

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département des Sciences et Technologies

Projet de fin d'étude présenté en vue de l'obtention du diplôme de

LICENCE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Hydraulique

Spécialité : Sciences de l'eau et de l'environnement

Thème

**La cartographie piézométrique et hydrochimique de
la nappe phréatique de la vallée de METLILI**

Par :

M^{LLE} : BAHAZ Hanane

Jury :

M. OULED BELKHEIR. C

Maître Assistant A

Univ. Ghardaïa **Encadreur**

Année universitaire 2012/2013

Remerciements :

Je remercie **ΑΛΛΑΗ** de m'avoir pr^o tⁱ vi^o et volont^e pour achever ce travail.

Je tiens tout d'abord ^à exprimer mes remerciement les plus sinc^{ères} res^{pectueux} Monsieur **ΟΥΛΕΔΒΕΛΚΗΙΕΡ Χ**, qui a encadr^é ce m^{on} moire de fin d'^{ét}ude, pour ses efforts fournis afin de mener ^à bien ce projet.

Je tiens ^à exprimer ma profonde gratitude ^à **M^P ΒΕΝΑΔΔΑ. Α** Pour ses remarques constructives et la disponibilit^é tout au long du travail

Je veux t^émoigner mon gratitude ^à **M^P ΔΑΗΕΥΡ** et je tiens ^à le remercier pour ses nombreux conseil, ^à lui exprimer tout ma reconnaissance pour sa bon humeur, sa gentillesse et patience.

Je voudrais remercier madame **ΒΟΥΑΜΕΡ Κ**, monsieur **ΡΕΖΕΓ** et monsieur **ΜΕΣΣΙΤΦΑ**, laborantins au laboratoire de chimie universit^é de Gharda^ïa qui ont mis ^à moi tous les moyens n^écessaires et pour leur conseils et leur pacienc

Je ne saurais oublier l'ensemble du corps professoral du d^épartement des sciences techniques pour l'enseignement qu'on a re^{çu} u ^{durant} dix,

Nous ne pouvons clore ces remerciements sans une pens^{ée} ^à nos amies qui nous ont toujours aid^{és}, soutenu et encourag^{és}, leurs judicieuses interventions nous remettaient souvent sur la bonne voie. A tous et ^à toutes, Merci

Merci ^à toute personne qui a contribu^é de pr^{és} ou de loin ^à l'^{avanc}ement de ce projet, que ce soit par son amiti^é, ses conseils ou son soutien moral



Dédicace

*Je dédie ce travail, À
mes très chers
parents, ma très chère
mère et mon très chère
père, qui ont toujours
été là pour moi, et qui
m'ont donné un
magnifique modèle de
labeur et de
persévérance.*

*À mes chers frères
Mohamed, Ahmed,
Salim, Abdenour,
Abdessamed*

*A mes Sœurs : Souad,
Israa*

SOMMAIRE

Remerciement

Dédicace

Sommaire

Liste des tableaux

Listes des abréviations

Liste des figures

Introduction

Chapitre I : l'approche géostatistique

I.1. INTRODUCTION A LA GEOSTATISTIQUE	5
I.2. THEORIE DES LA VARIABLES REGIONALISEES	5
I.2.1 LE CONCEPT DE FONCTION ALEATOIRE.....	5
I.2.2.LA VARIABLE REGIONALISEE	6
I.3. HYPOTHESE DE STATIONNARITE	6
I.3.1. La Stationnarité D'ordre 1.....	6
I.3.2. La Stationnarité D'ordre 2	6
I.3.3. L'hypothèse Intrinsèque.....	7
I.4. LE VARIOGRAMME	7
I.4.1 Variogramme Théorique et Variogramme Expérimental	7
I.4.2.PROPRIETES DU VARIOGRAMME.....	8
I.4.3.MODELISATION DU VARIOGRAMME	10
I.4.4.TYPES DE MODELES COURANTS.....	10
I.5. LE KRIGEAGE.....	11
I.5.1.NOTIONS GENERALES	10
I.5.2.ESTIMATEUR DE KRIGEAGE	12
B- Krigeage dans le cadre de l'hypothèse intrinsèque :	12
I.6.CONCLUSION.....	13

Chapitre IV :La Cartographie

II.1 DEFINITION	15
II.2.LES PRINCIPAUX TYPES DE COORDONNEES	15
II.3.LES PROJECTIONS PLANES	15

II.4 PROPRIETES RECHERCHEES.....	16
II.5.1.TYPES DES PROJECTIONS	17
II.5.1.LES PROJECTIONS AZUMUTALES	17
II.5.3.LES PROJECTIONS CYLINDRIQUES	18
II.6.LE SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE	19
II.6.1.DEFINITION D'UN SIG	19
II.6.2.AVANTAGE D'UN SIG.....	20
II.6.3.Les données du Système d'Information Géographique	21
II.6.4.UTILISATION	21
II.6.5.LOGICIEL SURFER 8	22

Chapitre III : La Piézométrie

III.1. DEFINITIONS	25
III.2. LE GRADIENT HYDRAULIQUE	25
III.3. LA HAUTEUR PIEZOMETRIQUE	26
III.4. DIFFERENTS TYPES DE PIEZOMETRES	26
III.4.1.PUIT OUVERT	26
III.4.2.Piézomètre à élément poreux	27
III.4.3.Autres types.....	27
A-Piézomètres ouverts	27
B-Piézomètre à volume constant	28
B1- Piézomètres Hydrauliques	28
B2 -Piézomètres pneumatiques	28
B3-Piézomètres à corde vibrante	29
III.5. DIFFERENTS TYPES DE NAPPES	29
III.5.3. NAPPE LIBRE.....	29
III.5.2.NAPPE CAPTIVE	29
III.5.3.NAPPE ARTISIENNE	30
III.6. L'EAU SOUTERRAINE DANS LES ROCHES.....	30

Chapitre IV :L'hydrochimie

IV.1INTRODUCTION	35
IV.2PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'EAU.....	35
A-LA TEMPERATURE	35
B- LE pH	35
IV.2.2.PARAMETRES CHIMIQUES	36

IV.2.2.1. LES ANIONS.....	36
A- CHLORURE.....	3636
B- SULFATES.....	3636
C- NITRATES.....	36
D- LES BICARBONATE ET LES CARBONATES.....	37
IV.2.2.2. LES CATIONS.....	37
A- LE SODIUM.....	37
B- LE MAGNESIUM.....	37
C- LE CALCIUM.....	37
D- LE POTASSIUM.....	38
IV.3. LES FACTEURS CHIMIQUES DE POLLUTION DES EAUX.....	38
IV.3.1. LES IONS D'AMMONIUM.....	38
IV.3.2. LES NITRITES.....	38
IV.3.3. LES PHOSOHATES.....	38
IV.3.4. L'OXYDABILITE AU PERMANGANATES DE POTASSIUM.....	39

Chapitre V :Présentation Du Site

V.2. SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA WILAYA DE GHARDAIA.....	41
V.3. SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA COMMUNE DE METLILI.....	41
V.4. CLIMAT.....	42
V.5. TEMPERATURE.....	42
V.6. PRECIPITATION.....	42
V.7. HUMIDITE RELATIVE.....	44
V.8. EVAPORATION.....	44
V.9. INSOLATION.....	44
V.10. VENT.....	45
V.11. CLASIFICATION DU CLIMAT.....	45
V.11.1. Diagramme ombrothermique de GAUSSEN.....	45
V.11.2. CLIMMAGRAMME D'EMBERGER.....	46
V.12. APERCU GEOLOGIQUE DE METLILI.....	47
V.13. ASPECT HYDRAULIQUE.....	48
V.13.1. LES EAUX SUPERFICIELLES.....	48
V.13.2. LE EAUX SOUTERRAINES.....	48
V.13.2.1. LA NAPPE PHREATIQUE.....	48
V.13.2.2. LA NAPPE CONTINENTAL INTERCALAIRE (CI).....	49

V.14.	AGRICULTURE.....	51
V.15.	INDUSTRIE.....	52
V.16.	TOURISME.....	52
V.17.	ARTISANAT	52

Chapitre VI :Matériels Et Méthodes

VI.1.	SECTEUR D'ETUDE	55
VI.2.	LES TRAVEAUX PIEZOMETRIQUES	الإشارة المرجعية غير معرفة خطأ
VI.2.1.	INTRODUCTION.....	55
VI.2.2.	MESURE DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE	56
VI.2.3.	LA METHODE DU TRAVAIL	56
VI.4.	LE MATERIEL UTILISE	56
➤	le GPS :.....	56
➤	LA SONDE LUMINEUSE.....	57
VI.4.2.	MODE DE PRELEVEMENT	58
VI.5.	LES TRAVEAUX D'ANALYSES AU LABORATOIRE	59
VI.5.1.	L'ANALYSE DE LA QUALITE DE L'EAU	59
VI.5.3.1.	MESURE DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE	60
VI.5.3.2.	MESURE DE pH.....	60
	MODE OPERATOIRE	61
VI.5.3.3.	MESURE DE LA DURETE TOTALE DE L'EAU	62
V.5.3.4.	MESURE DE LA DURETE CALCIQUE	63

Chapitre VII :Discussions Des Données

VII.1.	INTRODUCTION	65
VII.2.	PARAMETRES PIEZOMETRIQUES.....	65
VII.3.	PARAMETRES PHYSIQUES	65
VII.4.	PARAMETRES CHIMIQUES	66

Chapitre VIII :Résultats et Interprétations

VIII.1	INTRODUCTION	68
VIII.2.	VARIOGRAPHIE.....	68
VIII.2.1.	VARIOGRAMMES DES PARAMETRES PIEZOMETRIQUES	69
VIII.2.1.1.	NIVEAU PIEZOMETRIQUE.....	69
VIII.2.1.2.	LE NIVEAU STATIQUE	70

VIII.2.2.VARIOGRAMME DES PARAMETRES PHYSIQUES	71
VIII.2.2.1. LE pH	71
VIII.2.2.2. LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE	72
VIII.2.3. VARIOGRAMMES DES PARAMETRES CHIMIQUES	73
VIII.2.3.1. LA DURETE TOTALE.....	73
VIII.2.3.2. LE CALCIUM	74
VIII.2.3.3. LE MAGNESIUM	75
VIII.3. LA CARTOGRAPHIE	76
VIII.2.3.2.CARTE DE NIVEAU PIEZOMETRIQUE	77
VIII.3.2.CARTOGRAPHIE DES PARAMETRES PHYSIQUE	78
VIII.3.2.1 CARTE DE POTENTIEL D'HYDROGENE	78
VIII.3.2.2.CARTE DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE	79
VIII.3.3.CARTOGRAPHIE DES PARAMETRES CHIMIQUES	80
VIII.3.3.1.CARTE DE LA DURETE TOTALE	80
VIII.3.3.2.CARTE DES IONS DE CALCIUM	81
VIII.3.3.3. CARTE DES IONS DE MAGNESIUM	82
VIII.4.CORRELATIONS ET ACP.....	83
CONCLUSION GENERALE.....	84
REFERNCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	87
ANNEXE.....	

Liste des tableaux

Tableau N°01 : Données météorologique de la région de Meltili (2001-2012).....	44
Tableau N°02 : les paramètres statistiques des variables piézométriques.....	65
Tableau N °03 : les paramètres statistiques des variables physiques.....	65
Tableau N °04 : les paramètres statistiques des paramètres chimiques.....	66

Listes Des Abréviations

CE : Conductivité Electrique.

Mg/l: milligramme par litre.

NS :niveau statique

NP : Niveau piézométrique.

pH: potentiel hydrogène.

μS : MicroSiemens.

I : gradient hydraulique

TH :titre hydrométrique

V.A : variable aléatoire

D.P.A.T :Atlas de Ghardaïa

$f(t)$: facteur de correction

K :le constant de le cellule

f : nombre de dilution

GPS : global positioning system

SIG : système d'information géographique

X, Y, Z : Coordonnées géographiques.

ACP : Analyse en Composante Principale.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques.

LISTE DES FIGURES

Figure N 01 : schéma présentative du variogramme	9
Figure N02 :les types de projections	17
Figure N°03 : les projections azimutales	18
Figure N°04 :Les projection cylindriques	18
Figure N°05 : Les projection coniques	19
Figure N06 : schéma présentatif du gradient hydraulique.....	26
Figure N08 : la nappe captive.....	30
Figure N09 : Les différents types d'interstices et leur relation avec la texture et la porosité...31	
Figure N°10: Limites administratives de la région de Meltili (Atlas, 2004).....	43
Figure N°11 : Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN de la région de Meltili(2001-2012).....	46
Figure N° 12 Etage bioclimatique de Meltili selon le climagramme d'EMBERGER	47
Figure N°14 : Coupe hydrogéologie transversale montrant le toit et la surface.....	50
Figure N°15 : carte du niveau statique de l'aquifère	51
Figure N °16:la vallée de Metlili.....	55
Figure N°17 : le GPS utilisé aux travaux piézométriques	56
FigureN°18 : la sonde lumineuse.....	57
Figure N° 19: les bouteilles d'échantillonnage	59
Figure N° 20 : le conductimètre.....	60
Figure N°21: le pH-mètre.....	62
Figure N°22 : le variogramme du niveau piézométrique	69
Figure N°23 : le variogramme du niveau statique.....	70
Figure N°24 : le variogramme des valeurs de pH	71
Figure N°25 : le variogramme de la conductivité électrique.....	72
Figure N°26 : le variogramme des valeurs de TH.....	73
Figure N° 27: le variogramme des ions de calcium.....	74
Figure N°28 : le variogramme des ions de magnésium.....	75
Figure N°29 : la carte du niveau statique.....	76
Figure N°30 : la carte du niveau piézométrique	77
FigureN°31 : la carte de répartition des valeurs de pH	78

FigureN°32 : la carte de répartition des valeurs de CE	79
FigureN°33 : la carte de répartition des valeurs de la dureté totale	80
FigureN°34 : la carte de répartition des valeurs de ca^{+2} mg/l.....	81
FigureN°35 : la carte de répartition des valeurs de mg^{+2} mg/l	82
Figure N°38 les graphes des corrélations.....	83
Figure N°37 le diagramme d'ACP	84

INTRODUCTION

INTRODUCTION

La vallée de Metlili fait partie de la région centrale de la chebka du M'zab, cette dernière se caractérise par un relief cisailé, ravine et serpenté d'innombrables oueds. Le substratum géologique est constitué de calcaires, dolomies et marnes d'âge Turonien. On distingue aussi, le long de la vallée des dépôts alluvionnaires d'âge quaternaire. Ces alluvions sont constituées de sables fins et grossiers (mélangés à des limons et des argiles), gravillons, galets consolidés. Cette formation superficielle (de 20 m), contient une nappe phréatique plus ou moins profonde, exploitée par des puits donnant de faibles débits.

Au cours des 20 dernières années la vallée a connue plusieurs problèmes liés notamment à la remontée des eaux, au phénomène de pollution. La croissance démographique entraînant une intense exploitation des nappes profondes tel que l'Albien, ce qui a induit l'abandonnement presque totale de la nappe phréatique, ajoutant à celle-là, la mauvaise maîtrise de la collection des eaux usées, entraînant ainsi une importante infiltration dans la nappe phréatique alluvionnaire. Cette situation a entraîné la remontée et la pollution de la nappe phréatique.

La caractérisation et le diagnostic de qualité d'une eau souterraine passe toujours par des prélèvements réguliers d'échantillons aux endroits de captage (puits, piézomètres, sources, châteaux) et l'analyse de différents paramètres physico-chimiques. Si certains éléments chimiques permettent de caractériser l'aquifère d'autres éléments sont liés à des contaminations anthropiques (nitrates, pesticides, ...). Certains éléments, tels que les nitrates, sont d'excellents indicateurs quant aux pressions qualitatives exercées sur les nappes

Notre travail qui porte sur l'étude piézométrique et la caractérisation hydrochimiques des eaux souterraines de la vallée de Metlili, a pour but de faire une collecte de données qui permettra à terme : d'une part de comprendre à travers les cartes piézométriques établies, le fonctionnement

hydrodynamique des eaux souterraines de cette nappe, et d'autre part d'analyser quelques paramètres hydrochimiques pour obtenir des différentes cartes dans le cadre de la régionalisation stochastique sur la base de la géostatistique

Le présent travail s'articule en deux parties. La première partie consiste à donner des définitions sur les aspects théoriques pour établir une campagne d'échantillonnage et pour le traçage des cartes notamment : la géostatistique, la cartographie, l'hydrochimie...etc.

Dans la seconde partie nous avons présenté le cadre physique régionale de la région d'étude notamment : la climatologie, situation géographique, la géologie, cadre urbanistique, le cadre socioéconomique...etc.

En suite et dans la même partie nous avons procédé à l'échantillonnage et l'analyse sur terrain, puis au traçage des cartes de différents paramètres en ajustant la variation spatiale à un modèle théorique après le passage de l'analyse statistique appropriée (ACP corrélation) et enfin nous avons proposées des recommandations pour le but de la bonne gestion de milieu environnementale

L 'Approche Géostatistique

I.1. INTRODUCTION A LA GEOSTATISTIQUE

Le mot géostatistique est un néologisme forgé à l'École des Mines. La géostatistique est née des problèmes rencontrés dans le secteur de la mine : contrôle des teneurs, optimisation de maille, cartographie des ressources, prévision des réserves récupérables, étude de scénarios d'exploitation...

