

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

جامعة 20 أوت 1955 - سكيكدة.

UNIVERSITE 20 AOUT 1955- SKIKDA



Faculté des Sciences

Département Ecologie et Environnement

Mémoire Présenté en Vue de l'Obtention du Diplôme de Master

Filière : Ecologie et Environnement

Spécialité : Protection des Ecosystèmes

Intitulé :

**Application des méthodes géostatistiques pour la cartographie
des éléments polluants cas de gisement de fer Anini « Sétif »**

Présenté par :

BENDJAMA Chahinez

BENBECHINA Amani

BOUSMAT Chiraz

PETIT Sabrina

Membre de Jury:

Président : NOUASRIA D. (MCB)

Université 1955. Skikda

Promoteur : BOUDRIES A. (MCB)

Université 1955. Skikda

Examineur: HADEF A. (MAA)

Université 1955. Skikda

Année universitaire 2024-2025

Remerciements

Avant toute chose, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir accordé la santé, la volonté, la patience et l'opportunité d'achever ce modeste travail.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à notre **encadrante, BOUDRIES A**, pour avoir accepté de superviser ce mémoire, ainsi que pour ses conseils avisés et son accompagnement précieux tout au long de ce travail.

Nos remerciements vont également aux membres du jury **Président NOUASRIA D, examinateur HADEF A**, pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Nous tenons aussi à remercier chaleureusement l'ensemble des membres du Département d'Ecologie et environnement, en particulier les enseignants qui ont assuré notre formation avec dévouement tout au long de nos années d'étude.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance la plus profonde à nos êtres les plus chers : nos parents, frères et sœurs, dont le soutien moral et les encouragements constants nous ont permis de poursuivre nos études et de mener à bien ce projet.

Dédicace

À ma mère...

Qui m'a appris que la patience est la mère des miracles. Bien que son rêve ne se soit pas réalisé, elle ne s'est pas brisée, mais a fait de moi le rêve qu'elle avait longtemps attendu.

Chaque pas que je faisais était guidé par ses prières, et chaque réussite est le fruit de son grand cœur.

À mon père...

Qui m'a offert la vie sans rien demander en retour, a travaillé en silence, s'est beaucoup fatigué, et m'a éduquée dans la dignité et la force.

Sans ses bras infatigables, je ne serais pas aujourd'hui debout avec fierté.

À mes frères Imad et Adam, et à ma sœur Amira,

Vous êtes la forteresse quand l'âme faiblit, l'ombre quand les jours deviennent brûlants.

Vous étiez ce soutien silencieux qu'on ne dit pas... mais qu'on ressent.

À mes amies qui étaient bien plus que des noms dans ma journée,

Racha, Chiraz, Amani, Sabrina...

Vous avez tendu la main avec douceur quand j'étais fatiguée, et vos rires ont été un baume à chaque instant d'inquiétude.

Chahinez

Dédicace

À ceux qui ont planté en moi les graines de l'espoir et qui ont été mon soutien à chaque étape...

À ma chère famille, battement de mon cœur et raison de ma persévérance.

À mes parents bien-aimés, symboles de sacrifice et de générosité : merci pour votre patience et vos prières constantes.

À mes frères et sœurs, vous qui avez toujours été mon refuge et ma compagnie fidèle.

À mes précieuses amies : Manel, Chahinez, chiraz, Amani et Tesnim, vous qui avez allégé le poids du chemin, partagé les moments de joie et été la lumière dans les jours de fatigue. Merci pour votre présence, votre écoute et votre affection sincère.

À toutes les personnes qui m'ont encouragée, que ce soit par une parole, un conseil ou simplement par leur foi en moi : merci du fond du cœur.

À vous tous, je dédie ce travail.

Sabrina

Dédicace

**Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux.
{Allah élèvera en degrés ceux d'entre vous qui auront cru et ceux qui
auront reçu le savoir.}**

Louange à Allah jusqu'à ce que la louange atteigne son terme.
C'est avec fierté que je dédie le fruit de mes efforts, grâce à Sa bénédiction,
À mon pilier, à ma force, celui qui a embelli ma vie par son sourire,
À celui dont l'écriture a inspiré la beauté de la mienne,
Je suis si fière de toi, **papa**, pour avoir atteint le stade du baccalauréat.
Et me voici aujourd'hui, achevant, par la grâce de Dieu, ce qui restait de ton
chemin.

Mon succès est le fruit de tes sacrifices et de ton soutien constant.

À mon ange, celle qui réalise mes rêves,

À mon premier et éternel soutien, matériel et moral,

À ma main droite, à ma compagne de route,

À mon refuge, mon espoir, mon miroir,

Ma chère maman, sans qui ce rêve n'aurait pu se réaliser.

À mon appui, à mon ombre, à mon énergie et à ma source de joie,

À ceux par qui Dieu a fortifié mon dos : mes frères et sœurs,

Dikra, Lina, Zakaria et le petit dernier Himo,

Qu'Allah vous protège et vous garde dans les meilleures conditions.

À toute ma grande famille qui m'a soutenue par ses paroles et ses actes,
Sans exception, je vous adresse toute ma gratitude et mes remerciements.

À mes compagnes de route, celles qui ont partagé chaque pas avec moi,

Puisse Allah les combler de réussite dans leur vie professionnelle.

Et pour finir, comme on dit "la meilleure pour la fin",

Je remercie **moi-même**, pour avoir tenu bon malgré les embûches.

Fière de toi, Amouna.

Amani

Dédicace

Louange à Dieu, par Sa grâce les bienfaits s'accomplissent et les rêves deviennent réalité. À Lui toute reconnaissance, aujourd'hui et toujours.

À **ma mère** partie trop tôt, celle qui fut bien plus qu'une mère : un foyer, une prière, une tendresse inoubliable. Tu vis encore dans mon cœur, mes réussites et mes prières. Que Dieu t'accorde Sa miséricorde. Si un vœu pouvait se réaliser, ce serait de t'avoir à mes côtés aujourd'hui.

À **mon père**, ce pilier inébranlable, cette prière constante. Merci pour ton soutien, ta patience et tes sacrifices. Tu as toujours été mon refuge dans les épreuves. Que Dieu te récompense pour tout ce que tu as fait pour moi.

À ma sœur aînée **Hind**, lumière dans mes ténèbres, guide dans mes choix et mes prières. Merci d'avoir été comme une seconde mère, toujours présente avec ton amour et ton soutien.

À mon cher frère **Abderraouf**, mon ami, mon appui, le meilleur des frères, tu as toujours été une source de force et de joie dans ma vie. Merci d'avoir été ce frère dont on peut être fière.

À ma sœur douce et généreuse **Yasmine**, au cœur pur, merci d'avoir été ce refuge chaleureux, cette parole réconfortante, ce répit à chaque moment de faiblesse.

À ma petite sœur **Hadil**, ma confidente et mon reflet, celle qui a été le baume dans mes moments de fatigue, merci pour ton amour, ton soutien, et ta présence à chaque étape.

Un grand merci à mes amies **Chourouk, Amani, Chahinaz, Sabrina et Aya**, pour leur soutien précieux .et leur belle énergie

Enfin, **merci à moi-même** pour ma persévérance, et à tous ceux qui m'ont encouragée ou crue en moi. Ce succès est aussi le leur.

Chiraz

Résumé

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de la cartographie géochimique du gisement de fer d'Anini, localisé au nord de la ville de Sétif, dans la région nord-orientale de la chaîne alpine d'Algérie. Ce gisement, reconnu pour sa minéralisation en goethite et hématite, avec des traces de minéraux de gangue (calcite, quartz) et de sulfures, a fait l'objet d'explorations géologiques par l'ORGM entre 2009 et 2011.

L'étude repose sur l'exploitation de données issues de 40 sondages portant sur les teneurs en Fe_2O_3 , FeT, SiO_2 et CaO. Elle combine des méthodes statistiques classiques (analyses monovariée, bivariée, ACP) et des outils géostatistiques, notamment la variographie et le krigeage ordinaire, afin de modéliser la distribution spatiale du Fe_2O_3 dans le gisement.

Les résultats de variographie ont montré la présence d'une anisotropie dont le grand axe est dans la direction $\text{N}135^\circ$ et le petit axe est dans la direction $\text{N}45^\circ$. Les variogrammes directionnels de Fe_2O_3 ont été calculés et ajustés à l'aide de modèle sphérique. Les résultats de variographie ont été utilisés pour produire des cartes de krigeage. Ces cartes constituent une base utile pour la planification des travaux futurs et pour une meilleure compréhension de la distribution du fer au sein du gisement d'Anini.

Mots-clés :

Gisement de fer, teneur en fer, analyse multivariée, variographie, krigeage, anisotropie, cartographie géostatistique.

Abstract

This work is part of the geochemical mapping of the Anini iron deposit, located north of the city of Sétif, in the northeastern region of the Alpine chain of Algeria. This deposit, known for its mineralization in goethite and hematite, with traces of gangue minerals (calcite, quartz) and sulfides, was geologically explored by the ORGM between 2009 and 2011.

The study is based on the analysis of data from 40 boreholes concerning the contents of Fe_2O_3 , total iron (FeT), SiO_2 , and CaO. It combines classical statistical methods (univariate, bivariate and principal component analysis) with geostatistical tools, notably variographie and ordinary kriging, in order to model the spatial distribution of Fe_2O_3 within the deposit.

The variographie results revealed the presence of anisotropy, with the major axis oriented $\text{N}135^\circ$ and the minor axis $\text{N}45^\circ$. Directional variograms of Fe_2O_3 were calculated and fitted using a spherical model. The variography outcomes were then used to produce kriging maps. These maps provide a valuable basis for planning future work and for a better understanding of the spatial distribution of iron within the Anini deposit.

Keywords:

Iron deposit, iron content, multivariate analysis, variography, kriging, anisotropy, geostatistical mapping.

ملخص

يندرج هذا العمل في إطار إعداد خريطة جيوكيميائية لمكمن الحديد عيني، الواقع شمال مدينة سطيف، في المنطقة الشمالية الشرقية من السلسلة الأطلسية بالجزائر. يتميز هذا المكمن بتعدنه من الغوثيت والهيمايتيت، مع وجود ثانوي لمعادن الشوائب مثل الكالسيت، الكوارتز، والكبريتيدات. وقد خضع لأعمال استكشاف جيولوجي من طرف المكتب الوطني للبحث الجيولوجي والمعدني (ORGM) خلال الفترة الممتدة بين سنتي 2009 و2011. تعتمد هذه الدراسة على تحليل بيانات مأخوذة من 40 بئراً اختبارياً تتعلق بنسب Fe_2O_3 ، الحديد الكلي (FeT)، SiO_2 ، وCaO

وقد تم استخدام طرق إحصائية تقليدية (أحادية ومتعددة المتغيرات، وتحليل المركبات الرئيسية) إلى جانب أدوات الجيوإحصاء، خصوصاً الفارايوغرافيا والكريجاج العادي، بهدف نمذجة التوزيع المكاني لـ Fe_2O_3 داخل المكمن. أظهرت نتائج الفارايوغرافيا وجود تباين مكاني (أنيسوتروبي) بحيث أن المحور الرئيسي يتجه نحو 135° شمالاً، والمحور الثانوي نحو 45° . وقد تم تعديل الفارايوغرام باستخدام نموذج كروي. واستُخدمت هذه النتائج لإنتاج خرائط كريج لعنصر Fe_2O_3 ، والتي تمثل أداة مهمة في التخطيط للأعمال المستقبلية، وتسهم في فهم أدق لتوزيع الحديد داخل مكمن عيني.

الكلمات المفتاحية :

منجم حديد، نسبة الحديد، التحليل متعدد المتغيرات، التبيئية، الكريجنج، التباين الاتجاهي، الخرائط الجيوإحصائية.

Liste des figures

Figure 1. différents utilisation de minerai de fer.....	05
Figure 2. Carte de la situation géographique de la zone d'étude (Chaabia et al, 2015).....	08
Figure 3. Extrait des cartes topographiques au 1/50000 de : BOUGAA n° NJ-31-VI-53 Est (ORGM ,2010).....	09
Figure 4. Carte géologique schématique de la région de Guergour-Anini (Glaçon, 1967)	09
Figure 5. Hydroxyde de fer Hé : Hématite Lumière réfléchie, LP	10
Figure 6. Texture collomorphe Go : Goethite Ga : Gangue, lumière réfléchie, LP	10
Figure 7. - la barytine avec le minerai de fer.....	11
Figure (8). (A, B) - Barytine (Bary) en gerbes. Lumière réfléchie, LP.....	11
Figure 9. La stibine à l'intérieur de la goethite, St : stibine, lumière réfléchie	12
Figure 10. Les caractéristiques du graphe γ (h) en fonction de h.....	15
Figure 11. Schémas théoriques à palier d'ajustement des variogrammes.....	16
Figure 12. Schémas théoriques sans palier d'ajustement des variogrammes	17
Figure 13. Schéma d'un Variogramme à effet de trou.....	17
Figure 14. plan d'échantillonnage	21
Figure 15: Cercles de corrélation de l'ACP sur l'ensemble des éléments analysés	25
Figure 16 : Carte du facteur score F1.....	28
Figure 17: Variogramme de surface de Fe_2O_3	29
Figure 18: - les variogrammes directionnels de Fe_2O_3	30
Figure 19: Carte des isovaleurs de Fe_2O_3 krigeagé.....	32
Figure 20. Carte d'erreur de Fe_2O_3	33
Figure 21. Répartition des blocs krigeagé de Fe_2O_3 dans le gisement d'Anini	36
Figure 22. Répartition d'erreur de Fe_2O_3	38

Liste des tableaux

Tableau 1: présente le processus de la formation géologique ainsi que le type du minerai de fer obtenu avec ces principaux minéraux (US EPA, 1994).....	02
Tableau 2: Statistiques des paramètres chimiques mesurés dans les différents sondages....	22
Tableau 3 : La matrice de corrélation des différents éléments analysés.....	23
Tableau 4: Résultats de l'ACP sur l'ensemble des teneurs des échantillons de sondages du gisement d'Anini.....	24
Tableau 5 : les facteurs scores.....	26
Tableau 6: Résultats de la variographie de Fe ₂ O ₃	31

Sommaire

Introduction Générale.....	01
Chapitre I : Partie 1 : Analyse bibliographique sur les minerais de fer	02
1.1 Définitions.....	02
1.2 ORIGINES DES MINERAIS DE FER.....	02
1.2.1.1 Processus physiques et chimiques.....	03
1.2.1.2 Processus mécanique	03
1.3 Types de gisements.....	03
1.4 Les gisements de fer en Algérie.....	04
1.5 Domaines d'utilisation	05
Partie 2 : Impact de l'exploitation des gisements de fer	06
1. Impacts environnementaux.....	06
2. Impacts sociaux.....	06
3. Impacts économiques	06
4. Impacts sanitaires.....	07
Chapitre II : Matériels et Méthodes	08
1. Présentation du site d'étude.....	08
1.1 Localisation du site	08
1.2 Climat.....	08
1.3 Topographie	08
1.4 Géologie locale	09
1.4.1 Minéralisation	10
1.4.1.1 Composition minéralogique	10
2. Données utilisées.....	12
3. Méthodes utilisées	12
3.1. Méthodes statistiques.....	12
3.1.1. Analyse monovariante.....	12

3. 1. 2. Analyse bivariée	13
3.1.3 Analyse multivarié.....	13
3.2. Méthodes géostatistiques.....	14
3.2.1 Les outils et modèles de la géostatistique.....	14
3.2.2 Concept de variance d'estimation	18
3.2.3. Procédures de Krigeage ordinaire.....	18
4. Logiciels utilisés.....	20
Chapitre III : Résultat et Discussion	21
1. Méthode d'analyse des données, Géostatistique et Logiciels utilisées	21
1.1. Méthodes d'analyse de données	21
1.1.1 Analyse monovarié.....	21
1.1.2 Analyse bivariée.....	23
1.1.3 Analyse multivariée.....	23
1.2 Etude géostatistique.....	29
1.2.1 Variogramme de surface.....	29
1.2.2 Variographie de Fe ₂ O ₃	29
1.2.3 Variogramme directionnel de Fe ₂ O ₃	30
1.3 Le krigeage de Fe ₂ O ₃	31
CONCLUSIONS GENERALES.....	39
Références Bibliographiques	41

Introduction Générale

Les ressources minérales, en particulier le minerai de fer, représentent un levier stratégique pour le développement industriel et économique à l'échelle mondiale. Le fer est principalement destiné à la production de l'acier, matériau indispensable aux secteurs de la construction, du transport, de l'énergie et de l'ingénierie lourde. Environ 98 % du minerai de fer extrait dans le monde est transformé en acier (Olivier, 2012).

