



LST GARM 2015



Projet de fin d'études

MODÉLISATION GÉOLOGIQUE ET GÉOSTATISTIQUE DU PANNEAU 6, GISEMENT DE M'ZINDA (BASSIN DES GANTOUR, MAROC)

Réalisé par : Mlle Elakri M.

Encadrants: Mr Daafi Y. | Mr Al Hayan H.

Examineurs: Mr Elghorfi M. | Mr Bachno A.

SOMMAIRE

REMERCIEMENT.....	4
INTRODUCTION.....	5
1 ^{ERE} PARTIE : GENERALITES	6
I. GEOLOGIE DES PHOSPHATES.....	7
1. LES GISEMENTS SEDIMENTAIRES	7
2. LES GISEMENTS D'ORIGINE IGNEE.....	7
3. LES GISEMENTS DE TYPE GUANOS	7
II. PHOSPHATOGENESE.....	7
1. THEORIE BIOLITIQUE :	8
2. THEORIE ABIOLITIQUE :	8
3. THEORIE DE BUSHINSKI :	8
4. THEORIE DE KAZAKOV :	9
III. GEOCHIMIE DES PHOSPHATES	9
IV. GISEMENTS PHOSPHATES DU MAROC	10
1. BASSIN D'OULEDABDOUN	11
2. BASSIN DES MESKALA	12
3. BASSIN D'OUED EDDAHAB	12
4. BASSIN DES GANTOUR.....	12
a. <i>Cadre géographique</i> :.....	14
b. <i>Cadre géologique</i> :.....	14
c. <i>Cadre structural</i> :.....	14
d. <i>Cadre hydrogéologique</i> :.....	15
e. <i>Découpage de la série phosphatée au niveau du bassin des Gantour</i>	16
2 ^{EME} PARTIE : GISEMENT M'ZINDA-PANNEAU 6.....	19
I. PRESENTATION DE LA ZONE DE M'ZINDA :.....	20
1. CADRE GEOGRAPHIQUE :	20
2. CADRE GEOLOGIQUE :	21
a. <i>Description lithologique des niveaux phosphatés de M'ZINDA</i>	21
3. LA CARTE DES LIMITES SEC-NOYE DE M'ZINDA.....	22
4. LA ZONE D'ETUDE-PANNEAU 6:.....	23
a. <i>La situation du panneau 6</i> :.....	23
3 ^{EME} PARTIE : MODELISATION GEOLOGIQUE DU PANNEAU 6, GISEMENT DE M'ZINDA.....	24
I. HISTOIRE DE LA GEOSTATISTIQUE :	26
II. OBJECTIF DE LA GEOSTATISTIQUE.....	26
III. LE VARIOGRAMME.....	27

IV.	LE KRIGEAGE	28
V.	L'INVERSE DE DISTANCE	30
VI.	ETUDE GEOSTATISTIQUE DES NIVEAUX PHOSPHATES DU PANNEAU 6	31
1.	COUCHE 4 SUP.....	31
A.	<i>Traitement statistique</i>	31
B.	<i>Répartition spatiale des paramètres physico-chimiques</i>	33
2.	COUCHE 5.....	41
A.	<i>Traitement Statistique</i>	41
B.	<i>Répartition spatiale des paramètres physico-chimiques</i>	42
3.	COUCHE 6.....	43
A.	<i>Traitement statistique</i>	43
B.	<i>Répartition spatiale des paramètres physico-chimiques</i>	45
VII.	ESTIMATION DES RESSOURCES.....	53
VIII.	LISTING CASES.....	54
	CONCLUSION	55
	ANNEXE A.....	57
	ANNEXE B.....	64
	ANNEXE C.....	71

REMERCIEMENT

Au terme de ce stage, je tiens à exprimer mes vives reconnaissances, et mon dévouement à MRY.DAAFI, chef du service « recherche et développement, service géologie, zone centre » et responsable de mon stage.

Mes remerciements les plus distingués s'adressent à tous le personnel du service notamment Mr H.AL HAYAN mon parrain de stage, pour son aide et la qualité de l'encadrement, qui malgré ses préoccupations, s'est trouvé un temps pour me donner le nécessaire.

Je tiens à remercier également Mr. A.ZIANI, pour son aide, ses conseils précieux, et sa patience.

De la part de la FSTG, Je remercie de manière très sincère mon encadrant Mr A.SAIDIPour ses précieux conseils directifs et son suivi pendant la période de mon stage, sans oublier mes chers professeurs du département science de la terre, en souhaitant que mon travail requière leur ultime agrément.

Enfin, que tous ceux que nous avons oubliés n'en trouvent pas moins toute ma gratitude.

INTRODUCTION

Le bassin des Gantour, dont le gisement de M'Zinda fait partie, recèle un potentiel phosphaté considérable.

Le pilotage et la maîtrise des exploitations minières au niveau de ce bassin, s'appuie sur les travaux et les études géologiques préparatoires, qui commencent toujours par la phase d'exploration dans ces deux cadre régional puis local où les ouvrages de reconnaissance sont implantés, la série phosphatée décrite, les niveaux minéralisés échantillonnés et analysés. A ce stade une base de données brute sera créée et comportera les emplacements géographiques des ouvrages et les valeurs des paramètres physico-chimiques mesurés ou analysés.

La base de données brute a un caractère ponctuel, la continuité spatiale des phénomènes ou de la répartition des paramètres étant une énigme. Donc on a recours à des approches géostatistiques qui donnent la possibilité de quantifier la variabilité spatiale des paramètres étudiés, c'est dans ce cadre que la présente étude s'inscrit, elle sert notamment à faire le traitement géostatique ou La modélisation géologique en 2 dimensions du panneau 6 du gisement de M'Zinda.

1^{ÈRE} PARTIE : GÉNÉRALITÉS

I. GÉOLOGIE DES PHOSPHATES

Le phosphate est une substance minérale, qui tient une place très importante dans l'industrie minière.

De point de vue géologique, les gisements phosphatés peuvent être de différentes natures, selon l'abondance du phosphore et le contexte géodynamique. On distingue généralement :

1. Les gisements sédimentaires

Les gisements sédimentaires sont les plus abondants en quantité et ont en général des teneurs sur place qui dépassent les 28% P₂O₅.

2. Les gisements d'origine ignée

Ces gisements sont associés à des complexes intrusifs alcalins (les syénites néphéliniques, les carbonates, les ijolites et les pyroxénites).

Exemple : Les gisements de Khibiniy (Russie) sont liés à un complexe annulaire à syénite néphélinique, 16 millions de tonnes de minerais, la teneur est de 18 % P₂O₅ ; et les gisements de Palabora (Afrique du Sud) de teneur moyenne plus faible.

3. Les gisements de type Guanos

Les gisements de type guanos sont formés à partir des déjections des oiseaux de mer qui contiennent environ 4 % P₂O₅. En général la qualité de ces phosphates est fort intéressante vis à vis de leur quantité.

Exemples : Les gisements de l'île Nauru dans l'océan pacifique contiennent 90 millions de tonnes de minerai de 39 % P₂O₅.

Le Maroc est caractérisé par la présence des gisements de phosphate de type sédimentaire, dont les théories de formation présentent encore des ambiguïtés.

II. PHOSPHATOGÉNÈSE

Le problème de la phosphatogénèse peut être envisagé à la lumière de deux points de vue entièrement différents :

Point de vue continuiste d'après lequel la phosphatogénèse serait un processus permanent ;

Point de vue discontinuiste pour lequel le phénomène ne s'est produit qu'à certaines périodes privilégiées de l'histoire de la terre.

L'étude de la phosphatogénèse, quel que soit le gisement considéré, pose essentiellement deux problèmes :

- Quelle est l'origine première du phosphore renfermé dans le gisement de phosphate ?
- Cette origine étant supposée connue, par quels processus et dans quelles conditions le gisement s'est-il formé ?

Dans ces deux grands cadres, des théories sur la phosphatogénèse ont évolué :

1. Théorie Biolitique :

Il se limite à l'intervention des organismes (assimilation du phosphore dissout dans les eaux de mers) lorsque les conditions deviennent insupportables (salinité, refroidissement...) les organismes sont fossilisés et cimentés par la calcite ou rarement la silice.

2. Théorie Abiolitique :

Renvoie la formation des phosphates au lessivage de l'apatite (minerai des roches éruptives dans la formule chimique $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$).

3. Théorie de Bushinski :

Bushinski attribue aux rivières un rôle déterminant pour l'apport du phosphate dans un bassin. Les rivières prennent leur source dans des régions humides et traversant ensuite une région aride avant de se déverser dans le bassin également soumis à un contexte climatique aride.

Ce climat aride favorise l'apport phosphaté aux dépens des matériels terrigènes : une pédogénèse en climat chaud et humide jouant un rôle d'un « filtre séparateur » permettra d'accroître l'alimentation du bassin en solution phosphatée, en réduisant les apports détritiques. On a aussi montré que le phosphore se présente sous plusieurs formes dans les sols, une partie de la solution minérale issue de la roche mère est évacuée hors du profil, une autre conduit à des phosphates organiques, tandis que les ions phosphatés restants s'associent à des hydroxydes de Fer et d'Aluminium.

Certain gisements phosphatés apportent les arguments en faveur de cette théorie, cependant il est difficile d'imaginer que seule cette source permet la formation d'un

gisement économiquement exploitable. C'est ainsi que certains auteurs font appel aux réserves océaniques.

4. Théorie de Kazakov :

Cette théorie se base sur des données océanographiques anciennes. Kazakov constate que la teneur en P_2O_5 de l'eau de mer croît avec la profondeur à partir du bas de la zone d'oxydation. Son maximum est atteint vers la profondeur de 500m avec un pourcentage important du gaz carbonique (pH diminue). Si les courants ascendants ramènent les eaux profondes vers la surface en remontant le long du talus continental, le départ du gaz carbonique doit fournir la précipitation des phosphates.

Le dépôt du phosphate s'opère. D'après Kazakov, à deux profondeurs comprises entre 200 et 500. On admet que cette théorie est une base d'explication satisfaisante.

Jusqu'ici certains gisements dans le monde ont été étudiés par des pétrographes, d'autre par des minéralogistes d'autre enfin par des océanographes et chacun a eu tendance à accorder le maximum d'importance aux éléments fournis par sa propre discipline. En fait il semble que ce soit un gisement par une liaison étroite entre les diverses disciplines de la géologie avec la chimie, l'océanographie et même la biologie (car les conditions écologiques de ce milieu si particulier sont encore mal connues) et surtout grâce à des travaux menés en équipe avec beaucoup de cohésion que l'on puisse espérer arriver à une solution à peu près satisfaisante de l'ensemble de ce problème.

III. GÉOCHIMIE DES PHOSPHATES

Les caractéristiques d'un minerai phosphaté sont en relation direct avec sa teneur en certain éléments chimiques.

Généralement, les éléments chimiques sont classés en fonction de leur abondance relative dont on peut distinguer :

Les Eléments majeurs : sont plus abondants et forment en général 95 à 99% de la quasi-totalité du matériau. Il s'agit des éléments suivants : P_2O_5 ; SiO_2 ; Al_2O_3 ; MgO ; Fe_2O_3 ; CaO ; Na_2O ; K_2O ; CO_2 ; F ; Cl-, etc.

Les Eléments-traces qui constitue le reste des éléments chimiques, présents en très petite à fine quantité et qui sont exprimés généralement en ppm. Il s'agit de : Ba ; Be ; Cd ; Co ; Cr ; Cu ; Ga ; La ;

Mn ; Mo ; Nd ; Ni ; K, Bi, Pb ; Sb ; Sc ; Se ; Sr ; U ; V ; Y ; Yb ; Zn ; Zr ; Ag ; As, etc.

Mais parmi ces éléments chimiques, il y a ceux qu'on tient compte de leur teneur et qui constituent des facteurs déterminants en termes de qualité du phosphate. Parmi les éléments majeurs d'intérêt on a :

P₂O₅ ou BPL :

La Teneur en P₂O₅ (Anhydride phosphorique = Pentoxyde de Phosphore) ou encore teneur en BPL (Bone Phosphate of Lime) ou Tri-calcium de Phosphate (TCP) ou [Ca₃(PO₄)₂] déclare la richesse du minerai.

NB : TCP = BPL = 2,1852* P₂O₅.

La teneur en ph P = 0,4364*P₂O₅.

Silice (SiO₂) :

Sa teneur est due à la présence de silicates, surtout les quartzs détritiques ou néoformés, des argiles, glauconies et parfois des clinoptilolites. En cas de son excès, sa présence gêne l'attaque sulfurique ainsi que la cristallisation des sulfates de calcium d'où une mauvaise filtration des jus et le mauvais rendement (silice non active) (Salvan, 1961).

CO₂ et matière organique :

Sa teneur (élevée) peut être liée à sa présence dans l'apatite. C'est l'élément défavorable en cas d'attaque nitrique (fabrication des engrais complexes car ils amènent d'importantes pertes d'azote) (Salvan, 1961).

Le cadmium :

Les propriétés chimiques du cadmium sont semblables à celles du zinc. Ainsi qu'il y'a une corrélation positive entre cette élément et la matière organique principalement contenue dans les phosphates (Lucas et Prévôt, 1979).

IV. GISEMENTS PHOSPHATÉS DU MAROC.

La phosphatogénèse s'est opérée au Maroc durant la période géologique s'étendant du Maastrichtien (Crétacé Supérieur) au Lutétien (Eocène moyen) pendant 30 Ma. Il s'y est déposé une série phosphatée décrivant une séquence positive, comprise entre des détritiques fins (sables et argiles) à la base et des formations carbonatées au sommet. Ces phosphates sont formés de grains de taille généralement comprise entre 40 et 215 µm. Les faciès de la série phosphatée marocaine sont caractérisés par une grande diversité, tant sur le plan spatial que temporel.



Fig.1 : Bassins phosphatés du Maroc

Le phosphate marocain est de type sédimentaire sous-marin, et se répartit en 4 bassins d'extensions importantes :

1. Bassin d'Ouled Abdoun

C'est le bassin le plus étendu, et le plus riche en terme de qualité et de quantité du minerai qu'il renferme.

Il occupe la majeure partie de l'élément morphologique connu sous le nom du plateau des phosphates, ou plateau des Ourdigha bordé par le massif du Maroc central au nord, la plaine de Béni Amir au sud, la massif paléozoïque du Rehamna à l'ouest et le moyen Atlas de Beni Mellal.

Le phosphate d'Ouled Abdoun constitue le terme final d'une couverture sédimentaire qui s'étale de l'Infracénomien au Lutétien supérieur. Le substratum supportant la série est formé de terrains paléozoïques plissés et faillés qui affleurent au niveau du massif central au nord et au niveau du massif des Rehamna vers le sud.

La série phosphatée s'étale du Maestrichtien caractérisé par des dépôts phosphatés très marneux, au Lutétien coiffé par une dalle calcaire.

2. Bassin des Meskala

Le bassin de Meskala est le premier bassin que l'on rencontre à partir de la bordure atlasique en se dirigeant vers le Nord. Il est situé dans la plaine d'Essaouira Haouz. Il est limité par les Jbilet et les collines jurassiques de Mouissate au Nord, le Haut Atlas au Sud, la plaine de Haouz à l'Est et la plaine côtière d'Essaouira à l'Ouest.

3. Bassin d'Oued Eddahab

Il est situé en zone saharienne couvre une vaste région qui part de la zone saharienne d'Edchira au Sud de Laâyoune en près de confluence de Saquia El Hamra et Oued El Khat et se poursuivait en se rétrécissant jusqu'au Sud de la ville de Dakhla, il se limite au Nord et au Nord-Est par les affleurements de la série phosphatée et à l'Ouest par la ligne côtière.

La série phosphatée dans ce bassin s'étend du Maestrichtien à l'Yprésien, avec une puissance qui varie de 10 à 45 m.

4. Bassin des Gantour

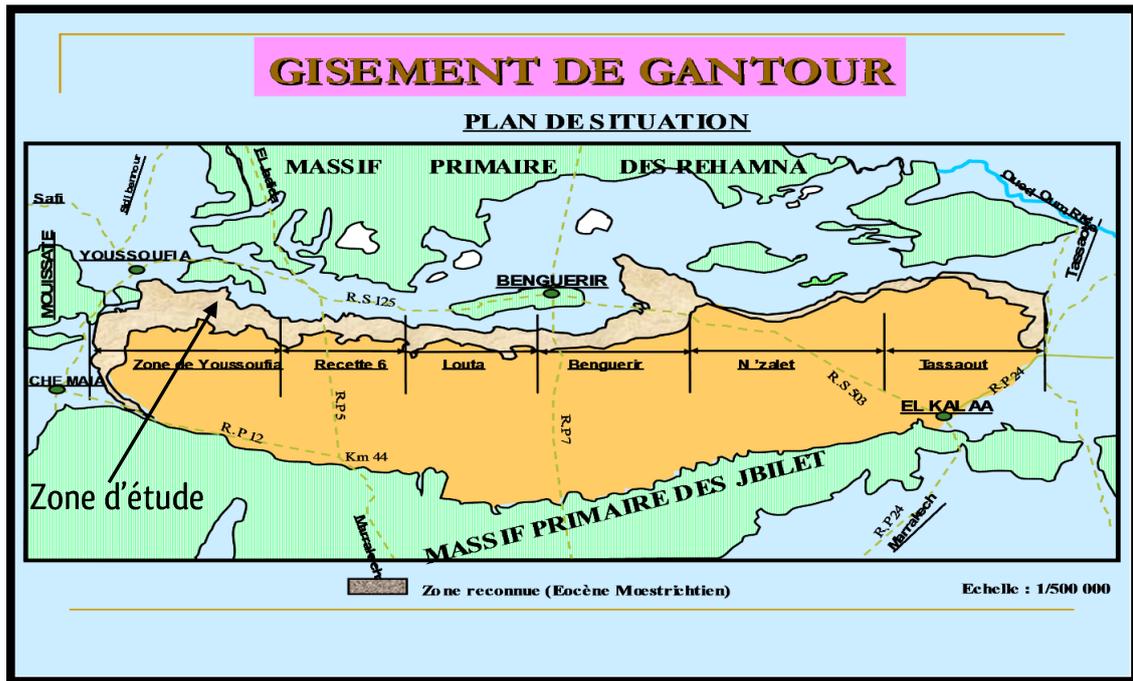


Fig.2 : Situation du bassin des Gantour

Le bassin des Gantour est l'un des quatre grands bassins phosphatés du Maroc. Situé au centre Nord du pays, il constitue un élément important de la couverture sédimentaire de la meseta.

Sur la figure 1, la partie reconnue géologiquement du bassin peut être subdivisée en six zones qui sont d'Ouest vers l'Est :

- Youssoufia.
- Bouchane.
- Louta.
- Benguerir.
- Nzalet El Hrarcha.
- Tassaout.

Actuellement l'exploitation du phosphate n'intéresse que deux zones :

- Zone de Youssoufia (partie occidentale du gisement) où l'on exploite le phosphate dans la mine de Bouchane et la mine M'Zinda, à ciel ouvert.
- Zone de Benguerir (partie centrale du gisement) où l'exploitation est faite à ciel ouvert.

a. Cadre géographique :

Le bassin des Gantour inscrit dans un rectangle orienté Est-ouest de la longueur de 120 Km et de largeur de 20 à 30 Km.

Il est limité :

- Au nord, le massif paléozoïque des Rehamna.
- Au sud, le massif paléozoïque des Jbilet.
- A l'Est, l'Oued Tassaout, affluent de l'Oued Oum-Errabia.
- A l'Ouest, les collines jurassiques de Mouissates.

Ce socle ancien, rigide et figé dans la meseta, est largement recouvert par des séries sédimentaires tabulaires ou faiblement plissées, ondulées ou faillées.

b. Cadre géologique :

A l'instar du gisement des Ouled Abdoun, la série phosphatée des Gantour est localisée au sein du Crétacé supérieur (fin de l'ère secondaire) et de l'Eocène inférieur (début de l'ère tertiaire). Cette série phosphatée est couronnée dans la partie méridionale du gisement par une dalle de calcaire siliceux renfermant des fossiles du genre "Therstae" (Gastéropode) et d'âge Eocène moyen. (Moutaouakil et Giresse (1993)).

La série des Gantour comporte des faisceaux, des couches, et des sillons phosphatés entre lesquels s'intercalent des roches de natures variées dépourvues de phosphates ou très peu phosphatées. Le dépôt de cette série phosphatée est typiquement d'origine marine.

Le bassin dans lequel s'était opéré ce dépôt faisait partie d'une mer Crétacé-Eocène qui recouvrait probablement toute la moitié Ouest du domaine atlasique à l'exclusion des massifs primaires des Rehamna, des Jbilet et d'un massif également primaire situé au sein de l'Atlas Occidental. (Moutaouakil et Giresse (1993)).

A signaler qu'au sein de la partie Ouest du massif des Rehamna, on connaît une petite enclave de Maestrichtien phosphaté qui porte le nom de Gantour Seguir.

c. Cadre structural :

La série phosphatée dans le bassin des Gantour présente un léger pendage (2 à 3°) vers le Sud à Sud Est. Elle est affectée par des flexures plus ou moins importantes qui déterminent des anticlinaux et synclinaux à grand rayons de courbure dont la plus importante est celle de « Limitrophe » dans la région de Youssoufia. Ces mouvements de couverture Crétacé-Eocène s'accompagnent de nombreux accidents cassants à faibles rejets métriques qui gênent peu l'exploitation. Ils sont présents surtout à l'extrême Ouest de gisement.

Reste à citer que la série phosphatée présente une variation latérale de puissance, elle est plus condensée dans la partie Est du bassin, pour ce qui concerne la teneur elle varie aussi mais d'une façon plus intense.

d. Cadre hydrogéologique :

Le gisement des Gantour présente une zone noyée dont la superficie et les ressources sont plus importantes que celles de la zone sèche (zone d'affleurement).

La zone noyée contient 3 nappes qui sont de bas en haut :

1. La nappe inférieure ou nappe maastrichtienne,
2. La nappe intermédiaire ou nappe Danienne Thanétienne.
3. La nappe supérieure ou nappe Yprésienne.

- *Nappe inférieure :*

C'est une nappe captive comprise entre la couche 1 et les argiles du mur de la couche 2 (argiles maastrichtiennes).

- *Nappe intermédiaire :*

Elle est encadrée par la couche 1 et les argiles Yprésiennes et se caractérise par sa faible perméabilité à cause du faciès marneux du Thanétien et de la présence de matière organique qui colmate les pores.

- *Nappe supérieure :*

Son niveau piézométrique correspond à peu près à sa surface libre, son substratum est constitué par les argiles Yprésiennes. Le réservoir est représenté par la série marno-cherteuse qui est interrompue par des phosphates sableux, des calcaires phosphatés et par des silts phosphatés. L'écoulement se fait du Sud au Nord au Nord de Loubirat.

Malgré la diversité des faciès, la série phosphatée constitue en général des aquifères à porosités d'interstices, sauf pour la série marno-cherteuse et la dalle à Thésitae où se manifeste la porosité de fracturation.

