



UNIVERSITE  
JEAN LOROUGNON GUEDE

**UFR ENVIRONNEMENT**

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

-----  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et  
De la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :

2019-2020

N° ORDRE : 0303/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :

CI0412006933

LABORATOIRE :

SCIENCES ET

TECHNOLOGIES DE

L'ENVIRONNEMENT

# MASTER

Géologie Appliquée

Option : Mines et Energies

THEME :

**ANALYSE COMPARATIVE DE L'IDW ET DU KRIGEAGE POUR  
L'ESTIMATION DES RESERVES MANGANESIFERES DU  
GISEMENT DE LAUZOUA ZONE C-EXT (SUD DE LA COTE  
D'IVOIRE)**

Présenté par :

**KOUADIO DON DEDIEU**

JURY

**Président : Mr N'DRI Brou Etienne, Maître de Conférences, Université  
Jean LOROUGNON GUEDE**

**Directeur : Mr. ALLIALY Marc Ephrem, Maître de Conférences,  
Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody**

**Encadreur : Mr. KOUDOU Aimé, Maître-Assistant,  
Université Jean LOROUGNON GUEDE**

**Examineur : Mr SOMBO Abé Parfait, Maître-Assistant, Université Jean  
LOROUGNON GUEDE**

Soutenu publiquement

le : 16/02/2021

## DEDICACES

Ce mémoire est dédié aux êtres les plus chères pour moi, tout ce que j'ai fait ou même encore je ferai de bien c'est grâce à eux, grâce à tout l'amour qu'ils m'ont donné. Ils m'ont appris à quel point c'est beau d'aimer, que le Seigneur, Dieu, Tout-Puissant puisse à jamais veiller sur eux. Et qu'Il m'accorde force et grâce pour les honorer au centuple et bien plus encore, que chacun de mes actes soit posé pour leur immense bonheur.

A mon Père **KOUADIO Senzé Lambert**, le patriarche de la grande famille **Kouadio Senzé**, faire votre fierté et être votre fierté ce sont mes buts de chaque instant de ma vie.

A ma Mère **KOFFI Adjoua Justine**, épouse **KOUADIO**, la plus puissante des mères et la plus brave femme vous êtes devenue pour moi un pilier incroyablement puissant au sein de ma vie, mon rempart indestructible contre les adversités et le découragement. Je ne vous remercierai jamais assez, je ne vous honorerai jamais assez pour tout l'amour que vous donnez. A feu ma Mère **ALLA Akissi Eugenie** merci de nous avoir aimé, merci de veillez sur nous de là où vous êtes. Sachez Mère que vous êtes toujours avec nous que ce soit dans nos prières et pensées vous demeureriez là pour toujours. Reposez en paix Mère.

## **REMERCIEMENTS**

Nous tenons à remercier Mme **TIDOU Abiba Sanogo** épouse **KONÉ**, Professeur et Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG), et les messieurs **KONÉ Tidiani** et **AKAFFOU Doffou Sélastique** respectivement Professeur et Maître de Conférences, ses deux vices-présidents.

Nous voudrions aussi remercier Mr **KOUASSI Kouakou Lazare**, Maître de Conférences, Directeur de l'Unité de Formation et de Recherche (UFR) Environnement.

Nous disons merci à Mr **DIBI Brou**, Maître de Conférences, Enseignant-chercheur à l'UJLoG, responsable de laboratoire des Sciences de la Technologie et de l'Environnement.

Il nous plaît de d'exprimer toute notre reconnaissance à Mr **NIANGORAN Kouadio Charles**, Maître de Conférences, Directeur du Département des Sciences de la Terre pour son attention envers tous ses étudiants, que le Seigneur Dieu puisse vous le rendre en grâce, bonheur et longévité.

Nous tenons à dire merci à Mr **BIE Goha René**, Maître de Conférences, Responsable de filière Géologie Appliquée pour le travail abattu au sein notre département.

Nous adressons un merci au Docteurs **SOMBO Abé Parfait**, Maître-Assistant responsable du parcours Master Géologie Appliquée pour son encadrement et les conseils nécessaires à notre développement personnel. Avec spontanéité, bienveillance et dans un temps imparti, il a accepté d'être l'examineur de ce présent travail en apportant des remarques constructives à l'élaboration de ce mémoire.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à Mr **N'DRI Brou Etienne**, Maître de Conférences à l'Université Jean Lorougnon Guédé pour ses directives, sa rigueur scientifique dans le travail qu'il a fait l'honneur de présider le jury lors de la soutenance.

Nous tenons particulièrement à remercier Mr **KOUDOU Aimé**, Maître de Conférences pour son encadrement rigoureux et sa formation de qualité, il nous a amené à toujours viser plus haut dans notre travail.

Nous tenons également à dire un merci tout aussi particulier à Mr **ALLIALY Marc Ephrem**, Maître de Conférences à l'UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR STRM) de l'Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody (UFHB) d'Abidjan, qui a accepté de diriger ce mémoire malgré ses lourdes charges et son temps énormément prisé.

Nous remercions également les messieurs **KOUADIO Fossou Jean-Luc Hervé**, **BAKA Derving** et **OKAIGNY Jean-Paul**, tous les trois Maîtres-Assistants, respectivement de l'UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR STRM) de l'Université Félix

Houphouët-Boigny (UFHB) d'Abidjan-Cocody, et du Département de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMI) de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) de Yamoussoukro, pour leur aide chaleureuse lors de l'analyse de nos données d'études, de la conception de la base de données et l'examen du travail dans son intégralité.

Nos remerciements sont portés à l'encontre de notre structure d'accueil la Compagnie Minière du Littoral et son chaleureux personnel à commencer par :

Mr **BONSU Kwaku Anthony**, Directeur Technique Adjoint pour son accueil des plus chaleureux et pour sa gaieté qui nous véhiculée chaque jour durant tout notre stage.

Mr **FOFANA Souleymane**, Ingénieur Géologue Sénior, chef de service géologie pour m'avoir pris dans son service et suivi. Merci à son équipe Mr **SALIA Salia** son adjoint, Mr **GBE Ninleu**, Mr **TOUTOUPKO Jean** et toute l'équipe géologique pour leur savoir qu'ils nous ont apporté et pour l'aide à la conversion de nos connaissances théoriques en pratique.

Mr **BROU Konan Sylvain** Chef de service Environnement Hygiène et Sécurité pour avoir participé de façon silencieuse à l'obtention de ce stage et qui permet chaque année aux étudiants de notre modeste université d'avoir un stage à la CML.

Nous ne pouvons conclure ces remerciements sans citer les personnes qui nous ont soutenu, aimé et accordé toute leur attention dans la réalisation de ce travail.

À mon père **KOUADIO Senzé Lambert** et à ma mère **KOFFI Adjoua Justine** épouse **KOUADIO**, leur amour et leur soutien sans pareil nous a permis de surmonter toutes les difficultés et d'atteindre ce présent travail.

À mon grand ami **COULIBALY Yacouba Juvenal**, nous disons merci du soutien qu'il nous apporte depuis notre 3<sup>ème</sup> année, plus particulièrement lors de la soutenance sa présence m'a été d'une grande aide et d'une grande force lors de la présentation de ce mémoire.

À cette personne spéciale **WOHI Safira Laetitia**, un merci tout aussi particulier lui est adressé pour sa présence et ses prières à notre égard. Sa présence nous a été d'une grande aide car elle nous a permis de supporter au mieux le stress de la soutenance. Sachez que ces remerciements sont très peu significatifs par rapport à ceux que vous nous avez apporté. Que Dieu vous bénisse infiniment.

Enfin, merci à tous ceux qui nous ont apporté leur soutien de près ou de loin, leur attention dans leur comportement et prière de chaque jour, vos noms sont gravés précieusement en nous ils y trouvent une place indélébile que nul ne saurait effacer, sachez que nous ne vous oublions

pas, nous vous portons dans nos prières afin que le Seigneur, Dieu dans son infini bonté vous gratifie à l'infini toute votre bienveillance.

## TABLE DES MATIERES

DEDICACES .....	i
REMERCIEMENTS .....	ii
TABLE DES MATIERES .....	v
LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES .....	vii
LISTE DE TABLEAUX.....	viii
LISTE DE FIGURES.....	ix
LISTE DES ANNEXES .....	x
INTRODUCTION .....	1
PREMIÈRE PARTIE : GÉNÉRALITÉS .....	4
1.1 Présentation de la zone d'étude.....	5
1.1.1 Localisation du gisement de manganèse de Lauzoua.....	5
1.1.2 Cadre géographique de la région.....	6
1.1.2.1 Climat et végétation.....	6
1.1.2.2 Relief et topographie .....	6
1.1.3 Contexte géologique du gisement de Lauzoua.....	6
1.1.4 Cadre structural et minéralogique du gisement de Lauzoua .....	7
1.2 SIG et différents outils d'interpolation .....	8
1.2.1 Système d'information géographique : SIG.....	8
1.2.2 Bref aperçu des outils d'interpolation .....	9
1.2.2.1 Méthodes d'interpolation dites déterministes.....	9
1.2.2.1.1 Méthodes d'interpolation par partitionnement de l'espace.....	9
1.2.2.1.2 Méthodes barycentriques .....	10
1.2.2.2 Méthodes d'interpolation dites stochastiques .....	12
DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	13
2.1 Matériel.....	15
2.1.1 Données de l'étude .....	15
2.1.2 Outils informatiques.....	15
2.2 Méthodologie .....	16
2.2.1. Constitution de la base de données .....	16
2.2.2 Analyse exploratoire de la base de données mise en place .....	17

2.2.3 Méthodologie des différents processus d'interpolation .....	18
2.2.3.1 Interpolation des teneurs à partir de la méthode IDW .....	18
2.2.3.1.1 Paramétrage de l'interpolateur IDW .....	18
2.2.3.1.2 Validation croisée : cas de la méthode IDW.....	19
2.2.3.2 Interpolation des teneurs à partir de la méthode géostatistique : le krigeage .....	20
2.2.3.2.1 Analyse variographique .....	20
2.2.3.2.2 Technique de la validation croisée : cas du krigeage.....	22
2.2.3.2.3 Krigeage.....	23
2.2.3.2.3.1 Paramétrage de l'interpolateur krigeage .....	24
TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS ET DISCUSSION .....	22
3.1 Résultats.....	26
3.1.1 Résultats de l'analyse exploratoire des données d'étude .....	26
3.1.2 Estimation spatiale des réserves manganésifères de la zone Lauzoua C-Ext .....	28
3.1.2.1 Estimation spatiale des réserves de la zone Lauzoua C-Ext par IDW.....	28
3.1.2.1.1 Résultats de la validation croisée : cas de la méthode IDW .....	31
3.1.2.2 Estimation spatiale des réserves de la zone Lauzoua C-Ext par krigeage.....	34
3.1.2.2.1 Géotraitement par krigeage ordinaire (KO).....	34
3.1.2.2.1.1 Variographie selon le KO .....	34
3.1.2.2.1.2 Nuage de corrélation du KO .....	35
3.1.2.2.1.3 Validation du modèle : cas du KO.....	37
3.1.2.2.1.4 Modélisation spatiale de la zone Lauzoua C-Ext par KO.....	37
3.1.2.2.2 Géotraitement par krigeage universel (KU).....	40
3.1.2.2.2.1 Variographie selon le KU .....	40
3.1.2.2.2.2 Nuage de corrélation : cas du KU .....	41
3.1.2.2.2.3 Validation du modèle : cas du KU.....	43
3.1.2.2.2.4 Modélisation spatiale de la zone C-Ext par KU.....	43
3.1.3 Analyse comparative des méthodes d'estimation .....	45
3.2 Discussion.....	47
Conclusion .....	51
RÉFÉRENCES .....	44

## **LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES**

**BRGM** : Bureau de Recherche Géologique et Minière (France)

**CGM** : China National Geological & Mining Corporation

**CML** : Compagnie Minière du Littoral

**EQM** : Erreur Quadratique Moyenne

**Ext** : Extension

**GPS** : Global Positioning System

**IMI** : Institute Manganèse International

**IDW** : Inverse Distance Weight

**KO** : Krigeage Ordinaire

**KU** : Krigeage universel

**NW** : Nord-Ouest

**NWW** : Nord-ouest-ouest

**SE** : Sud-Est

**SEE** : Sud-est-est

**SIG** : Système Informatique Géographique

**SODEMI** : Société pour le Développement minier (Côte d'Ivoire)

**UFR** : Unité de Formation et de Recherche

**UJLoG** : Université Jean Lorougnon Guédé

**UTM** : Universel Transversal Mercator

**2D** : Deux Dimensions

## **LISTE DE TABLEAUX**

<b>Tableau I</b> : Composition chimique de chaque type de minerai en (%) du gisement de Lauzoua .....	8
<b>Tableau II</b> : Paramètres d'interpolation IDW.....	19
<b>Tableau III</b> : Paramètres de l'interpolateur krigeage .....	24
<b>Tableau IV</b> : Statistiques de la base de données.....	26
<b>Tableau V</b> : Validation croisée par la méthode IDW .....	32
<b>Tableau VI</b> : Paramètres variographiques du KO .....	35
<b>Tableau VII</b> : Résultats de la validation croisée selon le KO .....	37
<b>Tableau VIII</b> : Analyse variographique selon le krigeage universel.....	41
<b>Tableau IX</b> : Résultats de la validation croisée par KU .....	43
<b>Tableau X</b> : Comparaison des méthodes d'estimation .....	46

## **LISTE DE FIGURES**

<b>Figure 1</b> : Localisation du gisement de Lauzoua zone C-Ext. ....	5
<b>Figure 2</b> : Carte géologique de la région de Lauzoua (Delor et <i>al.</i> , 1995 ; Dago, 2014) .....	7
<b>Figure 3</b> : Polygones de Thiessen (lignes pleines) accompagnés de la triangulation de Delaunay associée (lignes pointillées), (Baillargeon, 2005). ....	10
<b>Figure 4</b> : Répartition des puits sur la zone d'étude .....	15
<b>Figure 5</b> : Illustration de la méthode de rééchantillonnage utilisée .....	17
<b>Figure 6</b> : Schéma type d'un variogramme.....	21
<b>Figure 7</b> : Histogramme des données de teneur en Mn.....	27
<b>Figure 8</b> : Diagramme d'Henry pour la teneur en Mn .....	27
<b>Figure 9</b> : Modélisation spatiale par IDW de paramètre a) $n=2$ ; b) $n=2,34$ ; .....	29
<b>Figure 10</b> : Modélisation spatiale par IDW de paramètre c) $n=3$ ; d) $n=4$ .....	30
<b>Figure 11</b> : Modélisation spatiale par IDW de paramètre $n=5$ .....	31
<b>Figure 12</b> : Modélisation spatiale retenue après validation $n=2,34$ .....	33
<b>Figure 13</b> : Variogrammes modélisés selon le modèle théorique, a) gaussien, b) sphérique et c) exponentiel.....	35
<b>Figure 14</b> : Nuages de corrélation selon le modèle théorique par KO a) gaussien, b) sphérique et c) exponentiel.....	36
<b>Figure 15</b> : Carte de répartition spatiale des teneurs en Mn par KO selon le modèle théorique sphérique.....	38
<b>Figure 16</b> : Carte des écarts-type d'estimation pour le KO .....	39
<b>Figure 17</b> : Variogrammes tracés selon le modèle, a) gaussien, b) sphérique, et c) exponentiel .....	41
<b>Figure 18</b> : Nuages de corrélation selon le modèle théorique par KU, a) gaussien, b) sphérique, et c) exponentiel.....	42
<b>Figure 19</b> : Carte de répartition spatiale des teneurs en Mn par KU selon le modèle théorique exponentiel.....	44
<b>Figure 20</b> : Carte des écarts-type d'estimation pour le KU .....	45

## **LISTE DES ANNEXES**

**Annexe I :** Carte de localisation de la zone C-Ext du gisement de Lauzoua.

**Annexe II :** Base de données en teneurs de la zone C-Ext.

**Annexe III :** Paramètres d'interpolation des méthodes d'interpolation.

# **INTRODUCTION**

## INTRODUCTION

L'exploitation minière représente au niveau mondial une des activités économiques les plus importantes et rentables (Brou, 2014). Le continent africain est riche en ressources minières. Il est pourvu de 30 % des réserves minérales mondiales (Komassi, 2017). Il constitue ainsi le socle du développement économique de plusieurs pays africains (Komassi, 2017). La Côte d'Ivoire, pays situé en Afrique de l'Ouest, est doté d'un fort potentiel minier avec des réserves relativement estimées à de forts taux pour certains minerais (Halle & Bruzon, 2006). De ce fait l'État ivoirien a fait du secteur minier l'un de ses atouts majeurs de son développement économique et a même élaboré un code minier. Plusieurs permis d'exploration et d'exploitation ont été délivrés aux compagnies minières. C'est dans cet ordre d'idées que l'état ivoirien représenté par la SODEMI a signé un accord de partenariat avec le géant chinois CGM (China national Geological & Mining corporation). La CML (Compagnie Minière du Littoral) a ainsi vu le jour en 2011. Son objectif est d'exploiter l'élément chimique Mn (manganèse). Relativement abondant dans la croûte terrestre, le manganèse figure à la quatrième place des métaux usuels de nos sociétés modernes, après le fer, l'aluminium et le cuivre. En effet, il constitue un élément chimique très prisé par la société humaine. Son domaine d'intervention s'étend sur une large gamme d'activités. Son secteur de prédilection est la métallurgie. Près de 90% de sa production mondiale est destinée à la préparation des alliages ferreux et non-ferreux (IMI, 2012). Que ce soit les industries du bâtiment, de l'automobile, de la marine et même ceux de l'armement, l'addition de Mn comme adjuvant ou élément d'alliage est un processus plus que nécessaire pour l'accroissement des propriétés mécaniques des différents matériaux régissant ces industries. Jusqu'à ce jour, aucun substitut adéquat n'existe pour le remplacer dans ses différents domaines d'interventions. Les avancées modernes dont dispose l'humanité, n'aurait pu se faire sans son utilisation (IMI, 2012). Bien que sa valeur soit minimisée face à celle d'autres minerais tels que l'or, le diamant etc., le manganèse suscite la convoitise de grands pays tel la Chine premier producteur mondial (IMI, 2006). L'activité minière étant une activité de grande envergure en termes de finances, sa mise en place et sa réalisation sont d'autant plus rigoureuses. Alors, quel que soit le gisement considéré et la phase de son développement, des questions reviennent : « quel est le potentiel de ce gisement ? », « la rentabilité économique de ce gisement est-elle de mise ? » (Matheron 1955).

C'est pour répondre à toutes ces questions et permettre à tous les acteurs en jeu d'avoir une meilleure vision de l'intérêt économique du gisement, que les estimations sont faites. Ces estimations sont faites à partir de divers outils d'interpolation associés aux moyens de SIG pour discuter la rentabilité dudit gisement. Ces outils d'interpolation sont nombreux. Cependant à la

## INTRODUCTION

CML, seule la méthode des polygones de Thiessen est utilisée pour l'estimation des réserves. Pour une question de précision et d'acuité dans l'évaluation des réserves manganésifères de Lauzoua, le choix des outils d'interpolation s'est porté sur deux autres outils encore inexploités par la compagnie minière. C'est dans ce contexte d'idées qu'a été initié le présent travail intitulé : « ANALYSE COMPARATIVE DE L'IDW ET DUKRIGEAGE POUR L'ESTIMATION DES RESERVES MANGANESIFERES DU GISEMENT DE LAUZOUA : CAS DE LA ZONE C-EXT (SUD DE LA COTE D'IVOIRE) ».

L'objectif principal de ce travail est de comparer l'estimation spatiale des ressources manganésifères de la zone Lauzoua C-Ext à partir des interpolateurs pondération de la distance inverse ou IDW et krigeage. De façon spécifique, il s'agit :

- d'analyser la base de données en teneurs de Mn mise en place ;
- d'estimer spatialement les données de teneurs en Mn de la zone par les méthodes IDW et krigeage ;
- d'effectuer une analyse comparative des deux interpolateurs étudiés.

Ce présent mémoire est structuré en trois parties. La première partie présente les généralités où une description générale de la zone d'étude et des moyens d'estimation des réserves est faite. La seconde partie intitulée matériel et méthodes, cite le matériel utilisé et décrit la méthodologie de traitement adoptée pour l'étude. La troisième partie expose et discute les résultats obtenus lors de ce travail. Une conclusion dresse le bilan de l'étude, suivi de références pour conclure ce mémoire.

**PREMIÈRE PARTIE :**  
**GÉNÉRALITÉS**

1.1 Présentation de la zone d'étude

1.1.1 Localisation du gisement de manganèse de Lauzoua

Le gisement de manganèse de Lauzoua est situé au Sud de la zone forestière ivoirienne dans la région de Lôh-djiboua. Dans la sous-préfecture de Guitry département de Divo, à une cinquantaine de kilomètres au nord-ouest de Grand-Lahou, une piste de 7 Km conduit à la mine à partir de Dougodou. Ce gisement se situe entre les longitudes 5°21'10'' et 5°29'00'' Ouest et les latitudes 5°15'20'' et 5°22'40'' Nord. Le gisement de Lauzoua est couvert par des permis d'exploitation (PE 36) et d'exploration (PR 248) s'étendant respectivement sur des superficies d'environ 100 Km<sup>2</sup> et 88,6 Km<sup>2</sup>. Le gisement de Lauzoua est subdivisé en différentes zones pour son exploration et exploitation. La zone C-Ext du gisement de Lauzoua est le lieu choisi pour son exploration et exploitation. La zone C-Ext s'étend sur un périmètre de 1690,69 m soit 1,69 Km et couvre une surface de 212650,24 m<sup>2</sup>, environ 0,213 Km<sup>2</sup> (figure 1).