L'Algérie, pays riche en ressources naturelles, possède plusieurs gisements de fer à fort potentiel, dont celui d'Anini, situé au nord de la wilaya de Sétif. Ce gisement, exploré par l'Office National de la Recherche Géologique et Minière (ORGM) entre 2009 et 2011, se distingue par une minéralisation dominée par la goethite et l'hématite, accompagnées de minéraux de gangue comme la calcite, la dolomite et le quartz (ORGM, 2011). La présence possible d'éléments potentiellement polluants dans certains horizons du gisement appelle à une analyse approfondie, dans une perspective de développement durable.

Dans ce contexte, l'étude géostatistique constitue un outil fondamental pour modéliser la distribution spatiale des teneurs, estimer les ressources disponibles, réduire les incertitudes et optimiser la gestion minière (Chilès & Delfiner, 2012). Grâce à des techniques telles que la variographie et le krigeage, il est possible de produire des cartes thématiques précises, permettant d'identifier les zones de haute teneur ou à risque environnemental, et de mieux orienter les décisions d'exploration et d'exploitation (Journel & Huijbregts, 1978).

Le présent travail a pour objectif d'appliquer des méthodes géostatistiques à l'analyse des données géochimiques issues de 40 sondages réalisés sur le gisement de fer d'Anini. Il a pour principal objectif de cartographier la distribution spatiale du fer et d'évaluer ses implications sur les plans géologique et environnemental.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

- Le premier présente une synthèse sur les minerais de fer et leurs impacts sur l'environnement.
- Le deuxième décrit le cadre méthodologique, notamment les logiciels utilisés (Excel, Surfer, SGeMS) et les techniques géostatistiques mobilisées.
- Le troisième chapitre est consacré à l'analyse des résultats, leur interprétation, et la proposition de recommandations pour une valorisation raisonnée du gisement.

Chapitre I

Généralités sur les minerais de fer

Chapitre I : Partie 1 : Analyse bibliographique sur les minerais de fer

Au fil des dernières décennies, le minerai de fer est devenu une matière première stratégique, essentielle au développement industriel. Jadis échangé par des contrats à long terme, il alimente aujourd'hui majoritairement l'industrie sidérurgique, qui consomme près de 98 % de sa production mondiale (Olivier, 2012)

I.1 Définitions :

- **Gisement de fer** : est un corps minéral d'une taille suffisante, contenant une teneur en fer et une composition chimique avec des caractéristiques physico-économique qui le permet d'être une source minérale immédiate ou potentielle. (Kennedy B.A, 1990).

- **Le minerai riche** : ce qui donne des minerais marchands sans aucune transformation (run of mine), ou après concassage-criblage, parfois après un traitement simple n'affectant qu'une faible partie du tout-venant (débouillage, élimination ou enrichissement des parties les plus fines souvent plus chargées en impuretés). Les minerais riches titrent en général entre 55 et 67 % de fer.

- **Le minerai pauvre** : est un tout-venant qui doit subir un traitement parfois complexe permettant d'éliminer la plus grande partie de la gangue. Par enrichissement, on obtient généralement des concentrés pour agglomération. Les teneurs en fer des minerais actuellement exploités s'échelonnent entre 25 et 50 %. (Pierre SALESSE, 1989).

I.2 ORIGINES DES MINERAIS DE FER :

I.2.1 Processus de formation :

Le tableau 1 : présente le processus de formation géologique ainsi que le type du minerai de fer obtenu avec ces principaux minéraux (US EPA, 1994).

Processus	Type du gisement	Minéraux principaux
Sédimentation	Gisement de Fer rubanée (BIF)	Magnétite, Hématite, Sidérite, Fer Silicatés
	Roches Ferreuses	Chamosite, Limonite, Hématite, Sidérite
Activité igné (volcanique)	Séparation magmatique	Titanifère, Ilménite, Magnétite, Fer silicatés
	Pyrométasomatique	Magnétite
L'érosion à la surface ou proche	Enrichissement secondaire des gisements de fer en teneur faible	Magnétite, limonite, sidérite

La formation naturelle du minerai de fer engendre l'alternance de couches d'oxydes de fer et de silice partiellement altérée, donnant naissance à un minerai de faible teneur en fer (pauvre), (S. A. Elmquist & R.H. Behrendt, 1994).

- ❖ La formation d'un gisement du minerai de fer peut être :
 - Sédimentation directe.
 - Activité ignée (volcanique).
 - La désagrégation à la surface ou proche (Métamorphique).

I.2.1.1 Processus physiques et chimiques :

Sont des processus les plus répandues. Le processus commun de concentration d'un métal ou d'un minéral est la dissolution chimique des composants d'une roche, leur transport dans une solution et leur précipitation comme des minéraux dans certains sites spécifiques de disposition, usuellement contrôlée par le contraste chimique ou changement chimique environnementale. Dans le processus de cristallisation, la roche plus dense qui porte les minéraux va se séparer par gravité pour former un gisement riche en fer. Pendant la descente d'eau de la surface ou la montée d'eau du fond à travers les strates des roches (Howard L.H. (ed.), 1987).

I.2.1.2 Processus mécanique :

Ce processus de formation est principalement dû à l'érosion, au transport et au dépôt de matériaux riches en fer (Robb L, 2004).

I.3 Types de gisements :

Les gisements du minerai de fer sont classés en quatre catégories basées selon leur mode d'origine, en utilisant l'aspect des classifications précédentes par (Gross G. A, 1970) et (Klemic H. et al., 1973).

✓ Gisements sédimentaires

Ce sont les plus exploités dans le monde. Ils proviennent de la sédimentation marine, contenant du fer et de la silice (Kimberley, 1989 ; Kennedy, 1990).

Les BIF (Bandes de Fer Rubanées) datent du Précambrien et résultent d'un mélange de fer et de silice (Harry et al., 1973 ; Gross, 1993).

- **Type supérieur** : formé près des plateformes continentales avec la dolomite, quartzite, et schiste argileux.
- **Type Algoma** : lié à l'activité volcanique (Edwards & Atkinson, 1986).

- **Les gisements oolitiques (type Clinton et type Minette)** sont moins riches en fer et se sont formés en milieux marins peu profonds (Van Houten & Hou, 1990 ; Ferenczi, 2001).

✓ **Gisements ignés**

Ils résultent :

Soit de la ségrégation magmatique dans des roches mafiques riches en magnétite (ex : Bushveld, Afrique du Sud),

Soit de l'injection de fluides magmatiques dans les roches encaissantes (skarns), créant des dépôts massifs utilisés dans divers pays comme le Pérou ou la Russie (Howard, 1987; Ferenczi, 2001).

✓ **Gisements hydrothermaux**

Formés par des solutions aqueuses chaudes riches en fer, d'origine magmatique ou sédimentaire. Ils sont souvent associés à des gisements Fer-Cuivre-Or (IOCG) (Hitzman et al., 1992 ; Porter, 2000).

Exemple typique : le gisement de Kiruna, avec remplacement de roches hôtes par magnétite et hématite (Pollard, 2000).

✓ **Gisements d'enrichissement surfacique**

Ils proviennent de l'érosion et de la lixiviation de couches superficielles pauvres en fer (souvent des BIF), suivies d'un redéploiement des minéraux ferreux dans les couches inférieures (Ferenczi, 2001).

Ce type de gisement se développe souvent dans des climats tropicaux humides, créant des croûtes riches en goethite, limonite et lépidocrocite (US EPA, 1994).

I.4 Les gisements de fer en Algérie :

L'expansion de la sidérurgie algérienne s'appuie, en grande partie, sur l'utilisation rationnelle de toutes les ressources en fer. L'essentiel du potentiel géologique se trouve :

- Au Nord du pays « Ouenza » avec 80 millions de tonnes Fe, « Boukhadra » avec 50 millions de tonnes (Bouaziz, 1992).

- Et dans deux autres gisements au Sud-Ouest du pays, il s'agit des gisements de « Mecheri Abdelaziz » et de « Gara Djebilet » situés à 250 km à l'Est de Tindouf, avec 3.5 milliards de tonnes en Fe (Bouaziz, 1992). Cependant, ces derniers ne sont pas encore exploités car ils nécessitent de gros investissements. La forte demande a poussé vers le développement de

l'industrie minière de ce métal et la réouverture des petites mines. Les gisements de fer d'Anini, Châabet El Ballout, et khanguet El Mouhad en fait partie.

I.5 Domaines d'utilisation :

Le minerai de fer est principalement utilisé pour produire de la fonte, qui sert ensuite à fabriquer de l'acier, matériau essentiel dans l'industrie moderne (Hurst, 2013).

Environ 98 % du minerai de fer mondial est destiné à cette transformation (Hurst, 2013).

L'acier issu du fer est omniprésent dans :

- Les infrastructures : ponts, gratte-ciel, voies ferrées, lignes électriques...
- Les transports : navires, automobiles...
- Les réseaux : téléphonie, énergie...

Ce matériau est vingt fois plus utilisé que tous les autres métaux réunis (Ressources naturelles Canada, 2014).

◆ Les produits à base de minerai de fer sont classés selon :

- leur nuance,
- leurs propriétés métallurgiques,
- et leur teneur en impuretés (comme la silice) (Yellishetty, 2010).

◆ En dehors de l'acier, de petites quantités sont utilisées pour :

- les lavoirs à charbon, • la fabrication de ciment (Halimi, 2008 ; Yellishetty et al., 2012)

Comme cela est schématiquement représenté sur la **figure 1** ci-dessous (Halimi, 2008 ; Yellishetty et al., 2012).

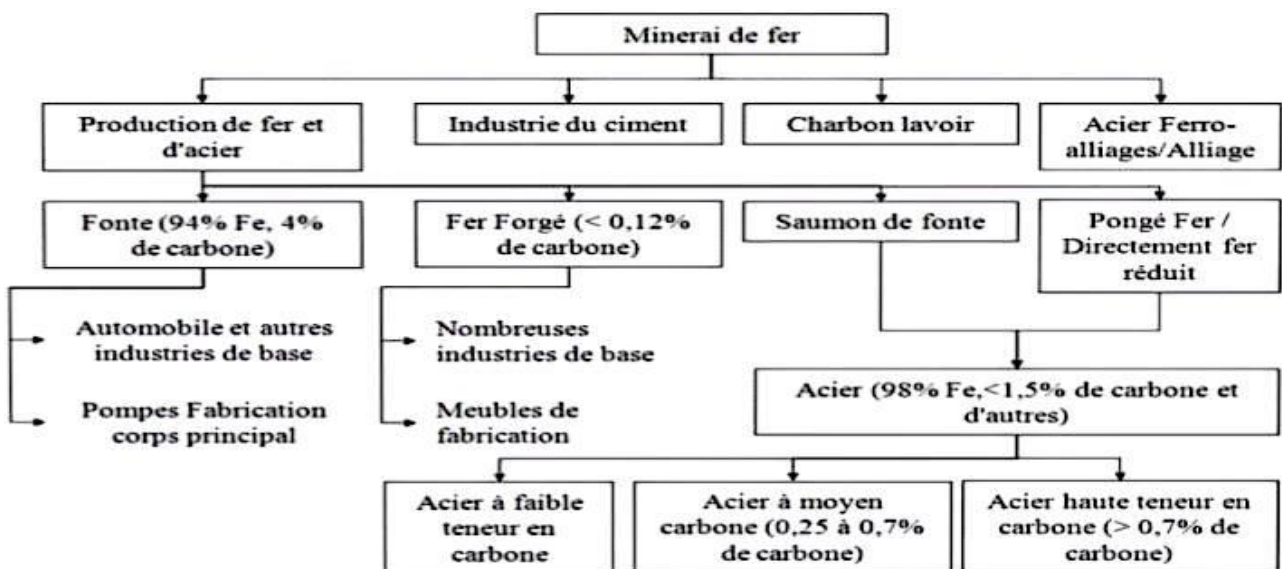


Fig.1. Différentes utilisations de minerai de fer

Partie 2 : Impact de l'exploitation des gisements de fer

Introduction :

L'exploitation minière du fer joue un rôle essentiel dans le développement industriel et économique mondial. Cependant, elle entraîne également de nombreux impacts négatifs sur l'environnement, les sociétés locales, la santé humaine et l'économie.

1. Impacts environnementaux :

Les mines de fer à ciel ouvert provoquent souvent une déforestation massive, la destruction des habitats naturels, et la fragmentation des écosystèmes. Ces perturbations menacent la biodiversité locale, y compris des espèces endémiques ou déjà vulnérables (Araujo et al., 2020).

L'exploitation du fer génère également d'importantes quantités de déchets miniers (stériles, boues rouges) qui peuvent contaminer les sols et les eaux avoisinantes. En présence d'eau et d'oxygène, ces résidus peuvent provoquer un drainage minier acide, entraînant l'acidification des rivières et la dissolution de métaux lourds dans les eaux (Lottermoser, 2010).

Les activités d'extraction, de broyage et de transport du minerai libèrent de grandes quantités de poussières et de particules fines, responsables de la pollution atmosphérique. Cette pollution peut se propager sur de grandes distances, affectant la qualité de l'air bien au-delà du site minier (Ghose & Majee, 2007).

2. Impacts sociaux :

L'implantation de projets miniers dans des zones habitées peut entraîner la relocalisation forcée des communautés locales, souvent sans compensation équitable. Ces déplacements entraînent des pertes culturelles, sociales et économiques importantes pour les populations affectées (Bebbington et al., 2008).

L'exploitation minière peut aussi engendrer des tensions entre les communautés locales, les entreprises minières et les autorités, notamment en raison des enjeux liés à l'accès à l'eau, à la terre et aux ressources naturelles. Des conflits sociaux peuvent ainsi émerger, parfois accompagnés de violences (Hilson, 2002).

3. Impacts économiques :

Le secteur minier représente une source importante de revenus pour de nombreux pays riches en fer, avec des investissements dans les infrastructures, la création d'emplois directs et indirects, et le développement régional (ICMM, 2012).

Cependant, cette croissance économique peut être fragile. Les pays fortement dépendants de l'exportation de minerai de fer sont vulnérables aux fluctuations des prix mondiaux.

Cette dépendance peut empêcher la diversification de l'économie et engendrer ce que l'on appelle la 'malédiction des ressources' (Auty, 1993).

4. Impacts sanitaires :

L'exposition prolongée aux poussières et particules fines issues des mines de fer peut provoquer des maladies respiratoires graves, comme la pneumoconiose, la bronchite chronique ou des cancers pulmonaires, en particulier chez les travailleurs (WHO, 2016).

La pollution des eaux et des sols affecte aussi la santé des populations voisines, notamment par l'ingestion de produits agricoles ou d'eau contaminés. Cette contamination peut entraîner des intoxications aiguës ou chroniques, avec des effets sur les reins, le foie et le système nerveux (Kiffner et al., 2015)

Chapitre II

Matériels et Méthodes

Chapitre II : Matériels et Méthodes

1. Présentation du site d'étude :

1.1 Localisation du site

Le gisement de fer d'Anini est situé dans la wilaya de Sétif, en Algérie, à environ 35 km au nord du chef-lieu de Sétif, à 10 km à l'est de Bougaa et à 3,5 km au sud de la localité d'Aïn Roua **Fig (2)** Ce gisement est exploité par la Société des Mines de Fer d'Algérie (SOMIFER), une filiale du groupe SONAREM.

