1. Voisinage unique:**

On peut décider d'effectuer le Krigeage en un point ou un bloc quelconque en conservant l'ensemble des points de données. On parle alors de Krigeage en voisinage unique. Dans ce cas, les données très éloignées interviennent dans l'estimation. Cependant, sauf cas particulier, leur influence aura de fortes chances d'être faible; (intuitivement, un site éloigné n'apporte pas beaucoup d'information sur le point ou le bloc à estimer, et sera par conséquent affecté d'un poids de Krigeage faible).

### **3.2. Voisinage glissant:**

Le Krigeage est effectué en voisinage glissant lorsqu'il n'utilise que les points de données "voisins" du site à estimer. En général, on ne se limite pas à une seule estimation locale, mais l'on cherche à estimer la variable régionalisée aux noeuds d'une grille régulière qui couvre la zone étudiée. Il reste à définir la taille et la forme du voisinage, que l'on centre sur le point ou le bloc à estimer et que l'on déplace à travers le champ à mesure que sont réalisées les estimations (d'où le qualificatif de glissant).

#### **3.2.1. Taille du voisinage:**

L'hypothèse stationnaire ou intrinsèque doit être admissible à l'échelle du voisinage choisi. D'autre part, nous allons voir que, dans les équations du Krigeage, la

covariance ou le variogramme n'intervient que pour des distances inférieures au diamètre de la zone où l'on prend l'information qui sert à l'estimation. Ainsi, si le modèle variographique est peu fiable aux grandes distances, il est préférable de travailler avec un voisinage glissant de taille modérée.

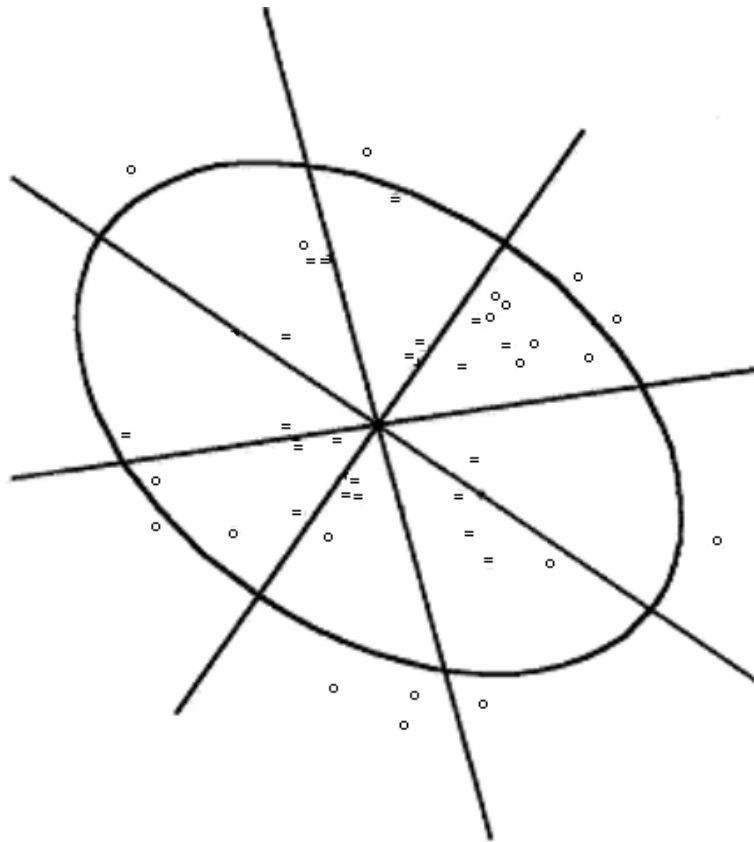
En revanche, si l'on choisit un voisinage trop petit, contenant peu de données, l'estimation sera peu précise et sensible aux valeurs de ces données ; la carte de Krigeage risque fort de présenter des artefacts (mauvais "raccordements" lorsque l'on passe d'un point à un autre et que les données utilisées ne sont pas les mêmes).

La taille du voisinage doit donc permettre un équilibre entre ces différents facteurs (précision et raccordement des estimations | temps de calcul, quasi-stationnarité et fiabilité du variogramme). Nous verrons ultérieurement un autre facteur - la minimisation du biais conditionnel - susceptible d'intervenir dans le choix de la taille du voisinage. Un critère objectif de décision est la *validation croisée*: on teste plusieurs tailles de voisinage et on retient celle qui donne les résultats les plus satisfaisants.

### 3.2.2. Forme du voisinage:

La forme du voisinage doit, dans la mesure du possible, tenir compte de l'anisotropie de la variable révélée par l'analyse variographique. Ainsi, dans le cas d'une anisotropie géométrique, on prendra un voisinage en forme d'ellipse (ou d'ellipsoïde) dont les caractéristiques - orientation et excentricité - sont identiques à celles de l'ellipse (ou de l'ellipsoïde) d'anisotropie. Souvent aussi, on divise cette ellipse en plusieurs secteurs, en général des quadrants ou des octants, dans chacun desquels on recherche un nombre fixé de données, afin de mieux répartir autour du point ou du bloc à estimer l'information que l'on va conserver.

La figure suivante présente un exemple, dans l'espace bidimensionnel, de voisinage glissant en forme d'ellipse centrée sur le site à estimer. Les données retenues, au maximum de trois par octant, sont indiquées.



**Figure 5:** voisinage elliptique, divisé en octants

"=" données retenues ; "o " données écartées

En cas d'anisotropie plus complexe que l'anisotropie géométrique, on conserve souvent un voisinage en forme d'ellipse ou d'ellipsoïde, bien que l'on devrait idéalement choisir une forme plus sophistiquée (par exemple, un voisinage en forme de "bande" si l'on a affaire à une anisotropie zonale pure). Il faut donc chercher une ellipse qui se rapproche au mieux des courbes d'isovaleurs du modèle variographique, qui indique le niveau de corrélation, ou d'information, en fonction de la distance géographique.

### **3. Méthodes d'interpolation spatiale:**

#### **3.1. La méthode de l'inverse des distances (I.D.): [12]**

L'inverse des distances c'est une méthode d'interpolation spatiale et déterministe, prend en compte un plus grand nombre de données, en affectant une pondération plus élevée aux valeurs proches qu'aux valeurs éloignées. Cette méthode présente en théorie plusieurs points faibles, car les valeurs interpolées sont toujours comprises entre la valeur minimale et la valeur maximale, et elle ne tient compte que de la distance entre les sites d'observation et le point à estimer, et non de la configuration géométrique des sites d'observation entre eux.

#### **3.2. Les méthodes du Krigeage : [13-18]**

Le Krigeage est une méthode d'interpolation spatiale qui prend en compte la variation spatiale des données. Le nom de Krigeage a été choisi par **Georges Matheron** en hommage au géologue sud africain **Daniel Gerhardus Krige**. Néanmoins, la théorie de cette méthode a été développée par **Georges Matheron**, qui en a aussi assuré le développement au Centre de Géostatistique de l'Ecole des Mines de Paris.

##### **4.1.1. Le Krigeage à moyenne connue (Krigeage simple "KS"):**

On suppose ici que  $z$  est la réalisation d'une fonction aléatoire  $Z$  stationnaire du second ordre telle que

$$\begin{cases} \forall \mathbf{x} \in \mathcal{Z}, E[Z(\mathbf{x})] = m \text{ connue} \\ \forall \mathbf{x}, \mathbf{x} + \mathbf{h} \in \mathcal{Z}, \text{cov}[Z(\mathbf{x} + \mathbf{h}), Z(\mathbf{x})] = C(\mathbf{h}) \end{cases} \quad (6)$$

où  $\mathcal{V}$  désigne le voisinage de Krigeage (pour un Krigeage à voisinage unique,  $\mathcal{V}$  s'identifie au champ  $\mathcal{D}$  de la variable régionalisée).

On suppose de plus dans un premier temps que  $m$  est nulle :  $m = 0$ . Examinons une à une les quatre étapes du Krigeage.

**3.1.1.1. Linéarité :** en prenant comme estimateur en  $\mathbf{x}_0$

$$Z^*(\mathbf{x}_0) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} Z(\mathbf{x}_{\alpha}) \quad (7)$$

on assure que l'erreur d'estimation satisfait la contrainte de linéarité. En toute rigueur, on devrait écrire  $\lambda_{\alpha}(\mathbf{x}_0)$  au lieu de  $\lambda_{\alpha}$ , car les poids optimaux dépendront bien sûr du point  $\mathbf{x}_0$  à estimer.

**3.1.1.2. Autorisation :** sous l'hypothèse stationnaire du second ordre, toute combinaison linéaire est autorisée. La contrainte d'autorisation est automatiquement vérifiée.

**3.1.1.3. Non-biais :** elle est également vérifiée, car comme  $\mathbf{m} = \mathbf{0}$ , il vient immédiatement :

$$E[Z^*(\mathbf{x}_0) - Z(\mathbf{x}_0)] = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \underbrace{E[Z(\mathbf{x}_{\alpha})]}_{=m=0} - \underbrace{E[Z(\mathbf{x}_0)]}_{=m=0} = 0. \quad (8)$$

**3.1.1.4. Optimalité :** il reste à minimiser la variance de l'erreur d'estimation, qui se développe de la manière suivante à l'aide de la fonction de covariance  $\mathbf{C}$  :

$$\text{var}[Z^*(\mathbf{x}_0) - Z(\mathbf{x}_0)] = \mathbf{C}(\mathbf{0}) + \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n \lambda_{\alpha} \lambda_{\beta} \mathbf{C}(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) - 2 \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \mathbf{C}(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0). \quad (9)$$

Comme il n'y a ni contrainte d'autorisation ni contrainte de non-biais, le minimum de cette expression est obtenu en annulant ses dérivées partielles par rapport aux poids inconnus  $\{\lambda_\alpha, \alpha = 1 \dots n\}$ . On obtient le système :

$$\sum_{\beta=1}^n \lambda_\beta C(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_\beta) = C(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_0) \quad \forall \alpha = 1 \dots n. \quad (10)$$

C'est un système linéaire où le nombre d'équations et le nombre d'inconnues sont égaux au nombre de points de données utilisés. En écriture matricielle, ce système s'écrit :

$$[C(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_\beta)] [\lambda_\beta] = [C(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_0)] \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} C(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_1) & \dots & C(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_n) \\ \vdots & & \vdots \\ C(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_1) & \dots & C(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0) \\ \vdots \\ C(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_0) \end{pmatrix}$$

ce qui permet de déterminer les poids de Krigeage optimaux:

$$[\lambda_\beta] = [C(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_\beta)]^{-1} [C(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_0)]. \quad (12)$$

La valeur de la variance de l'erreur au point  $\mathbf{x}_0$ , appelée variance de Krigeage, se simplifie en reportant les équations du Krigeage dans l'expression précédente de la variance :

$$\sigma_{KS}^2(\mathbf{x}_0) = \sigma^2 - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha C(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_0) \quad (13)$$

où  $\sigma^2 = C(\mathbf{0})$  est la variance *a priori* de la fonction aléatoire  $\mathbf{Z}$ .

Dans le cas général où  $Z$  a une moyenne (espérance)  $\mathbf{m}$  non nulle, mais connue, on se ramène au cas précédent en travaillant sur la variable  $Z - \mathbf{m}$ , qui, elle, est de moyenne nulle. On écrira donc :

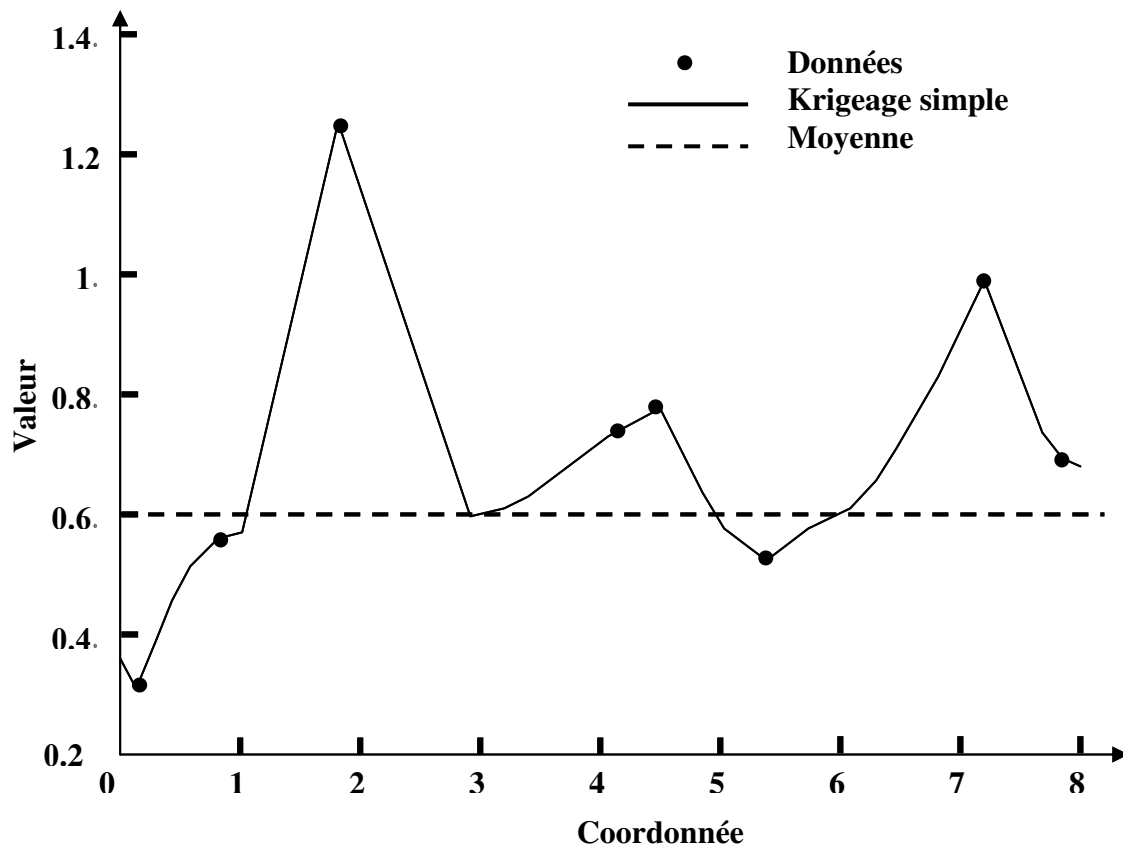
$$Z^*(\mathbf{x}_0) - \mathbf{m} = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} [Z(\mathbf{x}_{\alpha}) - \mathbf{m}] \quad (14)$$

soit encore

$$Z^*(\mathbf{x}_0) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} Z(\mathbf{x}_{\alpha}) + \left(1 - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha}\right) \mathbf{m}. \quad (15)$$

Le système de Krigeage et la variance de Krigeage sont donnés par les mêmes équations que précédemment. Ce Krigeage stationnaire à moyenne connue a été baptisé Krigeage simple. Cette méthode est relativement exigeante puisque la valeur de la moyenne intervient dans l'estimation, et son poids est d'autant plus élevé que le poids cumulé des données est faible. Ainsi, dans les zones peu échantillonnées, l'estimation va se calibrer sur la moyenne pour pallier le manque d'information.

Nous allons illustrer ces propos sur un exemple volontairement très simple ; il s'agit de huit données, réparties irrégulièrement le long d'une droite. La figure 6 présente les résultats du Krigeage simple (avec une moyenne est égale à 0.6).



**Figure 6:** Estimation par Krigeage simple

### 3.1.1.5. Exemple important ; cas d'un effet de pépite pur:

Un exemple intéressant à examiner est celui où la fonction de covariance est purement pépitique :  $C(\mathbf{0}) = \sigma^2$  et  $C(\mathbf{h}) = 0$  si  $|\mathbf{h}| > 0$ . L'effet de pépite pur correspond à une absence totale de structuration des données. Dans ce cas, le système de Krigeage simple en un point  $\mathbf{x}_0$  non échantillonné se réduit à:

$$\begin{pmatrix} C(\mathbf{0}) & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & C(\mathbf{0}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

qui admet pour solution évidente  $\lambda_1 = \dots = \lambda_n = \mathbf{0}$ . Par suite, l'estimation est égale à la moyenne  $m$  et la variance d'estimation vaut  $\sigma^2$ , variance *a priori* de  $\mathbf{Z}$ . L'estimation et la variance d'estimation en un point non échantillonné sont indifférentes à la configuration de Krigeage et aux valeurs mesurées aux sites de données. Tout se passe comme si les données n'apportaient aucune information sur le point à estimer.

En outre, il se produit des discontinuités dans les valeurs de l'estimation et de la variance d'estimation au niveau des points de données. En effet, si le point à estimer  $\mathbf{x}_0$  coïncide avec l'un des points de données  $\mathbf{x}_\alpha$ , le poids devient  $\lambda_\alpha$  égal à  $\mathbf{1}$  et les autres poids restent nuls, de sorte que l'estimation redonne la valeur observée en  $\mathbf{x}_\alpha$  et la variance d'estimation est nulle (ce qui traduit que l'estimation est exacte en ce point).

En résumé, dans le cas d'un effet de pépite pur,

$$\begin{aligned} \text{si } \mathbf{x}_0 \notin \{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n\}, Z^*(\mathbf{x}_0) = m \text{ et } \sigma_{KS}^2(\mathbf{x}_0) = \sigma^2 = C(\mathbf{0}) \\ \text{si } \mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_\alpha \in \{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n\}, Z^*(\mathbf{x}_0) = Z(\mathbf{x}_\alpha) \text{ et } \sigma_{KS}^2(\mathbf{x}_0) = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

#### 4.1.2. Le Krigeage à moyenne inconnue (Krigeage ordinaire "KO"):

Dans les applications, il est rare que l'on connaisse avec certitude la valeur de la moyenne. Il convient donc d'élargir le Krigeage au cas où celle-ci est inconnue. Comme précédemment, on suppose que, à l'échelle du voisinage de Krigeage, la régionalisation est une réalisation d'une fonction aléatoire  $\mathbf{Z}$  stationnaire d'ordre deux, d'espérance  $\mathbf{m}$  constante et de fonction de covariance  $\mathbf{C}$ . Mais on suppose ici que  $\mathbf{m}$  est inconnue. Les étapes du Krigeage s'écrivent :

4.1.2.1. *Linéarité* : l'estimateur de  $\mathbf{Z}$  en un point  $\mathbf{x}_0$  est défini par :

$$Z^*(\mathbf{x}_0) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha Z(\mathbf{x}_\alpha) \quad (18)$$

**4.1.2.2. Autorisation**, pas de contrainte effective dans le cadre stationnaire.

**4.1.2.3. Non-biais**: l'espérance de l'erreur d'estimation s'écrit :

$$\begin{aligned} E[Z^*(\mathbf{x}_0) - Z(\mathbf{x}_0)] &= \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \underbrace{E[Z(\mathbf{x}_{\alpha})]}_m - \underbrace{E[Z(\mathbf{x}_0)]}_m \\ &= m \left( \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} - 1 \right) \end{aligned} \quad (19)$$

Or  $m$  étant inconnue, le seul moyen de garantir le non biais de l'erreur est d'imposer la condition (*appelée parfois condition d'universalité*) :

$$\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} = 1.$$

Cette égalité assure que, dans le cas où toutes les données sont égales à une même constante, la valeur estimée restituera cette constante.

**4.1.2.4. Optimalité** : la variance de l'erreur d'estimation se développe en:

$$\text{var}[Z^*(\mathbf{x}_0) - Z(\mathbf{x}_0)] = C(\mathbf{0}) + \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n \lambda_{\alpha} \lambda_{\beta} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) - 2 \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0) \quad (20)$$

quantité qu'il faut minimiser sous contrainte de la condition de non-biais, à savoir

$$\sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} = 1.$$

Pour résoudre ce problème de minimisation sous contrainte, on applique la technique des multiplicateurs de Lagrange. On introduit, dans l'expression de la variance, une inconnue auxiliaire  $\mu$ , appelée *multiplicateur de Lagrange*, de la façon suivante :

$$\text{var}[Z^*(\mathbf{x}_0) - Z(\mathbf{x}_0)] = C(\mathbf{0}) + \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n \lambda_{\alpha} \lambda_{\beta} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) - 2 \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0) + 2\mu \underbrace{\left( \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} - 1 \right)}_{=0} \quad (21)$$

et l'on minimise la fonction des  $n+1$  variables  $\lambda_1, \dots, \lambda_n, \mu$ . En calculant les  $n+1$  dérivées partielles de cette fonction puis en les annulant, on obtient le système :

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \lambda_\alpha} = 0 : \sum_{\beta=1}^n \lambda_\beta C(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_\beta) + \mu = C(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_0) & \forall \alpha = 1 \dots n \\ \frac{\partial}{\partial \mu} = 0 : \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha = 1 & \text{(condition de non-biais)} \end{cases} \quad (22)$$

Ce système comporte une inconnue et une équation de plus que le système de Krigeage simple. Ce Krigeage est appelé "**Krigeage ordinaire**".