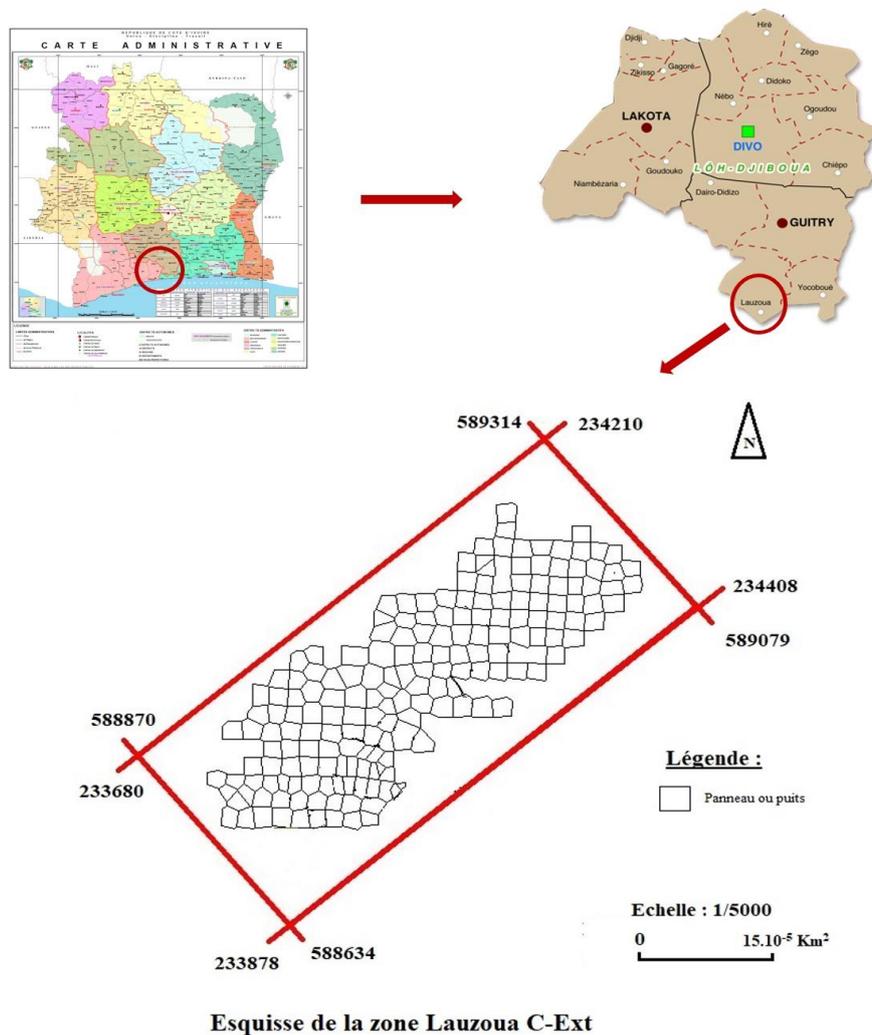


Figure 1 : Localisation du gisement de Lauzoua zone C-Ext.

### 1.1.2 Cadre géographique de la région

#### 1.1.2.1 Climat et végétation

Le climat rencontré dans la localité de Lauzoua est du type subéquatorial. Des fortes précipitations annuelles sont enregistrées avec des valeurs de 1470 à 2500 mm/an en moyenne (SODEMI, 2008 ; Soro, 2006). Des températures annuelles varient de 25 à 33°C en moyenne. Un taux d'humidité de l'ordre de 80 à 90%, est associé à ces dernières (Delor *et al.*, 1995 ; Boua, 2012). La couverture végétale à l'origine dominée par la forêt dense, est en voie de disparition au profit des activités agricoles de la population locale. On observe également des forêts marécageuses et des forêts en reconstitutions (forêts secondaires) (Nangah, 2014).

#### 1.1.2.2 Relief et topographie

La localité de Lauzoua a un relief dominé par une chaîne de collines orientée Nord-Est, Sud-Ouest. Les sommets les plus importants s'échelonnent de 103 m à 144 m du Sud-Ouest au Nord-Est. La topographie du milieu est caractérisée par des plateaux disposant d'un recouvrement terreux, argileux et/ou latéritique d'épaisseur variable (Fofana, 2004 ; Boua, 2012).

### 1.1.3 Contexte géologique du gisement de Lauzoua

Les concentrations manganésifères de Lauzoua sont situées dans les formations birrimiennes du Protérozoïque inférieur. Ces formations sont affectées par l'orogénèse éburnéenne, qui a débuté voici 2 000 millions d'années environ (Grandin, 1968 ; Benyahia *et al.*, 2005 ; Toummite, 2012). Ces formations birrimiennes plissées sont essentiellement constituées de roches volcaniques et sédimentaires épimétamorphiques. Ces roches constituent une série de sillons d'orientation NNE - SSW, au sein du socle ancien Libérien (Grandin & Perseil, 1977). Certaines sont enfermées dans des sillons de formations schisteuses et quartzitiques, toujours associés à des roches volcano-sédimentaires (Dago, 2014). L'horizon manganésifère du gisement de Lauzoua est interstratifié dans les schistes en une série de lentilles discontinues les unes à la suite des autres selon la direction birrimienne. La minéralisation qui se trouve sous forme d'oxydes secondaires provient de l'altération des gondites, ampélites et schistes manganésifères. Les travaux des auteurs (Papon, 1962 ; Camil, 1994) sur la région de Lauzoua, ont mis en exergue des formations volcaniques, des formations métamorphiques d'origine sédimentaire et d'origine volcanique (figure 2) (Dago, 2014). Le contenu de ces complexes volcano-sédimentaires a été réinterprété en termes de roches vertes (amphibolites) d'une part, et de bassins sédimentaires, d'autre part (Doumbia, 1997 ; Boua, 2012). L'ensemble volcano-

sédimentaire est essentiellement représenté par les formations cristallophylliennes, dont les schistes birrimiens infusés dans plusieurs générations de granitoïdes (granite, granodiorite à biotite) (Boua, 2012).

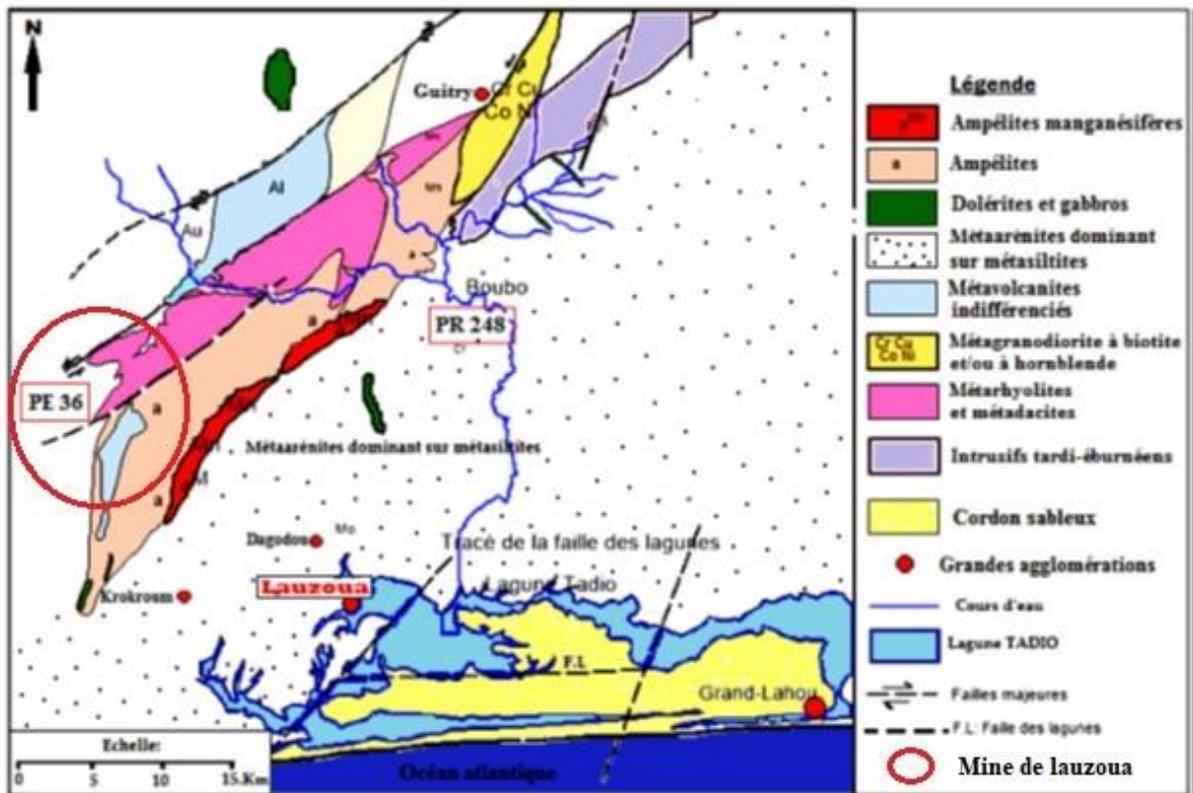


Figure 2 : Carte géologique de la région de Lauzoua (Delor et *al.*, 1995 ; Dago, 2014)

#### 1.1.4 Cadre structural et minéralogique du gisement de Lauzoua

Le cadre structural du gisement s'illustre par un pendage général de direction NW subvertical (pendage=70°). Au niveau de la dorsale de la chaîne de collines, le gisement se déverse progressivement sur les flancs où il tend à être subhorizontal (pendage<10°) (Fofana, 2004 ; Dago, 2014). Ce phénomène se manifeste à proximité de la surface topographique dudit milieu. En ce qui concerne l'aspect minéralogique des dépôts de manganèse de la région, trois types de minerai ont été mis en évidence (Grandin, 1977 ; Fofana, 2004) :

- le minerai de lentille (faciès stratifié) ;
- le minerai de démantèlement (faciès concrétionné) ;
- le minerai de cuirasse (faciès carapace massive).

La composition chimique de chaque type de minerai est illustrée par le tableau I.

**Tableau I :** Composition chimique de chaque type de minerai en (%) du gisement de Lauzoua

Minerais/Types	Lentille	Démantèlement		Cuirasse
Mn	46,6	46,5	42,5	55
Fe	3,3	4	4,7	1,5
SiO <sub>2</sub>	12,2	7,1	9,8	1,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,5	68	7,8	25

## 1.2 SIG et différents outils d'interpolation

De plus en plus des données à référence spatiale sont exploitées dans divers domaines de la société professionnelle. Qu'il s'agisse de précipitations mesurées à des stations météorologiques, de la densité d'un minerai dans des échantillons de sol ou de la concentration de gaz carbonique dans l'air en certains sites, ces données possèdent toutes un point commun. Elles sont toutes localisées dans l'espace géographique. Des méthodes statistiques adaptées à ce type de données ont été développées pour effectuer une interpolation spatiale. Ces méthodes permettent de prévoir la valeur prise par un phénomène naturel d'un site à partir d'observations ponctuelles de ce phénomène en des sites voisins. Comme le souligne Caloz, (1990) gérer c'est prévoir, et prévoir l'évolution d'un phénomène suppose que l'on connaisse sa dynamique. En occurrence, les paramètres qui le déterminent et leurs rôles respectifs (Chakroun, 2014). Cette prévision est faite au moyen des SIG qui sont des outils d'accès à la connaissance géographique et d'aide à la décision.

### 1.2.1 Système d'information géographique : SIG

Le SIG (Système d'Information Géographique) est un système d'information pour lequel la Terre est l'objet de référence fondamental. On le définit comme un ensemble d'équipements informatiques, de logiciels et de méthodologies pour la saisie des données. La majorité des données est spatialement référencée et destinée à la simulation du comportement d'un phénomène naturel observé (Caloz, 1990 ; Chakroun, 2014). Les SIG représentent un domaine en perpétuelle développement. Ils suscitent l'intérêt de plusieurs disciplines telles que la cartographie, la géographie, les statistiques, la télédétection et bien d'autres disciplines traitant de l'analyse de données localisées. Les SIG dans leur application, sont des moyens de gestions et d'aide à la décision. Les logiciels SIG comprennent en général cinq modules qui sont :

- le module de saisie et de vérification de données
- le module de stockage et de gestion de la base de données

- le module de sortie et de représentation des données
- le module de transformation des données
- le module d'interaction avec l'utilisateur

Il existe un grand nombre de logiciels en SIG concernant la gestion de l'espace sous toutes ses formes et à toutes échelles (aménagement, planification, environnement...). Parmi ces logiciels les plus couramment utilisés et connus de l'assistance scientifique sont les logiciels ArcGIS, Surpac, AutoCAD, MapInfo.

### **1.2.2 Bref aperçu des outils d'interpolation**

La fonction interpolatrice développée est un arrangement statistique qui implique des approches probabilistes basées sur des modèles soit déterministe ou stochastique. Deux types d'interpolation spatiale sont à dénombrer selon le modèle utilisé. Basé sur le modèle déterministe, ces méthodes interpolatrices s'appuient uniquement sur une entité mathématique désignant la variable régionalisée. Outre le modèle déterministe, l'interpolation spatiale se base sur un second modèle dit probabiliste ou stochastique. Dans ce cas, la variable régionalisée est vue comme la réalisation d'une fonction aléatoire. Elle incorpore ainsi des notions de hasard et de probabilité. Grâce à ce processus stochastique, des erreurs de prévision peuvent être calculées pour formaliser le comportement du phénomène naturel à l'étude.

#### **1.2.2.1 Méthodes d'interpolation dites déterministes**

Les méthodes déterministes se dispersent en deux groupes bien distincts. Ce sont les méthodes de partitionnement de l'espace et les méthodes barycentriques. Ces méthodes considèrent la variabilité régionale par une fonction aléatoire en assumant que les observations sont faites sans erreurs (Kurtzman & Kadmon, 1999 ; Koussa, 2018).

##### **1.2.2.1.1 Méthodes d'interpolation par partitionnement de l'espace**

Ces méthodes se distinguent par l'utilisation d'un partitionnement du champ d'étude afin de déterminer les poids des observations et le voisinage du point de prévision.

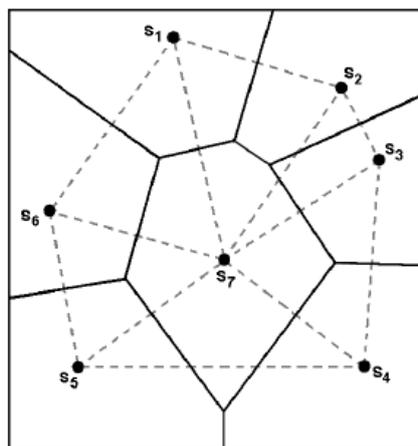
- **Polygones de Thiessen**

La méthode consiste à partitionner l'espace géographique en polygones, puis à attribuer une valeur à chacun des polygones. Elle permet de déterminer un zonage où la valeur de la variable à prédire est à priori la même que celle du site d'observation (donnée source connue et

localisée). Chacun de ses polygones désigne un polygone d'influence. Un polygone d'influence est obtenu en traçant les médiatrices des segments joignant un site à ses sites voisins.

- **Triangulation**

Cette méthode consiste à diviser le champ d'étude en triangles disjoints. Les sommets de ces triangles sont les sites échantillonnés, puis à interpoler à l'intérieur de chaque triangle. La construction des triangles n'est pas unique. Différentes approches sont donc proposées. La plus connue est celle de Delaunay. Il se base sur un partitionnement par polygones de Thiessen. Les sites d'observation ayant un côté de leurs polygones de Thiessen en commun sont reliés par une droite, formant ainsi la triangulation (Baillargeon, 2005 ; Claude, 2008). L'argumentation ci-contre est décrite par la figure 3 où on aperçoit les polygones de Thiessen en traits plein accompagnés de la triangulation de Delaunay associée (en pointillés).



**Figure 3 :** Polygones de Thiessen (lignes pleines) accompagnés de la triangulation de Delaunay associée (lignes pointillées), (Baillargeon, 2005).

### I.2.2.1.2 Méthodes barycentriques

Les méthodes d'interpolation de type barycentrique sont aussi appelées moyennes mobiles ou approximation de Kernel. Elles sont très intuitives car elles prévoient la valeur d'une variable régionalisée en un point non échantillonné par une moyenne pondérée des valeurs régionalisées observées (Arnaud & Emery, 2000 ; Baillargeon, 2005).

- **Interpolation par voisinage naturel**

L'interpolation par voisinage naturel est une méthode due à Sibson, (1981). Par cette méthode, la prévision de la valeur régionalisée en un site prend la forme d'une moyenne pondérée des

valeurs régionalisées observées des sites voisins. L'algorithme utilisé par l'outil, recherche le sous-ensemble d'échantillons en entrée le plus proche du point désigné. Ensuite il lui applique une pondération sur la base de surfaces proportionnelles afin d'interpoler (ou prédire) une valeur (Sibson, 1981). Ses propriétés de base sont son caractère local (utilisation d'un seul sous-ensemble d'échantillons entourant le point désigné) et la garantie que les hauteurs interpolées se situent dans la plage des échantillons utilisés.

- **Pondération de la distance inverse ou IDW**

L'outil Pondération de la distance inverse ou IDW est une méthode qui évalue les valeurs des cellules en calculant la moyenne des valeurs des points d'échantillonnage dans le voisinage de chaque cellule de traitement. Plus un point est proche du centre de la cellule en cours d'analyse, plus il a d'influence (ou poids) sur la procédure de calcul. Un rayon d'échantillonnage peut être défini afin d'accorder un poids constructif supplémentaire à la procédure de calcul. Le site à estimer est le centre de ce rayon prédéfini.

- **Interpolation polynomiale**

Selon le théorème de WEIERSTRAUSS, toute fonction continue peut-être approchée uniformément par un polynôme. L'interpolation polynomiale consiste à approcher une fonction  $f$  dont on connaît  $n$  points par un polynôme de degré  $(n-1)$ . Pour avoir une bonne interpolation polynomiale, il faut suffisamment d'informations à la fois sur la régularité et sur le nombre de points  $n$  utilisés. A priori plus ce nombre ( $n$  points utilisés) est grand plus le degré du polynôme est important et plus la précision devrait être grande. Les plus connues sont les interpolations de Lagrange et d'Hermite.

- **Splines**

L'outil splines utilise une méthode d'interpolation selon laquelle les valeurs sont déterminées à l'aide d'une fonction mathématique. Cette fonction réduit la courbure globale des surfaces et restitue une surface lisse passant exactement par les points d'observations. Les splines avec interruptions utilise une méthode semblable à la technique utilisée dans l'outil splines. La principale différence est que cette méthode respecte les discontinuités codées à la fois dans les interruptions en entrée et dans les données de points en entrée.

### I.2.2.2 Méthodes d'interpolation dites stochastiques

Les méthodes stochastiques intègrent des notions de probabilités lors de la procédure de calcul. Les plus connues sont au nombre de trois.

- **Techniques de régression classique**

La régression classique permet d'effectuer une interpolation en ajustant une surface aux valeurs régionalisées observées. Elle suppose à l'étude que la variable régionalisée est une fonction aléatoire qui se décompose en deux structures. Une structure déterministe fonction de la localisation des observations. Une fonction aléatoire normale d'espérance nulle, de variance homogène, qui ne présente pas de structure de dépendance spatiale. Cette technique possède les propriétés d'être approximative et globale. Sa surface générée est plutôt lisse du fait qu'elle ne passe pas nécessairement par tous les points d'observations.

- **Technique de régression locale**

Une extension de la régression classique permet de diminuer l'impact sur l'interpolation en un point  $S_0$  des observations éloignées de ce point. Il s'agit de la régression locale aussi nommée régression kernel ou plus spécifiquement régression pondérée géographiquement. Cette méthode postule le même modèle qu'en régression classique. En pratique, l'utilisateur de la régression locale a quatre choix à faire avant d'ajuster une surface. Il doit d'abord déterminer la forme de la tendance et la spécifier. Ensuite, la fonction de poids et la taille du voisinage doivent être sélectionnées. Le paramètre le plus difficile à déterminer est la taille du voisinage présentant une grande influence sur la surface obtenue. Plus sa valeur est grande, plus la surface d'interpolation est lisse.

- **Krigeage**

Le krigeage est la première méthode d'interpolation à tenir compte de la structure de dépendance spatiale des données. Le krigeage est une procédure d'interpolation qui fournit une estimation optimale, linéaire et non-biaisée de la propriété étudiée dont l'erreur d'estimation est minimisée. Tout comme les modèles de régression classique et locale, le krigeage est doté d'une structure déterministe et d'une fonction aléatoire. Sa fonction aléatoire est stationnaire, d'espérance nulle et de structure de dépendance spatiale connue (Baillargeon, 2005). Pour formuler complètement le modèle, il faut spécifier la forme de la tendance. C'est en fait cette tendance qui précise le type de krigeage effectué (Pierre, 2011). Il existe trois types classiques

de krigeage. La différence entre ces types d'estimation réside dans la connaissance de la statistique de la variable à interpoler :

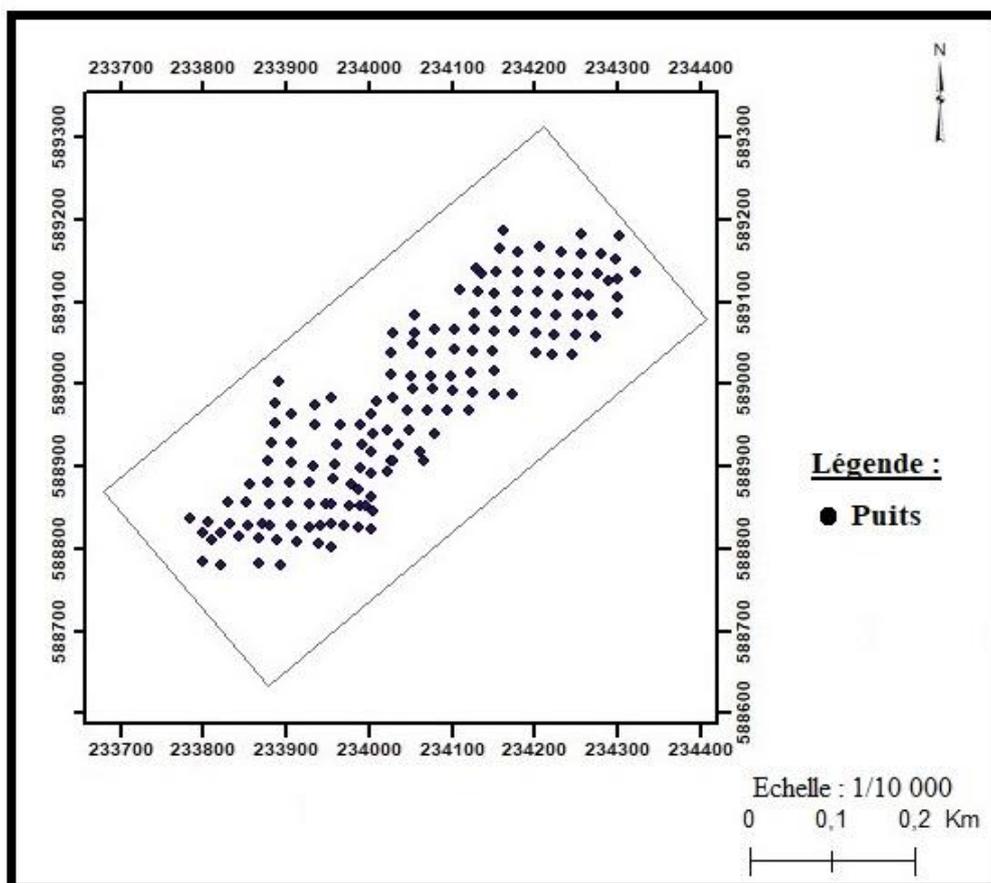
- le krigeage simple : variable stationnaire de moyenne connue ;
- le krigeage ordinaire : variable stationnaire de moyenne inconnue ;
- le krigeage universel : variable non-stationnaire contenant une tendance.