Les coordonnées Lambert qui le déterminent sont (Chaabia, 2016) :

Longitude : $5^{\circ}09' 5^{\circ}25'$

Latitude : $36^{\circ}20' 36^{\circ}18'$

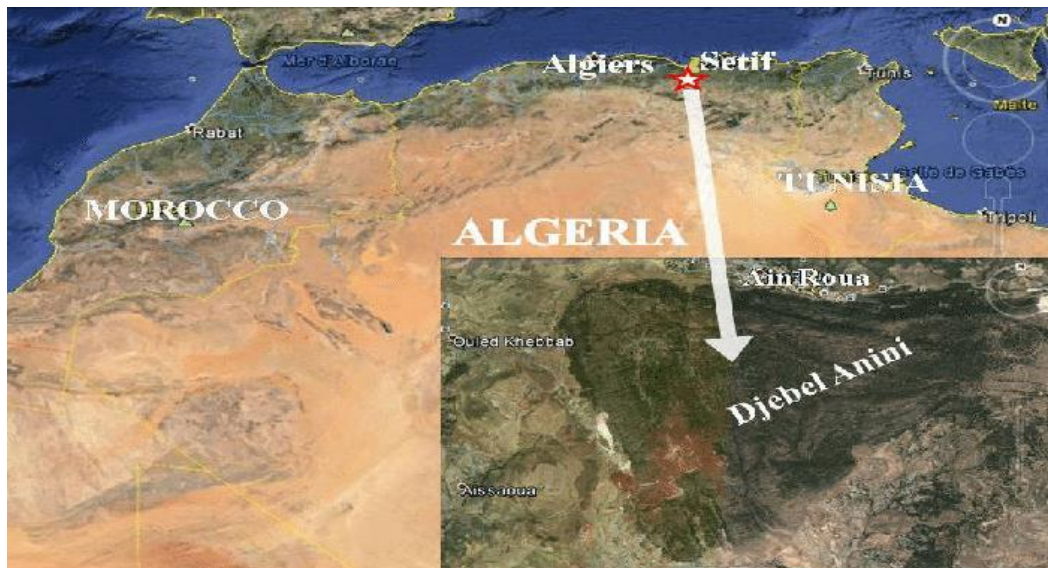


Fig (2) - Carte de la situation géographique de la zone d'étude (Chaabia et al, 2015)

1.2 Climat :

La localisation de la région vis-à-vis de la méditerranée lui attribue un climat continental caractérisé par un été chaud et un hiver relativement froid et neigeux.

La température de la région oscille entre 03°C et 35°C , et sa moyenne annuelle est entre 10°C à 15°C .

1.3 topographie :

La nature topographique de cette région l'a favorisée à abriter de petits forêts de cyprès, pins d'Alep, chênes et cèdres (Ghamoud, 2009).

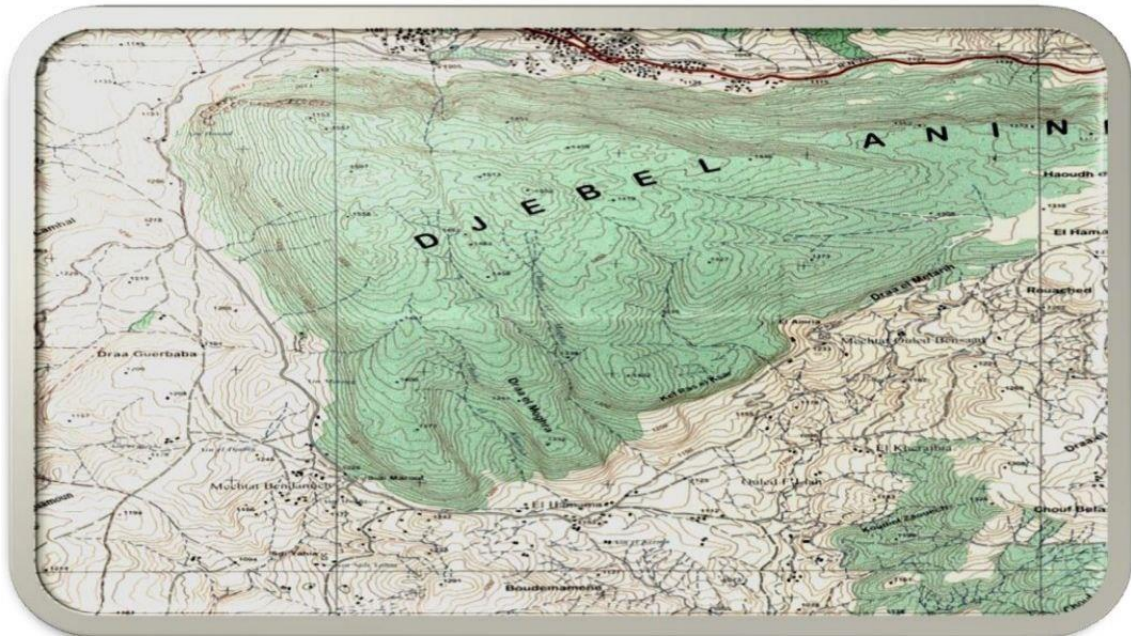


Fig (3) - Extrait des cartes topographiques au 1/50000 de : BOUGAA n° NJ-31-VI-53 Est (ORGM, 2010)

1.4 Géologie locale :

Le massif de « Djebel Anini » fait partie des unités composant l’ensemble allochtone sud sétifien. Celui-ci apparait en fenêtre tectonique, sous les dépôts de la nappe de Djemila (ORGM, 2010). (nappes bibaniques) suite aux mouvements de bombement et de surrection. La minéralisation ferrifère de gisement de Djebel Anini, qui est encaissée dans les calcaires massifs d’âge Cénomano-Turonien se localise principalement dans la partie sud ouest de ce dernier (Fig. 4)

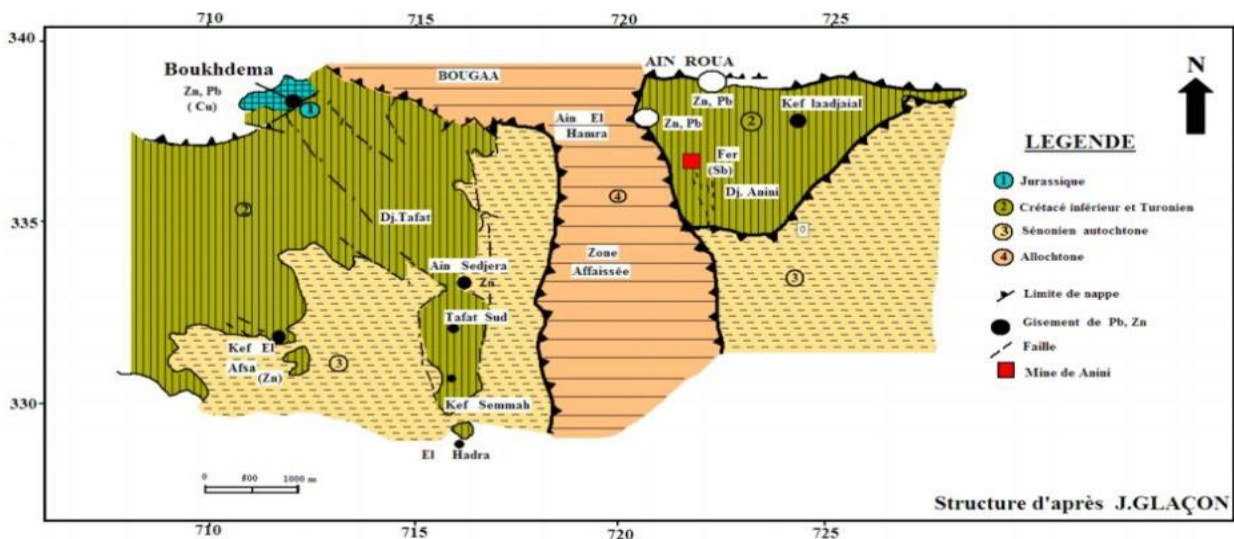


Fig (4) - Carte géologique schématique de la région de Guergour-Anini (Glaçon, 1967)

1.4.1 Minéralisation

1.4.1.1 Composition minéralogique La minéralisation de Djebel Anini présente des associations minérales simples à savoir macroscopiquement comme les hydroxydes et oxydes de fer « goéthite, hématite », et des minéraux de gangue. (Halimi, 2019).

a). Les minéraux ferrifères

- **Hématite (Fe_2O_3)** : Elle est de couleur parfois gris foncé, ou noir, parfois rougeâtre, à éclat submétallique. Elle se rencontre souvent en masses homogènes Fig (5).

- **Goéthite $\text{FeO}(\text{OH})$** : C'est le principal minéral du gisement, macroscopiquement de couleur sombre ou noir, à éclat submétallique, lisse au touché, dense, il apparaît en différentes textures (mamelonnée, en stalagmites et stalactite ou parfois massive). Au microscopique, il se caractérise par ces réflexions internes rouges et sa texture collomorphe observée en sections polies (Fig. 6).

- **Limonite $\text{FeO}(\text{OH}), n\text{H}_2\text{O}$** : elle donne des ocres jaunes à orange, peu abondante sur le terrain.

(Halimi, 2019).

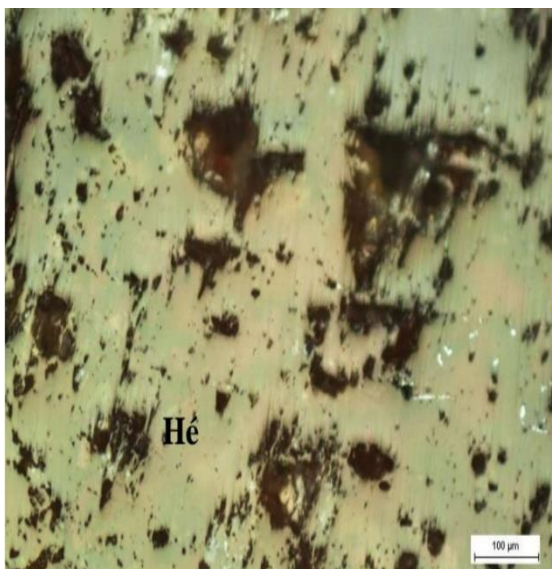


Fig (5) - Hydroxyde de fer Hé : Hématite
Lumière réfléchie, LP.

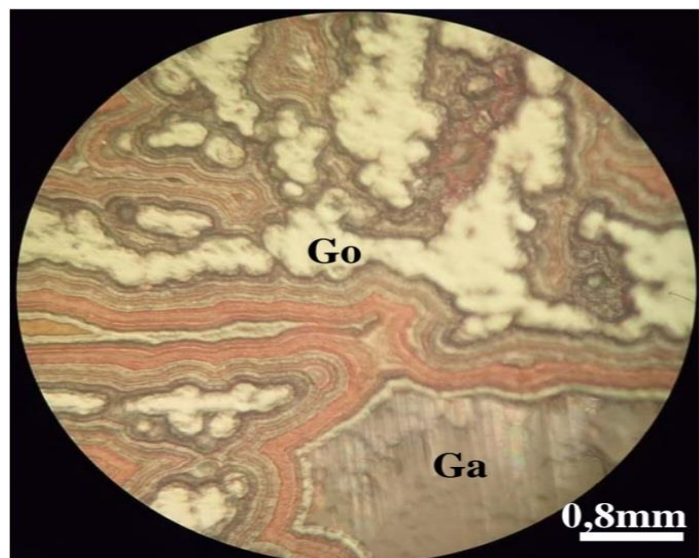


Fig (6) - Texture collomorphe Go :
Goéthite Ga : Gangue, lumière réfléchie, LP.

b). Les sulfates :

- **Barytine** : Elle a été observée à un seul niveau, elle est de couleur rosâtre associée à des Oxydes-hydroxydes de fer (Fig. 7).

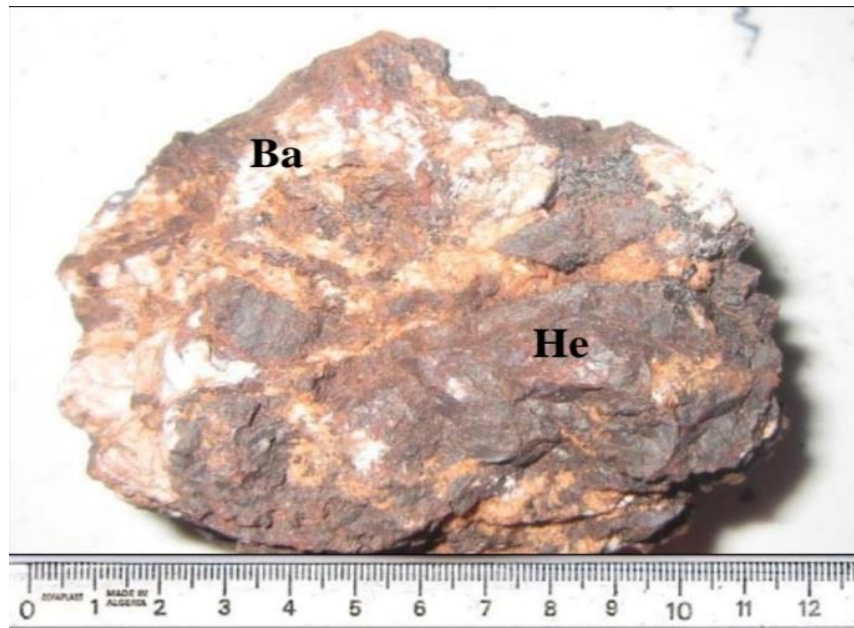


Fig (7) - la barytine avec le minerai de fer.

Microscopiquement elle est caractérisée par son relief fort, de couleur blanche à grisâtre, se présente sous forme de gerbes (Fig. 8), elle est cimentée par les oxydes et hydroxydes de fer.

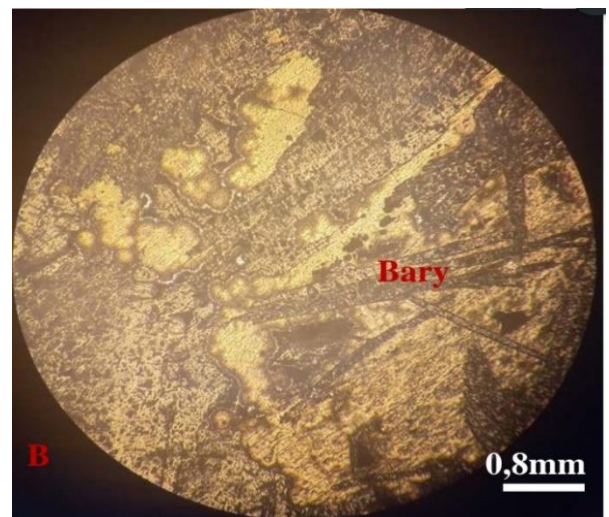
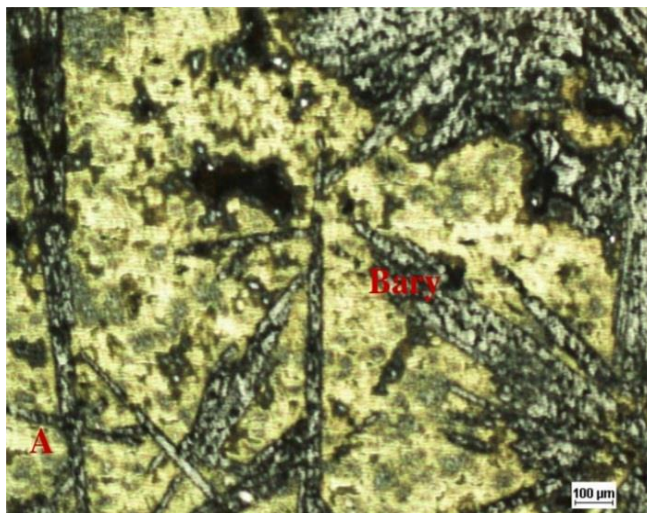
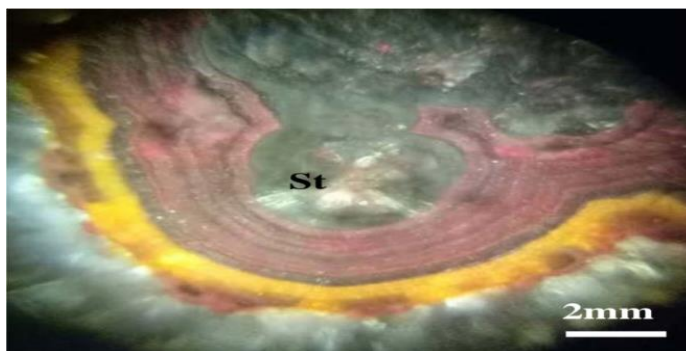


Fig (8)(A, B) - Barytine (Bary) en gerbes. Lumière réfléchie,c).

Les sulfures : Sont rares : la pyrite, la marcassite et probablement la stibine ont été observées. La présence d'antimoine (1 %) confirmée par Bendali (1989) suggère de réaliser des analyses chimiques pour vérification



Fig(9) – La stibine à l'intérieur de la goéthite, St : stibine, lumière réfléchie.

d). Les minéraux de gangue :

Sont principalement la calcite, le quartz et l'aragonite ; la calcite, la plus abondante, apparaît en gros cristaux comblant fractures et vides des calcaires.

2. Données utilisées

Pour le gisement d'Anini l'analyse de données et l'étude géostatistique ont été faites sur les résultats d'analyse d'éléments chimiques de 40 sondages analysés sur SiO_2 , CaO , Fe_2O_3 et FeT .