Ces calcaires affleurent sur la bordure Sud du plateau, les eaux qu'ils reçoivent à partir la pluviométrie sont acheminées dans deux directions opposées :

- Vers le Nord pour alimenter les nappes de la série phosphatée ;
- Vers le Sud pour alimenter les formations quaternaires de la Bahira.
- Les exutoires sont constitués par :
 - Les prélèvements par pompage dans les différentes unités d'exploitation.
 - Les drainages par foudroyage dans les zones déjà exploitées ce qui entraîne une communication de tous les aquifères situés au-dessous de la couche 1.

e. Découpage de la série phosphatée au niveau du bassin des Gantour

Découpage chronostratigraphique

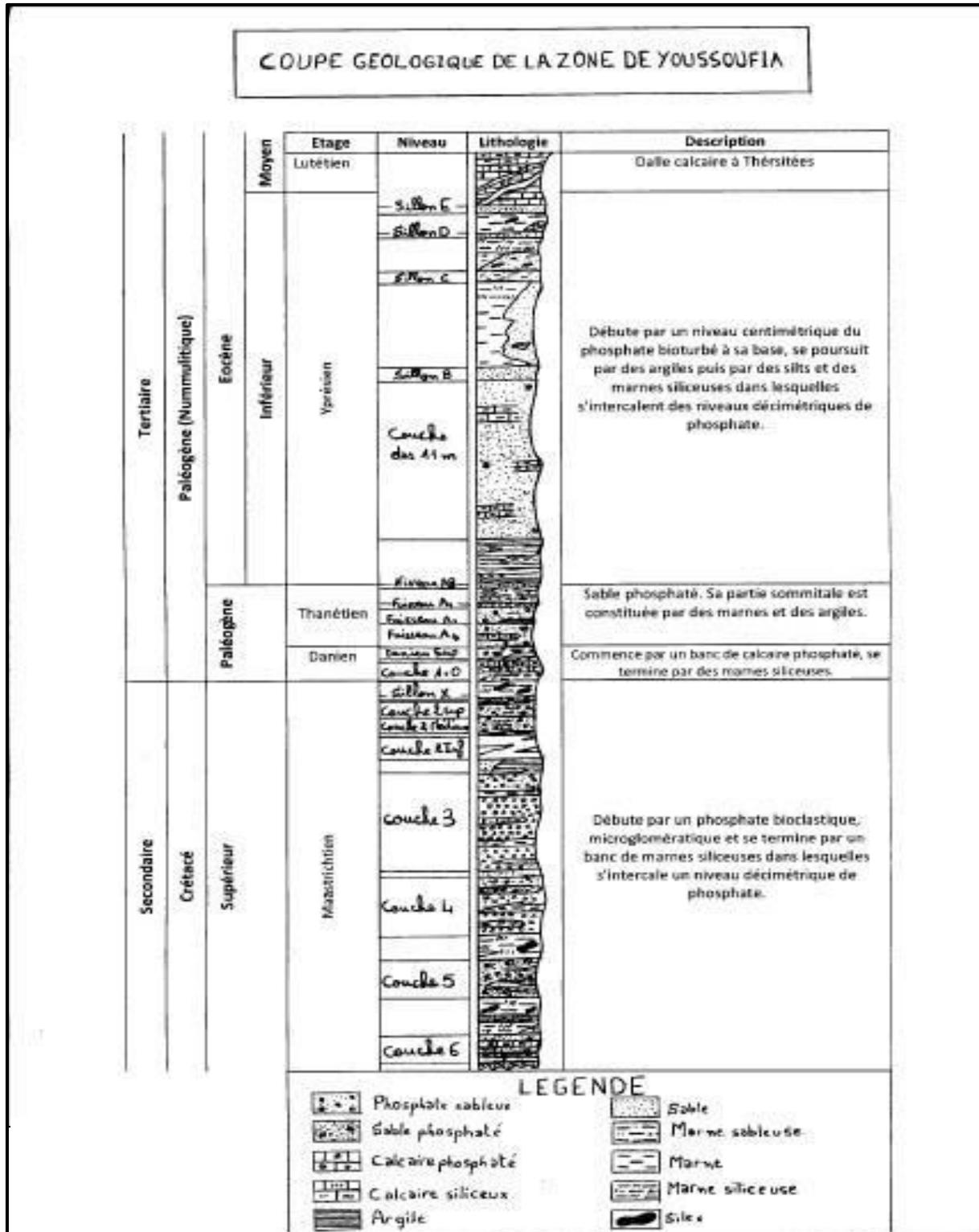


Fig.3 : Coupe géologique du bassin des Gantour

La série phosphatée dans le bassin des Gantour s'étend du Maastrichtien au Lutétien, ce qui est illustré clairement sur la figure 3a, la succession des âges phosphatés est la suivante :

- Maestrichtien : débute par un phosphate bioclastique, micro conglomératique et se termine par un banc de marnes siliceuses dans lesquels s'intercale un niveau décimétrique de phosphate.
- Danien : Commence par un banc de calcaire phosphaté et contient le niveau le plus riche de la série, il se termine généralement par des marnes et marnes siliceuses sauf à l'extrême Ouest du gisement ou ces marnes font défaut.
- Thanétien : Cet étage est dominé par une sédimentation sablo-phosphatée. Sa partie sommitale est constituée par des marnes et des argiles.
- Yprésien : débute par un niveau centimétrique de phosphate bioturbé à sa base, se poursuit par des argiles puis par des silts et des marnes siliceuses dans lesquels s'intercalent des niveaux décimétriques de phosphate.
- Lutétien : Il débute par un complexe marno-siliceux. Cet étage se caractérise par le développement d'une dalle calcaire dolomitique à Thérissitae. Il confirme la régression de la phosphatogénèse déjà amorcée à l'Yprésien.

Découpage séquentiel

Le bassin de Gantour se présente en un golf ouvert à l'Ouest vers l'atlantique est encadré par les deux massifs paléozoïques émergés : Les Rehamna au Nord et les Jbilet au Sud.

La série phosphatée qui s'est déposée dans le bassin est subdivisée en 5 entités sédimentologiques séparées par des discontinuités majeures. On distingue :

- La mégaséquence inférieure qui correspond au maastrichtien.
- La mégaséquence médiane qui correspond au danien Thanétien.
- La mégaséquence supérieure qui correspond à l'Yprésien.

Découpage minier

Maestrichtien	Danien	Thanétien	Yprésien	Lutétien
Couche 6 - couche 5	Couche 1+0	Sous faisceau A3	Niveau AB	Stérile
Couche 4 - couche 3			Couche de 11 m	
Couche 2 inférieure		Sous faisceau A2	Sillon B	
Couche 2 médiane	DSP	Sous faisceau A1	Sillons supérieurs	
Couche 2 supérieure				
Sillon X				

DSP : Danien supérieur phosphaté

2^{ÈME} PARTIE :
GISEMENT
M'ZINDA-
PANNEAU 6

I. PRÉSENTATION DE LA ZONE DE M'ZINDA

1. Cadre géographique :

Le centre du gisement M'ZINDA se situe à environ 8 km au Sud du chemin de fer reliant Youssoufia à Benguerir et à environ 14 km au S-E de la ville de Youssoufia.

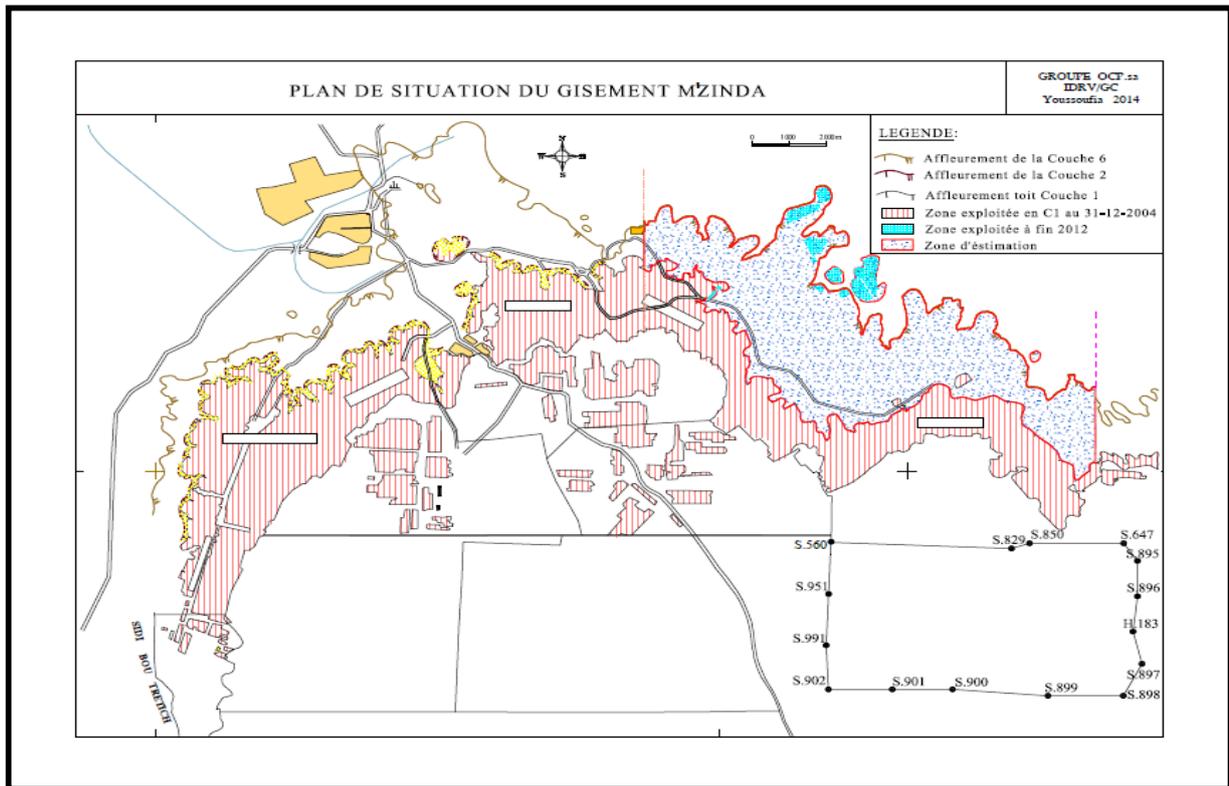


Fig.4 : Situation du gisement de M'Zinda

Le gisement de M'ZINDA s'étend sur 10 km de l'Ouest vers l'Est et couvre une superficie de 3049 ha.

Géographiquement, il est limité :

$$X_{\max}=223993 \text{ m}$$

$$X_{\min}=214265 \text{ m}$$

$$Y_{\max}=189022 \text{ m}$$

$$Y_{\min}=181788 \text{ m}$$

2. Cadre géologique :

La série phosphatée du gisement M'ZINDA appartient au Maastrichtien qui comporte généralement plusieurs niveaux phosphatés. Il est subdivisé en trois entités :

Entité inférieure : Elle est marquée par le développement des intercalaires silicocarbonatées (marnes, marnes siliceuses, silex et grés). Ces couches constituent la principale exploitation, elles sont les plus étendus et les plus trouvables.

Les niveaux miniers qui composent cette entité, cités de haut en bas sont :

- La couche 5 ;
- La couche 6 (inférieure, médiane A et médiane B)

Entité médiane .Les niveaux miniers qui constituent cette entité sont :

- La couche 3 ;
- La couche 4.

Cette entité se termine par un puissant dépôt d'argile de couleur ocre ou noire qui forme l'intercalaire couche 3 / couche 2. Ces couches sont moyennement abondantes.

Entité supérieure : Elle est caractérisée par la réduction des puissances des intercalaires stériles constituées de grés, de marnes et de silex. Ces couches ne sont pas abondantes elles affleurent dans des zones restreintes et bien limitées.

Les niveaux miniers qui constituent cette entité sont :

- Le sillon X ;
- La couche 2.

a. Description lithologique des niveaux phosphatés de M'ZINDA

Les niveaux repères de la série phosphatée de M'ZINDA :

Sur le terrain on a observé 3 niveaux repères qui se répètent partout dans le gisement de M'Zinda :

Banc de calcaire à carditas :

Il s'agit d'un calcaire dur à carditas (fossiles), il représente le niveau qui coiffe la couche (1+0).

Le bone-bed :

C'est une couche très mince (quelques centimètres) formée presque en totalité par des débris osseux, c'est un niveau repère qui sépare la couche 2 inférieure de la couche 2 supérieure.

Les argiles maastrichtiennes :

C'est un niveau des argiles jaunes appelées argiles maastrichtiennes qui apparaît au-dessus de la couche 3. Elle permet de distinguer la couche 2 de la couche 3.

3. La carte des limites sec-noyé de M'ZINDA

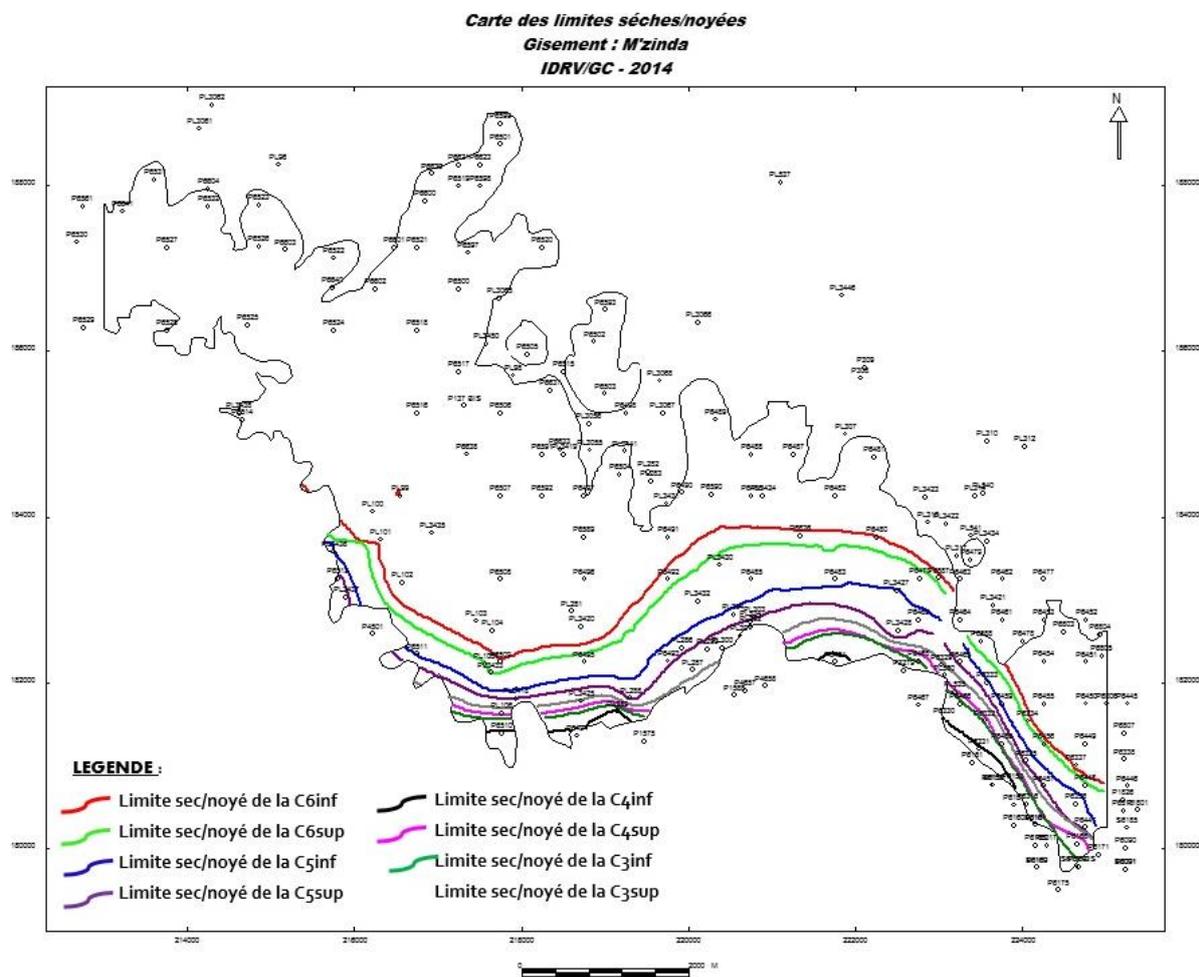


Fig.5 : Carte des limites sec/noyé du gisement de M'Zinda

La carte piézométrique de la zone de M'Zinda, met en évidence la limite entre les parties sèches et les parties noyées de chaque niveau phosphaté.

D'après cette carte, on peut visualiser que les limites sont généralement localisées au Sud du secteur de M'Zinda, ces limites recourent le panneau 6 en partie, on aura donc dans ce panneau des zones noyées qu'on ne peut pas exploiter, surtout vers le sud.

4. La zone d'étude-Panneau 6:

a. La situation du panneau 6 :

Le panneau 6, qui représente la zone d'étude, est situé dans le SE du gisement de M'ZINDA, limité géographiquement par :

$$X_{\max} = 222500 \text{ m}$$

$$X_{\min} = 217500 \text{ m}$$

$$Y_{\max} = 186000 \text{ m}$$

$$Y_{\min} = 182000 \text{ m}$$

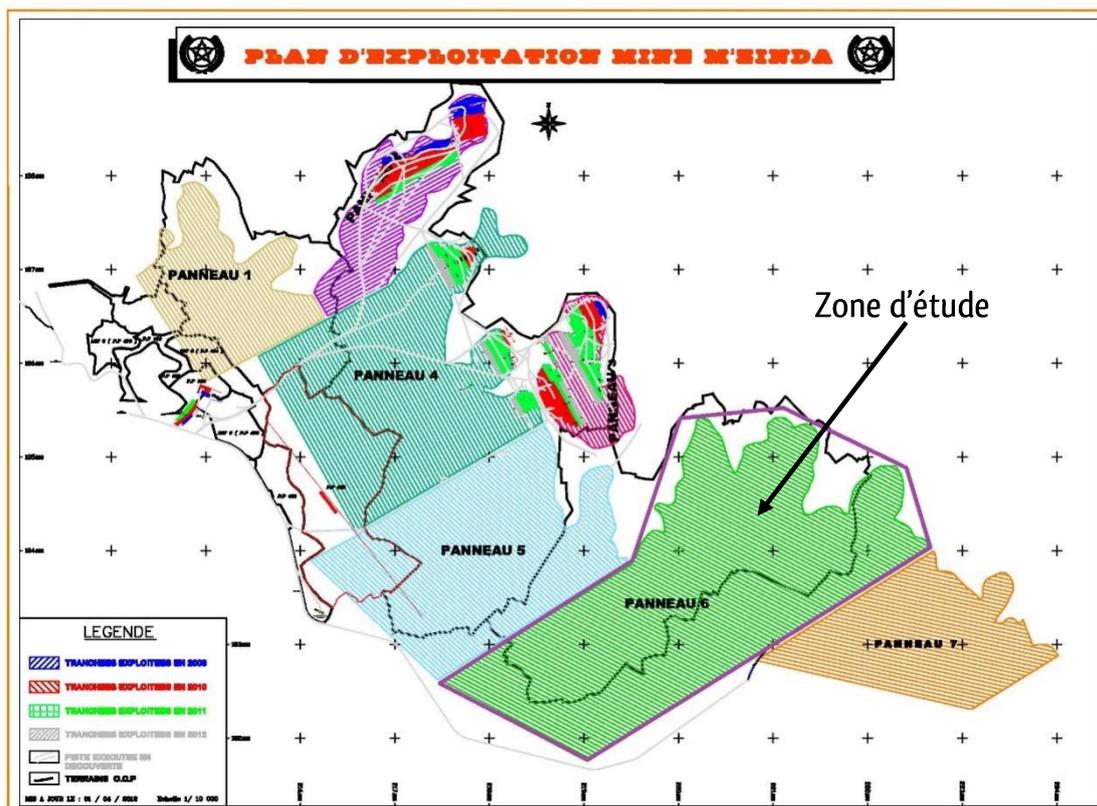


Fig.6 : Découpage du gisement de M'Zinda

3^{ÈME} PARTIE :
MODÉLISATION
GÉOLOGIQUE DU
PANNEAU 6,
GISEMENT DE
M'ZINDA

Objectifs de l'étude

La présente étude qui s'inscrit dans le cadre de mon projet de fin d'études, vise la modélisation géologique en deux dimensions du panneau 6 du gisement phosphaté de M'Zinda par l'intermédiaire d'approches géostatistiques.

Les grands traits et objectifs de l'étude se résument en ce qui suit :

- Prétraiter la base de données, et la critiquer pour éliminer les valeurs aberrantes et évaluer la qualité des données.
- Quantifier la variabilité spatiale des données géologiques intéressants le panneau 6 du gisement de M'Zinda, en se basant sur des approches géostatistique, notamment le krigeage pour une bonne estimation des ressources.
- Evaluer la répartition spatiale des paramètres physico-chimiques, en élaborant des cartes de répartition ou cartes iso-valeurs de tous les paramètres.
- Tracer des stratégies de futures d'exploitations, qui se basent sur les résultats obtenus et qui visent l'optimisation de l'exploitation.

I. HISTOIRE DE LA GÉOSTATISTIQUE :

Les débuts (50's - 60's)

- Méthodes d'estimation pour l'industrie minière (Dr D.G. Krige)

La deuxième ère (60's - 70's)

- Formalisation de la théorie de la géostatistique (Dr G. Matheron)

- géostatistique linéaire
- géostatistique non linéaire
- géostatistique non stationnaire
- simulations

Troisième génération (80's ...)

- Développement des méthodes spécifiques pour des applications dans de nouveaux domaines.

- intégration de données ("hard" et "soft")
- modélisation géologique 3D des hétérogénéités.

Aujourd'hui, la géostatistique est appliquée dans une foule de domaines (mines, pétrole, foresterie, agriculture, environnement, hydrogéologie, géotechnique, pêches, biologie, biomédical,...)

II. OBJECTIF DE LA GÉOSTATISTIQUE

La géostatistique vise la caractérisation et l'analyse d'un phénomène (géologique par exemple) dans son contexte spatiale ou spatio-temporel. Ceci par l'établissement de modèles géostatistiques, capables d'estimer la variabilité des phénomènes dans le temps.

L'objectif principal, est donc d'explorer des sites non échantillonnés et non reconnus au préalable en se basant sur les données des sites voisins échantillonnés, c'est l'interpolation spatiale.

III. LE VARIOGRAMME

1. Définition :

Le variogramme est une fonction mathématique utilisé pour le krigeage. Il permet d'analyser et de quantifier la continuité spatiale d'un phénomène.

On note Z la variable d'étude. Le variogramme expérimentale est défini par :

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

Avec :

$\gamma(h)$: Variogramme à la distance h

$Z(x_i)$: Valeur mesuré au point x_i

$Z(x_i + h)$: Valeur mesuré au point $x_i + h$

h : Distance entre x_i et $x_i + h$

$N(h)$: Nombre de couple des points distants de h

Lorsque la distance h tend vers 0, les points x_i et $x_i + h$ sont presque confondus et les valeurs mesurées en x_i et $x_i + h$ soit également très proches. Donc $\gamma(h)$ tend vers 0. En pratique il est possible que $\gamma(h)$ ne soit pas égal à 0 pour $h=0$ lorsqu'il y a une erreur d'échantillonnage ou une erreur d'analyse, ou bien quand le phénomène mesuré peut varier très vite à petite distance, comme par exemple dans le cas d'une pépite d'or. On appelle ce phénomène « effet de pépite ».

A grande distance il n'y a en général pas de corrélation entre les mesures, et la valeur du variogramme se stabilise autour d'une valeur constante appelée « palier ». La distance à partir de laquelle il n'y a plus de corrélation entre points de mesure est appelée « portée ».

Entre $h=0$ et $h=portée$, la valeur du variogramme augmente progressivement de 0 jusqu'au palier.

IV. LE KRIGEAGE

L'estimation des valeurs inconnues de blocs par leur échantillonnage, dans une exploitation minière sélective, présente un risque. Pour éviter ce danger dû à la variabilité naturellement trop élevée de l'échantillonnage, D.G. Krige proposait de prendre un estimateur basé sur une régression (sous des hypothèses log normales adaptées aux gisements d'or sur lesquels il travaillait).