Daniel Krieger, géologue dans les mines d'or, proposa dans les années 60 une méthode statistique pour estimer la teneur d'un bloc de minerai à partir d'échantillons pris autour du bloc à exploiter. Dix ans plus tard, **Georges Matheron** développa un outil pour analyser la continuité spatiale des teneurs appelé le « variogramme » et une méthode d'estimation basée sur le « variogramme » appelée le « krigeage ». Nous étudierons ces deux méthodes. Aujourd'hui, la géostatistique s'exprime dans des champs d'applications comme l'océanographie, la météorologie, le génie civil, l'environnement, la géologie, la qualité de l'air et des sols, la santé, etc.

Techniquement, la géostatistique utilise également une combinaison linéaire des données observées, mais à la différence des méthodes classiques d'interpolation, elle tient compte à la fois de l'information relative à leur position et du caractère aléatoire du phénomène étudié. De plus, elle permet d'intégrer des informations auxiliaires dans l'estimation. Ces avantages font considérablement améliorer les estimations dans le contexte spatial. La mise en œuvre de la méthode de krigeage passe par une étape d'analyse des données. Elle est destinée à décrire la structure spatiale de la variable régionalisée. La carte de l'interpolation est alors accompagnée d'indicateurs de fiabilité des résultats.

I.2. THEORIE DES LA VARIABLES REGIONALISEES

I.2.1. LE CONCEPT DE FONCTION ALEATOIRE

une variable aléatoire (V.A.) est une variable qui prend un nombre des valeurs numériques selon une certaine loi de probabilité, tel que une concentration d'un paramètre chimique (calcium fer...) $Z(X_1)$ en un point (X_1) ou l'ensemble des concentrations $Z(X)$ pour tous les implantations (X) . la variable régionalisée $Z(X_i)$ peut être considérée comme une réalisation particuliers de l'ensemble des V.A appelées une fonction

aléatoire ; et on la note $Z(X)$. Cette définition de la fonction aléatoire traduit le double aspect aléatoire et structuré d'une variable régionalisée

I.2.2. LA VARIABLE REGIONALISEE

Une variable régionalisée est une fonction qui quantifie des grandeurs mesurées sur l'espace géographique. L'espace dans lequel cette variable prend ses valeurs est appelé champ. cette variable peut se présenter comme :

La teneur en élément polluant (azote....)

La pluviométrie...

La perméabilité ...

En général ces fonctions ont un comportement spatial très complexe c'est pour cela il a été proposée des hypothèses telles que la stationnarité et l'hypothèse intrinsèque pour faciliter la compréhension et le formalisme de telle fonctions.(ouled belkhir.C).

I.3. HYPOTHESE DE STATIONNARITE

I.3.1. La Stationnarité D'ordre 1

La stationnarité d'ordre 1 d'un phénomène exprime son homogénéité spatiale qui fait qu'il se répète lui-même en quelque sorte dans l'espace (Azouzi, 1993) La fonction aléatoire est dite stationnaire si les deux premiers moments de sa loi de probabilité sont constants, c'est à dire l'espérance mathématique et la variance ou covariance soit une constante sur tout le champ. (Wilfried, 2006)

I.3.2. La Stationnarité D'ordre 2

Une fonction aléatoire $Z(s)$ est stationnaire du 2^{ème} ordre quand l'espérance mathématique existe et ne dépend pas du point s ; et que la covariance entre chaque paire ($Z(s+h)$, $Z(s)$) existe et ne dépend que de h (distance).

- L'espérance mathématique ne dépend pas de s :

$$\forall s, E(Z(s)) = m \text{ constante indépendante de } s$$

- La covariance entre $Z(s)$ et $Z(s+h)$ ne dépend que de h :

$$\forall s, s + h, \text{cov}(Z(s + h), Z(s)) = C(h) \text{ ne dépend que de } h \text{ et non de } s$$

$C(h)$ est appelé fonction de covariogramme

- La variance existe en tout site s et est une constante indépendante du site s :

$$\forall s, \text{Var}(Z(s)) = \text{cov}(Z(s), Z(s)) = C(\mathbf{0}) = \text{constante}$$

- Le covariogramme et le variogramme sont liés :

$$\forall s, s + h, \text{Var}(Z(s + h) - Z(s)) / 2 = \gamma(h) = C(\mathbf{0}) - C(h)$$

Remarque: L'hypothèse de stationnarité d'ordre deux ne peut être validée de manière rigoureuse et infaillible à l'aide d'un test statistique sur les données expérimentales (Arnaud et Emery, 2000)

I.3.3. L'hypothèse Intrinsèque

On dit qu'une fonction aléatoire $Z(s)$ est intrinsèque quand ses accroissements $Z(s+h)-Z(s)$ sont stationnaires d'ordre 2. C'est à dire que

- L'espérance des écarts est zéro:

$$E(Z(s + h) - Z(s)) = \mathbf{0} \quad \forall s \text{ et } h \text{ fixe}$$

- La variance des écarts ne dépend que de h :

$$\text{Var}(Z(s + h) - Z(s)) = E[(Z(s + h) - Z(s))^2] = 2\gamma(h)$$

Cette hypothèse permet de dire que la variabilité entre les valeurs prises en deux points différents ne dépend que de h (la distance entre ces points).

Toute fonction aléatoire stationnaire d'ordre deux est également intrinsèque (la réciproque est fautive). Autrement dit, l'hypothèse de stationnarité intrinsèque est moins restrictive que la stationnarité du second ordre. L'hypothèse intrinsèque ne requiert pas de connaître l'espérance ni sa covariance de la variable aléatoire.

La fonction la plus utilisée en géostatistique pour décrire la continuité spatiale est le variogramme. La continuité spatiale est réalisée lorsque les valeurs prises entre deux sites proches l'un de l'autre sont similaires. (Wilfried, 2006)

I.4. LE VARIOGRAMME

I.4.1. Variogramme Théorique et Variogramme Expérimental

D'après Marcotte (cours de «géostatistique minière »), 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. La différence entre les valeurs prises par deux variables aléatoires est $Z(s)-Z(s+h)$. C'est également une variable aléatoire dont on peut calculer la variance. Cette variance devrait être plus petite lorsque les points sont rapprochés (les valeurs se ressemblent plus en moyenne) et plus grande lorsque les points sont éloignés. On appelle variogramme la demi-variance de cette différence.

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

L'outil mesure la « variabilité spatiale », c'est-à-dire la dissemblance entre les valeurs en fonction de leurs séparations. Il décrit la continuité spatiale de la variable régionalisée. (Wilfried, 2006)

Le variogramme théorique est défini comme :

$$\gamma (h) = \frac{1}{2} \text{Var}(Z(s + h) - Z(s)) = \frac{1}{2} E[(Z(s + h) - Z(s))^2] = C(0) - C(h)$$

$$\text{avec } C(0) = \text{Var}(Z(s)) \text{ et } C(h) = \text{Cov}(Z(s + h), Z(s))$$

I.4.2. PROPRIETES DU VARIOGRAMME

Le variogramme est une fonction de h , croissante et souvent caractérisé par trois Paramètres :

- L'effet de pépité : Le comportement à l'origine du variogramme reflète le degré de régularité spatiale de la variable régionalisée. Si le variogramme présente un saut abrupt à l'origine (effet de pépité), cela indique une absence partielle de corrélation entre les valeurs prises en deux sites très proches. C'est-à-dire qu'il y a une faible ressemblance entre les valeurs régionalisées très voisines.

- Le palier : Valeur du variogramme pour la distance égale à la portée.

- La portée : Distance où deux observations ne se ressemblent plus du tout. Leur covariance est nulle. (Wilfried, 2006)

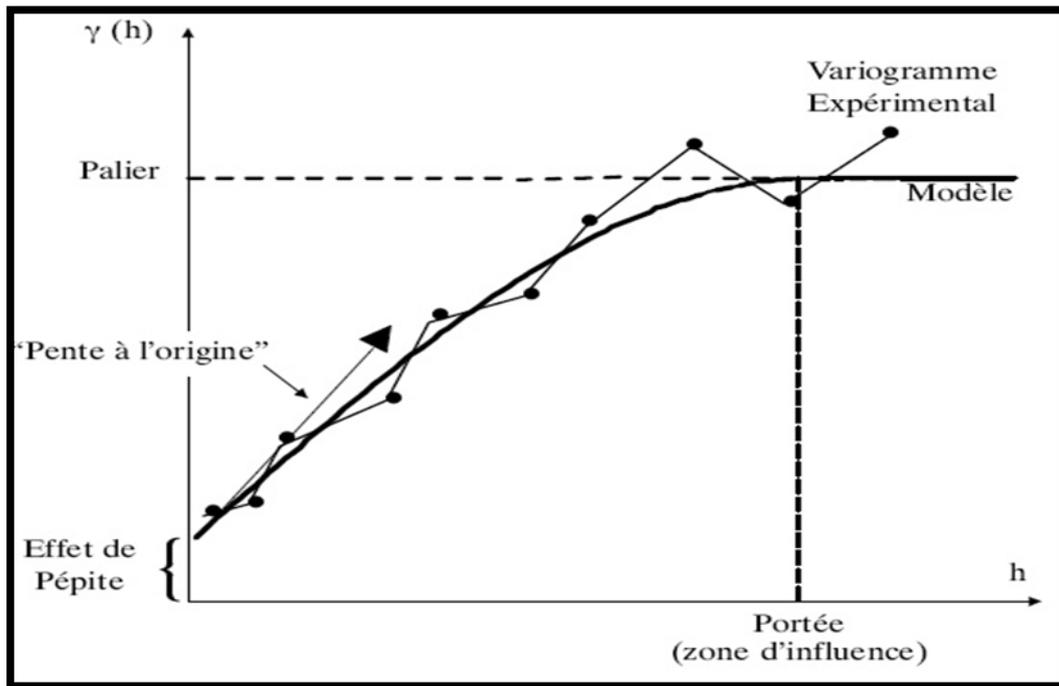


Figure N°1 : schéma représentative du variogramme

REMARQUES

- Si le variogramme est borné alors la covariance existe et l'on peut présumer une stationnarité du second ordre (Journel et Huijbergts, 1993).
- Si la variable régionalisée est stationnaire du second ordre alors le palier est égal à La variance de cette même variable.

$$\gamma(h) = \sigma^2 - C(h)$$

- Inversement, si un variogramme est non borné, il ne possède ni portée, ni palier. La variance de la fonction n'est pas définie et elle n'est donc pas stationnaire du second ordre.

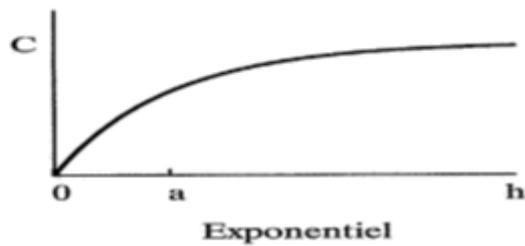
- Arnaud et Emery (2000,) affirment que le variogramme expérimental n'est pas fiable pour des distances supérieures à la moitié du diamètre du champ D . Elles sont peu nombreuses et augmentent la variance de la valeur $Z(x_i)$ estimée.

- Les variogrammes directionnels permettent de détecter une éventuelle anisotropie. (Wilfried, 2006)

I.4.3. MODELISATION DU VARIOGRAMME

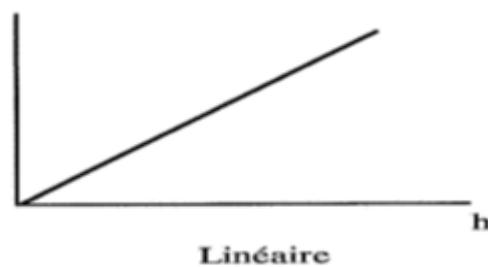
Le variogramme expérimental n'est pas défini partout, notamment aux distances h pour lesquelles il n'existe pas de pair de points de mesures. Ainsi lui est-il ajusté une fonction mathématique appelée modèle de variogramme. Marcotte recommande d'utiliser des modèles éprouvés ou des modèles construits à partir de modèles éprouvés.

I.4.4. TYPES DE MODELES COURANTS



$$\text{Sphérique : } \gamma (h) = \begin{cases} C_0 + C \left(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right) & \text{pour } a \geq h \geq 0 \\ C_0 + C & \text{pour } h > a \end{cases}$$

$$\text{Exponentiel : } \gamma (h) = C_0 + C \left(1 - \exp\left(-\frac{3h}{a} \right) \right)$$



$$\text{Linéaire : } \gamma (h) = \begin{cases} C_0 + \frac{C}{a} h & \text{pour } a \geq h \geq 0 \\ C_0 + C & \text{pour } h > a \end{cases}$$

$$\text{Gaussien : } \gamma (h) = C_0 + C \left(1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{a^2} \right) \right)$$

I.5. LE KRIGEAGE

I.5.1. NOTIONS GENERALES

Le Krigeage est la méthode optimale, au sens statistique du terme, d'estimation. Le Krigeage porte le nom de son précurseur, l'ingénieur minier sud-africain D.G. Krige. Dans les années 50, Krige a développé une série de méthodes statistiques empiriques afin de déterminer la distribution spatiale de minerais à partir d'un ensemble de forages. C'est cependant le français Matheron qui a formalisé l'approche en utilisant les corrélations entre les forages pour en estimer la répartition spatiale.

La méthode présente trois caractéristiques :

- Elle est linéaire, c'est-à-dire que l'estimation de Z en x_0 est une combinaison linéaire des valeurs expérimentales Z_i aux points x_i .
- Elle est non biaisée, c'est le choix selon lequel l'erreur moyenne doit être nulle.
- Elle prend en compte une condition optimisée, minimisant la variance de l'écart entre Z et estimation.

Ces caractéristiques conduisent à des équations sont développées à l'aide du modèle ajusté au variogramme. Le Krigeage utilise le variogramme pour assigner les poids aux points d'observation pendant le processus d'interpolation (Marcotte, 2003).

I.5.2. ESTIMATEUR DE KRIGEAGE

Le krigeage est un interpolateur linéaire sans biais. Il prend en compte la géométrie des données, les caractéristiques de la régionalisation et de la variance. Son but est de lisser les données. Ayant calculé les poids ω_i par la résolution du système précédent, nous pouvons écrire l'estimateur de la manière suivante :

$$\hat{Z}_1(s_0) = \sum_{i=1}^n \omega_i Z(s_i)$$

I.5.3. DIFFERENTS TYPES DE KRIGEAGE

A- KRIGEAGE SIMPLE EN COVARIANCE

C'est le cas où la fonction aléatoire est stationnaire d'ordre 2, c'est-à-dire que :

-l'espérance mathématique existe et est constante

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

-la covariance pour chaque couple existe et ne dépend que de l'inter distance h

$$C (h) = E (Z (x), Z (x + h)) - m^2$$

Notons que dans ce cas ou la condition de la variance finie est posée n'est que rarement vérifié en réalité, d'autre hypothèses sont à envisager.

B- KRIGEAGE DANS LE CADRE DE L'HYPOTHESE INTRINSEQUE

Cette hypothèse est moins forte que la première. Elle considère que ce sont les accroissements $Z(x) - Z(x + h)$ qui sont stationnaires d'ordres 2

-la moyenne est constante

$$E (Z (x) - Z (x+ h)) = m (x) - m(x+ h) = 0$$

Les accroissements sont nuls en moyenne et $Z (x)$ est stationnaire en moyenne. la variance est constante pour une distance h.

$$VAR (Z (x) - Z (x+ h)) = 2 \square (h)$$

C- KRIGEAGE UNIVERSEL

Certaines propriétés du milieu naturel peuvent présenter un gradient se traduisant par une tendance. C'est le cas lorsque ni la variance ni la covariance ne peuvent être définies. L'espérance mathématique n'est donc

plus constante et elle est fonction de la position des points d'appui de x, on aura donc :

$$E (Z(x)) = m (x) \text{ Et } E (Z(x) - Z(x+h)) \neq 0$$

Dans ce cas, l'estimation du variogramme par l'équation habituelle n'est plus valable et devient. (WEBSTER, 1985)

$$\square_{réel} (h) = \square_{estimé} (h) - 1/2 (m (x) - m (x +h))^2$$

Dans ce type de Krigeage, il faut donc estimer simultanément le variogramme brut et la dérive que l'on suppose généralement être une fonction simple variant relativement lentement.

I.6.CONCLUSION

L'étude de la variabilité spatiale repose sur différentes méthodes d'approches, dont certaines sont basées sur la statistique classique et d'autre du type géostatistique, cette dernière comprend deux étapes :

1. L'analyse de la structure spatiale réalisée par l'étude du variogramme qui est une fonction permettant de quantifier la corrélation spatiale entre les données.

2. L'emploi d'une technique de prédiction spatiale (krigeage), qui tient compte de cette structure et qui permet d'estimer la distribution spatiale de la variable en sites non échantillonnés.

La Cartographie

Chapitre II: La Cartographie

II.1 DEFINITION

La carte topographique est une représentation aussi fidèle que possible de la réalité. Pour y arriver, le cartographe transforme les informations en une image cartographique lisible et compréhensible. Ses instruments sont des symboles, des signatures, des couleurs et des textes.

La cartographie désigne la réalisation et l'étude des cartes géographiques et géologiques. Elle est très dépendante de la géodésie, science qui s'efforce de décrire, mesurer et rendre compte de la forme et des dimensions de la Terre. Le principe majeur de la cartographie est la représentation de données sur un support réduit représentant un espace généralement tenu pour réel. L'objectif de la carte, c'est une représentation concise et efficace, la simplification de phénomènes complexes (politiques, économiques, sociaux, etc.) à l'œuvre sur l'espace représenté afin de permettre une compréhension rapide et pertinente. La création de carte débute avec la définition du projet cartographique. La collecte d'informations est en deux parties :

- ✚ le relevé des contours et de l'espace support à représenter (fond de carte)
 - ✚ le relevé des données statistiques à représenter sur cet espace.
- Vient ensuite un travail de sélection des informations, de conception graphique (icônes, styles), puis d'assemblage (création de la carte), et de renseignement de la carte (légende, échelle, rose des vents).