**DEUXIÈME PARTIE :**  
**MATÉRIEL ET**  
**MÉTHODES**

## 2.1 Matériel

### 2.1.1 Données de l'étude

Les principales données utilisées dans l'étude sont les valeurs de teneurs en Mn provenant des différents ouvrages de prospection (principalement des puits). Ces informations sont présentées sur la carte géologique de la zone d'étude Lauzoua C-Ext, réalisée par le service géologique de la CML (voir annexe I). Chaque puits est caractérisé par ses coordonnées X et Y en UTM, sa profondeur, les hauteurs de minéralisation et les valeurs de teneurs en Mn qui leur sont associées. Ces différentes données ont permis de constituer la base de données de la présente étude. On dénombre 155 puits répartis irrégulièrement sur la zone d'étude (figure 4).



**Figure 4 :** Répartition des puits sur la zone d'étude

### 2.1.2 Outils informatiques

Le matériel informatique est essentiellement constitué d'un ordinateur portable. Plusieurs logiciels ont été installés pour le traitement des données de terrain et l'estimation des réserves. Les logiciels utilisés sont :

- Microsoft office Excel 2019 pour la création et le stockage de la base de données ;

- IBM SPSS Statistics 26 et Minitab 19 pour le traitement statistique des données ;
- ArcGIS 10.5 pour l'application des différentes interpolations spatiales et la réalisation des cartes. Les méthodes de cartographie utilisées sont celles proposées par l'extension Geostatistical analyst du logiciel.

## 2.2 Méthodologie

### 2.2.1. Constitution de la base de données

Une base de données se doit d'être statistiquement viable pour toute étude statistique afin d'acquiescer à des résultats sans biais. Un rééchantillonnage des données de base s'impose. Il s'est opéré par le calcul de la teneur moyenne déterminée pour chaque puits échantillonné. Cette teneur est déterminée par l'équation 1 suivante :

$$T_m = \frac{\sum_{i=1}^n E p_i T_i}{\sum_{i=1}^n E p_i} \quad (1)$$

Avec

$T_m$  : Teneur moyenne en Mn par puits

$E p_i$  : Epaisseur minéralisée en i

$T_i$  : Teneur en Mn en i

Pour illustrer la méthode de calcul, les valeurs de teneurs moyennes des puits O21 et L19 sont déterminées comme suit :

$$T_m(O21) = \frac{(E p_1 * T_1 + E p_2 * T_2)}{(E p_1 + E p_2)} ; \quad T_m(L19) = \frac{(E p_1 * T_1 + E p_2 * T_2 + E p_3 * T_3)}{(E p_1 + E p_2 + E p_3)}$$

Un schéma illustratif de la méthode de rééchantillonnage des données est présenté pour apporter au lecteur une compréhension claire de la méthode adoptée.

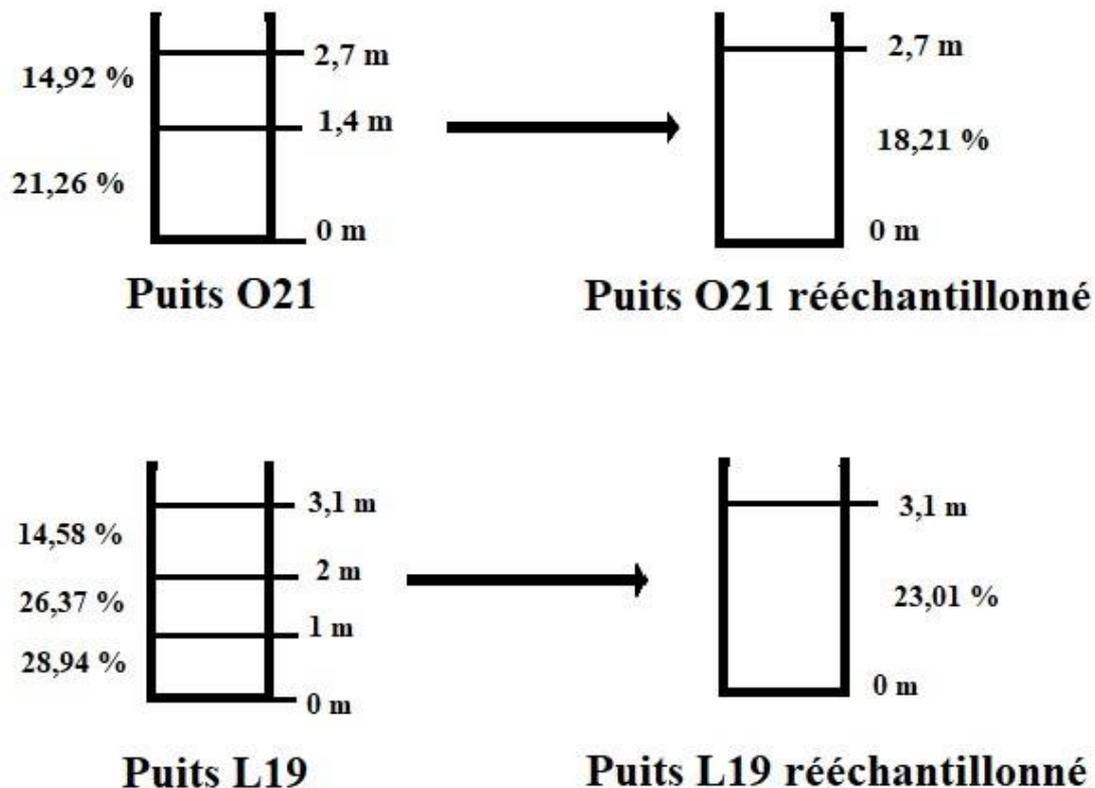


Figure 5 : Illustration de la méthode de rééchantillonnage utilisée

A partir d'Excel, une base de données des valeurs de teneurs en Mn par puits en 2D est établie (annexe II). La méthode appliquée à la détermination des teneurs dans le cas présent, se situe dans un contexte pédagogique. Dans un cadre entrepreneurial, elle serait inappropriée car elle pourrait créer un grand biais dans les résultats attendus.

### 2.2.2 Analyse exploratoire de la base de données mise en place

La mise en œuvre des techniques d'estimation exige une analyse préalable des données expérimentales. Le traitement de ces données en statistique permet la description de façon synthétique des données observées pour une analyse approfondie et une estimation sans biais. Divers outils statistiques (histogrammes, diagramme QQ) sont utilisés à cet effet, pour une compréhension plus accrue et une description plus accentuée des données de puits. Les histogrammes et diagramme QQ indiquent la loi suivant laquelle une distribution de données peut être modélisée.

### 2.2.3 Méthodologie des différents processus d'interpolation

#### 2.2.3.1 Interpolation des teneurs à partir de la méthode IDW

La pondération de la distance inverse repose principalement sur l'inverse de la distance élevée à une puissance mathématique n. Il s'agit d'un nombre positif et réel dont la valeur par défaut est 2. Son expression mathématique est déterminée par l'équation 2 suivante :

$$Z^*_{i=} \sum_{i=1}^N \frac{Z_i}{(d_i)^n} \quad (2)$$

Avec

$Z^*_i$ : valeur à estimer

$Z_i$ : données connues ou échantillonnées

$d_i$ : distance entre les différentes cellules

n : Paramètre puissance

Avec le paramètre Puissance, il est possible de contrôler la signification des points connus sur les valeurs interpolées en fonction de leur distance par rapport au point à estimer.

##### 2.2.3.1.1 Paramétrage de l'interpolateur IDW

Cinq paramètres sont utilisés pour le géotraitement des données par la méthode IDW. Ces paramètres sont :

- le voisinage prédéfini afin de contrôler les caractéristiques de la surface à interpoler ;
- la forme du secteur de recherche, généralement celle d'un cercle ;
- les dimensions du secteur de recherche (axe X et axe Y), déterminées automatiquement en fonction des limites du voisinage définies plus haut ;
- l'angle de la forme du secteur de recherche ;
- le paramètre puissance.

Le tableau II indique les valeurs des paramètres utilisés lors du géotraitement des données par IDW avec le logiciel ArcGIS 10.5.

**Tableau II** : Paramètres d'interpolation IDW

Paramétrage	
Voisinage	Maximum : 15 Minimum : 10
Forme du secteur de recherche	○ 1 secteur
Dimensions du secteur de recherche	Axe X : 100 m Axe Y : 100 m
Angle de la forme du secteur de recherche	0
Paramètre puissance	n=2, n=2,34, n=3, n=4, n=5

Hormis le paramètre puissance, les autres paramètres demeurent inchangés. L'optimalité de l'interpolateur est ainsi définie par son paramètre puissance. Le choix de la méthode optimale s'est fait par l'analyse des statistiques des erreurs de prédiction de la validation croisée.

#### **2.2.3.1.2 Validation croisée : cas de la méthode IDW**

La validation croisée est un principe qui consiste à retirer tour à tour une donnée connue dans l'ensemble de données et à estimer ce point à l'aide des autres données. À la fin du processus, en chaque point d'observation, on dispose de la vraie valeur observée ( $Z_i$ ) et de l'estimé ( $Z_i^*$ ) obtenu en utilisant les données voisines et la méthode testée. Des erreurs de prédiction :  $e_i = (Z_i) - (Z_i^*)$  sont alors construites afin de juger la robustesse de la prédiction à partir de leurs statistiques.

Avec la pondération de la distance inverse, le processus d'interpolation est répété en changeant le paramètre puissance  $n$ . Ainsi, une comparaison est effectuée sur les statistiques des erreurs obtenues afin de déterminer le processus le plus précis. La méthode optimale est celle donnant les meilleures statistiques d'erreur (INERIS, 2003 ; Despagne, 2006) :

- une moyenne proche de 0 ;
- une variance la plus faible possible.

D'autres statistiques jugeant de la précision de l'interpolateur sont ajoutées à ces dernières pour une comparaison rigoureuse de la méthode. Ces paramètres sont l'erreur quadratique moyenne (EQM) et le coefficient de corrélation (C.C).

### 2.2.3.2 Interpolation des teneurs à partir de la méthode géostatistique : le krigeage

Le krigeage est une méthode d'interpolation basée sur un modèle supposant la connaissance de la structure de dépendance spatiale de la variable aléatoire étudiée. Cette méthode probabiliste s'inscrit dans une démarche d'analyse géostatistique des données. La géostatistique est la discipline qui tient compte de l'organisation spatiale des variables afin d'étudier tout phénomène naturel quantifiable. Basée sur la théorie des variables régionalisées (Cressie, 1963 ; Koussa, 2018), son objectif premier est de mettre en évidence la structuration spatiale du phénomène étudié et d'envisager l'estimation (ou l'interpolation) de ce phénomène. Georges Matheron a fait le choix du terme de variable régionalisée pour souligner les deux aspects contradictoires de cette variable (Matheron, 1962) :

- un aspect aléatoire (qui explique les irrégularités locales) ;
- un aspect structuré (qui reflète les tendances du phénomène à grande échelle).

Effectuée à l'aide du logiciel ArcGIS 10.5, cette analyse géostatistique des données débute par le calcul du variogramme expérimental ajusté à un modèle théorique. Cette étape est dénommée analyse variographique.

#### 2.2.3.2.1 Analyse variographique

La variographie ou l'analyse variographique est une étape préalable au krigeage. Cette étape permet d'estimer la fonction de la continuité spatiale de la variable d'intérêt (Despaigne, 2006 ; Ibtissem *et al.*, 2014). Son outil privilégié est le variogramme. Le variogramme mesure la variabilité spatiale entre deux variables aléatoires mesurées en deux points distincts  $s$  et  $s+h$ . La plupart des auteurs travaillent avec  $\gamma(s,h)$ , la demie du variogramme, encore appelée semi-variogramme. Il est l'outil mathématique de la géostatistique, défini par l'équation 3 :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(s+h) - Z(s)] \quad (3)$$

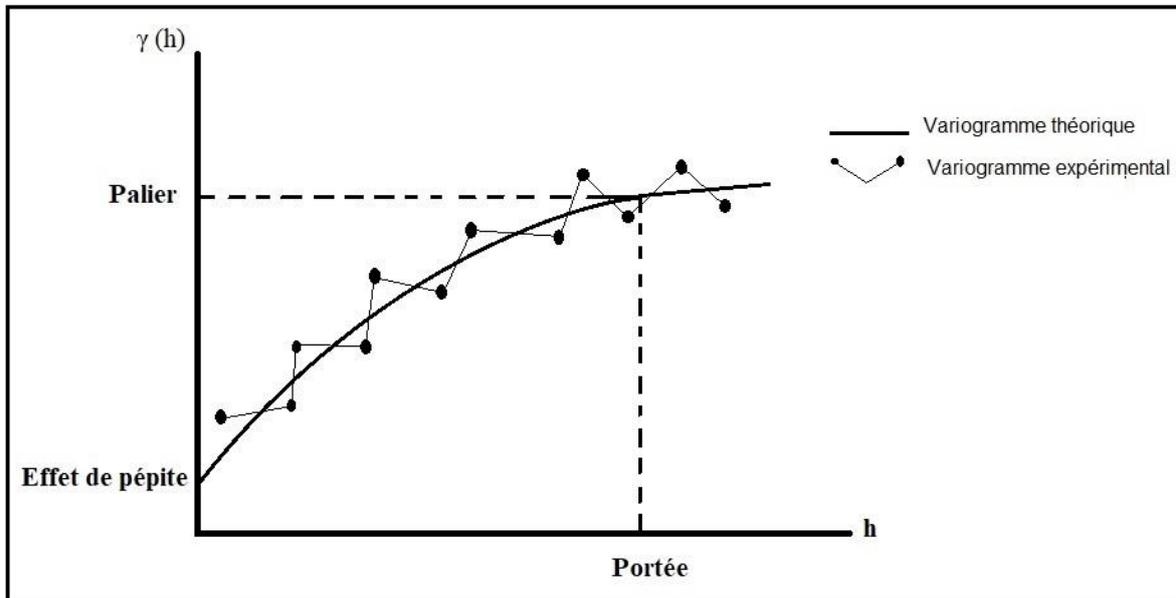
Où

$\gamma(h)$  : le semi-variogramme,

$\text{Var}[Z(s+h) - Z(s)]$  : la variance respectivement aux points  $s+h$  et  $s$ ,

$h$  : le vecteur de translation entre les points  $s$  et  $s+h$ .

A partir des données de l'étude, un variogramme expérimental est tracé. Il quantifie la corrélation spatiale des données. De par l'évolution de sa courbe, il décrit la structure spatiale de la variable d'intérêt. Il est caractérisé par un effet de pépite, une portée et un palier (Figure 5).



**Figure 6 :** Schéma type d'un variogramme

**L'effet de pépité** représente la discontinuité du variogramme à l'origine. Il traduit une forte irrégularité du processus des variations locales. Un effet de pépité s'explique par des variations non détectées à une très faible échelle. Il reflète le degré de régularité spatiale de la variable régionalisée.

**La portée** représente la valeur de  $h$  pour laquelle le variogramme atteint une limite. La portée caractérise la distance entre sites de mesures au-delà de laquelle les dépendances entre les mesures du processus sont nulles. Elle représente l'échelle de l'hétérogénéité du processus.

**Le palier** indique la valeur limite du variogramme pour de grandes valeurs de  $h$ .

Une bonne structure de variogramme expérimental est celle qui s'approche d'un modèle théorique connu avec un effet de pépité le plus faible possible (Moussaoui & Moussaoui, 2017). Les valeurs des paramètres portée et palier définissent la zone d'influence des données de la variable d'intérêt. Plus elles sont grandes plus le variogramme est idéal. Lorsque la portée augmente, la corrélation entre les sites de mesures et les sites à estimer augmente. Les valeurs observées apportent davantage d'informations sur la valeur inconnue. Par conséquent l'estimation faite est plus précise. Quant à l'influence du palier variographique, elle se situe au niveau de la variance d'estimation qui traduit la robustesse de l'estimateur (ou l'interpolateur). L'étape de la variographie qui s'en suit, consiste à ajuster au mieux le variogramme expérimental modélisé sur une courbe d'expression théorique connue. En effet, le variogramme expérimental n'est pas défini partout, notamment aux distances  $h$  au-delà de lesquelles, il

n'existe plus de paires de points de mesures. Ainsi, une fonction mathématique lui est ajustée pour palier à ce défaut. Cette fonction est appelée modèle de variogramme. Il est recommandé d'utiliser des modèles éprouvés ou des modèles construits à partir de modèles éprouvés (Despaigne, 2006). Ces types de modèles courants sont : linéaire, sphérique, gaussien et exponentiel. Lors de la présente étude, trois de ces modèles sont utilisés pour l'interpolation des données d'étude : sphérique, gaussien et exponentiel.

Les bases fondamentales de la géostatistique sont présentées par les auteurs tel que Matheron, (1962) ; Matheron, (1970) ; Journel & Huijbregts, (1978) ; Isaaks & Srivastava, (1989) ; Stein & Corsten, (1991) ; Cressie, (1993) ; Kitandis, (2000) ; Baillargeon, (2005) ; Marcotte, (2014).

### **2.2.3.2.2 Technique de la validation croisée : cas du krigeage**

Défini un peu plus haut (voir section II.2.3.1.2), la validation croisée est à la base une technique de la géostatistique pouvant s'appliquer à tous les modèles d'estimation. Selon (Despaigne, 2006), la validation croisée avec le krigeage fournit des critères statistiques de sélection dans le choix du modèle de variogramme (INERIS, 2003 ; Despaigne, 2006). Le rapport INERIS recommande le calcul des statistiques suivantes (Despaigne, 2006) :

- la moyenne et la variance de l'erreur d'estimation ;
- l'erreur quadratique moyenne ;
- la moyenne de l'erreur relative ;
- la moyenne et la variance de l'erreur standardisée ;
- le coefficient de corrélation entre la vraie valeur observée ( $Z_i$ ) et de l'estimé ( $Z_i^*$ ) obtenu.

Et définir également les caractéristiques d'un modèle de qualité optimale :

- la moyenne des erreurs d'estimation et des erreurs réduites (standardisées) est plus proche de 0, ce critère assure l'absence de biais ;
- la variance des erreurs d'estimation est plus faible, ce critère traduit la robustesse de l'estimateur et renseigne sur la précision de l'estimation ;
- la variance des erreurs standardisées est plus proche de 1, ce critère indique que l'écart-type de krigeage reflète correctement la précision de l'estimation ;
- la moyenne des erreurs relatives est plus proche de 0, ce critère traduit la bonne précision de l'estimateur ;
- la corrélation entre la vraie valeur observée ( $Z_i$ ) et de l'estimé ( $Z_i^*$ ) obtenu est plus proche de 1 et le nuage de corrélation plus resserré.

Ces critères de choix sont utilisés pour la détermination du modèle optimal retenu pour l'interpolation avec le krigeage. Un modèle sera d'autant plus performant que si ces critères sont les plus proches possibles de 0.

### 2.2.3.2.3 Krigeage

Le krigeage est une procédure géostatistique avancée qui génère une surface estimée à partir d'un ensemble dispersé de points avec des valeurs  $Z$ . Il est le seul algorithme d'interpolation qui intègre une règle de pondération directement déduite du comportement spatial de la donnée de la variable d'intérêt (teneurs en Mn dans le cas présent).

La théorie du krigeage a d'abord été développée dans un cadre stationnaire de second ordre. Sous cette hypothèse l'espérance de la fonction aléatoire étudiée est supposée connue et constante sur tout le champ. Il s'agit du krigeage simple (Matheron, 1970). Cependant l'hypothèse du krigeage simple est rarement vérifiée. La méthode a donc été généralisée au cas où l'espérance est inconnue et constante localement. Il s'agit du krigeage ordinaire (Matheron, 1970), le modèle de krigeage le plus couramment utilisé selon (Gratton, 2002), (Baillargeon, 2005). Ce type de krigeage est développé sous l'hypothèse plus générale de stationnarité intrinsèque. Le postulat évoqué par les hypothèses des deux types de krigeage cités précédemment peut être mis en doute. Postuler que l'espérance de la fonction aléatoire étudiée reste constante ou quasi-constante sur le champ d'investigation, semble souvent erroné (Baillargeon, 2005). Un troisième modèle a été développé : le krigeage universel. Celui-ci est présenté sous une hypothèse de stationnarité intrinsèque d'espérance nulle et de structure de dépendance spatiale de la fonction aléatoire connue. Universel signifie que la méthode est applicable même en présence d'une dérive non stationnaire sur le domaine étudié (Meylan, 1986 ; Stein & Corsten, 1991).

Dans le cadre de cette étude, les types de krigeage utilisés sont les krigeages ordinaire et universel. Dans le domaine minier, la géostatistique s'applique principalement à travers le krigeage ordinaire. Les données de puits suivent généralement une loi normale. Quant au krigeage universel, il a une approche plus universelle des données de puits. Ces types de krigeage sont retenus pour leur application plus ou moins simple et moins contraignant en hypothèses de départ.

**2.2.3.2.3.1 Paramétrage de l'interpolateur krigeage**

Les paramètres d'interpolation de base utilisés pour l'interpolateur krigeage sont dressés dans le tableau III. L'intégralité du paramétrage est présentée en annexe (annexe III), (Adrian & Diane, 2010).