A sa suite, G. Matheron propose l'estimateur baptisé par lui krigeage, estimateur linéaire ne requérant que la connaissance du variogramme. La valeur d'un bloc $Z(v)$ se voit alors estimée par une moyenne pondérée des données présentes à l'intérieur d'un voisinage de ce bloc. Dans un modèle de FAI, l'erreur $Z(v)-Z(v)^*$ faite en estimant $Z(v)$ par la moyenne pondérée $\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$ est une combinaison linéaire, dont la somme des coefficients $\sum_{i=1}^n \lambda_i$ est nulle pourvu que la somme des poids affectés aux échantillons x_i soit égale à 100%:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

La variance d'estimation peut s'écrire alors :

$$\sigma_k^2 = \sum \lambda_i \gamma(x_i, x_0) + \mu$$

Le meilleur estimateur sera obtenu en choisissant les poids λ_i qui conduisent à la variance la plus faible (sous la condition $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$). Ces poids apparaissent alors comme solution du système linéaire :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum \lambda_i \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x_0) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{array} \right.$$

Ainsi le krigeage permet-il de donner, aux divers échantillons, les poids les meilleurs, compte tenu de la configuration géométrique de l'ensemble et de la structure. Le plus souvent les échantillons éloignés du bloc reçoivent un poids quasi -nul, les échantillons

plus proches leur faisant écran, ce qui facilite le choix du voisinage. On appelle "variance de krigeage" la variance de l'erreur d'estimation ainsi minimisée.

Lorsque v est réduit à un point, on a un krigeage ponctuel. Et on peut montrer que, le voisinage étant fixé, le krigeage d'un bloc coïncide avec la moyenne de celui des différents points du bloc. En dehors des applications minières, le krigeage, appliqué à l'estimation de chacun des points d'une grille, apparaît comme une méthode de cartographie.

Mais d'autres modèles que les FAI, basés sur des hypothèses de stationnarité différentes, sont également utilisables, comme on le verra plus loin.

Le krigeage ainsi décrit, est une méthode d'interpolation qui consiste à estimer la valeur d'attribut pour des sites non échantillonnés situés à l'intérieur des limites définies par les positions de sites échantillonnés.

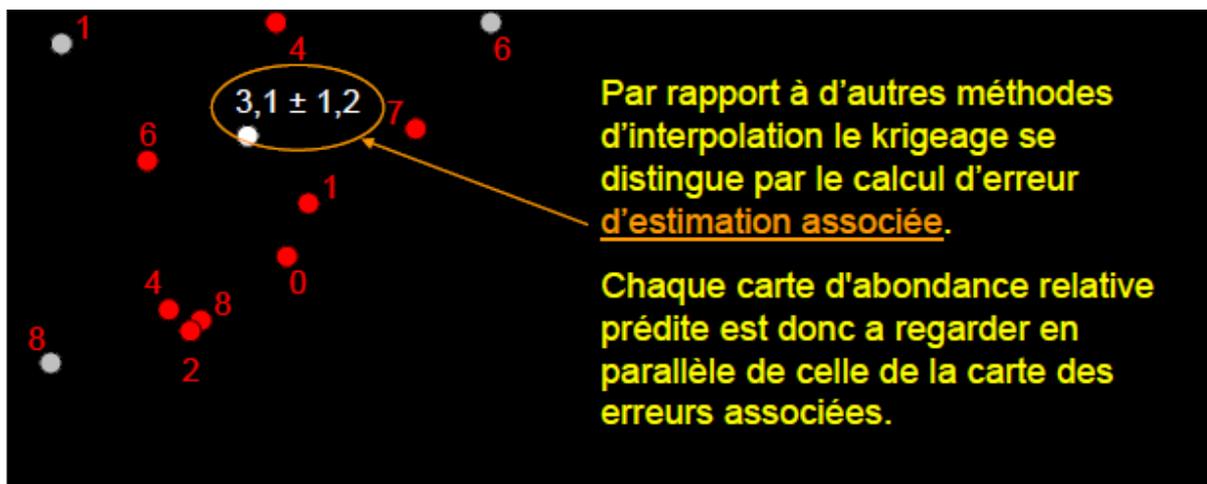


Fig.7 : Avantages du Krigeage

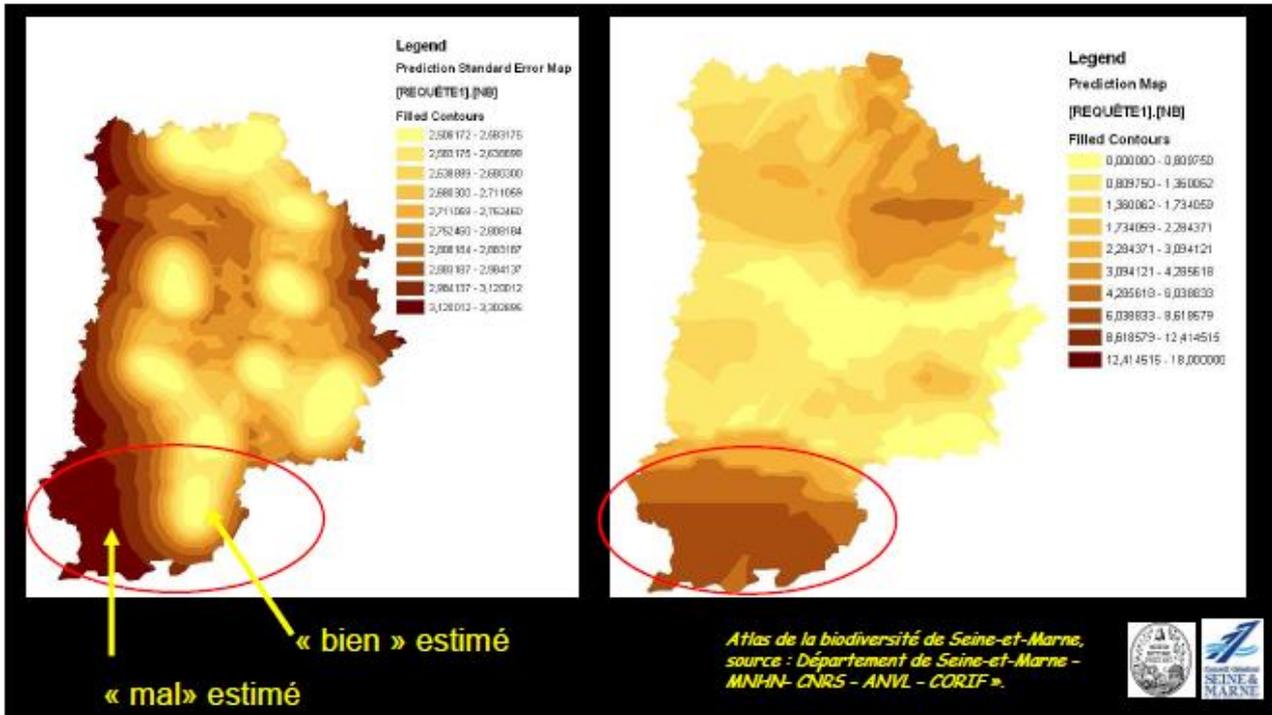


Fig.8 : Erreurs d'estimation du Krigage

Le krigage est donc une méthode d'interpolation très souple. Il peut être global ou local dépendamment du voisinage choisi, il s'agit d'une méthode d'interpolation exacte.

V. L'INVERSE DE DISTANCE

Il s'agit d'une méthode de moyenne pondérée ou chaque valeur de la grille à interpoler, est calculée comme une moyenne pondérée des observations. Les facteurs de pondérations sont calculés proportionnellement à l'inverse de la distance élevée à une puissance c'est à dire :

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^\alpha}$$

Les valeurs aux nœuds de la grille sont interpolées en pondérant les valeurs des points du voisinage par l'inverse de distances à la puissance α

$\frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z(x_i)}{d_i^\alpha}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^\alpha}}$	<p>Avec: $d_i = \sqrt{h_i^2 + S^2}$ d_i= distance entre point à estimer x et point de données x_i. S^2= facteur de lissage . α = exposant.</p>
--	---

C'est un interpolateur exact si $S_2=0$. Dans GDM, le facteur S est pris égal à 0 et n'est pas modifiable.

Le paramètre doit être ajusté en fonction du degré de continuité souhaité. Plus il est fort, meilleur est la continuité et plus la donnée la plus proche a un poids fort.

Cette méthode permet d'obtenir des grilles très rapidement mais crée des zones circulaires autour des valeurs observées (bull'eyes). Cet aspect peut être lissé en jouant sur la puissance et le voisinage. C'est un interpolateur exact (il passe par les valeurs observées).

VI. ETUDE GÉOSTATISTIQUE DES NIVEAUX PHOSPHATÉS DU PANNEAU 6

1. Couche 4 Sup

A. Traitement statistique

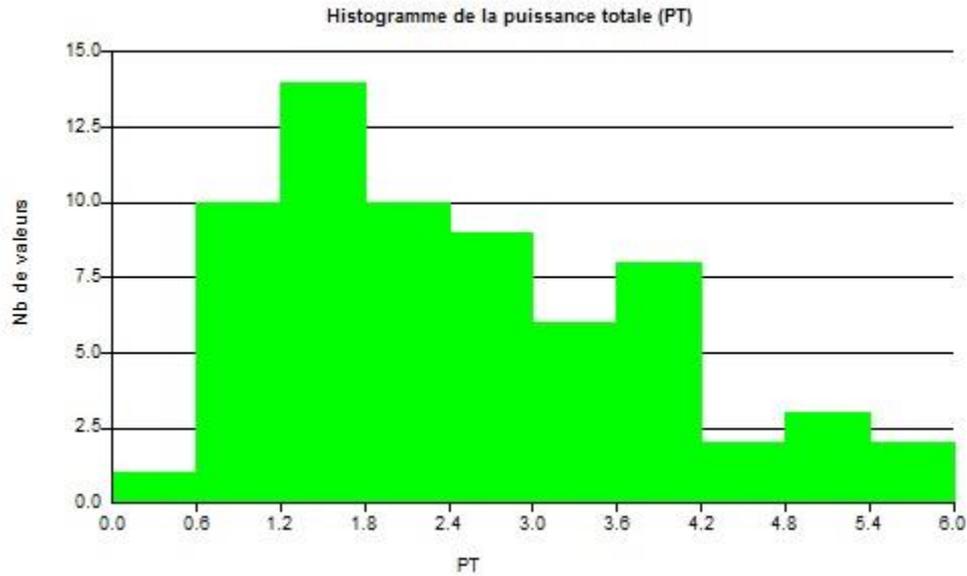
Nom étendu	Effectif	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
PT	65	0,40	5,80	2,51	1,32
PI	57	0,00	3,50	0,56	0,65
PP	57	0,35	4,55	2,10	1,03
BPL_BRUT	56	16,12	51,79	31,75	9,29
PP_ACC BPL_BRUT	56	0,35	4,55	2,07	1,03
ACC BPL_BRUT	56	17,59	116,53	58,93	23,51
CO2_BRUT	56	3,55	21,18	8,32	2,86
PP_ACC CO2_BRUT	56	0,35	4,55	2,07	1,03
ACC CO2_BRUT	56	3,84	66,72	16,56	10,44

PT : Puissance totale

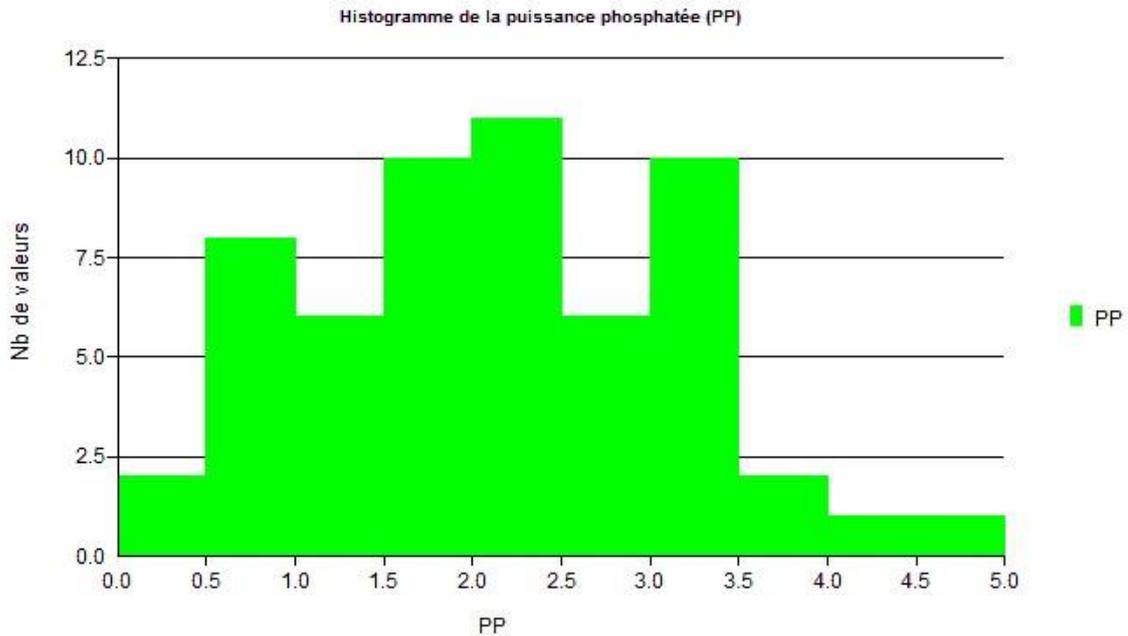
PI : Puissance d'Intercalaire

PP : Puissance phosphatée

Acc : Accumulation



L'histogramme de la puissance totale ci-dessous, met en évidence une population plus au moins homogène marquée par une distribution régulière de ses valeurs selon une loi normale. L'intervalle de puissances totales compris entre 1,2 et 1,8 m est dominant.

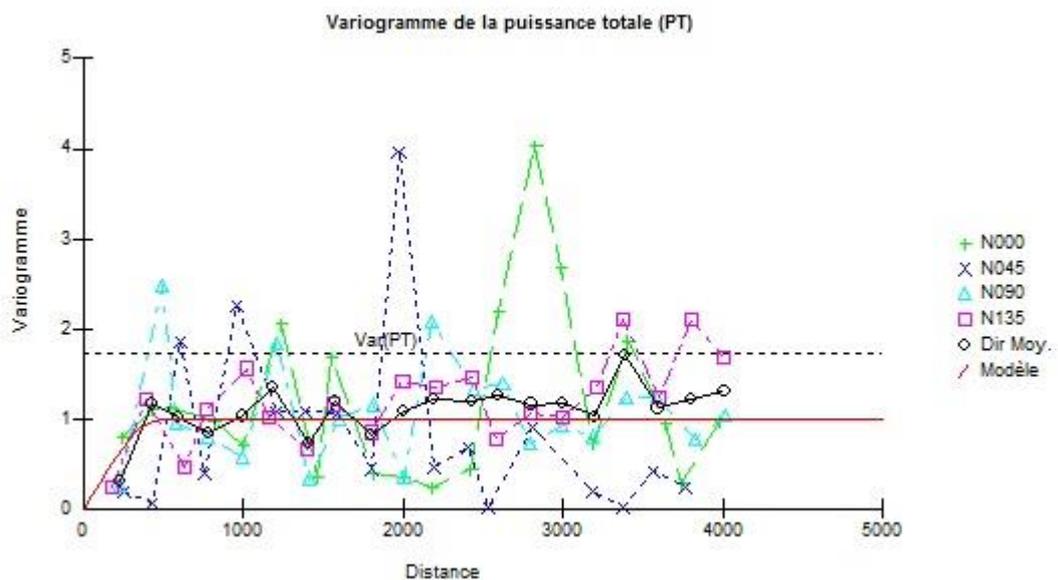
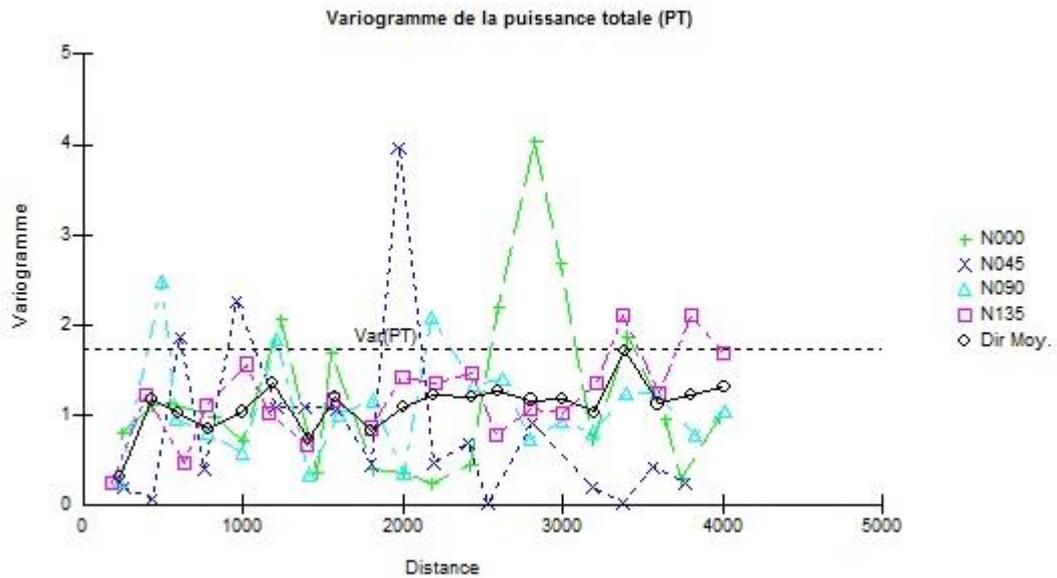


L'histogramme des puissances phosphatées est marqué par une distribution irrégulière des valeurs, avec dominance de puissances 1,5 à 2,5 m et 3 à 3,5 m.

B. Répartition spatiale des paramètres physico-chimiques

Analyse variographique

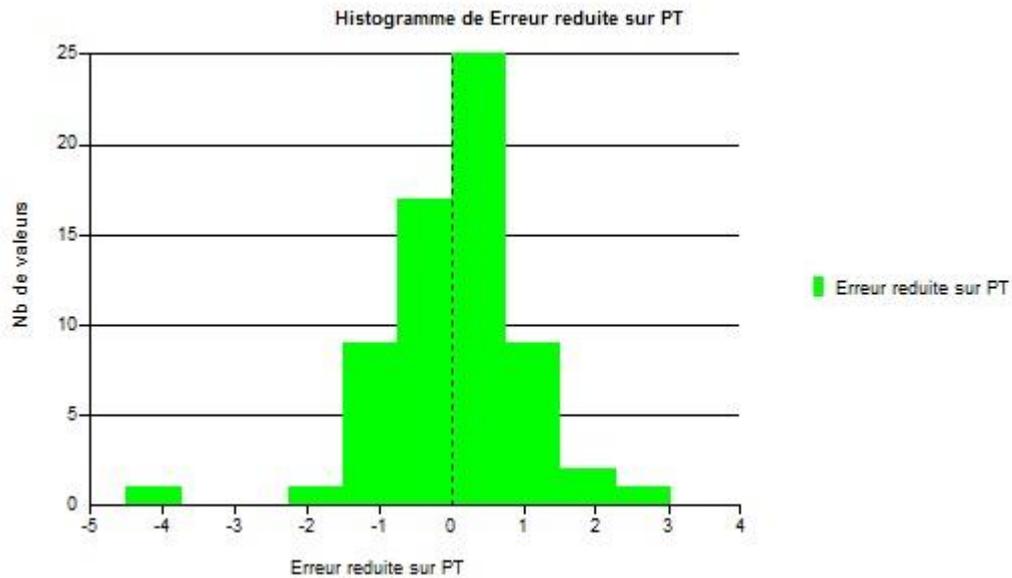
Puissances totales



Le schéma variographique des puissances totales de la couche 4 supérieure, est ajusté aussi par un modèle sphérique, son comportement à

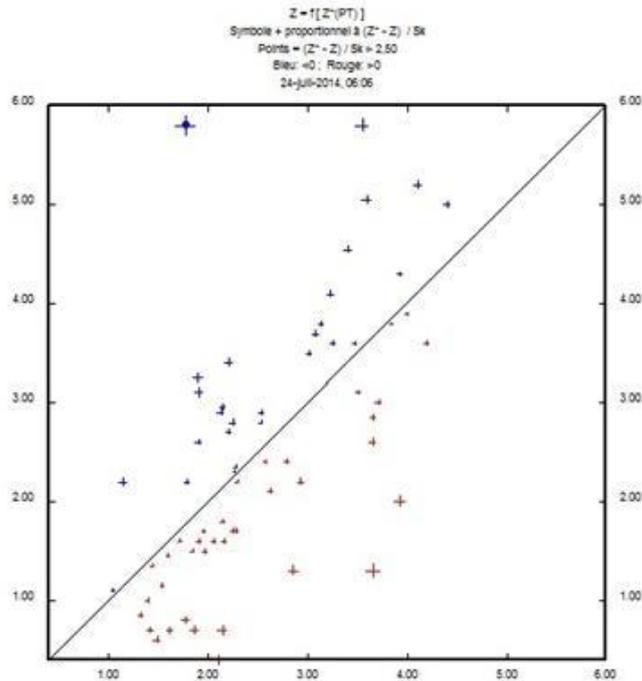
l'origine est linéaire signifiant que la puissance totale en un point se dégrade régulièrement quand on s'éloigne.

La corrélation spatiale entre les points est présentée jusqu'à ce qu'ils atteignent le palier 1 et une distance de 500 m.



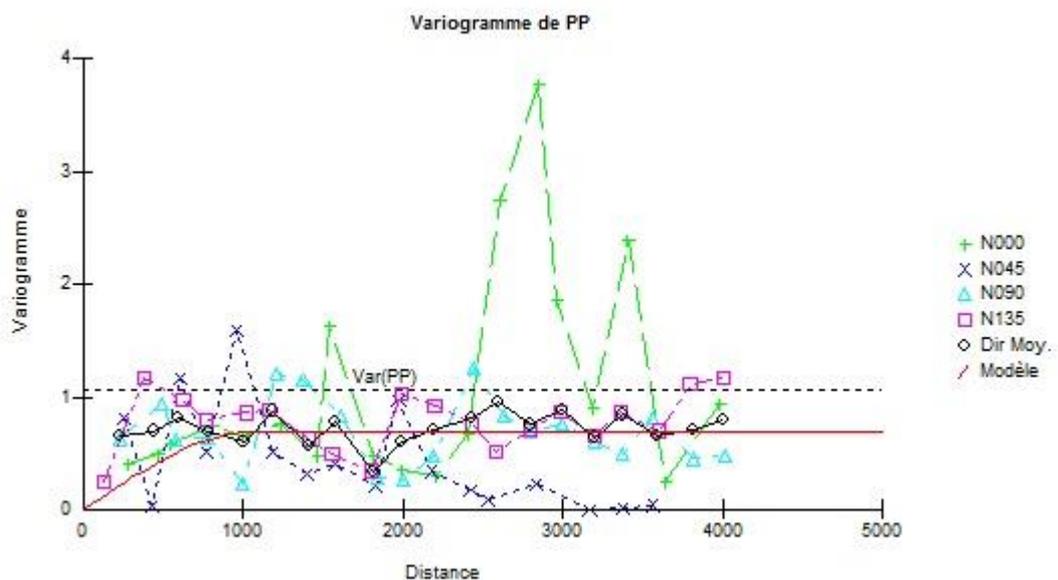
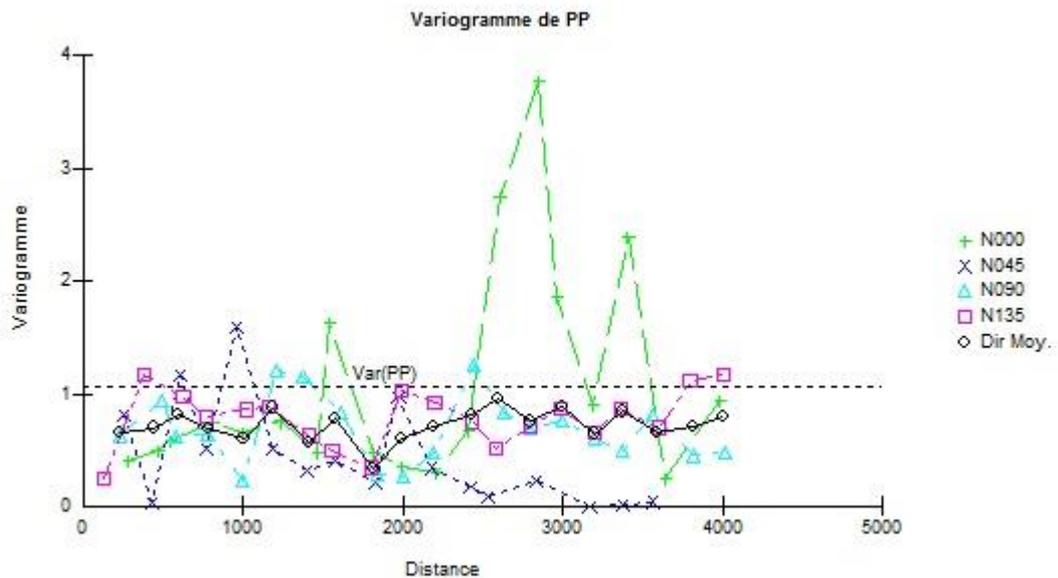
Dans le but de visualiser la justesse du variogramme établi, la distribution de l'erreur réduite sera représentée en histogramme par rapport aux intervalles de puissances.