II.2. LES PRINCIPAUX TYPES DE COORDONNEES

Les coordonnées d'un point peuvent être exprimées de différentes façons

- ✓ Géographiques : latitude et longitude (valeurs angulaires)
- ✓ Cartésiennes : exprimées dans un référentiel géocentrique (valeurs métriques)
- ✓ En projection : représentation cartographique plane (valeurs métriques)

Généralement, les coordonnées géocentriques ne servent que d'étape de calcul pour les changements de système géodésique.

II.3. LES PROJECTIONS PLANES

L'objectif des projections cartographiques est d'obtenir une représentation plane du modèle ellipsoïdal de la surface de la Terre. L'intérêt majeur réside alors dans les valeurs métriques, beaucoup plus facilement exploitables, en particulier pour les mesures de distance.

Mais une projection ne peut jamais se faire sans qu'il y ait de déformations. Pour s'en convaincre, il suffit d'essayer d'aplatir la peau d'une orange ! Néanmoins, par calcul, il est possible de définir le type et les paramètres d'une projection dans le but de minimiser certaines déformations. On choisit alors :

- ❖ soit de conserver les surfaces (projections équivalentes)
- ❖ soit de conserver localement les angles (projections conformes)
- ❖ soit de conserver les distances à partir d'un point donné (projections équidistantes)
- ❖ soit d'opter pour une représentation ne conservant ni les angles ni les surfaces (projections dites aphyllactiques).

Dans tous les cas, **aucune projection ne peut conserver toutes les distances**. On introduit alors les notions de module linéaire et d'altération linéaire. Aujourd'hui, la plupart des projections utilisées en géodésie et topographie sont conformes. La cartographie à petite échelle utilise souvent des projections équivalentes.

II.4. PROPRIETES RECHERCHEES

Les caractéristiques recherchées dans les projections sont les suivantes :

- ✓ conservation des surfaces (projection équivalente) ;
- ✓ conservation des angles (projection est conforme) ;
- ✓ conservation des distances (le long de grands cercles) ;
- ✓ représentation des grands cercles par des droites (projection orthodromique).

II.5.1. TYPES DES PROJECTIONS

Pour passer de la représentation en 3D de la terre (globe terrestre) à une représentation en 2D (la carte), on utilise des projections de différents types. Dans le cadre des projections cartographiques les plus simples, la terre est projetée sur un plan, un cylindre ou un cône. Une fois la projection réalisée, le cône et le cylindre sont développés et mis à plat.

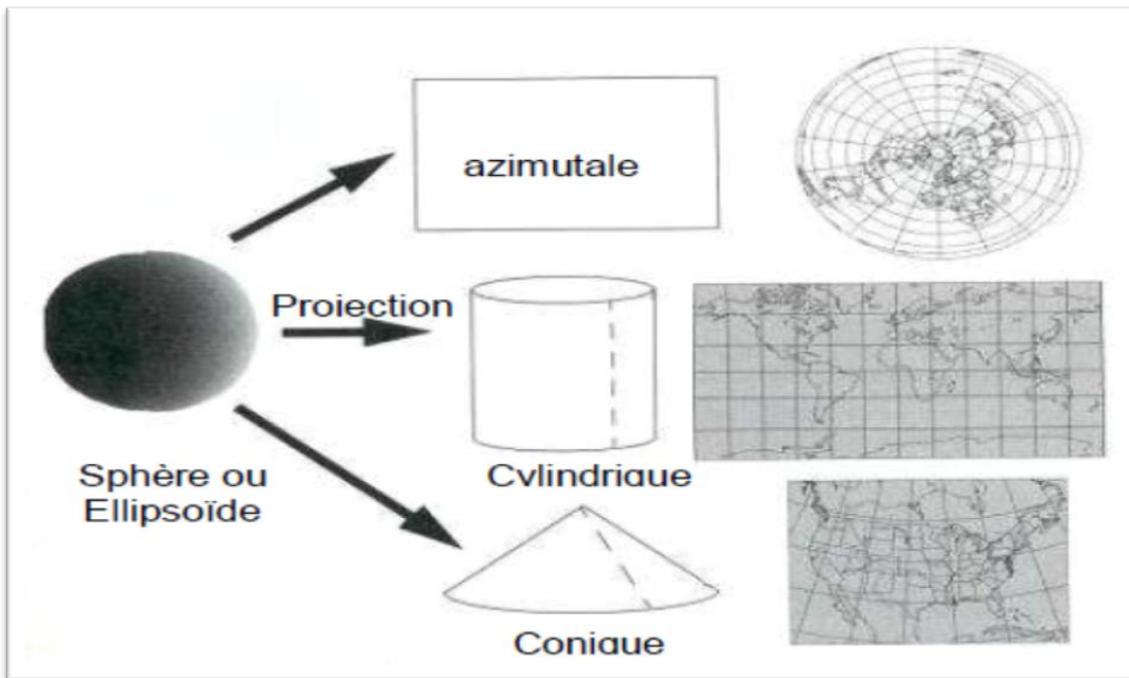


Figure N02 : les types de projections

Les projections sont couramment classées selon la surface géométrique dont elles dérivent : conique, cylindrique, et plane (azimutale ou zénithale). (A. Charbonnel.2005)

II.5.1. LES PROJECTIONS AZUMUTALES

Les projections azimutales sont vraies uniquement en leur point de tangence. Les distorsions sont maximales aux limites de la carte. Les régions polaires sont représentées en projection azimutale. Il existe trois types de projections azimutales, qui se différencient par la position du point de perspective utilisé pour la projection :

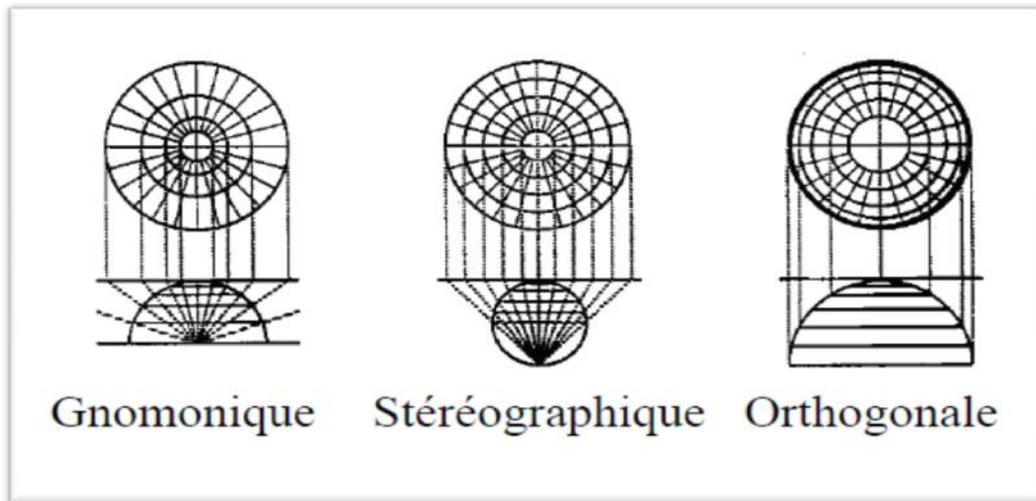


Figure N°03 : les projections azimutales

II.5.3. LES PROJECTIONS CYLINDRIQUES

sont vraies à l'équateur(cylindrique normale) ; les distorsions augmentent vers les pôles. Les pays dans les tropiques sont souvent représentés avec des projections cylindriques. Dans ce type de représentation, l'image des méridiens est un faisceau de droites parallèles, et l'image des parallèles, un faisceau de droite parallèles, orthogonales à l'image des méridiens. Elles peuvent réalisées de trois façons :

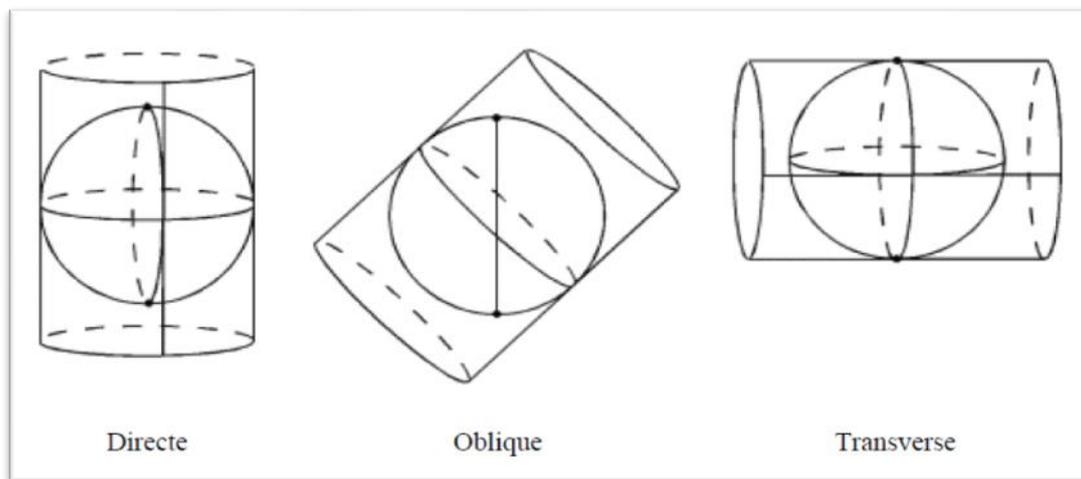


Figure N°04 : Les projection cylindriques

III.5.3. LES PROJECTIONS CONIQUES

sont vraies le long de certains parallèles entre l'équateur et un pôle; les distorsions augmentent de part et d'autre en s'éloignant de ces parallèles. Les régions de la zone tempérée sont souvent représentées avec des projections coniques. Dans ce type de représentation, les images des méridiens sont des demi-droites qui concourent en un point image du pôle et les parallèles des arcs de cercles concentriques autour de ce point. Elles peuvent être réalisées de deux façons :

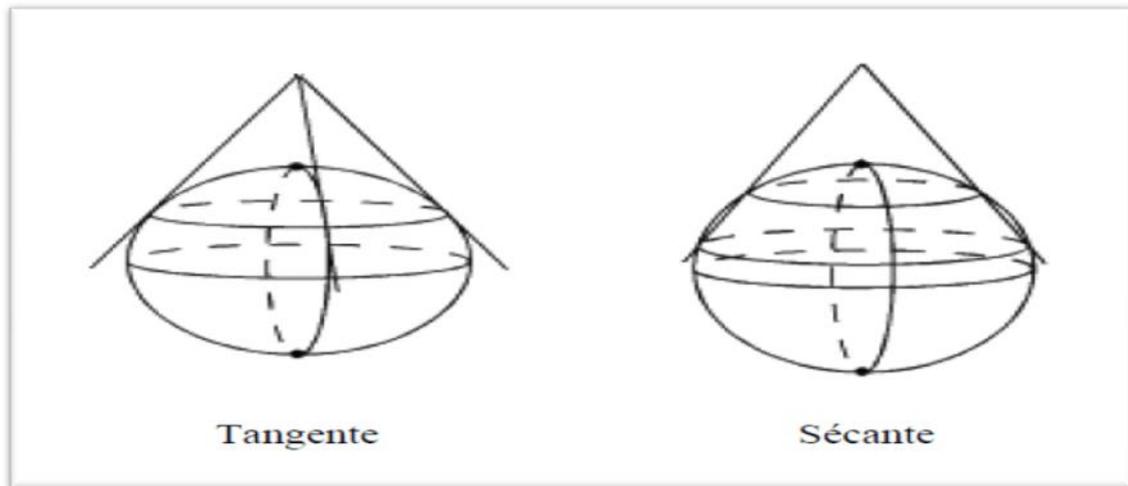


Figure N°05 : Les projection coniques

II.6. LE SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

II.6.1. DEFINITION D'UN SIG

Plusieurs définitions ont été proposées, mais elles s'orientent toutes vers le même ordre d'idées. Toutes reprennent les fonctionnalités que doit avoir tout **SIG**

- D'après l'Union Géographique Internationale (I .G. U) ,un système d'information géographique est « le terrain commun entre le traitement d'information et plusieurs domaines utilisant les techniques d'analyse spatiale »

- Pour STAR et ESTES(1990) cité par Mouissaa (2005), l'objectif d'un SIG est de permettre une utilisation pertinente des données couvrant une portion de la surface terrestre .il doit préparer les données pour des traitements ou des analyses , afin de les transformer en information, avec finalité la production cartographique, l'analyse spatiale, l'aide à l'expertise

- Une définition quelque peu différente (faisant ressortir l'aspect « aide à la décision » par rapport à l'utilisation) est donnée par DIDIER(1990) : un système d'information géographique est un ensemble des données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision

En définitif, on peut simplifier l'utilisation du SIG dans un cadre pratique comme dans notre cas comme étant la superposition de plusieurs cartes en une seule afin de rassembler les différentes informations en un lot pour simplifier la décision afin de résoudre des problèmes de gestion.

II.6.2. AVANTAGE D'UN SIG

Les systèmes d'informations géographiques présents d'énormes avantages pour l'utilisateur, parmi ces avantages en situés :

- les possibilités de description des organisations spatiales sont beaucoup plus larges
- l'accès à toutes les informations et par les utilisateurs est nettement facilité
- les sorties finales se font tout de même sur papier : une carte restant le moyen privilégié pour exprimer un phénomène spatialisé .
- on peut produire différentes cartes à partir des mêmes données ponctuelles mêmes modèles d'organisations, en modifiant les options (modifications des classes pour tel ou tel caractère).
- Il est possible, de façon quasi illimitée, de « croiser » des données hydrochimiques par exemple avec d'autres données spatialisées non hydrochimiques (géomorphologie, télédétection spatiale, climat)
- Enfin, à l'aide des modèles de fonctionnement (hydrologiques, croissance de telle plante), on peut procéder à des simulations fournissant des images selon divers scénarios

Les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) sont de plus en plus utilisés par des géographes, des planificateurs,etc. comme instrument facilitant toute une gamme probablement la raison importante que posent les SIG .

II.6.3. Les données du Système d'Information Géographique

Les données géographiques possèdent quatre composantes :

- les données géométriques renvoient à la forme et à la localisation des objets ou phénomènes ;
- les données descriptives (qui font partie des données attributaires) renvoient à l'ensemble des attributs descriptifs des objets et phénomènes à l'exception de la forme et de la localisation ;
- les données graphiques renvoient aux paramètres d'affichage des objets (type de trait, couleur...) ;
- les métadonnées associées, c'est-à-dire les données sur les données (date d'acquisition, nom du propriétaire, méthodes d'acquisition...).

II.6.4. UTILISATION

Les systèmes d'information géographiques sont utilisés essentiellement pour :

- l'analyse spatiale ;
- l'aide à la décision, notamment pour l'aménagement du territoire ;
- les définitions de zones de chalandise, implantations de points de vente, aides au médiaplanning notamment en affichage, optimisation de la distribution d'ISA (imprimés sans adresses) ;
- la cartographie ;
- la cartographie réglementaire, destinée à représenter et à rendre opposables les droits à construire sur un terrain particulier, elle permet d'élaborer graphiquement les plans locaux d'urbanisme (PLU) et de les éditer sous forme de documents papiers ou informatiques. La cartographie réglementaire doit permettre de faire le lien entre les différents acteurs de l'immobilier en partant des collectivités publiques compétentes en matière d'urbanisme en passant par les professionnels de la construction (promoteurs immobiliers et maîtres d'œuvres) sans oublier le public non professionnel.

II.6.5. LOGICIEL SURFER 8

L'étude de l'analyse structurale par la construction du variogramme et sa modélisation ainsi que la régionalisation via une cartographie est assurée par certaines opérations du programme **Surfer**(version8)

Le SURFER est un programme servant à la réalisation des représentations graphiques en deux et trois dimensions. Il peut convertir toutes informations numériques où data en représentation graphique « out standing contour », image, surface,... dont tous les aspects virtuels peuvent être personnalisées pour produire exactement le représentation qu'on veut réaliser

La régionalisation des paramètres chimiques, physique n'ont été autant jamais plus facile et rapide que celle fournie par le programme Surfer

L'exécution du programme permet de visualiser le menu et ces options, qui sont illustré ci-après :

Le fichier « Grid » utilise la commande « Griddata» pour crée le classeur Gridà partir d'un fichier data X,Y,Z

Comme méthode de « Griding » le Surfer emploie en plus d'autres techniques d'interpolation(Inverse Distance to a power, Natural Neighbor, polynomial Regression krigeage...etc.)la méthode du krigeage avec variogramme indiquant la structure spatiale correspondante à la répartition réel du phénomène étudié, cette méthode donne de très bon résultats pour la majorité des data X,YetZ, alors pour produire un fichier « Grid » à partir d'un fichier data X,YetZ il faut :

1. Créer un fichier en forme data suivant les coordonnées XY et la variable étudiée Z en colonnes séparées
2. Choisir l'option data « Grid » en choisissant le nom du fichier data. Dans cette étape on introduire les coordonnées X et Y (minimum et maximum) et faire les « Spacing appropriés » et il faut assurer que le « Griddingmethod » est de type kriging.
3. La visualisation du carte se fait par la commande « Map », « Contour Map » puis « New Contour Map »et faire ouvrir le fichier Grid qui a été déjà créé. l'option « Contour MapProperties »s'affiche en spécifiant les

« FillContour » et « ColorScale » puis sur « Smooth Contours » et par l'option « Levels » on choisit « Yes » pour toutes les courbes.