Le système de **Krigeage ordinaire** écrit en notation matricielle est :

$$\begin{bmatrix} C(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_\beta) & \mathbf{1} \\ \mathbf{1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_\beta \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{pmatrix} C(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_1) & \dots & C(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_n) & 1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ C(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_1) & \dots & C(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_n) & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0) \\ \vdots \\ C(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_0) \\ 1 \end{pmatrix}$$

Les poids de Krigeage sont donnés par :

$$\begin{bmatrix} \lambda_\beta \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_\beta) & \mathbf{1} \\ \mathbf{1} & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} C(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_0) \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

La variance de Krigeage au point  $\mathbf{x}_0$  s'écrit, en tenant compte des équations de Krigeage :

$$\sigma_{\text{KO}}^2(\mathbf{x}_0) = \sigma^2 - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha C(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_0) - \mu. \quad (25)$$

Le variogramme étant équivalent à la covariance, d'après la relation  $\gamma(h) = C(0) - C(h)$ , on peut choisir de l'utiliser au lieu de la fonction de covariance. Les équations de Krigeage deviennent :

$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^n \lambda_{\beta} \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) - \mu = \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0) & \forall \alpha = 1 \dots n \\ \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} = 1 \end{cases} \quad (26)$$

Soit:

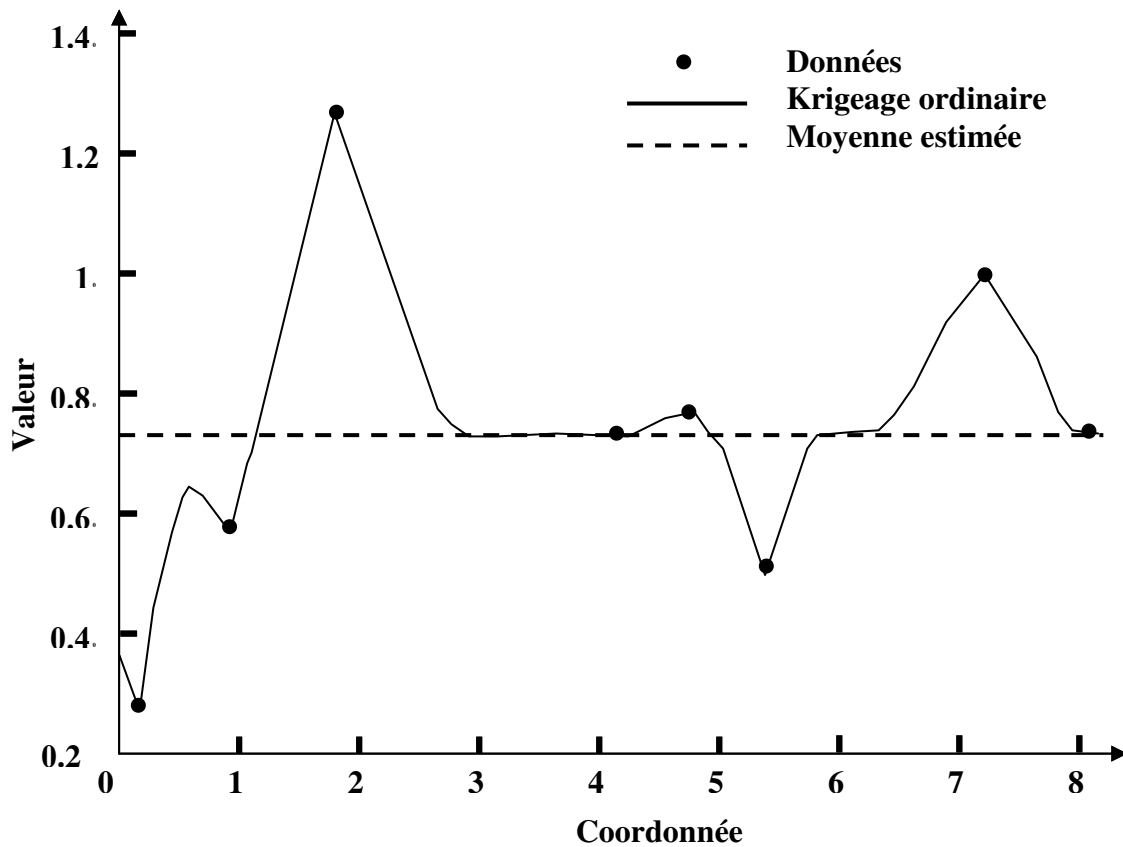
$$\begin{bmatrix} \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) & \mathbf{1} \\ \mathbf{1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{\beta} \\ -\mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\begin{pmatrix} \gamma(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_1) & \gamma(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_n) & 1 \\ \gamma(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_1) & \gamma(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_n) & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_n \\ -\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0) \\ \gamma(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_0) \\ 1 \end{pmatrix}$$

La variance de Krigeage vaut :

$$\sigma_{\text{KO}}^2(\mathbf{x}_0) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0) - \mu. \quad (28)$$

Nous allons reprendre l'exemple des huit sites pour illustrer succinctement la technique du **Krigeage ordinaire** (figure 7). Il est intéressant d'ajouter, sur le graphique des valeurs krigées, la valeur estimée de l'espérance mathématique.



**Figure 7:** Estimation par Krigeage ordinaire

#### 4.1.2.5. Exemple important ; cas d'un effet de pépité pur

Lorsque la covariance est purement pépinière (c'est-à-dire nulle pour tout vecteur  $h$  non nul), il n'y a aucune structure spatiale entre les valeurs observées aux différents sites. On vérifie alors qu'en un point non échantillonné le système de Krigeage attribue des poids égaux à tous les sites d'observation. Autrement dit, en présence d'un effet de pépité pur, l'estimation ne privilégie aucun échantillon et coïncide avec la moyenne arithmétique des données :

$$\text{si } \mathbf{x}_0 \notin \{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n\}, Z^*(\mathbf{x}_0) = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n Z(\mathbf{x}_\alpha). \quad (29)$$

La variance de Krigeage ordinaire en un site non échantillonné est légèrement supérieure à la variance a priori  $\sigma^2 = C(0)$  :

$$\sigma_{\text{KO}}^2(\mathbf{x}_0) = \underbrace{\sigma^2}_{\text{variance a priori de la fonction } Z} + \underbrace{\frac{\sigma^2}{n}}_{\text{variance d'estimation de la moyenne}}. \quad (30)$$

La forme de l'estimateur et de la variance d'estimation change en un point de données : le Krigeage redonne la valeur observée : poids égal à 1 pour le point à estimer, poids nul pour les autres points, multiplicateur de Lagrange nul. En conséquence, la variance d'estimation est nulle. Il y a donc des discontinuités dans l'estimation et la variance d'estimation au niveau des points de données.

#### **4. Méthode statistique:**

##### **3.1. Validation croisée: [21-26]**

Comme différents modèles de variogramme peuvent souvent convenir à un même variogramme expérimental, on souhaiterait savoir quel est le meilleur. La méthode de validation croisée est souvent utilisée pour cela. La procédure consiste à éliminer un point de l'ensemble des données de manière temporaire puis à Kriger sa valeur en utilisant les échantillons restants comme données. Connaissant la vraie valeur, on en déduit l'erreur de Krigeage. On effectue ce calcul pour chacun des modèles en compétition. Si on répète cette opération pour tous les points (ou pour un sous-ensemble représentatif de ceux-ci), on obtient une série d'estimations d'erreur pour chacun des points et pour chaque modèle de variogramme.

La validation croisée afin de tester différents modèles de variogrammes. Chaque point est enlevé à tour de rôle de l'ensemble des données et est krigeé à partir des autres données. Si le modèle de variogramme s'accorde bien avec les données, on peut s'attendre à ce que les différences entre les vraies valeurs et les estimations Krigées soient faibles. Pour être plus précis, on s'attend à ce que les différences aient une moyenne de 0 et une variance égale à la variance de Krigeage. Plusieurs statistiques concernant ce sujet sont abordées et discutées.

Cette technique permet notamment :

- D'étudier la sensibilité des estimations aux paramètres du modèle;
- D'évaluer l'ordre de grandeur des erreurs pour l'estimation ponctuelle. En effet, la variance de Krigeage fournie par le modèle n'est pas directement transposable en intervalle de confiance, et sa validité dépend de la qualité de l'ajustement pour la zone estimée. L'histogramme expérimental des erreurs

standardisées (erreur divisée par l'écart-type de Krigeage) peut permettre de valider l'hypothèse de normalité des erreurs d'estimation.

Cette opération, menée pour tous les points pris un à un, permet de comparer l'erreur d'estimation expérimentale (différence entre la valeur ré-estimée par Krigeage et la valeur réelle mesurée) et l'erreur d'estimation due au modèle de variogramme à travers le calcul des expressions suivantes :

✓ Moyenne de l'erreur :  $m_{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z^*(x_i) - Z(x_i))$

✓ Variance de l'erreur :  $\sigma_{\varepsilon}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z^*(x_i) - Z(x_i))^2$

✓ Moyenne de l'erreur standardisée :  $\hat{m}_{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{Z^*(x_i) - Z(x_i)}{\hat{\sigma}_i} \right)$

✓ Variance de l'erreur standardisée :  $\hat{\sigma}_{\varepsilon}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{Z^*(x_i) - Z(x_i)}{\hat{\sigma}_i} \right)^2$

La moyenne de l'erreur, qui doit être voisine de zéro, permet de vérifier si le Krigeage est effectivement non-biaisé. La variance de l'erreur standardisée, qui doit se rapprocher de 1, correspond au rapport entre les variances expérimentale et théorique de Krigeage. Elle permet de vérifier que les erreurs de Krigeage sont cohérentes avec la variance calculée. Les points si pour lesquels l'erreur standardisée  $(Z^*(x_i) - Z(x_i)) / \hat{\sigma}$  est comprise dans l'intervalle [-2.5 ; +2.5] (par analogie au cas de la loi normale centrée réduite, où cet intervalle contient 95% des valeurs) sont dits robustes.

## **5. CONCLUSION:**

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue le Krigeage, le choix du voisinage et les méthodes d'interpolation spatiale et statistique. Plus précisément, l'erreur d'estimation, qui est aléatoire dans le modèle probabiliste, doit satisfaire quatre contraintes successives ;

- Linéarité
- Autorisation
- Non-biais
- Optimalité (variance minimale).

Le Krigeage génère non seulement des prévisions spatiales, mais en plus l'estimation des erreurs qu'il produit est plus fiable que celles produites par la régression classique, car les postulats de base du Krigeage modélisent mieux la réalité pour des données à référence spatiale. Le Krigeage ressort donc favorablement de la comparaison théorique avec d'autres méthodes d'interpolation. Ainsi le Krigeage permet d'estimer la valeur de la variable régionalisée en un point ou sur un bloc à l'aide d'une combinaison linéaire pondérée des données avoisinantes. Il permet aussi de mesurer la précision de la valeur estimée par l'intermédiaire d'une variance d'estimation. Sa mise en oeuvre nécessite de spécifier un modèle de covariance ou de variogramme, ainsi qu'un *voisinage*, c'est-à-dire un domaine autour du point ou du bloc à estimer où sont prises les données qui servent à l'estimation.

PARTIE  
PRATIQUE

## **I. Techniques d'échantillonnage:**

Dans cette section, nous présentons des techniques d'échantillonnage dans le plan. Celles-ci consistent à sélectionner  $N$  points dans  $\mathbf{R}^2$ . Il existe plusieurs méthodes d'échantillonnage possibles, parmi ces méthodes nous considérons uniquement celles qui font intervenir les trois dispositifs fondamentaux suivants :

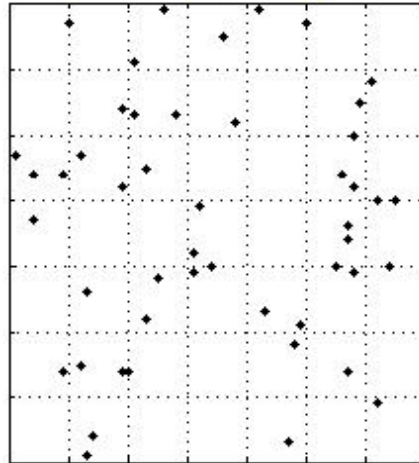
- Echantillonnage aléatoire simple,
- Echantillonnage systématique,
- Echantillonnage aléatoire stratifié.

Nous décrivons ces trois dispositifs en considérant un carré  $Q$  d'origine  $O$ , de côtés parallèles aux axes  $(O, x)$  et  $(O, y)$ , de largeur  $L$ .

Dans notre travail nous nous sommes intéressés à l'échantillonnage aléatoire simple.

### **Echantillonnage aléatoire simple (EAS):**

L'échantillonnage aléatoire simple (EAS) consiste à prélever au hasard et de façon indépendante  $N$  points dans  $\mathbf{D}$ , chaque point ayant la même probabilité d'inclusion dans l'échantillon, et chaque échantillon de taille  $N$  ayant la même probabilité de sélection. En pratique, il suffit de tirer deux nombres aléatoires  $U_i$  et  $U'_i$  uniformément répartis dans  $[0, 1]$ , puis de sélectionner le point  $(x_i, y_i)$  tel que  $x_i = U_i L$  et  $y_i = U'_i L$ , en répétant cette procédure pour  $i = 1, \dots, N$ . Le dispositif aléatoire simple présente l'inconvénient de sur-échantillonner ou de sous-échantillonner certaines régions de  $N$  puisque les points ne sont pas répartis de façon régulière (Figure 8).



**Figure 8:** Echantillonnage aléatoire simple

## **II. Simulation avec ISATIS:**

### **II.1. Description des données:**

Nous avons réalisé des simulations avec le logiciel **ISATIS** pour le risque de pollution de la nappe phréatique de la plaine Ouest d'El-Hadjar par les métaux lourds contenus dans l'Oued Meboudja qui proviennent des rejets de l'usine Sidérurgique ARCLOR METAL. Les données disponibles des variables régionalisées se situent dans l'espace à deux dimensions et sont distribuées irrégulièrement selon les cartes variographique.

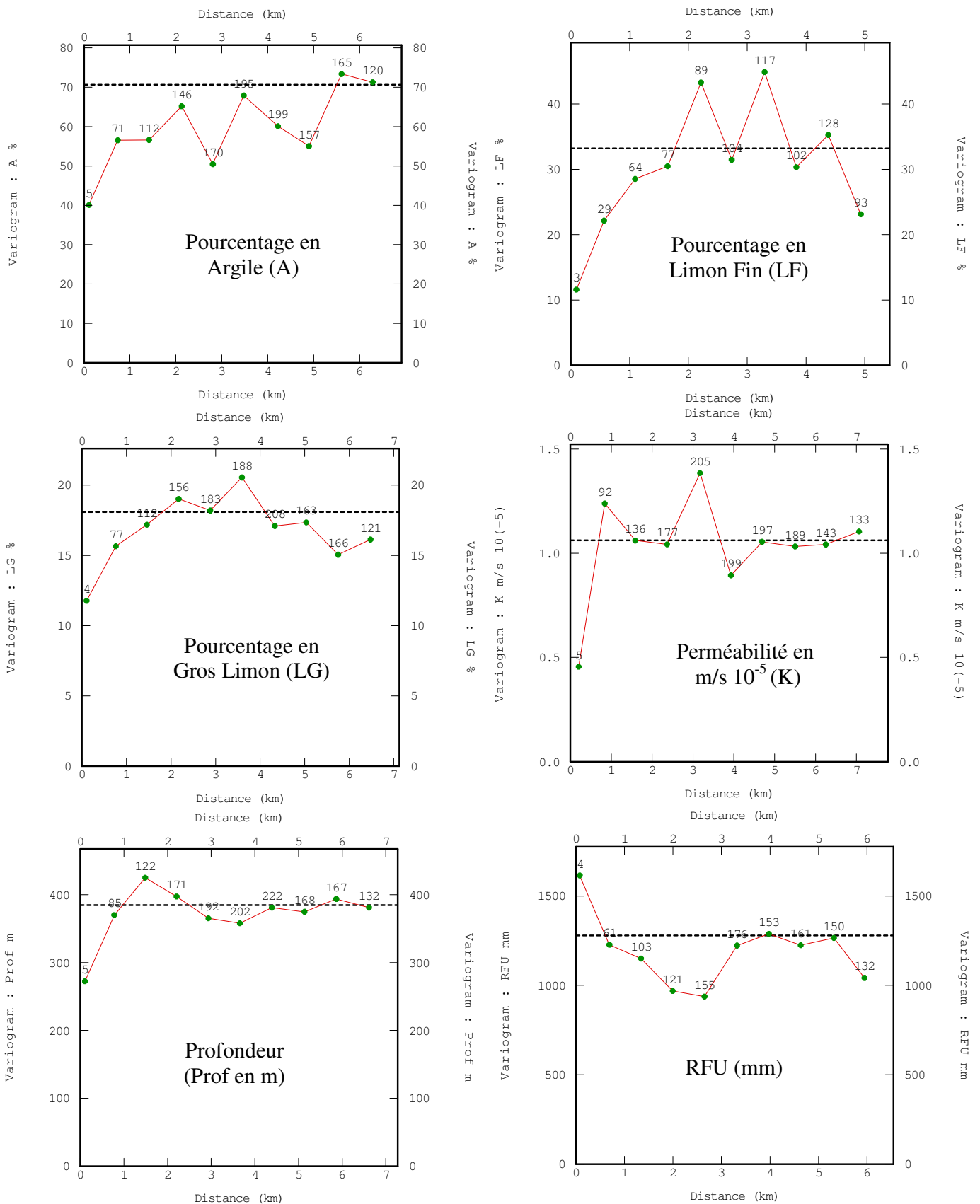
Les valeurs statistiques élémentaires des données sont réunies dans le tableau 1 suivant:

**Tableau 1:** Statistiques monovariabiles des données de la région

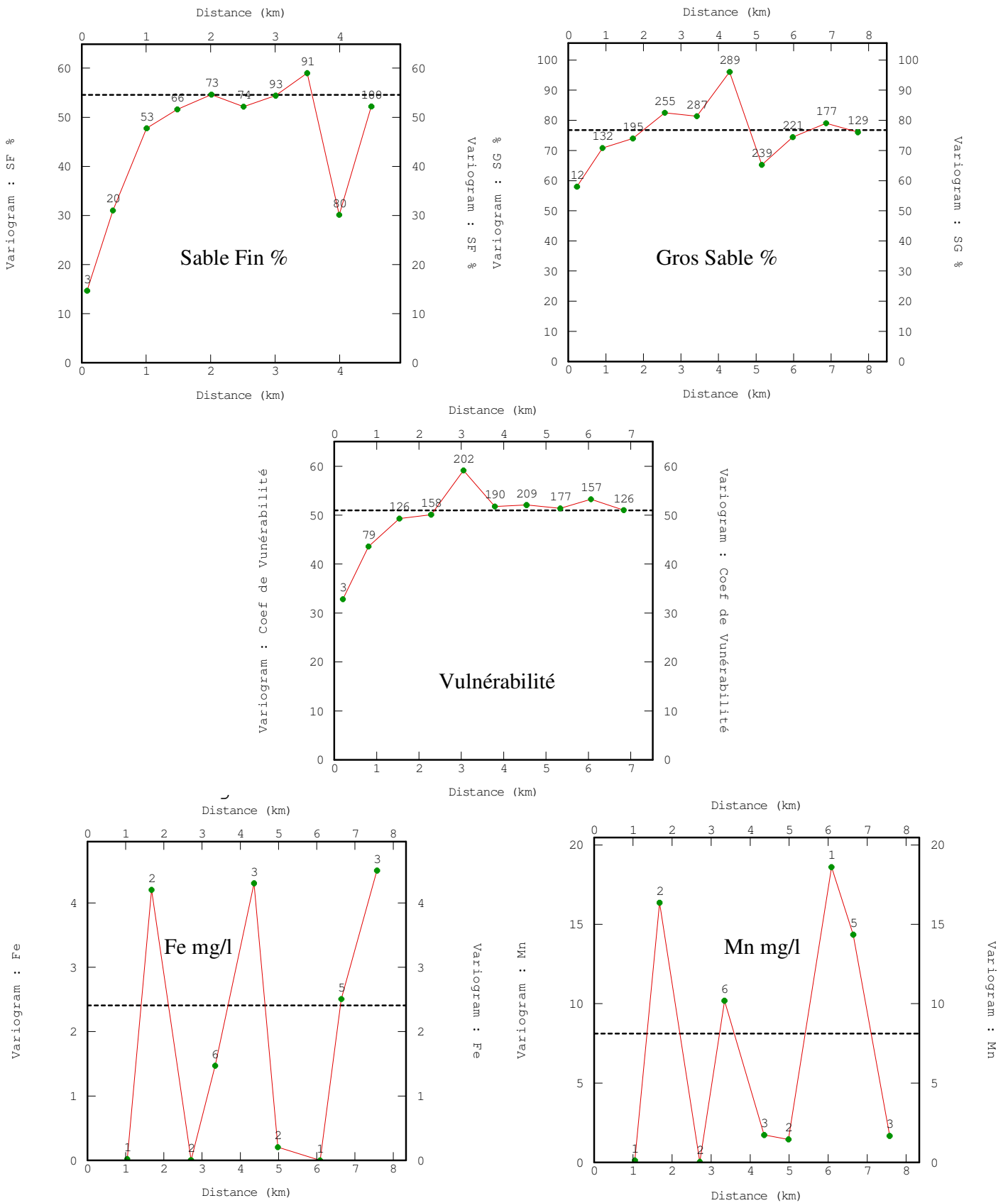
Variable		Nombre d'échantillons	Maximum	Minimum	Moyenne	Ecart- Type	Variance
X (km)		75	949.9	934.58	940.72	3.97	15.73
Y (km)		75	398.52	390.46	394.14	1.92	3.69
Argile %		75	45.66	11	32.73	8.41	70.64
Limon %	Fin	75	35.66	2	19.22	6.31	37.53
	Gros	75	27.5	6	17.06	4.36	19.04
Sable %	Fin	75	44.66	5.66	16.86	8.02	64.28
	Gros	75	59.66	5	13.18	8.76	76.78
Profondeur (m)		75	175	60	130.92	19.61	384.5
Perméabilité (m/s) $\times 10^{+5}$		75	8.04	0.26	1.98	1.42	2
RFU (mm)		75	180	0	47.27	35.76	1278.6
X (km)		73	949.9	934.58	940.75	3.99	15.92
Y (km)		73	398.52	390.46	394.1	1.93	3.72
Coef. de Vulnérabilité		73	130	90	111.81	7.63	58.21
X (km)		9	947	935	941.45	4.06	16.5
Y (km)		9	399.3	394.7	396.99	1.62	2.62
Fe (mg/l)		9	5.2	0.1	0.94	1.55	2.41
Mn (mg/l)		9	8.6	0.2	2.47	2.85	8.12

## **II.2. Etude de la corrélation des données:**

Pour étudier la corrélation des données, la géostatistique utilise la fonction de variogramme qui quantifie la corrélation entre les données. Sur la figure 9, nous avons présenté les variogrammes expérimentaux des données pour le % en Argile, % en Limon, % en Sable, Profondeur (m), Perméabilité (m/s), RFU (mm), Vulnérabilité, Fer (mg/l) et le Manganèse (mg/l).