3. Méthodes utilisées

3. 1. Méthode statistiques

Toute étude géostatistique et estimation des réserves doit être précédée par une analyse statistique des variables étudiées (teneurs des éléments chimiques entre autres) et de confronter les résultats obtenus avec les hypothèses géologiques.

Trois types d'approches statistiques ont été utilisés pour le traitement des données : analyse monovariante, bivariante et multivariante (Halimi, 2019).

3. 1.1. Analyse monovariante

Ce traitement permet de déterminer les paramètres statistiques de la distribution des variables étudiées (paramètres de position centrale et de dispersion) des éléments chimiques et de résumer graphiquement les caractéristiques essentielles de la distribution de chaque variable.

3. 1. 2. Analyse bivariée

Le traitement statistique bivariable consiste à étudier deux variables aléatoires en même temps, et de définir la liaison entre elles (deux éléments chimiques analysés) à l'aide de plusieurs paramètres dont la covariance, le coefficient de corrélation simple et la régression linéaire simple.

➤ **La covariance entre deux éléments (X, Y)**

La covariance entre deux variables X et Y est définie comme :

$$\text{Cov}(X, Y) = E(XY) - E(X) \cdot E(Y)$$

Où E(XY) - Espérance mathématique du produit (X, Y).

E(X) - Espérance mathématique de X.

E(Y) - Espérance mathématique de Y.

➤ **Le coefficient de corrélation simple :**

Le coefficient de corrélation simple entre deux variables X et Y est désigné par ρ , il quantifie le lien entre ces deux variables et il est égal à :

$$\rho_{xy} = \frac{\text{cov}(xy)}{\sigma_x \cdot \sigma_y}$$

Généralement la signification du coefficient de corrélation simple dépend du nombre de données.

3. 1. 3. Analyse multivariée :

L'analyse des données désigne l'ensemble des méthodes qui permettent de collecter, d'organiser, d'analyser, de présenter que l'on appelle les données. Ces méthodes utilisent des techniques géométriques permettant de mettre en évidence des groupes d'individus homogènes, des liens entre individus et variables, des ressemblances ou des différences entre variables, etc. (Halimi, 2019).

- **Analyse en Composantes Principales (ACP)**

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode statistique multivariée qui permet de **réduire la dimensionnalité** d'un jeu de données tout en **conservant l'essentiel de l'information**. Elle est fréquemment utilisée en géologie, géochimie et exploration minière pour analyser des variables corrélées, comme les concentrations de différents éléments chimiques dans des échantillons de minerai.

Cette méthode utilise des techniques géométriques permettant de mettre en évidence des groupes d'individus homogènes, des liens entre individus et variables, des ressemblances ou des différences entre variables et surtout de représenter les données initiales d'un Tableau R (n, p) par un nombre plus petit sans perdre l'information (Chamussy et al, 1994). Soit un tableau (matrice) R (n, p) où n est le nombre de lignes et p le nombre de colonnes.

3.2. Méthodes géostatistiques

Actuellement, l'estimation des ressources/réserves minières se fait essentiellement à l'aide de méthodes géostatistiques. Cette méthode est basée sur la théorie des variables régionalisées et des fonctions aléatoires (Matheron, 1971, Armstrong et Carignan, 1997, Journel et Huijbregts, 1978, Chauvet, 1999). Elle consiste à procéder à l'étude de l'autocorrélation et la variabilité spatiale – variographie - Les résultats de cette variographie sont utilisés dans différents domaines et entre autre pour minimiser les erreurs d'estimations des ressources/réserves.

3.2.1 Les outils et modèles de la géostatistique

La nature n'est pas entièrement "imprévisible". Deux observations situées l'une près de l'autre devraient, en moyenne, se ressembler davantage que deux observations éloignées

En géostatistique, il est essentiel de quantifier la continuité spatiale avant d'effectuer tout calcul sur un gisement. Le phénomène étudié peut être stationnaire ou non. On parle de stationnarité lorsque les moments statistiques (notamment la moyenne et la covariance) ne varient pas selon la position dans l'espace. En pratique, on se limite souvent aux deux premiers moments :

La moyenne et la covariance (ou le variogramme), qui sont les outils fondamentaux de la géostatistique utilisés pour l'estimation et d'autres analyses.

- Moment d'ordre 1 - $E[Z(x)] = m(x)$ qui est l'Espérance mathématique

- Moment d'ordre 2 - $2\gamma(x, h) = E \{ [z(x) - z(x+h)]^2 \}$ appelé variogramme

Ou

$C(x, h) = E \{ [Z(x+h) - m(x+h)] \cdot [Z(x) - m(x)] \}$ appelé covariance

Les deux moments quantifient chacun l'autocorrélation entre les valeurs $Z(x)$ au point x et $Z(x+h)$ au point $x+h$.



- Dans le cas de stationnarité les deux premiers moments seront :

$$E[Z(x)] = m$$

$$E[Z(x+h) - Z(x)]^2 = 2\gamma(h) = 2\gamma(-h)$$

$$E[Z(x+h) \cdot Z(x)] - m^2 = C(h) = C(-h)$$

- **Variogramme expérimental**

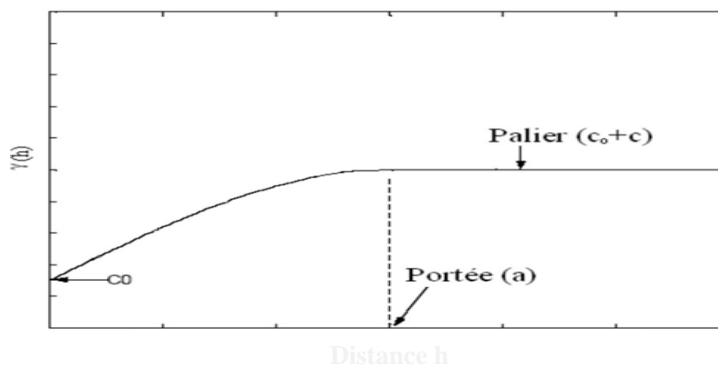
Dans le cas de stationnarité, le variogramme $\gamma(x,h)$ ne dépend que du vecteur h (module et direction) **Hypothèse intrinsèque.**

En pratique, on ne dispose que d'une seule réalisation $[Z(x+h)-Z(x)]$ mais ces hypothèses permettent d'avoir plusieurs couples et le variogramme expérimental sera estimé

Par la formule :

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

Où $N(h)$ est le nombre de couples $[z(x), z(x+h)]$, séparé par une distance h suivant une direction. Les résultats obtenus peuvent être représentés sous forme graphique (Fig. 10)



Fig(10) - Les caractéristiques du graphe $\gamma(h)$ en fonction de h .

- **Propriétés du variogramme**
- **palier $\sigma^2 = C_0 + C$** : En général le palier correspond à la variance de la VA.
- **Portée a** : Distance où deux observations ne sont plus auto corrélées, elles ne sont plus liées ($\gamma(h) = c$) linéairement. À cette distance, la valeur du variogramme correspond à la variance de la variable aléatoire.
- **Effet de pépite C_0** : Variation à très courte échelle, échelle d'observation, erreurs d'analyse et précisions analytiques et qualités d'échantillonnages.

- **Anisotropies** : Le variogramme est calculé pour tout couple de points, et il révèle dans certains cas que la continuité spatiale n'est pas nécessairement la même dans toutes les directions. Dans ce cas il existe une anisotropie.

A) -anisotropie géométrique : lorsque deux variogrammes directionnels ont des paliers identiques et des portées différentes.

B) -anisotropie zonale : lorsque deux variogrammes directionnels ont des paliers et les portées différentes. Selon l'existence ou non d'un palier et le comportement à l'origine les variogrammes expérimentaux sont ajustés à l'aide de modèles théoriques (Chauvet 1999), parmi lesquels les schémas à palier (Fig. 11), schémas sans palier (Fig. 12) et schémas à effets de trous (Fig.13).

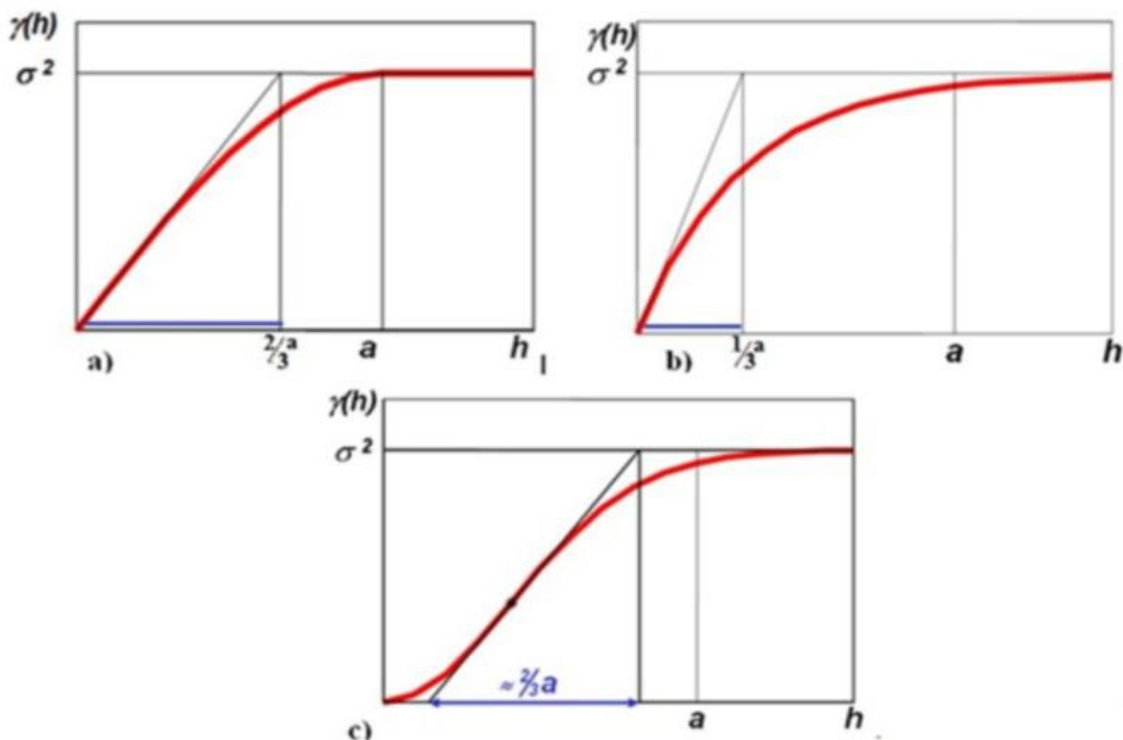
Schémas à palier : Ce sont des variogrammes présentant un palier C.

- **Un comportement linéaire à l'origine** :

$$\text{Sphérique} : \gamma(h) = \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]$$

$$\text{Exponentiel} : \gamma(h) = \left[1 - \exp \left(-\frac{h}{a} \right) \right]$$

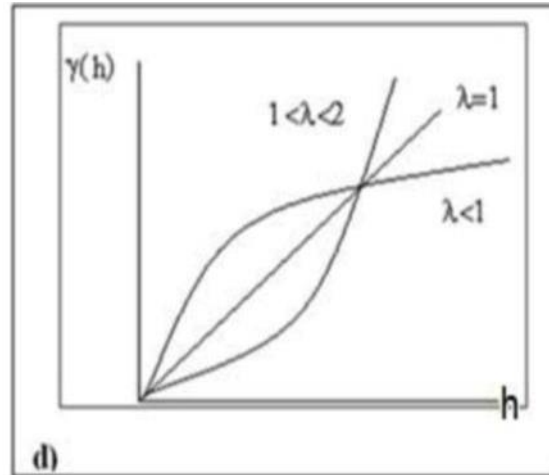
- **Un comportement parabolique à l'origine** : $\gamma(h) = \left[1 - \exp \left(-\left(\frac{h}{a} \right)^2 \right) \right]$



Fig(11) - Schémas théoriques à palier d'ajustement des variogrammes

- Schéma sans palier :
- - Puissance (cas particulier : linéaire) :

$$\gamma(h) = ah^\lambda \text{ ou } 0 < \lambda < 2$$



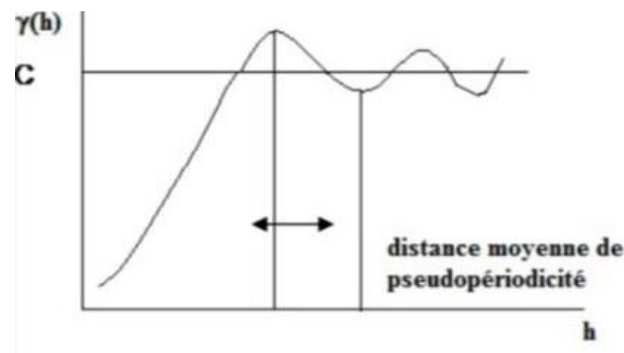
Fig(12) - Schémas théoriques sans palier d'ajustement des variogrammes.

- Schéma à effet de trou

On dit qu'un variogramme $\gamma(h)$ présente un effet de trou si sa croissance n'est pas monotone (Fig.13). Les graphes à effet de trou montrent une forme sinusoïdale au palier. L'effet de trou est dû à la présence d'alternance de zones riches et pauvres

Il peut être estimé par :

$$\gamma(h) = 1 - \frac{\sin(h)}{h}, \forall h > 0$$



Fig(13)- Schéma d'un Variogramme à effet de trou.

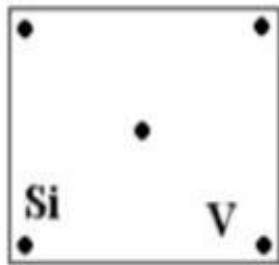
3.2.2 Concept de variance d'estimation

Si Z est la valeur inconnue que l'on cherche à estimer par la valeur mesurée ou calculée Z^* . L'erreur commise est $[Z - Z^*]$. Comme Z est une V.A. alors Z^* et $[Z - Z^*]$ sont aussi des réalisations particulières de variable aléatoire. L'erreur aléatoire $[Z - Z^*]$ est caractérisée par ses deux premiers moments :

- Moyenne, $b = E \{[Z - Z^*]\}$, quand cette moyenne est nulle ($b = 0$), on dit que l'estimation est sans biais sinon l'estimation est biaisée.

- La variance d'estimation est définie comme étant :

$$\sigma_{Eu}^2 = E(Z - Z^*)^2 - b^2$$



Si l'on dispose de N informations, l'estimateur est :

Dans le cas où l'information disponible est représentée par N sondages :

$$Z^* = Z_v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z(x_i)$$

On démontre que la variance d'estimation s'écrit alors, en annotation symbolique :

Il faut signaler que cette formule est générale quelle que soient les géométries des informations

$$\sigma_{Eu}^2 = E(Z_v - Z^*)^2 = 2 \sum_j \lambda_j \bar{\gamma}(S_i, V) - \bar{\gamma}(V, V) - \sum_j \sum_j \lambda_j \lambda_j \bar{\gamma}(S_i, S_j)$$

$\sum_i \lambda_i = 1.$

Si et quels que soient les pondérateurs λ_i .

Le non-biais doit cependant être assuré $E \{Z_v - Z^*\} = 0$, pour cela il suffit d'imposer la condition

3.2.3. Procédures de Krigeage ordinaire

Le problème de krigeage consiste à trouver le meilleur estimateur linéaire possible d'une caractéristique inconnue à partir de l'information disponible. L'information disponible consiste généralement en une information expérimentale, et une structurale.

La fonction aléatoire $Z(x)$ est stationnaire d'espérance $E[z(x)] = m$, constante mais inconnue.

a) **Contrainte de linéarité** : L'estimateur est de la forme :

$$z_v^* = \sum_{i=1}^N \lambda_i z_i$$

b) **Contrainte de non-biais** : Il suffit d'imposer la condition

c) **Contrainte d'autorisation** : Il faut s'assurer que l'espérance et la variance de l'erreur de

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i m = m \quad \rightarrow \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$$

prévision $\{E [Z_v - Z_v^*]^2\}$ existent. Cette contrainte n'intervient que dans le cas où la fonction aléatoire $Z(x)$ est supposée stationnaire intrinsèque

d) **Contrainte d'optimalité** : Consiste à trouver les poids λ_i et la constante μ qui minimisent la variance de l'erreur d'estimation.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N \lambda_i \bar{\gamma}(v_i, v_j) + \mu = \bar{\gamma}(v_j, V) \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i i = 1 \\ \sigma_k^2 = \sum_{i=1}^N \lambda_i \bar{\gamma}(v_i, V) + \mu - \bar{\gamma}(V, V) \end{array} \right.$$

- le système du krigeage ordinaire :

Propriétés et remarques à propos du krigeage :

1 - Le système de krigeage est un système à N+1 équations à N+1 inconnues qui sont les N Pondérateur λ_i et μ qui est le paramètre de Lagrange.