**Tableau III** : Paramètres de l'interpolateur krigeage

Paramètres d'interpolation	Krigeage ordinaire	Krigeage universel
Voisinage	Maximum : 5 Minimum : 2	Maximum : 5 Minimum : 2
Forme du secteur de recherche	 4 secteurs	 4 secteurs
Dimensions du secteur de recherche	Variable	Variable
Angle de la forme du secteur de recherche	45°	45°

**2.2.4 Analyse comparative des interpolateurs étudiés**

Une étude comparative des méthodes d'interpolation est faite dans le but de déterminer l'interpolateur le plus représentatif des données de l'étude. Cette analyse comparative a pour but d'évaluer la performance prédictive des interpolateurs. Cette évaluation s'est basée sur la comparaison de trois statistiques (Koussa, 2018 ; Baka et al, 2019) :

- la moyenne des erreurs de prédiction assure l'absence de biais ;
- l'écart-type des erreurs de prédiction détermine la précision de l'estimation ;
- l'erreur quadratique moyenne (EQM) traduit la précision de l'estimateur.

Plus ces statistiques sont proches de zéro, plus l'interpolateur est qualifié de meilleur.

**TROISIÈME PARTIE :**  
**RÉSULTATS ET**  
**DISCUSSION**

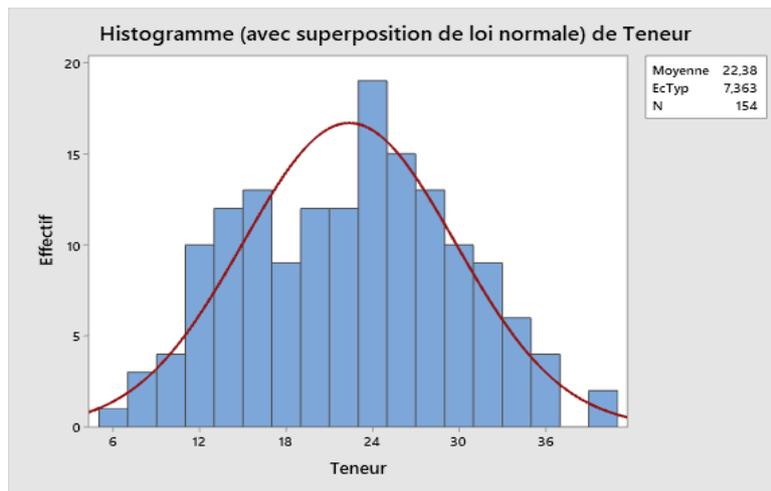
**3.1 Résultats****3.1.1 Résultats de l'analyse exploratoire des données d'étude**

Le traitement statistique de la base de données a donné des indications sur la distribution des données de la variable d'intérêt (teneur en Mn). Une distribution des données décalée à droite par rapport à la médiane est indiquée par une valeur négative du coefficient d'asymétrie. Une concentration des valeurs autour de la moyenne est observée. Cela est traduit par un écart-type dit faible. On note également un coefficient de variation de la variable d'intérêt inférieur à 50%, indiquant son insensibilité aux légères variations de la moyenne. En d'autres termes, les valeurs de teneurs de la zone d'étude sont sensiblement homogènes. Les valeurs statistiques sont consignées dans le tableau IV.

**Tableau IV** : Statistiques de la base de données

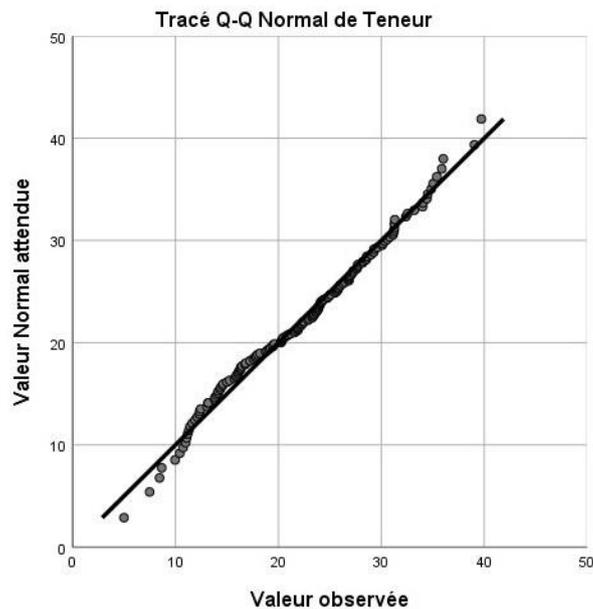
Paramètres statistiques	Teneur (%Mn)
Minimum	5
Maximum	39,71
Moyenne	22,38
Ecart-type	7,36
Variance	54,21
Coefficient de variation (%)	33
Asymétrie	-0,02
Aplatissement	-0,68

D'autres statistiques sont déterminées pour une analyse et un traitement plus exhaustifs des données relayées. Les histogrammes de la variable d'intérêt ont permis de faire ressortir la structure de la distribution des données. On peut observer pour la majeure partie des effectifs des données de teneur en Mn se situe autour de la moyenne. Une telle distribution est appelée loi normale (figure 6).



**Figure 7 :** Histogramme des données de teneur en Mn

Le diagramme d'Henry quant à lui permet d'apprécier l'adéquation d'une distribution observée à la loi de Gauss. Les réalisations d'une variable gaussienne donnent un nuage de points proche d'une droite. Le tracé Q-Q normal (figure 7) ou diagramme d'Henry pour la variable teneur en Mn indique une distribution des valeurs observées à la loi de Gauss.



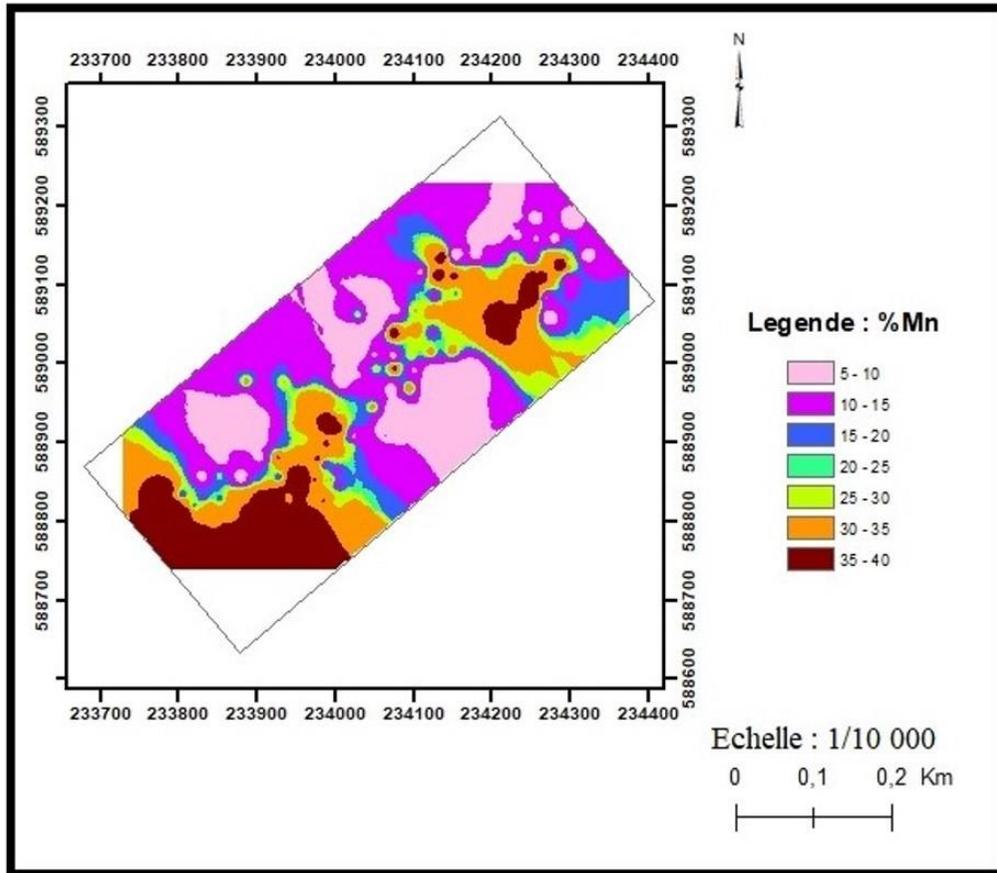
**Figure 8 :** Diagramme d'Henry pour la teneur en Mn

L'analyse exploratoire des données montre que la distribution des données en teneurs de Mn peut être modélisée par deux lois, une loi normale ou une loi gaussienne.

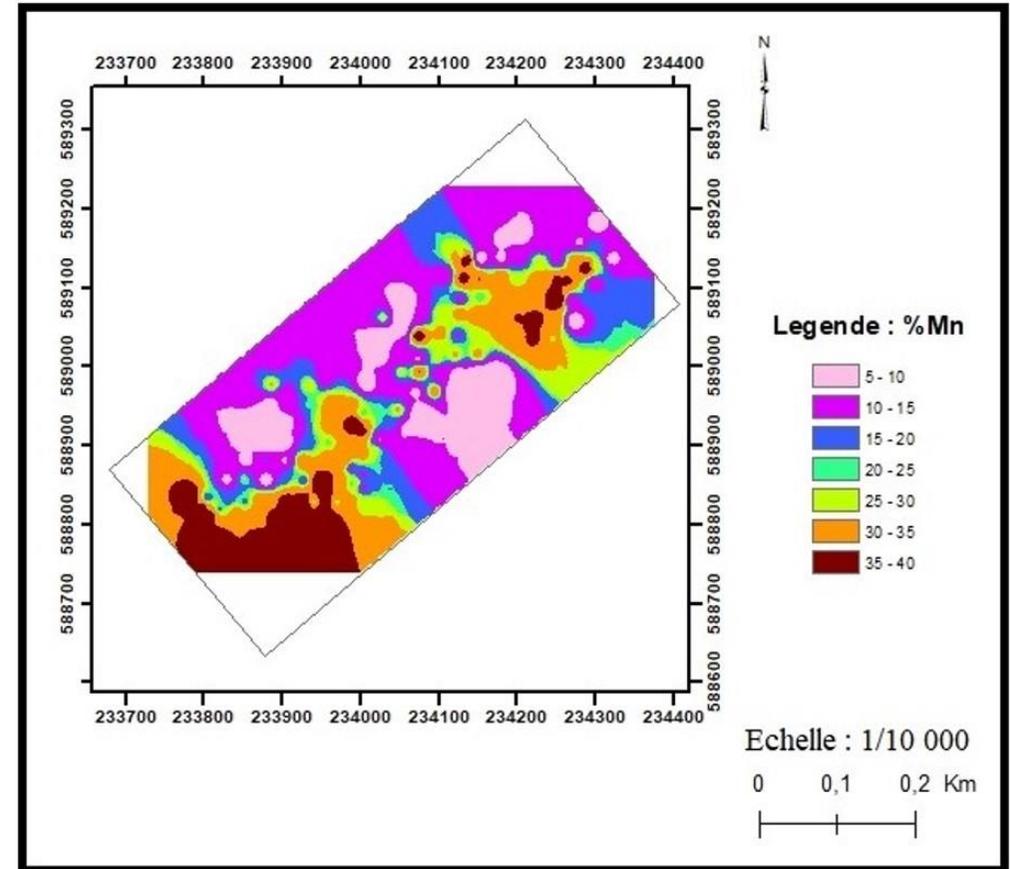
### **3.1.2 Estimation spatiale des réserves manganésifères de la zone Lauzoua C-Ext**

#### **3.1.2.1 Estimation spatiale des réserves de la zone Lauzoua C-Ext par IDW**

L'interpolation spatiale des données de teneurs en Mn par la méthode IDW s'est faite à partir de différents paramètres de puissance. Les figures 8, 9 et 10 illustrent les modélisations spatiales par IDW, évaluées à différentes valeurs de puissance. L'observation faite à partir des surfaces interpolées indique une couverture majoritaire des valeurs de teneurs en Mn comprise entre 10 et 15% (teneurs faibles). Les zones NE, SEE, SW et NWW sont principalement gouvernées par des faibles teneurs de Mn. Les fortes teneurs sont essentiellement concentrées dans la zone SSW. Elles comprennent les valeurs comprises de 30 à 40% de Mn (teneurs fortes). Les zones de faibles teneurs dominent le domaine étudié. En fonction des différentes classes de teneurs, les cartes restituées par la méthode IDW présentent des courbes d'isovaleurs. Ces courbes décrivent un aspect généralement arrondi sur leur flanc (œil de bœuf) autour des sites d'observation. Cet aspect est dû à l'influence du site le plus proche. Les données estimées ne tiennent compte que de la distance entre les sites de mesure.

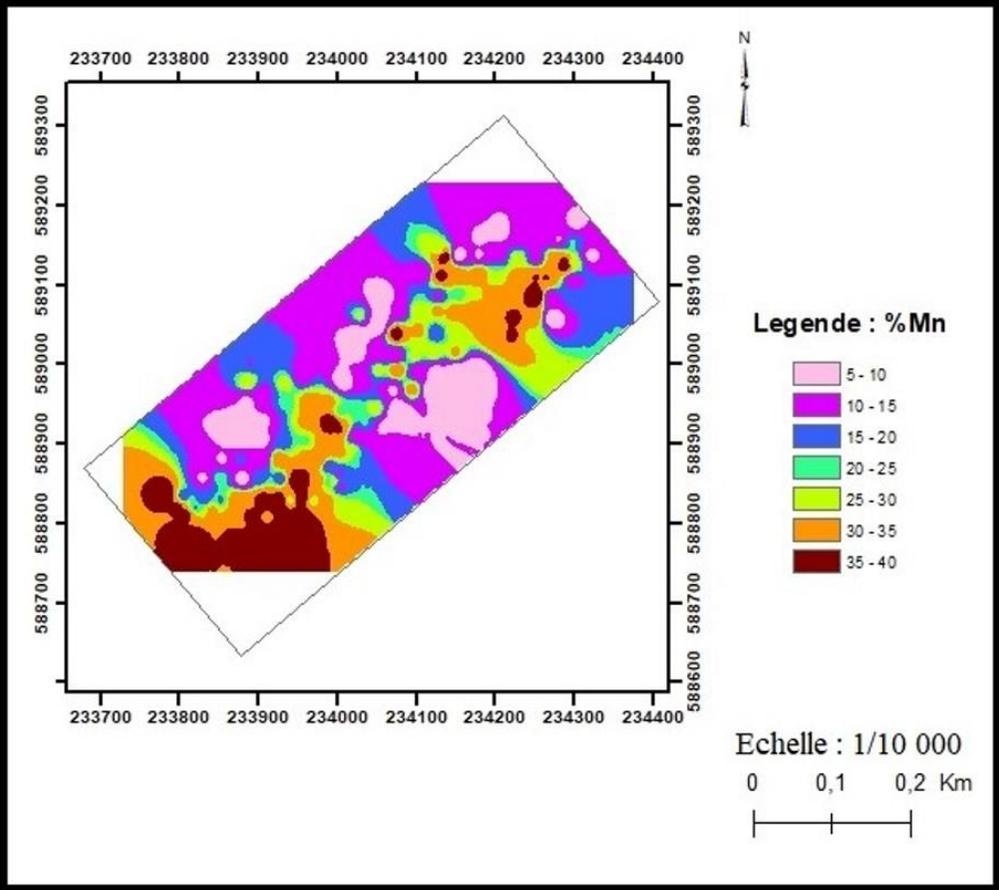


a

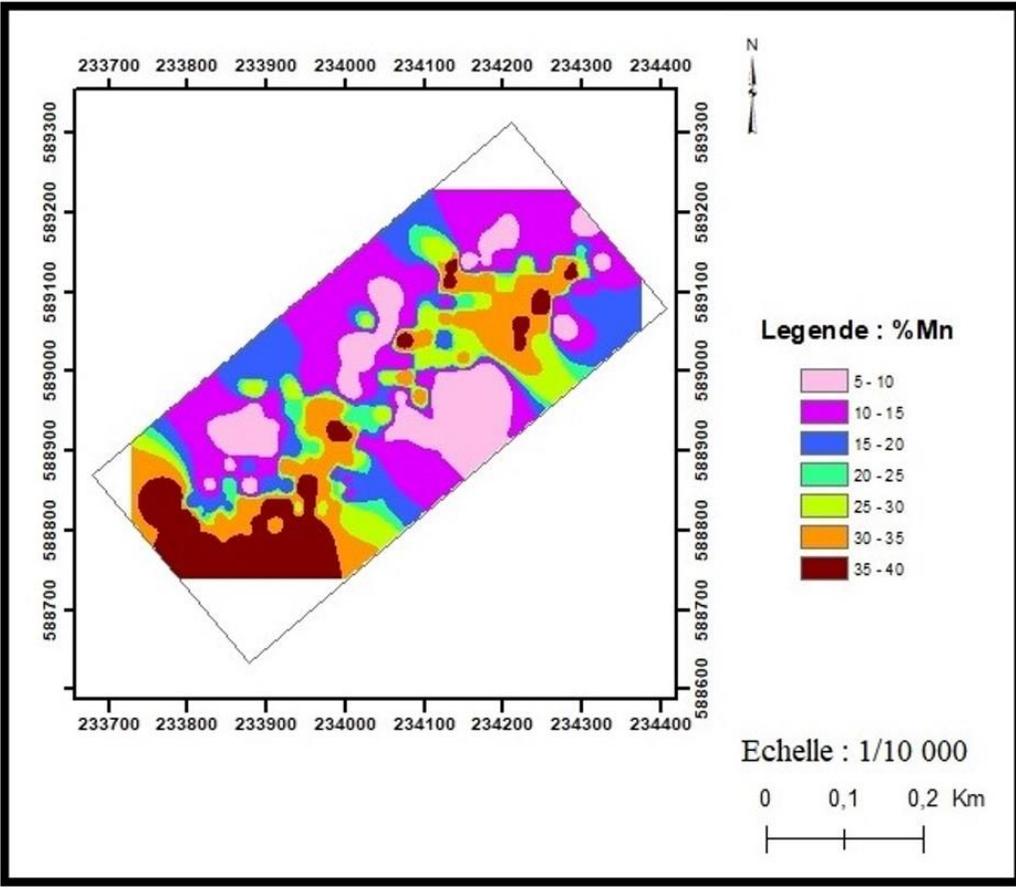


b

Figure 9 : Modélisation spatiale par IDW de paramètre a)  $n=2$  ; b)  $n=2,34$  ;



c



d

Figure 10: Modélisation spatiale par IDW de paramètre c) n=3 ; d) n=4

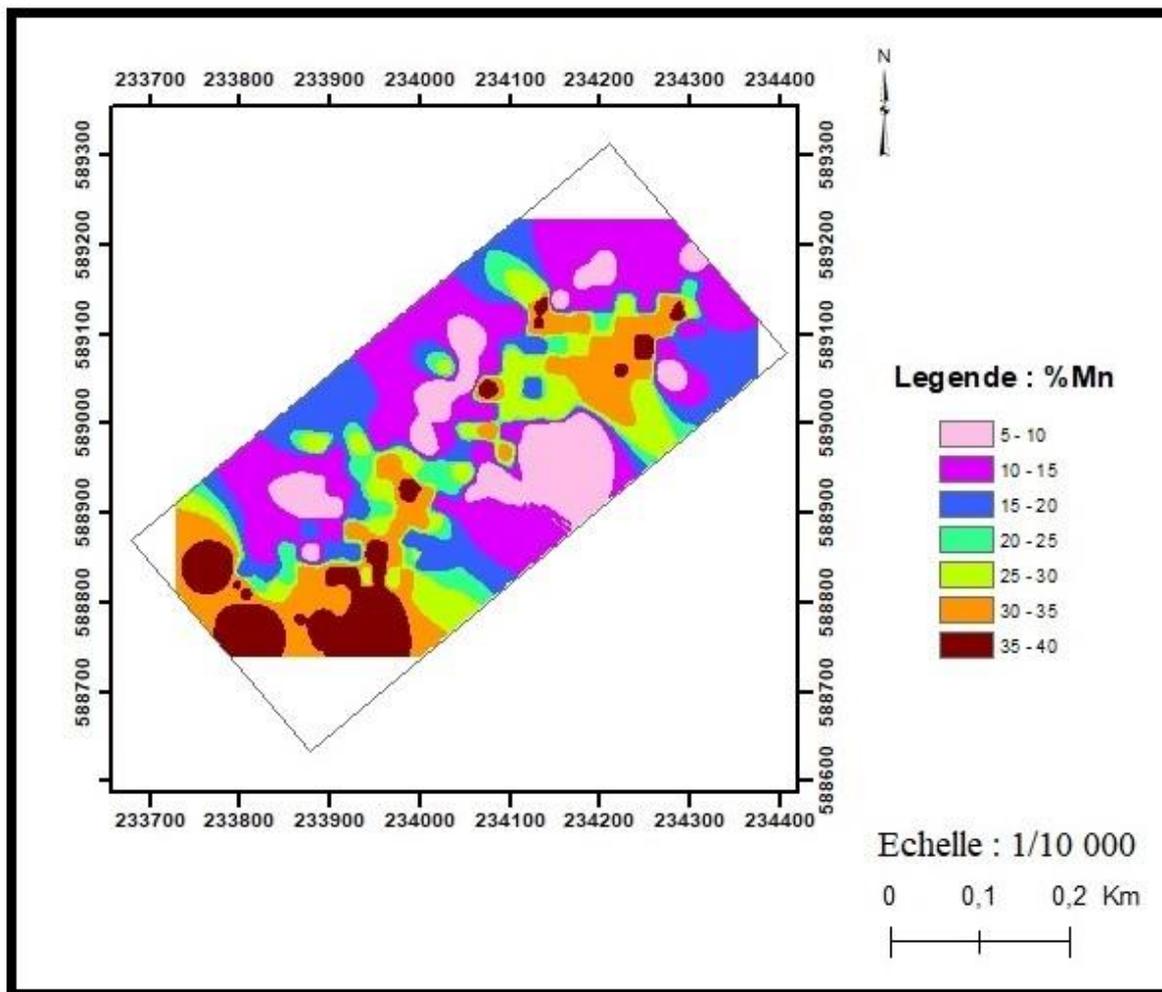


Figure 11 : Modélisation spatiale par IDW de paramètre n=5

### 3.1.2.1.1 Résultats de la validation croisée : cas de la méthode IDW

Les résultats de la validation croisée ont permis de comparer la méthode IDW à différentes valeurs de puissance. Ces statistiques indiquent la méthode IDW et sa valeur de puissance associée, la plus optimale dans l'interpolation des données. Le tableau V présente ces statistiques sur les erreurs de prédiction obtenues. Ces statistiques montrent pour une valeur de puissance n=4, la moyenne des erreurs de prédiction est la plus faible possible. Ce résultat désigne la valeur de puissance n=4 comme le paramètre de puissance optimale. A ce résultat, d'autres statistiques (variance, EQM, C.C) sont analysées et interprétées pour la détermination de la méthode optimale. Les valeurs de puissance n=2,34 et n=3 répondent à 2 sur 4 des critères de choix. Respectivement, l'un présente une valeur d'EQM la plus faible tandis que l'autre, une variance minimale. Cependant, la valeur de puissance n=2,34 est le paramètre puissance retenu comme la méthode optimale par IDW (figure 11). Ce choix s'est fait par comparaison

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

des moyennes des erreurs de prédiction. La valeur de puissance  $n=2,34$  a une moyenne des erreurs de prédiction plus proche de 0 (0,391 contre 0,488).