**Figure 9:** Variogrammes Expérimentaux des données des variables la plaine Ouest d'El Hadjar



**Figure 9:** (Suite) Variogrammes Expérimentaux des données des variables la plaine Ouest d'El Hadjar

Sur la figure 9, nous avons calculé les variogrammes expérimentaux avec des différents pas en kilomètre, et pour lisser et robustifier ces variogrammes expérimentaux lorsque l'échantillonnage n'est pas régulier, on a modifié la tolérance sur les distances avec de 90° de tolérance angulaire.

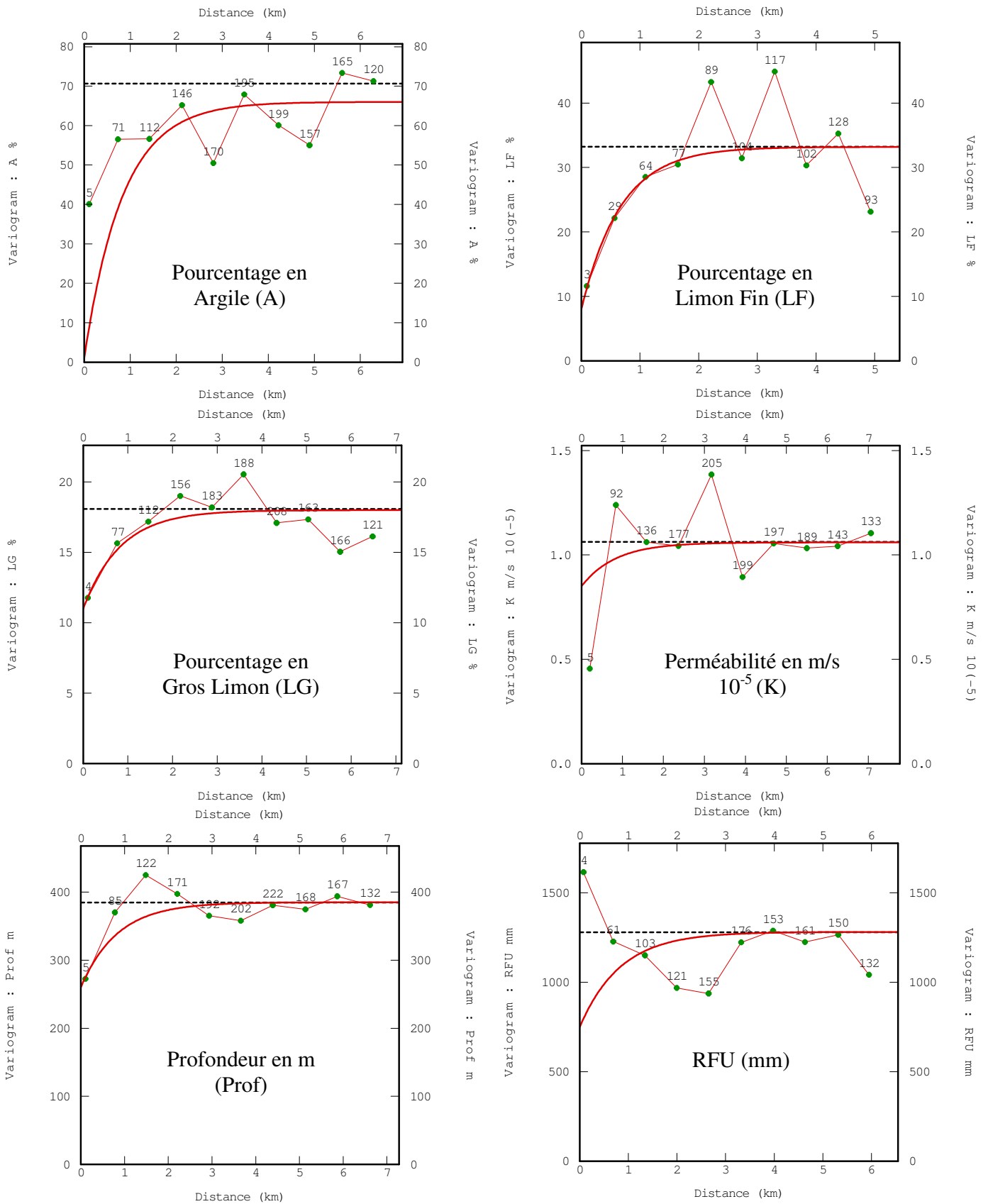
L'existence de ce palier permet de conclure que l'intégralité de la variabilité spatiale a été observée, et les valeurs des variogrammes expérimentaux se stabilisent autour des valeurs illustrées dans le tableau 2.

**Tableau 2:** Les valeurs de stabilisation du variogrammes expérimentaux des données des variables de la plaine Ouest d'El Hadjar

Propriétés de la région		Stabilisation
Argile %		71
Limon %	Fin	33
	Gros	18.3
Sable %	Fin	54.3
	Gros	76.5
Profondeur (m)		381
Perméabilité (m/s)		1251
RFU		1255
Vulnérabilité		51
Fe (mg/l)		2.4
Mn (mg/l)		8.2

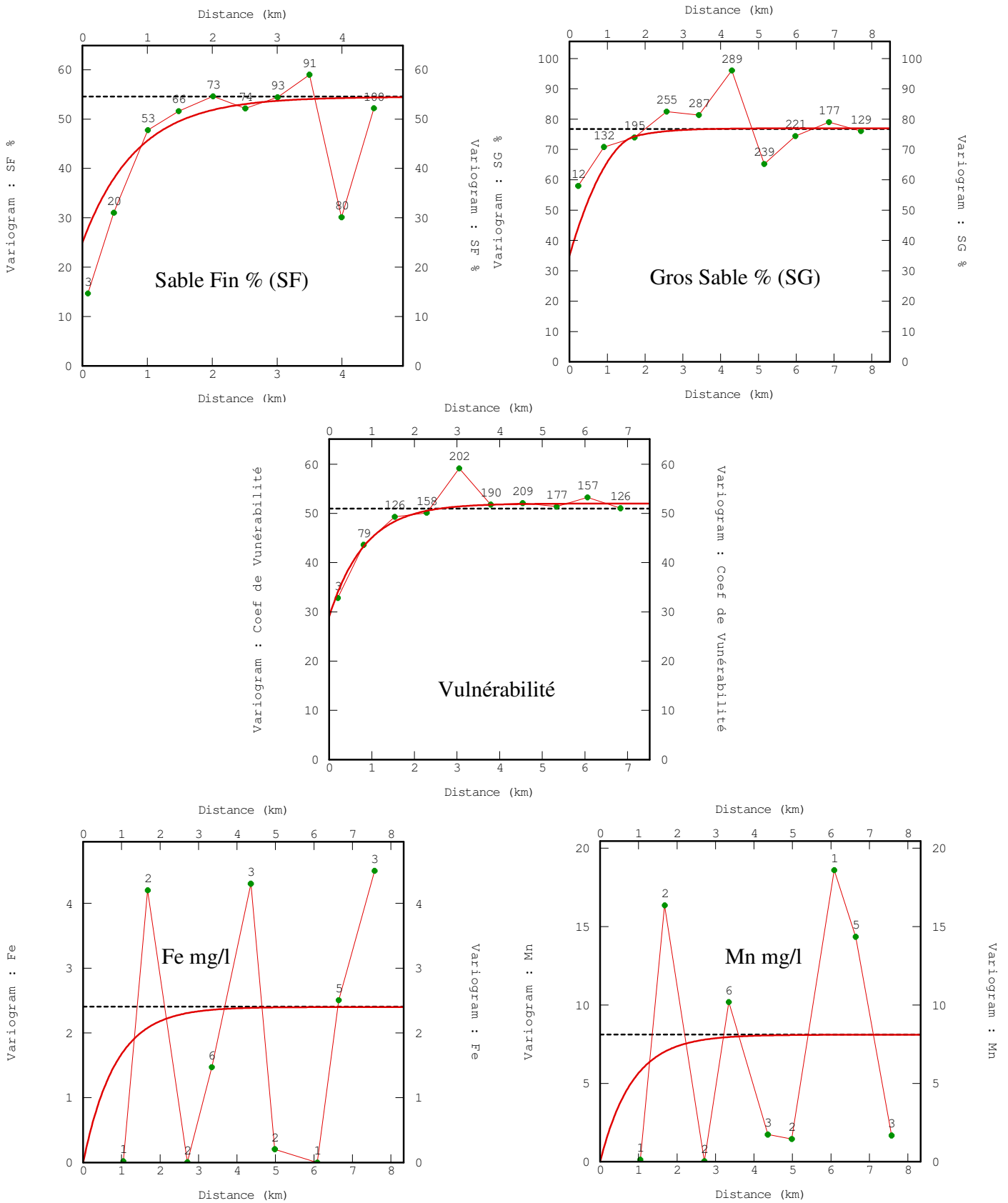
### **II.3. Ajustement du variogramme:**

Pour ajuster ces variogrammes expérimentaux, nous avons utilisé les modèles du variogramme théorique qui a été pratiqué en hydrogéologie, c'est ce qu'on a mentionné dans la partie théorique. Les variogrammes expérimentaux ajustés par des modèles théorique, sont illustrés sur la figure 10.



**Figure 10:** Ajustement des Variogrammes Expérimentaux par des modèles théorique des données des variables de la plaine Ouest d'El Hadjar

**Partie pratique**



**Figure 10: (Suite) Ajustement des Variogrammes Expérimentaux par des modèles théorique des données des variables de la plaine Ouest d'El Hadjar**

Dans le tableau 3 nous avons résumé les paramètres d'ajustement des variogrammes expérimentaux.

**Tableau 3:** Paramètres des variogrammes expérimentaux des données des variables de la plaine Ouest d'El Hadjar

Variable Paramètre	Argile %	Limon %		Sable %		Profondeur (m)	Perméabilité (m/s)	RFU	Vulnérabilité	Fe (mg/l)	Mn (mg/l)
		Fin	Gros	Fin	Gros						
Modèle Théorique	Exponentielle	Exponentielle	Exponentielle	Exponentielle	Exponentielle + Sphérique	Exponentielle	Exponentielle	Exponentielle	Exponentielle	Exponentielle	Exponentielle
Nombre Des échantillons	75	75	75	75	75	75	75	75	73	9	9
Pas (km)	0.7	0.548	0.72	0.5	0.857	0.733	0.786	0.663	0.76	0.48	0.84
Nombre de pas	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9	9
Tolérance Angulaire	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°
Tolérance sur les distances	0.35	0.274	0.36	0.25	0.4285	0.3665	0.393	0.3315	0.38	0.24	0.42
Effet de pépite	1	8	11	25	35	260	0.85	750	29	0	0
Portée (km)	2.5	2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Palier	65	25.2	7	29.5	21	125	0.21	531	23	2.4	8.1
Etendue	/	/	/	/	1.73	/	/	/	/	/	/

Nous avons réalisé un ajustement à un modèle exponentiel pour toutes les variables régionalisées de la plaine Ouest d'El Hadjar, sauf pour le cas du gros sable, on ajuste avec un couplage de deux modèles l'un exponentiel et l'autre sphérique, avec l'addition d'un effet de pépite de palier différent pour toutes les variables mis à part les deux métaux lourds le fer et le manganèse. Pour tous les variogrammes expérimentaux la tolérance sur le pas varie de 0.48 à 0.86 km et sur la distance de 0.24 à 0.43 km. Le pas moyen utilisé est de l'ordre de 0.67 km. D'après les valeurs des portées résumées dans le (tableau 3), elle est de 2 km. Donc, au-delà de cette portée il n'y a aucune corrélation.

Les modèles s'ajustent relativement bien aux valeurs expérimentales. On ne pourra jamais dire si ce modèle est bon.

#### **II.4. Validation du modèle de variogramme**

La méthode de validation croisée ne teste que la validité de la composante verticale du variogramme et non celle du reste du modèle. Afin de se mettre dans des conditions semblables à celles du Krigeage ultérieur, il vaut mieux faire le Krigeage en éliminant les points trop proches.

Une fois le modèle de variogramme déterminé, la procédure de validation croisée permet de comparer l'impact du choix du modèle sur les résultats de l'estimation. La validation croisée consiste à supprimer successivement chacune des données pour l'estimer ensuite par Krigeage à partir des autres.

Dans cette partie, nous comparons par la validation croisée la qualité de l'estimation pour les données de la plaine Ouest d'El Hadjar, celle-ci est présentée sur les figures de 25 jusqu'au 35 (voir Annexe), tel que pour le % en Argile, % en Limon, % en Sable, Profondeur (m), Perméabilité (m/s), RFU, Vulnérabilité, Fer (mg/l) et le Manganèse (mg/l). Les résultats de la validation croisée sont donc présentés dans le tableau 4; l'erreur est calculée comme la différence entre le niveau de l'exposition mesurée et son estimation.

D'après les résultats ulistrés dans le tableau des validations croisées, les estimations sont globalement sans biais, c'est-à-dire l'erreurs de moyenne presque nulle et les erreurs standardisées ont une variance proche de 1 pour tous les variables da la plaine Ouest d'El-Hadjar. Par ailleurs, ce qui montre que les modèles de variogramme permet d'apprécier correctement l'amplitude des erreurs commises.

**Tableau 4:** Statistiques des Validations Croisée basées sur les données robustes des variables de la plaine Ouest d'El Hadjar  
(Erreurs standardisées situées dans l'intervalle [-2.5; +2.5])

Propriétés de la région		Nombre Des échantillons	valeurs non estimée	Les types d'erreurs	Moyenne	Variance
Argile %		72	4%	Erreur	0.38977	44.95135
				Erreur Standardisée	0.06446	1.10788
Limon %	Fin	75	0%	Erreur	0.08284	30.36567
				Erreur Standardisée	0.01918	1.19059
	Gros	75	0%	Erreur	0.03313	18.72300
				Erreur Standardisée	0.01114	1.10187
Sable %	Fin	75	0%	Erreur	0.32051	35.97504
				Erreur Standardisée	0.05197	0.75922
	Gros	75	0%	Erreur	-0.12544	68.58313
				Erreur Standardisée	-0.01816	1.06089
Profondeur (m)		75	0%	Erreur	-0.90067	417.57507
				Erreur Standardisée	-0.04495	1.09961
Perméabilité (m/s)		72	4%	Erreur	0.20413	1.20802
				Erreur Standardisée	0.19634	1.11601
RFU		75	0%	Erreur	0.16688	1433.53990
				Erreur Standardisée	0.00347	1.19645
Vulnérabilité		71	5.33%	Erreur	-0.83793	50.53461
				Erreur Standardisée	-0.12054	1.03445
Fe (mg/l)		9	0%	Erreur	-0.00679	2.88437
				Erreur Standardisée	-0.00225	1.09121
Mn (mg/l)		9	0%	Erreur	-0.04137	10.41893
				Erreur Standardisée	0.00712	1.19667

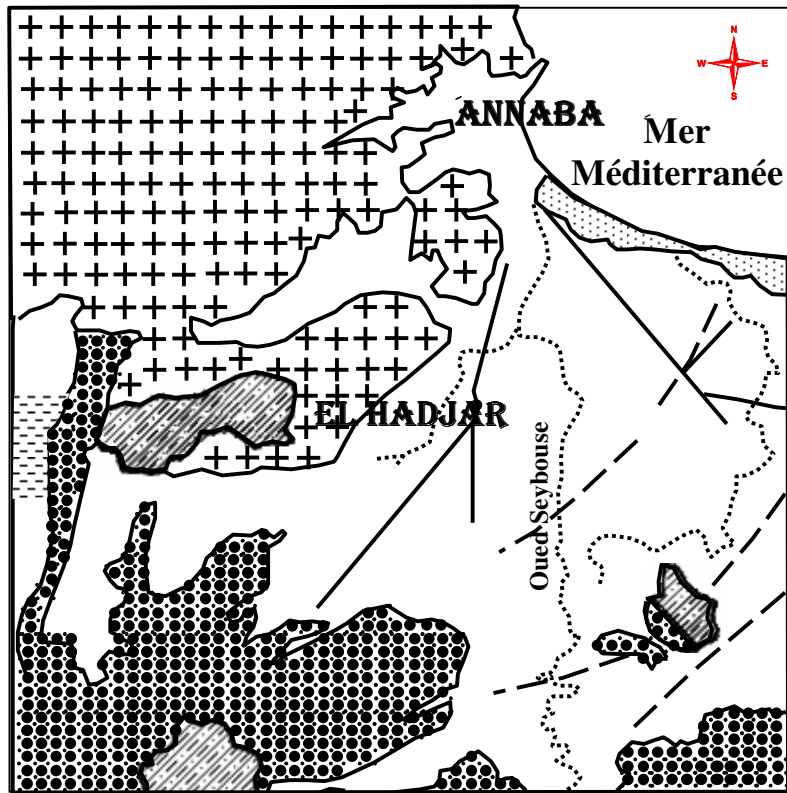
**II.5.    Krigeage:**


**A. Etude hydrogéologique:**

**A.I.    APERÇU GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE**

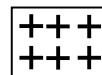
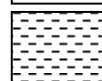

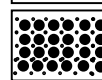
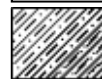



Les aquifères de la région de Annaba occupent une superficie de près de 500 km<sup>2</sup>. La région, située au nord-est de l'Algérie, est bordée au Nord par la mer Méditerranée, à l'Est par les marécages de Mekrada, à l'Ouest par le massif de l'Edough, dominant Annaba, et par le lac Fetzara situé plus au Sud. Elle est limitée au Sud par le prolongement oriental de la chaîne numidique (Monts de la Cheffia et d'El-Kala). Elle constitue la basse plaine des Oueds Ressoul et Seybouse.

Les figures 11 et 12 nous donnent un aperçu géographique, géologique et administratif de la région d'Annaba.

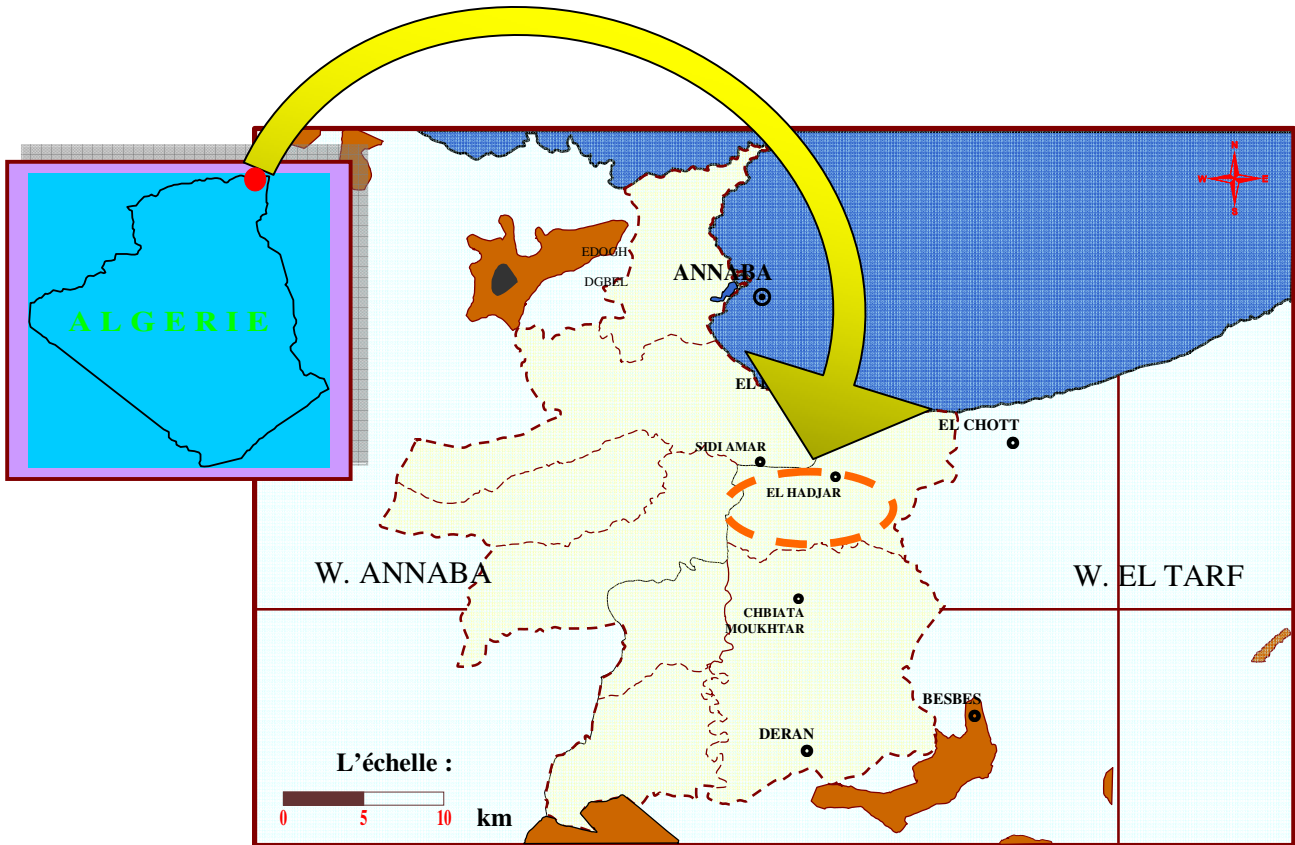


Echelle  
  
 0 5.5 Km

Légende :

- |   |   |
|---|---|
|  | Formation métamorphique.                  |
|  | Lac ou marecage.                          |
|  | Alluvions récentes et actuelles.          |
|  | Alluvions anciennes terraces des vallées. |
|  | Grés ou argile de numidien.               |
|  | Dunes.                                    |
|  | Axe des fosses.                           |
|  | Tracé de coupe.                           |

**Figure 11:** Situation géographique et géologique des plaines de la région d'Annaba (d'après Strojexport, 1975, modifié).