En ce qui concerne les puissances totales, la distribution des erreurs réduites suit une loi normale, avec une allure presque symétrique par rapport à 0.



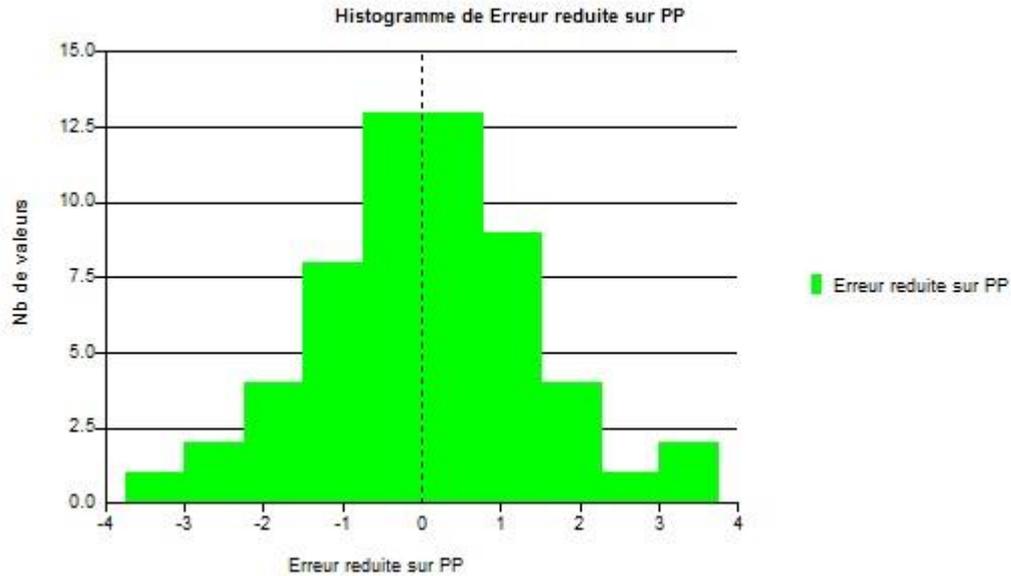
Pour visualiser la qualité et la précision de l'estimation, un nuage de corrélation entre la valeur réelle (Z) et la valeur estimée (Z^*) est réalisé. Dans le cas de la puissance totale illustrée sur la figure ci-dessus, le nuage de points est généralement dispersé autour de la droite de 0, montrant ainsi une corrélation moyenne entre les puissances réelles et les puissances estimées indiquée aussi par un coefficient de corrélation égale à 0.658, donc on peut parler d'une précision d'estimation moyenne.

Puissances phosphatées

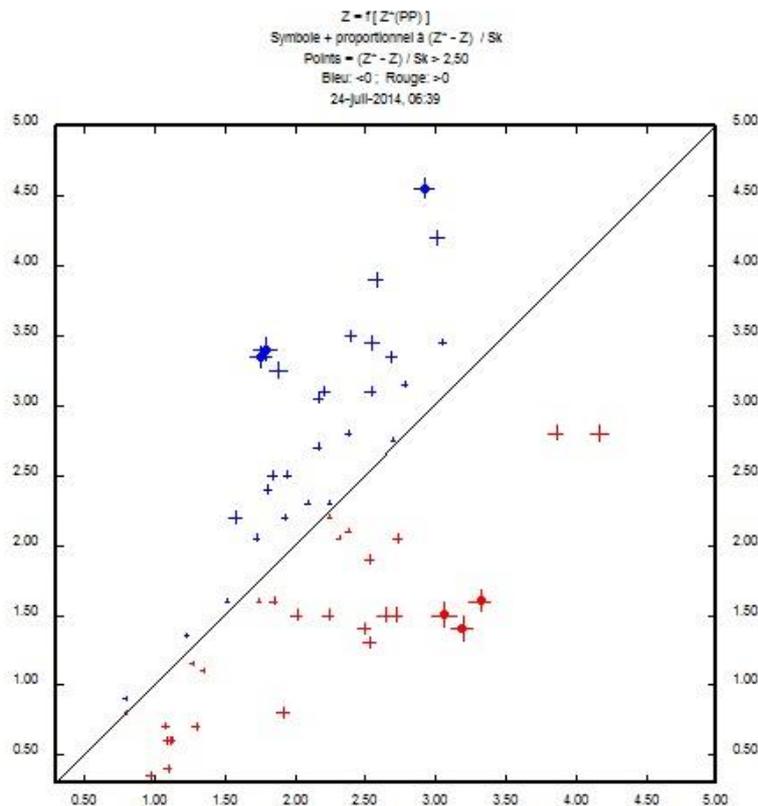


Le variogramme des puissances phosphatées établie est ajusté par un model sphérique, son comportement à l'origine est linéaire indiquant un grand degré de continuité et de régularité spatiale de la variable régionalisée.

La corrélation spatiale entre les points est présentée jusqu'à ce qu'ils atteignent le palier 0.7 et une distance de 1100 m.

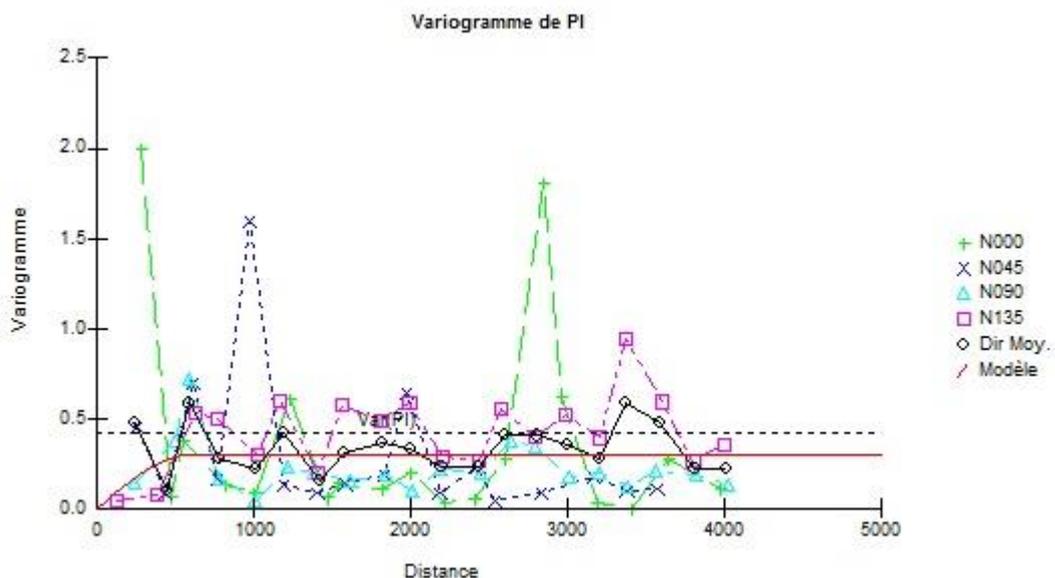
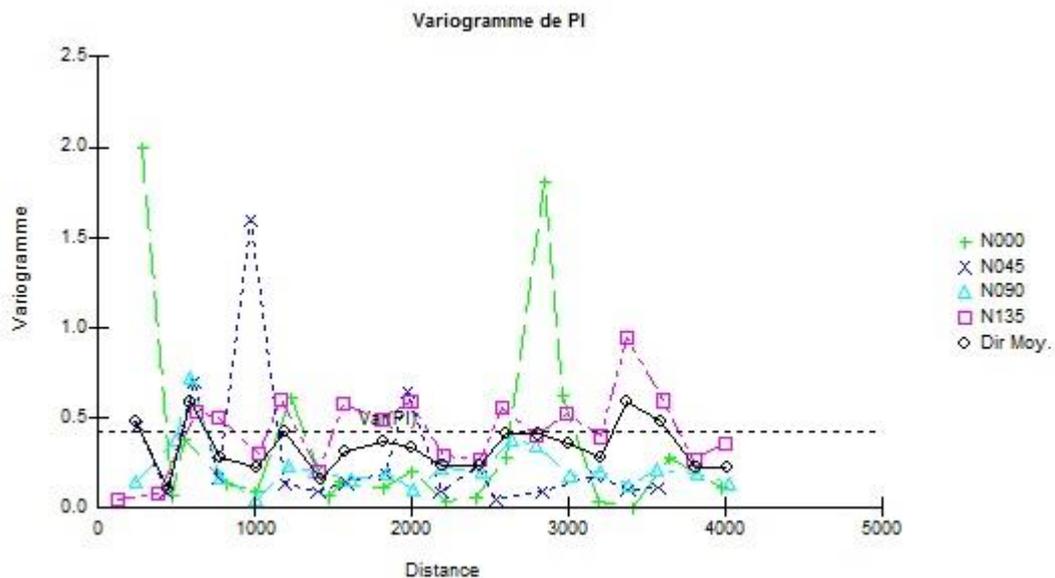


L'histogramme des erreurs réduites des puissances phosphatées au niveau de la couche 4 met en évidence une distribution parfaitement gaussienne, avec une symétrie remarquable autour de 0. En moyenne, l'erreur d'estimation est faible, ceci est argumenté par un coefficient de corrélation très faible qui tend vers 0 entre la valeur estimée (Z^*) et l'erreur.



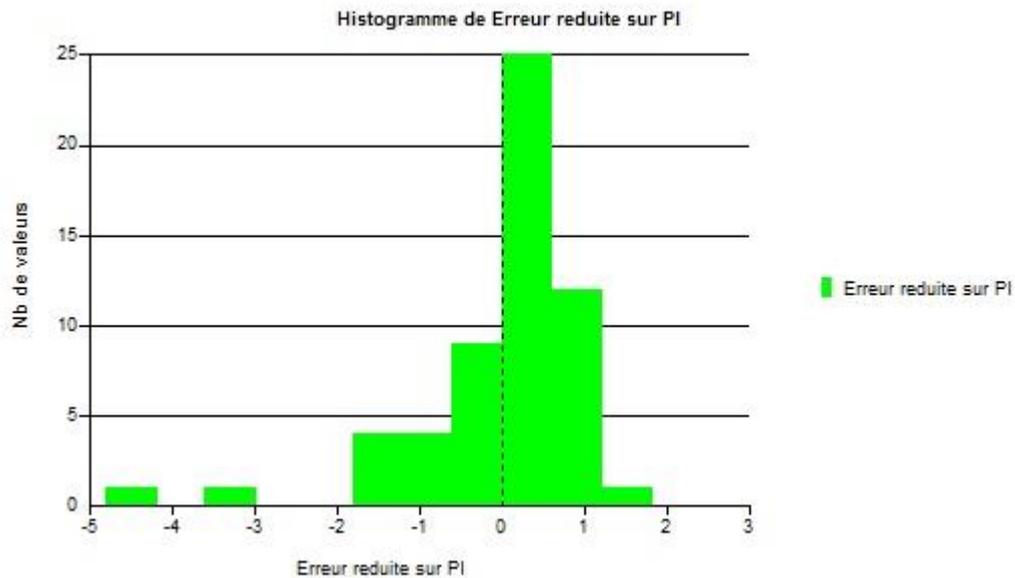
Le nuage de corrélation de la puissance phosphatée entre la valeur estimée (Z^*) et réelle (Z) illustrée sur la figure ci-dessus, est moyennement dispersé autour de la droite de 0. Avec une symétrie remarquable entre les valeurs négatives et celles positives, par rapport à cette droite, indiquant ainsi une corrélation moyenne entre les puissances réelles et les puissances estimées indiquée aussi par un coefficient de corrélation égale à 0.571, d'où la précision d'estimation peut être jugée comme moyenne.

Puissances d'intercalaire

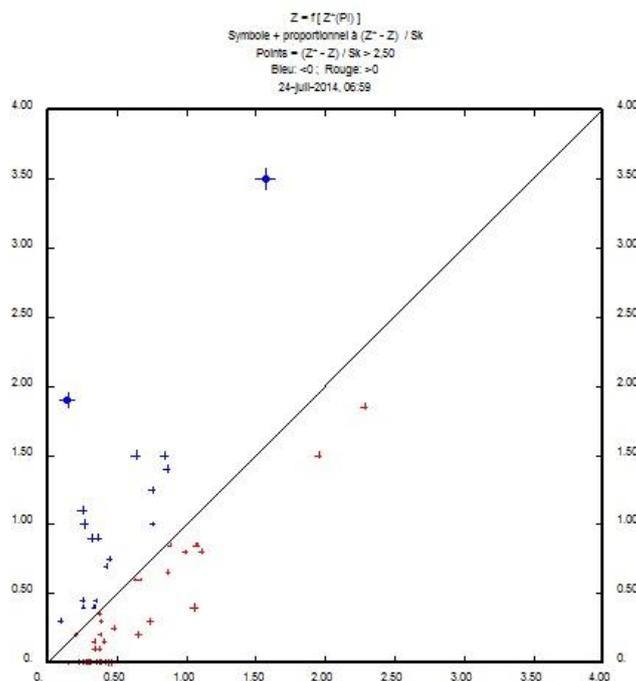


Le présent variogramme des puissances intra-couches, sur lequel un modèle sphérique a été adopté. L'allure de variogramme montre à l'origine un comportement linéaire signifiant que la puissance intra-couches en un point se dégrade régulièrement quand on s'éloigne.

La corrélation spatiale entre les points est présentée jusqu'à ce qu'ils atteignent le palier 0.3 et une distance de 600 m.



La distribution des erreurs réduites suit une loi normale dans un intervalle allant de -5 à 2 avec une rupture et irrégularité entre -5 et -2. La corrélation entre l'erreur réduite et la valeur estimée (Z^*) demeure faible et se limite à 0,026.



La représentation de la corrélation entre les valeurs réelles et estimées est illustrée sur la figure ci-dessus, le nuage de points est très dispersé autour de la droite de 0, d'où une corrélation faibles entre les puissances intra-couches réelles et estimées indiquée aussi par un coefficient de corrélation égale à 0.630, il s'agit donc d'une précision d'estimation faible, les résultats alors sont à critiquer.

Cartographie

Puissance totale (Figure 9)

La carte de répartition spatiale des puissances totales de la couche 4 supérieure, montre une distribution irrégulière au niveau du panneau, dont la majeure partie est occupée par des puissances totales allant de 2 à 3 m.

Puissance phosphatée (Figure 10)

La carte de répartition spatiale des puissances phosphatées de la couche 4 supérieure, permet de relever un comportement des puissances qui évoluent de part et d'autre du panneau (NE et SW) vers le centre où les puissances phosphatées sont les plus grandes et dépassent 2,5m.

Puissance intercalaire (Figure 11)

L'intercalaire C4S/C3I est généralement mince au niveau de tout le panneau 6, son épaisseur est de l'ordre de quelques centimètres.

BPL/B (Figure 12)

La répartition spatiale des teneurs en BPL/B de la couche 4 Supérieure, montre bien qu'il s'agit de niveau à dominance de basse teneurs qui occupent la majeur partie du panneau 6, dont le centre présente des teneurs plus élevées, encore basse en termes de qualités du produit phosphaté. La teneur en BPL/B de la couche 4 supérieure est toujours inférieure à 40%.

CO₂(Figure 13)

La partie Sud à Sud-Ouest du panneau 6, met en évidence des teneurs en CO₂, élevées qui dépassent le seuil de 8,5 %, le reste du panneau montre une répartition évoluant du NE vers le SE, avec dominance des teneurs moyennes.

2. Couche 5

A. Traitement Statistique

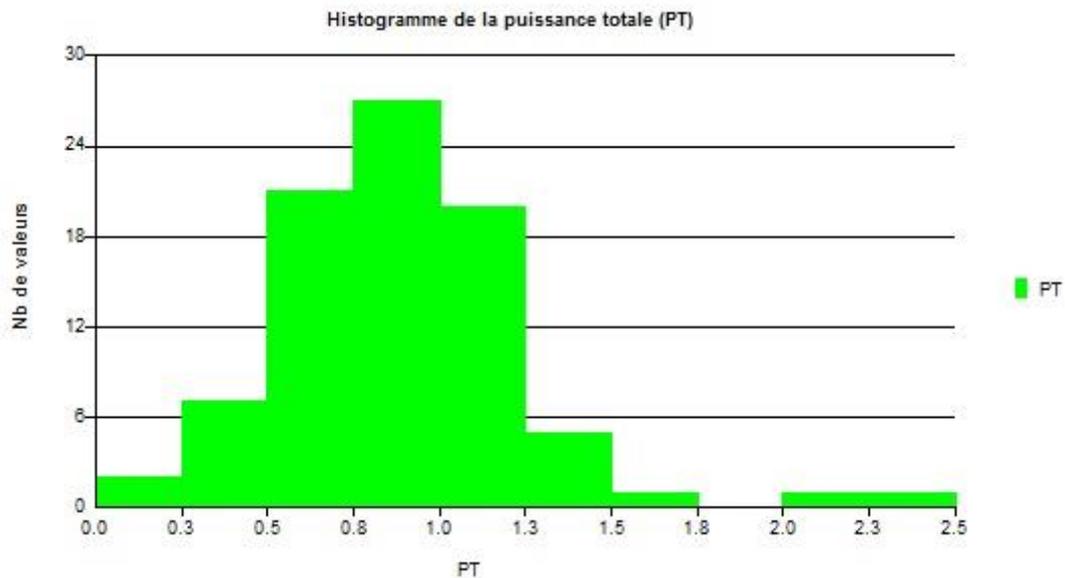
Nom étendu	Effectif	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
PT	85,00	0,15	2,40	0,86	0,37
PI	75,00	0,00	1,05	0,24	0,25
PP	74,00	0,15	2,40	0,66	0,37
BPL_BRUT	81,00	14,84	59,97	39,30	9,22
PP_ACC BPL_BRUT	73,00	0,15	2,40	0,65	0,38
ACC BPL_BRUT	73,00	6,09	105,62	25,21	14,72
CO2_BRUT	81,00	1,23	23,45	13,37	4,80
ACC CO2_BRUT	73,00	1,47	44,74	8,71	6,39
PP_ACC CO2_BRUT	73,00	0,15	2,40	0,65	0,38

PT : Puissance totale

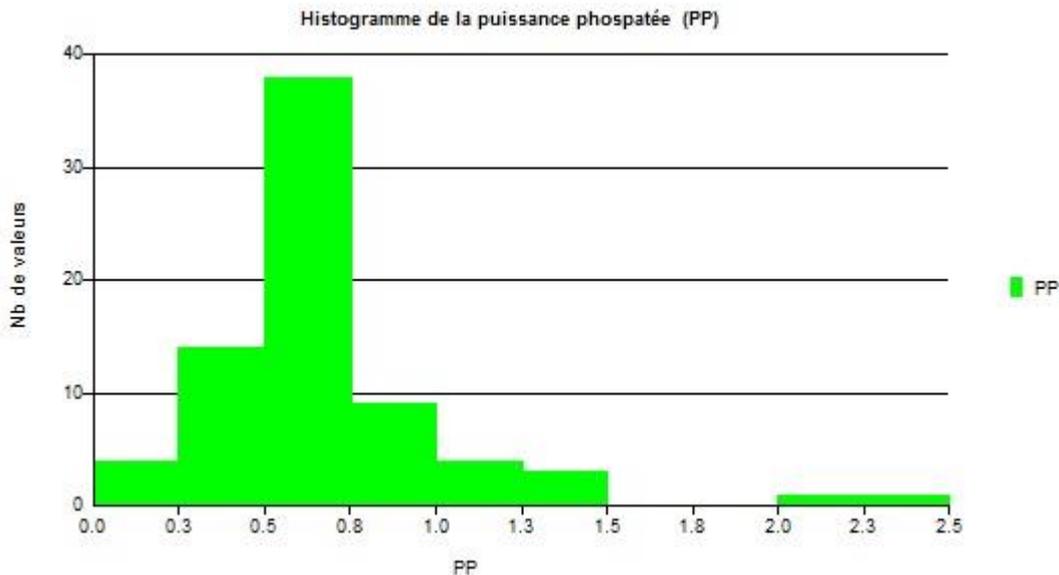
PI : Puissance d'Intercalaire

PP : Puissance phosphatée

Acc : Accumulation



L'histogramme des puissances totales au niveau de la couche 5 supérieure B, est parfaitement uni-modale, dans un intervalle allant de 0 à 2,5 m. La couche 5 supérieure B est dominée par des puissances totales localisées généralement entre 0,8 et 1 m.



La distribution des puissances phosphatées au niveau de la couche 5 supérieure B, est uni-modale. Les puissances allant de 0,5 à 0,8 m sont dominante 12%.

B. Répartition spatiale des paramètres physico-chimiques

J'ai décidé d'interpoler la couche 5 supérieure par la méthode d'inverse des distances, puisque l'ajustement des variogrammes n'est pas faisable dans le cas de la couche 5 supérieure.

Cartographie

Carte de PT (Figure 15)

La répartition des puissances totales de la couche 5, est irrégulière. Les grandes puissances (>1m) sont rencontrées dans les zones, Sud, Nord et Nord-Est du panneau. Le reste comporte des puissances moyennes, sauf dans la partie Ouest du panneau où l'épaisseur de la couche 5, baisse jusqu'à moins de 60 cm.

Carte de PP (Figure 16)

La répartition spatiale des puissances phosphatées de la couche 5, est presque identique à celle des puissances totales.

Carte PI (Figure 17)

La puissance de l'intercalaire au centre du panneau est faible, en fait elle ne dépasse pas 1 m. La partie SSW est marquée par un intercalaire plus puissant (>4 m), ce qui va gêner plus l'exploitation. Le Nord et le Nord-Est comporte les puissances intermédiaires.

Carte BPL/B (Figure 18)

Le panneau 6 est dominé par des teneurs de la couche 5, généralement faibles qui ne dépassent pas 42 % BPL. La partie SSW du panneau marque l'exception avec enregistrement de teneurs qui dépassent 50 % en BPL, mais qui reste toujours très locales.