4. La réalisation des variogrammes se fait par l'option « Grid », « Variogram » puis « New Variogramme »

5. L'ajustement du variogramme se fait par l'option « Model » en spécifiant les différentes caractéristiques dans le menu « Variogramproperties » telles que « Max Lag Distance , Number of lag , lagwith et Vertical scale.... ».

LA PIEZOMETRIE

Chapitre III : La Piézométrie

III.1. DEFINITIONS

Un piézomètre est un dispositif qui permet de mesurer la charge hydraulique en un point du sol. Il est constitué, d'une façon générale, par un élément perméable (élément de tube crépiné, pierre poreuse, etc.) relié à la surface par un tube rigide ou une tubulure souple et mis en place dans un forage .

Un bouchon étanche est réalisé au-dessus du crépiné afin d'éviter les communications entre les trous de forage avec les autres nappes supérieures ou d'éviter des infiltrations d'eau. Par suite d'une confusion regrettable, on étend souvent le nom piézomètre à tout autre dispositif destiné à mesurer le niveau de l'eau dans le sol, par exemple un tube troué placé dans le trou d'un forage.

Cette erreur d'utilisation peut dans certains cas apporter des confusions et peut se traduire par des accidents de chantier qui auraient pu être évités si des piézomètres, au sens propre du mot, avaient été installés et interprétés correctement.

III.2. LE GRADIENT HYDRAULIQUE

Le gradient hydraulique, i , entre deux points d'un milieu est défini par la relation suivante :

$$i = \Delta H / L = (H_2 - H_1) / L = -\partial h / \partial l$$

avec ΔH , la différence des charges hydrauliques entre deux points et L la distance entre ces deux points.

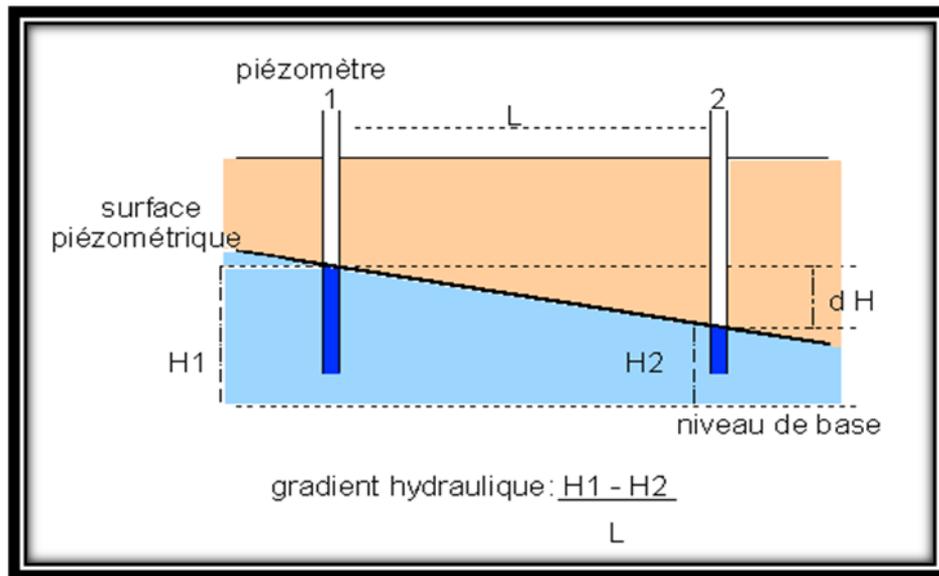


Figure N06 : schéma présentatif du gradient hydraulique

III.3. LA HAUTEUR PIEZOMETRIQUE

Pour un point M situé au sein d'un milieu aquifère avec la cote z , si on mesure le niveau d'eau au moyen d'un piézomètre à la cote z' , la pression d'eau sera donc :

$$u = (z' - z) w$$

et la charge hydraulique sera :

$$H = (z' - z) + z = z'$$

La charge hydraulique au point M sera donc égale à la hauteur d'eau dans le piézomètre par rapport au point M; la hauteur z' est appelée également la hauteur piézométrique. Le lieu de l'ensemble des hauteurs piézométriques d'une nappe est appelé la surface piézométrique. Sur une surface piézométrique, la pression est égale à la pression atmosphérique.

III.4. DIFFERENTS TYPES DE PIEZOMETRES

III.4.1. PUIT OUVERT

C'est la technique la plus commune à enregistrer le niveau de l'eau consiste à mesurer ce dernier dans le trou du forage. Un des inconvénients de cette technique est que les différentes couches de sol peuvent avoir différentes pressions hydrostatiques et par conséquent le niveau mesuré sera inexact et non représentatif du site. Cette technique est utile uniquement pour les dépôts homogènes.

La plupart des inconvénients de la technique précédente peut être éliminée en installant un piézomètre. Ce système permet d'isoler une section bien limitée des sols.

III.4.2. Piézomètre à élément poreux

un élément poreux est connecté à un tube de mesure de faible diamètre afin de diminuer le temps de réponse de l'instrument. En fait, il s'agit du piézomètre Casagrande dont l'élément poreux est une pierre en céramique ou tout autre matériau de mêmes dimensions

Les pores de l'élément ont une dimension de 0.050mm de telle sorte que l'on peut l'utiliser en contact direct avec les sols fins.

III.4.3. Autres types

Les autres types de piézomètres utilisés sont pneumatiques à air, pneumatique à l'huile ou hydrauliques. Généralement, on distingue deux types de piézomètres:

A-Piézomètres ouverts

Les piézomètres ouverts peuvent être réalisés soit par forage, soit par battage.

- Installation par forage : Si le terrain est instable, le forage sera tubé car l'emploi de la bentonite (pour la stabilité des parois) doit être absolument prohibé pour éviter le colmatage du terrain. Une fois atteinte la profondeur désirée, on introduit dans le forage un tube piézométrique crépiné à sa base.

Lorsqu'on veut procéder des mesures ponctuelles, est évident que la crépine devra être très courte. Si par contre, il ne s'agit que de mesurer un niveau d'eau, on pourra adopter une valeur beaucoup plus importante, mais sans dépasser 2.0 m de longueur. En ce qui concerne la densité des vides de la crépine, il faut qu'elle soit telle que sa perméabilité soit très élevée. Une fois le piézomètre placé dans le forage tubé, on introduit dans l'espace annulaire, tout en remontant le tube de forage, un filtre dont la granulométrie doit être compatible avec celle du terrain environnant.

On confectionne ensuite au-dessus du filtre, un bouchon étanche sur une hauteur d'environ 1m. La réalisation du bouchon est une opération très délicate qui demande beaucoup d'expérience. Enfin on finalise les travaux en remblayant toujours dans l'espace annulaire.

→ Avantages des piézomètres ouverts:

Simplicité, fiabilité, pas d'appareillage et composants compliqués.

→ Désavantages des piézomètres ouverts: Temps de réponse long; tubulure doit être verticale ; sujet au gel; ils peuvent être endommagés par l'équipement de construction en surface et possibilité de bulles d'air emprisonnées dans la colonne d'eau.

B-Piézomètre à volume constant

Comme on a souligné plus haut, le temps de réponse des piézomètres ouverts dans les sols argileux est très long. On a donc cherché à diminuer le volume d'eau nécessaire pour l'équilibre des pressions et l'on a conçu des piézomètres dits à volume constant. Il existe différents types de ce genre de piézomètres tels que :

B1-Piézomètres Hydrauliques

Ce sont des piézomètres du type ouvert dans lesquels on a placé un manomètre à l'extrémité des tubulures. Les tubulures sont remplies d'un liquide incompressible. La pression interstitielle au niveau de la crépine, u , s'obtient en mesurant la pression au niveau du manomètre

→ Avantages: Simple, fiable, temps de réponse plus rapide, et moins sujet à être endommagé.

→ Inconvénients: Sujet au gel, les tubulures doivent être désaérées périodiquement

B2 -Piézomètres pneumatiques

Ces sont constitués d'un piézomètre d'un élément déformable (membrane flexible). La pression de l'eau contenue dans le sol applique la membrane sur les deux orifices de la chambre de pression. Par l'un de ces orifices, on envoie un gaz comprimé (air, azote ou CO₂). Lorsque la pression du gaz est égale à la pression interstitielle du sol, u , la membrane se trouve en équilibre indifférent, et le gaz s'évacue par la deuxième tubulure.

→ Avantages: Pas de correction hydrostatique, réponse rapide, peut être branché un système d'acquisition de données, n'est pas limité par la profondeur de la nappe.

→ Inconvénients: Problèmes de condensation, période d'utilisation limitée à quelques années.

B3-Piézomètres à corde vibrante

Ils sont basés sur la déformation d'une membrane solidaire d'un fil tendu (corde vibrante). La pression interstitielle agissant sur la membrane fait varier la tension dans le corde. La fréquence de vibration est fonction de la tension de la corde . En mesurant la fréquence de vibration, on peut calculer la tension et ensuite la pression interstitielle.

→ Avantages: Possibilité d'enregistrement continu, grande sensibilité, réponse rapide, non sujet au gel, peut être ré-étalonné, poste de lecture peut être très éloigné du site, peut mesurer des pressions négatives.

→ Inconvénients: Sensible à la température, dérive dans le temps, sensible à l'humidité et aux orages électriques, action galvanique et le prix est élevé.

III.5. DIFFERENTS TYPES DE NAPPES

III.5.3. NAPPE LIBRE

C'est une nappe contenue dans une couche perméable partiellement saturée et reposant sur une couche imperméable ou semi-imperméable. La surface libre étant toujours à la pression atmosphérique.

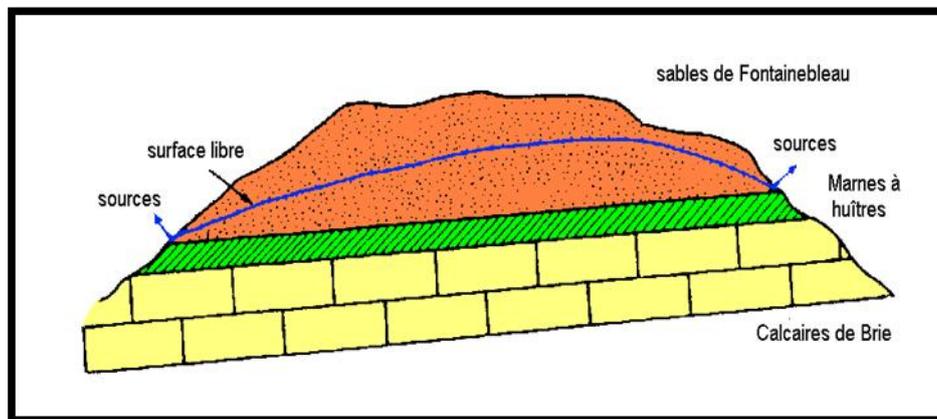


Figure N07 : la nappe libre

III.5.2. NAPPE CAPTIVE

C'est un aquifère contenu dans une couche perméable saturée à 100 % entre deux couches imperméables, un aquitard (argile, silt ou d'autres matériaux imperméables), et dont la pression, en tout point, est supérieure à la pression atmosphérique. Dans un aquifère confinée, le niveau d'eau dans un piézomètre

dépasse celui du niveau de la partie supérieure de l'aquifère confiné. La pression de confinement est égale à la différence du niveau d'eau dans l'aquifère et celui de la partie supérieure de l'aquifère exprimée en unité de pression (multiplié par le poids volumique de l'eau).

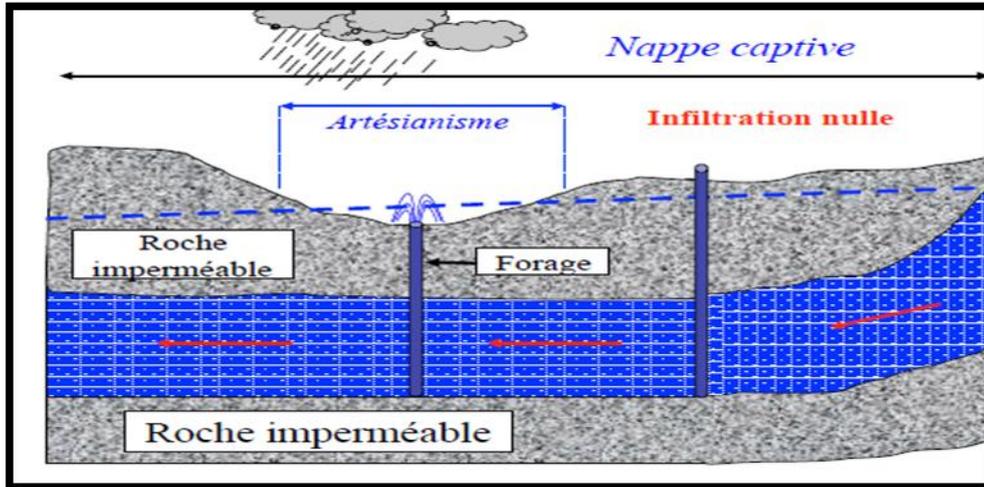


Figure N08 : la nappe captive

III.5.3. NAPPE ARTISIENNE

C'est un aquifère où le niveau piézométrique dépasse celui de la surface du terrain à l'endroit du sondage, du piézomètre ou du puits réalisé. L'eau souterraine est donc capable de jaillir en surface du terrain si on réalise un puits.

III.6. L'EAU SOUTERRAINE DANS LES ROCHES

L'eau souterraine se trouve dans les interstices des roches qui ont une origine, des formes et des tailles variées. La capacité des roches à laisser circuler l'eau à travers ses interstices s'appelle la perméabilité. Celle-ci dépend de leurs propriétés physiques et de leur histoire génétique (facteurs et processus géologiques). Les interstices en tant que parcours possible de l'écoulement souterrain (aquifère) peuvent être classés de la façon suivante:

Les pores sont des interstices entre les grains consolidés ou non consolidés des sédiments clastiques ou des tufs volcaniques non consolidés (Fig09.A)

Les fissures sont des cassures ou des craquelures dans les roches (Fig09.B)

Les cavités se rencontrent dans les roches carbonatées (Fig09.C) et les coulées de laves dans les roches volcaniques.

L'organisation spatiale d'un aquifère contrôle la forme et le caractère hydrodynamique de l'écoulement, le temps de transit et le temps de séjour de l'eau souterraine. Dans les zones fissurées des circulations mixtes existent; elles peuvent contribuer de manière significative à la recharge ou permettre des communications entre plusieurs aquifères. La nature (lithologie) de l'aquifère et l'interface eau-roche contrôlent les réactions hydrochimiques et le comportement des éléments dissous dans les eaux souterraines.

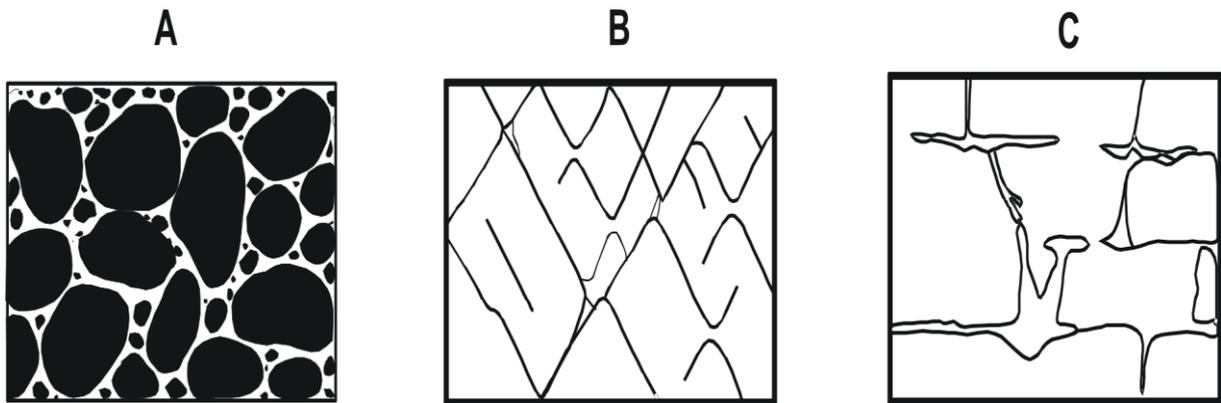


figure N09 : Les différents types d'interstices et leur relation avec la texture et la porosité. (A) Dépôts sédimentaires à forte porosité, (B) Roches poreuses du fait de la fissuration, et (C) Roches poreuses du fait de la dissolution des fractures.

L'hydrochimie

Chapitre IV :L'hydrochimie

IV.1 INTRODUCTION

Les eaux sous terraines représentent une phase aqueuse dont la composition peut être très complexe étant donnée son grand pouvoir dissolvant .la plupart des eaux qui circulent en lessivant les terrains ne conservent en fait qu'une minéralisation réduite et qui varie en fonction du contexte géologique et du climat. Les substances chimiques les plus courantes dans l'eau souterraines sont les suivantes (Detay, 1997)

Les substances minérales anioniques (carbonate, sulfates et chlorures.....) et cationique (calcium, magnésium et sodium ...)

IV.2 PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'EAU

IV.2.1. PARAMETRES PHYSIQUES

A-LA TEMPERATURE

La température de l'eau est un paramètre de confort pour les usagers .elle permet également de corriger les paramètres dont les valeurs sont liées à la température (conductiviténotamment). De plus, il est signalé que la connaissance de ce paramètre peut aider d'obtenir des indications sur l'origine et l'écoulement de l'eau (Guy, 2003)

B- LEpH

le pH(potentiel Hydrogène) mesure la concentration en ion H^+ de l'eau .Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0à14, 7 étant le pH de neutralité . Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique.

C-LA CONDUCTIVITE

Elle indique la capacité de l'eau à transmettre un courant électrique. La conductivité est directement proportionnelle à la quantité des sels (ions) dissous dans l'eau ; la conductivité électrique s'exprime en millimhos/cm ou

en décisiemens (ds/m), elle est proportionnelle à la somme des cations ou des anions (Baza, 2005).