**Légende :**

- Limite de wilaya
- - - Limites des communes
- La zone d'étude
- ⊙ Chef lieu de wilaya
- Chef lieu de la commune

**Figure 12:** Carte administrative de la plaine d'Annaba

### **Cadre Géomorphologique :**

La région d'Annaba est constituée par une forme morphologique très importante telle que les montagnes, les plaines et le lac Fetzara. Et qu'on a consacré notre étude sur la plaine Ouest d'El Hadjar, nous donnons une impression générale en quelques lignes sur le cadre géomorphologique de cette dernière. La plaine d'El Hadjar présente une forme inclinée vers la mer et occupe la partie Est du fond de la cuvette du lac Fetzara, la liaison entre le lac et la plaine d'El Hadjar se fait par l'Oued Meboudja.

## **A.II. PEDOLOGIE**

### **A.II.1. Les différentes classes de sols:**

#### **A.II.1.a. Les sols peu évolués: d'origine non climatique (SPE):**

D'après l'étude géographique et géologique nous avons ce type de sols essentiellement sur les terres onduleuses des pieds de montagnes et sur les terrasses. L'épaisseur varie selon leur position topographique, et ils se caractérisent par une très faible rétention d'eau, une perméabilité très élevée et un taux de matières organiques moyen.

#### **A.II.1.b. Les vertisols (SV):**

Les vertisols sont des sols riches en argile gonflante; ils ont de mauvaises propriétés physiques (sols lourds), possèdent une texture très fine et présentent un mauvais drainage. On distingue deux classes, les sols à drainage externe nul ou réduit et les sols à drainage externe possible.

#### **A.II.1.c. Les sols hydromorphes (SH)**

Ces sols sont fréquents à l'Ouest, au sud, à coté de la plaine Ouest d'El Hadjar. Ce sont des sols caractérisés par une texture très fine et une faible perméabilité. La présence d'une nappe explique alors l'hydromorphie temporaire ou permanente.

#### **A.II.1.d. Les sols halomorphes (SHA)**

Ces sols se trouvent dans une petite partie de la plaine d'El Hadjar. Ce sont des sols caractérisés par l'accumulation des sels solubles, à texture lourde et riches en minéraux argileux gonflants.

#### **A.II.1.e. Les sols calcimagnésiques (SC):**

On les observe ces sols à la plaine Ouest d'El Hadjar. Ce sont des sols à texture favorable, à dominance de calcium et de magnésium, de texture fine à moyennement fine et de perméabilité modérée. Leur teneur en calcaire total peu élevée n'affecte pas l'assimilabilité de certains éléments tels que le phosphore et le potassium.

#### **A.II.1.f. Sols minéraux bruts (SMB):**

Ces sols sont fréquents dans la plaine Ouest d'El Hadjar sont constitués d'une texture sableuse, ils se caractérisent par une très faible rétention d'eau, une perméabilité très élevée, une structure continue et un taux de matière organique moyen.

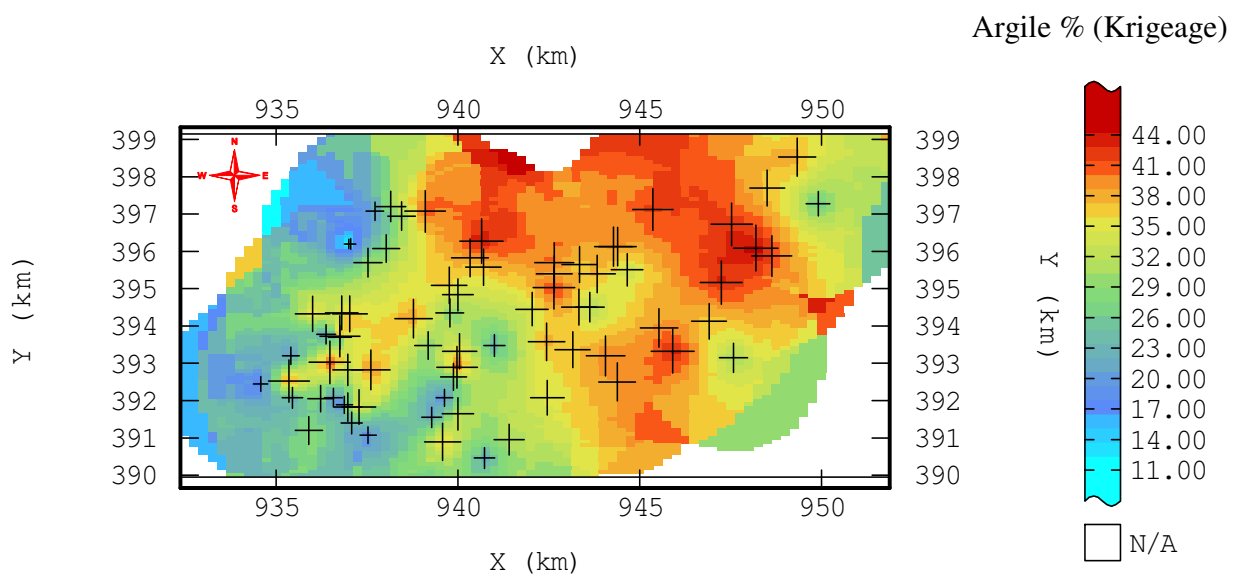
## **A.II.2. Les caractéristiques physiques des sols:**

### **A.II.2.a. La texture:**

Elle est considérée comme l'une des plus importantes propriétés et concerne la qualité physique des terres. C'est la composition élémentaire du sol, c'est-à-dire les proportions des particules minérales constitutives des sols classées suivant leur dimension. La texture influe sur la disponibilité en eau, sur le taux d'infiltration, sur le drainage et sur la capacité de rétention des éléments nutritifs. La texture est caractérisée par les différentes propriétés suivantes:

#### **A.II.2.a.i. Argile:**

L'argile est l'une des propriétés qui permettent de tester la qualité physique des terres, la figure 13 présente la variabilité du pourcentage en argile obtenu par la méthode de Krigeage. Sur cette figure nous avons présenté la variation du pourcentage en argile de la plaine Ouest d'El Hadjar, cette variabilité indique que la nappe phréatique n'est pas protégée à l'Ouest de cette zone. La très faible teneur en argile nous permet de dire qu'il existe une fine couche d'argile à côté de l'Oued Meboudja qui est perméable aux métaux lourds contenus dans ce dernier, et qui proviennent des rejets de l'usine d'El Hadjar. Ceux-ci polluent la nappe phréatique, on remarque aussi qu'au centre et un peu à l'Est de la plaine, on a une couche épaisse en argile qui est imperméable aux métaux lourds, ce qui protège cette zone.



**Figure 13:** Estimation du taux en argile par la méthode de Krigage de la plaine Ouest d'El Hadjar

A.II.2.a.ii. Limon:

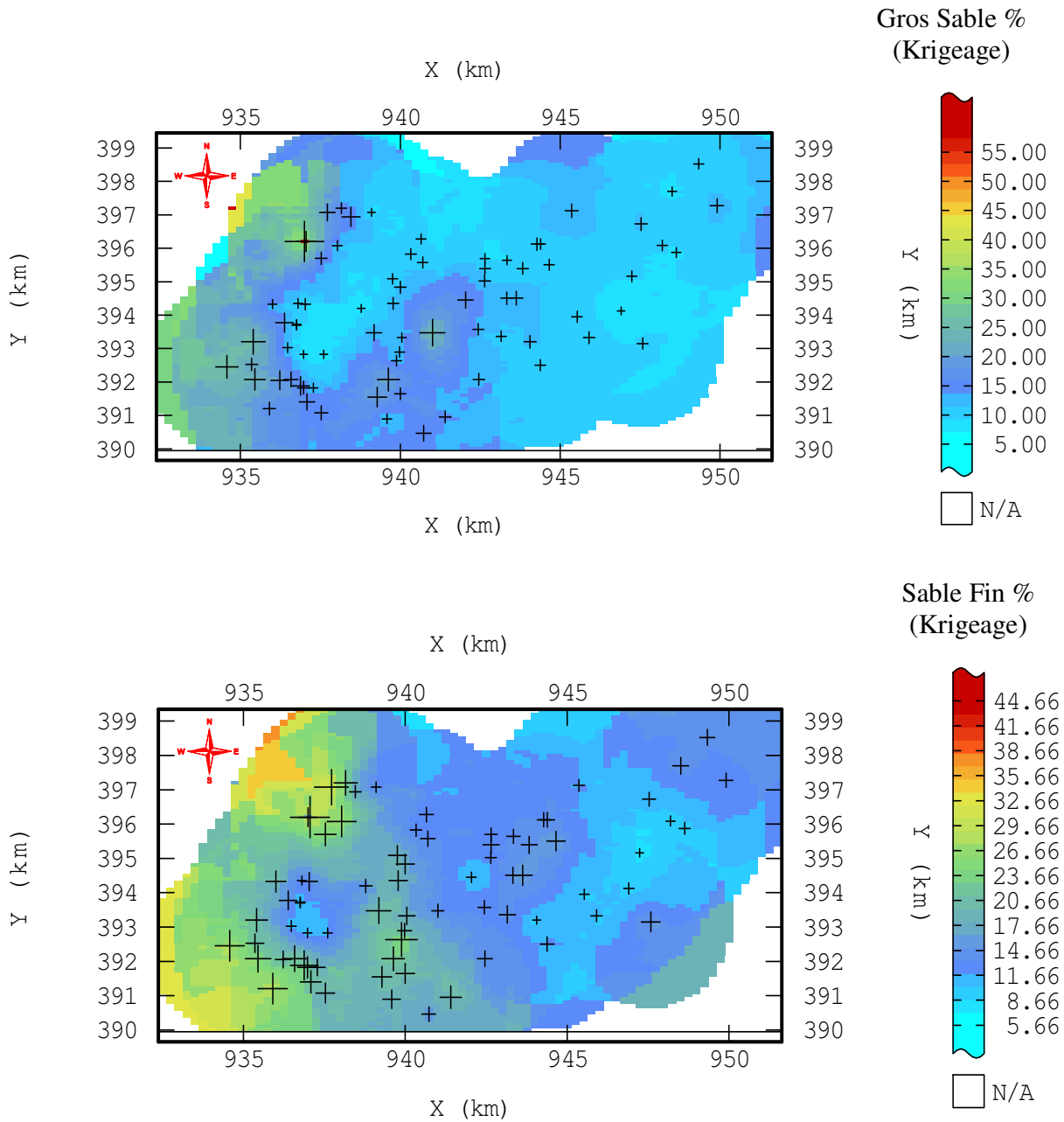
Dans le cadre de la protection de la nappe phréatique contre une éventuelle pollution, et pour avoir aussi une idée sur la texture de la plaine Ouest d'El Hadjar, nous avons fait une étude du pourcentage en limon, cette plaine est caractérisée par deux types de limon (gros et fin).

Nous avons également suivi la variation du pourcentage en limon (gros et fin) par la méthode de Krigeage, illustrée dans la figure 14. Ici nous constatons qu'on a un très faible pourcentage des deux types de limon à l'Ouest et au Nord-Ouest de la plaine exactement à coté de l'Oued, dans cette zone aussi la nappe phréatique n'est pas protégée. La fine couche de limon est perméable aux métaux lourds contenus dans l'Oued.



A.II.2.a.iii. Sable:

La figure 15 présente la variation du pourcentage du sable (gros et fin) de la plaine Ouest d'El Hadjar toujours par la méthode de Krigeage. D'après ces résultats nous remarquons qu'il y a une petite quantité en sable (gros et fin) au centre, à l'Est et au Sud de la zone. Mais le grand pourcentage en sable (gros et fin) se trouve à l'Ouest de la plaine ce qui s'explique par une grande infiltration, qui est confirmée par le coefficient de perméabilité et l'évaporation qui interprète la quantité minimale en RFU. Donc on peut dire que la nappe phréatique n'est pas protégée à côté d'Oued Meboudja.



**Figure 15:** Estimation du pourcentage en sable (gros et fin) par la méthode de Krigage de la plaine Ouest d'El Hadjar

**A.II.2.b. La perméabilité K (m/s):**

La perméabilité est liée à la texture du sol. Une terre sableuse ne favorise pas l'avance de l'eau, la laissant filtrer trop rapidement. Une terre très argileuse est souvent peu perméable. La texture moyenne permettra à la fois l'écoulement de l'eau et une bonne diversification.

La perméabilité s'exprime par le volume d'eau qui traverse le sol par unité; de temps (heure) et on peut l'exprimer facilement par la vitesse de filtration (K):

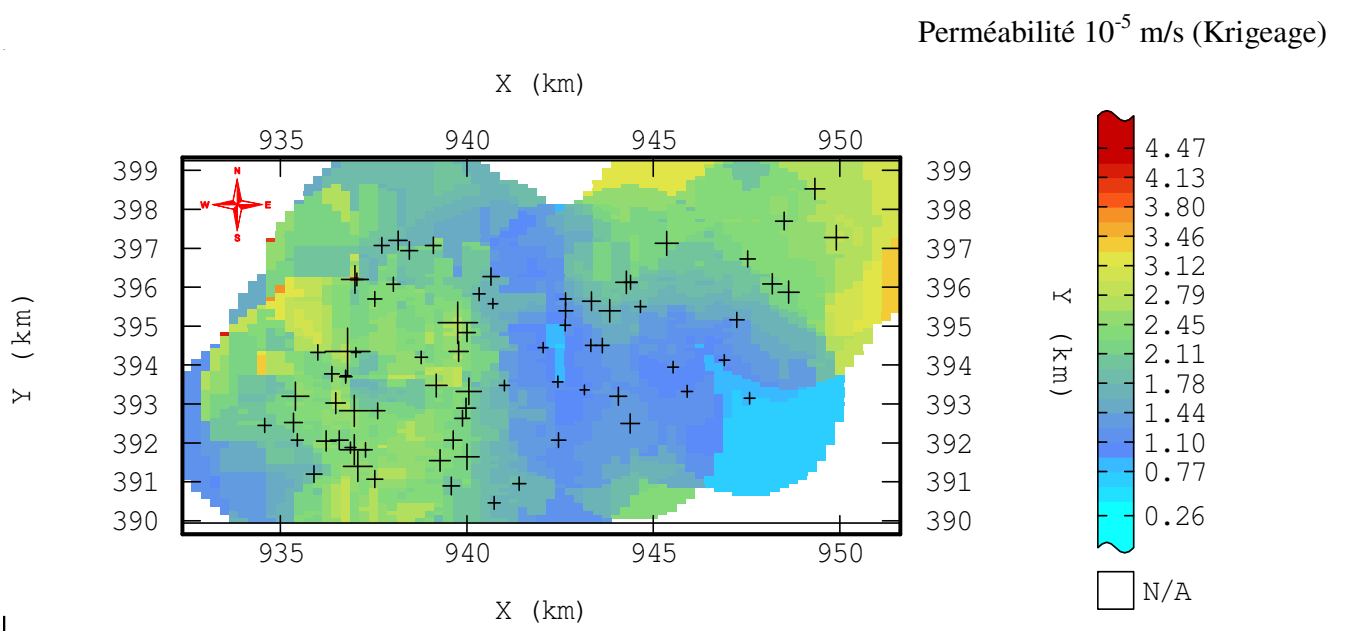
$$K = Q / S$$

Où

Q = volume en cm<sup>3</sup>.

S = section du tube contenant le sol en cm<sup>3</sup>.

Nous constatons d'après les résultats présentés sur la figure 16 que la plaine Ouest est peu perméable au Sud-Est, au centre et à l'extrême Sud-Ouest. Par contre il existe une zone perméable à côté de Oued Meboudja à l'Ouest et au Nord-Est, qui montre la présence d'une grande infiltration et évaporation, qui favorise la pollution de la nappe phréatique.



**Figure 16:** Estimation de perméabilité par la méthode de Krigage de la plaine Ouest d'El Hadjar

### **A.III.    *HYDROCLIMATOLOGIE***

Le fonctionnement de l'aquifère et l'évolution du niveau piézométrique dépendent étroitement des précipitations, des exutoires et des prélèvements. Il est significatif à cet égard de constater que les processus d'alimentation sont régis en partie par la fraction de pluie qui s'infiltré vers la zone saturée.

Toute étude hydroclimatologique nécessite des renseignements bien précis des différents facteurs climatiques pour mieux comprendre leur influence sur la région d'étude.

#### **A.III.1.    Etude des éléments essentiels du climat:**

##### **A.III.1.a.    Les précipitations:**

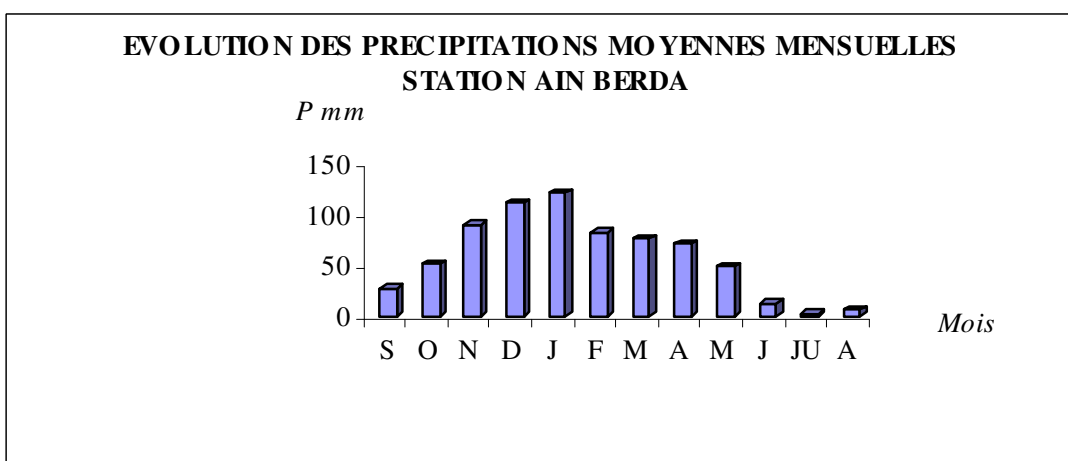
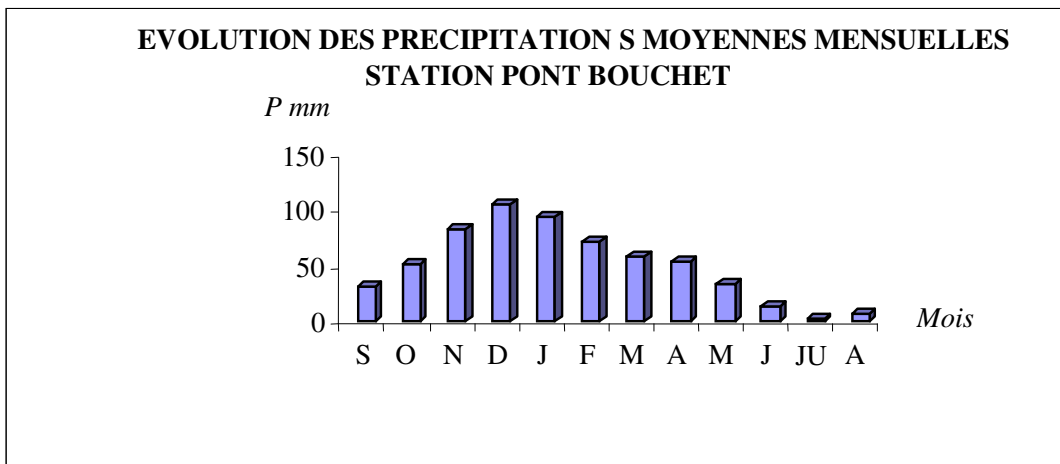
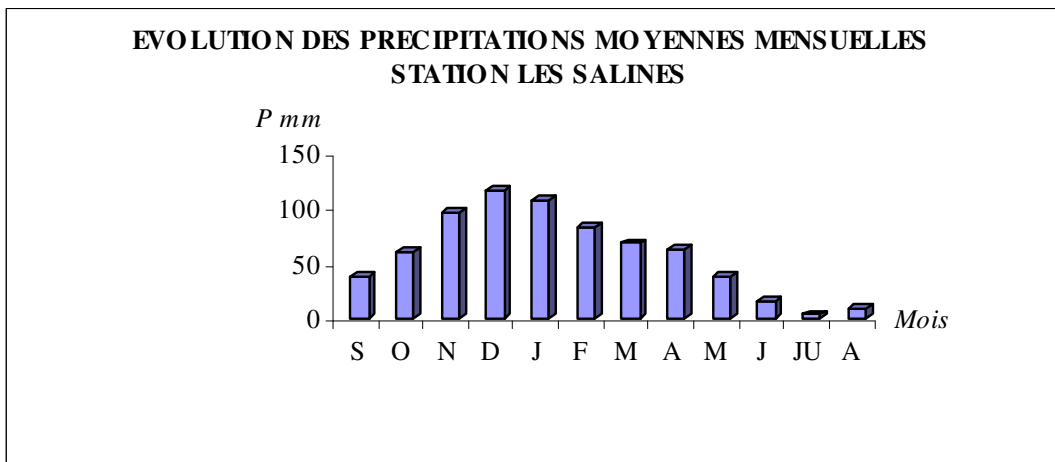
La précipitation est un paramètre indispensable dans l'établissement du bilan hydrique. Elle joue un rôle essentiel dans le comportement hydrologique des cours d'eaux.

L'établissement des histogrammes (figure 17) visualise une allure en cloche où le maximum est enregistré au mois de Décembre pour les deux stations (les Salines et Pont Bouchet) et au mois de Janvier pour la station de Ain Berda, et le minimum apparaissant au mois de juillet pour les trois stations.

Il est utile de noter encore la forte variabilité des hauteurs des précipitations mensuelles entre les mêmes mois de la période (77/78)-(06/07) des trois stations.

La moyenne des hauteurs des précipitations annuelles des trois stations sont:

- Les Salines.
- Pont Bouchet.
- Ain Berda.