2 - Le krigeage est un estimateur linéaire sans biais. C'est un interpolateur exact.

3 - Le système et la variance de krigeage rendent compte des 4 faits suivants :

a - de la géométrie du domaine à estimer - terme de $\bar{\gamma}(V, V)$.

b - de la géométrie entre estimant et estimateur - terme de $\bar{\gamma}(V, v_i)$

c - de la géométrie interne de l'information - terme de $\bar{\gamma}(v_j, v_i)$

d - de la structure sous-jacente - terme $\gamma(h)$

Ce concept permet donc de calculer la variance d'estimation d'un volume V a partir de différents géométrie et dispositifs. Nous allons donc utiliser cette propriété pour calculer les variances d'estimation de différentes configurations et avoir une idée sur la maille deprosection.

4. Logiciels utilisés :

Le traitement des données nécessite l'utilisation systématique de technique faisant appel à l'ordinateur. Pour l'analyse des données nous avons utilisé des logiciels dont les principaux sont : Surfer 08, Statistica -2008 et Variowin pour le traitement géostatistique (variographie).

- **Logiciel "SURFER8"**

C'est un logiciel à multiples utilisation, il a été utilisé pour l'établissement des cartes d'iso valeurs, la visualisation des résultats de krigeage et de cartographie automatique. Ce logiciel a été acquis par le Laboratoire de Géologie – UBMA (LRG) en 2009.

- **Logiciel Statistica-2008**

Ce logiciel a été utilisé pour le traitement statistique movariés, bivarié et multivarié (statistiques descriptives, représentation graphique histogrammes et graphes de probabilités, calcul des matrices de corrélations, calcul des facteurs de charges, valeurs propres - ACP).

Tous les outils analytiques de la gamme *STATISTICA* sont des composantes intégrées du logiciel.

- **Logiciel Variowin**

C'est un logiciel de géostatistique permettant le calcul des variogrammes de surface, et les variogrammes directionnels avec une tolérance choisie. Ces derniers sont ajustés à l'aide de modèles théorique.

Chapitre III

Résultat et discussion

Chapitre III : Analyse des données

1. Méthode d'analyse des données, Géostatistique et Logiciels utilisés

1.1. Méthodes d'analyse de données

1.1.1 Analyse monovariante

Au total 40 échantillons de sondages, ont été prélevés. Ces échantillons de carotte ont été analysés sur Fe_2O_3 , FeT, CaO et SiO_2 .

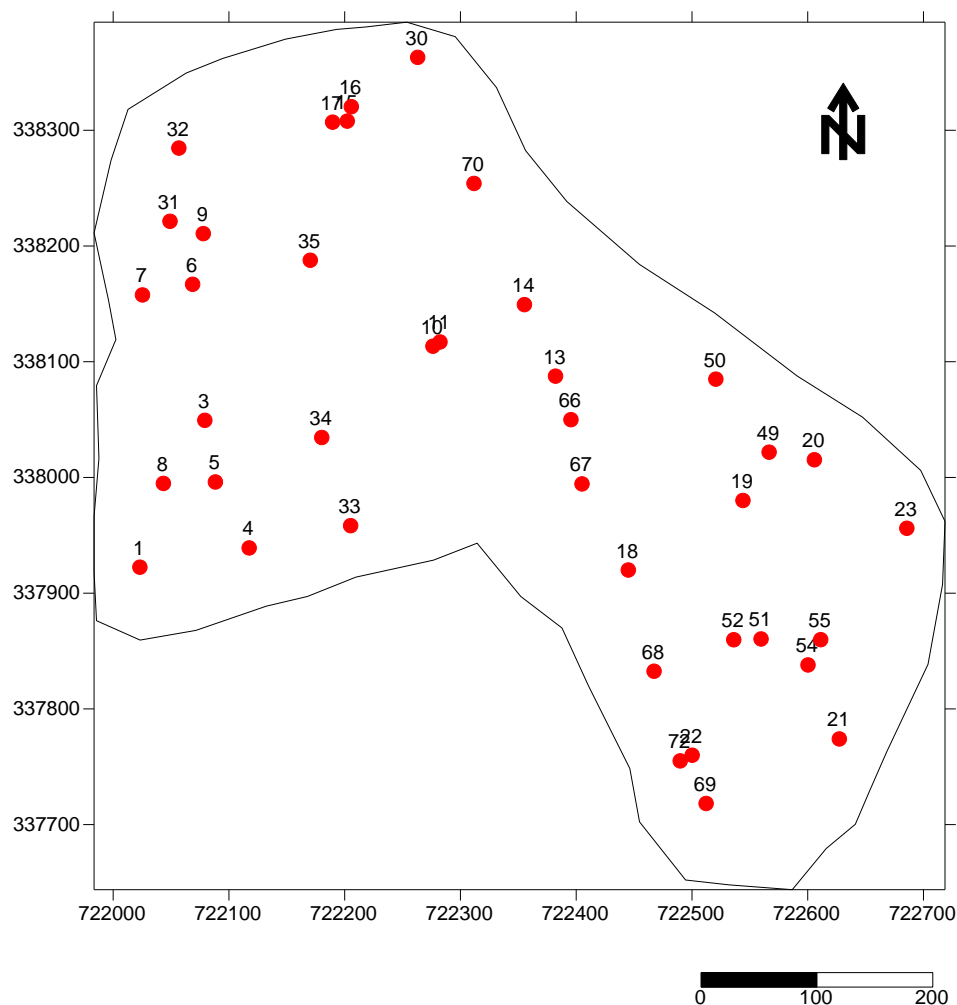


Fig.14. plan d'échantillonnage

Les résultats des analyses chimiques ont été saisi sur excel, puis traités statistiquement en analyses monovariée et bivariée et multivariée à l'aide du logiciels Statistica Les paramètres statistiques de ces éléments ont été calculés (**tableau 2**)

Le tableau ci-dessus présente les statistiques descriptives permettant de mieux comprendre la distribution et la variabilité des concentrations mesurées dans les échantillons.

Tableau 2 : Statistiques des paramètres chimiques mesurés dans les différents sondages

	Valide N	Moyenne	Mediane	Mode	Frequency	Minimum	Maximum	Variance	Ecart type	Coef.Var.
SiO ₂ (%)	40	19,17	21,11	Multiple	1,00	0,05	40,13	165,42	12,86	67,08
CaO(%)	40	9,78	1,10	Multiple	1,00	0,22	42,73	179,80	13,41	137,12
Fe ₂ O ₃ (%)	40	38,82	38,71	Multiple	1,00	18,49	74,23	197,73	14,06	36,22
FeT(%)	40	27,08	25,93	Multiple	1,00	12,94	54,09	100,81	10,04	37,08

- La silice (SiO₂) présente une teneur moyenne de 19,17 %, avec un maximum atteignant 40 %, traduisant une forte présence de gangue siliceuse, défavorable à la richesse en fer. L'écart-type élevé (12,86) et le coefficient de variation (CV = 67 %) révèlent une grande hétérogénéité, certaines zones étant particulièrement riches en silice, ce qui dilue le minerai. Cette teneur relativement élevée et très variable en silice peut nuire à la qualité du minerai, rendant nécessaire un tri ou un traitement supplémentaire pour en améliorer la valeur.

- La teneur moyenne en CaO est de 9,78 %, mais l'écart-type, supérieur à cette valeur (13,41 %), entraîne un coefficient de variation particulièrement élevé (137,12 %), traduisant une distribution très hétérogène. Cette forte variabilité pourrait être liée à la présence locale de carbonates ou à des zones d'altération. Ainsi, la répartition du CaO au sein du gisement est inégale, pouvant indiquer des processus d'altération secondaire ou des intercalations carbonatées.

- L'oxyde de fer (Fe₂O₃) affiche une teneur moyenne de 38,82 %, avec une médiane proche (38,71 %), indiquant une distribution centrée et représentative du gisement. La teneur maximale atteint 74,23 %, ce qui traduit une concentration en fer relativement élevée et constitue un indicateur favorable du potentiel économique du gisement.

Enfin, le fer total (FeT) présente une teneur moyenne de 27,08 %, avec une large dispersion. L'écart important entre la valeur minimale (12,94 %) et la valeur maximale (54,09 %) met en évidence une variabilité marquée des teneurs en fer total dans les échantillons, révélant la présence de zones localement très riches en fer.

1.1.2 Analyse bivariée

La matrice de corrélation linéaire simple a été calculée sur l'ensemble des données. Les résultats sont représentés dans **(le tableau 3)**

Tableau.3 - La matrice de corrélation des différents éléments analysés.

	SiO ₂ (%)	CaO(%)	Fe ₂ O ₃ (%)	FeT(%)
SiO ₂ (%)	1,00			
CaO(%)	-0,76	1,00		
Fe ₂ O ₃ (%)	-0,38	-0,26	1,00	
FeT(%)	-0,39	-0,26	1,00	1,00

Cette matrice met en évidence plusieurs corrélations significatives :

- Une corrélation négative modérée est observée entre la silice (SiO₂) et l'oxyde de fer (Fe₂O₃), avec un coefficient de -0,38, indiquant que l'augmentation de la silice s'accompagne généralement d'une diminution de la teneur en fer, en raison de l'effet de dilution exercé par la gangue siliceuse. Une tendance similaire est observée entre la silice et le fer total. Par ailleurs, la silice montre une forte corrélation négative avec le CaO ($r = -0,76$), suggérant que les zones riches en CaO sont pauvres en silice, ce qui reflète la présence de deux lithologies distinctes : l'une carbonatée et l'autre siliceuse.

- Le CaO présente une faible corrélation négative avec l'oxyde de fer (Fe₂O₃) et le fer total ($r = -0,26$), ce qui suggère que les phases carbonatées sont globalement pauvres en fer et représente la gangue carbonatée.

- **Le Fe₂O₃ et le fer total présentent une Corrélation presque parfaite** : logique, car **FeT est directement dérivé de Fe₂O₃** (le fer total correspond principalement au fer contenu sous forme d'oxydes).

1.1.3 Analyse multivariée

A partir de la matrice de corrélations linéaires simple (**Tableau 3**), les facteurs de charges ont été calculés (**Tableau 4**).

Tableau 4. - Résultats de l'ACP sur l'ensemble des teneurs des échantillons de sondages du gisement d'Anini.

	F1	F2
SiO ₂ (%)	0,56	0,82
CaO(%)	0,07	-0,99
Fe ₂ O ₃ (%)	-0,98	0,21
FeT(%)	-0,98	0,20
Expl.Var	2,24	1,73
Prp.Totl	0,56	0,43

L'analyse en composantes principales (ACP) appliquée aux données chimiques du gisement de fer d'Anini a permis d'extraire deux axes principaux (F1 et F2), caractérisés par des **valeurs propres** de respectivement **2,24** et **1,73**. Ces valeurs indiquent la **quantité de variance expliquée** par chaque axe.

Le premier axe (F1) explique **56 % de la variance totale**, tandis que le second (F2) en explique **43 %**, soit un cumul de **99 % de l'information totale contenue dans les quatre variables analysées** (SiO₂, CaO, Fe₂O₃, FeT).

- **L'Axe F1 montre** : une Forte corrélation négative avec Fe₂O₃ (-0,98) et FeT (-0,98) et une Corrélation positive avec SiO₂ (+0,56). F1 oppose les échantillons riches en fer à ceux riches en silice.

- **L'Axe F2 montre** : montre forte corrélation positive avec SiO₂ (0,82) et une corrélation très négative avec CaO (-0,99). F2 oppose les échantillons siliceux à ceux carbonatés (CaO).

Les résultats de l'ACP montrent trois associations chimiques (fig.) :

- ✓ **Association 1** : formé par Fe₂O₃ et FeT représente le minerai de fer.
- ✓ **Association 2** : formé par SiO₂ représente la gangue siliceuse.
- ✓ **Association 3** : formé par CaO représente la gangue carbonatée.

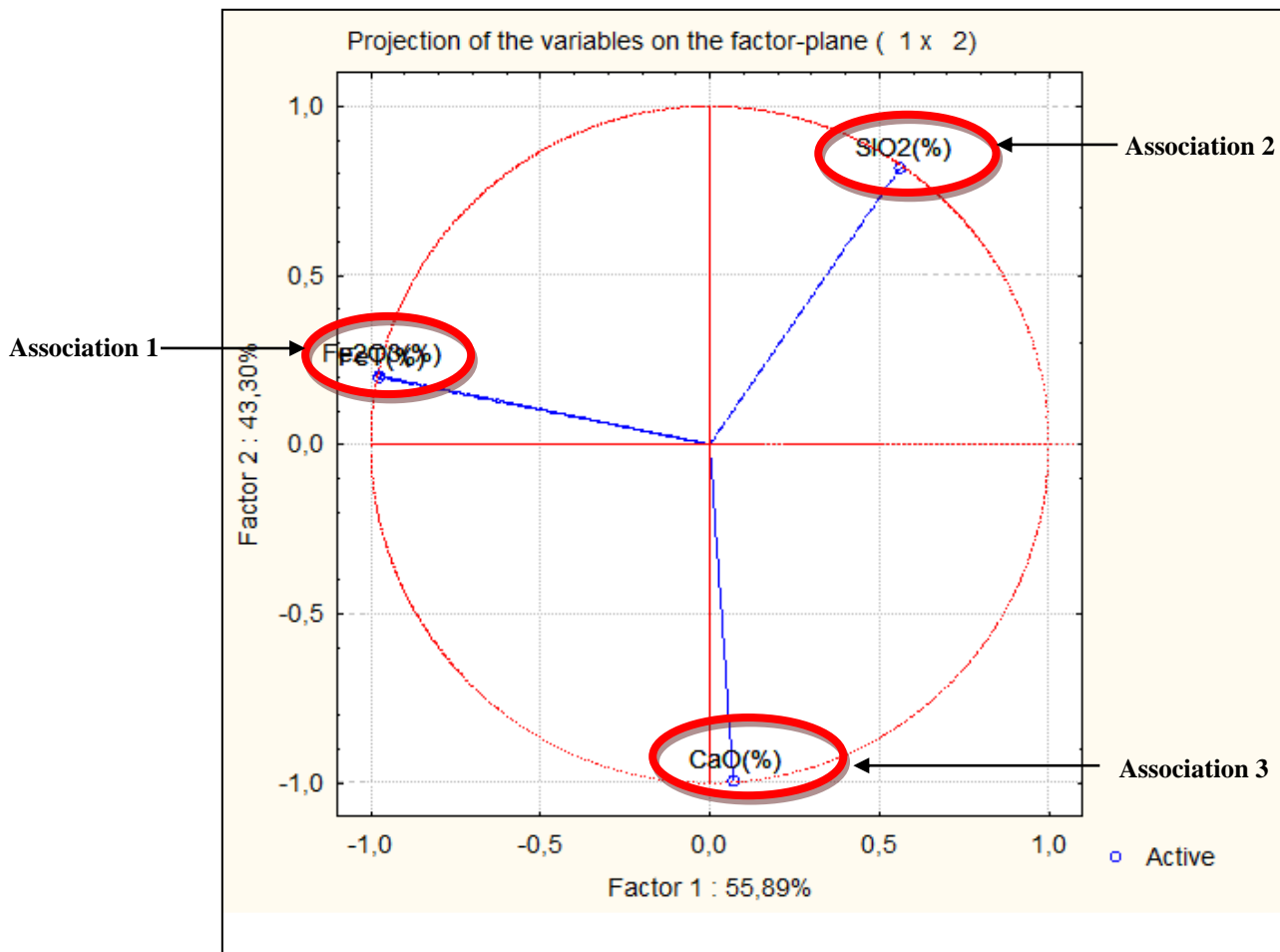


Fig.15 - Cercles de corrélation de l'ACP sur l' ensemble des éléments analysés

Les résultats de l'analyse en composantes principales (ACP) ont été exploités pour réaliser une cartographie multivariée. Les coordonnées factorielles des variables permettent de regrouper les échantillons selon leurs signatures géochimiques. Ainsi, en projetant les points d'échantillonnage sur une carte, il est possible de les classer ou de les représenter par des couleurs : les échantillons présentant des valeurs négatives sur l'axe F1 sont enrichis en fer, tandis que ceux ayant des valeurs positives sur F1 sont caractérisés par une forte teneur en éléments de la gangue, tels que la silice ou le calcaire (**fig.15**).