IV.2.2. PARAMETRES CHIMIQUES

IV.2.2.1 LES ANIONS

A-CHLORURE

Les chlorures provenant essentiellement de la désolution des sels naturels provoquer par lessivage des terrains salés, et aussi de l'évaporation interne, dans les régions où le niveau piézométrique est proche de la surface.

La présence des chlorures dans les eaux souterraines peut avoir une origine essentiellement agricole (engrais, pesticides ...) ou industrielle et urbain égout. En l'absence des apports cités ci-dessous, les eaux souterraines ne contiennent en générale que de faible quantité de chlorure dans l'origine et attribue à des retombées d'origine climatique (pluies) et au lessivage des formations géologiques par les eaux d'infiltration. (Barkani et Benarfa, 2005)

B-SULFATES

Les sulfates des eaux souterraines proviennent essentiellement de la dissolution du gypse (Ca^{2+} , $\text{So}_4^{2-}, 2\text{H}_2\text{O}$) dans les terrains gypseux ou de lessivage de terrains contenant « pyrites » dont les sulfures entraînés s'oxydent en sulfate à l'air. (Abdlhafidi, 2005)

Elles peuvent aussi provenir des rejets d'eaux usées d'origine industrielle et du lessivage des engrais dans les terrains agricoles.

C- NITRATES

Les nitrates, en faible quantité dans les eaux souterraines proviennent de la nitrification de l'azote organique des sols par les bactéries et de l'oxyde d'azote atmosphérique apporté par la pluie. Les teneurs anormalement élevés sont liées aux apports d'engrais chimique et organique et aux rejets des eaux usées d'origine domestique et industrielle. (Baza, 2005)

La concentration en nitrate des eaux souterraines est en augmentation dans les régions et certaines réserves des eaux souterraines risque de devenir inconsommables

D- LES BICARBONATE ET LES CARBONATES

Les carbonates sont les dérivés de l'acide carbonique (H_2CO_3), formé lorsque dioxyde de carbone (CO_2) se dissout dans l'eau ; par contre la présence des bicarbonates (HCO_3^-) liée à la nature lithologie des terrains traversés (Encarta, 2005).

IV.2.2.2. LES CATIONS

A- LE SODIUM

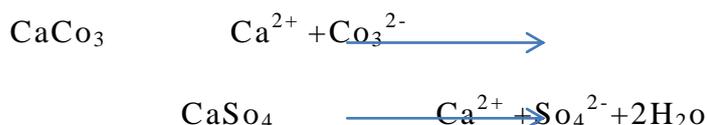
En raison de sa solubilité, le sodium est un élément fréquemment rencontré dans les eaux souterraines. Il présente plusieurs origines indépendamment du lessivage des formations géologiques riche en NaCl ; le sodium peut provenir de la décomposition des sels minéraux tels que les silicates, des venues d'eaux salées dans les nappes ; des rejets d'eaux usées d'origine industrielle et domestique (Taha, 2002).

B- LE MAGNESIUM

L'origine de magnésium dans les eaux souterraines est liée à la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite).

C- LE CALCIUM

La présence des ions Ca^{2+} dans les eaux souterraines est liée à deux origines géologiques : soit à la dissolution des formations carbonatées ($CaCO_3$) soit à la dissolution des formations gypseuses $CaSO_4$.



D-LE POTASSIUM

le potassium provient de l'altération des formations silicatées (gneiss, schiste), les argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques. (Abdlhafidi, 2005).

IV.3. LES FACTEURS CHIMIQUES DE POLLUTION DES EAUX

IV.3.1. LES IONS D'AMMONIUM

L'ammonium provient soit de la réduction des nitrates, soit des activités humaines (rejets d'effluents des stations d'épuration, activités industrielles, élevage). L'ammonium est un indice d'une possible contamination

microbiologique. Il peut aussi modifier le goût de l'eau ou provoquer la prolifération de bactéries nitrifiantes. (Encarta, 2005).

IV.3.2. LES NITRITES

Les nitrites proviennent d'une transformation de l'ammonium par les bactéries. Leur présence est signe d'une pollution d'origine bactériologique et organique. Les nitrites sont aussi les plus toxiques. Le principal risque pour la santé humaine associé à l'ingestion de nitrates est lié à la faculté de l'organisme humain de transformer les nitrates en nitrites. Cette réduction de NO_3 en NO_2 est le fait des bactéries ayant une activité nitrate réductase. Les nitrites ainsi formés sont susceptibles de se fixer sur l'hémoglobine. Celle-ci est alors oxydée en méthémoglobine incapable de transporter de l'oxygène. Le transport de l'oxygène vers les tissus qui en ont besoin ne se fait plus. Cette maladie est dénommée méthémoglobinémie. Chez l'adulte, ce risque est très faible car une enzyme réduit la méthémoglobine en hémoglobine.

IV.3.3. LES PHOSPHATES

Les phosphates rejetés dans l'environnement proviennent, de sources agricoles (engrais) et industrielles, de déjections humaines et de détergents ou lessives phosphatées. Les phosphates sont les principaux responsables, des

phénomènes d'eutrophisation et dedystrophisation. En effet, non toxiques en eux-mêmes pour la vie animale et végétale, ils portent atteinte à l'environnement dès lors qu'ils sont en fortes concentrations. (Encarta, 2005).

IV.3.4. L'OXYDABILITE AU PERMANGANATES DE POTASSIUM

Ce test permet d'évaluer la quantité de matières organiques et minérales dans l'eau. Il a un caractère qualitatif, permet d'approcher une teneur globale des matières organiques et minérales. Les matières organiques d'origine animale s'oxydent plus facilement en milieu alcalin tandis que celles d'origine végétale le sont plutôt en milieu acide. Au-delà de 2 mg/l, on peut considérer que, sauf dans le cas des ruisseaux à substrat humique, une eau de rivière représente des traces de pollution. Une oxydabilité élevée doit faire suspecter une contamination microbienne. (RODIER, 2005).

Présentation Du Site

Chapitre V :Présentation Du Site

MATERIELS ET METHODES

Chapitre VI:Matériels et Méthodes

VI.1. SECTEUR D'ETUDE

L'étude s'intéresse au long de la vallée de Metlili; suivant le méridien 03° 31' Est, le parallèle 32° 18' Nord au niveau de la région de Timadakssine (amont de la vallées), et le méridien 03° 41' Est, le parallèle 32° 14' Nord au niveau de la région de souareg (aval de la vallées).

Du point de vue cartes topographiques, on dispose d'un levé topographique à L'aide de Google earth.

La campagne d'inventaire a touché 34 puits et s'est portée sur :

- 1 – mesure de niveau statique dans le puits;
- 3 – positionnement du puits à l'aide d'un GPS;
- 4 – prélèvement d'échantillons d'eau.



Figure N °16:la vallée de Metlili

VI.2. LES TRAVEAUX PIEZOMETRIQUES

VI.2.1. INTRODUCTION

La mesure du niveau des eaux souterraines est d'une importance fondamentale dans l'hydrogéologie. Le niveau des eaux souterraines de l'aquifère peut être utilisé pour plusieurs raisons y compris un complot hydrogramme, et la construction d'une carte piézométrique qui est nécessaire afin de connaître l'extension de l'aquifère, la direction et la vitesse de l'écoulement des eaux souterraines, ainsi que leur zones d'accumulation.

VI.2.2. MESURE DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE

Les mesures des différents niveaux piézométriques doivent être effectuées dans des conditions de stabilisation de la nappe pour l'ensemble de la région cartographiée au cours d'une période la plus courte possible. En effet Castany (1998) souligne que la surface piézométrique que nous mesurons, constitue la limite supérieure de la nappe. C'est une limite hydrodynamique donc en perpétuelle fluctuation. Cette limite (surface piézométrique) peut s'élever ou s'abaisser librement dans la formation hydrogéologique perméable.

VI.2.3. LAMETHODE DU TRAVAIL

Le principe du travail consiste à déterminer les coordonnées géographiques (la localisation des points) de chaque puits à l'aide d'un GPS. ces derniers sont utilisées pour la réalisation des cartes piézométriques

VI.4. LE MATERIEL UTILISE

➤ le GPS :

Le « global positioning system » ou le système de positionnement global C'est un appareil de pointe qui permet de donner la position exacte (en 3 dimensions : latitude, X ; longitude, Y et altitude, Z) de l'ouvrage (le lieu) au niveau duquel on se trouve et où l'on a effectué la mesure

Le GPS que nous avons utilisé lors de la prise des mesures dans notre bassin versant est de marque GARMIN



Figure N°17 : le GPS utilisé aux travaux piézométriques

➤ **LA SONDE LUMINEUSE**

La sonde est un appareil qui permet de mesurer la profondeur à laquelle se trouve la surface de l'eau dans un puits. Pour la mesure des niveaux statiques des différents ouvrages de notre bassin, nous avons utilisé une sonde électrique possédant un voyant qui s'allume une fois que le bec de la sonde est en contact avec la surface de l'eau.



FigureN° 18 : lasonde lumineuse

VI.4. LES TRAVEAUX D'ÉCHANTILLONNAGE

VI.4.1. LE PRELEVEMENT

il existe plusieurs types d'échantillons :l'échantillon ponctuel, l'échantillon périodique ; l'échantillon composé (pondéré ou non) et l'échantillon intégré.

Le prélèvement des échantillons d'eau est une opérations délicate à laquelle le plus grand soin doit être apportés. Les échantillons doivent être homogènes , représentatifs obtenues sans modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (RODIER,2005).

Les prélèvements ont été effectués dans la période de 15mars-03avril 2013 (34) points d'eau différents au long de la vallée de Metlili .Les échantillons ont été prélevés dans des bouteilles en plastiques préalablement lavées à l'eau distillée et rincée à l'eau à analyser. Ils sont conservés dans une glacière.

Les analyses ont été réalisées au niveau du laboratoire de l'université de GHARDAIA

VI.4.2. MODE DE PRELEVEMENT

Dans tous les prélèvements, les démarches suivantes ont été respectées :

Les bouteilles d'échantillonnage utilisées étaient en polyéthylène de 1000 ml,préalablement nettoyées à l'acide et à l'eau de robinet, puis trois fois à l'eaudistillée.

Sur le terrain, et en absence de pompage, il était indispensable de faire coulerl'eau de puits pendant au moins 10 minutes pour éviter l'effet de stagnation.

La bouteille est rincée 3 fois à l'eau de puits et après remplie jusqu'au bord.

Le bouchon était placé de telle façon qu'il n'y ait aucune bulle d'air et qu'il ne soit pas éjecté au cours du transport.

Une fois les bouteilles remplies, elles étaient conservées dans des glacièrespour maintenir une température basse qui éviterait le dégazage de l'eau et laprécipitation de certains éléments.

Chaque bouteille était accompagnée d'une fiche signalétique permettant derassembler les renseignements utiles suivants :

-  Identité du prélèvement ;
-  Date et heure du prélèvement ;
-  Ville ou établissement que l'eau alimente ;
-  Nom du point d'eau et localisation précise ;
-  origine de l'eau (puits ou forages) ;



FigureN° 19: les bouteilles d'échantillonnage

VI.5. LES TRAVEAUX D'ANALYSES AU LABORATOIRE

VI.5.1. L'ANALYSE DE LA QUALITE DE L'EAU

L'analyse régulière de la qualité de l'eau est indispensable au maintien d'une réserve d'eau fiable et sûre, les résultats de l'analyse permettent de prendre les mesures nécessaires pour régler des problèmes particuliers.

On s'assure ainsi de protéger adéquatement la source d'eau contre une éventuelle contamination de choisir le traitement approprié et de contrôler l'efficacité de ce traitement.

Il est important d'analyser la qualité de son eau en fonction de l'usage prévu, que ce soit l'abreuvement du bétail, la pulvérisation de produits chimiques ou l'eau potable afin de prendre des décisions éclairées au sujet de l'eau et de son utilisation.

VI.5.2. L'IMPORTANCE DE L'ANALYSE

Une analyse régulière est importante pour les raisons suivantes:

- Elle permet de définir les problèmes existants ;
- Elle garantit une eau qui convient à l'utilisation prévue ;
- Elle garantit une eau potable sûre ;
- Elle permet de vérifier l'efficacité du système de traitement.

VI.5.3. LES ANALYSES REALISEES

Le principe de travail consiste à faire une analyse des quelques paramètres physico-chimiques des eaux dans la région de Melti. Elle est principalement dans les mesures des

variations dans les valeurs de pH , la conductivité électrique (CE) et la dureté totale TH, et le calcium.

VI.5.3.1. MESURE DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE

La conductivité est définie par la teneurs des sels dessous dans un liquide ; elle a été réalisé à l'aide d'un conductimètre de marque JENWAY.

Premièrement il est nécessaire de rincer l'électrode avec l'eau distillé, et après en prolonge l'électrode dans l'échantillon de l'eau et en fait la lecture du valeur qui est donné en us/cm dans la plupart des cas ,surtout si la température est différente à 25°C (température de référence) pour cela en fait la correction de température en utilisant la formule suivante :

$$CE \text{ à } 25^{\circ}C = L * K * f(t)$$

$$f(t) = 1 - T^{\circ} - 25 * 0.02$$

L : la lecture de conductivité en us/cm

K :le constant de le cellule; dans ce cas $K= 1.033$

T° : la température de l'eau au cours de lecture en c°

$f(t)$: facteur de correction



Figure N°20 : le conductimètre

VI.5.3.2. MESURE DE pH

Le pH ou le potentiel d'hydrogène est le logarithme décimal de l'inverse de sa concentration en ions d'hydrogène [H_3O^+], il est inférieur ou supérieur à 7 suivant que l'eau

est acide ou basique. Le pH présente une notion très importante pour la détermination de l'agressivité de l'eau. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un pH-mètre de marque JENWAY.

Cet appareil doit être étalonné en laboratoire, à l'aide d'une solution de pH égale à 7 puis d'une solution de pH égale à 9. Pour la réalisation des mesures il suffit de prolonger l'électrode dans l'échantillon d'eau et prendre la lecture après la stabilisation.

MODE OPERATOIRE

a) l'étalonnage de l'appareil :

- allumer le pH-mètre
- Rincer l'électrode avec l'eau distillée
- Prendre la solution tampon de pH=7 dans un bécher
- Régler l'agitation à faible vitesse
- Tremper l'électrode de pH dans la solution tampon de pH=7
- Laisser stabiliser un moment jusqu'à l'affichage du standard 2
- Enlever l'électrode et la rincer abondamment avec l'eau distillée
- Ré-étalonner de la même manière avec la solution tampon pH=9
- Puis rincer abondamment l'électrode avec l'eau distillée

b) Dosage de l'échantillon :

- Prendre environ de 100ml d'eau à analyser
- Mettre un agitateur avec une faible agitation
- Tremper l'électrode dans le bécher
- Laisser stabiliser un moment avec une faible vitesse d'agitation
- Puis noter la lecture de pH



Figure N°21: le pH-mètre

VI.5.3.3. MESURE DE LA DURETE TOTALE DE L'EAU

Teneur en calcium et magnésium, s'opposant à la formation de mousse avec le savon et permettant le dépôt de sels insolubles et incrustants (tartres ou incrustations).

PRINCIPE

Titration molaire des ions calcium et magnésium avec une solution de sel disodique de l'acide EDTA à pH=10. L'indicateur coloré est le NET (Noir d'EriochromeT), qui donne une couleur rouge foncée ou violette en présence des ions calcium et magnésium.

MODE OPERATOIRE

A 50 ml d'échantillon on ajoute 4 ml de la solution tampon pH= 10 (solution de NH_4Cl), en présence de l'indicateur coloré la solution doit se colorer en rouge foncé ou violet, le titrage se fait avec l'EDTA 0,01 N, le virage est atteint par la couleur Bleu royale.

Si le volume de l'EDTA est supérieur à 20 ml il faut faire une dilution au 1/10 pour l'échantillon.(RODIER,2005)

EXPRESSION DES RESULTATS :

$$[TH] = V_{EDTA} * f * 20$$

[TH] : concentration de la dureté totale en mg/l

V_{EDTA} : volume de l'EDTA en ml

f : nombre de dilution

V.5.3.4. MESURE DE LA DURETE CALCIQUE

PRINCIPE

Dosage des ions Calciums avec une solution de sel disodique d'EDTA. L'indicateur coloré Calonne carboxylique forme un complexe rouge avec le calcium. Lors du dosage, les ions de calcium réagissent avec l'EDTA, d'abord les ions libres puis ceux qui se combinent avec l'indicateur coloré vont virer la couleur du rouge au bleu clair.

REACTIFS

- ❖ Hydroxyde de Sodium C (NaOH) \approx 2 mol/l
- ❖ EDTA C (Na₂EDTA) = 0,01 mol/l
- ❖ Indicateur coloré NET

MODE EPURATOIRE

La prise d'essai est de 50 ml à laquelle on ajoute 2 ml de NaOH en présence d'indicateur coloré, titrer à l'EDTA, le virage est atteint lorsque la couleur devient nettement bleu et persistante. (RODIER,2005)

EXPRESSIONS DES RESULTATS

$$[Ca] = V_{EDTA} * f * 8.016$$

[Ca] = concentration de calcium en mg/l

V_{EDTA} : volume de l'EDTA en ml

f : nombre de dilution

REMARQUE

$$\text{La Dureté Magnésienne (mg/l)} = (V_{TH} - V_{Ca}) * f * 4.86$$

V_{TH} : volume de TH en ml

V_{Ca} : volume de calcium en ml

f : nombre de dilution

Discussion des données

VII.1. INTRODUCTION

A toute étude de régionalisation, il est nécessaire de procéder à l'analyse des paramètres de position (moyenne, médiane.....) et des paramètres de dispersion (l'écartype, la variance...), pour données une visée approximative à l'étude. En effet, le programme Surfer fournit un rapport statistique détaillé en parallèle à la réalisation des Variogrammes.