**Figure 17:** Histogrammes des précipitations moyennes mensuelles (1977-2007)

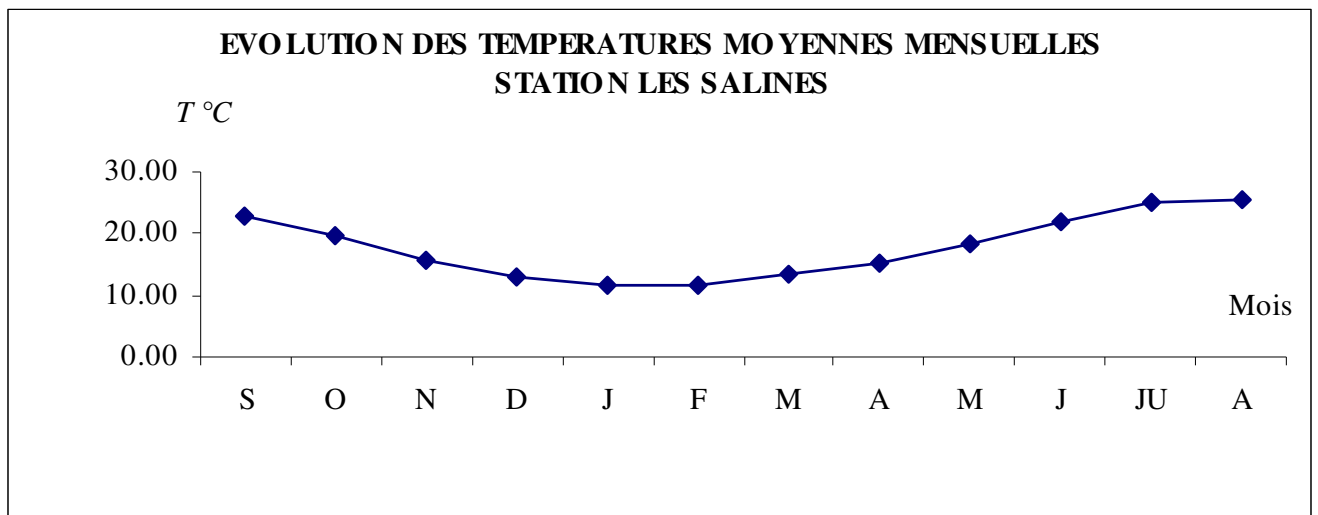
**A.III.1.b. Température:**

La température constitue un facteur important dans toute étude climatique. Elle nous permet d'étudier l'évapotranspiration et l'établissement du bilan hydrique de la région d'étude.

Comme nous ne disposons pas des températures mensuelles de deux stations Pont Bouchet et Ain Berda, nous avons pu avoir celle de la station des salines qui présente les mêmes conditions de climat et de relief.

L'analyse de la courbe d'évolution des températures moyennes mensuelles (figure 18) montre l'existence de deux périodes:

- La première période où la température croît progressivement du mois Février au mois d'Août.
- La deuxième période où la température décroît du mois d'Août au mois de Janvier.



**Figure 18:** La courbe des températures moyennes mensuelles (1977-2007)

### **A.III.2. Le Bilan hydrique**

Le bilan hydrique exprime le processus que suit une quantité d'eau arrivant au sol par précipitation ou neige avant de retourner à l'atmosphère.

#### **A.III.2.a. L'évapotranspiration:**

L'évapotranspiration correspond à la somme de la quantité d'eau évaporée par suite d'un déficit hygrométrique de l'air et la quantité d'eau transpirée par la végétation.

##### **A.III.2.a.i. Evapotranspiration potentielle: "formule de THORNTHWAITE "**

La formule empirique proposée par THORNTHWAITE se présente sous la forme:

$$ETP = 16 \times (10 \times t/I)^a \times k$$

$$i = (t/5)^{1.5}$$

$$I = \sum i$$

$$a = (1.6/100) \times I + 0.5$$

où:

t : Température moyenne annuelle en °C

i : Indice thermique mensuel

I : Somme des indices mensuels

ETP : Evapotranspiration potentielle mensuelle en mm

k : Terme correctif, dépend de la durée d'insolation

##### **A.III.2.a.ii. Evapotranspiration réelle par la méthode de C. W.**

##### **THORNTHWAITE**

Pour l'établissement du bilan mensuel on utilise l'évapotranspiration potentielle et réelle moyenne par la méthode de C.W. THORNTHWAITE.

Ce bilan repose sur l'hypothèse suivante :

- la satisfaction de l'ETR est prioritaire sur l'écoulement.
- Le calcul de l'ETR peut s'effectuer suivant deux cas :
  - 1<sup>er</sup> cas :  $P > ETP \Rightarrow ETR = ETP$  on a alors un excédent.
  - 2<sup>eme</sup> cas:  $P < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$ .

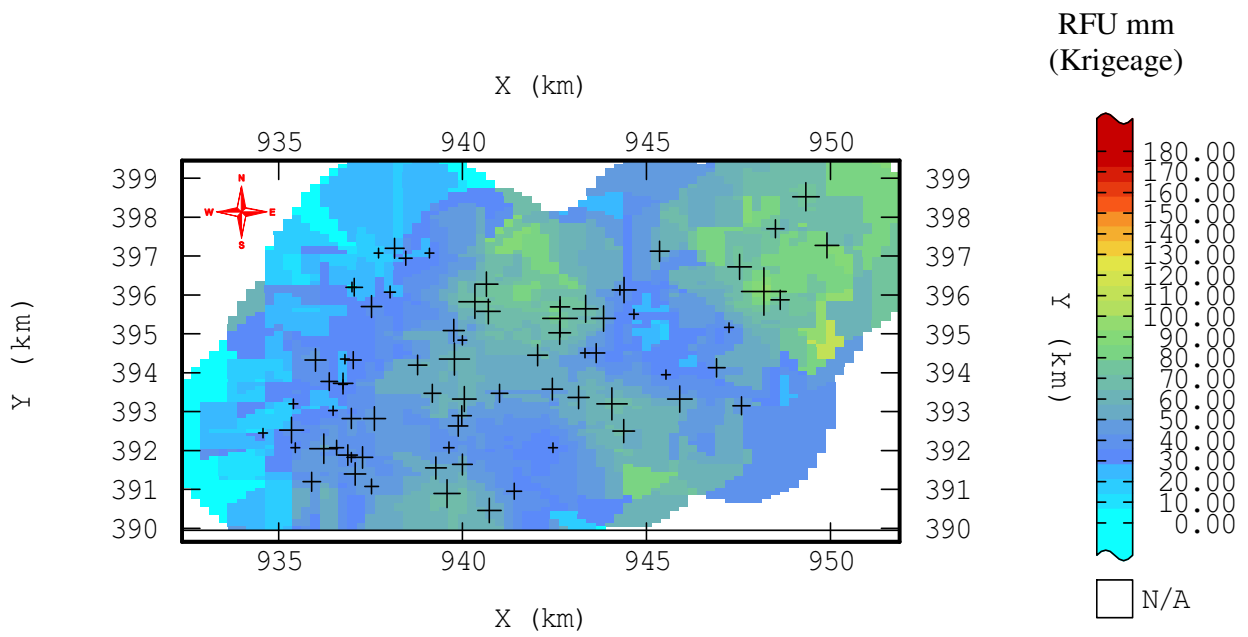
**A.III.2.b.      Calcul de la réserve facilement utilisable (RFU):**

Elle présente la quantité d'eau emmagasinée dans le sol, son degré de saturation dépend de plusieurs facteurs :

- la nature, la lithologie et l'épaisseur de la couche superficielle;
- la profondeur du niveau piézoélectrique de la nappe aquifère;
- le climat de la région;
- le type de la couverture végétale.

La réserve facilement utilisable correspond à la quantité d'eau du sol en dessous de laquelle une plante flétrit.

La figure 19 présente une estimation de RFU par la méthode de Krigeage de la plaine Ouest d'El Hadjar, la réserve facilement utilisable est exprimée en (mm), et avec ce paramètre on peut confirmer la présence en argile dans notre champ d'étude. D'après cette figure nous remarquons qu'on a une réserve importante au centre et au Nord-Est de la plaine, qui est constituée d'un sol argileux; pour le reste de la plaine nous avons une quantité moins importante qui explique la présence du gros pourcentage en sable.



**Figure 19:** Estimation de RFU par la méthode de Krigage de la plaine Ouest d'El Hadjar

**A.III.2.c. Interprétation du bilan hydrique:**

Dans le tableau 5 nous présentons les bilans hydriques sur une période qui s'étale de l'année 1977/78 à l'année 2006/07 pour les trois stations de notre région d'étude, on remarque que :

la réserve facilement utilisable est épuisée à partir du mois d'octobre jusqu'au mois de Juin où l'épuisement du stock commence; ce qui provoque une période marquée par un déficit agricole. Notons que l'ETP atteint son maximum au mois de Juillet avec une valeur de 159.13 mm, et un minimum au mois de Janvier avec une valeur de 21 mm, et que l'écoulement commence à ce manifester à partir du mois de Décembre et continu jusqu'au mois de Mars.

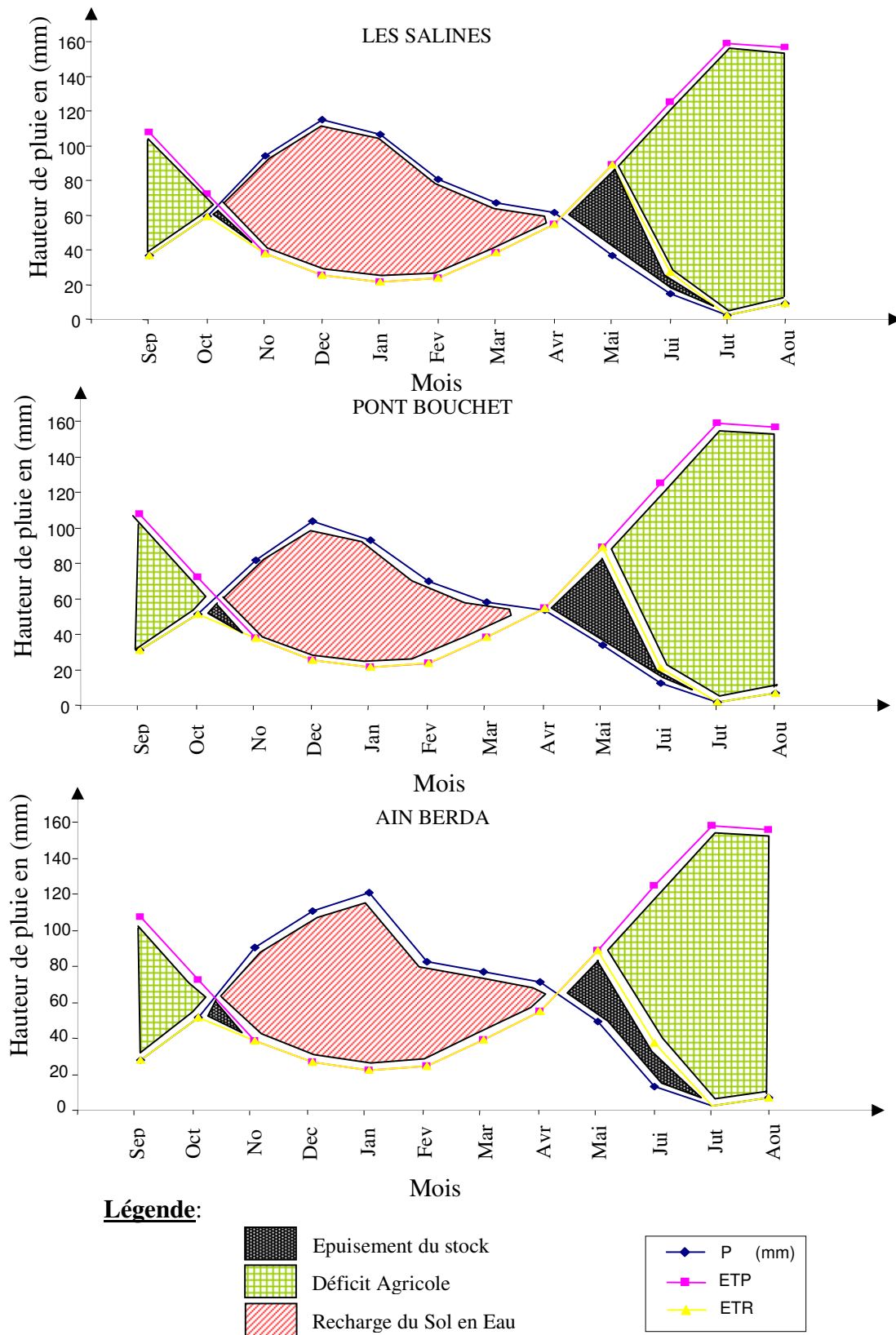
La figure 20 représente graphiquement les résultats des bilans hydriques de THORNTHWAITE illustrés dans le tableau 5 pour les trois stations de la plaine Ouest d'El Hadjar.

**Tableau 5 :** Bilans hydriques d'après la méthode de THORNTHWAITE pour les trois stations de la plaine Ouest d'El Hadjar  
(1977/78-2006/07) a = 1.83

LES SALINES	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Ju	A	TOT
P mm	36.6	59.5	94.4	115.1	106.4	80.9	67.2	61.4	36.5	14.6	2.4	8.9	683.9
T	22.94	19.92	15.52	13.05	11.55	11.76	13.25	15.03	18.22	21.88	24.92	25.70	213.74
I	9.83	7.95	5.47	4.22	3.51	3.61	4.31	5.21	6.96	9.15	11.13	11.65	83.00
K	1.05	0.91	0.75	0.7	0.73	0.78	1.02	1.15	1.32	1.33	1.33	1.24	-
ETP	107.96	72.27	37.72	25.64	21.38	23.61	38.41	54.54	89.04	125.41	159.13	156.97	912.09
RFU 65 mm	0	0	56.68	65	65	65	65	65	12.46	0	0	0	-
ETR	36.6	59.5	37.72	25.64	21.38	23.61	38.41	54.54	89.04	27.06	2.4	8.9	424.8
DA	71.36	12.77	0	0	0	0	0	0	0	98.35	156.73	148.07	487.28
Ex	0	0	0	81.14	85.02	57.29	28.79	6.86	0	0	0	0	259.1

PONT BOUCHET	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Ju	A	TOT
P mm	31.30	51.10	81.90	103.70	93.20	70.10	57.90	53.60	33.60	12.20	1.70	6.80	597.10
T	22.94	19.92	15.52	13.05	11.55	11.76	13.25	15.03	18.22	21.88	24.92	25.70	213.74
I	9.83	7.95	5.47	4.22	3.51	3.61	4.31	5.21	6.96	9.15	11.13	11.65	83.00
K	1.05	0.91	0.75	0.70	0.73	0.78	1.02	1.15	1.32	1.33	1.33	1.24	-
ETP	107.96	72.27	37.72	25.64	21.38	23.61	38.41	54.54	89.04	125.41	159.13	156.97	912.09
RFU 65 mm	0.00	0.00	44.18	65.00	65.00	65.00	65.00	64.06	8.62	0.00	0.00	0.00	-
ETR	31.30	51.10	37.72	25.64	21.38	23.61	38.41	54.54	89.04	20.82	1.70	6.80	402.06
DA	76.66	21.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	104.59	157.43	150.17	510.02
Ex	0.00	0.00	0.00	57.24	71.82	46.49	19.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	195.04

AIN BERDA	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Ju	A	TOT
P mm	27.20	51.00	90.60	111.10	121.30	82.50	76.60	71.10	48.80	11.80	1.30	6.00	699.30
T	22.94	19.92	15.52	13.05	11.55	11.76	13.25	15.03	18.22	21.88	24.92	25.70	213.74
i	9.83	7.95	5.47	4.22	3.51	3.61	4.31	5.21	6.96	9.15	11.13	11.65	83.00
K	1.05	0.91	0.75	0.70	0.73	0.78	1.02	1.15	1.32	1.33	1.33	1.24	-
ETP	107.96	72.27	37.72	25.64	21.38	23.61	38.41	54.54	89.04	125.41	159.13	156.97	912.08
RFU 65 mm	0.00	0.00	52.88	65.00	65.00	65.00	65.00	65.00	24.76	0.00	0.00	0.00	-
ETR	27.20	51.00	37.72	25.64	21.38	23.61	38.41	54.54	89.04	36.56	1.30	6.00	412.40
DA	80.76	21.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	88.85	157.83	150.97	499.68
Ex	0.00	0.00	0.00	73.34	99.92	58.89	38.19	16.56	0.00	0.00	0.00	0.00	286.90



**Figure 20:** Représentations graphiques des bilans hydriques de THORNTHWAITE pour les trois stations de la plaine Ouest d'El Hadjar

**A.III.2.d. Répartition des précipitations****A.III.2.b.i. Détermination de ruissellement [R (mm)]:**

Le coefficient de ruissellement est calculé selon deux formules :

- 1<sup>ère</sup> formule de "TIXERONT.BERKALOFF "

$$R = P^3 / 3 \times ETP^2 \quad \text{si} \quad P < 600 \text{mm}$$

- 2<sup>ème</sup> formule de "TIXERONT.BERKALOFF" modifiée par "ROMANTCHOUK (1974) "

$$R = P^3 / 3 \quad \text{si} \quad P > 600 \text{ mm}$$

où: P : Précipitation moyenne annuelle en (m)

ETP : Evapotranspiration potentielle annuelle en (m)

R : Ruissellement en (m)

D'après les valeurs des précipitations moyennes annuelles on utilise la première formule pour la station Pont Bouchet et la deuxième pour les deux autres stations.

**Tableau 6 :** Résultats des ruissellements calculés par la méthode de TIXERON. BERKALOFF et ROMANTCHOUK

Station	Les Salines	Pont Bouchet	Ain Berda
R (mm)	106.62	85.30	113.99

Ce qui établit que la région d'Ain Berda possède un ruissellement plus important que chacun des deux autres stations.

**A.III.2.b.ii. Détermination de l'infiltration [I (mm)]:**

On utilise la formule générale :

$$P = ETR + I + R \quad \Rightarrow \quad I = P - ETR - R$$

où: ETR : Evapotranspiration réelle annuelle en mm

**Tableau 7 :** Résultats de l'infiltration pour les différentes stations

Station	Les Salines	Pont Bouchet	Ain Berda
I (mm)	152.48	109.74	172.91

Les résultats réunis dans le tableau 7 montrent que les valeurs de l'infiltration sont supérieures à celles du ruissellement pour chacune des trois stations.

Cette différence d'infiltration est due probablement à de fortes précipitations, ainsi qu'à la pédologie de la région.

## **A.IV. HYDROGEOLOGIE**

### **I. L'aquifère étudié (nappe superficielle):**

Les études hydrogéologique réalisées dans la plaine Ouest d'El Hadjar font ressortir l'existence de deux aquifères : l'un superficiel et l'autre profond. Mais notre travail va s'articuler sur l'étude de la nappe superficielle, qui est répandue sur toute la zone d'étude. La région à l'Est présente une nappe superficielle continue, localisée dans la plaine Ouest d'El Hadjar ainsi que dans la région d'El Allélick. La lithologie de cette nappe est constituée par des alluvions récents et actuels (sables, limons, argiles) avec une texture argilo-sableuse et argilo-limoneuse. Son alimentation se fait par les précipitations, les crues des Oueds, l'apport à partir de la nappe de graviers et par les bordures latérales de la nappe des dunes.

### **II. Piézométrie de la nappe superficielle**

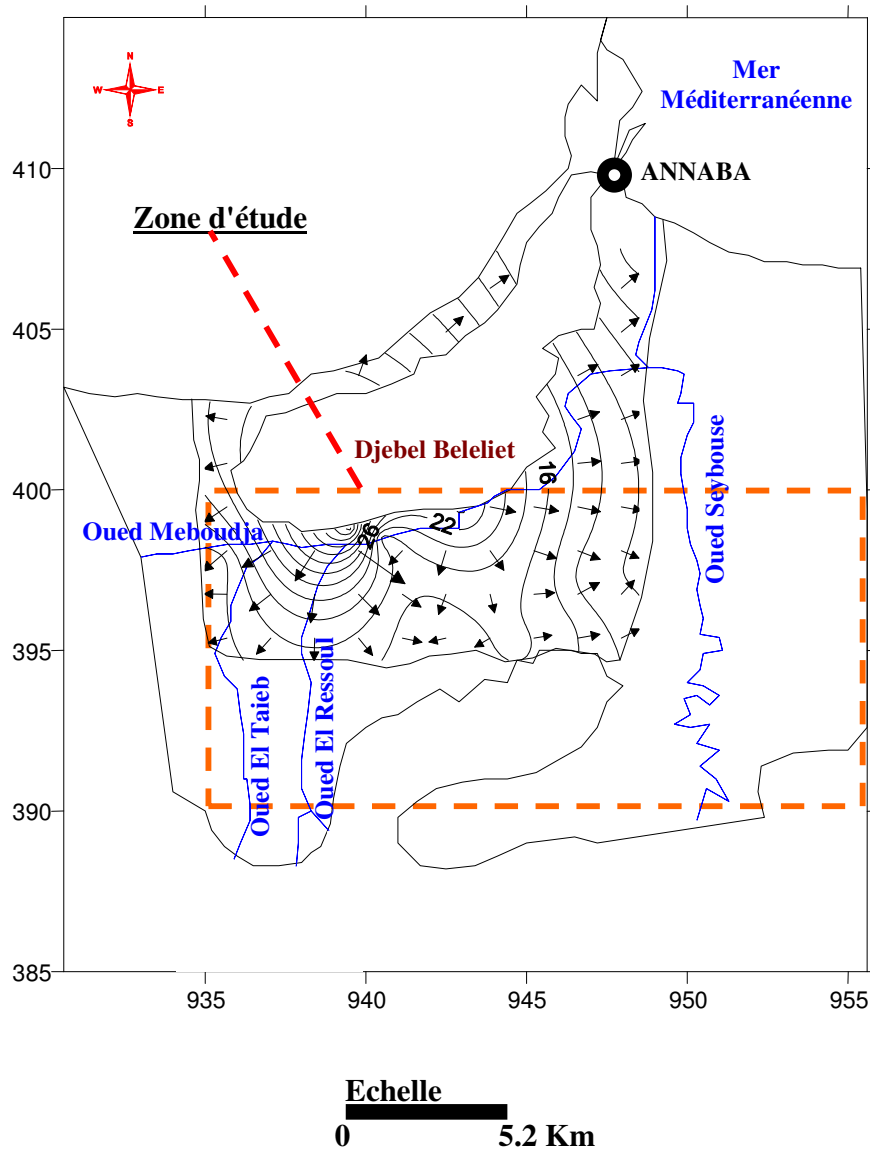
Les courbes piézométriques (Figure 21) sont fermées et serrées dans la partie amont de l'Oued Meboudja, traduisant une zone de protubérance due à un apport latéral à partir du socle métamorphique.