**Tableau V** : Validation croisée par la méthode IDW

Statistiques	n=2	n=2,34	n=3	n=4	n=5
Moyenne	0,389	0,391	0,488	0,368	0,469
Variance	33,355	34,215	33,057	35,862	37,018
EQM*	5,740	5,728	5,764	5,905	6,084
C.C*	0,580	0,591	0,592	0,510	-0,019

\*EQM : Erreur quadratique moyenne

\*C.C : Coefficient de corrélation

A l'instar des autres cartes obtenues par IDW, celle retenue après validation croisée, présente un domaine d'étude couvert majoritairement par de faibles valeurs (10 à 15%) en teneurs de Mn. Les valeurs moyennes (15 à 30%) de teneurs en Mn sont légèrement présentes à des endroits du champ d'étude (zones NNW, NNE, SEE, SWW). Une zone unique (zone SSW) contient les valeurs fortes (30 à 40%) de teneurs en Mn. Cependant, on peut observer de très petites surfaces à valeurs fortes en teneurs de Mn dans la zone NNE.

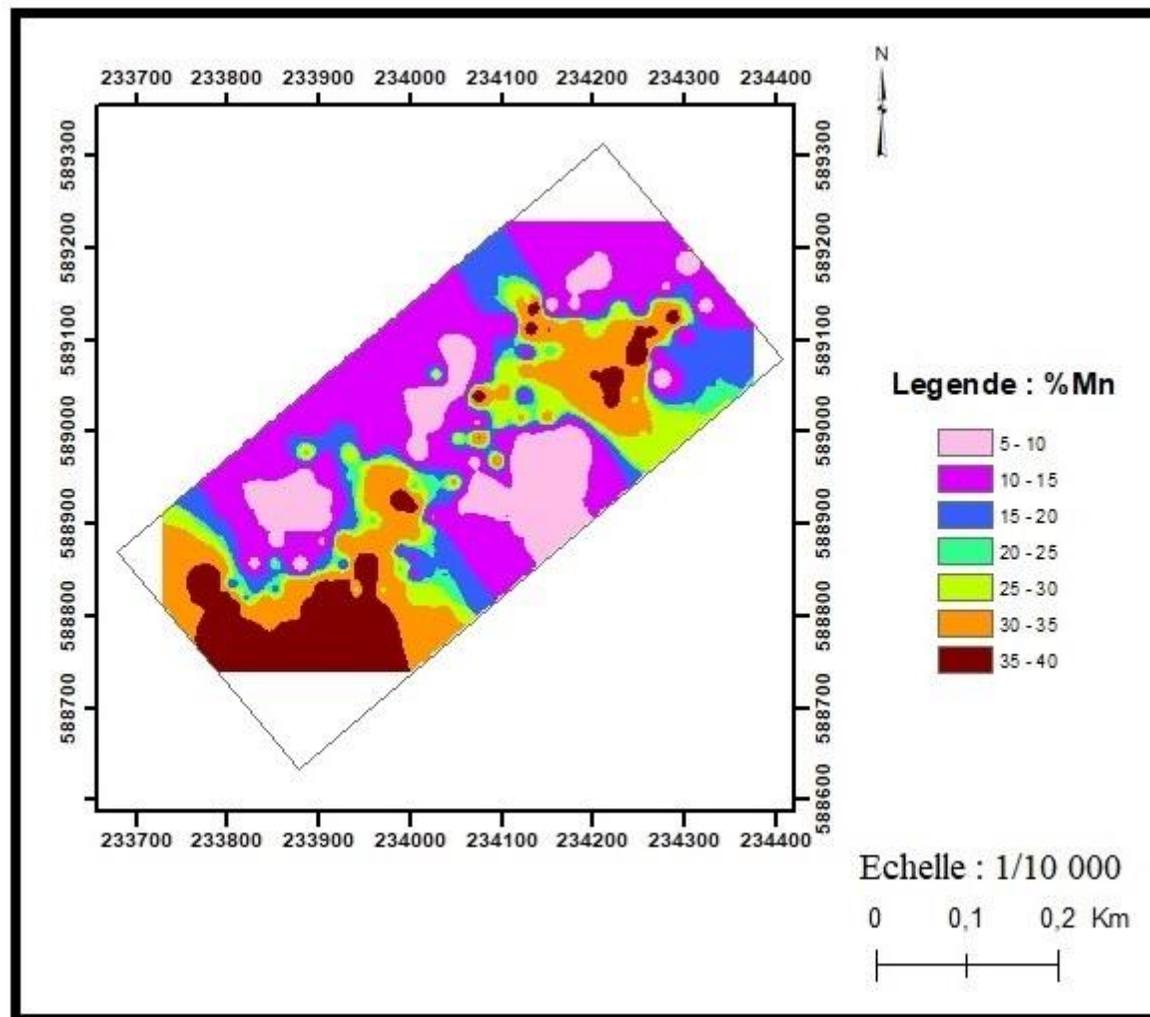


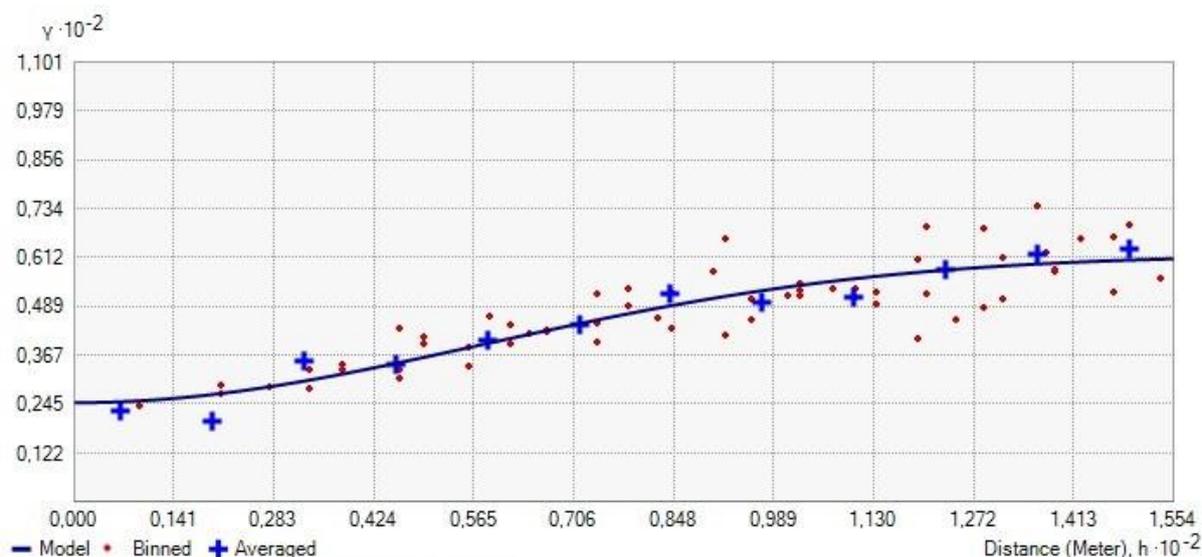
Figure 12 : Modélisation spatiale retenue après validation n=2,34

3.1.2.2 Estimation spatiale des réserves de la zone Lauzoua C-Ext par krigeage

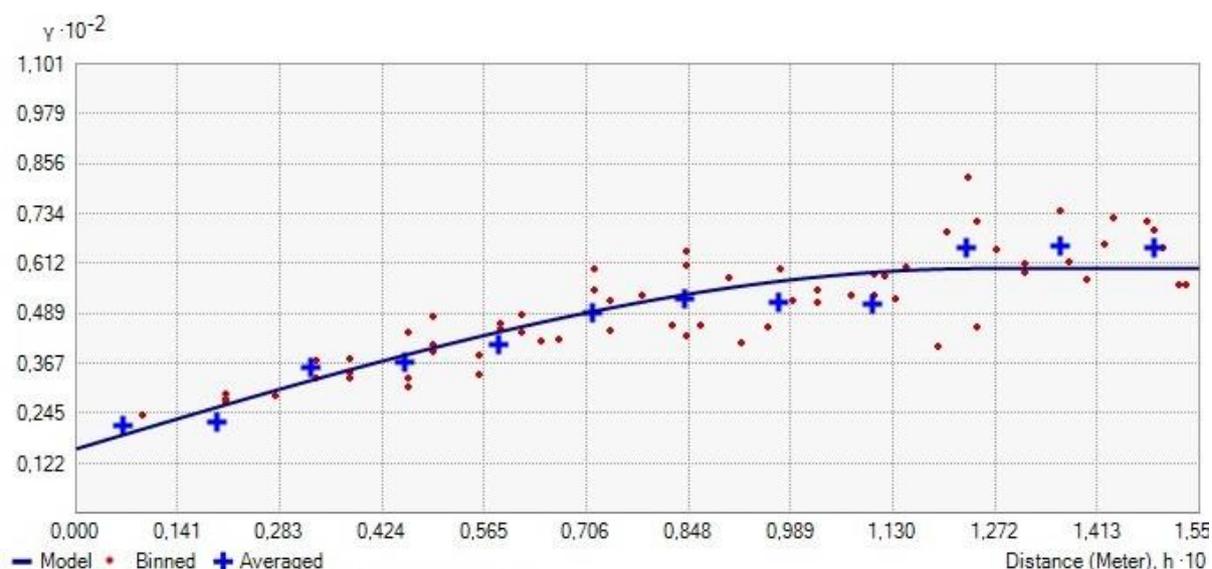
3.1.2.2.1 Géotraitement par krigeage ordinaire (KO)

3.1.2.2.1.1 Variographie selon le KO

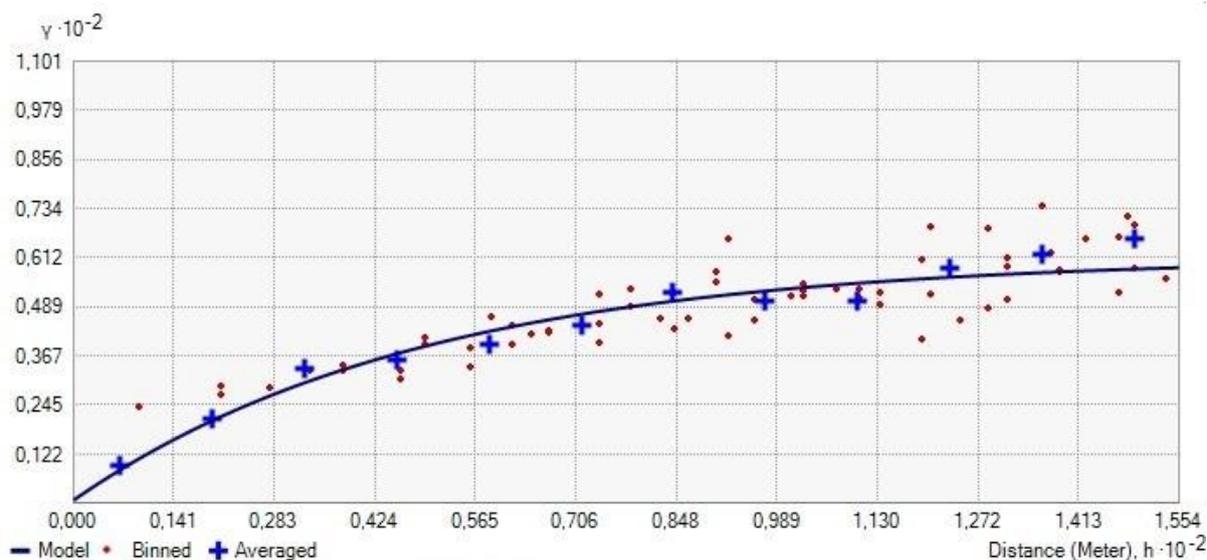
Les variogrammes expérimentaux des données de teneurs en Mn sont tracés et ajustés à des modèles théoriques (gaussien, sphérique et exponentiel). La figure 13 montre les différents variogrammes obtenus. Cette figure présente les variogrammes théoriques représentés en trait plein (bleu) et les variogrammes expérimentaux ajustés à ces derniers en croix (bleu).



a



b



C

**Figure 13 :** Variogrammes modélisés selon le modèle théorique, a) gaussien, b) sphérique et c) exponentiel.

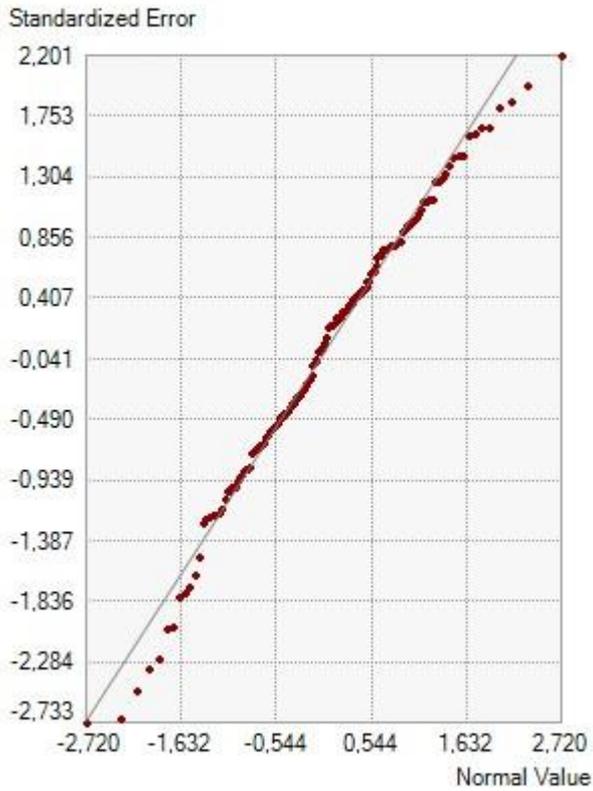
Leurs paramètres variographiques ont permis de jauger le modèle le plus adéquate pour le cadre de l'étude variographique en cours. Le tableau VI indique les valeurs paramétriques des différents variogrammes. Les résultats variographiques selon le krigeage ordinaire ont désigné le modèle exponentiel comme le modèle variographique optimal. Les paramètres effet de pépité et palier ont été les critères de choix dudit modèle.

**Tableau VI :** Paramètres variographiques du KO

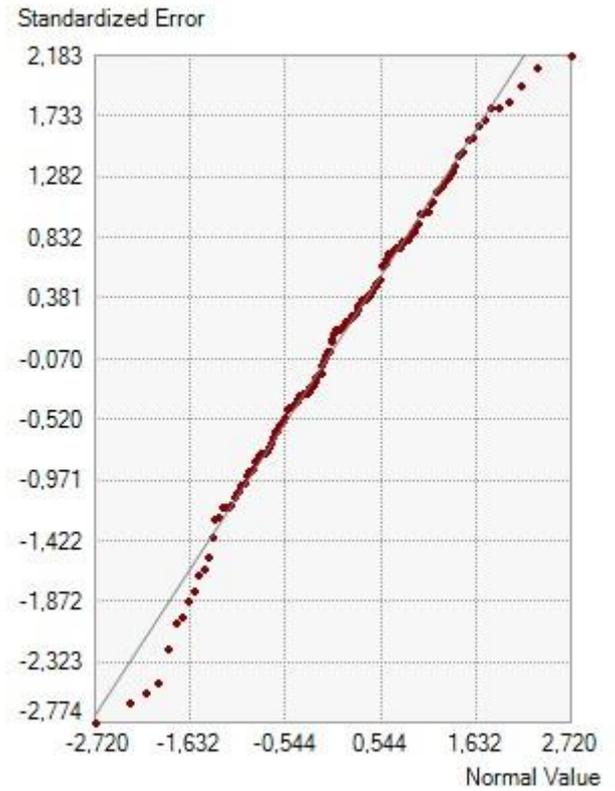
Modèle variographique	Gaussien	Sphérique	Exponentiel
Effet de pépité	24,72	15,63	0,70
Palier (m <sup>2</sup> )	37,11	44,30	60,51
Portée (m)	88,64	96,14	91,69

### 3.1.2.2.1.2 Nuage de corrélation du KO

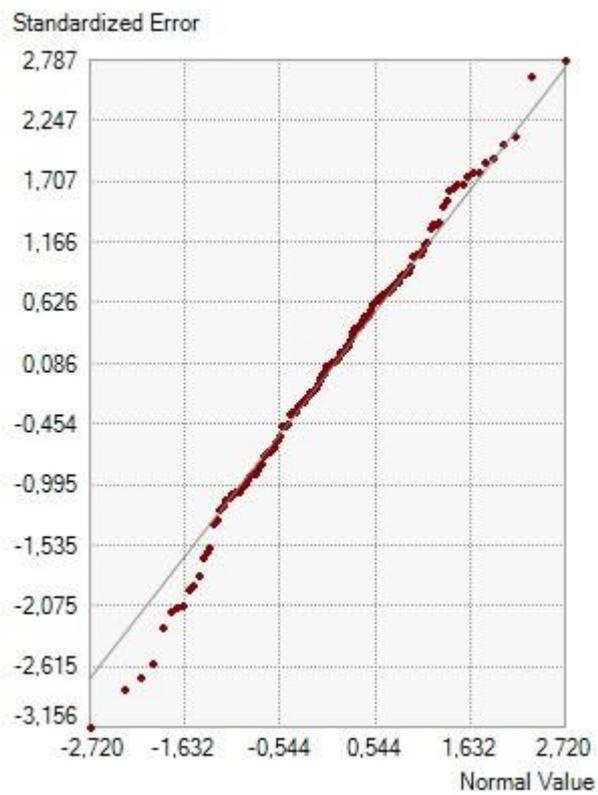
Le nuage de corrélation décrit la robustesse des estimations faites. Plus les points se resserrent autour de la bissectrice plus le modèle est optimale. Les nuages des différents modèles étudiés sont présentés sur la figure 14. La concentration des points autour de la bissectrice est visiblement plus accentuée au niveau du modèle exponentiel.



a



b



c

**Figure 14 :** Nuages de corrélation selon le modèle théorique par KO a) gaussien, b) sphérique et c) exponentiel.

**3.1.2.2.1.3 Validation du modèle : cas du KO**

La validation croisée avec le krigeage fournit des critères statistiques de sélection dans le choix du modèle variographique et définit par la même occasion les caractéristiques d'une méthode optimale. Le tableau VII présente les résultats de cette validation croisée. Les résultats de la validation croisée fixent le caractère optimal au modèle sphérique. Sur les sept critères de sélection de la validation croisée, le modèle sphérique en a obtenu 4. Il est suivi du modèle gaussien avec une note de 3/7.

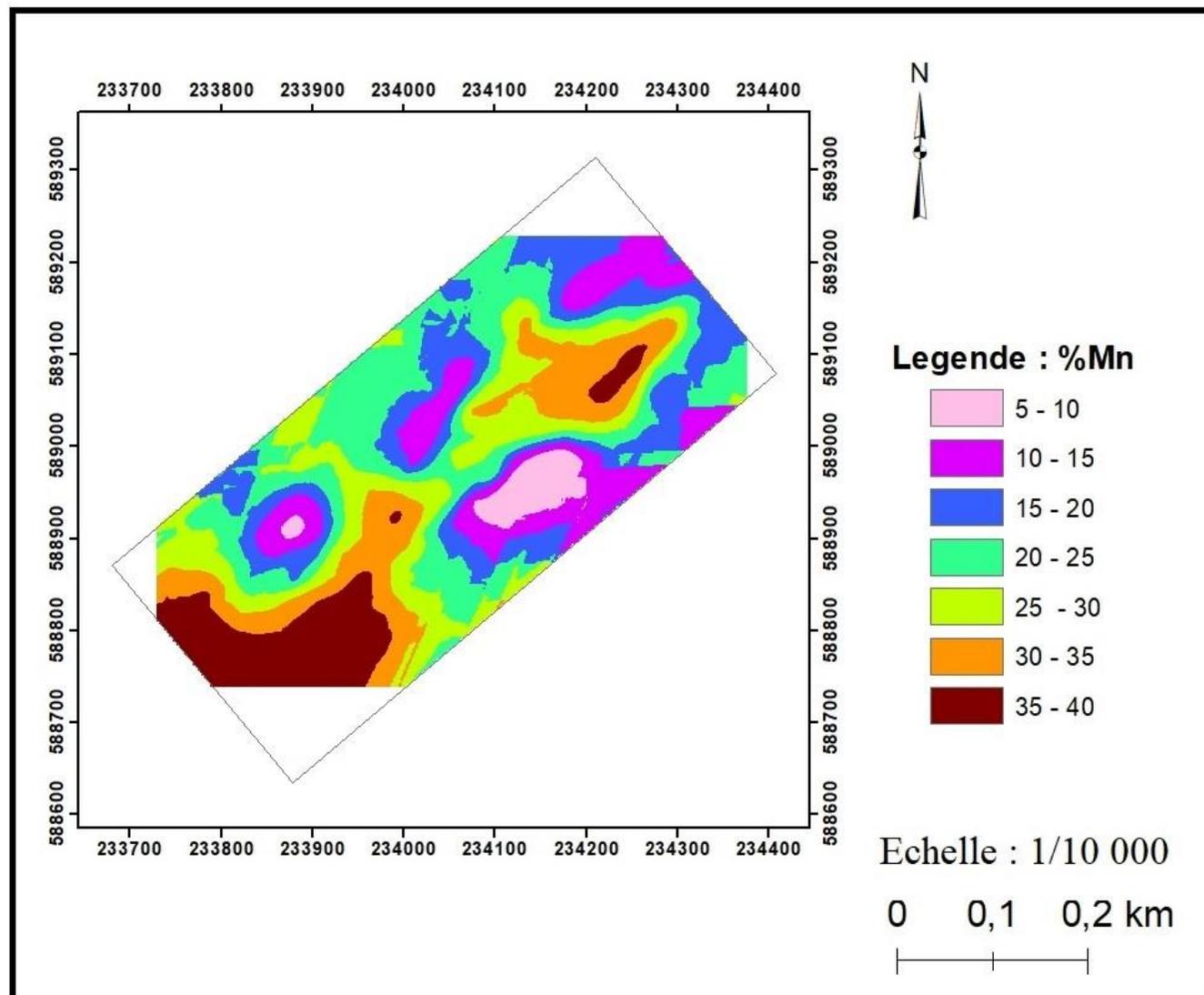
**Tableau VII :** Résultats de la validation croisée selon le KO

Paramètres statistiques		Gaussien	Sphérique	Exponentiel
Erreurs de prédiction	Moyenne	0,005	0,073	0,113
	Variance	30,91	29,77	31,62
EQM*		5,55	5,53	5,67
Erreurs relatives	Moyenne	5,605	5,468	5,212
Erreurs standardisées	Moyenne	-0,092	0,001	-0,082
	Variance	2,130	1,031	2,453
Coefficient de corrélation		0,61	0,61	0,59

**3.1.2.2.1.4 Modélisation spatiale de la zone Lauzoua C-Ext par KO**

La modélisation spatiale par KO s'est faite selon le modèle théorique retenu par validation croisée (le modèle sphérique), (figure 15). La surface interpolée présente trois types de zonages en fonction des valeurs de teneurs en Mn. Les zones à faible teneur (5 à 15%) se trouvent dans les directions NNE, SEE et légèrement dans les directions SWW et NWW. La seconde zone à teneur moyenne couvre la majeure partie de la surface interpolée. Elle présente des valeurs de teneurs relativement (ou moyennement) fortes (15 à 30%). La 3<sup>ème</sup> zone, celle à forte teneur (30 à 40%) se retrouve principalement au SSW du domaine étudié et légèrement au NNE.