Tableau 5 : les facteurs scores

Ns	x	y	F1	F2
1	722023,08	337922,438	-0,89724	-1,10103
3	722079,18	338049,358	0,80762	-2,40217
4	722117,493	337939,069	0,57596	-2,14028
5	722088,31	337996,083	0,63698	-1,29907
6	722068,63	338166,914	-0,51739	-1,26505
7	722025,32	338157,706	-1,41654	-0,59933
8	722043,392	337994,818	0,09648	0,63554
9	722077,85	338210,702	-0,35894	0,59968
10	722276,23	338113,406	0,92359	0,86486
11	722282,33	338117,064	-0,63960	-1,33839
13	722382,13	338087,537	0,40210	-1,79327
14	722355,27	338149,328	-2,00261	0,61803
15	722202,21	338307,931	-0,84760	0,31592
16	722205,71	338320,383	0,81667	-1,52890
17	722189,57	338307,01	1,38998	0,82733
18	722427,52	337327,329	-0,43574	0,68146
19	722544,05	337980,09	0,46521	-1,07699
20	722605,73	338015,26	-0,53764	-0,63720
21	722627,28	337774,024	0,94304	0,40128
22	722500,15	337759,96	0,26313	0,52039
23	722685,59	337956,083	0,00507	-1,83760
30	722263,06	338363,008	-1,14191	0,64096
31	722049,107	338221,347	1,52593	0,79975
32	722056,747	338284,63	1,63887	0,82465
33	722205,134	337958,317	-0,14850	0,84639
34	722180,195	338034,506	-0,92984	0,77701
35	722170,276	338187,695	0,15959	0,69670
49	722566,636	338021,844	-0,82447	0,69289
50	722520,614	338084,952	0,50511	0,74955
51	722559,677	337860,407	-1,24714	0,31589
52	722536,088	337859,721	1,11017	0,63189
53	722536,088	337859,721	0,78878	0,59580
54	722600,226	337837,957	-0,97821	-0,13337
55	722611,213	337859,806	-0,06257	0,49764
66	722395,457	338049,914	-1,04937	0,61999
67	722405,009	337994,408	1,40565	0,75619
68	722467,262	337832,546	0,50384	0,56709
69	722512,211	337718,245	1,01641	0,56971
70	722311,7	338254,05	-2,58424	0,46188
72	722489,829	337755,06	0,63937	0,64418

La carte de facteurs score présentée résulte de l'analyse en composantes principales (ACP) appliquée aux données géochimiques du gisement de Anini (**fig.16**). Elle représente la distribution spatiale des scores associés au facteur 1, identifié comme la composante expliquant la plus grande part de la variance dans le jeu de données. Ce facteur est dominé par une forte corrélation positive avec le Fe_2O_3 , ce qui suggère qu'il reflète principalement la minéralisation en fer dans la région étudiée.

Cette carte constitue un outil d'aide à la décision en permettant de localiser les zones géochimiquement homogènes dominées par des signatures minérales spécifiques. Combinée à la carte de krigeage des teneurs et à la carte de la variance d'estimation, elle permet d'identifier non seulement les zones riches en fer, mais aussi celles dont l'estimation est fiable et représentative. Ainsi, les zones à score élevé et faible variance représentent des cibles prioritaires pour de futurs travaux d'exploration ou de développement.

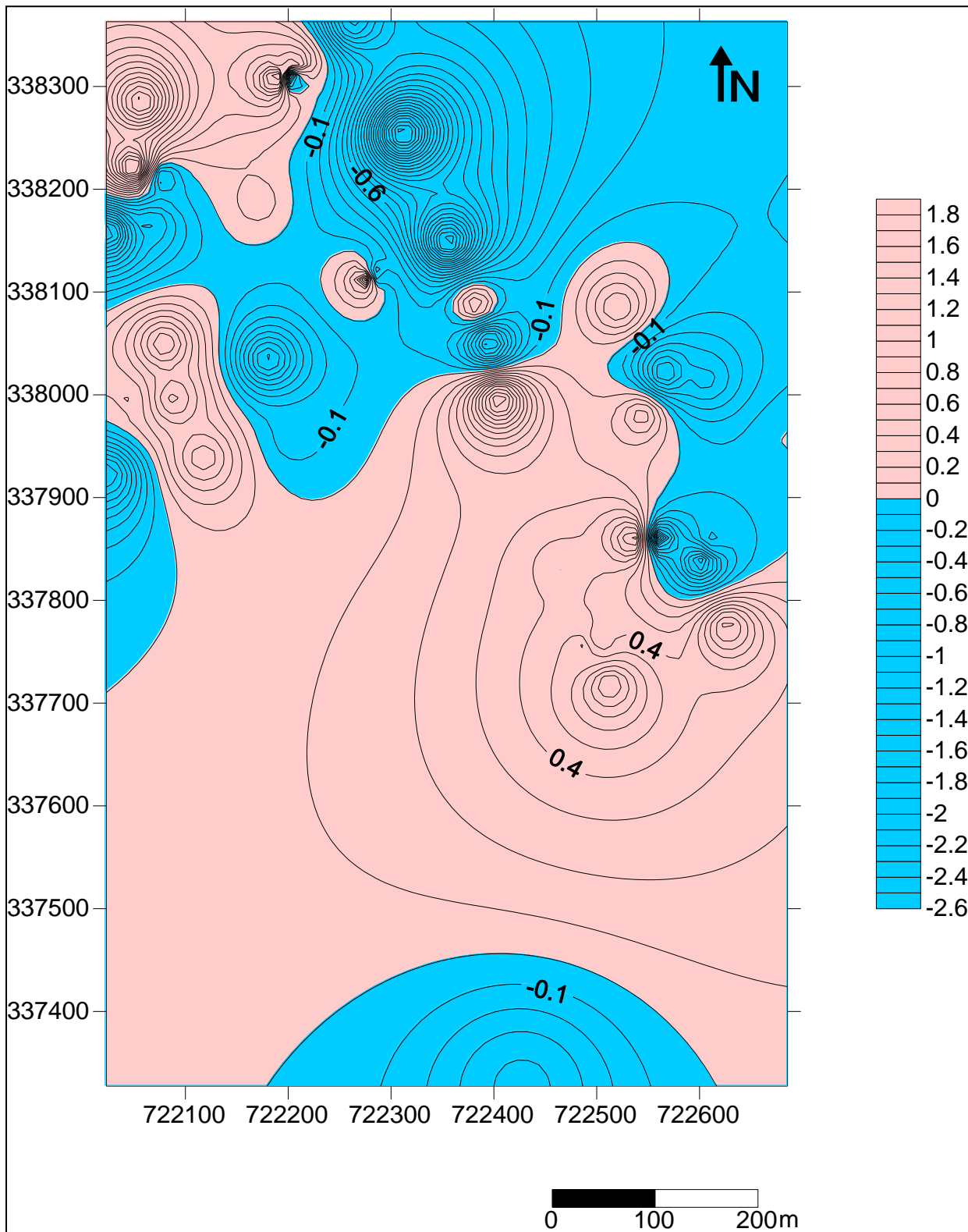


Fig.16. – Carte du facteur score F1

1.2 Etude géostatistique

1.2.1 Variogramme de surface

Le variogramme de surface (ou variogramme spatial bidimensionnel) est utilisée pour analyser la structure spatiale des données dans un plan (2D). C'est un outil fondamental en géostatistique, notamment pour l'interprétation de la continuité spatiale des variables (teneurs, concentrations, etc.) sur une surface. Un variogramme de surface montre comment la variance entre des valeurs d'un paramètre (comme la teneur en fer, la silice, etc.) augmente avec la distance et selon la direction (anisotropie). Il aide à comprendre dans quelle mesure une variable est spatialement corrélée dans toutes les directions du plan.

1.2.2 Variographie de Fe₂O₃

Le variogramme de surface de la teneur en Fe₂O₃ a été calculé le résultat met en évidence une anisotropie marquée, avec une plus grande continuité spatiale dans la direction nord-ouest/sud-est (grand axe a une direction de 135°). Cette information sera utilisée pour orienter les interpolations géostatistiques par krigeage, en tenant compte des directions privilégiées de distribution du fer dans le gisement.

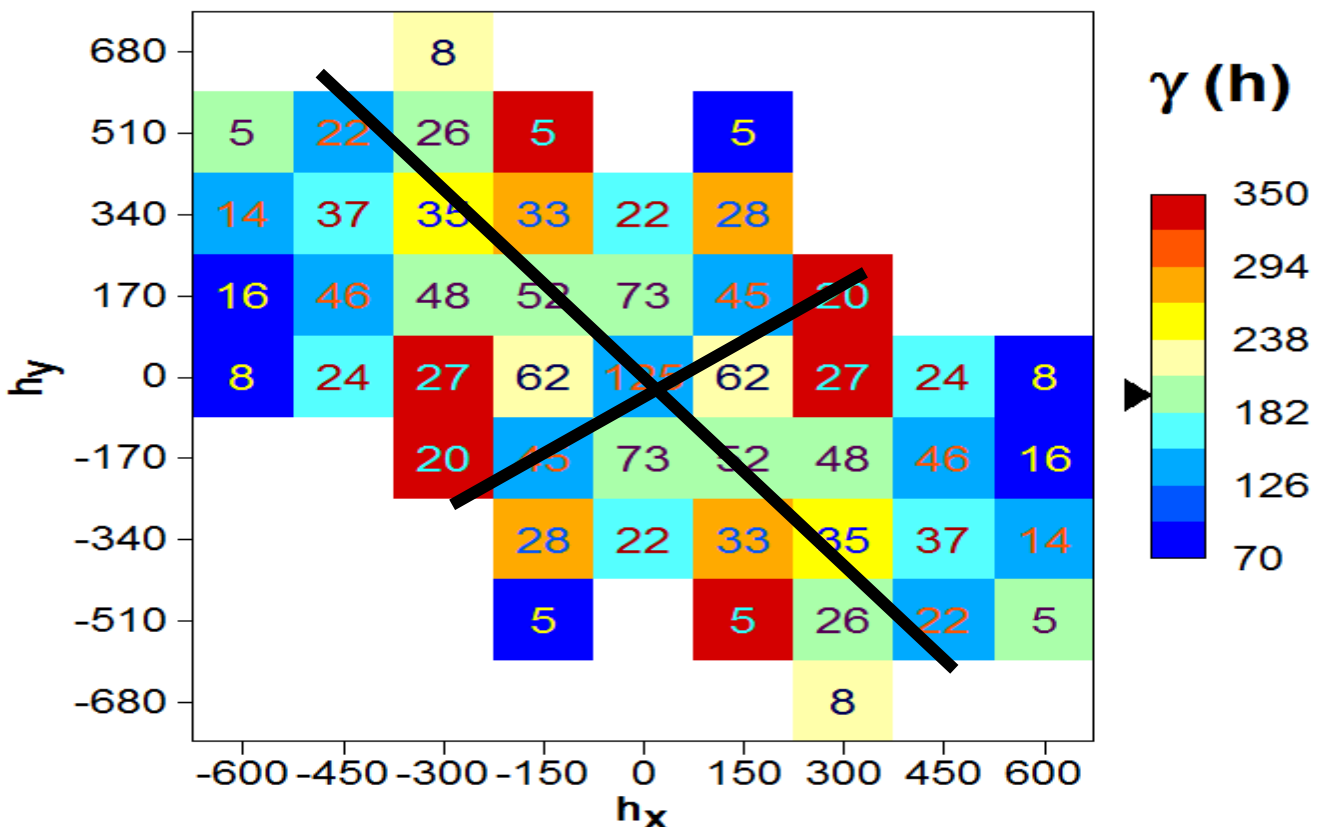
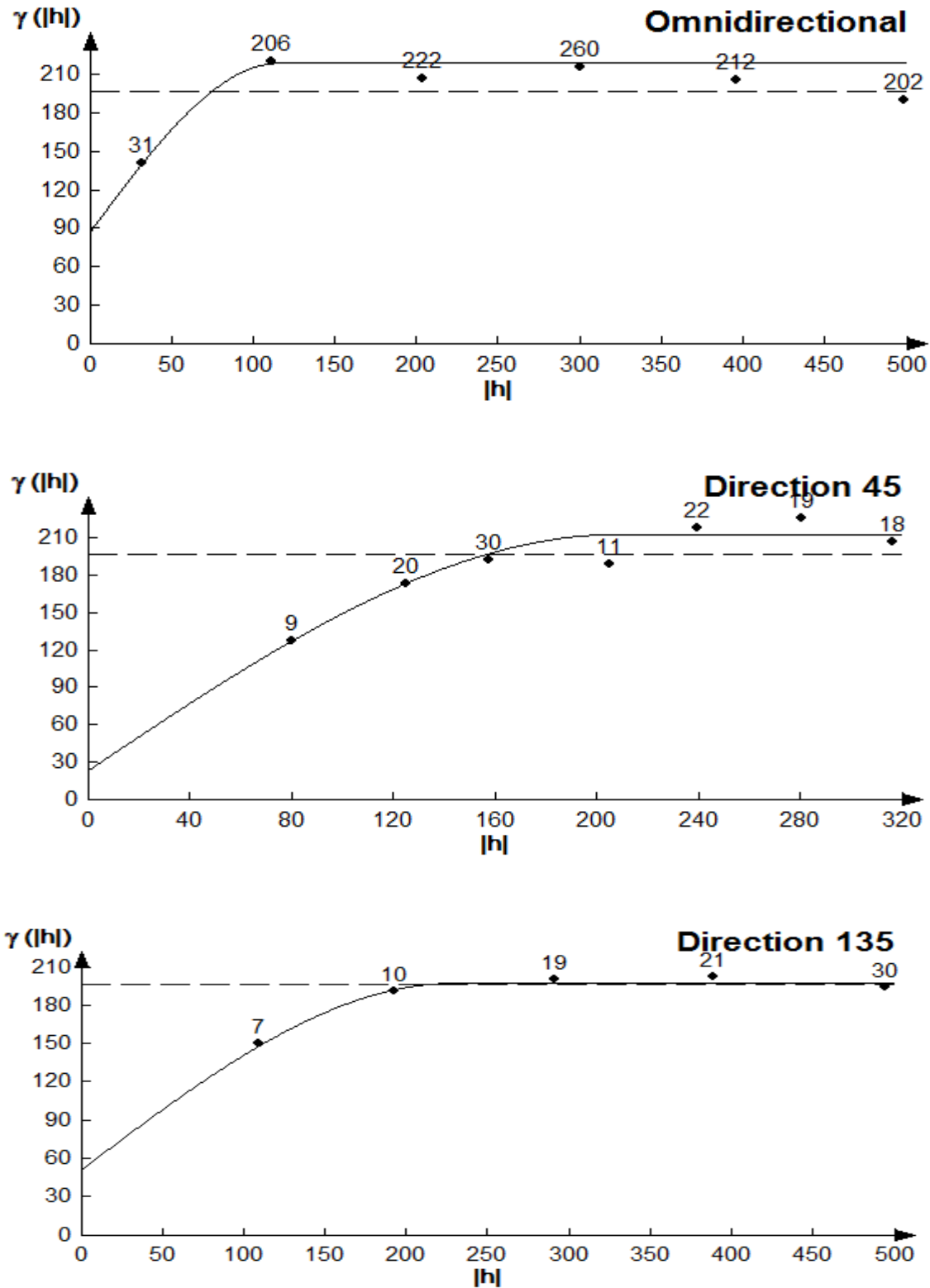


Fig.17. - Variogramme de surface de Fe₂O₃

1.2.3 Variogramme directionnel de Fe2O3

Les variogrammes directionnels de Fe2O3 dans les directions suivantes : 0°, 90°, 135°, 45°, ont été calculées et ajustées (Fig.).



Fig(18) - les variogrammes directionnels de Fe2O3

Le coefficient d'anisotropie sera égale à : $R = \text{portée de petit axe} / \text{portée de grand axe}$.

$$R = 208 / 227 = 0,92$$

Les résultats de variographie sont récapitulés dans (**le tableau 6**)

Tableaux.6. - Résultats de la variographie de Fe₂O₃

	Direction	Model	C₀	porté	palier
Fe₂O₃	0°-90°	Sphérique	88	115	132
Fe₂O₃	135°	Sphérique	52	227	146
Fe₂O₃	45°	Sphérique	24	208	190

Le krigeage de Fe₂O₃

Les résultats de la variographie ont été utilisé pour le krigeage ordinaire de Fe₂O₃.