La morphologie de la surface piézométrique montre des zones d'alimentation au Nord de la plaine Ouest d'El Hadjar. Elles sont caractérisées par des courbes isopièzes divergentes, donc à concavité orientée vers l'amont et à faible espacement. Ce dernier indique un écoulement rapide.

Oued Meboudja provoque un resserrement local des courbes isopièzes. On remarque un écoulement rapide qui peut être engendré par les apports latéraux et la relation mixte qui existe entre la nappe et l'Oued Meboudja.

Vers Pont Bouchet, Oued Meboudja orienté Sud Ouest-Nord Est, joue le rôle d'axe de drainage jusqu'à sa confluence avec l'Oued Seybouse. La relation de la nappe avec les autres Oueds est non identifiée. Ceci est dû au fait que les Oueds existants sont temporaires et présentent de très faibles débits.

La protubérance est caractérisée par des axes d'écoulement divergents. Elle se localise au Sud de la lunette sableuse. Elle est due à une baisse de perméabilité (plus faible que celle de la lunette sableuse), c'est une lentille argilo-sableuse, qui joue le rôle de barrière entraînant un changement de la surface piézométrique. Les courbes hydroisohypses de cette protubérance sont irrégulières et très espacées, traduisant un écoulement lent.

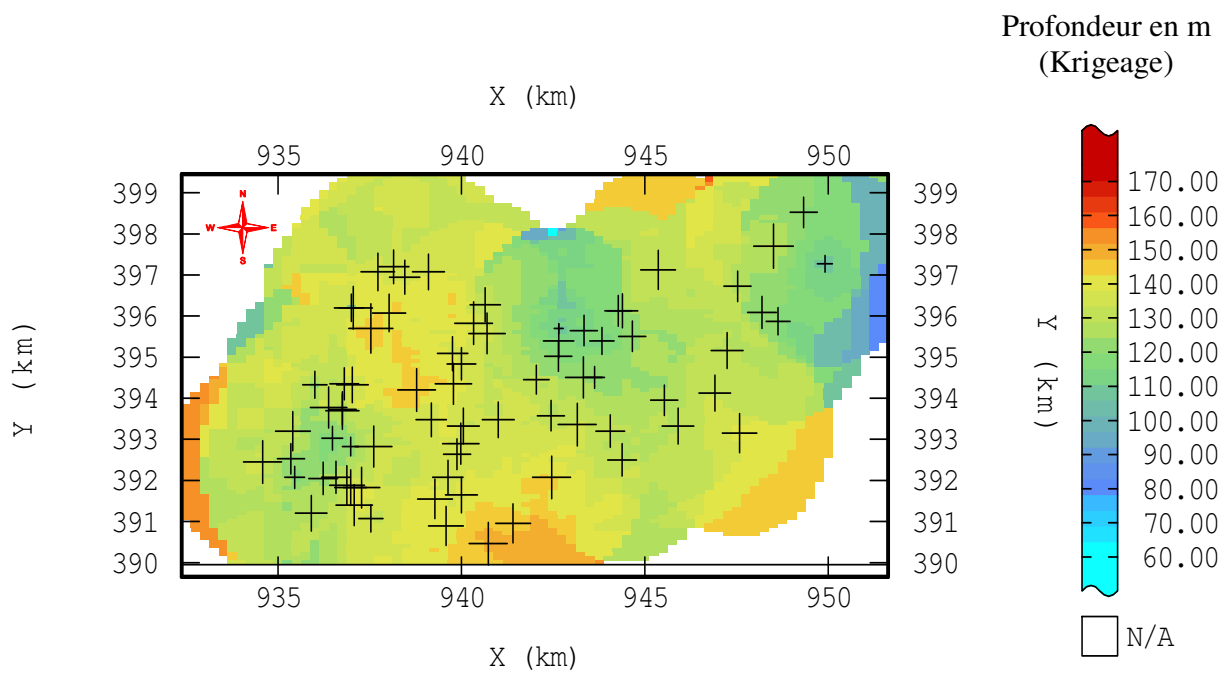


**Figure 21:** Carte piézométrique

### **III. La profondeur:**

La nappe phréatique est relativement proche du sol; on mesure sa profondeur en mètre par rapport au sol de la plaine Ouest d'El Hadjar. Cette profondeur qui varie d'un point à une autre a été estimée par la méthode de Krigeage.

D'après la figure 22, on remarque une profondeur moyenne sur presque la totalité de la plaine, sauf à l'extrême Sud-Ouest, au Sud, Sud-est et au Nord où ils existent des zones très profondes. Aussi la partie à l'extrême Nord-Est et à proximité de l'Oued Meboudja caractérisée par une faible profondeur favorise la pollution de la nappe phréatique.



**Figure 22:** Estimation de profondeur par la méthode de Krigage de la plaine Ouest d'El Hadjar

**B. Partie spéciale:**

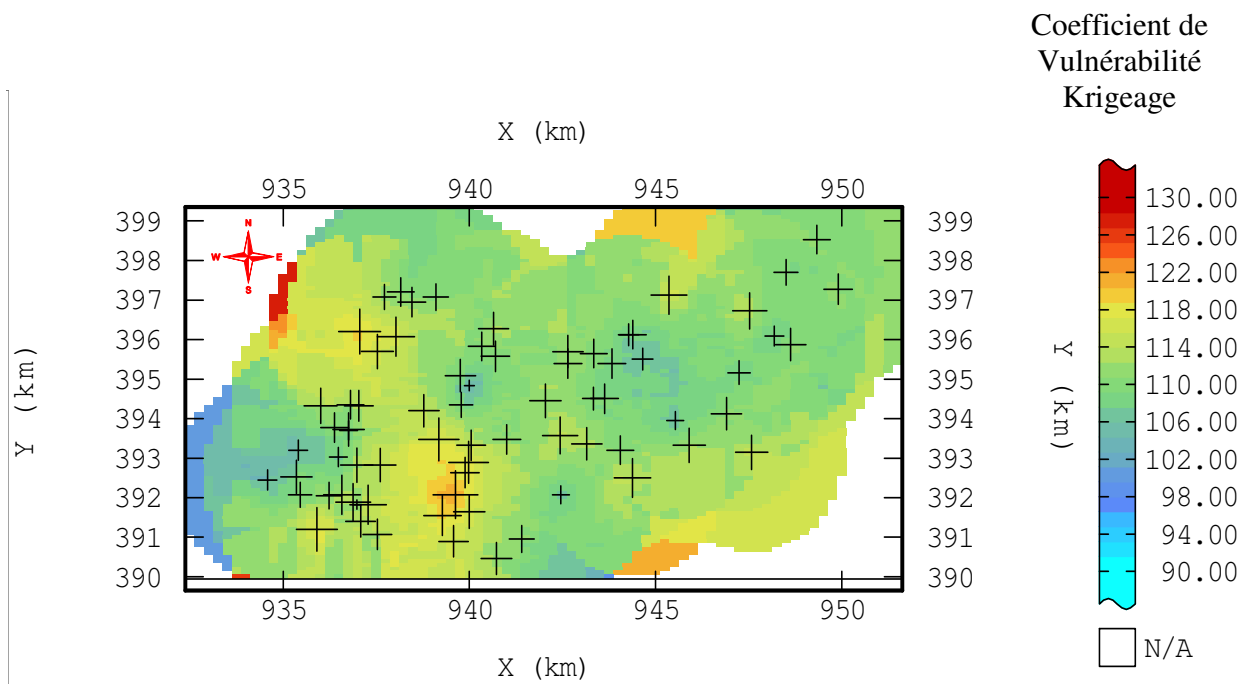
**B.I Le coefficient de vulnérabilité:**

Le coefficient de vulnérabilité permet de prévoir le transfert d'un contaminant provenant de la surface vers l'eau souterraine. Cette évaluation est basée sur dix (10) critères concernant les caractéristiques du sol, des zones non saturée et saturée, sont :

- Enracinement des plantes;
- Epaisseur du sol;
- Vitesse de percolation;
- Réserve en eau;
- Texture ;
- K du profil;
- Présence d'un plancher imperméable;
- Pente;
- Prof de la nappe;
- Pluie efficace.

La carte de vulnérabilité est un document fondamental pour l'aménagement de territoire. Elle permet essentiellement d'orienter le choix de sites des projets de développement pouvant avoir des conséquences négatives sur la qualité des ressources en eau souterraines. Le logiciel ISATIS est un outil performant par excellence pour l'élaboration des cartes de vulnérabilités des aquifères. Elles constituent une base d'information essentielle pour la gestion des ressources en eau, pour l'évaluation des risques de pollution des nappes et la mise en place de mesures destinées à la prévention des pollutions accidentelles.

La présente étude traite de la vulnérabilité présentée sur la figure 23 et des risques de pollution de la nappe phréatique de la plaine Ouest d'El Hadjar, menacée par de nombreux foyers de la pollution industrielle, qui se sont multipliés dans la région en dehors de toute mesure de protection de l'environnement. La méthode utilisée pour entreprendre cette étude repose sur le recensement des causes de pollutions potentielles ou réelles en tenant compte de plusieurs facteurs. La zone sud-Ouest qui possède une faible vulnérabilité occupe un pourcentage de 15% du total, et la majorité de la région et une zone vulnérable (80% de la surface totale), la partie très vulnérable est à côté d'Oued Meboudja et elle occupe 5% de la plaine. D'après les résultats présentés des propriétés du sol, la forte vulnérabilité et le sens d'écoulement de cette zone (Oued Meboudja), on peut conclure que la nappe à été infectée, donc il y a un risque de pollution.

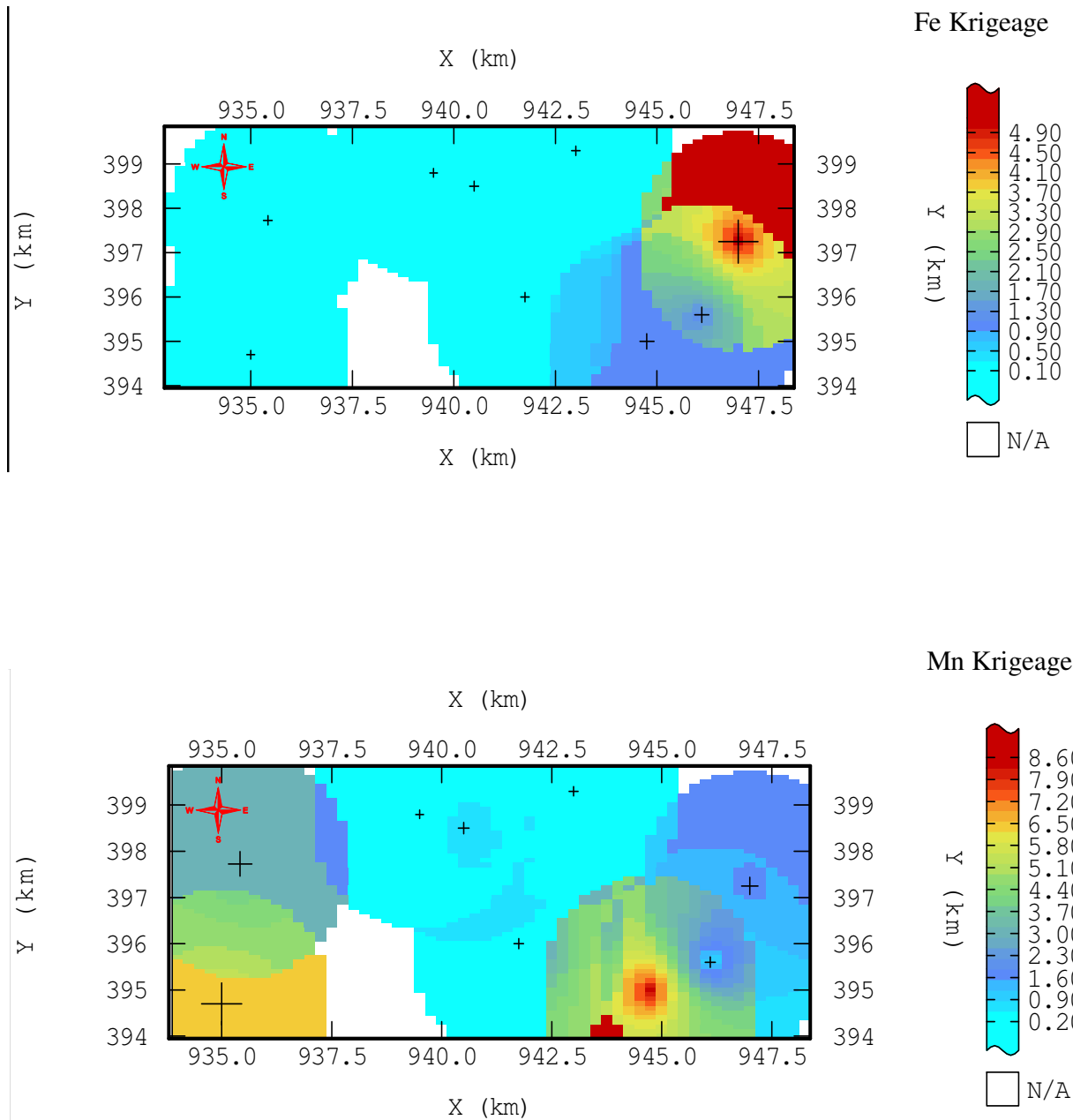


**Figure 23:** Estimation du coef. de vulnérabilité par la méthode de Krigeage de la plaine Ouest d'El Hadjar

## **B.II      Les métaux lourds:**

Pendant de nombreuses années, les industries situées à proximité de cours d'eau (pour des raisons de refroidissement de process, de transport) ont rejeté leurs effluents dans ceux-ci. A ce phénomène (de plus en plus limité par l'installation de station d'épuration au sein même des sites industriels), il faut ajouter l'érosion et le ruissellement de l'eau sur les sols et chaussées. L'eau constitue un élément fondamental en matière de pollution, puisque dans le cas des métaux, comme pour d'autres composées, celle-ci va favoriser de nombreuses réactions chimiques. L'eau transporte les métaux lourds, et les insères dans les chaînes alimentaires (algues, poisson, etc.). Même si les métaux lourds sont le plus souvent présents à l'état de traces, ils n'en restent pas moins très dangereux, puisque leur toxicité se développe par bioaccumulation dans les organismes.

Dans notre travail on s'est intéressé aux métaux lourds, le Fe et Mn, présents dans les rejets du l'usine d'El Hadjar, qui sont versés dans l'Oued Meboudja, pour illustrer la variation de la vulnérable de la pollution de la plaine Ouest d'El Hadjar. La toxicité des métaux lourds n'est plus à démontrer. On remarque sur la figure 24 que la plus haute concentration du fer se trouve au Nord-Est de la plaine, avec une diminution remarquable vers le Sud-Est, et le reste de la région est caractérisé par une concentration faible sur toute la surface. Pour le manganèse, les deux zones de haute toxicité sont localisées au Sud-Ouest et au Sud-Est, les deux zones à moyenne concentration apparaissent au Nord-Ouest et au Nord-Est, alors que la zone à faible concentration se distribue au centre de la plaine d'étude. La présence de fortes concentrations dans la partie Sud-Est est due à l'écoulement de l'eau dans la nappe phréatique.



**Figure 24:** Estimation des métaux lourds par la méthode de Krigage de la plaine Ouest d'El Hadjar

# Conclusion générale

## **Conclusion générale:**

La plus grande source de pollution de la nappe phréatique de la zone d'étude est l'usine d'El Hadjar, qui verse directement ses rejets dans l'Oued Meboudja. Ces déchets se composent essentiellement de matières en suspension (MES), riches en cations de métaux lourds et de composés indésirables. Le champ étudié est l'une des régions les plus arrosées d'Algérie. Elle est soumise à un climat méditerranéen, caractérisé par une période humide qui s'étale du mois d'octobre au mois de mai et une période sèche qui s'étend du mois de mai jusqu'au mois de septembre. L'étude pédologique de la plaine est constituée apparemment par quatre types de sols à savoir : sols hydromorphes, sols calcimagnésiques, sols minéraux bruts et sols halomorphes. La texture limono-argileuse est la plus dominante. L'étude géologique, comporte à la fois les affleurements de terrains métamorphiques, des roches éruptives et des terrains sédimentaires. Les formations sédimentaires correspondent à un ensemble non uniforme où on trouve un espace marécageux, des dunes sableuses et des plaines fertiles. Ces deux dernières sont considérées comme des formations potentiellement aquifères. Elles sont caractérisées par des sédiments quaternaires.

D'après l'étude géostatistique et les résultats du Krigeage nous avons un sol formé d'une couche fine d'Argile à côté de Oued Meboudja qui est perméable aux métaux lourds. La variation du pourcentage en limon (gros et fin) a aussi montré que la nappe phréatique à proximité de l'Oued n'est pas protégée. De même que la forte concentration de sable (gros et fin) de cette zone laisse passer les métaux lourds ce qui est confirmé par le coefficient de perméabilité. La quantité de réserve facilement utilisable confirme la présence des sols argileux.

La carte piézométrique nous indique que le fer est concentré à l'extrême Est de la plaine, par contre le manganèse se trouve en grande quantité à l'extrême Sud de celle-ci comparativement à la carte de vulnérabilité.

La pollution provoquée par les rejets de l'usine d'El Hadjar qui versent directement dans l'Oued Meboudja menace la nappe phréatique de la plaine Ouest d'El Hadjar.