Carte CO₂/B (Figure 19)

Le comportement des teneurs en CO₂ de la couche 5, est similaire à celui du BPL mais dans le sens inverse; dans la quasi-totalité du panneau les teneurs en CO₂ sont importantes et dépassent 14 %, sauf dans la partie SSW où de faibles teneurs sont rencontrées.

3. Couche 6

A. Traitement statistique

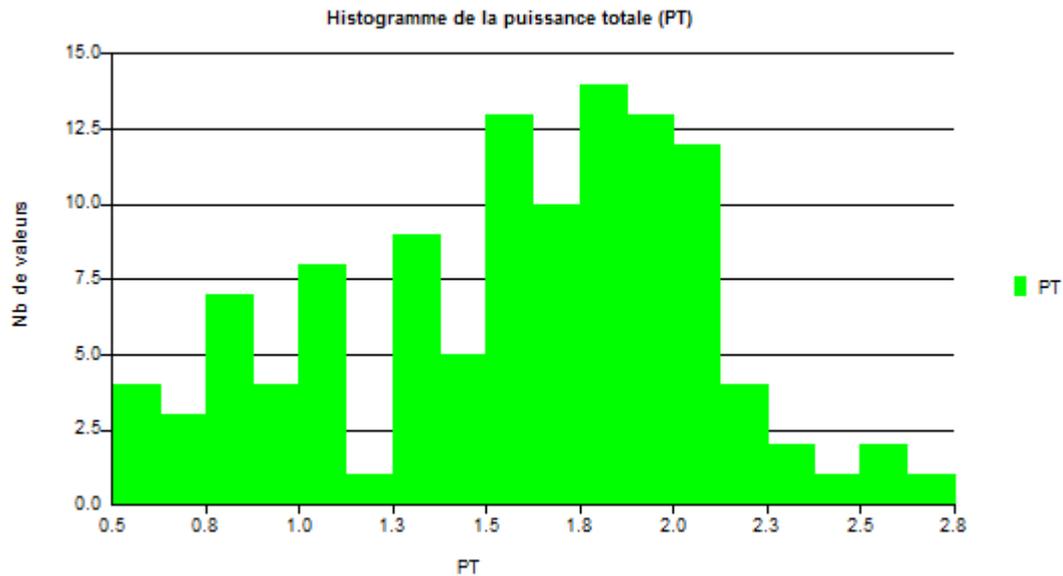
Nom étendu	Effectif	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
PT	113	0,50	2,65	1,56	0,49
PI	109	0,00	1,40	0,13	0,23
PP	109	0,50	2,50	1,44	0,48
BPL_BRUT	109	44,44	67,98	58,88	4,76
PP_ACC BPL_BRUT	109	0,50	2,50	1,44	0,48
ACC BPL_BRUT	109	25,21	154,84	86,14	31,83
CO ₂ _BRUT	109	4,45	15,42	6,82	1,69
PP_ACC CO ₂ _BRUT	109	0,50	2,50	1,44	0,48
ACC CO ₂ _BRUT	109	3,26	21,49	9,44	3,12

PT : Puissance totale

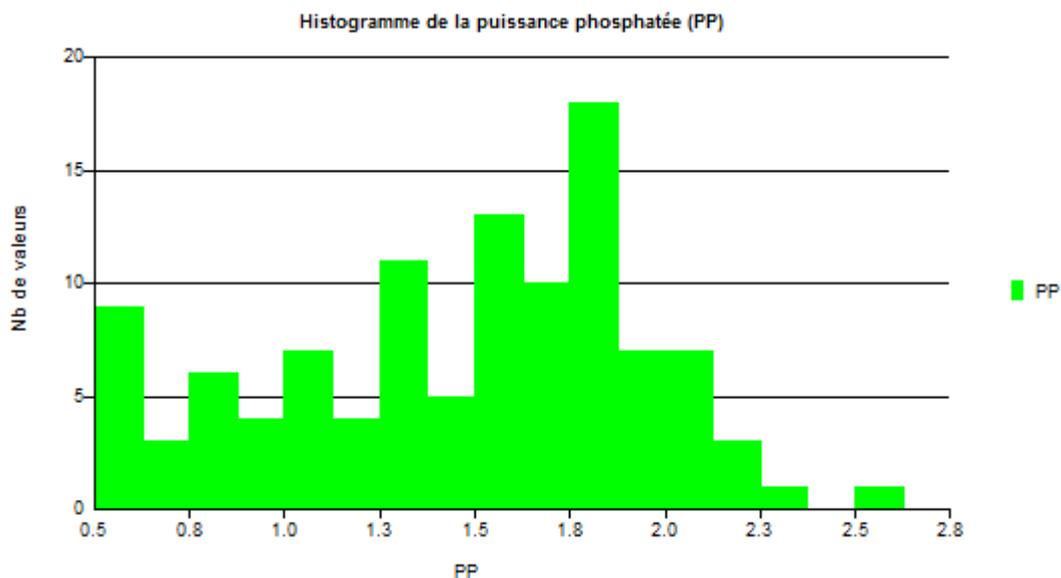
PI : Puissance d'Intercalaire

PP : Puissance phosphatée

Acc : Accumulation



L'histogramme de la puissance totale ci-dessous, met en évidence une population hétérogène marquée par une distribution irrégulière de ses valeurs. L'intervalle de puissances totales compris entre 1,5 et 2,15 m est dominant au niveau de la couche 6 supérieure.

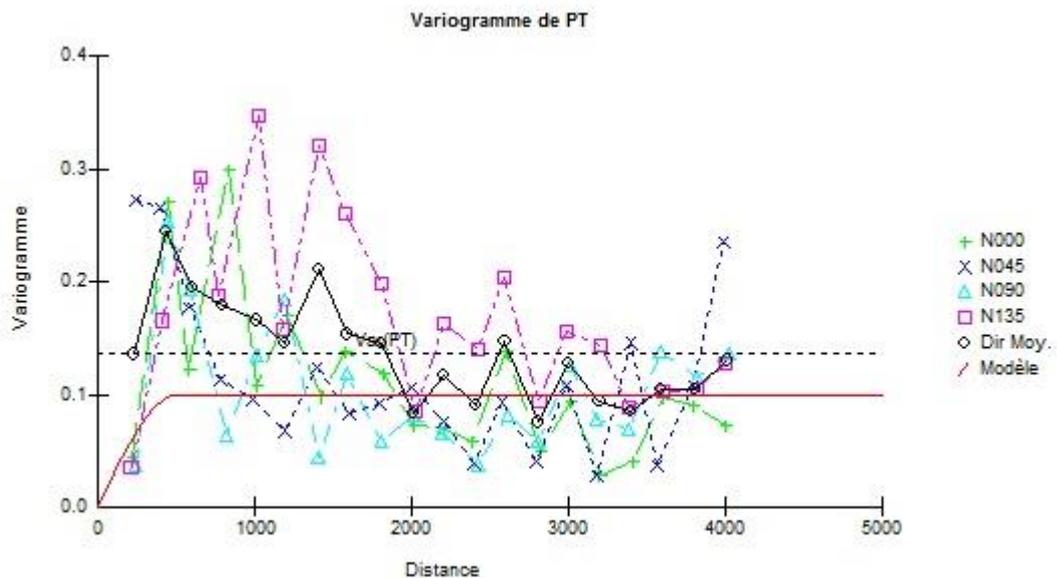
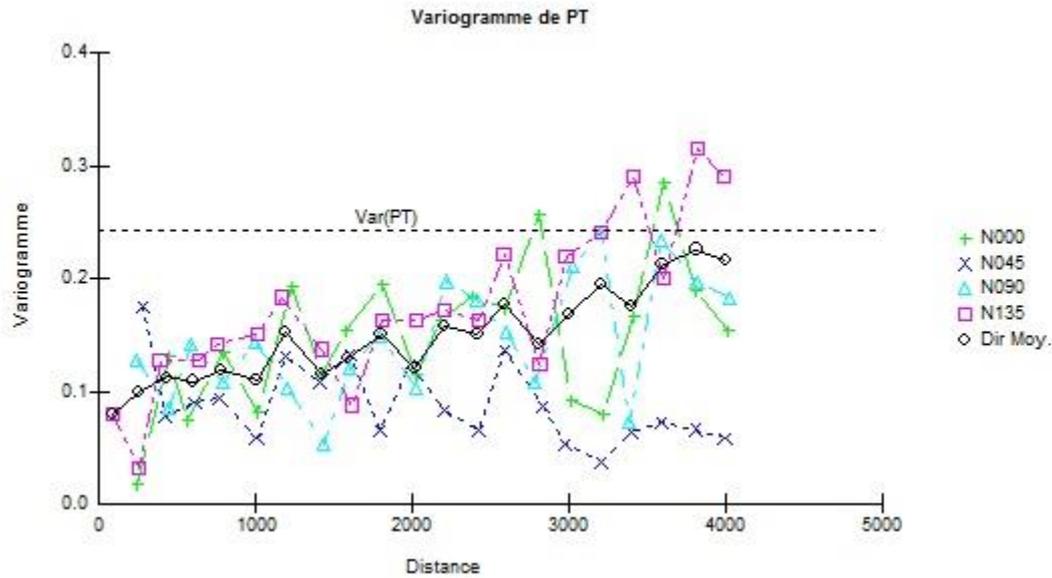


A l'instar de l'histogramme de puissances totales, l'histogramme des puissances phosphatées est marqué par une distribution irrégulière des valeurs dont 11% aux alentours de 1,8 m. La puissance phosphatée minimale au niveau de la couche 6 est de 0,5 m représentant ainsi environ 8%.

B. Répartition spatiale des paramètres physico-chimiques

Analyse variographique

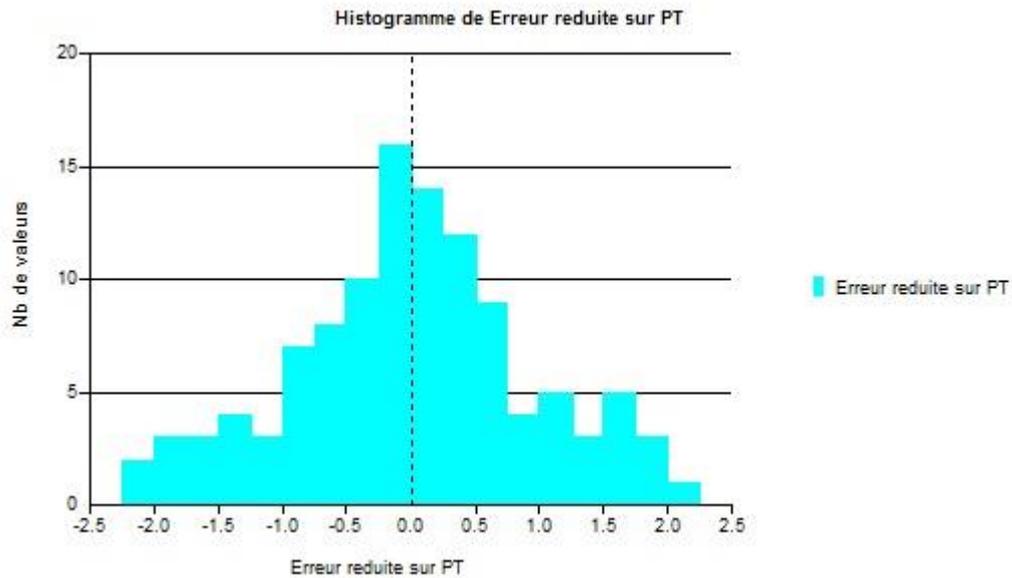
Puissances totales



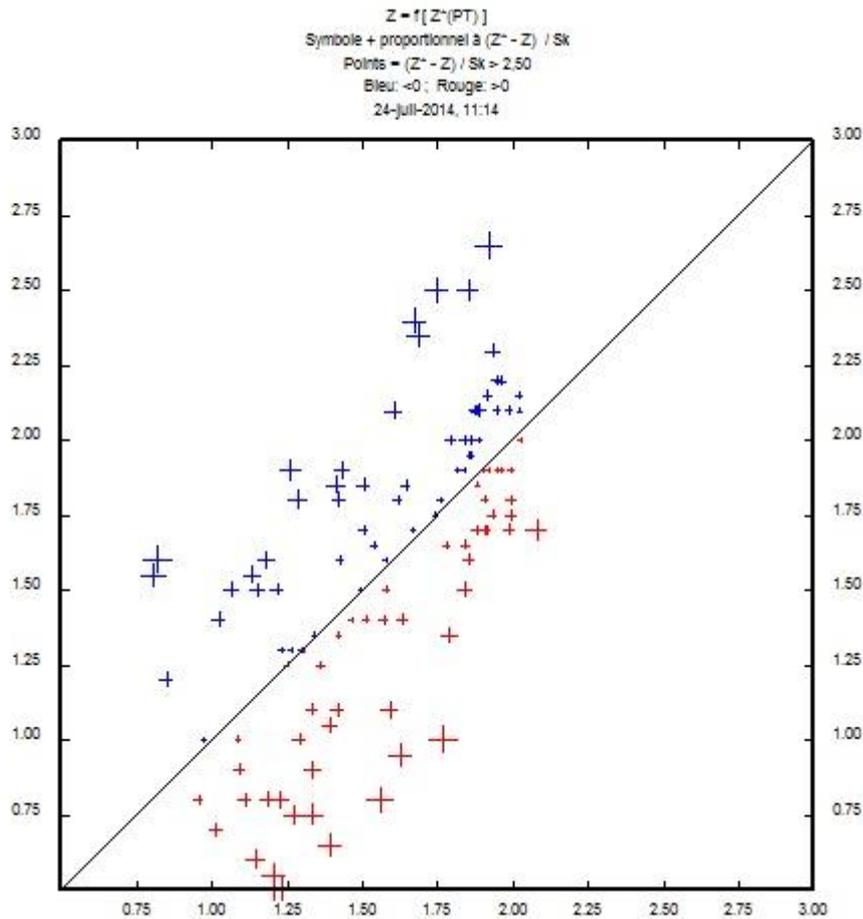
La représentation variographique des puissances totales au niveau de la couche 6 supérieure, est ajusté à son tour par un model sphérique, son comportement à l'origine est également linéaire signifiant que la puissance

totale en un point change de façon progressive quand on s'éloigne, ce qui confirme la continuité spatiale et la régularité de la variable régionalisée.

La corrélation spatiale entre les points est présentée jusqu'à ce qu'ils atteignent le palier 0,15 et une distance de 600 m.

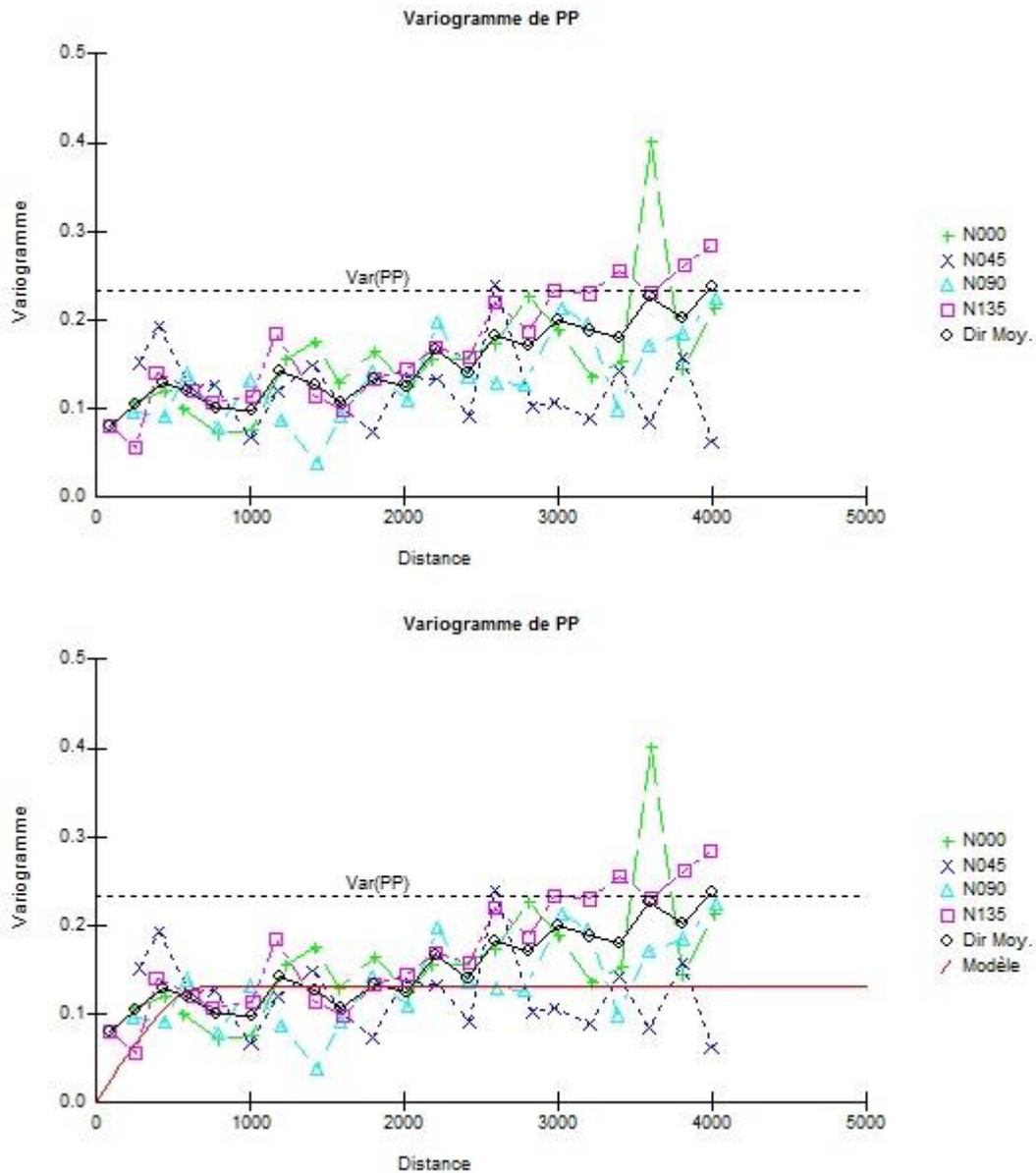


L'histogramme de l'erreur réduite des puissances totales, relève une distribution des erreurs réduites gérée par une loi normale, avec une allure presque symétrique par rapport à 0.



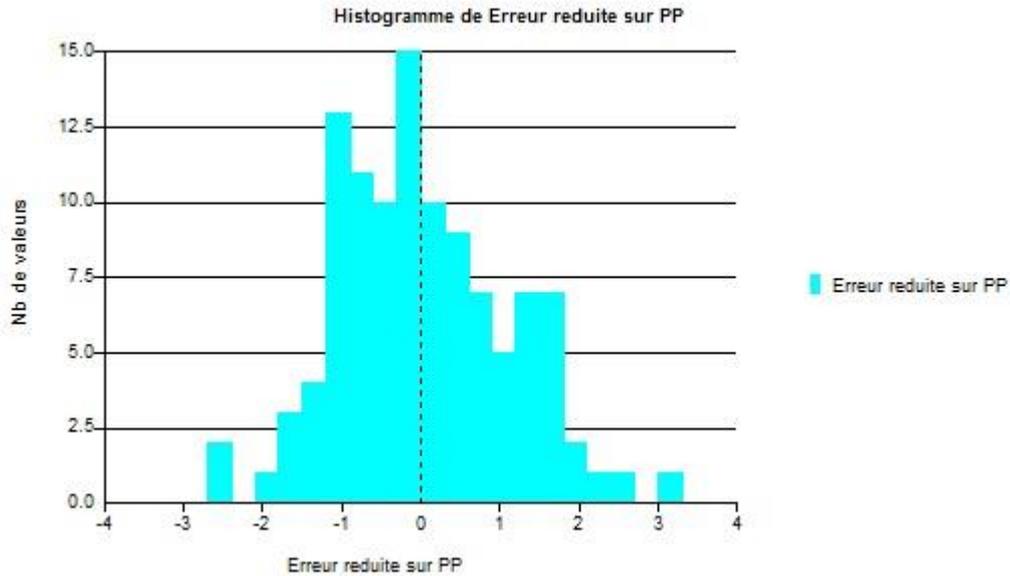
Le nuage de points représenté sur la figure ci-dessus est généralement dispersé autour de la droite de 0. Mais avec un nombre de valeur important qui est très proche de la droite, cette dernière peut être considérée comme un axe de symétrie entre les valeurs positives et celles négatives, tout ça montre qu'il s'agit d'une corrélation moyenne acceptable entre les puissances réelles et les puissances estimées indiquée aussi par un coefficient de corrélation égale à 0.685, donc on peut parler d'une précision d'estimation moyenne à bonne.

Puissances phosphatées

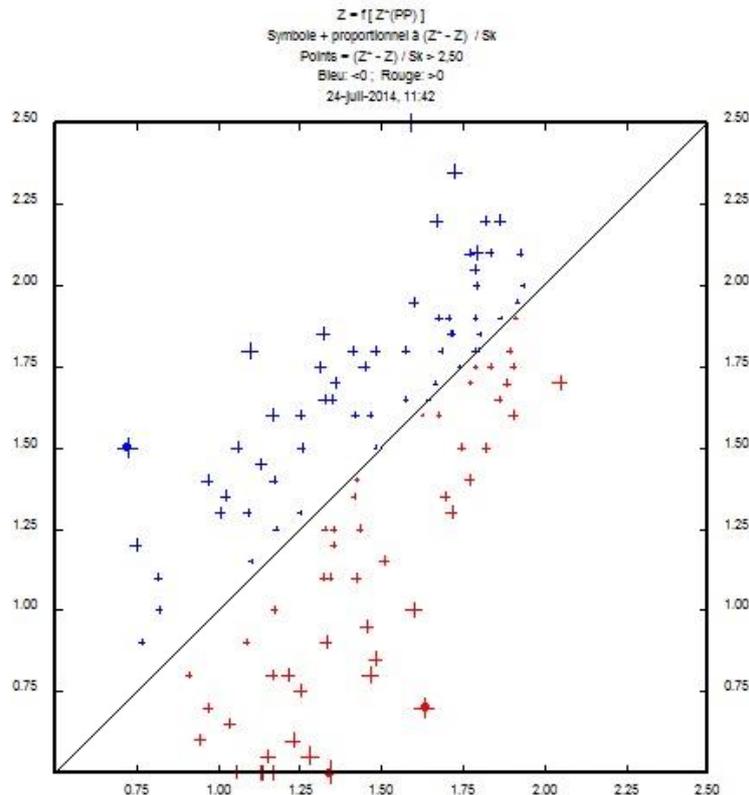


Le variogramme des puissances phosphatées établie est ajusté par un model sphérique, son comportement à l'origine est linéaire indiquant un grand degré de continuité et de régularité spatiale de la variable régionalisée.

La corrélation spatiale entre les points est présentée jusqu'à ce qu'ils atteignent le palier 0,13 et une distance de 700 m.