Carte d'isovaleurs des teneurs en Fe₂O₃ krigés

La carte des isovaleurs du fer interpolé par krigeage (**figure19**) met en évidence la distribution spatiale des teneurs en Fe₂O₃ dans le gisement d'Anini. Les teneurs interpolées varient de faibles valeurs (~34 % Fe₂O₃) à des teneurs très élevées dépassant les 54 %, reflétant une hétérogénéité significative du gisement.

Une zone à haute teneur est clairement identifiée au nord-est du gisement, autour des sondages 70, 11 et 15, avec des courbes d'isovaleurs très resserrées, indiquant une anomalie ferrifère bien localisée et potentiellement exploitable. Les zones centrales présentent des teneurs intermédiaires, traduisant une minéralisation plus étalée, tandis que les zones périphériques sud et ouest montrent des teneurs faibles à très faibles, suggérant une moindre concentration en fer.

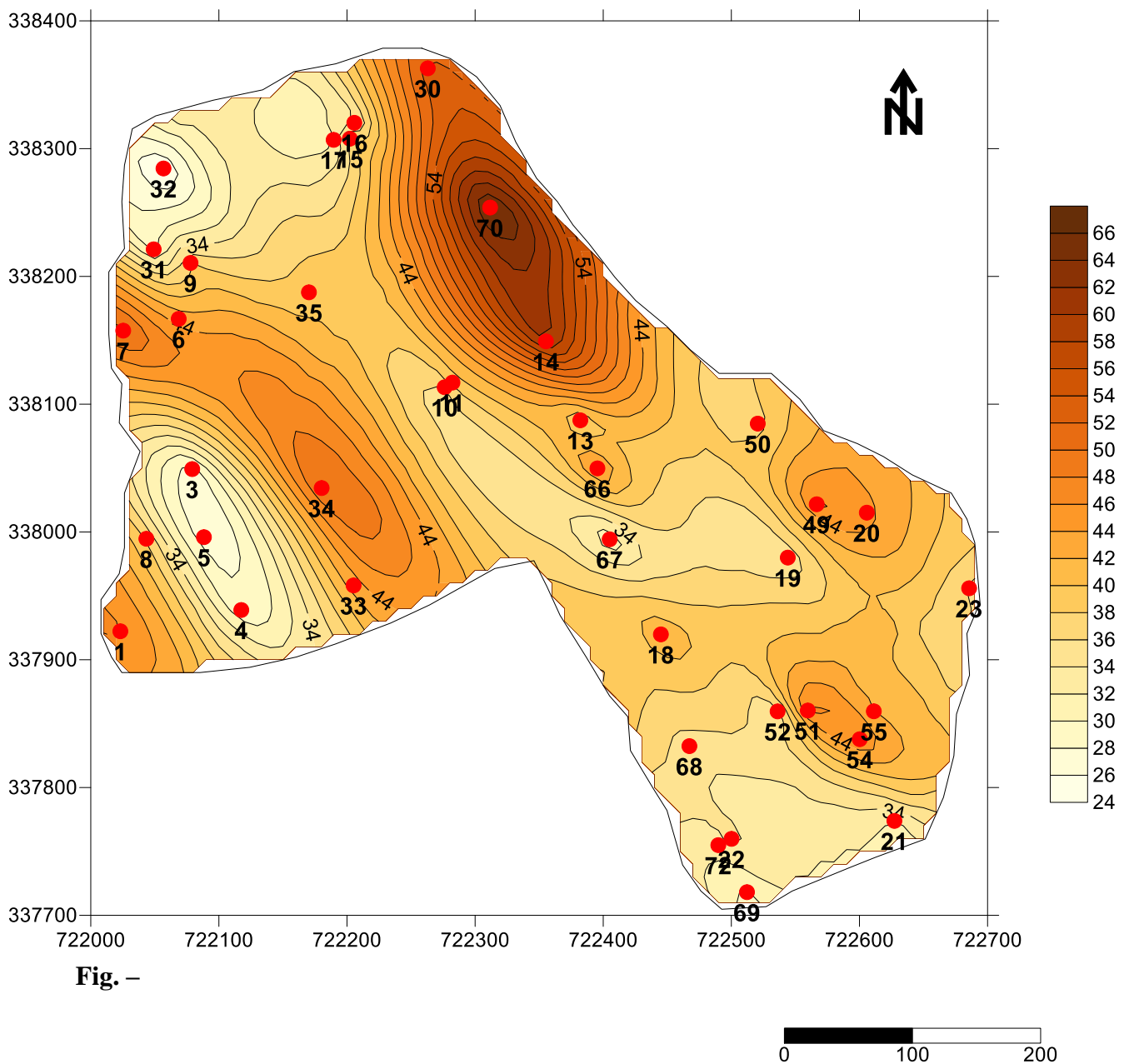


Fig. –

Fig (19) :Carte des isovaleurs de Fe₂O₃ krigeagé

Carte des isovaleurs de l’erreur du krigeage

La figure ci-dessus illustre la carte des isovaleurs de l’erreur du krigeage (fig 20) appliquée aux teneurs en Fe₂O₃ dans le gisement de fer d’Anini. Cette carte représente la distribution spatiale de l’incertitude associée à l’interpolation géostatistique réalisée par krigeage ordinaire.

Les isovaleurs, matérialisées par des courbes d’égal-erreur, permettent d’identifier les zones où la prédiction est la plus fiable, c’est-à-dire là où la variance de krigeage est la plus faible. Ces zones, de teinte foncée, se concentrent autour des points d’échantillonnage, où

l'information expérimentale est disponible. À l'inverse, les zones en bleu clair montrent des erreurs plus élevées, dues à un manque de données voisines ou à une forte variabilité spatiale locale.

Cette carte est essentielle pour l'interprétation conjointe avec celle des teneurs interpolées. Elle permet de distinguer les zones de haute teneur fiables, des zones qui, bien que riches en Fe_2O_3 , présentent une incertitude trop élevée pour justifier une exploitation immédiate sans campagnes complémentaires de forage.

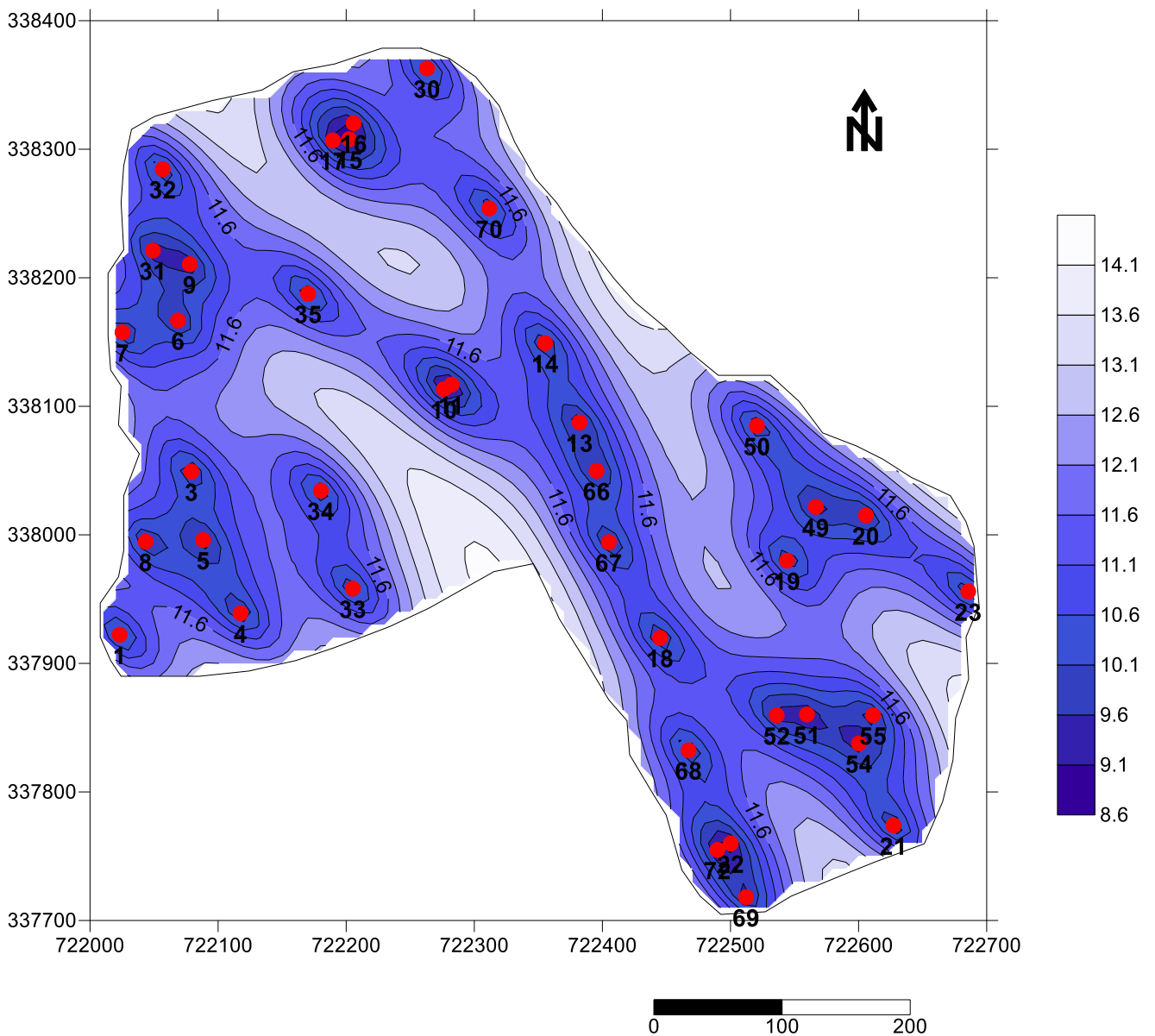


Fig20. - Carte d'erreur de Fe_2O_3

L'interprétation croisée entre la carte des isovaleurs du fer (Fe_2O_3) et celle de l'erreur du krigeage permet de distinguer les zones du gisement d'Anini présentant à la fois une forte teneur en fer et une bonne fiabilité géostatistique.

Le secteur nord-est, localisé autour des sondages 70, 11 et 15 montre des teneurs très élevées (>54 % Fe_2O_3) couplées à une erreur de krigeage faible. Cette configuration traduit une forte concentration ferrifère bien contrainte par les données expérimentales, en faisant une zone prioritaire pour l'exploitation minière.

Le centre du gisement présente des teneurs intermédiaires (44 % Fe_2O_3) avec une erreur de krigeage modérée à faible, indiquant une minéralisation diffuse mais exploitable sous conditions économiques favorables. À l'opposé, les zones sud et ouest révèlent des teneurs faibles associées à une incertitude plus marquée, ce qui réduit leur intérêt économique immédiat.

Ces résultats permettent d'établir une hiérarchisation des secteurs à exploiter, et justifient la nécessité d'un renforcement de l'exploration par forage dans certaines zones à fort potentiel, notamment en périphérie des hauts niveaux de teneurs.

Carte de répartition des blocs krigés Fe_2O_3

La carte de krigeage des teneurs en Fe_2O_3 obtenue à partir des données d'échantillonnage du gisement d'Anini (**fig 21**) permet de visualiser la distribution spatiale de l'oxyde de fer au sein de la zone étudiée. Les teneurs interpolées ont été classées en trois classes. Les blocs à haute teneur (41 à 70 %, en bleu) se concentrent dans le nord du gisement, représentant les zones à fort potentiel économique. Les zones à forte teneur en Fe_2O_3 , bien qu'économiquement attractives, sont susceptibles de générer des impacts environnementaux notables si une exploitation intensive y est envisagée. Ces impacts incluent :

- La déstabilisation des sols et la destruction de la couverture végétale locale,
- Le drainage minier acide potentiel, notamment en présence de minéraux sulfurés détectés dans la gangue (comme les sulfures cités dans le document),
- La dispersion de poussières métalliques, qui peuvent affecter la qualité de l'air et la santé des populations avoisinantes.

Les blocs à teneur moyenne (37 à 41 %, en rouge) sont localisés au centre, formant une zone tampon à potentiel exploitable sous conditions. Enfin, les blocs à faible teneur (24 à 37%, en vert) sont dispersés en périphérie et au sud, zones jugées stériles ou marginales. Ces zones correspondent à des lithologies pauvres en fer et plus riches en gangue. Leur exploitation pourrait entraîner une importante production de stériles, représentant un risque pour la qualité des sols et des nappes en cas de stockage non contrôlé. Ces zones hétérogènes requièrent une attention particulière en matière de tri du minerai et de gestion des déchets miniers.

Cette répartition spatiale constitue une base solide pour la planification de l'exploitation et l'optimisation de la rentabilité du projet.

Cette distribution spatiale permet non seulement d'orienter les priorités d'exploitation vers les zones les plus riches, mais également de mieux planifier les travaux de reconnaissance géologique. En croisant cette carte avec la carte de la variance du krigeage, il est possible d'identifier les zones à haute teneur mais à forte incertitude, qui doivent faire l'objet d'une validation par échantillonnage supplémentaire avant toute prise de décision.

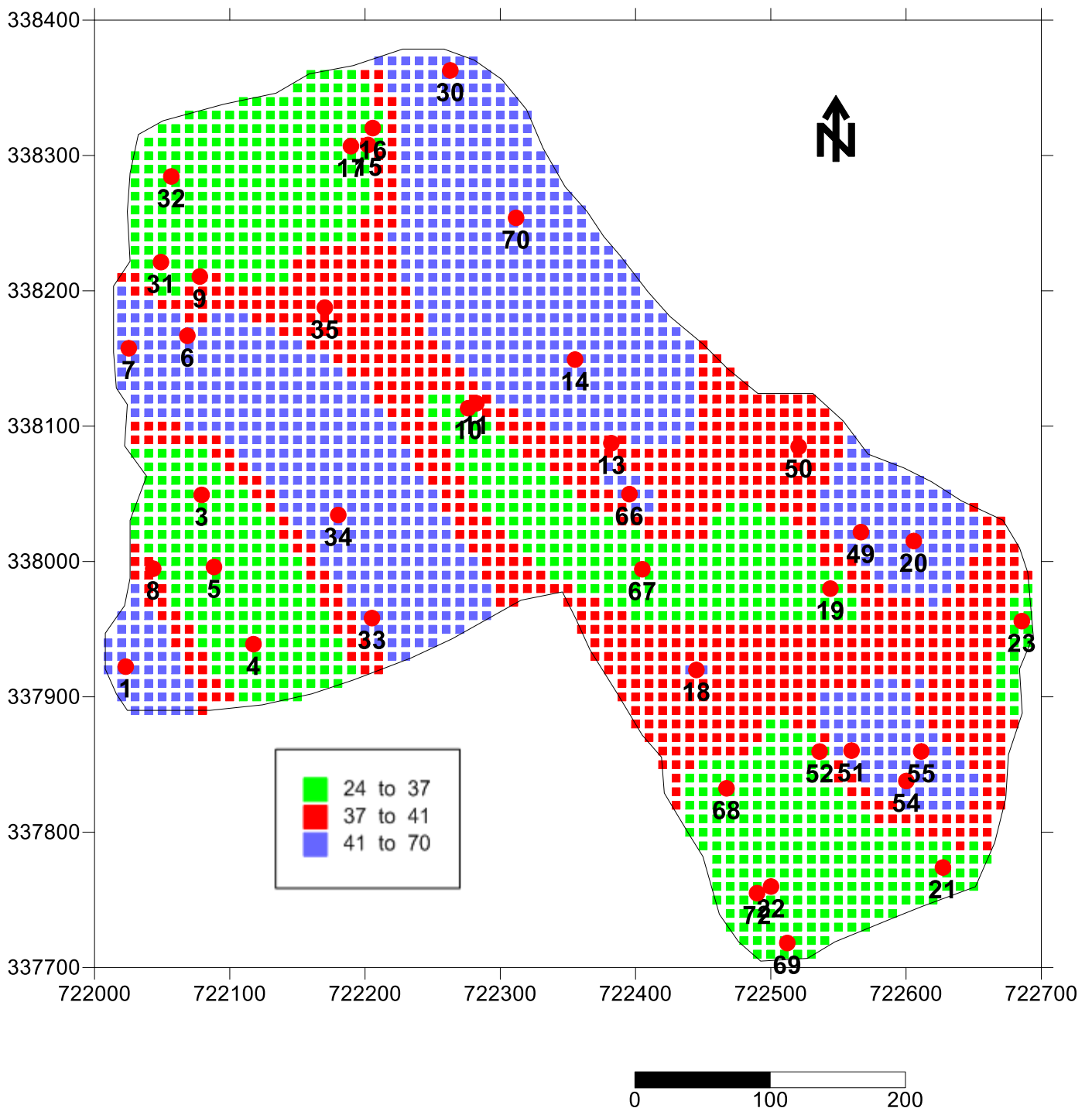


Fig 21. - Répartition des blocs krigeage de Fe_2O_3 dans le gisement de Anini

- Carte de Répartition d'erreur de Fe_2O_3

La carte présentée illustre la variance du krigeage associée à l'estimation des teneurs en Fe_2O_3 dans le gisement de Anini. Cette variance représente l'incertitude spatiale liée à l'interpolation des données analytiques ponctuelles par la méthode du krigeage ordinaire. Les

valeurs sont classées en trois intervalles : de 8 à 11 (en vert), indiquant une faible incertitude et donc une estimation fiable ; de 11 à 12 (en rouge), correspondant à une incertitude modérée ; et de 12 à 20 (en bleu), signalant une forte incertitude sur les valeurs interpolées.