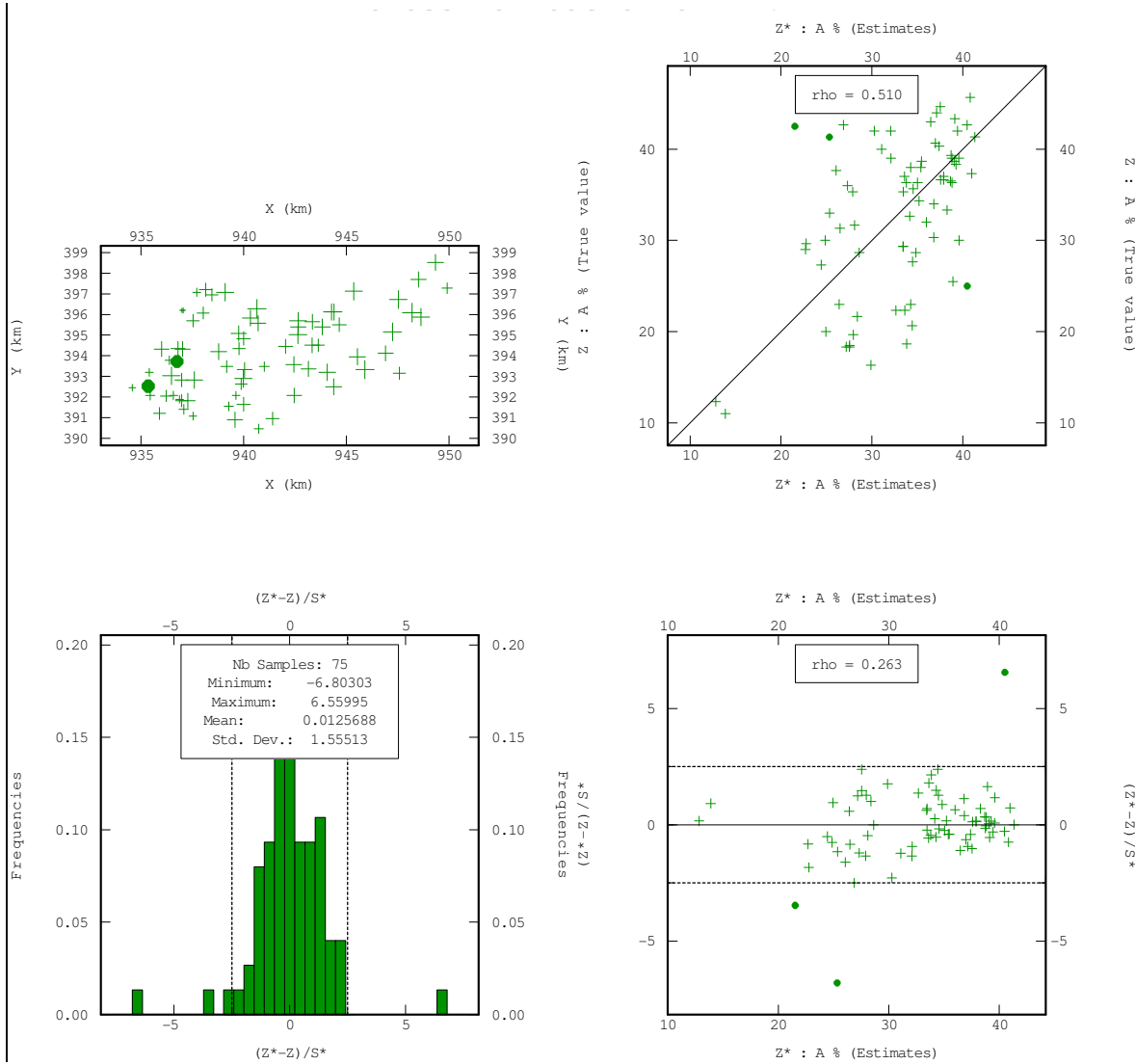
# Bibliographie

## **BIBLOGRAPHIES:**

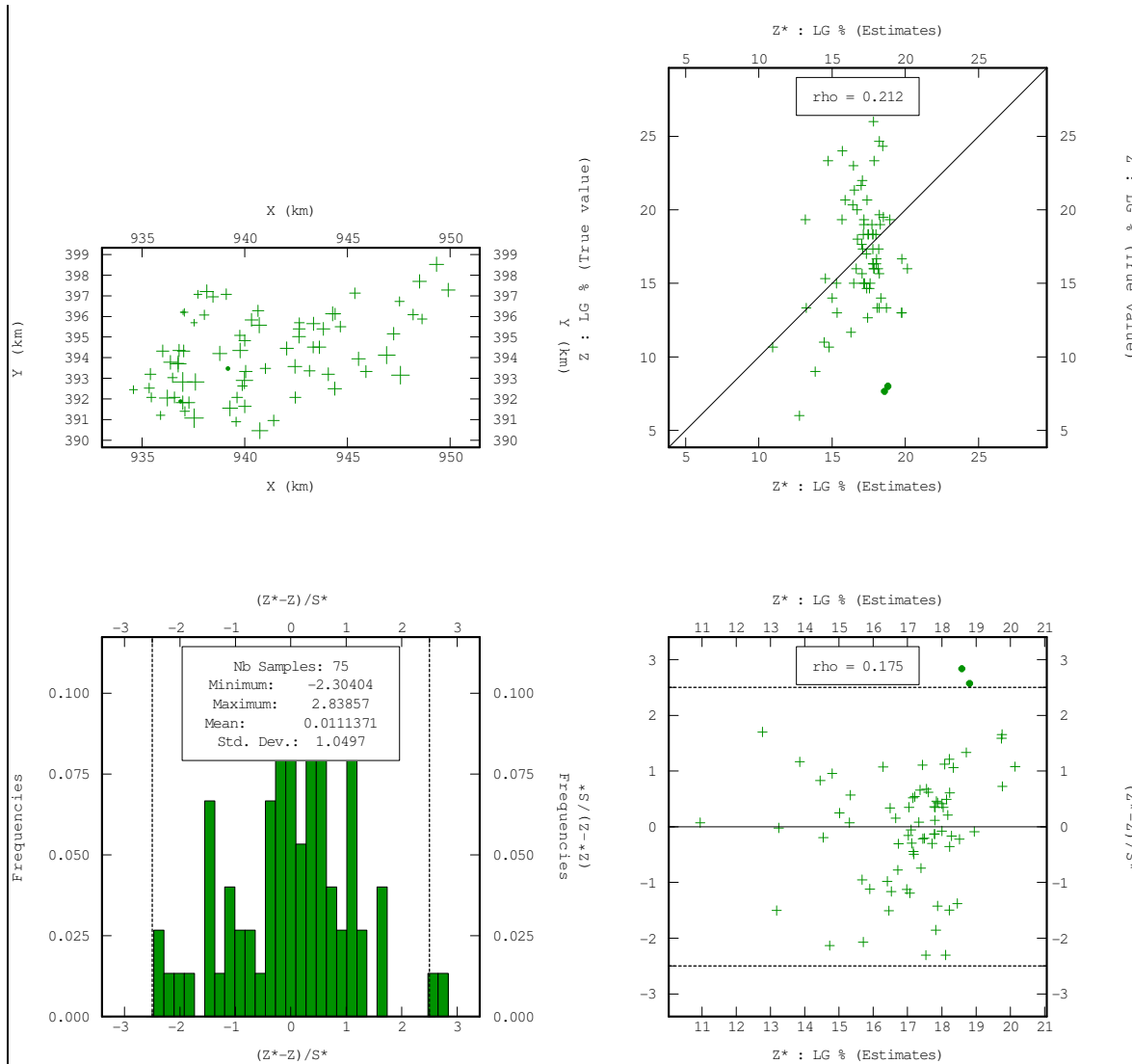
- [1] **Barnes R.J. (1991)**. The variogram sill and the sample variance. *Mathematical Geology*, 23 : **673-678**.
- [2] **Matheron, G. (1955)**. Application des méthodes statistiques à l'évaluation des gisements. *Annales des Mines 144 (12)*, **p50-75**.
- [3] **Chauvet, P. (1982)**. The variogram cloud. In T. B. Johnson & R. J. Barnes (Eds.), *17th APCOM*, New York, **p757-764**. Society of Mining Engineers.
- [4] **G. Christakos**, On the problem of permissible covariance and variogram models. *Water Resources Research*, 20(2):**251-265**. 1984.
- [5] **H. Wackernagel**, Multivariate Geostatistics: an Introduction with Applications, *Springer-Verlag, Berlin, 3rd edition, 2003*.
- [6] **Lantuéjoul C., 2002** : Geostatistical simulation, models and algorithms. *Berlin: Springer-Verlag*, **p256**.
- [7] **X. Emery**, Géostatistique linéaire. *Ecole de Mines de Paris, Janvier 2003* **p 103-105**.
- [8] **Matheron, G. (1976a)**. Les concepts de base et l'évolution de la géostatistique minière. *See Guarascio, David, & Huijbregts (1976)*, **p3-10**.
- [9] **J. Rivoirard**. Two key parameters when choosing the kriging, neighborhood. *Maths Geol., Vol. 19. n° 8 (Nov. 1987)* **p 851-856**.
- [10] **Addicott J.F., J.M. Aho, M.F. Antolin, D.K. Padilla, J.S. Richardson & D.A. Soluk (1987)**. Ecological neighborhoods: *scaling environmental patterns. Oikos*, 49. **p 340-346**.
- [11] **Arnaud, M. et Emery, X. (2000)**. *Estimation et interpolation spatiale*. Hermes Science Publications, Paris.
- [12] **Journel A. G., 1974** : Simulation conditionnelle – théorie et pratique. *Thèse de docteur-ingénieur, Ecole des Mines de Paris*, **p110**.
- [13] **J. Rivoirard**. Le comportement des poids de krigeage. *Thèse de Docteur Ingénieur en Sciences et Techniques Minières soutenue le 23 novembre 1984, option Géostatistique. ENSMP (1984)*. **p 72**.
- [14] **Stein, A. and Corsten, L.C.A. (1991)**. Universal Kriging and Cokriging as a Regression Procedure. *Biometrics* 47, **p 575-587**.
- [15] **G. Matheron**, Le krigeage universel. *Les cahiers du Centre de morphologie mathématique de Fontainebleau, Fascicule 1. Ecole de Mines de Paris, Fontaine-bleau. 1969*.
- [16] **Bárdossy A. (1988)**. Notes on the robustness of the kriging system. *Mathematical Geology*, 20. **p189-203**.

- [17] **Stein, M. L. (1999)**. Interpolation of Spatial Data: Some Theory for Kriging. *New York : Springer-Verlag*.
- [18] **Klinkenberg, B. et Waters, N. (1990)**. Spatial interpolation I. *Dans Goodchild, M. et Kemp, K., éditeurs : NCGIA Core Curriculum in GIS. National Center for Geographic Information and Analysis, University of California, Santa Barbara CA. [En ligne], <http://www.geog.ubc.ca/courses/klink/gis.notes/ncgia/u40.html>*.
- [19] **Matheron, G. (1970)**. La théorie des variables régionalisées, et ses applications. *Les cahiers du Centre de morphologie mathématique de Fontainebleau, Fascicule 5. Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau*.
- [20] **Gratton, Y. (2002)**. Le krigeage : La méthode optimale d'interpolation spatiale. *Les Articles de l'Institut d'Analyse Géographique*. Disponible en ligne: [http://www.iag.asso.fr/pdf/krigeage juillet2002.pdf](http://www.iag.asso.fr/pdf/krigeage_juillet2002.pdf).
- [21] **M. Armstrong, J. Carignan**. Géostatistique linière. *Ecole de Mine de Paris p90 - 92*.
- [22] **Matheron, G. (1962)**. Traité de Géostatistique Appliquée, *Volume1. Paris: echnip*.
- [23] **Isaaks, E. et Srivastava, R. (1989)**. Applied Geostatistics. *Oxford University Press, New York*.
- [24] **Arnaud, M. et Emery, X. (2000)**. Estimation et interpolation spatiale. *Hermes Science Publications, Paris*.
- [25] **Cressie, N. A. C. (1993)**. Statistics for spatial data. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics : Applied Probability and Statistics. *John Wiley & Sons Inc., New York. Revised reprint of the 1991 edition, A Wiley-Interscience Publication*.
- [26] **Wackernagel, H. (2003)**. Multivariate Geostatistics : an Introduction with Applications. *Springer-Verlag, Berlin. Third completely revised edition*.

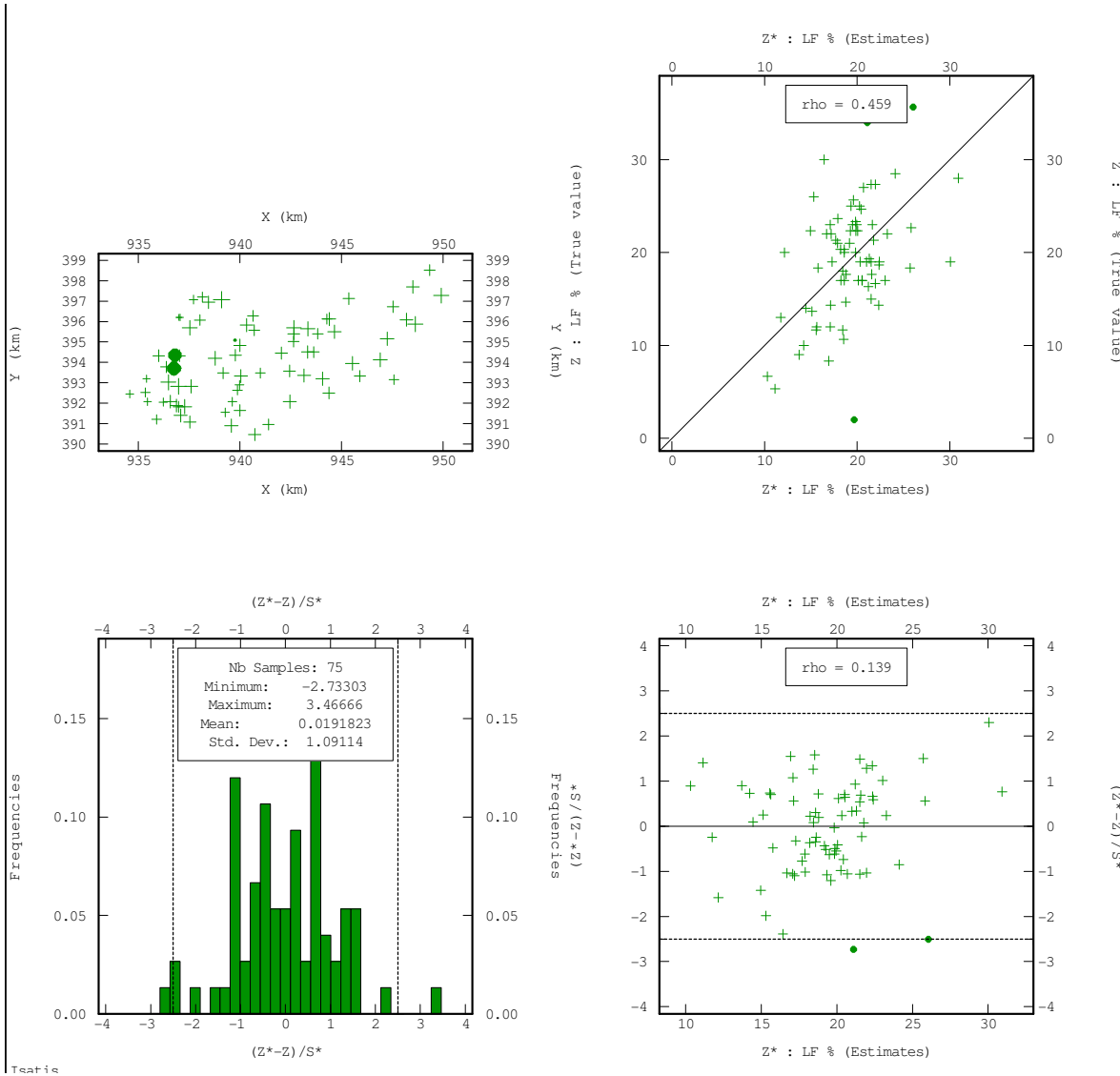
ANNEXE



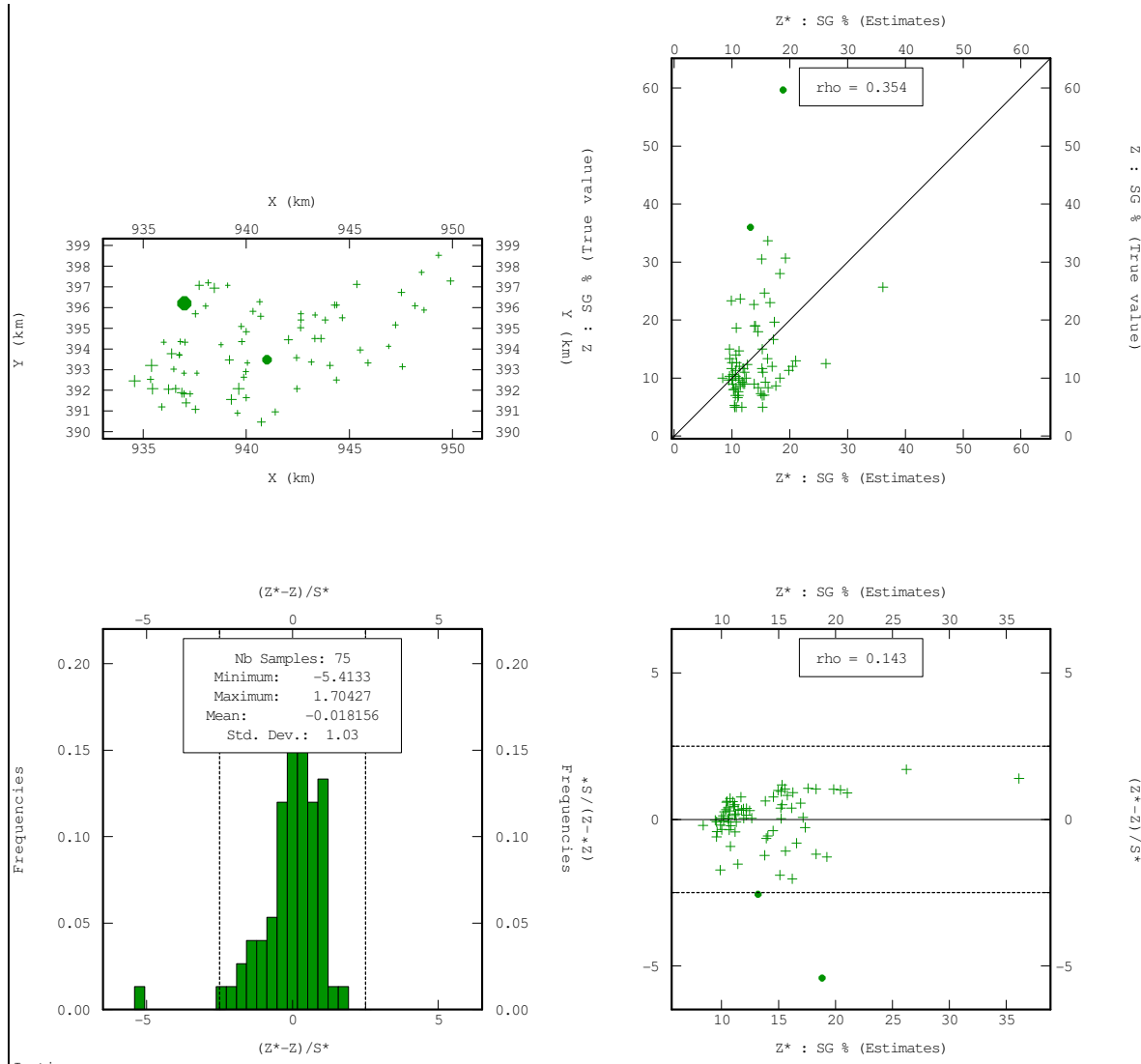
**Figure 25:** Les 4 tests graphiques de la validation croisée pour le pourcentage en Argile



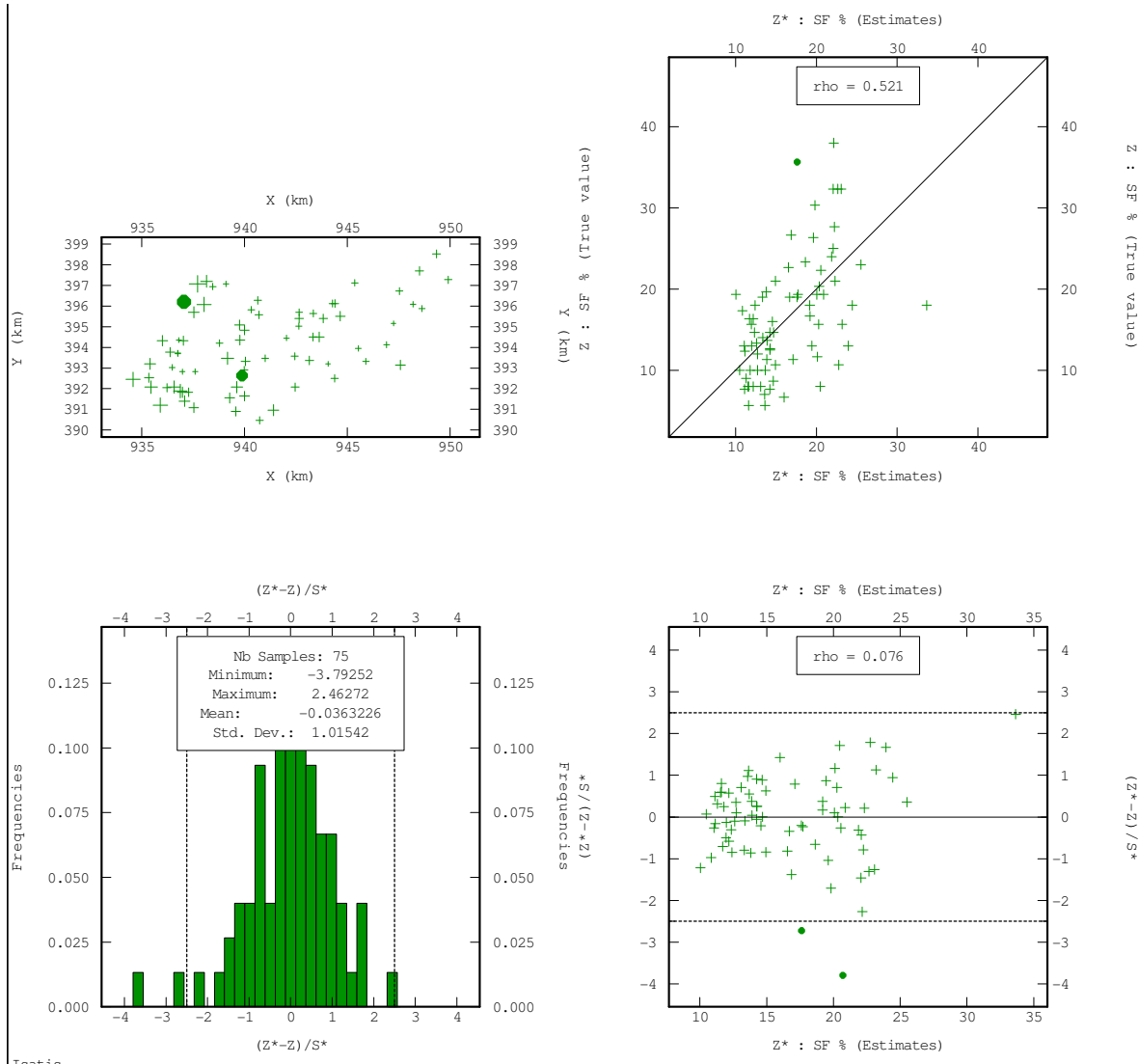
**Figure 26:** Les 4 testes graphiques de la validation croisée pour le pourcentage en Gros Limon