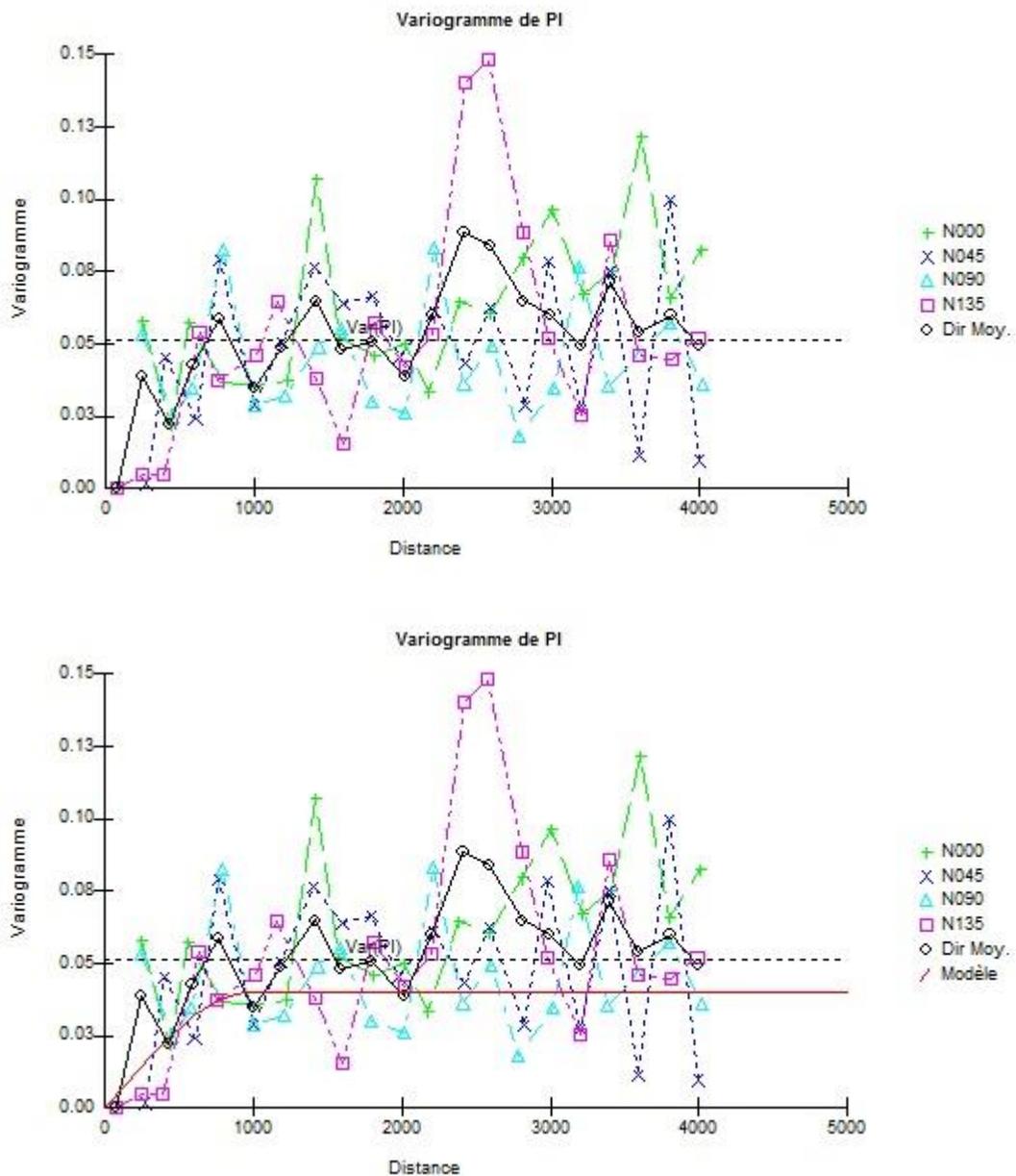


L'histogramme des erreurs réduites des puissances phosphatées au niveau de la couche 6 met en évidence une distribution légèrement irrégulière. En moyenne, l'erreur d'estimation est faible, ceci est argumenté par un coefficient de corrélation très faible qui tend vers 0 entre la valeur estimé (Z^*) et l'erreur.



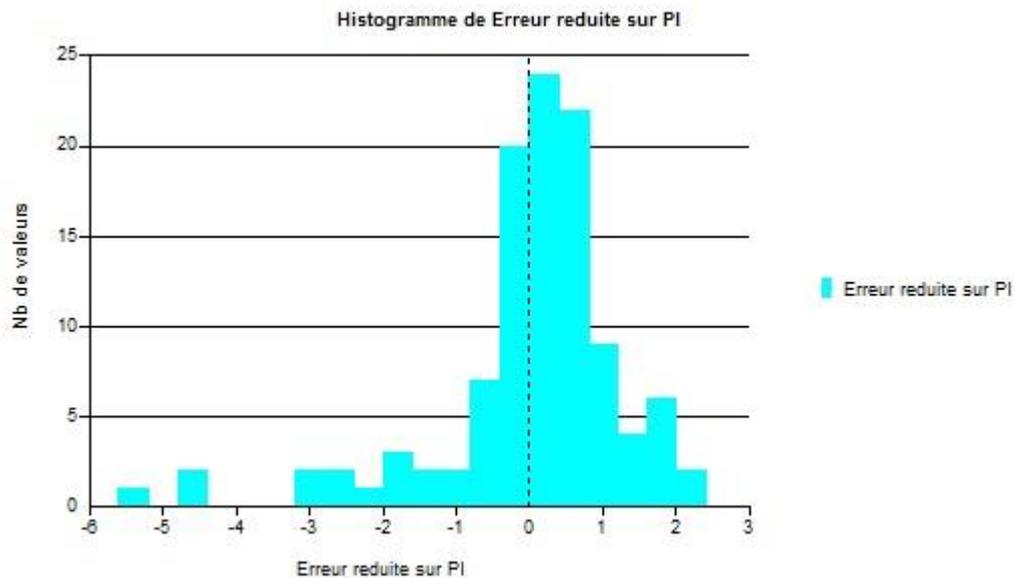
Le nuage de corrélation de la puissance phosphatée entre la valeur estimée (Z^*) et réelle (Z) illustrée sur la figure ci-dessus, est moyennement dispersé autour de la droite de 0. Avec une symétrie bien visible entre les valeurs négatives et celles positives, par rapport à cette droite, indiquant ainsi une corrélation moyenne entre les puissances réelles et les puissances estimées indiquée aussi par un coefficient de corrélation égale à 0.685, d'où la précision d'estimation peut être jugée comme moyenne.

Puissances d'intercalaire

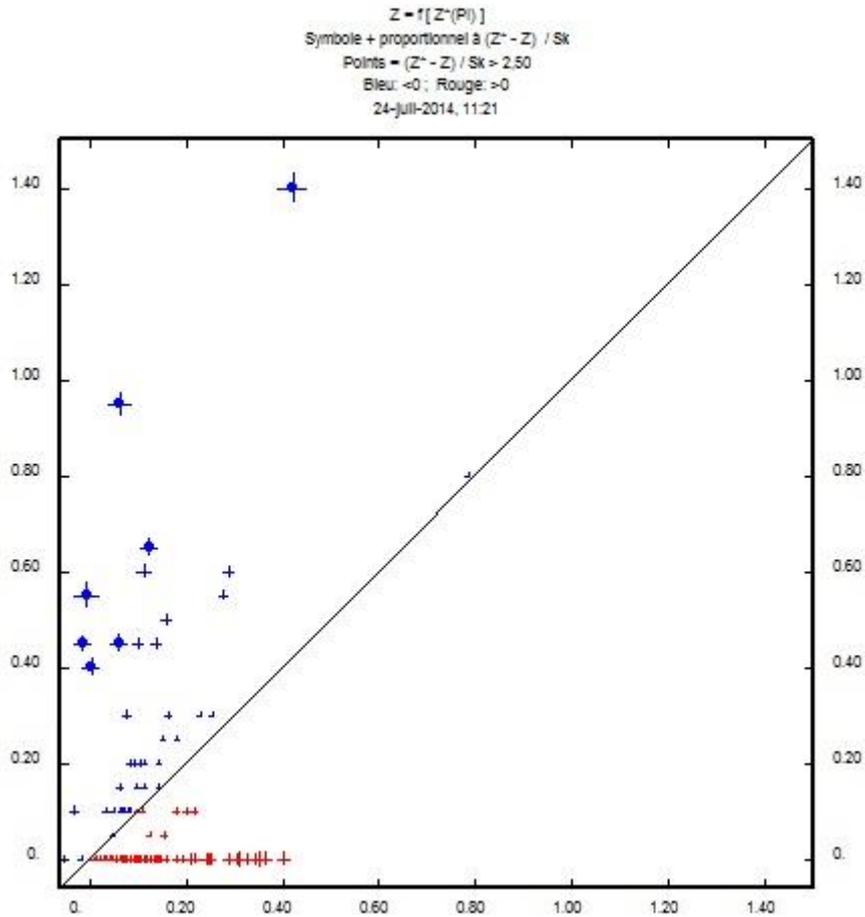


Le variogramme des puissances intra-couches ci-dessus, est fondé sur la base d'un modèle sphérique. L'allure de variogramme montre à l'origine un comportement linéaire signifiant que la puissance intra-couches en un point se dégrade aussi régulièrement quand on s'éloigne ce qui montre une régularité et une continuité de la variable régionalisée.

La corrélation spatiale entre les points est présentée jusqu'à ce qu'ils atteignent le palier 0,04 et une distance de 1000 m.



La distribution des erreurs réduites est compatible avec une loi normale dans un intervalle allant de -6 à 3 avec une rupture et irrégularité entre -6 et -3. La corrélation entre l'erreur réduite et la valeur estimée (Z^*) demeure faible et se limite à 0,235.



La représentation de la corrélation entre les valeurs réelles et estimées est illustrée sur la figure ci-dessus, le nuage de points est très dispersé autour de la droite de 0, d'où une corrélation faible entre les puissances intra-couches réelles et estimées indiquée aussi par un coefficient de corrélation égale à 0.27, il s'agit donc d'une précision d'estimation faible, les résultats alors sont à critiquer.

Cartographie

Puissances totales (Figure 21)

La carte de répartition spatiale des puissances totales au niveau de la couche 6, montre une irrégularité dans la répartition, les puissances les plus importantes sont rencontrées à l'extrême Sud-Ouest du panneau, là les puissances dépassent 2 m. On note la disposition de faibles puissances en couloir recoupant le panneau selon une direction NW-SE. Vers le nord-est du panneau les puissances totales deviennent plus importantes dans les environs de 1.90 m.

Puissances phosphatées (Figure 22)

Le comportement des puissances phosphatées au niveau de la couche 6 est similaire à celui des puissances totales, avec la même zonalité précitée.

Puissances d'Intercalaire (Figure 23)

Les puissances d'intercalaire marquent une évolution en allant du NW vers le SE. L'intercalaire est absent dans les parties NNW et NE.

BPL/B (Figure 24)

Les teneurs en BPL/B les plus élevées sont localisées dans la partie NE et l'extrême SW du panneau, là où les teneurs dépassent 62 %.

Les plus faibles teneurs inférieures à 60 % se présentent dans deux foyers à l'Est de la partie centrale du panneau.

CO₂/B (Figure 25)

D'après la carte de répartition spatiale des teneurs en CO₂, on peut dégager une évolution progressive des teneurs en allant du NW où les teneurs faibles sont présentes, au SE du panneau où les teneurs augmentent.

La superposition de la carte du BPL/B avec celle du CO₂, met en évidence une relation inversée entre le BPL et le CO₂, ceci est bien argumenté par la bonne superposition des deux foyers dont on a parlé précédemment dans la carte du BPL, avec deux autres dans la carte du CO₂. Quand les teneurs en BPL augmentent celles en CO₂, diminuent et vice versa.

VII. ESTIMATION DES RESSOURCES

C'est une phase très importante pour tout le projet minier, elle est réalisée à la base des résultats achevés par l'approche géostatistique, notamment les puissances moyennes qui vont servir pour le calcul des réserves.

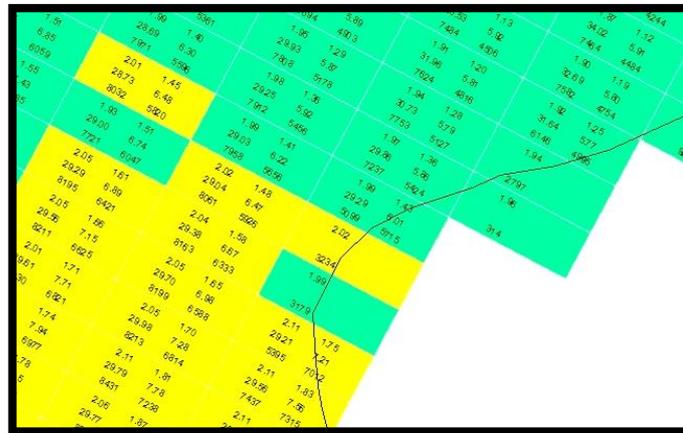
La méthode de calcul adopté se base sur la multiplication des puissances moyennes de chaque case de dimension 40*100 m² avec sa surface calculée via GDM. Les résultats sont synthétisés dans le tableau suivant :

Couche	PT	PP	Surface totale (m ²)	Surface minéralisée (m ²)	Volume total (m ³)	Volume minéralisé (m ³)
C4 Sup	2.51	2.1	7 493 560	7 493 560	18 808 835	15 736 475
C5	0.86	0.66	8 842 176	8 842 176	7 604 272	5 835 836
C6	1.56	1.44	10 362 816	10 362 816	16 165 993	14 922 455

La couche 4 supérieure est la plus importante de point de vue volume de phosphate, suivie de la couche 6 et de la couche 5 successivement. Sachant que la couche 6 est présente partout dans le panneau et la couche 4 supérieure est absente dans des parties vers le Nord.

VIII. LISTING CASES

Pour piloter les futures exploitations au niveau du panneau 6, j'ai découpé le panneau en cases d'exploitation de dimension 100m*40m (Dimension adoptée au niveau du bassin des Gantour), ces cases seront les futures tranchés d'exploitation. Sur chaque case figure un ensemble de paramètres qui intéresse l'exploitation tel que les puissances et les volumes de phosphate.



Listing cases

Les cartes de Listing Cases élaborées, renseignent sur l'évolution et la répartition spatiale des volumes de phosphates. Dans les trois couches une répartition hétérogène des volumes de phosphate est remarquable. (Figure 14,20 et 26).

Ces cartes seront très importantes pour les programmes d'exploitation, à la base de ces cartes l'exploitant peut implanter un scénario d'extraction du phosphate, en déterminant les zones par lesquelles elle va commencer en fonction des exigences clientèles (Clients=usine de calcination et Laverie).

CONCLUSION

La présente étude, a été engagée dans le cadre de la modélisation géostatistique du panneau 6, qui fait partie du gisement de M'Zinda. L'étude a été consacrée aux niveaux miniers : couche 4 supérieure, couche 5 supérieure B et couche 6 supérieure.

Les données brutes sont relevées du terrain par l'intermédiaire des ouvrages de reconnaissance implantés dans et autour du secteur étudié. Ces données présentent un aspect ponctuel, du fait qu'on ne peut pas échantillonner tout le terrain. L'objectif est alors d'estimer avec une grande précision les paramètres étudiés au niveau des zones non échantillonnées et non explorées. Le krigeage est la méthode adoptée pour l'étude du panneau 6. Cette approche concrète a révélé l'importance de l'analyse variographique. Elle permet en effet à l'instar des méthodes déterministes, de modéliser la répartition spatiale des paramètres étudiés.

L'analyse variographique des paramètres physico-chimiques étudiés a permis de mesurer leur variabilité spatiale, pour que les résultats soient plus précis, il est indispensable de bien ajuster les variogrammes.

En général, les variogrammes élaborés sont bien ajustés aux modèles proposés, les erreurs sur l'estimation sont faibles.

Les trois niveaux étudiés montrent un potentiel phosphaté considérable, mais la qualité n'est pas assez bonne.

Les programmes et les stratégies d'exploitation des niveaux miniers traités dans le cadre de cette étude, seront fondés sur les résultats achevés, tandis que l'estimation est jugée de bonne, les risques sont alors minimisés. Il reste uniquement de synthétiser les données issues de cette étude et les transformer en configurations facilement compréhensible et interprétable pour faciliter le pilotage et l'optimisation de l'exploitation.

Références bibliographiques

- Documents OCP SA (confidentiel)
- J.P. Chil_es and P. Del_ner. Geostatistics. Wiley, 1999.
- N.A.C Cressie. Statistics for spatial data. Series in Probability and Mathematical statistics. Wiley, 1994.
- P.J. Diggle, R.A. Moyeed, and J.A. Tawn. Model based geostatistics. Journal of the Royal Statistical Society, serie A, Applied Statistics, 1998.
- Lantu_ejoul. Geostatistical simulation. Springer, 2002.
- Géostatistiques, [en ligne], <http://www.geovariances.com>
- Cours de géostatistiques, [en ligne], <http://www.univ-orleans.fr>
- Concepts et méthodes de la géostatistique, [en ligne], <http://cg.ensmp.fr>

ANNEXE A

Cartographie de la couche 4 Supérieure

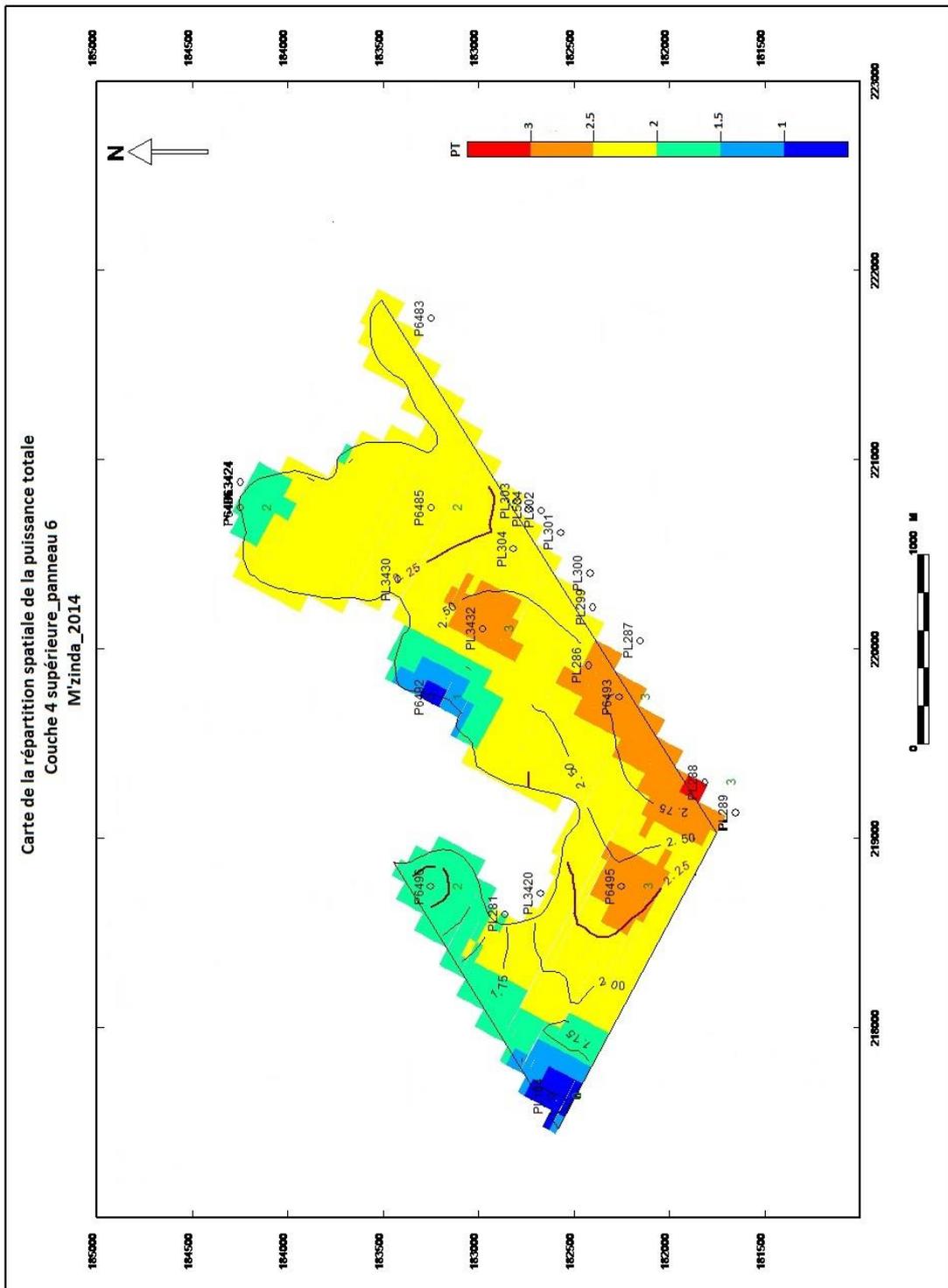


Figure 9 : Carte de la répartition spatiale de la puissance totale de la couche 4 supérieure P_6

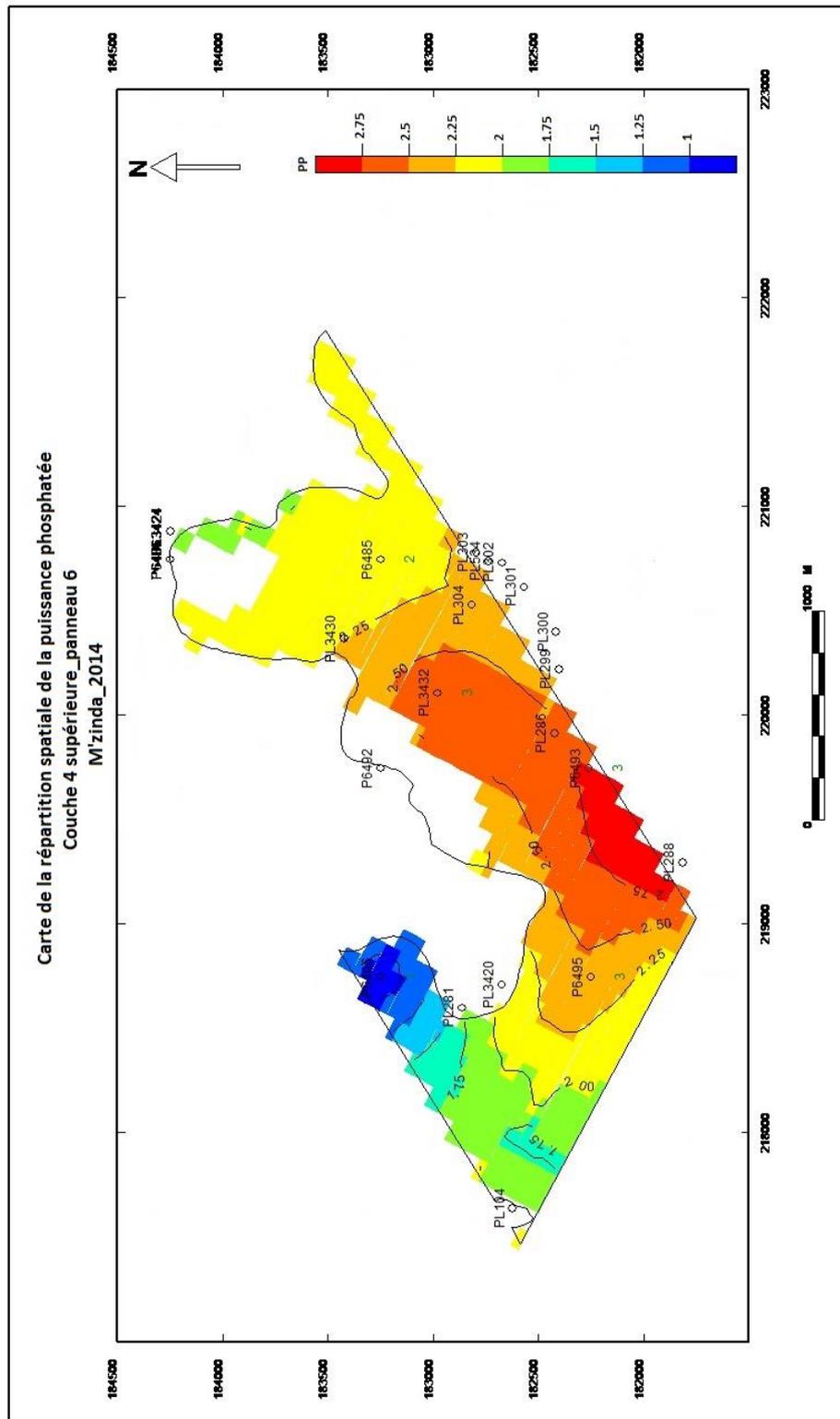


Figure 10 : Carte de la répartition spatiale de la puissance phosphatée de la couche 4 supérieure P_6