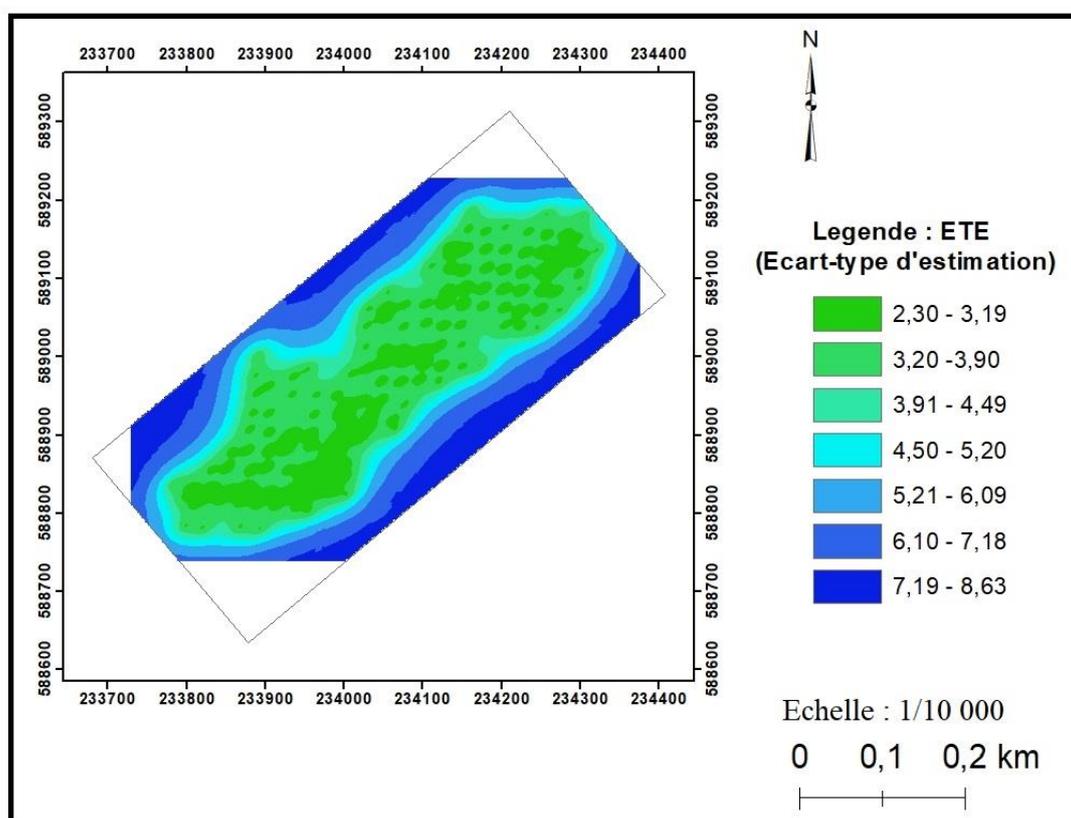
En krigeage ordinaire, les courbes d'isovaleurs ne présentent pas un aspect œil de bœuf comme en IDW. L'aspect des courbes diffère par endroits et est plus étalé sur les bords en raison du caractère lissage de l'interpolateur. Le krigeage permet de lisser les données d'étude afin d'éviter de les sous-estimer ou surestimer à l'interpolation. Le biais est ainsi minimisé le plus possible.



**Figure 15** : Carte de répartition spatiale des teneurs en Mn par KO selon le modèle théorique sphérique

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

Cette carte peut être associée à une carte des écarts-types de krigeage (figure 16). Chaque valeur estimée par KO est associée à un écart-type d'estimation. Cet écart-type définit ainsi le degré d'incertitude entre le point à estimer et la valeur calculée. La figure 15 indique que la marge d'incertitude est forte sur les flancs du domaine. L'on peut observer une décroissance du degré d'incertitude des bords de la zone d'étude vers son centre. La direction SSW de la zone à forte teneur présente également de faibles écarts-types d'estimation. Les fortes valeurs du degré d'incertitude aux bords du domaine traduisent une mauvaise estimation à ces endroits. Cette baisse de la qualité de l'estimation est due au nombre minime de points d'échantillonnage sur les flancs du domaine. Au centre de la zone les points d'échantillonnage étant dense, l'estimation est de bonne qualité avec des faibles valeurs du degré d'incertitude.

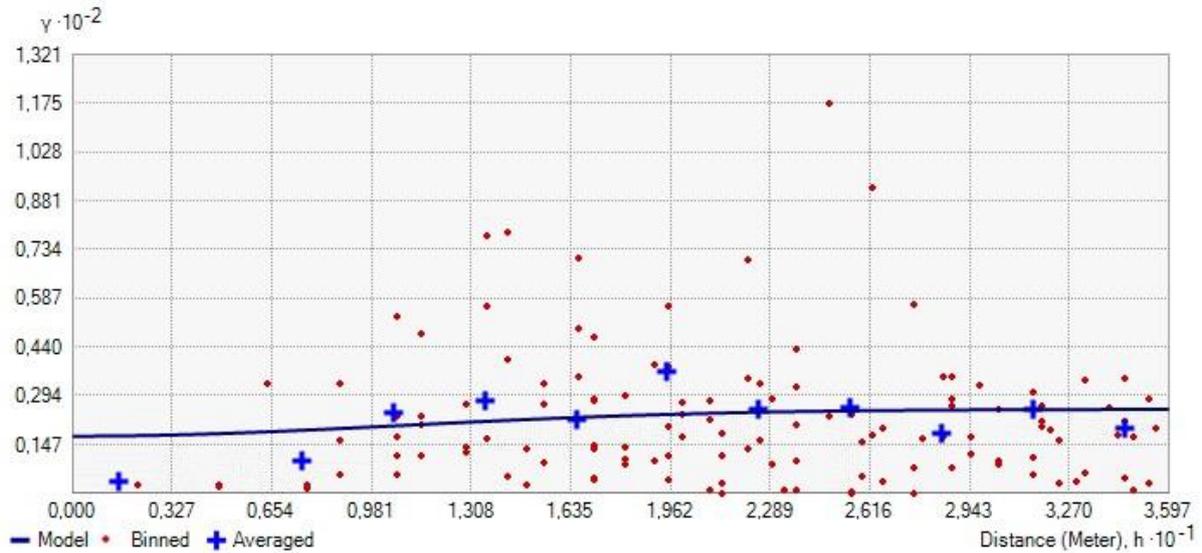


**Figure 16 :** Carte des écarts-types d'estimation pour le KO

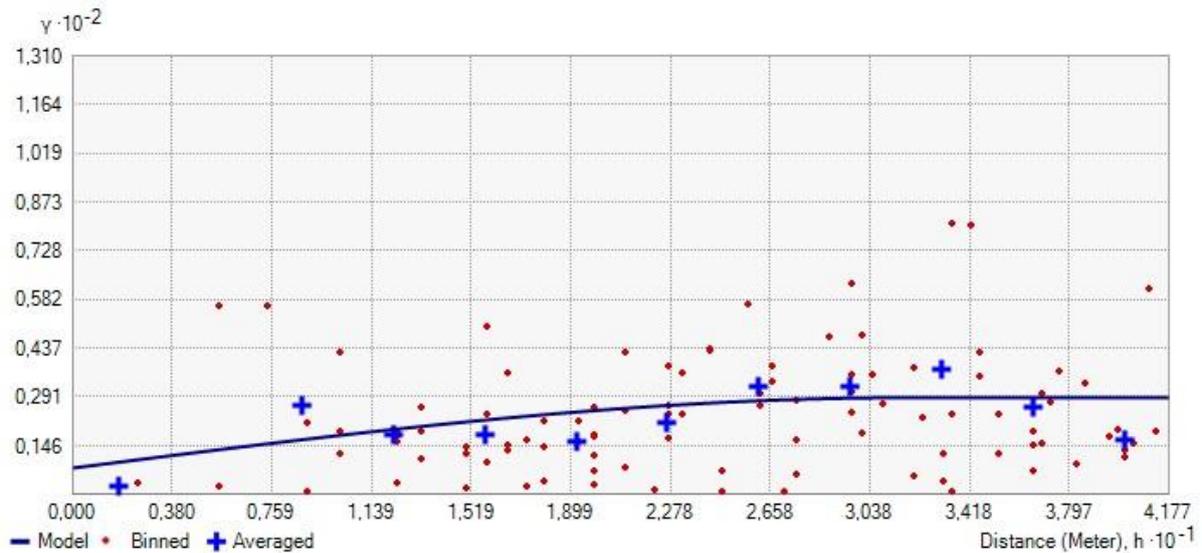
3.1.2.2.2 Géotraitement par krigeage universel (KU)

3.1.2.2.2.1 Variographie selon le KU

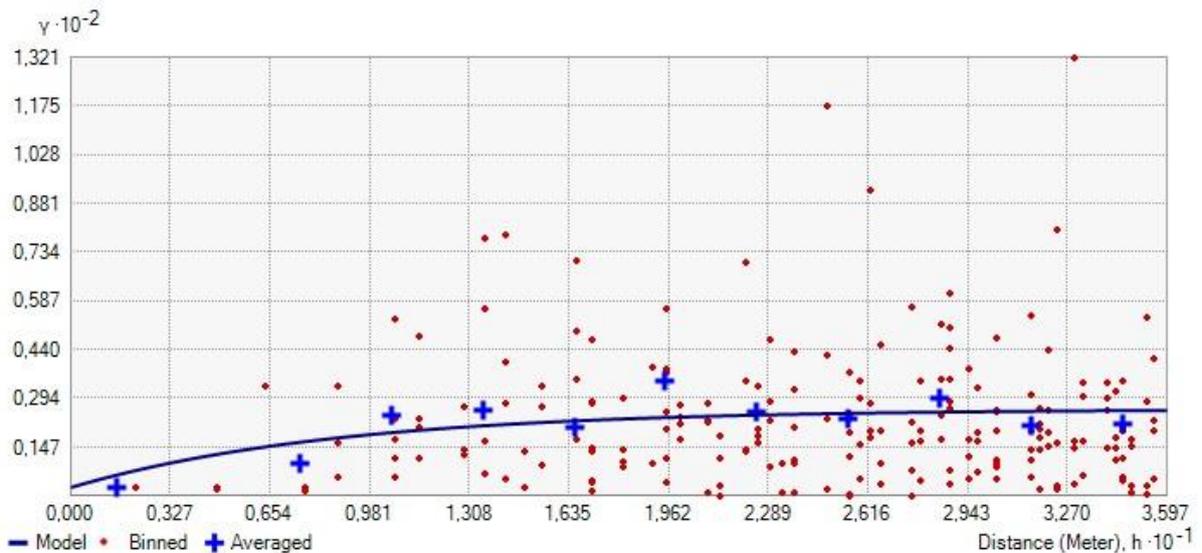
L'étude variographique selon le KU s'est également faite à partir des trois modèles théoriques étudiés plus haut (gaussien, sphérique et exponentiel) (figure 17).



a



b



C

Figure 17 : Variogrammes tracés selon le modèle, a) gaussien, b) sphérique, et c) exponentiel

Les valeurs paramétriques (effet de pépite, palier et portée) des différents variogrammes sont consignées dans le tableau X. Les résultats variographiques indiquent le modèle sphérique comme modèle apte pour une représentation optimale des données d'étude. Les valeurs paramétriques de son variogramme sont celles d'une bonne structure de variogramme. Des valeurs de palier et de portée sont meilleures à celles des deux autres modèles. Bien que sa valeur d'effet de pépite soit supérieure à celle du modèle exponentiel, elle demeure acceptable.

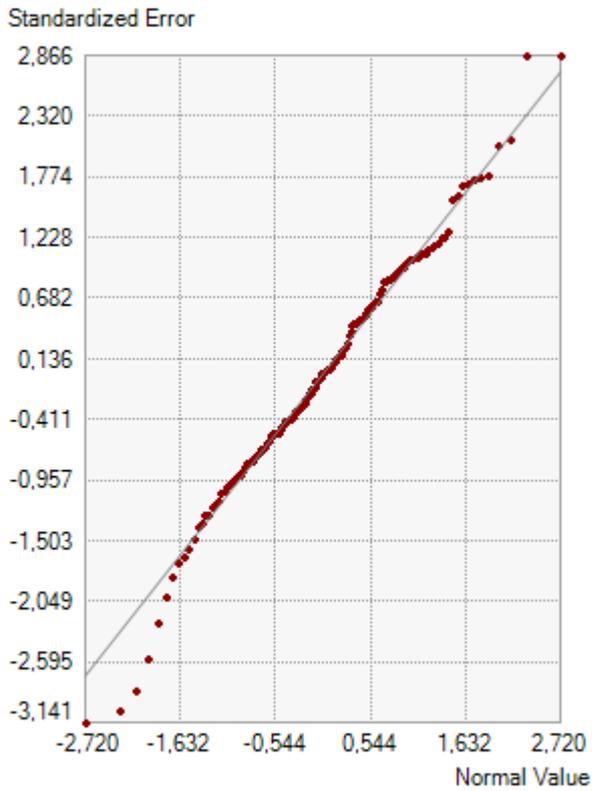
Tableau VIII : Analyse variographique selon le krigeage universel

Modèle variographique	Gaussien	Sphérique	Exponentiel
Effet de pépite	17,08	5,07	2,42
Palier (m <sup>2</sup> )	8,10	24,27	23,61
Portée (m)	26,22	35,36	26,22

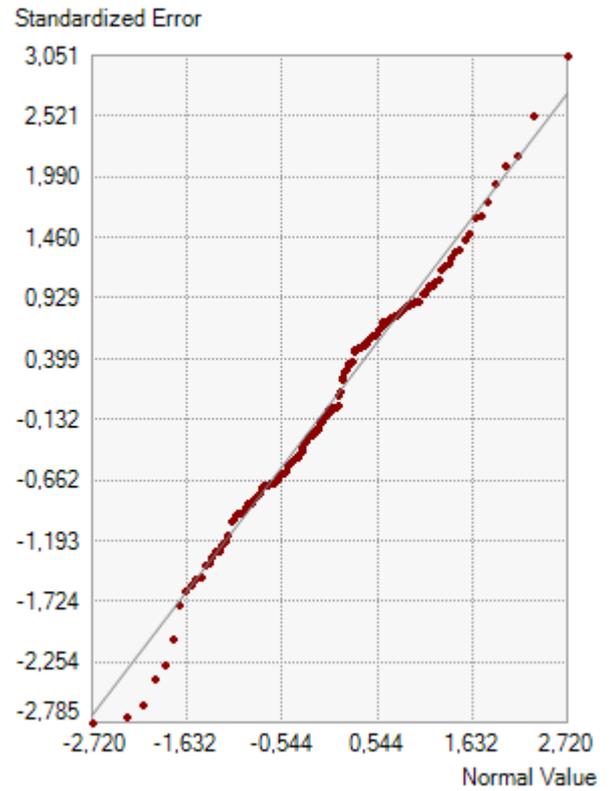
### 3.1.2.2.2 Nuage de corrélation : cas du KU

La concentration des points autour de la bissectrice est plus accrue et resserrée dans le cas du modèle gaussien. Les différents nuages de corrélation sont présentés à la figure 18.

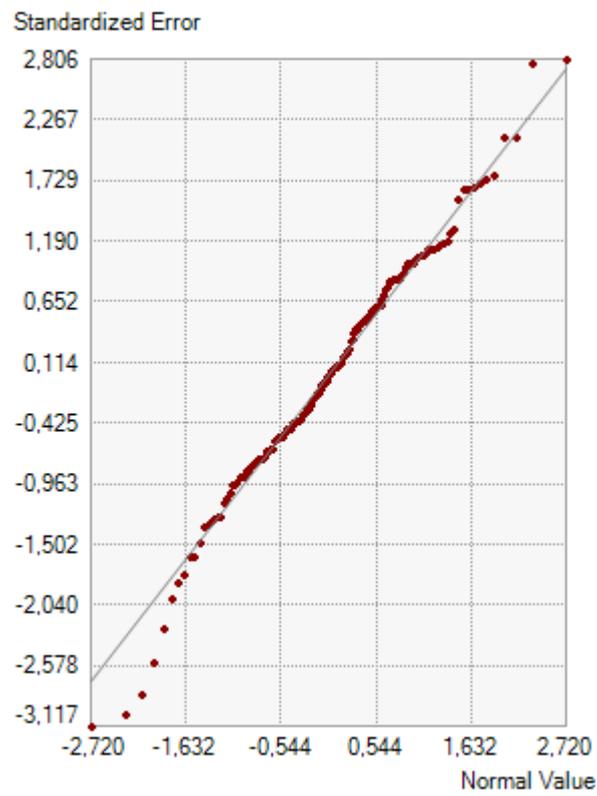
## RÉSULTATS ET DISCUSSION



a



b



c

**Figure 18:** Nuages de corrélation selon le modèle théorique par KU, a) gaussien, b) sphérique, et c) exponentiel.

### 3.1.2.2.3 Validation du modèle : cas du KU

Les résultats de la validation croisée (tableau IX) présentent les modèles exponentiel et gaussien comme les modèles optimaux. Ces modèles remplissent les critères de choix à une hauteur de 4 sur une échelle de 7. Le modèle sphérique suit avec une note de 1/7. Ceci dit un seul modèle est retenu après comparaison des valeurs d'EQM. Le modèle exponentiel est le modèle finalement retenu (5,510 contre 5,730).