VII.2. PARAMETRES PIEZOMETRIQUES

Le tableau suivant résume les paramètres statistiques de la piézométrie

paramètres piézométriques	Moyenne	Ecartype	Min	Max	Variance	Médiane
niveau statique(m)	19.82	9.71	3	42	94.37	20.1
niveau piézométrique(m)	487.873	21.166	446	521.8	448	491.6

Tableau N°02 : les paramètres statistiques des variables piézométriques

D'après ce tableau en remarque que les écart types et les variances ont une variation importantes, et le niveau statique (la profondeur d'eau), varie dans une intervalle limitée par 3 m comme valeur minimale a 42 m comme valeur maximale, d'autre part le niveau piézométrique atteint un minimum de 446m et un maximum de 521.8m

VII.3. PARAMETRES PHYSIQUES

Les paramètres statistiques des grandeurs physiques analysés sont représentés dans le tableau suivant :

Paramètres physique	Moyenne	Ecartype	Min	Max	Variance	Médiane
pH	7.87	0.47	7.14	8.86	0.22	7.79
CE(µs/cm)	1873.96	1480.5	237.38	6453.5	2191902	1605.5

Tableau N °03 : les paramètres statistiques des variables physiques

Le tableau montre la variabilité et les étendues des écartypes qui sont remarquablement importantes. On note que le pH varie entre un minimum de 7.14 jusqu'à un maximum de 8.86 . La conductivité électrique varie entre un minimum de 237.38 μ s/cm et un maximum de 6453.5 μ s/cm.

VII.4. PARAMETRES CHIMIQUES

Les grandeurs chimiques choisies sont le Calcium et le Magnésium. Les paramètres statistiques qui décrivent le comportement des éléments chimiques étudiés sont donnés dans le tableau suivant :

Paramètres chimique	Moyenne	Ecartype	Min	Max	Variance	Médiane
TH	1420.678	1113.99	200	4800	1240994.8	1260
Ca⁺	240.9257	129.643	56.112	496.99	16807.345	232.464
Mg⁺	175.3351	195.373	14.58	816.48	38170.953	82.62

Tableau N °04 : les paramètres statistiques des paramètres chimiques

D'après le tableau en remarque que :

- la dureté totale varie entre 200 et 4800mg/l avec un écartype de 1113.99 et une variance de 1240994.8.
- Le calcium (ca⁺²) a un écartype de 129.643148 et une variance égale à 16807.345. L'intervalle de ce paramètre est limité entre 56.112 et 496.992 mg/l.
- Le magnésium (mg⁺²) a un écartype de 195.335 et une variance de 38170.9 l'intervalle de ce paramètre est varié entre 14.58 et 816.48 mg/l.

Résultats et Interprétations

Chapitre VII : Résultats et interprétations

VIII.1 INTRODUCTION

La régionalisation des paramètres piézométriques et hydrochimiques par des méthodes traditionnelles est une opération très onéreuse, et peut présenter des erreurs non tolérables. Pour cela il est nécessaire de présenter une approche géostatistique basée sur l'estimation spatiale où le krigeage, qui peut générer des surfaces estimées à partir d'une valeur de point connu (échantillonné) et un modèle de variation théorique (Variogramme). La structure spatiale des paramètres piézométriques et hydrochimiques sont celle de la campagne d'échantillonnage et de mesure de la date Avril 2013 sur la nappe phréatique de Metlili.

VIII.2. VARIOGRAPHIE

Les Variogrammes de différents paramètres étudiés sont tracé par le logiciel Surfer afin de mettre en évidence les caractéristiques structurales de les variables régionalisées, et de proposer et ajuster un modèle structural théorique pour procéder au krigeage.

VIII.2.1. VARIOGRAMMES DES PARAMETRES PIEZOMETRIQUES

VIII.2.1.1. NIVEAU PIEZOMETRIQUE

variogramme: niveau piézométrique (m)
Direction: 0.0 Tolerance: 90.0

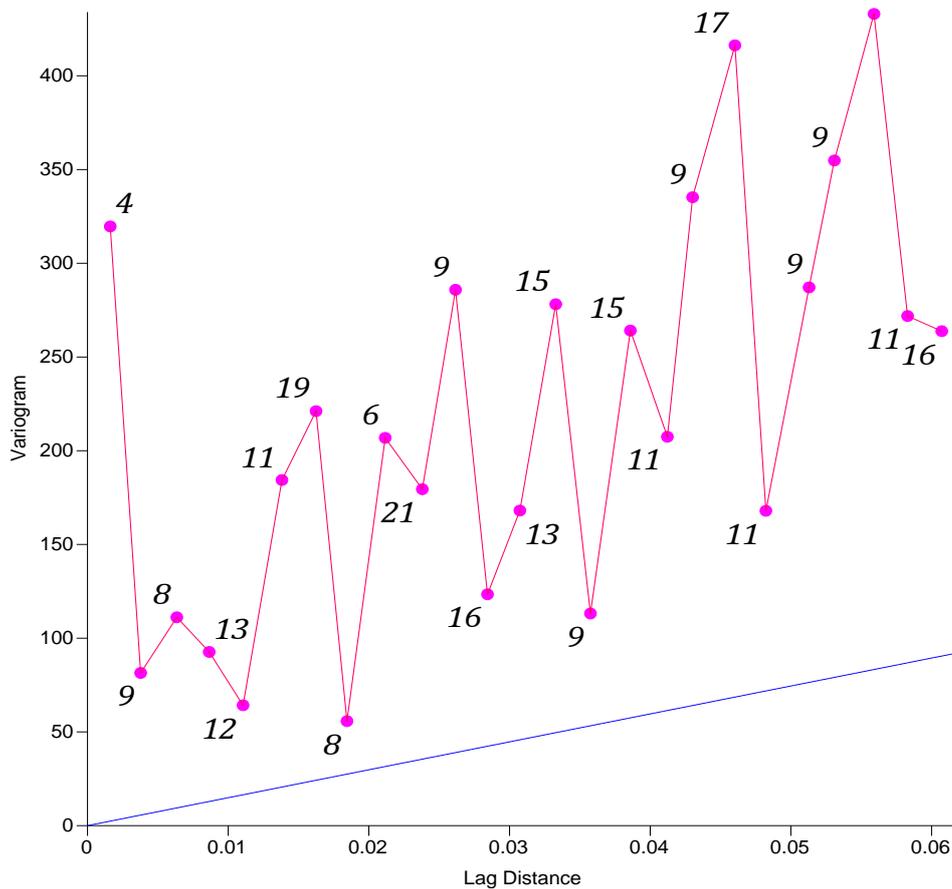


Figure N°22 : le variogramme du niveau piézométrique

Cette figure représente le variogramme expérimentale des valeurs de niveau piézométrique de la vallée de Metlili qui s'ajuste au modèle linéaire représentant une anisotropie de ratio égale à 1 et un angle de 0°

Les caractéristiques de cette structure spatiale sont :

Max lag distance = 0.062

Number of lags = 24

Lagwidth = 0.00258333

Vertical scale = 667.176686

VIII.2.1.2. LE NIVEAU STATIQUE

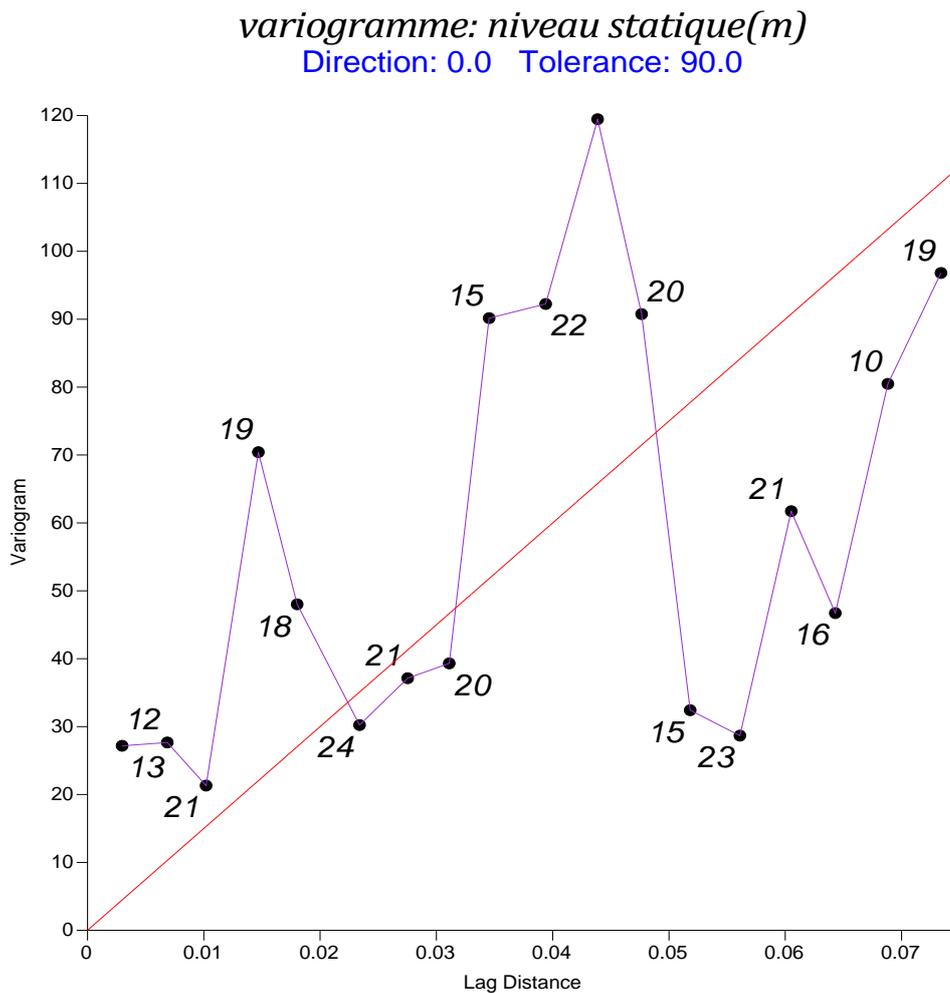


Figure N°23 : le variogramme du niveau statique

Le variogramme expérimentale du niveau statique suivi un model linéaire avec un anisotropie de ratio=1 et un angle=0°, un Slope égale à 1500

Les caractéristiques de cette structure spatiale sont :

Max lag distance =0.075

Number of lags =18

Lagwidth =0.00416666

Vertical scale =120

VIII.2.2. VARIOGRAMME DES PARAMETRES PHYSIQUES

VIII.2.2.1. LE pH

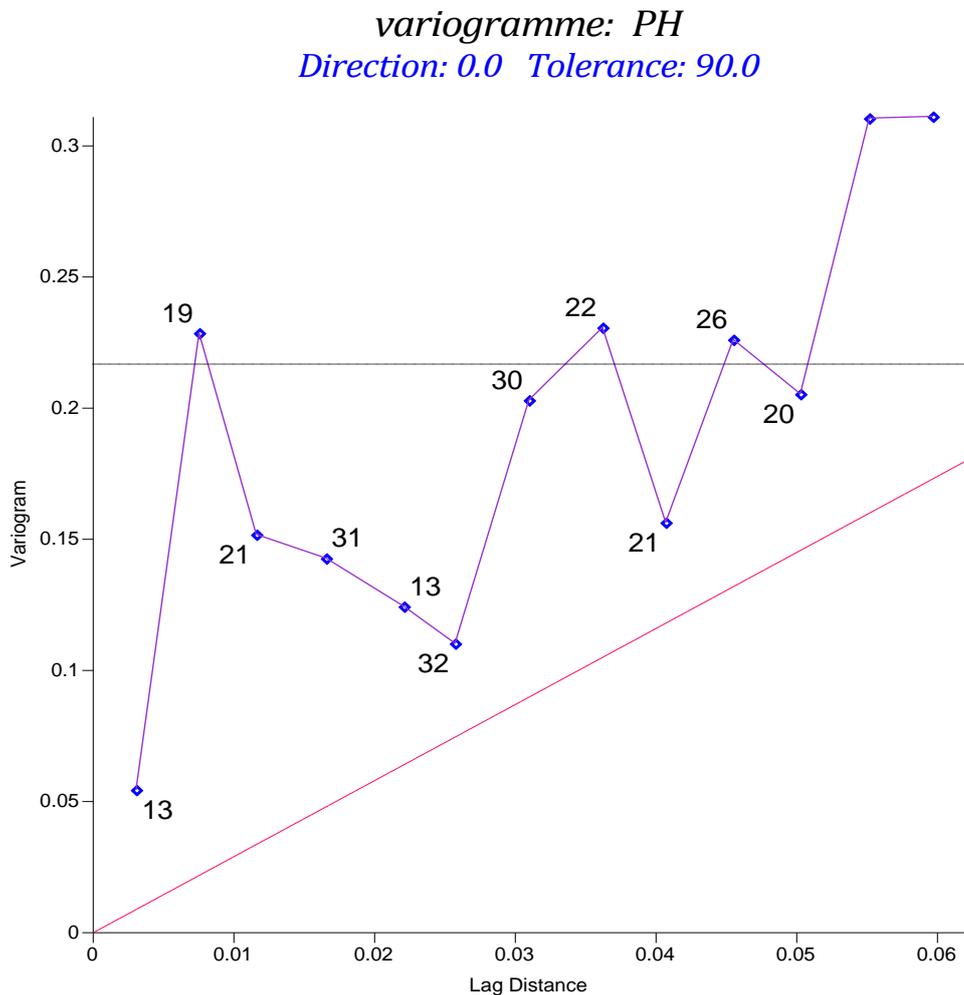


Figure N°24 : le variogramme des valeurs de pH

Cette figure représente le variogramme expérimentale du potentiel d'hydrogène qui suivi un model linéaire représentant un anisotropie de ratio= 1 avec un angle égale à 0°et de slopede 2.9.

Les caractéristiques de cette structure spatiale sont :

Max lag distance =0.062

Number of lags =13

Lagwidth =0.0047692

Vertical scale=0.311

VIII.2.2.2. LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE

variogramme : CE à 25 °C
Direction: 0.0 Tolerance: 90.0

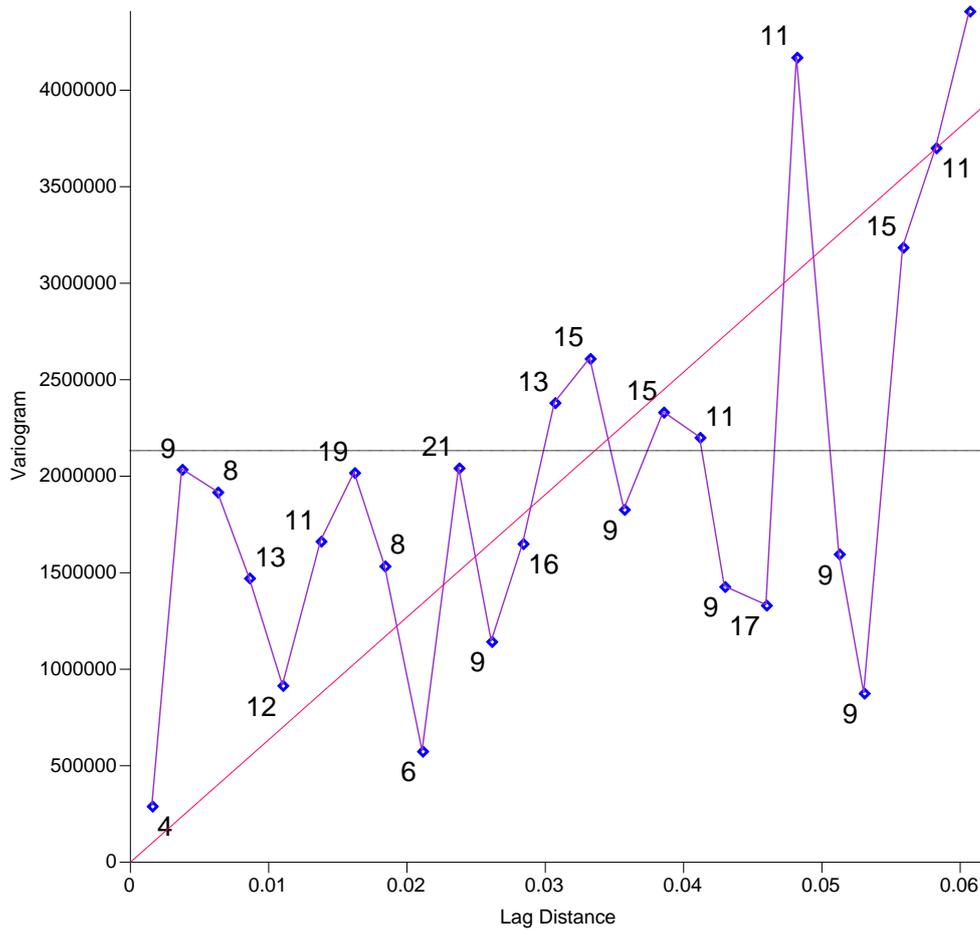


Figure N°25 : le variogramme de la conductivité électrique

Le variogramme expérimentale de la conductivité électrique s'ajuste au modèle linéaire avec Anisotropie de ratio 1 et d'angle 0° et de slope 63500000

Les caractéristiques de cette structure spatiale sont :