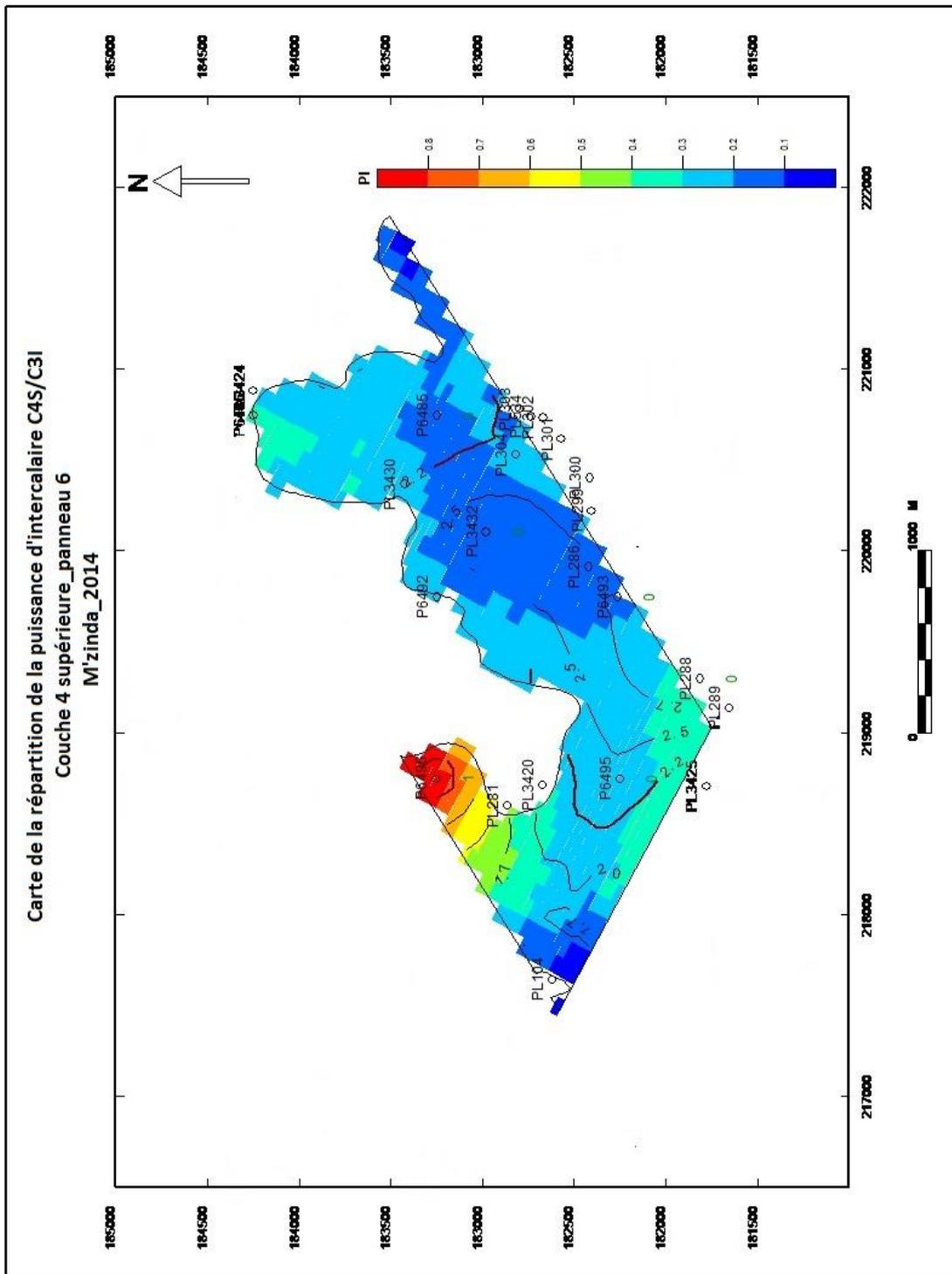


Figure 11 : Carte de la répartition spatiale de la puissance d'intercalaire C4S/C3I de la couche 4 supérieure P_6

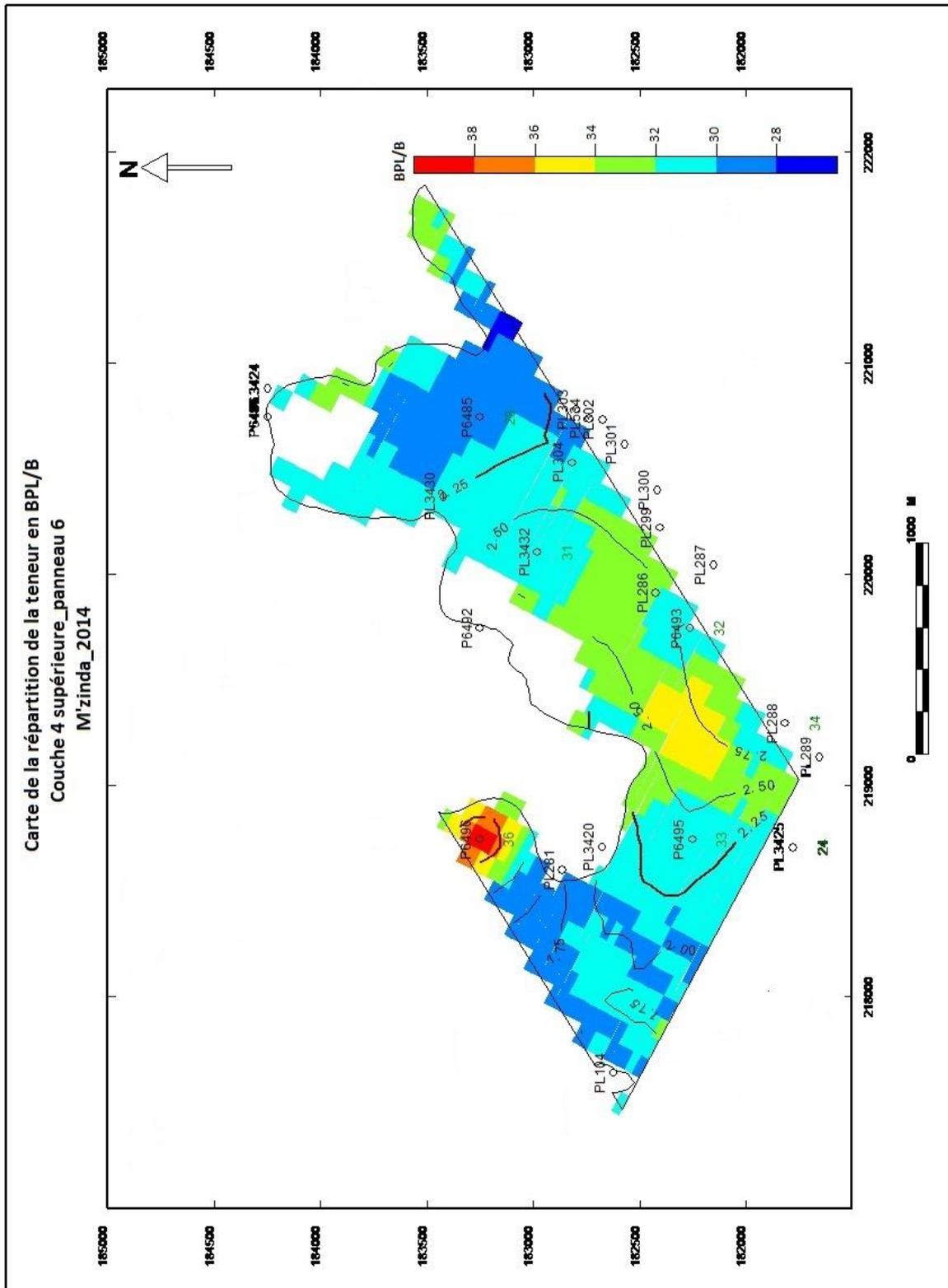


Figure 12 : Carte de la répartition spatiale de la teneur en BPL/B de la couche 4 supérieure P_6

Listing cases de la couche 4 supérieure
gisement : M'zinda_panneau 6
2014

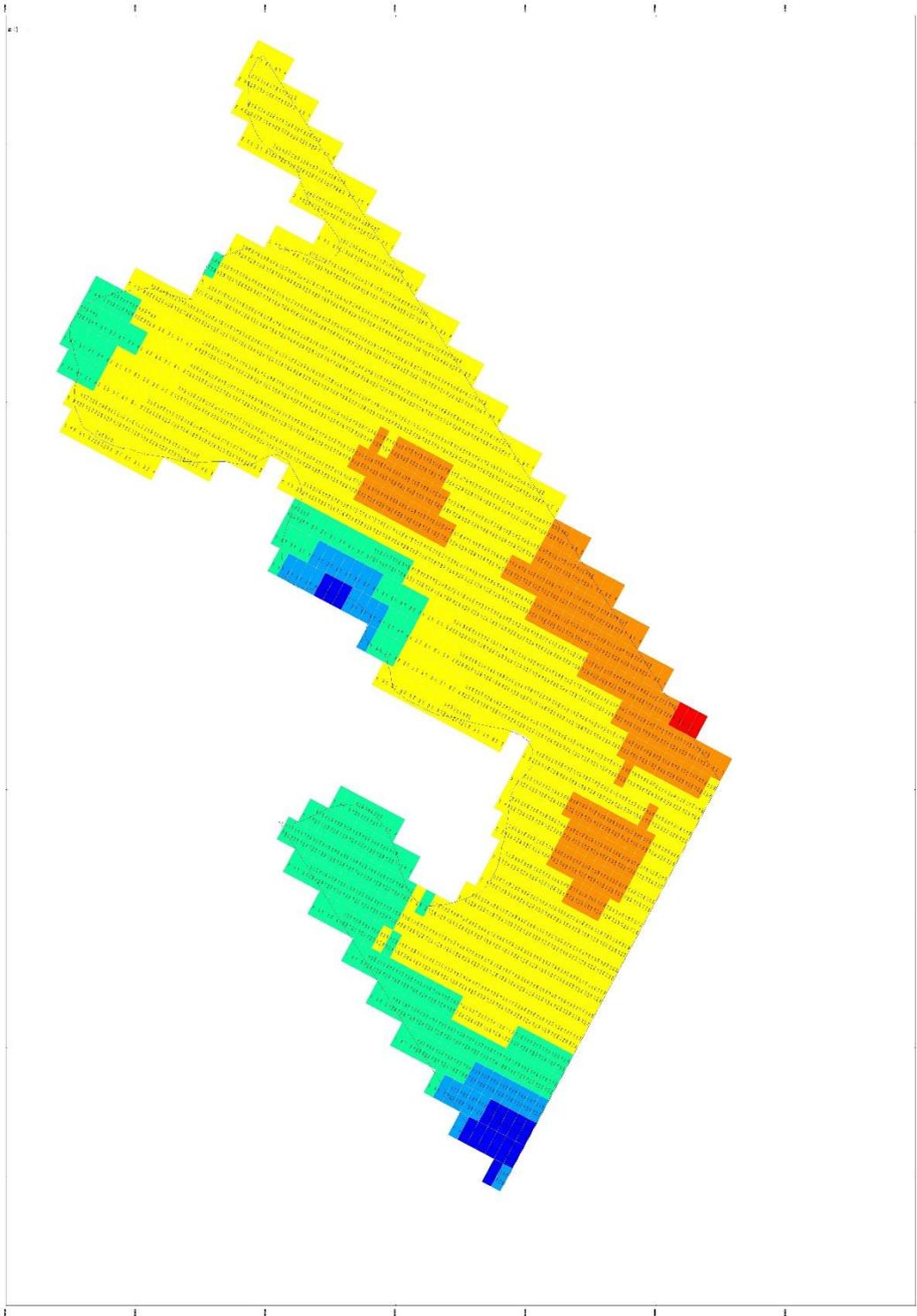


Figure 14 : Listing cases de la couche 4 supérieure
Panneau 6

ANNEXE B

Cartographie de la couche 5

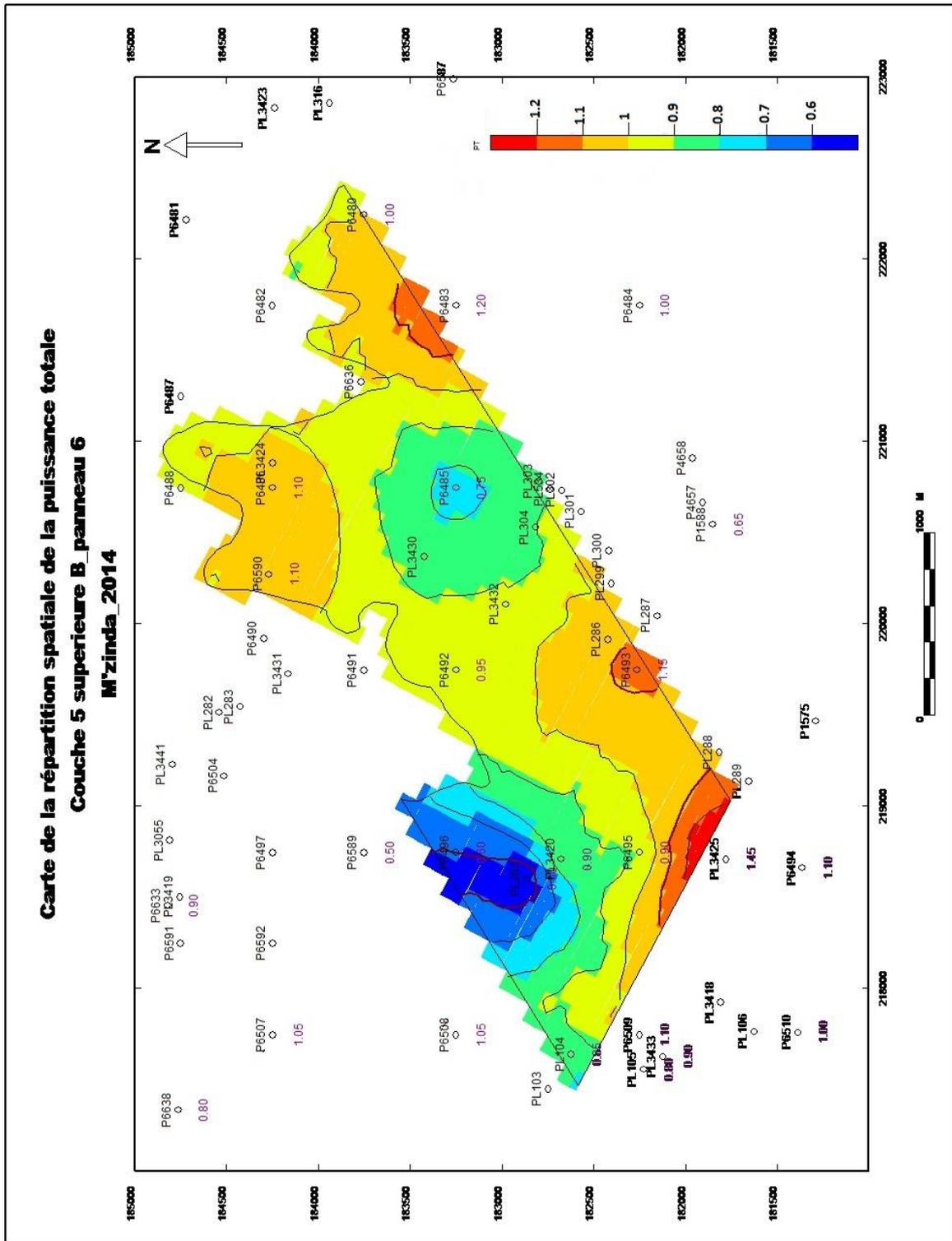


Figure 15 : Carte de la répartition spatiale de la puissance totale de la couche 5 supérieure B P_6

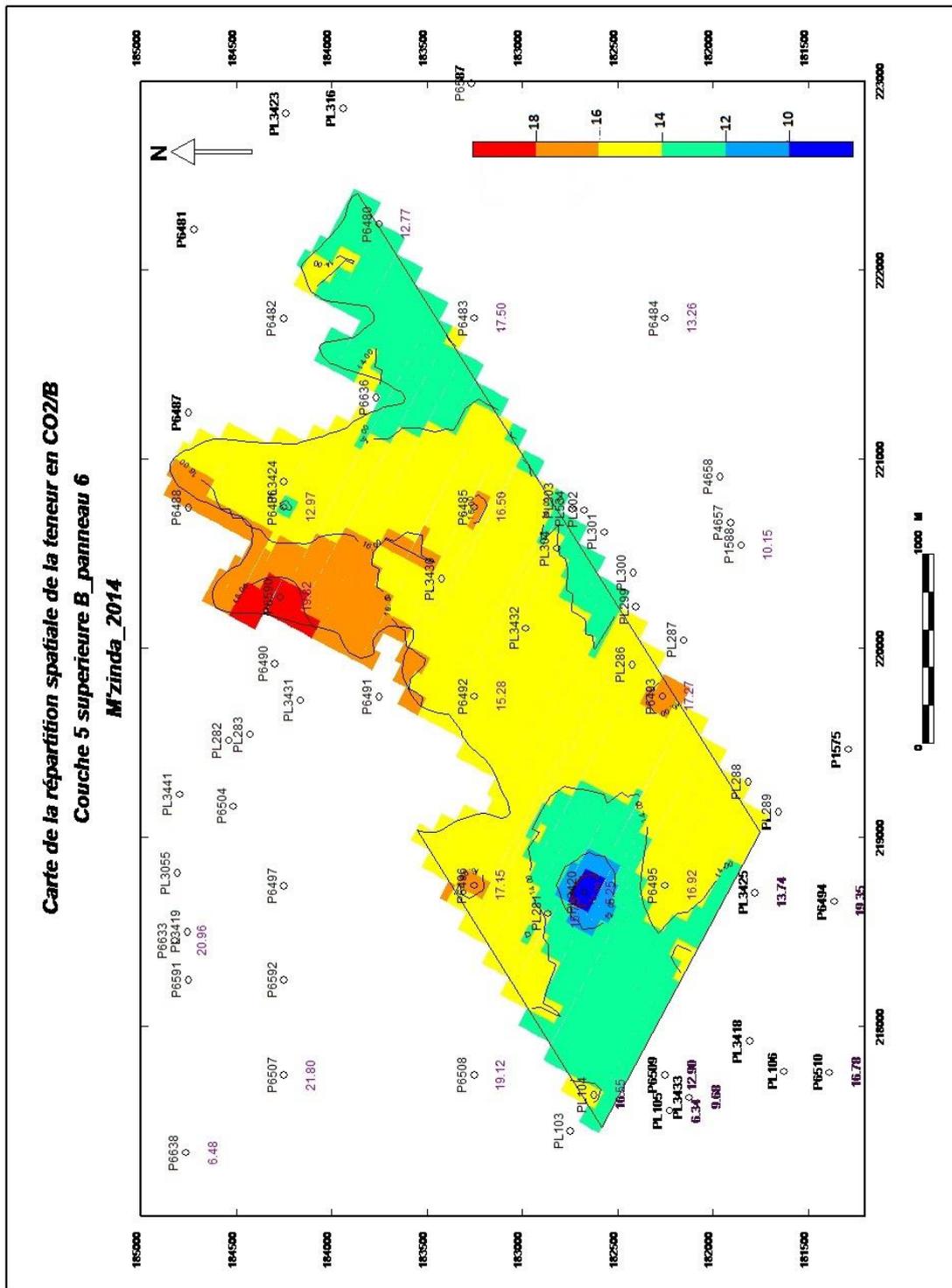


Figure 19 : Carte de la répartition spatiale de la teneur en CO₂/B de la couche 5 supérieure B P_6