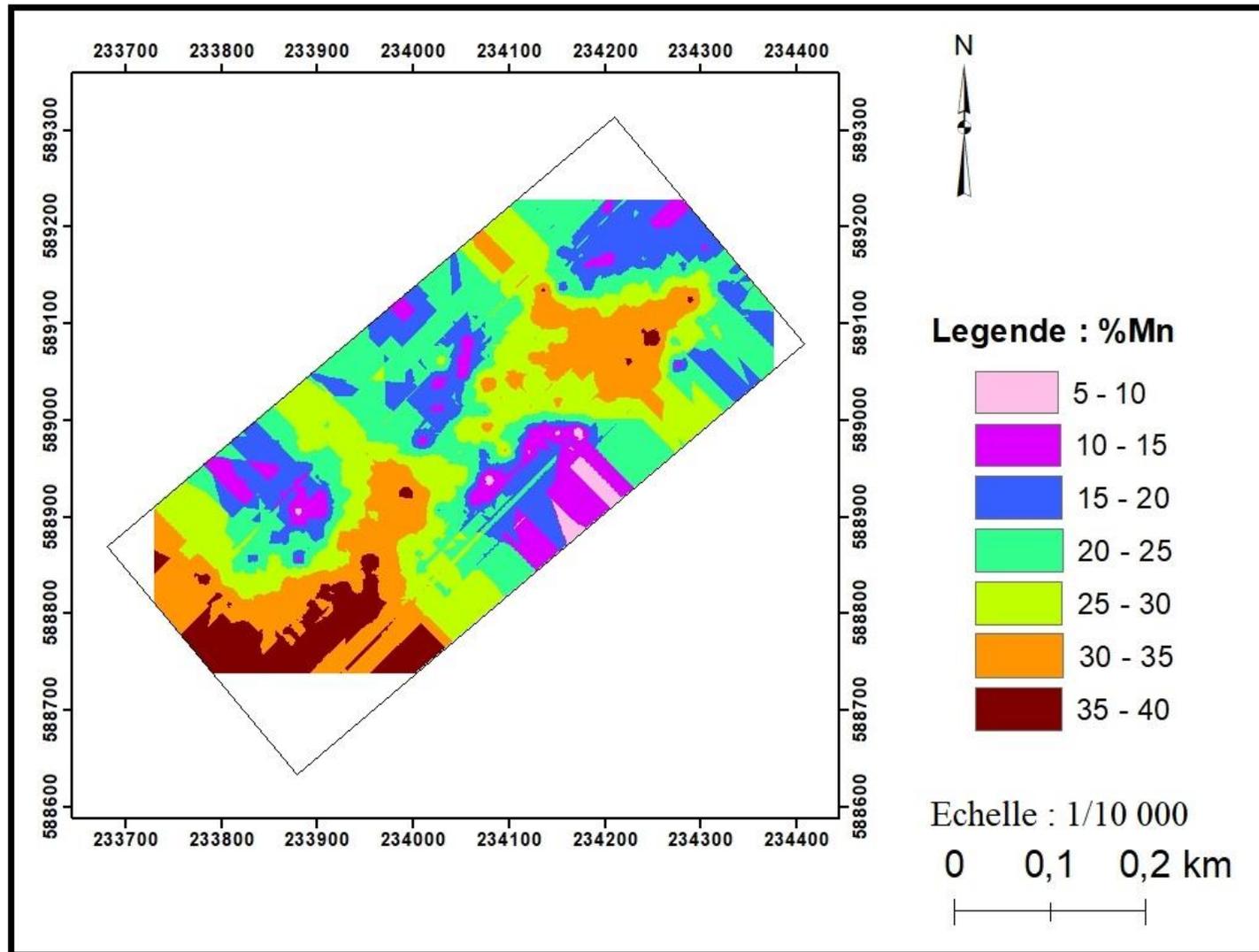
**Tableau IX** : Résultats de la validation croisée par KU

Paramètres statistiques		Gaussien	Sphérique	Exponentiel
Erreurs de prédiction	Moyenne	-0,044	0,587	0,140
	Variance	30,529	83,690	30,982
EQM*		5,730	5,630	5,510
Erreurs relatives	Moyenne	5,561	5,463	5,194
Erreurs standardisées	Moyenne	-0,006	-0,003	0,003
	Variance	0,998	1,024	1,201
Coefficient de corrélation		0,64	0,58	0,64

### 3.1.2.2.4 Modélisation spatiale de la zone C-Ext par KU

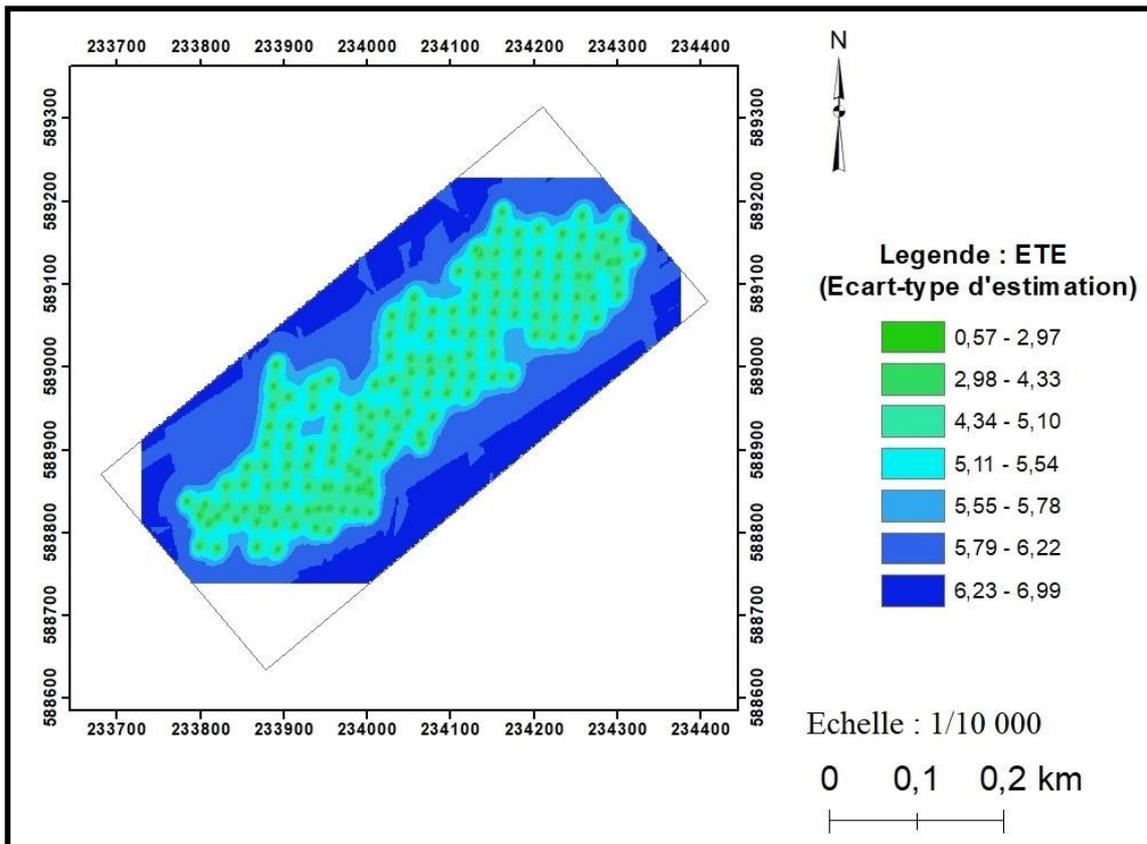
La spatialisation opérée par KU à partir du modèle exponentiel présente une surface assez homogène (figure 19). Le domaine d'étude présente en majorité un espace occupé par des teneurs relativement fortes (20 à 35% de Mn). Le zonage en teneurs faibles (5 à 15% de Mn) est très limité et se retrouve essentiellement au direction SEE. La zone à forte teneur (plus de 35% de Mn) se trouve en aval de notre domaine d'étude (direction SSW).

Les courbes d'isovaleurs en krigeage universel ont des aspects différents en fonction des classes de teneurs et directions de la zone d'étude. Ce manque d'aspect commun des courbes d'isovaleurs est traduit par le caractère lissage de l'interpolateur. Tout comme en KO le biais est le plus petit possible.



**Figure 19** : Carte de répartition spatiale des teneurs en Mn par KU selon le modèle théorique exponentiel

La carte des écarts-type de krigeage pour le KU est également présentée (figure 20). Les fortes valeurs de l'écart-type d'estimation sont observées sur tout le long des flancs du domaine d'étude. Les valeurs minimales sont concentrées au centre du domaine. L'estimation des bords du domaine vers légèrement son centre, est qualifiée de faible qualité. Cela est traduit par de fortes valeurs des écarts-types d'estimation. Au centre du domaine, l'estimation est relativement de bonne qualité. Des faibles valeurs des écarts-types d'estimation sont observées.



**Figure 20 :** Carte des écarts-type d'estimation pour le KU

### 3.1.3 Analyse comparative des méthodes d'estimation

Une analyse comparative des données interpolées est faite afin de déterminer l'interpolation optimale faite à partir des méthodes. Des paramètres statistiques sont calculés et comparés à partir des erreurs de prédiction. Les valeurs des statistiques sont récapitulées dans le tableau X. La comparaison de ces valeurs indique le krigeage ordinaire avec le modèle variographique sphérique comme la méthode optimale. Son interpolation des données d'étude est moins biaisée par rapport aux autres méthodes. Ce fait est justifié par une moyenne des erreurs de prédiction la plus faible (0,073 contre 0,140 et 0,391). Elle traduit un biais le plus petit possible. Cette

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

analyse indique également un interpolateur plus précis avec une valeur d'EQM la plus faible. Le krigeage universel avec le modèle exponentiel est celui qui répond à ce critère avec une valeur de 5,510. La précision de l'estimation est évaluée lors de cette analyse. L'écart-type est le paramètre descriptif de ce critère. La méthode IDW  $n=2,34$  a la plus faible valeur d'écart-type 4,614. Par conséquent, elle a l'estimation la plus précise des trois méthodes. Cependant, le caractère optimal est attribué à la méthode de krigeage ordinaire qui assure une plus grande absence de biais dans l'estimation par rapport aux autres méthodes.

**Tableau X** : Comparaison des méthodes d'estimation

Méthodes d'estimation	Paramètres d'interpolation	Moyenne	EQM	Ecart-type
IDW	$n=2,34$	0,391	5,728	4,614
KO	Sphérique	0,073	5,530	5,456
KU	Exponentiel	0,140	5,510	5,566

### 3.2 Discussion

Ce travail a pour objectif de présenter une analyse comparative des méthodes d'interpolation déterministe et probabiliste. Cette analyse s'est basée sur l'estimation spatiale des réserves de la zone C-Ext de Lauzoua à partir des interpolateurs IDW et krigeage en fluctuant les paramètres de traitement jusqu'à atteindre la méthode optimale pour chaque interpolateur. Une analyse comparative des méthodes d'estimation s'en est suivie. Il est important de signifier que les résultats obtenus lors de ce travail sont à titre pédagogique. Dans un cadre professionnel, bien d'autres paramètres auront été nécessaires à la bonne interprétation des données de terrain. Ces paramètres sont, entre autres la topographie du milieu, la description géologique des puits. Cependant, les résultats obtenus n'en demeurent pas moins intéressants. Ils constituent d'éventuels outils d'aide à la décision pour la structure d'accueil. La méthode IDW a été la première à passer au géotraitement du fait de sa simplicité d'exécution. Le paramètre visé pour l'optimisation est le paramètre puissance  $n$ . La définition de ce paramètre est qualifiée d'optimale lorsque la moyenne des erreurs de prédiction est la plus basse possible (Phillip & Waston, 1982 ; Waston & Phillip, 1985). De ce fait et d'après les résultats obtenus lors de ladite étude, le paramètre de puissance optimale est  $n=4$ . Ce résultat est conforme aux résultats obtenus par les auteurs Yasrebi *et al.* (2009). Ces auteurs affirment qu'un paramètre de puissance égale à 4 assure une interpolation plus précise que toute autre valeur de puissance (Benazzouz, 2011). Cependant, avoir un paramètre de puissance optimale ne définit pas nécessairement qu'on a la méthode d'interpolation optimale. D'autres paramètres rentrent en compte. C'est ainsi selon le rapport INERIS (2003) en conformité avec les résultats obtenus lors du géotraitement, les méthodes IDW  $n=2,34$  et  $n=3$  sont désignées comme la méthode optimale pour cet interpolateur. Ces méthodes répondent aux critères de sélection avec une note maximale de 2 sur 4 des statistiques de prédiction. Rappelons qu'en règle générale, que les résultats de ces algorithmes d'interpolation déterministe sont issus d'une règle de pondération calculée sur la base des concentrations observées aux sites de mesure voisins du nœud le plus proche. Ils ne prennent pas en compte les caractéristiques spatiales naturelles de la variable aléatoire étudiée (Koussa, 2018). D'où le peaufinage de l'estimateur IDW s'est résulté essentiellement à son paramètre puissance  $n$ . La distinction entre ces deux valeurs de puissances pour ne retenir qu'une seule valeur, s'est faite à partir de la moyenne des erreurs de prédiction. L'absence de biais dans l'estimation est plus prononcée avec la méthode IDW  $n=2,34$  (0,391 contre 0,488). Par la suite, la méthode IDW  $n=2,34$  est désignée la plus optimale pour l'interpolateur IDW. Nombreux de documents et revues scientifiques ont affirmé que l'interpolateur IDW a pour paramètre de puissance  $n=2$ , valeur par défaut. De ce point de vue

et de l'essor des méthodes géostatistiques, l'assistance scientifique n'a pas poussé ses recherches loin et s'est reposé sur le paramétrage par défaut. Cependant, la méthode IDW reste une méthode couramment utilisée du fait de sa simplicité et rapidité d'exécution. Bien qu'elle soit loin d'être idéale (Clark & Harper, 2000 ; Lembo et *al*, 2005), elle procure des résultats acceptables si les points d'échantillonnages sont denses et uniformément distribués spatialement (England, 1994 ; Benazzouz, 2011 ; Pierre, 2011).

En ce qui concerne le traitement en géostatistique, il s'est fait selon deux types de krigeage (ordinaire et universel). Les paramètres étudiés ici sont les modèles variographiques et leurs composantes qui en découlent (effet de pépite, palier et portée). Cependant la validation du modèle est établie par les statistiques de la validation croisée. Avec le krigeage ordinaire, les différentes variographies obtenues lors du géotraitement ont désigné le modèle exponentiel comme le modèle optimal. Sa valeur d'effet de pépite est largement inférieure à celui des autres modèles. Outre l'effet de pépite, une valeur de portée supérieure indique un modèle adéquat. Le modèle sphérique se place en tête suivi du modèle exponentiel selon ce critère. Tandis qu'en krigeage universel, le modèle désigné est le modèle sphérique. Bien qu'il ait une valeur d'effet de pépite supérieur, les paramètres de portée et de palier l'indiquent comme le modèle apte. La qualification du modèle variographique optimale n'est pas limitée à l'analyse variographique. Les résultats de la validation croisée ont été les critères déterminants dans le choix du modèle final retenu. Selon Despaigne (2006), s'inspirant du rapport INERIS, (2003), les modèles qui répondent le plus aux critères de sélection de la validation croisée sont les modèles sphérique pour le krigeage ordinaire et exponentiel pour le krigeage universel. La performance prédictive des modèles variographiques s'explique à travers plusieurs points. L'absence de biais traduit par une faible moyenne des erreurs de prédiction (KO : 0,073 et KU : 0,140), la robustesse de l'estimateur définit par une faible valeur de variance (KO : 29,77 et KU : 30,98), une valeur du coefficient de corrélation proche de 1 (KO : 0,61 et KU : 0,64), sont les points à citer (INERIS, 2003). En outre, la valeur de l'erreur quadratique moyenne (EQM) est utilisée pour évaluer la performance des méthodes. L'erreur quadratique moyenne définit la mesure globale de la précision des techniques de spatialisation. Elle intègre à la fois l'erreur systématique et la dispersion statistique des erreurs de spatialisation (Baka et *al*, 2019). Ce critère est communément utilisé en statistiques pour évaluer la qualité d'une prédiction. Par exemple si ce terme est grand, le modèle surestime. Elle est respectivement pour le KO et KU de 5,53 et 5,51. Ces résultats sont en accord avec les travaux des auteurs tel que Baillargeon, (2005) ; Marcotte, (2011) qui indiquent les modèles variographiques couramment utilisés (linéaire, exponentiel, sphérique). Cependant, dans certaines études comme celle de Buslig, (2014), est

décrit une liste de modèles admissibles dont les plus classiques sont : le modèle gaussien, sphérique, exponentiel et puissance. Les auteurs Boubaker et al, (2011) dans l'application du krigeage ont retenu le modèle gaussien. Il a été celui répondant le plus aux critères de choix de la validation croisée. Bien que le modèle gaussien ait répondu à autant de critères que le modèle exponentiel dans le cas présent, le choix du modèle s'est fait sur comparaison des valeurs d'EQM. En effet une plus petite valeur d'EQM a été le choix unique pour la validation du modèle pour les auteurs Koudou et al, (2014) pour le traitement géostatistique de leur variable d'intérêt. Il convient de retenir que l'application du krigeage pour toutes données d'étude nécessite au préalable une bonne analyse variographique. Le modèle variographique retenu se doit de répondre aux critères de la validation croisée.

Les différentes approches déterministes (IDW) et probabilistes (KO et KU) ont contribué à une meilleure compréhension de la structuration spatiale des données de teneurs en Mn sur la zone Lauzoua C-Ext. La distribution spatiale établie par l'approche déterministe (IDW) a été conditionnée par son paramètre puissance ayant les meilleures statistiques de la validation croisée. En géostatistique via le variogramme, la description et la modélisation du comportement de la variable teneur en Mn sont établies lors de la spatialisation des données. Les spatialisations faites à partir des interpolateurs renseignent globalement sur la répartition des teneurs dans le domaine d'étude (zones à forte et faible teneurs). Cependant le but principal de ce mémoire est une confrontation entre les approches déterministe et probabiliste. Leur performance prédictive est évaluée à partir des statistiques de comparaison afin d'examiner leur potentiel dans la restitution des cartes de répartition de teneur en Mn. L'analyse des statistiques sur les erreurs de prédiction (moyenne, écart-type et EQM) indique le krigeage ordinaire avec son modèle sphérique comme la méthode la plus optimale. Cette indication est dû à sa faible moyenne des erreurs de prédiction par rapport à celles des autres méthodes. L'interpolateur krigeage est principalement supérieur à l'interpolateur IDW. Cette supériorité est acquise grâce à son outil de modélisation de la variabilité spatiale des données d'étude : le variogramme. Les méthodes déterministes sont des interpolateurs exacts, leur performance prédictive est optimale mais demeure inférieure à celle des outils probabilistes.

**CONCLUSION**

### Conclusion

L'étude conjointe des méthodes d'interpolation déterministe (IDW) et probabiliste (KO et KU) sur les données de terrain de la zone C-Ext a permis la localisation des zones à forte et faible teneurs en Mn. L'approche déterministe avec l'interpolateur IDW a fourni des résultats plus ou moins satisfaisants. Pour une valeur de puissance  $n=2,34$ , du point de vue de la moyenne des erreurs de prédiction, l'interpolation obtenue est moins biaisée et optimale. Les zones à faibles teneurs (10 à 15% de Mn) couvrent majoritairement le champ d'étude. La direction SSW est la seule zone occupée par de fortes valeurs de teneurs (30 à 40% de Mn). Globalement l'IDW reproduit des résultats presque similaires aux méthodes probabilistes. Cependant, les données interpolées tendent à être surestimées (valeur d'EQM élevée). L'approche probabiliste effectuée à partir du krigeage (ordinaire et universel) offre des résultats plus précis et proches de la réalité. La modélisation de la variabilité spatiale des données de teneurs est mieux représentée avec les modèles variographiques sphérique pour le KO et exponentiel pour le KU. Les statistiques de la validation croisée attestent la qualité de l'estimation faite à partir de ces modèles. Ces statistiques sont la moyenne et variance des erreurs de prédiction, l'EQM, la moyenne de l'erreur relative, la moyenne et variance des erreurs standardisées, 1 Les spatialisations obtenues par KO et KU présentent des similitudes tout le long du domaine. Trois types de zones en fonction des valeurs de teneurs en Mn sont observés. La zone à teneur faible (5 à 15% de Mn) est présente dans quelques directions privilégiées (principalement au SEE). La seconde zone, celle à teneur relativement forte (20 à 35% de Mn) occupe la majeure partie de la zone d'étude. La dernière zone présente les fortes valeurs de teneurs en Mn (plus de 35%). Elle est localisée dans une direction unique SWW. Une analyse comparative des trois méthodes d'estimation s'en est suivie. Il en est ressorti que le krigeage ordinaire a été le plus qualifié des méthodes d'estimation. Les modules de traitement des différentes méthodes d'interpolation assurent d'ores et déjà un avantage certain à l'approche probabiliste à la bonne représentation des données de terrain. L'outil variogramme fait de l'interpolateur krigeage le plus adapté et optimal pour l'étude d'un phénomène naturel. Cependant son application est très stricte et coûteuse. Son échantillonnage se doit d'être vraiment rigoureux et régulier pour plus d'optimalités. D'un point de vue décisionnel, l'IDW constitue un bon outil d'aide à la décision. Son application et sa réalisation ont un niveau de difficulté moyen pour sa mise en œuvre. En perspective il serait intéressant de confronter ces résultats à ceux de la structure d'accueil pour une amélioration de ceux-ci et des méthodes d'estimation. Avec un échantillonnage dense et régulier ces méthodes apporteraient de très bon résultats sur la réalité du terrain.

# **RÉFÉRENCES**

## RÉFÉRENCES

Adrian D. & Diane S. (2010). Comparaison des méthodes d'interpolation pour l'élaboration de modèle numérique d'élévation de haute précision dans la représentation micro-topographique des plaines inondables. *Hydrological sciences journal*, 55(4) : 526-539.

Arnaud M. & Emery X. (2000). Estimation et interpolation spatiale. *Hermes Science Publications*, 3 : 216-221.

Baillargeon S. (2005). Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations. Mémoire en Faculté des sciences et de génie, Facultés de l'Université Laval, Québec (Canada), 73 p.

Baka D., Kpampou J.C.M., Ahoussi K.T., Agoua D., & Takpa P.T. (2019). Étude de la variabilité spatiale de la pluviométrie par la méthode géostatistique et IDW (Inverse Distance Weighted) au centre-ouest de la Côte d'Ivoire. *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*, 9(2) : 212-223.

Benazzouz M. (2011). Étude comparative entre la géostatistique et les méthodes déterministes pour la cartographie des types de sols. Thèse de maîtrise en Géographie, Université d'Ottawa, Ottawa (États-Unis), 71 p.

Benyahia O., Haddoum H., Ouzegane K., Bendaoud A., Djemai S., & Kienast J. (2005). Fonctionnement et rôle des méga zones de cisaillement dans la structuration du métacraton éburnéen du LATEA au panafricain puis au phanérozoïque (région de Tamanrasset, Hoggar, Algérie). *African Geosciences Review*, 12 : 261-274.

Boubaker Z., Bellatreche M. & Moussouni A. (2011). Apport de la géostatistique à la prédiction de la diversité avienne dans le Parc National de Gouraya (Algérie). *Revue d'écologie la terre et la vie*, 66(3) : 215-229.

Boua B. (2012). Evaluation du potentiel agro-pédologique des boues issues du traitement du minéral de manganèse de Lauzoua : Sud-Ouest De La Côte d'Ivoire. Mémoire de Master en Sciences et Gestion de l'Environnement, Université Felix Houphouët Boigny, Abidjan (Côte d'Ivoire), 53 p.

## RÉFÉRENCES

BRGM (1984). Ressources minières française, Les gisements de manganèse (situation en 1981). Rapport d'étude du BRGM, Paris (France), 137 p.

Brou K.S. (2014). Evolution en éléments traces métalliques de la boue de traitement du minerai de manganèse de lauzoua (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Mémoire de Master en Géoscience et Environnement, Université Nangui Abrogoua d'Abobo-Adjamé, Abidjan (Côte d'Ivoire), 49 p.

Buslig L. (2014). Méthodes stochastiques de modélisation de données : application à la reconstruction de données non régulières. Thèse de Doctorat en Mathématiques appliquées, Université d'Aix-Marseille, Marseille (Paris), 124 p.

Caloz R. (1990). Télédétection appliquée, Notes de cours. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne (Suisse), 121 p.

Camil J. (1994). Géologie du gisement de MOKTA. Rapport SODEMI, Abidjan (Côte d'Ivoire), 26 p.

Chakroun H. (2013). Introduction aux SIG et à la télédétection en génie civil. Département Génie Civil ENI, 51 p.