Max lag distance = 0.062

Number of lags = 25

Lagwidth = 0.00248

Vertical scale = 4410000

VIII.2.3. VARIOGRAMMES DES PARAMETRES CHIMIQUES

VIII.2.3.1. LA DURETE TOTALE

variogramme: TH

Direction: 0.0 Tolerance: 90.0

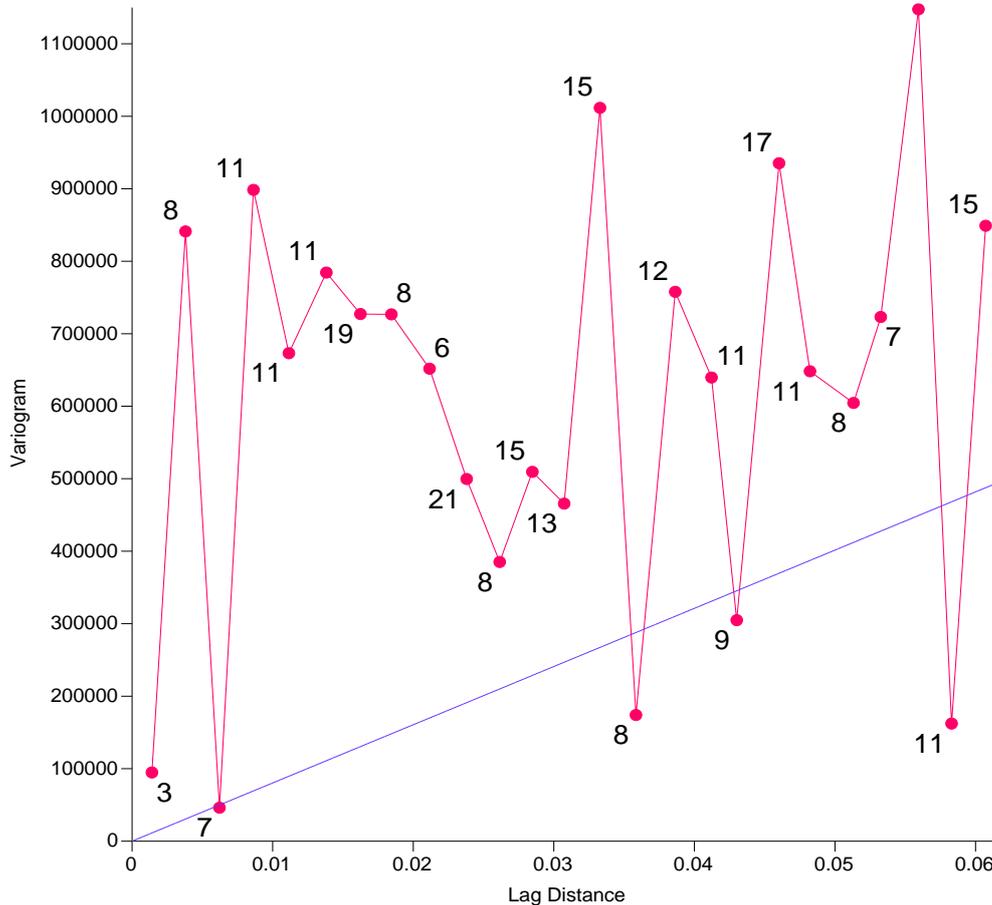


Figure N°26 : le variogramme des valeurs de TH

Le variogramme expérimental de la dureté totale TH représenté dans cette figure suivi un model linéaire avec un anisotropie de ratio= 1 et d'angle = 0°et un slope de8030000 .

Les caractéristiques de cette structure spatiale sont :

Max lag distance =0.062

Number of lags =23

Lag width = 0.002695

Vertical scale = 1240000

VIII.2.3.2. LE CALCIUM

variogramme : Ca+
Direction: 0.0 Tolerance: 90.0

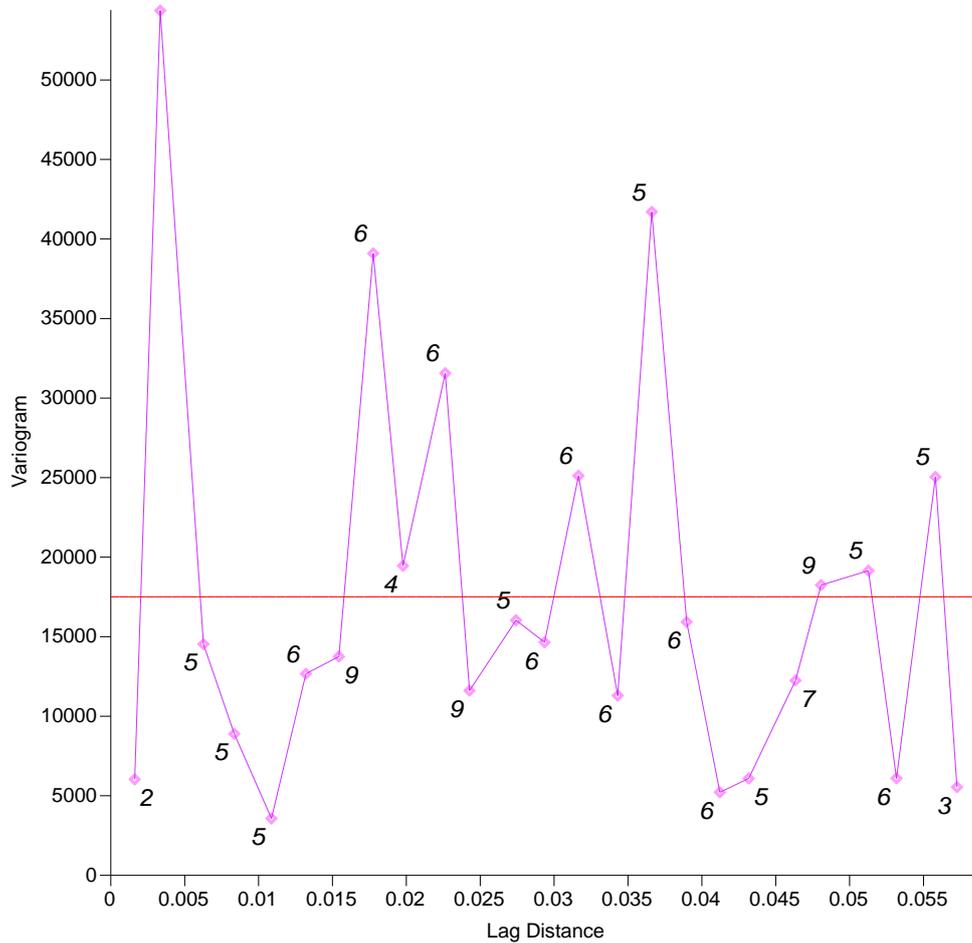


Figure N° 27: le variogramme des ions de calcium

Le variogramme expérimental des ions de calcium est ajusté à un modèle EFFET DE PEPITE, qui indique une absence d'auto corrélation régionale entre les valeurs analysées, le palier indique la variance totale de ce paramètre et sa dispersion résiduelle. Donc il n'y a pas de structure spatiale et cette variation ne doit pas être ajustée avec la méthode de krigeage. On peut dire que cette situation est due à la faible densité des points de mesure. La méthode utilisée est de "Invers Distance To A Power" (voir la carte N°34)

Les caractéristiques de cette structure spatiale sont:

Max lag distance = 0.059

Number of lags = 25

Lag width = 0.00236

VIII.2.3.3. LE MAGNESIUM

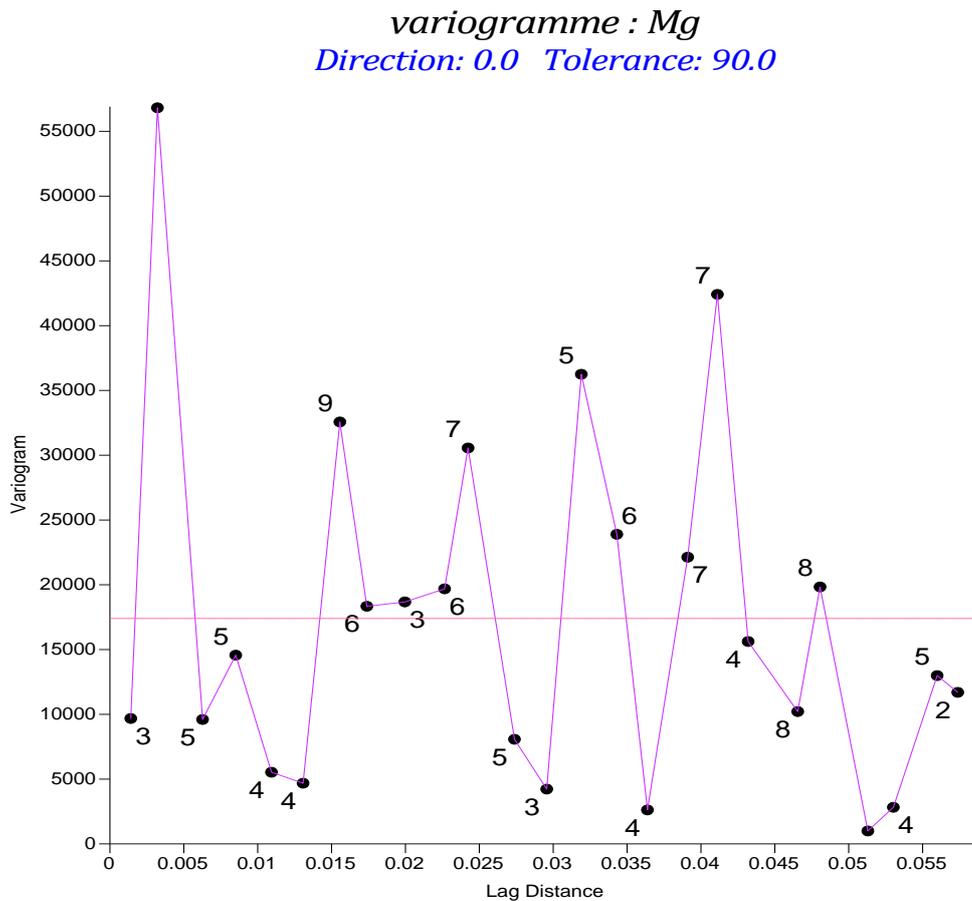


Figure N°28 : le variogramme des ions de magnésium

On Remarque que le graphe de la figure présente une structure chaotique du paramètre des ions de magnésium indiquant une absence de structure spatiale qui ne peut être ajusté par un variogramme, pour cela le krigeage ne peut être utilisé comme moyen d'interpolation, ainsi on a opté pour une autre méthode analytique n'exigeant aucune distribution spatiale par variographie, on a utilisé à cet effet, la méthode « inverse distance to a power » qui a abouti à la carte de la figure N°35

Les caractéristiques de cette structure spatiale sont:

Max lag distance = 0.059

Number of lags = 25

Lagwidth = 0 .00236

Vertical scale = 56900

VIII.3. LA CARTOGRAPHIE

VIII.3.1. CARTOGRAPHIE DES PARAMETRES PIEZOMETRIQUES

VIII.2.3.1. CARTE DU NIVEAU STATIQUE

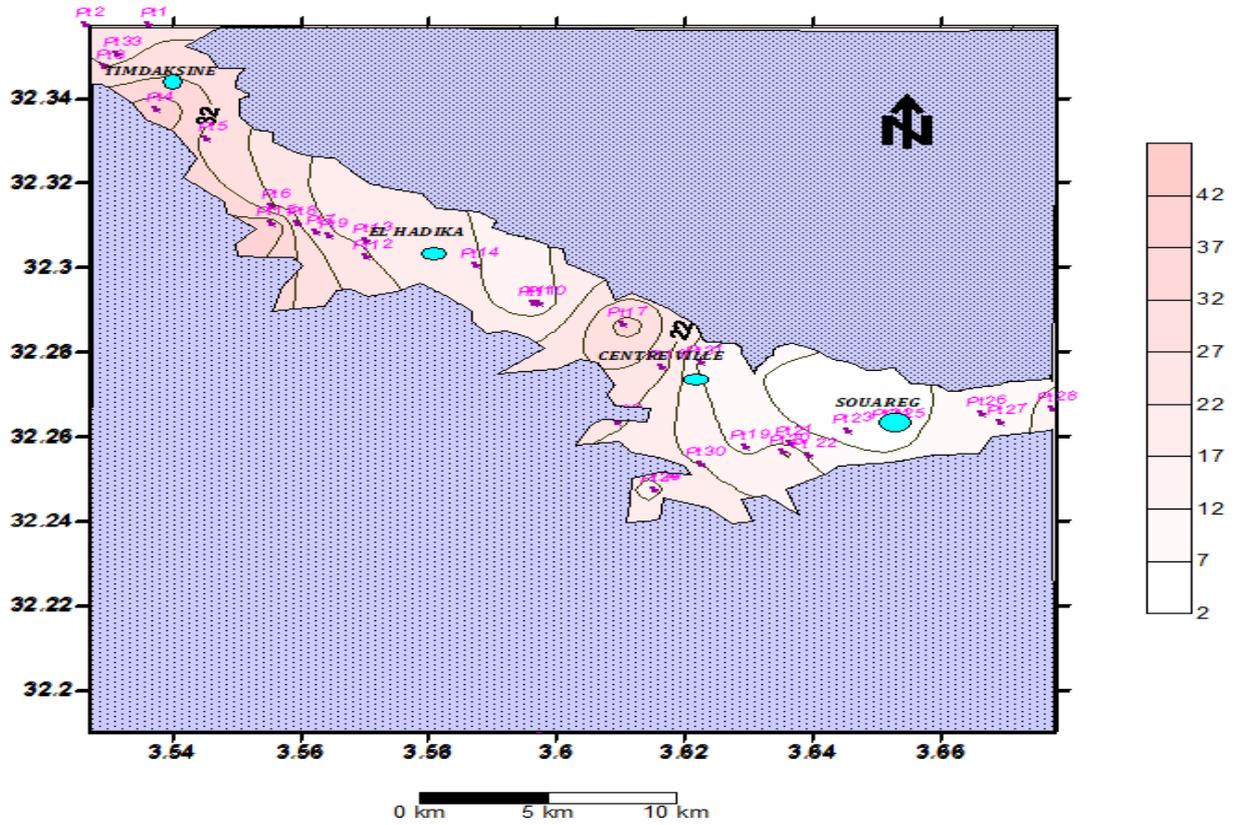


Figure N°29 : la carte du niveau statique

VIII.2.3.2. CARTE DE NIVEAU PIEZOMETRIQUE

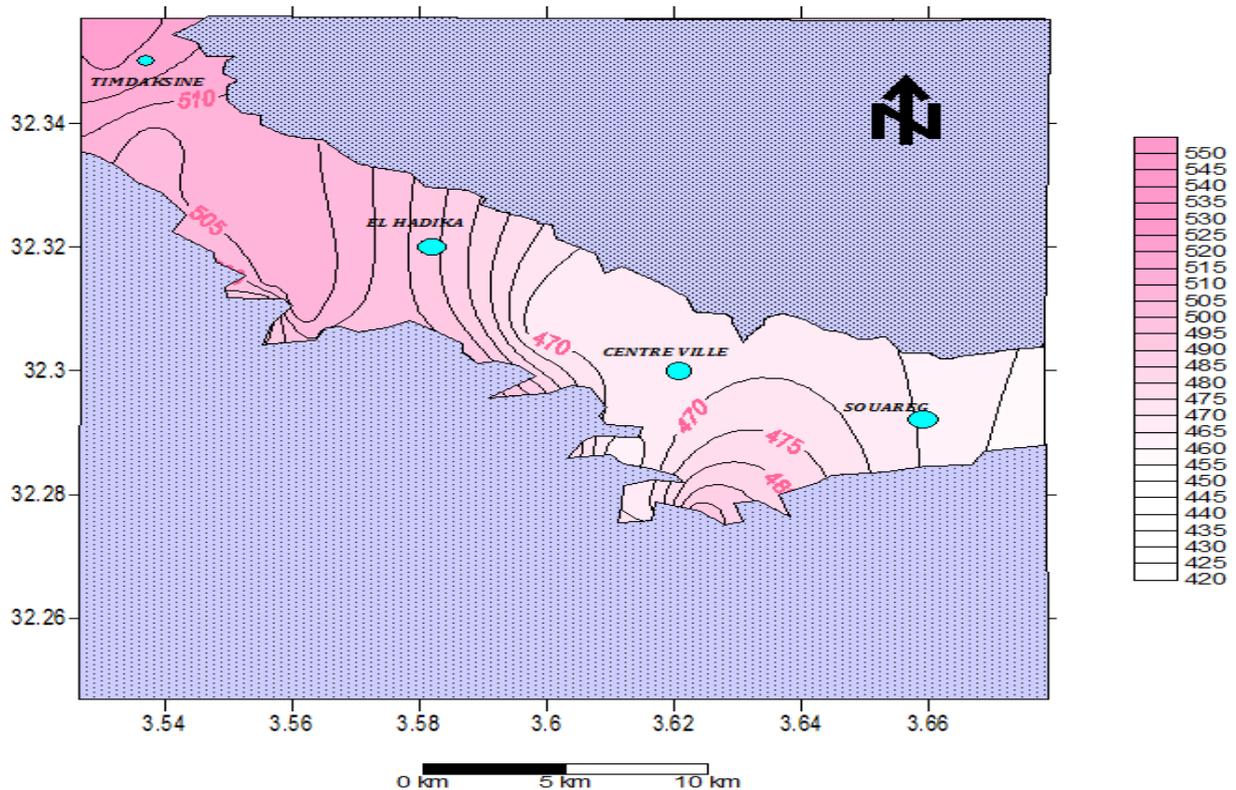


Figure N°30 : la carte du niveau piézométrique

Les cartes N°29 et 30 figurent la variation spatiale du niveau statique et du niveau piézométrique de la vallée de Metlili, le NS varie de 42m (puit 15) à 3m (puit 24). La valeur max est observée à la partie amont tandis que la valeur min est observée à la partie aval,

Le niveau piézométrique varie de 446m en aval notamment les puits 29 à 521.8m en amont notamment dans le puits 01 en.