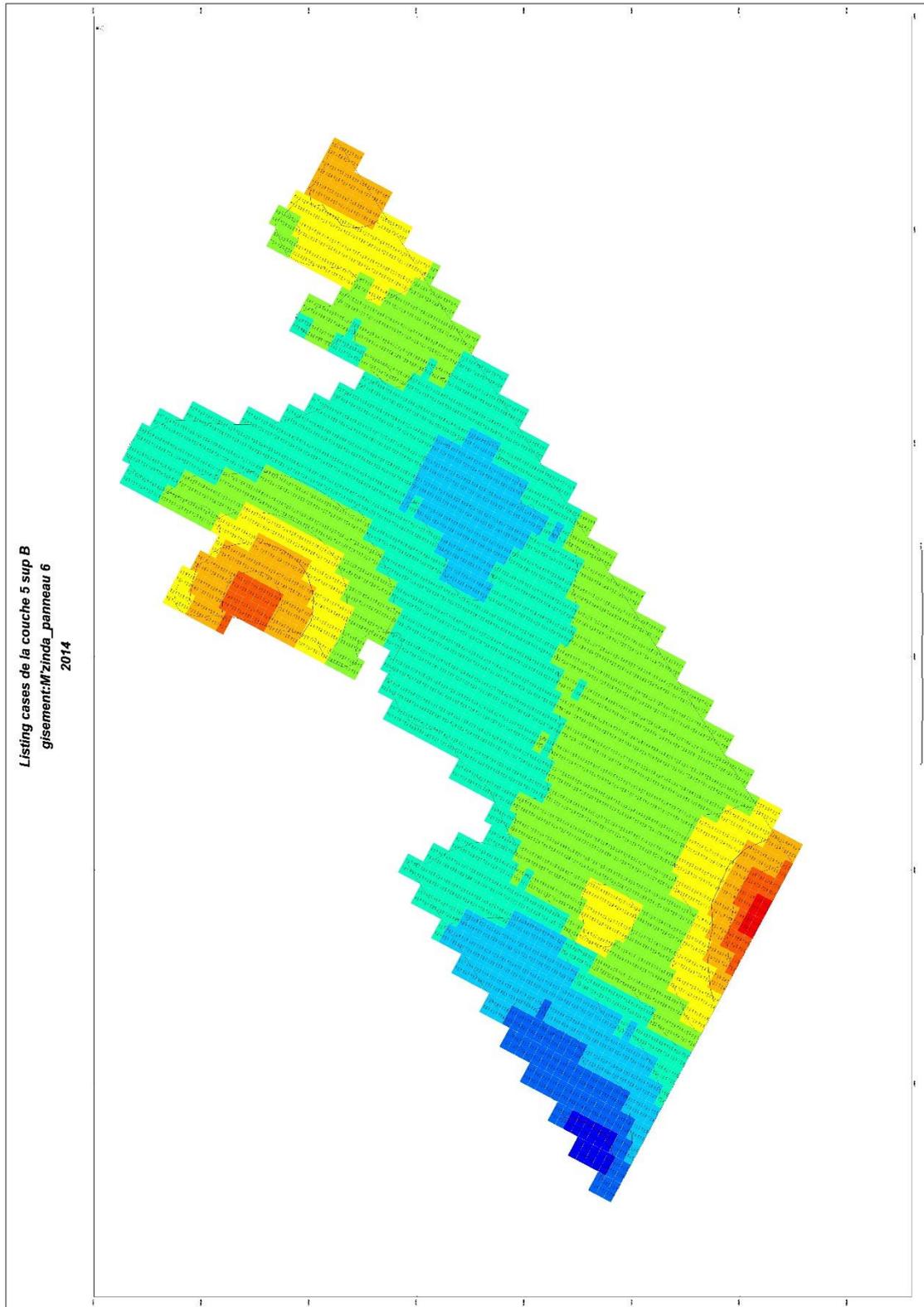


Figure 20 : Listing cases de la couche 5 supérieure B
Panneau 6

ANNEXE C

Cartographie de la couche 6

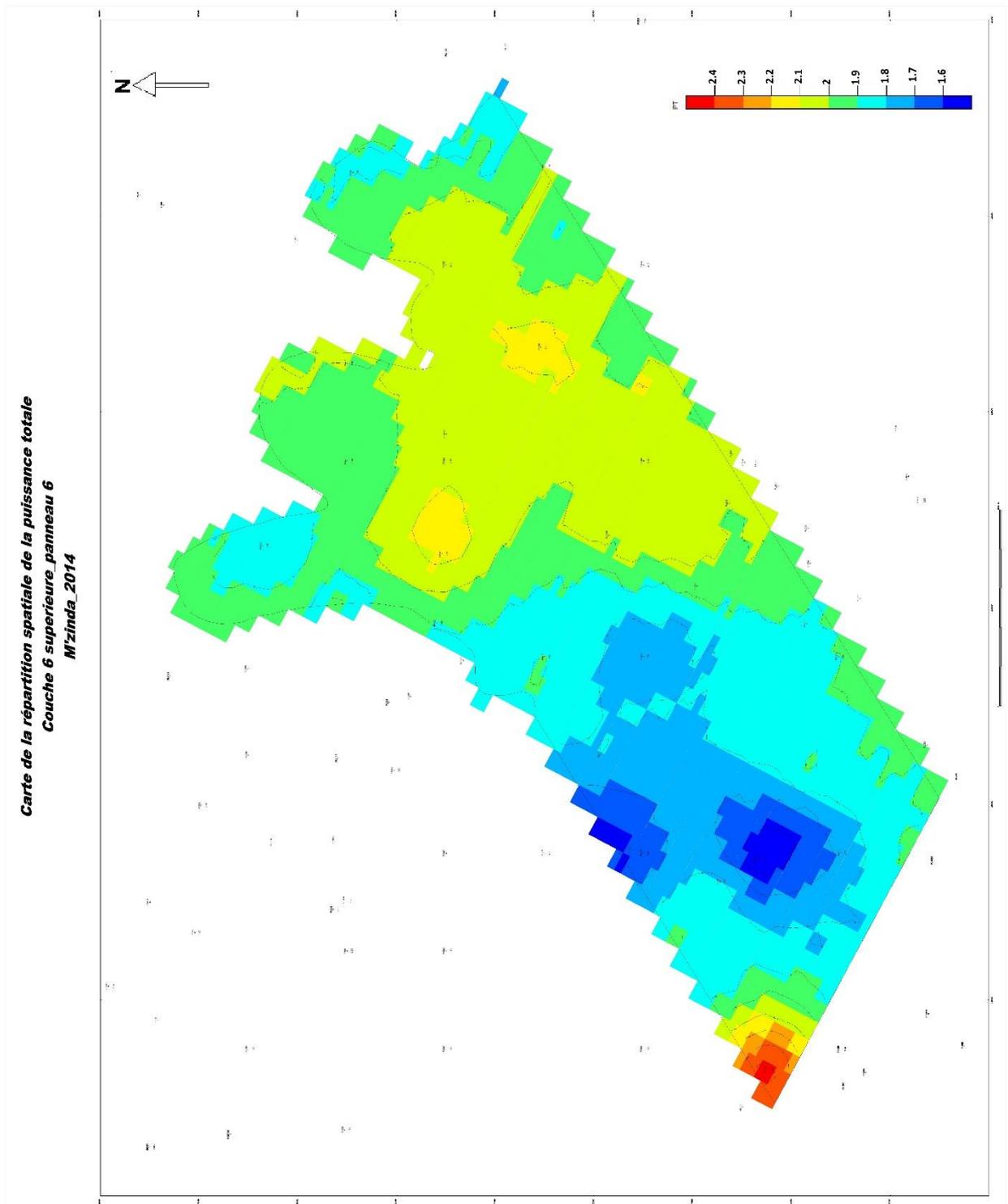


Figure 21 : Carte de la répartition spatiale de la puissance totale de la couche 6 supérieure P_6

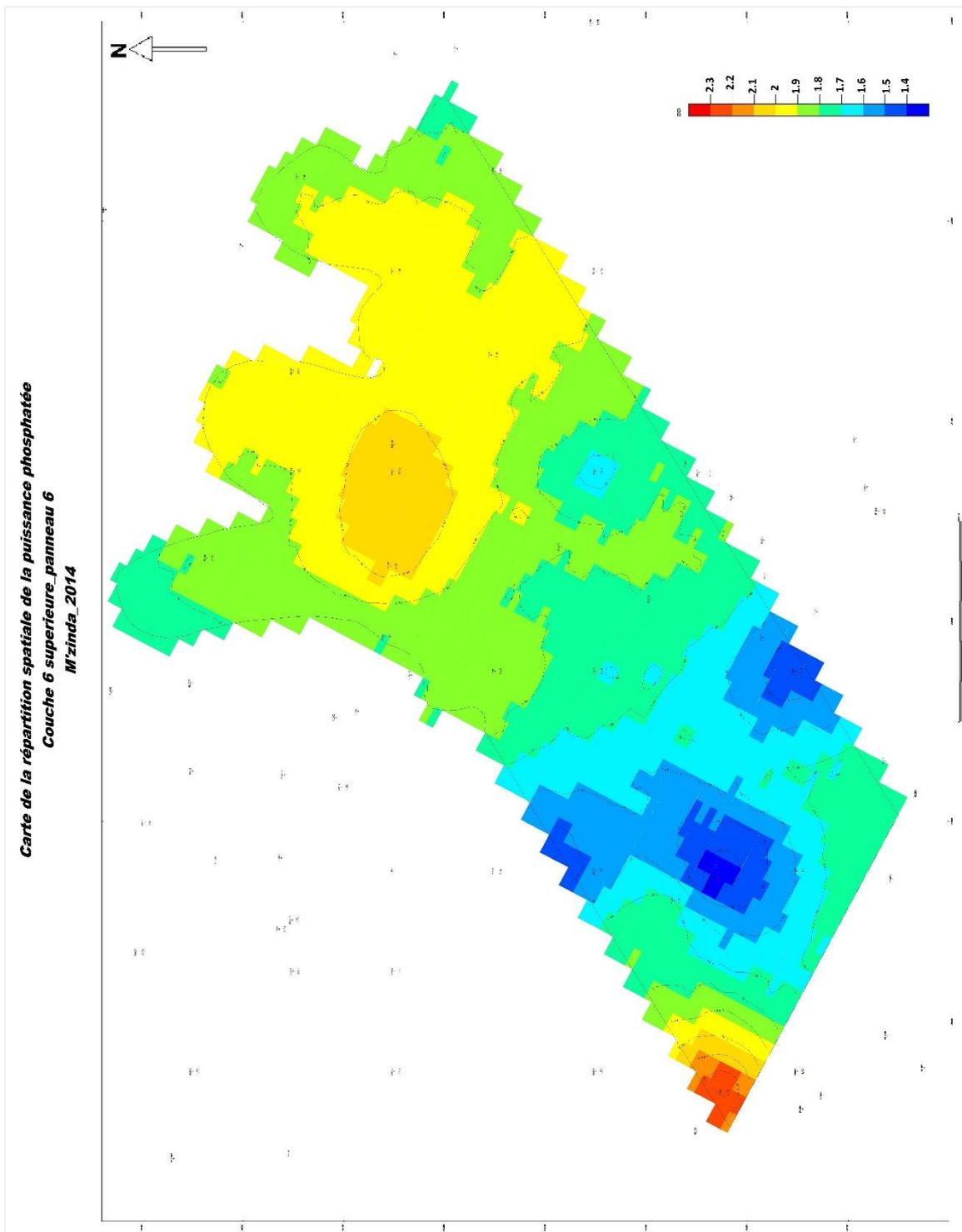


Figure 22 : Carte de la répartition spatiale de la puissance phosphatée de la couche 6 supérieure P_6

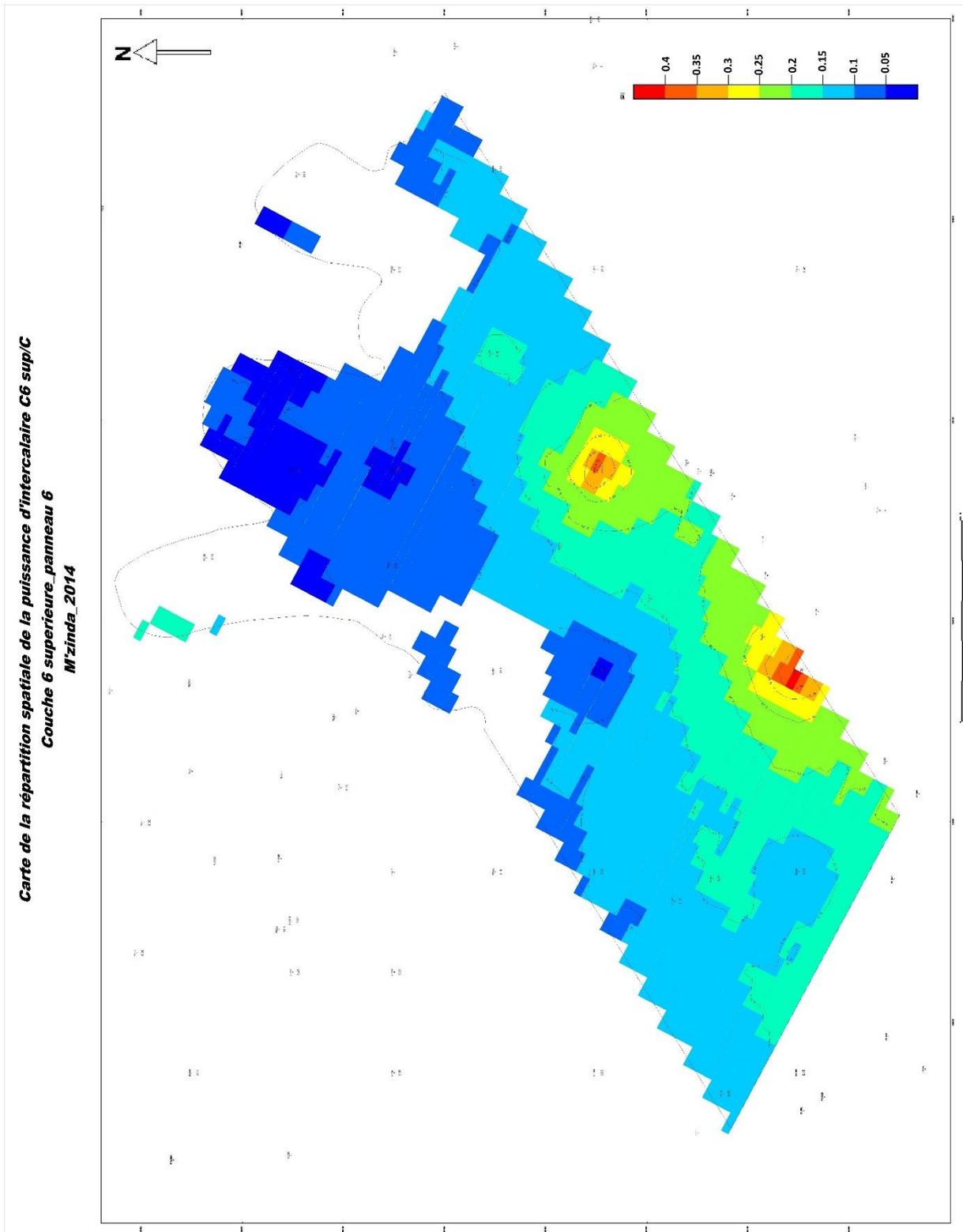


Figure 23 : Carte de la répartition spatiale de la puissance d'intercalaire de la couche 6 supérieure C6S/C5I P_6

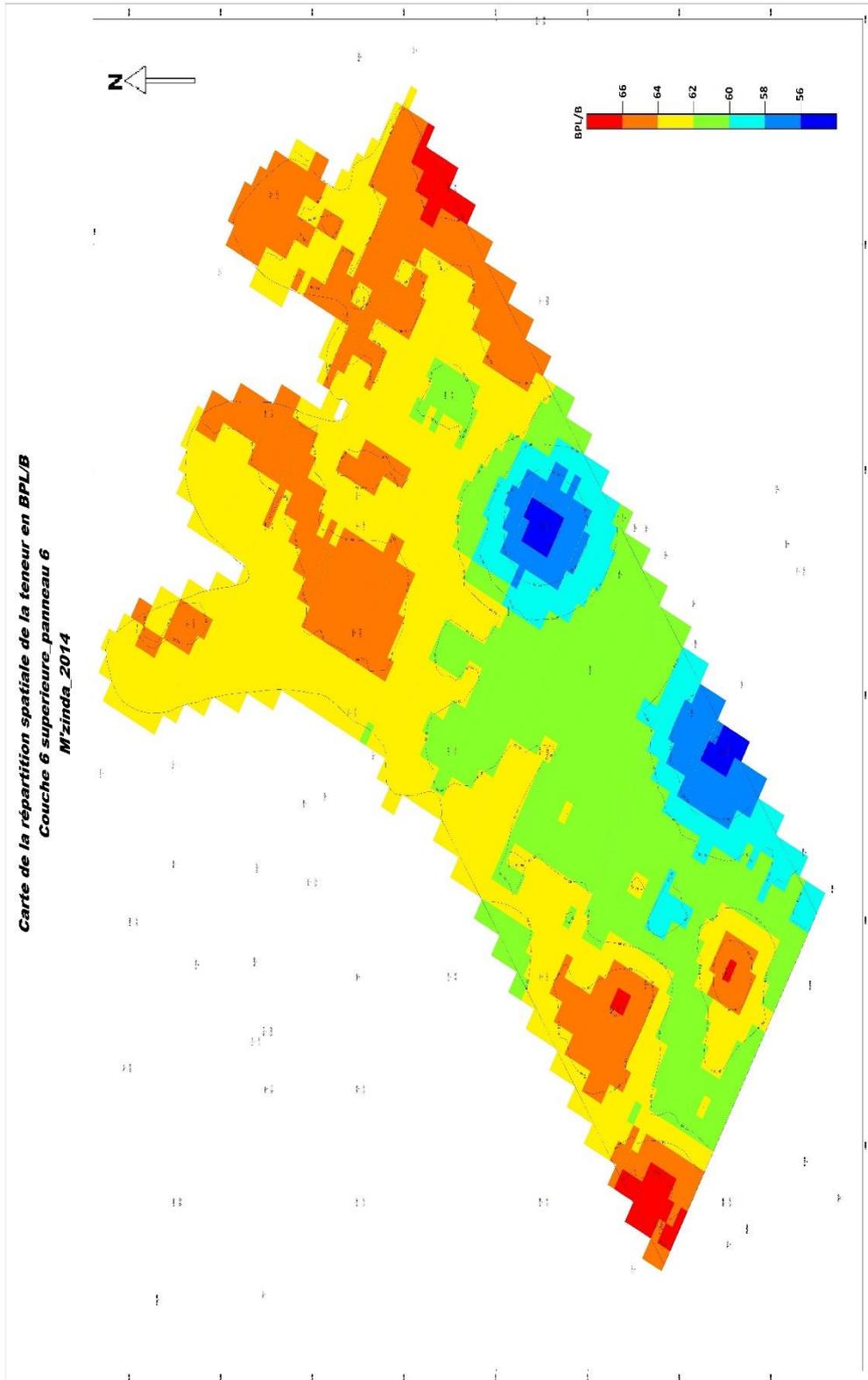


Figure 24 : Carte de la répartition spatiale de la teneur en BPL/B de la couche 6 supérieure P_6

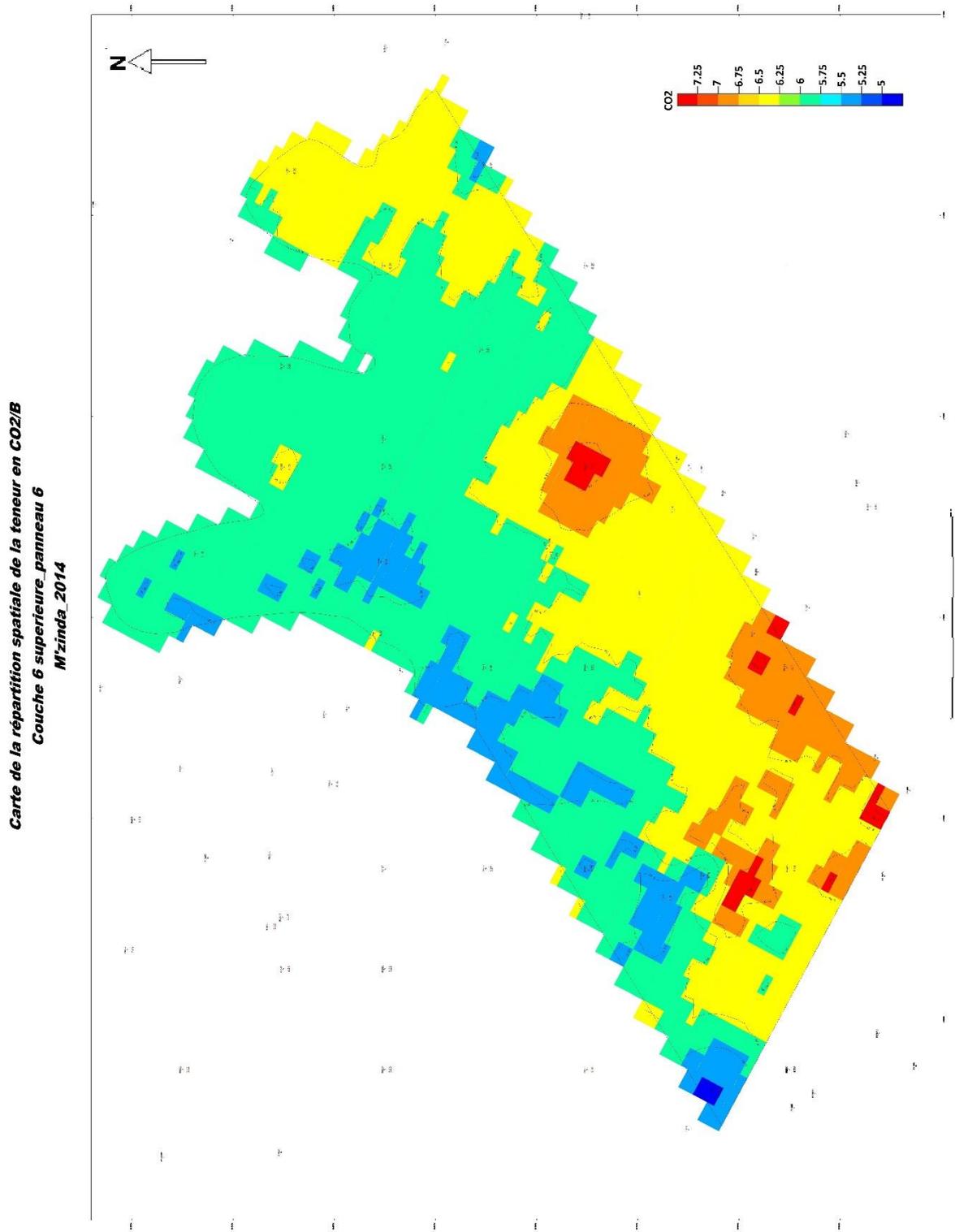


Figure 25 : Carte de la répartition spatiale de la teneur en CO₂/B de la couche 6 supérieure P_6

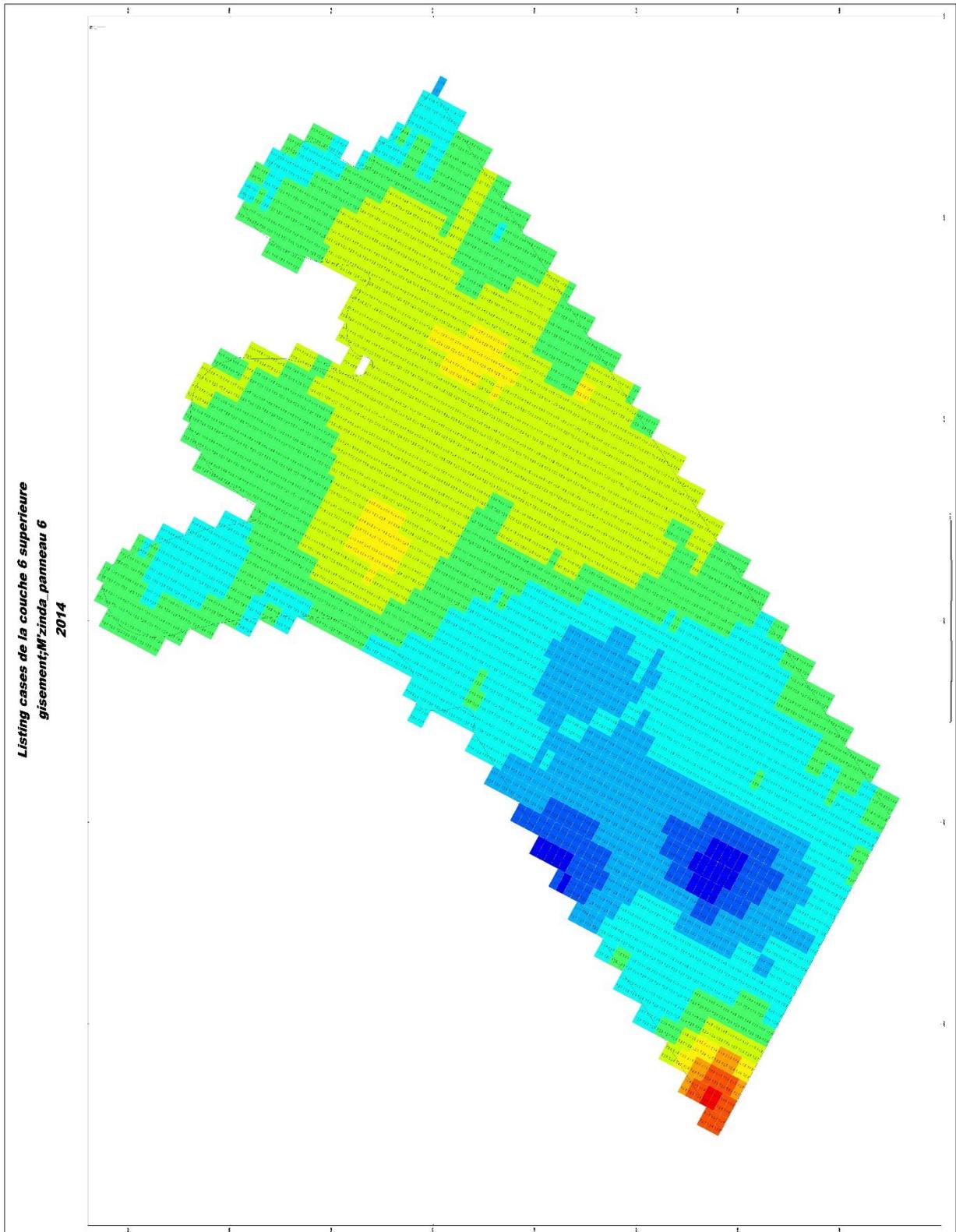


Figure 26 : Listing cases de la couche 6 supérieure
Panneau 6