Clark I. & Harper W. (2000). Practical Geostatistics 2000. Ecosse North America Llc, Columbus Ohio (U.S.A), 342 p.

Claude B. (2008). Présentation des méthodes géostatistiques. Université Blaise Pascal, Clermont-ferrand (France), 31 p.

Cressie N. (1993). Statistics for spatial data. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics: Applied Probability and Statistics. John Wiley and Sons Inc., New York (USA), 416p.

## RÉFÉRENCES

Dago A. (2004). Péetrogenèse du gisement manganésifère de Lauzoua dans le département de Guitry (Sud de la Côte d'Ivoire). Mémoire de Master en Sciences de la Terre, Université Felix Houphouët Boigny, Abidjan (Côte d'Ivoire), 63 p.

Delor C., Diaby I., Simeon Y., Yao B., Akre D., Okou A., & Iraore I. (1995). Notice explicative de la carte géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200,000, feuille Grand-Lahou. Memoire de la Direction des Mines et de la Géologie de Côte d'Ivoire, Abidjan (Côte d'Ivoire), 5 p.

Despaigne W. (2006). Méthode géostatistique pour l'interpolation et la modélisation en 2D/3D des données spatiales. Mémoire de Master en statistique et informatique, Université de Bretagne Sud, Bretagne (France), 145 p.

Doumbia S., (1997). Géochimie, géochronologie et géologie structurale des formations birrimiennes de la région de Katiola-Marabadiassa : évolution magmatique et contexte géodynamique du paléoprotérozoïque. Thèse de Doctorat, Université d'Orleans, Orleans (USA), 253 p.

Englund E. (1994). Evaluation and comparison of spatial interpolators II. *Mathematical Geology*, 26(5) : 589-603.

Fofana S. (2004). Etude de faisabilité de mise en exploitation du gisement de manganèse de Lauzoua. Rapport d'exploration de la SODEMI, Abidjan (Côte d'Ivoire), 95 p.

Grandin G. (1968). Aspects exogènes du gisement de manganèse de Grand-Lahou (Côte d'Ivoire). *Chronique des Mines et de la Recherche Minière*, 36(375) : 199-206.

Grandin G. (1977). Aplansissements cuirassés et enrichissement des gisements de manganèse dans quelques régions d'Afrique de l'ouest. Mémoire de Master en Sciences de la Terre, Université de Strasbourg, Strasbourg (France), 60 p.

Grandin G. & Perseil E. (1977). Le gisement de manganèse de Mokta : Transformations minéralogiques des minerais par action météorique. *Bull Soc Geol France*, 7 : 309-317.

Gratton Y. (2002). Le krigeage : La méthode optimale d'interpolation spatiale. Les Articles de l'Institut d'Analyse Géographique, Québec (Canada), 4 p.

Halle B. & Bruzon V. (2006). Profil Environnemental de la Côte d'Ivoire. Rapport d'offre de service de la coopération relatif au contrat cadre Europe-Aïd No119860/C/SV/Multi de la commission européenne, Abidjan (Côte d'Ivoire), 150 p.

Ibtissem T., Imen H., Nadia T., & Moncef Z. (2014). Cas du système aquifère phréatique de Sfax (Tunisie). *In* : Evaluation de techniques d'interpolation spatiale de la piézométrie à l'aide de l'extension Geostatistical Analyst d'ArcGIS. Ecole nationale d'ingénieurs de SFAX (Eds.), Sfax (Tunisie), pp. 55-63.

INERIS (2003). Evaluation des incertitudes associées aux méthodes géostatistiques. Rapport d'étude du laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air convention n°115/03, DRC-03-45599-2IEN-MECO-GCa-LMa – LCSQA-n°141\_v1, France, 54 p.

Isaaks E. & Srivastava R. (1989). An Introduction to Applied Geostatistics, Oxford University Press, New York, 561 p.

Journel, A. & Huijbregts C. (1978). Mining Geostatistics. Academic Press, Londres (Angleterre), 600 p.

Kitanidis P. (2000). Introduction to Geostatistics : Application in Hydrogeology. Cambridge University Press, Cambridge (USA), 451 p.

Komassi A. (2017). Double défi de l'industrie minière en Afrique subsaharienne : Droits humains et changements climatiques. Mémoire de Master en Environnement, Université de Sherbrooke, Québec (Canada), 102 p.

Koudou A., Assoma T.V., Adiaffi B., Youan T.A.M., Kouame K.F., Lasm T. (2014). Analyses statistique et géostatistique de la fracturation extraite de l'imagerie ASAR ENVISAT du Sud-Est de la Côte d'Ivoire. *Larhyss Journal*, 20 : 147-166.

## RÉFÉRENCES

- Koussa M. (2018). Étude comparative entre les méthodes d'interpolation pour la cartographie des Nitrates : Cas d'application les eaux souterraines de Djelfa (Algérie). *Agriculture and Forestry Journal*, 2(1) : 18-25.
- Kurtzman D. & Kadmon R. (1999). Mapping of Temperature Variables in Israel: A Comparison of Different Interpolation Methods. *Climate Research*, 13 : 33-43.
- Lembo A.J., Lyon S.W., Seibert J., Walter T.M., & Steenhuis S.T. (2005). Geostatistical investigation into the temporal evolution of spatial structure in a shallow water table. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union*, 2(4) : 1683-1716.
- Lopez P. (2000). Comportement mécanique d'une fracture en cisaillement : analyse par plan d'expériences des données mécaniques et morphologiques connues sur une Fracture. Thèse de doctorat, Université Bordeaux I et Université du Québec, Bordeaux (France), Chicoutimi (Canada), 401 p.
- Matheron G. (1955). Utilité des méthodes statistiques dans la recherche minière. *Revue de l'industrie minière*, 459-472.
- Matheron G. (1962). *Traité de Géostatistique appliquée*. Mémoires de BRGM-Edition Technique, Paris (France), 172 p.
- Matheron G. (1969). *La théorie des Variables Régionalisées et ses Applications*. Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique, Fontainebleau (Paris), 205 p.
- Meylan P. (1986). Régionalisation de données entachées d'erreurs de mesure par krigeage : application à la pluviométrie. *Hydrologie Continentale*, 1 : 25-34.
- Meylan P. (1986). Répartition spatiale des précipitations journalières en Suisse occidentale. *Ingénieurs et Architectes suisses*, 12 : 157-162 et 13 : 187-189.

## RÉFÉRENCES

Moussaoui B. & Moussaoui N. (2017). Etude géostatistique des ressources minières : cas du gisement de phosphate sus à Bled El Hadba (w. Tébessa). Mémoire de Master en Mines option Exploitation Minière, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Bejaia (Algérie), 60 p.

Nangah K.Y. (2014). Caractérisation pédologique et distribution des éléments traces métalliques dans les sols manganésifères dérivés de matériaux volcano-sédimentaires en Côte d'Ivoire. Thèse unique de doctorat, Université Nangui Abrogoua, Abidjan (Côte d'Ivoire), 159 p.

Philip G. & Watson D. (1982). A Precise Method for Determining Contoured Surfaces. *Australian Petroleum Exploration Association Journal*, 22 : 205–212.

Pierre B. (2011). Interpolation spatiale. Ecole Nationale des Sciences Géographiques département Positionnement Terrestre et Spatial, (France), 53 p.

Sibson R. (1981). A brief description of natural neighbour interpolation. *Interpreting Multivariate Data*, 21-36.

SODEMI (2008). Etude de faisabilité de mise en exploitation du gisement de manganèse de Lauzoua. Rapport d'exploration de la société SODEMI, Abidjan (Côte d'Ivoire), 93 p.

Soro T. (2006). Variabilité climatique et son impact sur l'alimentation des ressources en eau du degré carré de Grand-Lahou. Mémoire de Master en Sciences de la Terre option : Hydrogéologie, Université Felix Houphouët Boigny, Abidjan (Côte d'Ivoire), 85 p.

Stein A. & Corsten L. (1991). Universal Kriging and Cokriging as a Regression. *Procedure. Biometrics*, 47 : 575-587.

Toummite A. (2012). Les grannitoïdes du protérozoïque terminal de la vallée de Tifnoute (anti-Atlas Central) : Un exemple d'un magmatisme post-collisionnel d'origine juvénile dans un contexte métacratonique : Géochimie-Géochronologie-Isotopes Sr-Nd. Thèse de doctorat de la faculté des sciences Agadir, Université Ibn Zohr, Agadir (Maroc), 182 p.

Watson D. & Philip G. (1985). A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation. *Geoprocessing*, 2 : 315–327.

Yasrebi, J., Mahboub S., Hamed F., Najafali K., Masome M. & Reza G. (2009). Evaluation and Comparison of Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighing Methods for Prediction of Spatial Variability of Some Soil Chemical Parameters. *Research Journal of Biological Sciences*, 4(1) : 93-102.

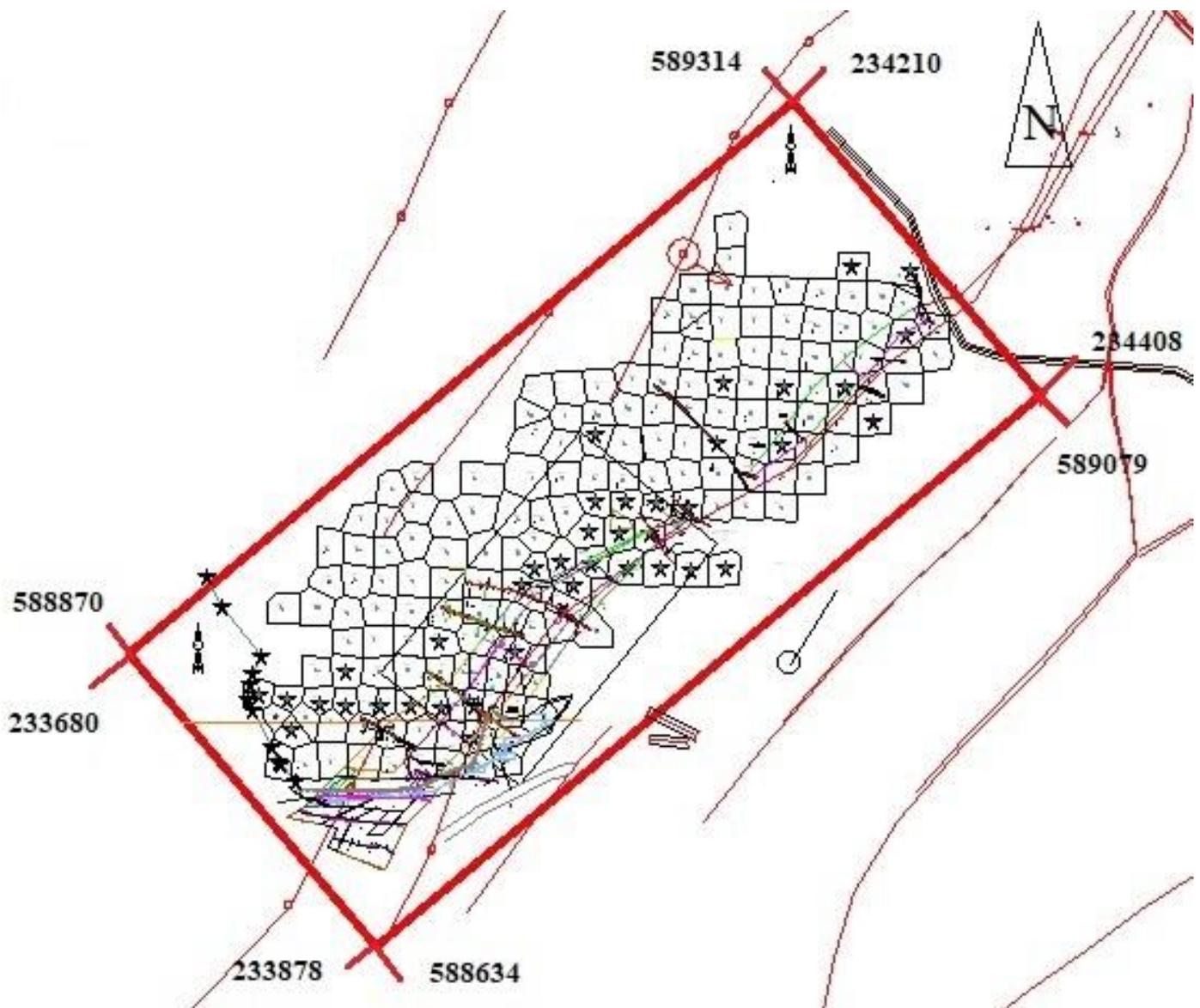
### References Web

IMI (2012), <https://fr.wikipedia.org/wiki/Manganèse#cite-note>

IMI (2006), [http://www.manganese.org/about\\_mn/reserves](http://www.manganese.org/about_mn/reserves)

# **Annexes**

**Annexe I : Carte de localisation de la zone C-Ext du gisement de Lauzoua**



**Esquisse de la zone Lauzoua C-Ext**

**Annexe II : Base de données constituées de la zone C-Ext**

Puits	X	Y	Ep.Min t	Teneur
O15	234304	589179	2	13,17
O17	234258	589182	1,5	15,90
O21	234162	589187	2,7	18,21
N21	234158	589164	1,8	17,25
N20	234181	589161	1,5	13,06
N19	234206	589166	1,8	12,34
N18	234234	589160	1,2	16,11
N17	234258	589157	3	16,23
N16	234282	589157	2,1	14,56
N15	234299	589152	5,3	21,89
M22	234131	589141	2	23,62
M21 B	234136	589135	2	34,42
M21	234155	589137	2,7	11,89
M20	234181	589137	1,3	14,38
M19	234206	589137	2	17,56
M18	234230	589133	4,3	24,11
M17	234253	589133	2,8	17,75
M16	234276	589133	3,2	27,23
M15	234301	589127	3,4	23,36
M15b	234290	589125	1,3	35,05
M14	234323	589136	4,4	13,81
L23	234110	589115	1,3	15,93
L22	234133	589111	2	31,24
L21	234153	589110	4,5	29,25
L20	234181	589113	3,3	27,65
L19	234204	589111	3,1	23,01
L18	234228	589108	4,2	27,15
L17	234253	589109	4,6	30,11
L16			1,2	23,84
L16B	234266	589108	2,5	30,08
L15	234300	589105	4,5	16,78
K25	234056	589083	1,3	10,99
K22	234129	589085	1	18,77
K21	234155	589088	2,7	21,90
K20	234178	589087	2,8	24,87
K19	234203	589086	5	27,72
K18	234226	589084	4,3	26,26
K17	234252	589084	3,4	39,04
K16	234271	589083	2,8	16,32

K15	234301	589086	1,5	20,40
J26	234030	589061	1,6	23,46
J25	234055	589062	2,7	11,31
J24	234079	589067	2,3	15,73
J23	234103	589067	1,1	24,13
J22	234128	589067	2	25,81
J21	234152	589065	2	26,87
J20	234177	589063	1,8	27,58
J19	234202	589061	2,6	29,25
J18	234225	589059	1,8	31,26
J17	234250	589059	3,8	26,90
J16	234275	589058	2	10,41
I26	234027	589038	0,8	11,18
I25	234053	589048	3,4	11,07
I24	234076	589038	1,5	32,55
I23	234104	589042	3,6	25,96
I22	234126	589039	5,1	19,63
I21	234150	589040	3	23,85
I19	234202	589038	2,6	28,52
I18	234223	589036	2,4	30,60
I17	234246	589035	2	24,46
H31	233891	589002	3,1	19,47
H26	234027	589012	2,1	13,17
H25	234052	589010	1,4	16,35
H24	234075	589009	4	15,00
H23	234099	589009	2	23,80
H22	234123	589014	3	25,05
H21	234151	589015	2,6	25,65
G31	233888	588976	2	24,77
G29	233936	588975	1,2	24,02
G28	233955	588984	1,1	17,25
G26bis	234010	588978	1	10,74
G26	234030	588984	3,1	16,46
G25	234053	588993	1	23,91
G24	234077	588993	1,1	29,28
G23	234102	588991	4,8	16,06
G22	234126	588989	3	12,45
G21	234151	588987	1	8,66
G20	234173	588988	1	5,00
F31	233887	588952	2	13,82
F30	233906	588963	1,7	17,99
F29	233935	588951	2,1	22,09
F28	233965	588951	1	27,29
F27	233991	588951	2	26,02

F26bis	234004	588963	0,6	
F25	234047	588968	2,6	19,49
F24	234072	588967	6	14,00
F23	234096	588968	2,5	26,83
F22	234121	588967	2,1	9,96
E31	233883	588928	1,1	12,12
E30	233907	588928	1,9	14,14
E29	233933	588900	4	20,77
E28	233962	588926	4,5	25,83
E27	233993	588926	3,2	36,02
E26 bis	234005	588940	5,5	22,23
E26	234024	588944	3,7	22,45
E25	234049	588944	4	25,05
E24	234079	588939	3,5	7,48
D31	233879	588906	1,5	8,45
D30	233906	588904	1,9	12,32
D29	233933	588901	4,5	21,16
D28	233960	588902	2,6	22,44
D 27	233990	588897	2,7	28,57
D26 bis	234004	588917	2	30,35
D26.1	234066	588907	2,45	16,81
D26.2	234027	588907	2,3	14,64
D26.3	234029	588907	1,7	17,83
D25	234036	588926	3	21,93
D24	234063	588918	0,8	11,41
C32	233856	588879	2	14,33
C31	233878	588880	4,2	20,26
C30	233905	588880	2,8	15,25
C29	233928	588880	2,6	28,59
C28	233958	588885	4,4	25,50
C27b	233979	588878	2,7	29,01
C27	233989	588871	6,2	19,23
C26 bis	234003	588891	2,6	27,01
C26	234022	588894	2,2	23,43
B33	233831	588856	0,9	14,15
B32	233853	588857	2,6	22,87
B31	233881	588855	1,2	11,64
B30	233903	588857	2	20,91
B29	233929	588855	5	20,37
B28b	233949	588854	2,1	33,20
B28	233956	588854	0,9	34,04
B27b	233976	588852	1,5	28,17
B27	233990	588851	3,4	22,24
B26b	233996	588852	1,8	24,29

B26bis	234003	588862	1,8	19,08
B26	234005	588846	5	18,89
A35	233784	588837	0,7	34,50
A34	233806	588833	1,6	20,50
A33	233832	588831	1	20,28
A32	233854	588828	3,5	21,57
A31a	233873	588829	2,5	27,71
A31	233881	588828	4,1	26,91
A30	233906	588828	3,2	32,38
A29	233929	588826	2,8	35,39
A28b	233942	588828	6,3	23,66
A28	233955	588829	7,7	35,87
A27	233971	588827	2,1	24,04
A27b	233987	588825	6	28,22
A26	234004	588823	2	23,27
Aa35	233799	588820	2,4	31,17
Aa35b	233810	588810	2,3	31,27
Aa34	233821	588819	2,9	21,73
Aa33	233843	588815	2,7	25,75
Aa32	233868	588812	1,9	26,48
Aa31	233890	588810	5	30,82
Aa30	233914	588808	5	29,62
Aa29	233939	588805	2,4	34,84
Aa28	233955	588802	3	39,71
Ab35	233799	588783	2,3	31,27
Ab34	233821	588780	1,4	34,01
Ab32	233868	588782	1,5	31,13
Ab31	233893	588779	2,8	31,31

**Annexe III : Paramètres d'interpolation des méthodes d'interpolation, IDW, KO et KU**

Paramètres d'interpolation	IDW	KO	KU
1. Nombre de points voisins	1	1	1
2. Forme du secteur de recherche	2	2	2
3. Dimensions du secteur de recherche	3	3	3
4. Angle de la forme du secteur de recherche	4	4	4
5. Puissance	5		
6. Paramètre			
7. Fonction Kernel			
8. Modèle de variogramme		8	8
9. Portée		9	9
10. Seuil partiel		10	10
11. Effet de pépite		11	11
12. Taille du champ		12	12
13. Nombre de champ		13	13
14. Anisotropie		14	14
15. Voisinage (global vs local)			15
16. Méthode de triangulation			

## **Résumé**

De nos jours le domaine minier occupe une grande place dans l'économie mondiale des États. Etant un domaine impliquant d'énormes fonds, son exploration est stricte et coûteuse. Le département mines et géologie a pour rôle premier d'estimer les réserves de façon à représenter au mieux la réalité du terrain afin d'en juger de la rentabilité économique du gisement. Ce présent mémoire s'inscrit dans un cadre d'évaluation des méthodes d'estimation. Les méthodes présentées lors de cette étude sont les modèles déterministe (IDW) et probabiliste (KO et KU). Chaque méthode a été appliquée de sorte à obtenir la méthode optimale en fluctuant les paramètres de traitement. L'optimalité de chaque méthode est déterminée principalement par les critères de la validation croisée. Les résultats obtenus avec les deux interpolateurs sont globalement acceptables. En matière de spatialisation des données de teneurs en Mn, ils présentent les mêmes tendances. Les zones à forte et faible teneur sont sensiblement réparties de la même manière chez les deux interpolateurs. Une comparaison des modèles d'estimation (IDW, KO, KU) s'en est suivie. Elle est basée sur la comparaison des statistiques des erreurs de prédiction. Le krigeage s'est montré le plus réaliste à partir du type ordinaire couplé au modèle variographique sphérique.

**Mots clés :** IDW, krigeage, estimation, spatiale, optimale.

## **Abstract**

Today, mining occupies a large place in the world economy of states. Being an area involving huge funds, its exploration is strict and expensive. The mining and geology department's primary role is to estimate reserves so as to best represent the reality on the ground in order to judge the economic profitability of the deposit. This thesis is part of a framework for evaluating estimation methods. The methods presented during this study are the deterministic (IDW) and probabilistic (KO and KU) models. Each method has been applied so as to obtain the optimal method by varying the treatment parameters. The optimality of each method is determined primarily by the criteria of cross-validation. The results obtained with the two interpolators are generally acceptable. In terms of spatialization of Mn content data, they show the same trends. The high and low content areas are distributed substantially in the same way in the two interpolators. A comparison of the estimation models (IDW, KO, KU) was followed up. It is based on the comparison of statistics of prediction errors. Kriging has been shown to be the most realistic from the ordinary type coupled with the spherical variographic model.

**Keywords:** IDW, kriging, estimation, spatial, optimal.