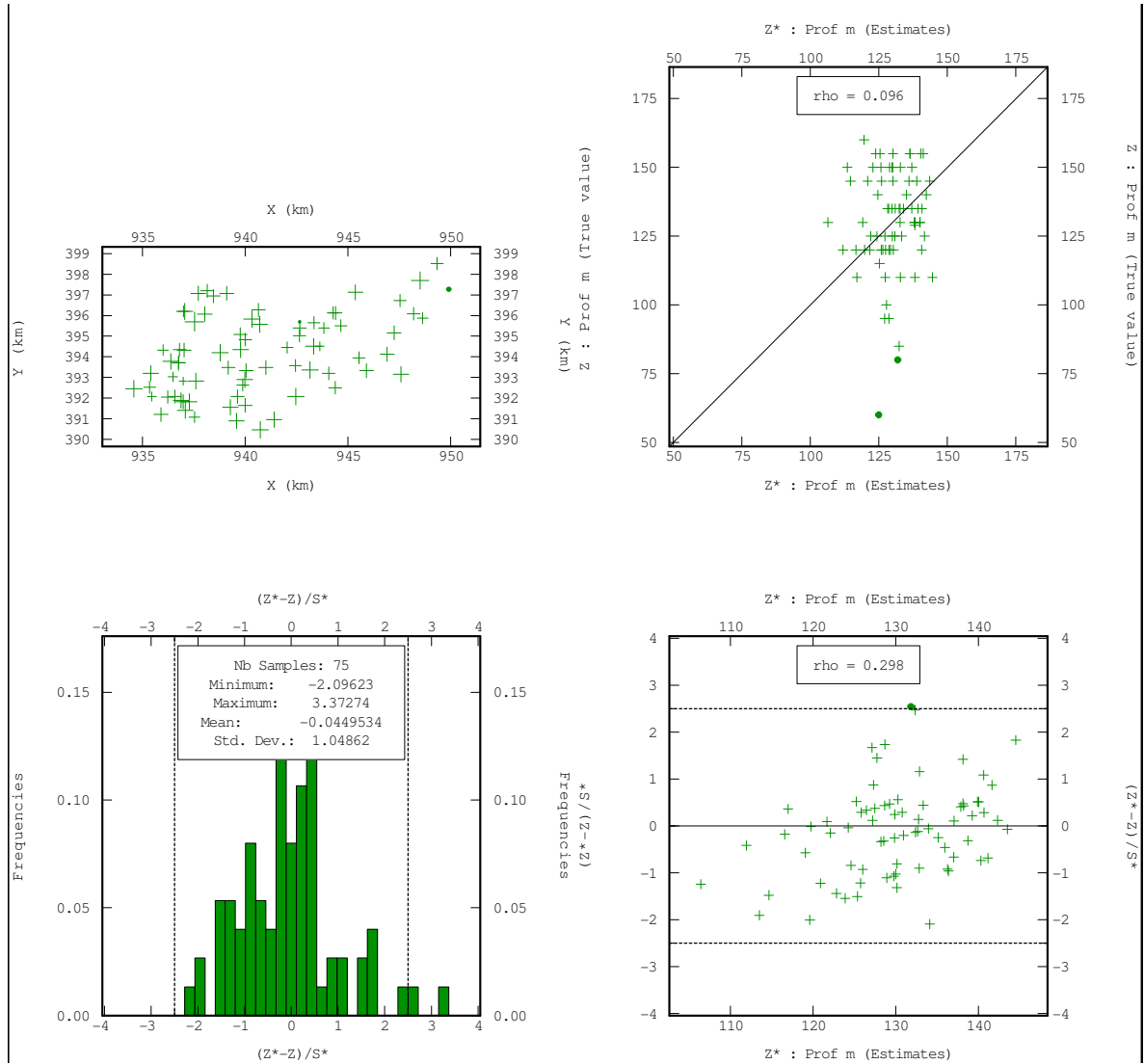
**Figure 27:** Les 4 tests graphiques de la validation croisée pour le pourcentage en Limon Fin



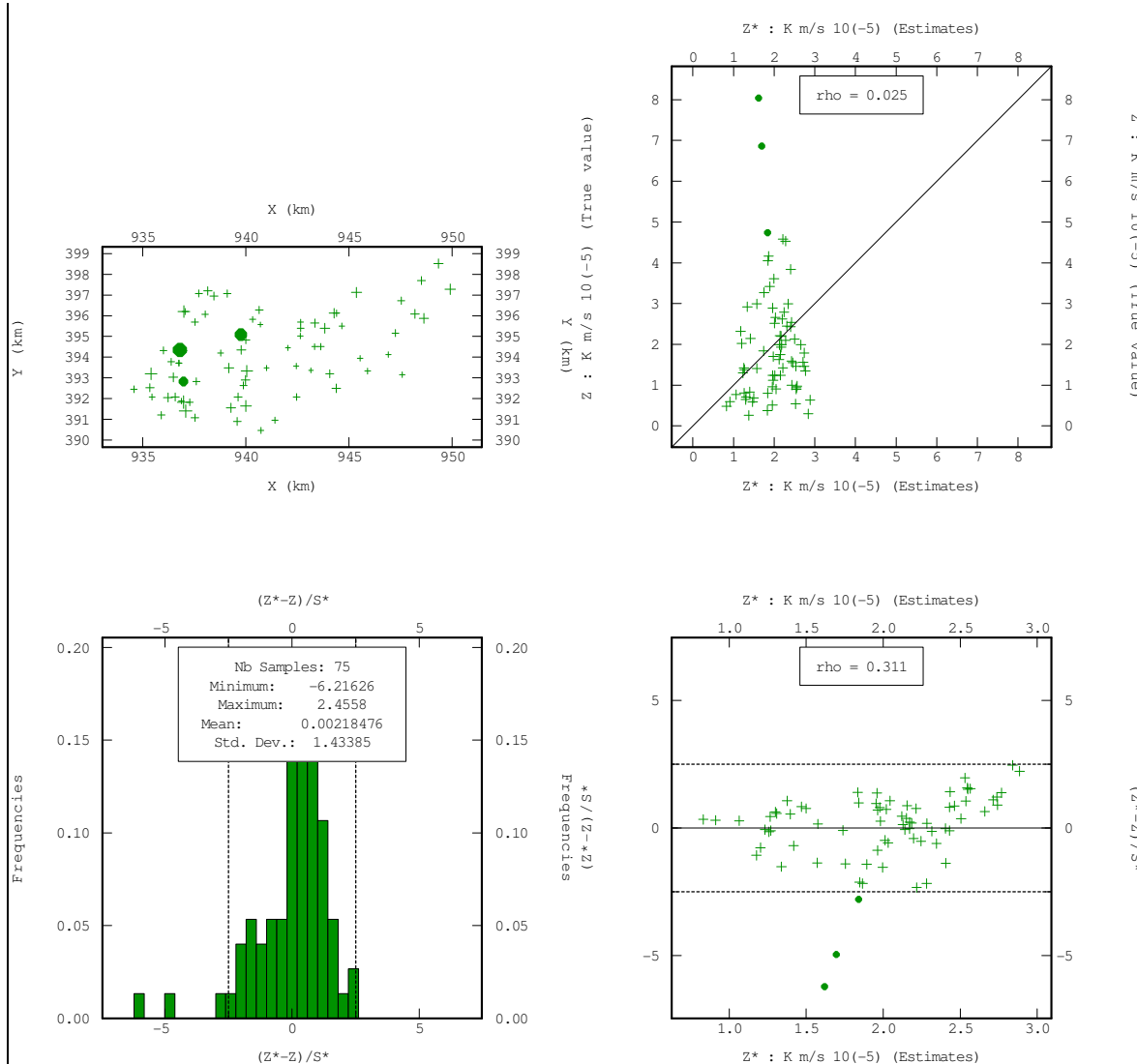
**Figure 28:** Les 4 testes graphiques de la validation croisée pour le pourcentage en Gros Sable



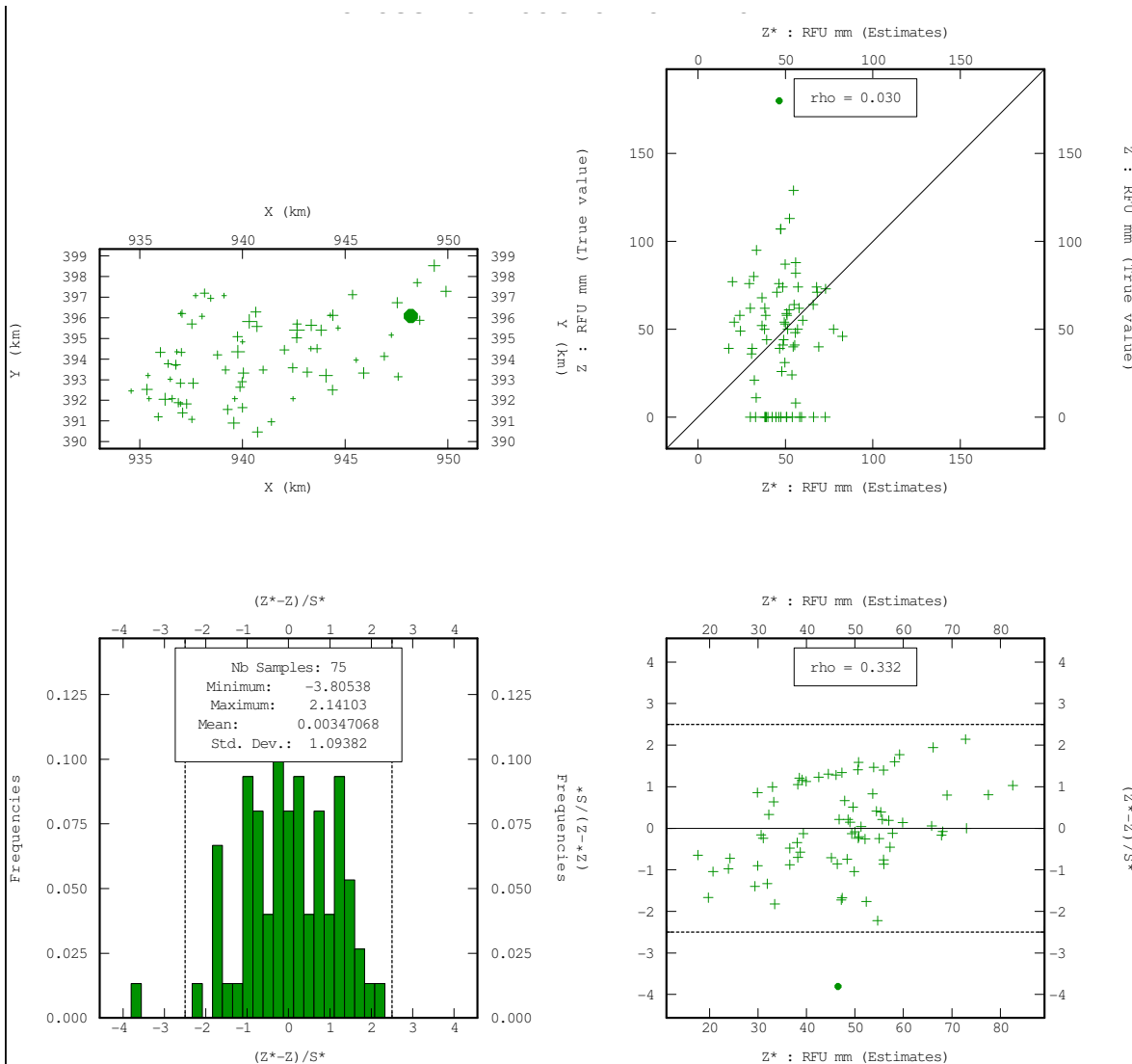
**Figure 29:** Les 4 testes graphiques de la validation croisée pour le pourcentage en Sable Fin



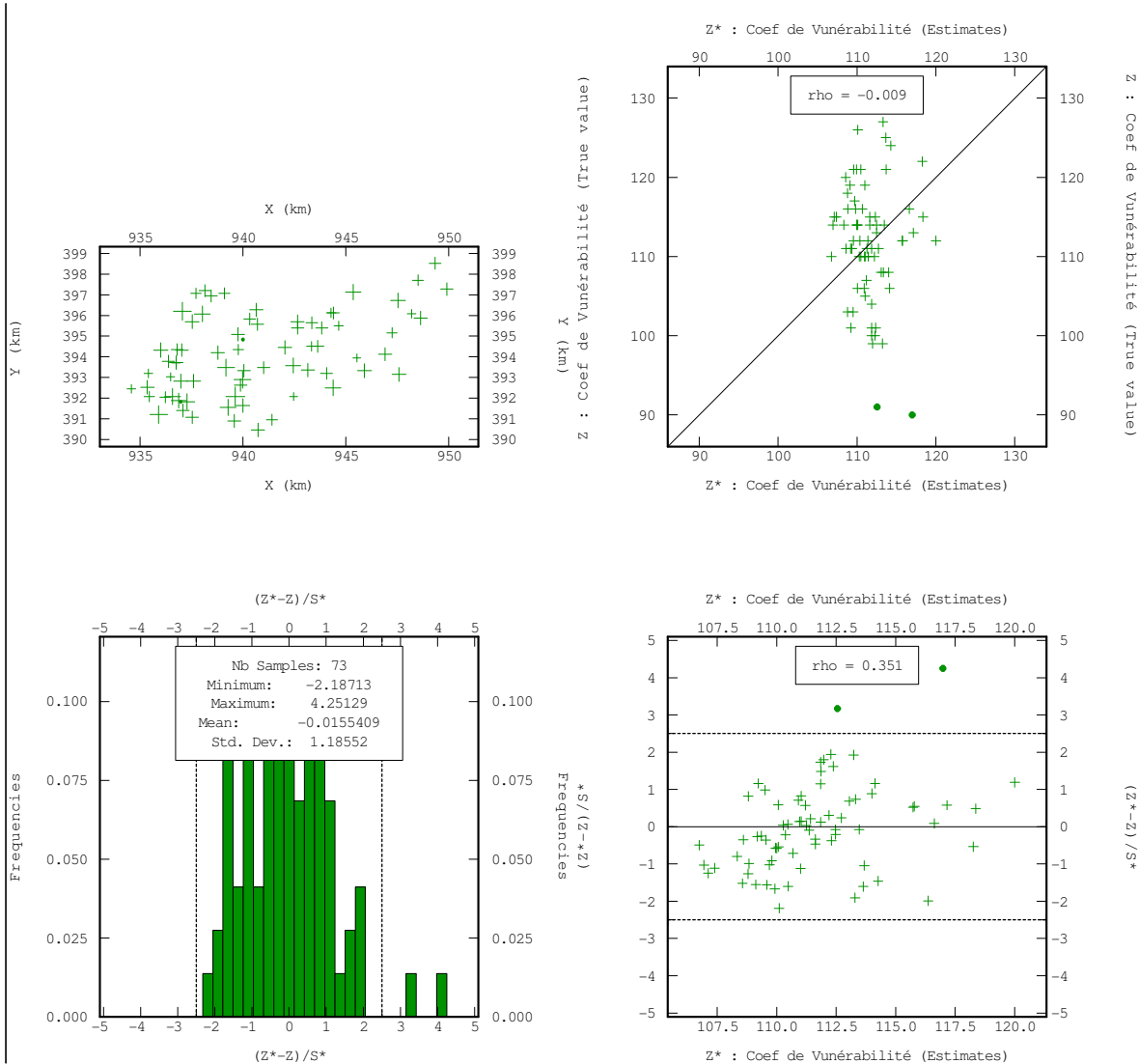
**Figure 30:** Les 4 testes graphiques de la validation croisée pour la profondeur



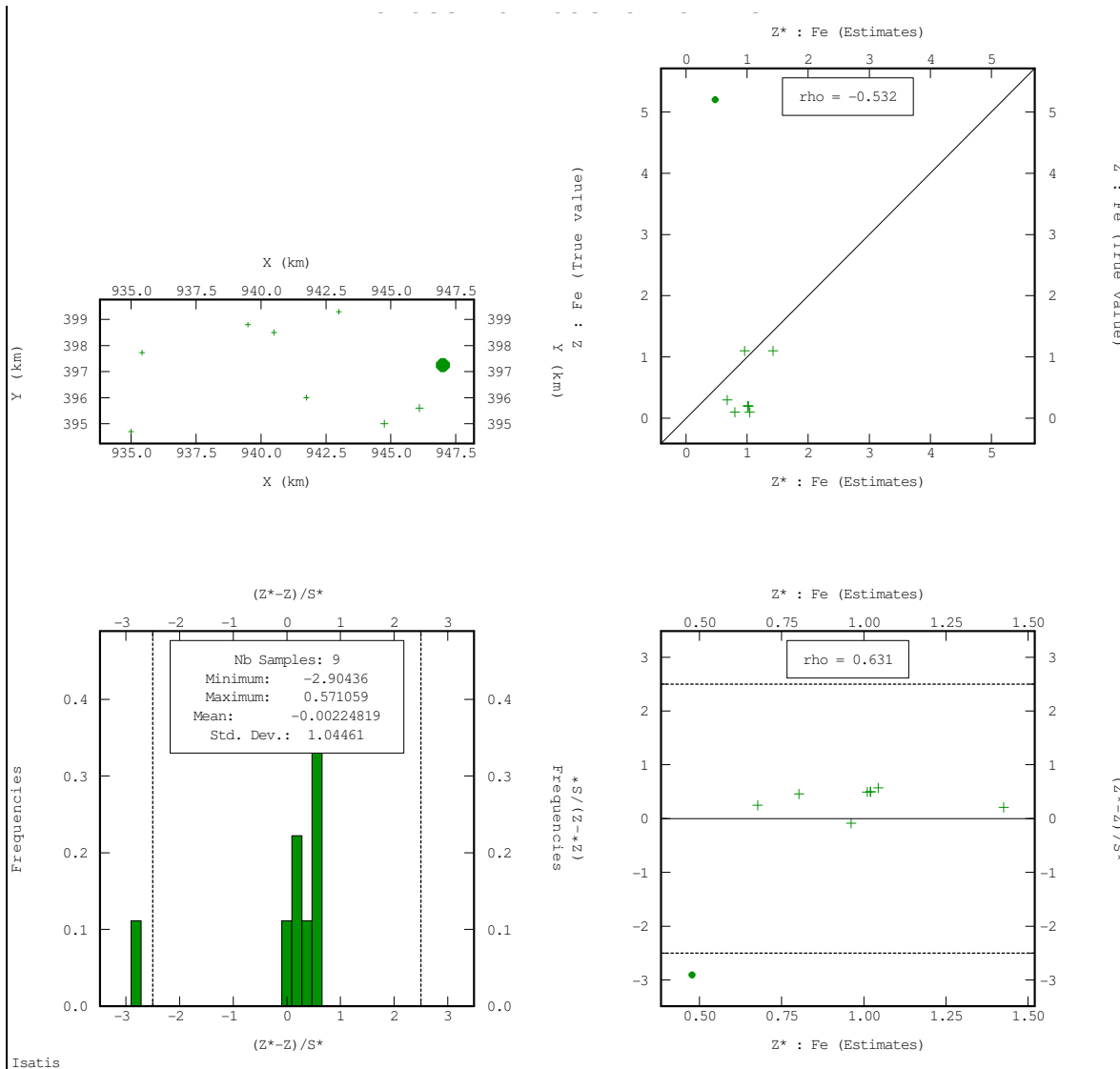
**Figure 31:** Les 4 testes graphiques de la validation croisée pour la perméabilité en  $\text{m/s} \cdot 10^{-5}$



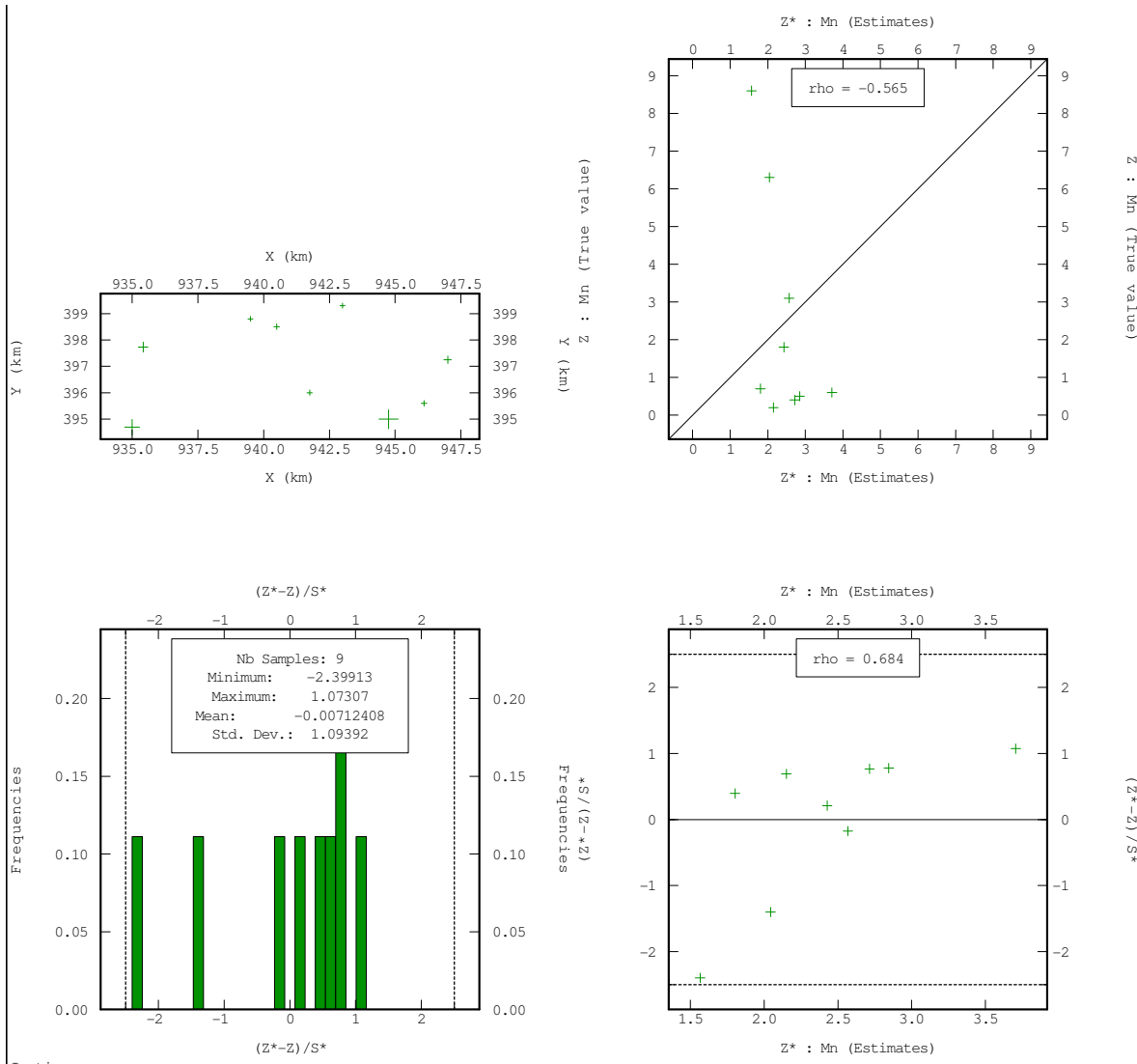
**Figure 32:** Les 4 testes graphiques de la validation croisée pour la RFU en mm



**Figure 33:** Les 4 tests graphiques de la validation croisée pour le coef. de vulnérabilité



**Figure 34:** Les 4 tests graphiques de la validation croisée pour la concentration du Fe en mg/l



**Figure 35:** Les 4 testes graphiques de la validation croisée pour la concentration du Mn en mg/l