L'analyse spatiale révèle que les zones à faible variance se concentrent autour des points de prélèvement, ce qui est cohérent avec le principe du krigeage, selon lequel la précision de l'estimation augmente à proximité des données observées. En revanche, les zones périphériques et certaines zones centrales relativement éloignées des échantillons présentent une variance plus élevée, traduisant une faible densité d'informations et une plus grande incertitude sur la teneur réelle en Fe_2O_3 .

Cette carte constitue un outil essentiel pour la planification des travaux de terrain. Les zones bleues, à forte variance, devront faire l'objet de campagnes d'échantillonnage complémentaires afin d'améliorer la couverture spatiale et de renforcer la fiabilité du modèle géostatistique. À l'inverse, les zones à faible variance peuvent être considérées comme bien caractérisées et potentiellement prioritaires pour des études plus détaillées ou des opérations minières.

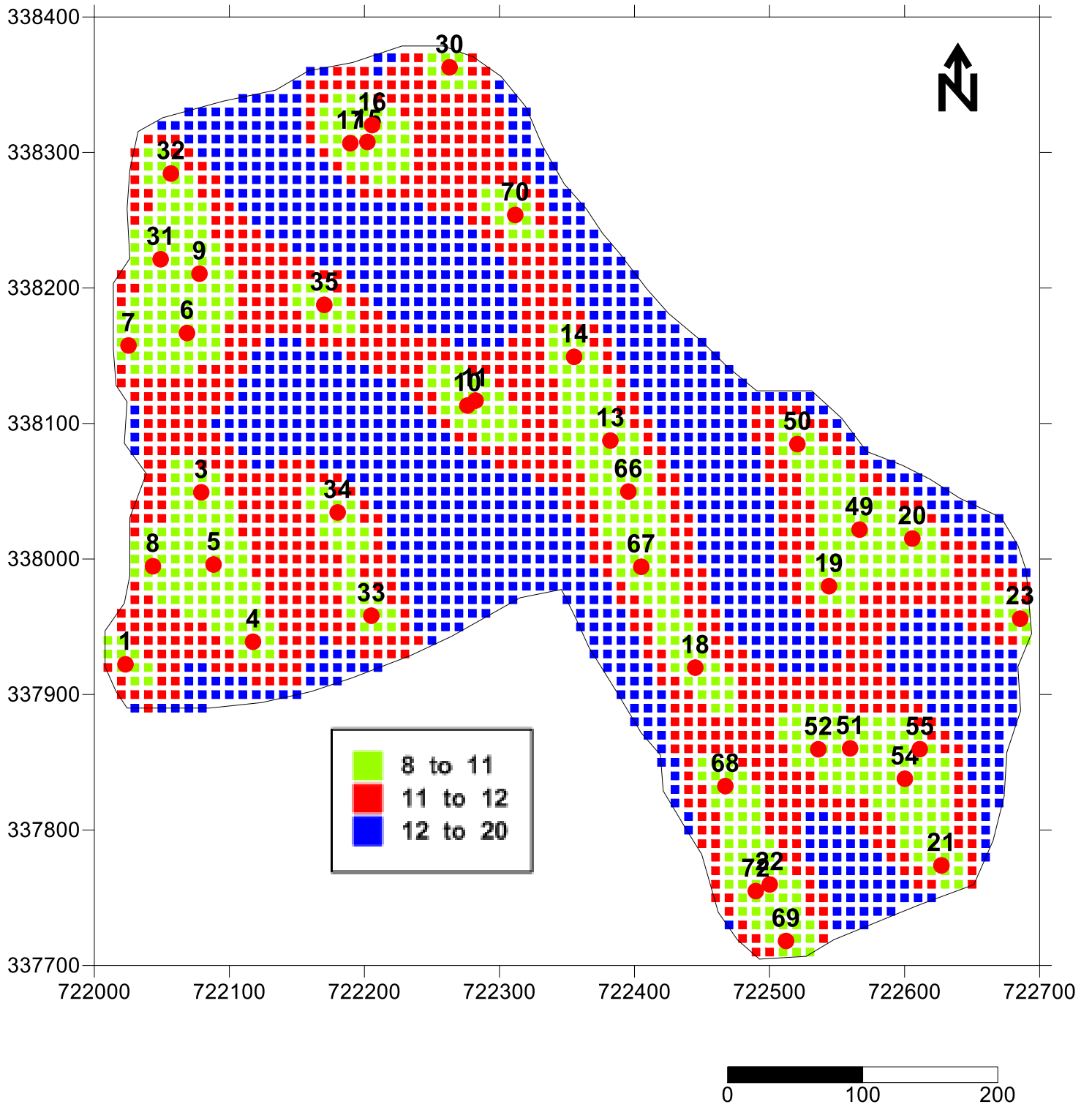


Fig 22.- Répartition d'erreur de Fe₂O₃

Conclusion générale

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de la cartographie géochimique et structurale du gisement de fer de Djebel Anini, situé au nord-ouest de la ville de Sétif, dans la région nord-orientale de la chaîne alpine d'Algérie. Ce gisement ferrifère, à dominante goethitique et hématitique, se développe dans un massif carbonaté d'âge Cénomano-Turonien.

L'étude repose sur l'exploitation de données géochimiques issues de 40 sondages, ciblant les teneurs en Fe_2O_3 , FeT, SiO_2 et CaO. L'approche méthodologique adoptée combine des outils statistiques classiques (analyses mono- et bivariée, analyse en composantes principales) à des techniques géostatistiques avancées (variographie, krigeage ordinaire), en vue de modéliser la distribution spatiale du fer et d'identifier les zones à fort potentiel minéralisé.

L'analyse bivariée a mis en évidence plusieurs corrélations significatives : une corrélation négative modérée entre SiO_2 et Fe_2O_3 , une corrélation fortement négative entre SiO_2 et CaO, une corrélation négative faible entre CaO et Fe_2O_3 , et une corrélation fortement positive entre Fe_2O_3 et FeT, traduisant la cohérence entre ces deux formes de fer.

L'analyse en composantes principales (ACP) a permis d'identifier trois associations géochimiques distinctes :

Association 1 : Fe_2O_3 et FeT → correspondant au minerai de fer,

Association 2 : SiO_2 → représentant la gangue siliceuse,

Association 3 : CaO → représentant la gangue carbonatée.

La variographie directionnelle a révélé une anisotropie spatiale marquée suivant un axe N135°. Le modèle sphérique a permis un ajustement optimal des variogrammes, qui ont ensuite été utilisés pour réaliser un krigeage des teneurs en fer et une carte de l'erreur d'estimation.

Les résultats géostatistiques permettent d'envisager une exploitation plus durable du gisement d'Anini. Ils offrent des outils d'aide à la décision pour :

- orienter les activités minières vers les zones riches et homogènes,
- minimiser les déchets,
- préserver les zones sensibles, et
- anticiper les risques de pollution.

La combinaison des cartes de krigeage, des scores de facteurs (ACP) et des erreurs permet de construire une stratégie d'exploitation à faible impact environnemental.

La géostatistique appliquée au gisement de fer d'Anini fournit une double lecture : géologique et environnementale. En modélisant les distributions spatiales, elle permet non seulement d'estimer les ressources disponibles mais aussi d'évaluer les implications écologiques d'une exploitation minière. Ce travail ouvre la voie à une planification responsable et durable de l'activité minière, respectueuse des écosystèmes locaux.

Références Bibliographiques

A

- Araujo CF et al. (2020) Environmental impacts of iron ore mining. *Environmental Earth Sciences* **79** (3) : 1–13.
- Armstrong M, Carignan J (1997) *Géostatistique linéaire, application minière*. Les Presses de l'École des Mines de Paris, 115 p.
- Auty RM (1993) *Sustaining Development in Mineral Economies: The Resource Curse Thesis*. Routledge, London, UK.

B

- Baccini A (2010) *Cours de statistique descriptive élémentaire*. Institut de Mathématique, Université Paul Sabatier Toulouse, 40 p.
- Bebbington A et al. (2008) Contention and ambiguity: Mining and the possibilities of development. *Development and Change* **39** (6) : 887–914.
- Bouaziz L (1992) *Étude et valorisation des réserves du minerai de fer pauvre de l'Ouenza*. Mémoire de magistère, Université Badji Mokhtar Annaba (UBMA), Algérie, 96 p.

C

- Chaabia R (2016) *Caractérisation physico-chimique et enrichissement des minerais de fer : cas du gisement d'Anini, Sétif - Algérie*. Thèse de doctorat en Mines, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie.
- Chaabia R, Bounouala M, Benselhoub A, Kharytonov M (2015) Anini iron ore deposit: mineralogy, wet magnetic separation enrichment and metallurgical use. *Metallurgical and Mining Industry* **7** : 364–370. <http://www.metalljournal.com>
- Chaabia R, Bounouala M, Boukelloul ML (2015) A preliminary study on Anini deposit iron ore enrichment (Algeria) in order to use it in metallurgical industry. *Науковий вісник НГУ* **4** : 44–50. <http://nvngu.in>
- Chamusy H, Charre, Dumolard JP, Durand MG, Le Berre M (1994) *Initiation aux pratiques statistiques en géographie*. Éditions Masson, 245 p.
- Chauvet P (1999) *Aide mémoire de géostatistique linéaire, application du domaine minier*. Les Presses de l'École des Mines de Paris, 140 p.

E

- Edwards R, Atkinson K (1986) *Ore Deposit Geology and its Influence on Mineral Exploration*. Chapman and Hall, London, UK, p. 779.
- Elmqvist SA, Behrendt RH (1994) Autogenous Mill Capacity Improvement at Hibbing Taconite Company. In: *67th AIME Proceeding*, Minnesota Section, Duluth.

G

- Ghamoud K (2009) *Audit environnemental de la carrière de Djebel Anini "FERPHOS"*. Bureau d'Études Géologiques et Minières, Rapport inédit, 51 p.
- Ghose MK, Majee SR (2007) Characteristics of hazard in underground metalliferous mines. *Journal of Mines, Metals and Fuels* **55** (5) : 125–130.

-Glaçon J (1967) Recherche sur la géologie et les gîtes métallifères du Tell sétifien (Algérie). *Bulletin de la Société Géologique de France*, Nlle série, **32** (2 tomes) : 750.

-Gross GA (1970) Nature and occurrence of iron ore deposits. In: United Nations, Department of Economic and Social Affairs (eds), *Survey of world iron ore resources, occurrence and appraisal*. United Nations, New York, USA, pp 13–31.

-Gross GA (1993) Industrial and genetic models for iron ore in iron-formations. In: Kirkham RV, Sinclair WD, Thorpe RI, Duke JM (eds), *Mineral Deposit Modeling*. Special Paper 40, Geological Association of Canada, pp 151–170.

H

-Halimi F (2008) *Étude géologique et géostatistique du gisement de Fer de Châabet El Ballout – Souk Ahras (N-E algérien)*. Thèse de magistère, Université Badji Mokhtar Annaba (UBMA), Algérie, 110 p.

-Halimi F (2019) *Caractérisation géologique et géostatistique des petits gisements et indices ferri-fères du Nord-Est Algérien*. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie.

-Harry K, Harold LJ, Donald GE (1973) Iron. In: Brobst DA, Pratt WP (eds), *United States Mineral Resources*. US Geological Survey, Professional Paper 820, pp 298–299.

-Hilson G (2002) An overview of land use conflicts in mining communities. *Land Use Policy* **19** (1) : 65–73.

-Hitzman MW, Oreskes N, Einaudi M (1992) Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research* **58** : 241–287.

-Howard LH (ed) (1987) *Mining Engineering Handbook*, 2nd edn, vol. 1. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, USA, p. 212.

-Hurst L (2013) West and Central African iron ore development and its impact on world prices. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* **57** : 521–538.

I

-ICMM (2012) *The Role of Mining in National Economies*. International Council on Mining and Metals.

J

-Journel AG, Huijbregts CJ (1978) *Mining Geostatistics*. Academic Press, London, UK, 600 p.

K

-Kennedy BA (1990) *Surface Mining*, 2nd edn. Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., Port City Press, Baltimore, Maryland, USA.

-Kiffner C et al. (2015) Mining and its impact on agriculture and food security. *Journal of Environmental Management* **151** : 278–283.

-Kimberley MM (1989) Nomenclature for iron formations. *Ore Geology Reviews* **5** : 1–12.

-Klemic H, James HL, Eberlein DG (1973) Iron. In: Brobst DA, Pratt WP (eds), *United States Mineral Resources*. US Geological Survey Professional Paper 820, pp 291–306.

L

-Lottermoser B (2010) *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Springer, Berlin, Germany.

M

- Matheron G (1971) *The Theory of Regionalized Variables and Its Applications. The Specifications CMM5*. ENSMP, Paris, 212 p.
- Mezghache H (1989) *Cartographie automatique et interprétation géostatistique d'une campagne de prospection géochimique sur sol – application à la zone mercurielle Nord Numidique (Algérie)*. Thèse de doctorat, CNRS CRPG INPL, Nancy, 178 p.
- Morineau A (1988) *Analyse en Composantes Principales*. Édition CISIA, Ceresta, France, 198 p.

O

- Office National de la Recherche Géologique et Minière (ORGM) (2010) *Rapport final sur les travaux de prospection pour la détermination des potentialités du gisement de fer d'Anini*. 86 p.
- Olivier D (2012) *Minerai de fer, l'émergence d'une nouvelle commodité sur les marchés financiers*. Travail de Bachelor HES, p. 57.

P

- Pannatier Y (1996) *Variowin – Software for Spatial Data Analysis in 2D*. Springer Verlag, 91 p. ISBN 0-387-94679-9
- Pollard PJ (ed) (2000) Evidence of a magmatic fluid and metal source for Fe-oxide Cu-Au mineralisation. In: Porter TM, *Hydrothermal Iron-Oxide Copper-Gold and Related Ore Deposits: A Global Perspective*. Australian Mineral Foundation, Adelaide, pp 27–41.
- Porter TM (2000) Hydrothermal iron-oxide copper-gold and related ore deposits. In: Porter TM, *Hydrothermal Iron-Oxide Copper-Gold and Related Ore Deposits: A Global Perspective*. Australian Mineral Foundation, Adelaide, pp 3–5.

R

- Ressources naturelles Canada (2014) Minerais de fer. <http://www.rncan.gc.ca/mines-materiaux/marches/articles-produits-mineraux> (consulté le 03/11/2015).
- Robb L (2004) *Introduction to Ore-Forming Processes*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK, pp 247–266.

S

- Salesse P (1989) *Élaboration et recyclage des métaux, Minerais et fondants*. Techniques de l'Ingénieur M 7 040, pp 1–2

U

- US Environmental Protection Agency (1994) *Technical Resource Document, Extraction and Beneficiation of Ores and Minerals*, EPA 530-R-94-030, Office of Solid Waste, Special Waste Branch, 401 M Street, SW, Washington, DC 20460, Vol. 3.

V

- Van Houten FB, Hou HF (eds) (1990) Stratigraphic and palaeogeographic distribution of Palaeozoic oolitic ironstones. In: McKerrow WS, Scotese CR (eds), *Palaeozoic Palaeogeography and Biogeography*. Geological Society Memoir 12, pp 87–93.

-WHO (2016) *Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease*. World Health Organization.

Y

-Yellishetty M, Mudd G, Mason L, Mohr S, Prior T, Giurco D (2012) *Iron Resources and Production: Technology, Sustainability and Future Prospects*. Department of Civil Engineering, Monash University, 60 p

-Yellishetty M, Ranjith PG, Tharumarajah A (2010) Iron ore and steel production trends and material flows in the world: Is this really sustainable? *Resources, Conservation and Recycling* **54** : 1084–1094.