Les zones de recharges sont :

- Première zone se situant entre les courbes isopièzes 530 et 535 elle est limitée entre Timdaksine bas jusqu'à M'Guissem, le gradient hydraulique est de 3%.
- Deuxième zone se situant entre les courbes isopièzes 500 et 505 au niveau d'Elhadika, le gradient hydraulique de cette zone est de 3.81%.

VIII.3.2. CARTOGRAPHIE DES PARAMETRES PHYSIQUE

VIII.3.2.1. CARTE DE POTENTIEL D'HYDROGENE

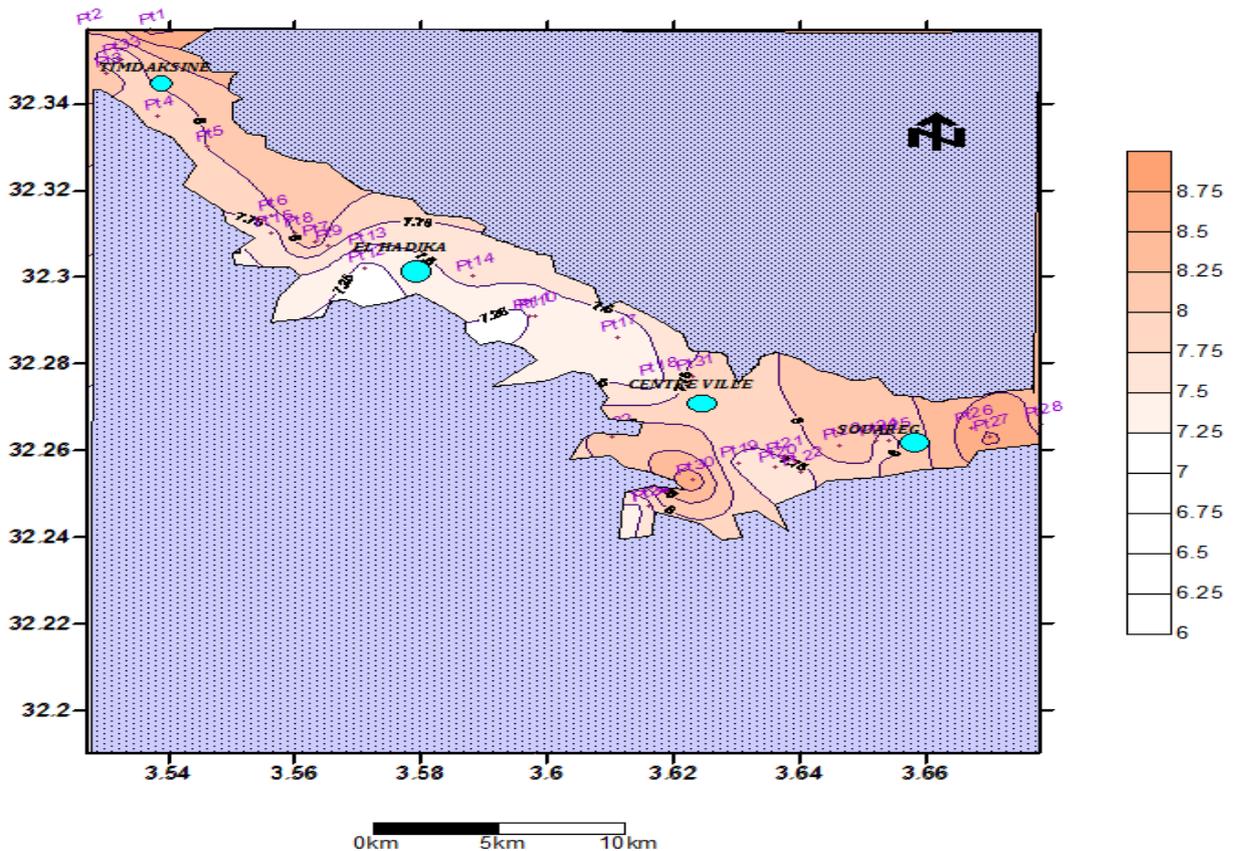


Figure N°31 : la carte de répartition des valeurs de pH

D'après la carte N°31 le pH présente une variation spatiale claire qui varie entre 7.17 et 8.86, les valeurs qui présentent une alcalinité sont situées en majorité en amont, avec une valeur maximale au puits pt1 ensuite pt2 à Timdaksine. Les valeurs acides sont situées en majorité en aval à Souareg. Les valeurs neutres sont situées au centre de la vallée. Notant que il y a des zones comme CheebetSidchikh qui présentent des valeurs alcalins situent en aval (p30 et p29). L'alcalinité des puits due probablement à la présence des sources chimiques qui libèrent les ions OH^+ notamment les engrais organiques ou la percolation des eaux usées (p30 et p29). L'acidité des puits en aval peut être expliquée par l'effet de lessivage et de drainage souterrain des éléments chimiques tels que NH_4 ou la présence des sources de contaminations par les eaux usées aux zones urbaines de la vallée, qui va modifier le faciès d'alcalin à l'acide.

VIII.3.2.2. CARTE DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE

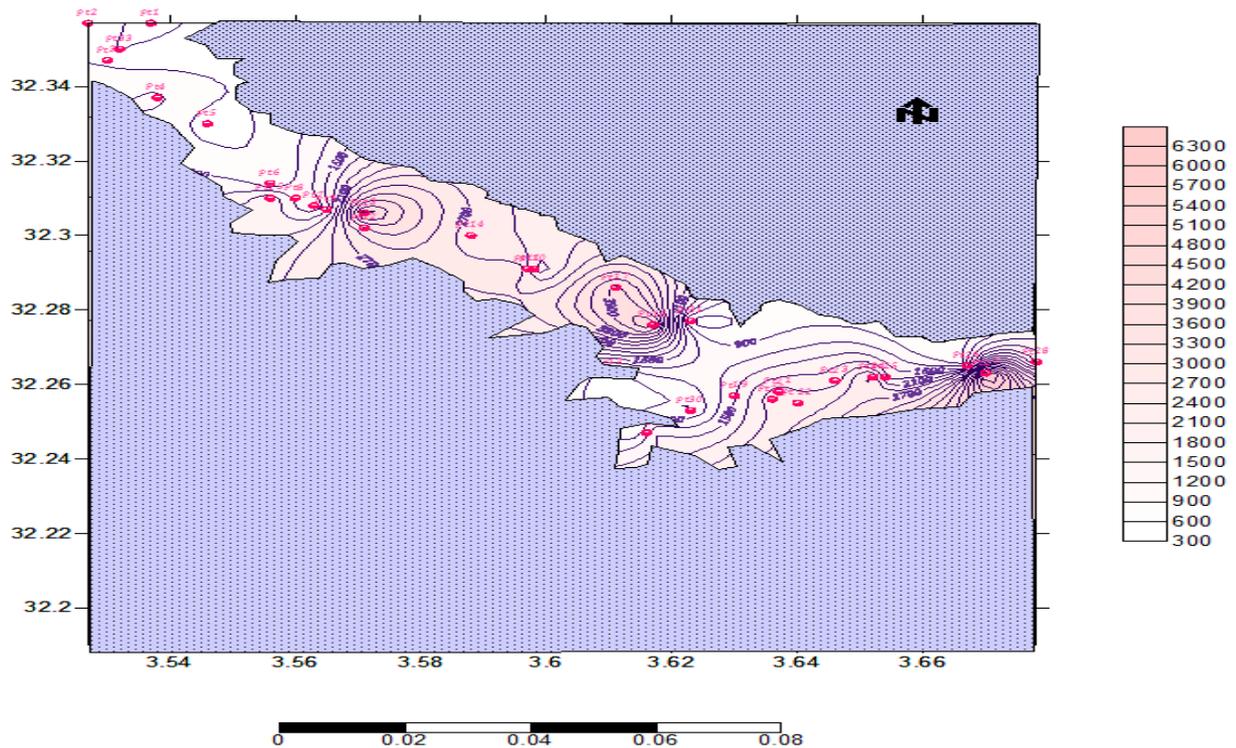


Figure N°32 : la carte de répartition des valeurs de CE

La conductivité électrique augmente avec la concentration des ions en solution et de la température, c'est à dire que la conductivité est induite par la présence des ions qui sont mobiles dans un champ électrique, cette mobilité dépend de la nature des ions dissous et de leur concentration, tels que les ions de calcium (Ca^{2+}), de sodium (Na^+), des bicarbonates (HCO_3^-), ..etc. donc la CE est un indicateur directe sur la concentration des ions.

D'après la carte N°32, les valeurs de CE mesurées à 25° varient entre $237.38 \mu\text{S}/\text{cm}$ et $6453.5 \mu\text{S}/\text{cm}$ aux puits Pt1 et Pt27 successivement, les valeurs minimales de CE sont situés à l'amont, et les valeurs maximales sont situés en aval et au centre de la vallée. On constate qu'il y a des zones au centre de la vallée ont une CE très élevé due probablement à la forte concentration des sels de lessivages et de drainages notamment dans la zone de El Hadika et Sebkh

La forte concentration en aval est due à l'accumulation des sels et des minéraux par l'effet d'écoulement et l'altération de la roche de la nappe.

La faible concentration en amont est expliquée par la faible drainances hydraulique de la nappe

VIII.3.3. CARTOGRAPHIE DES PARAMETRES CHIMIQUES

VIII.3.3.1. CARTE DE LA DURETE TOTALE

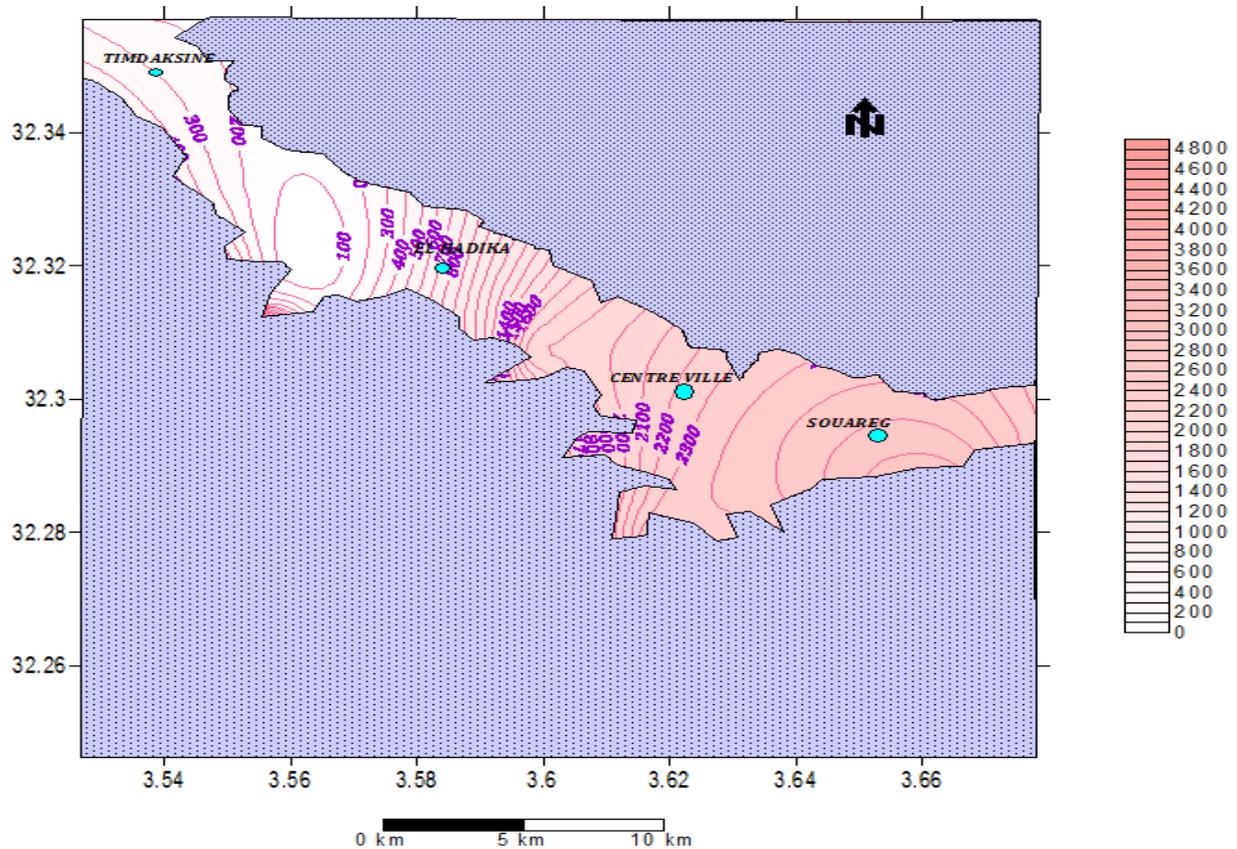


Figure N°33 : la carte de répartition des valeurs de la dureté totale

Selon la carte N°33, les valeurs obtenues de la dureté totale ont une variation importante elle est limitée entre 300 mg/l dans le puits P20 et 3500mg/l au puits P30. La dureté totale a un caractère naturel lié au lessivage des terrains traversés et correspond à la teneur en calcium et en magnésium. La dureté d'une eau dépend de la formation géologique de la nappe phréatique spécialement à sa composition en magnésium et en calcium.

VIII.3.3.2. CARTE DES IONS DE CALCIUM

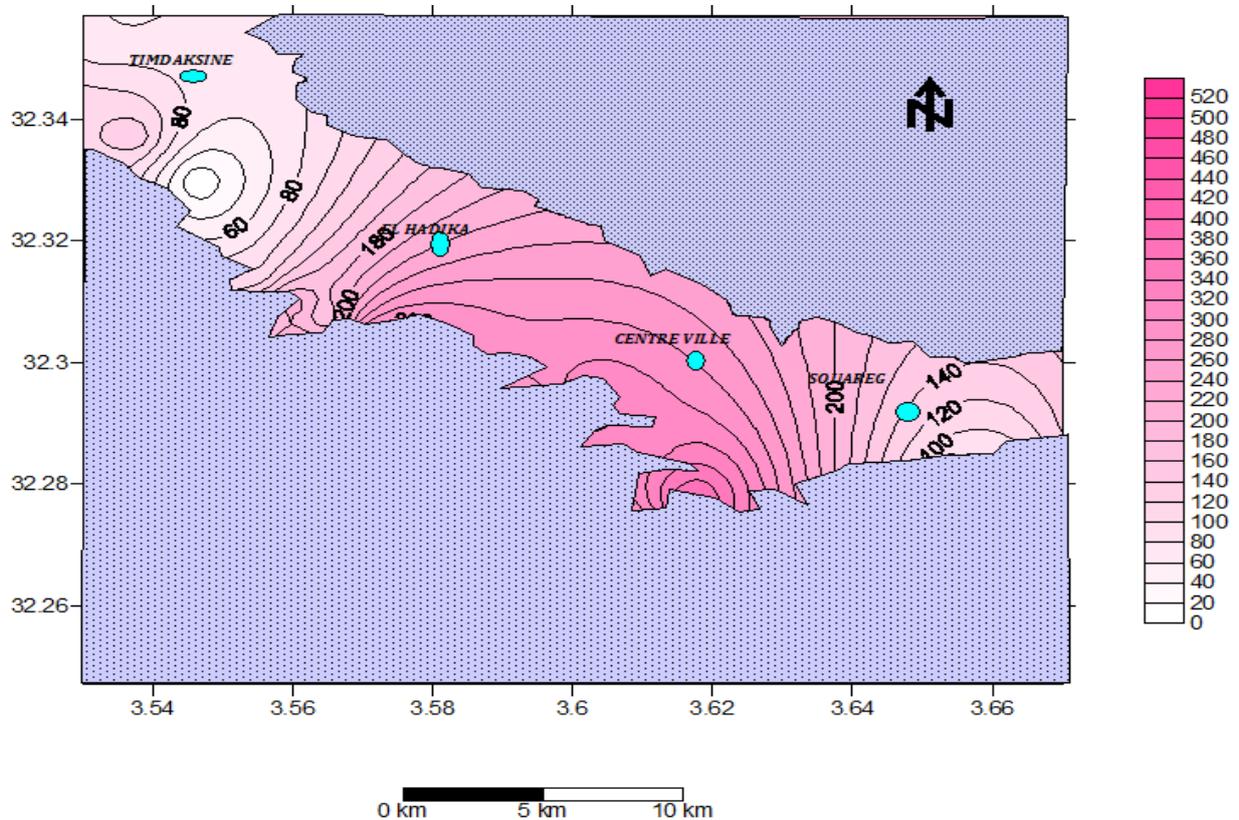


Figure N°34 : la carte de répartition des valeurs de Ca^{+2} mg/l

Cette carte a été élaborée par une méthode analytique, on remarque que les teneurs en calcium sont comprises entre 56.112 mg/l en puits Pt01 en amont de la vallée et 496.992 mg/l en puits Pt 27 en aval. Le calcium est un composant de la dureté totale de l'eau, il varie comme le Magnésium. L'augmentation de calcium dans certains puits est expliquée par la présence d'une roche sédimentaire, il provient essentiellement de la dissolution des roches carbonatées et à la présence du gaz carbonique. Le calcium peut provenir également des formations gypsifères ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) qui sont facilement solubles (RODIER, 2005).

VIII.3.3.3. CARTE DES IONS DE MAGNESIUM

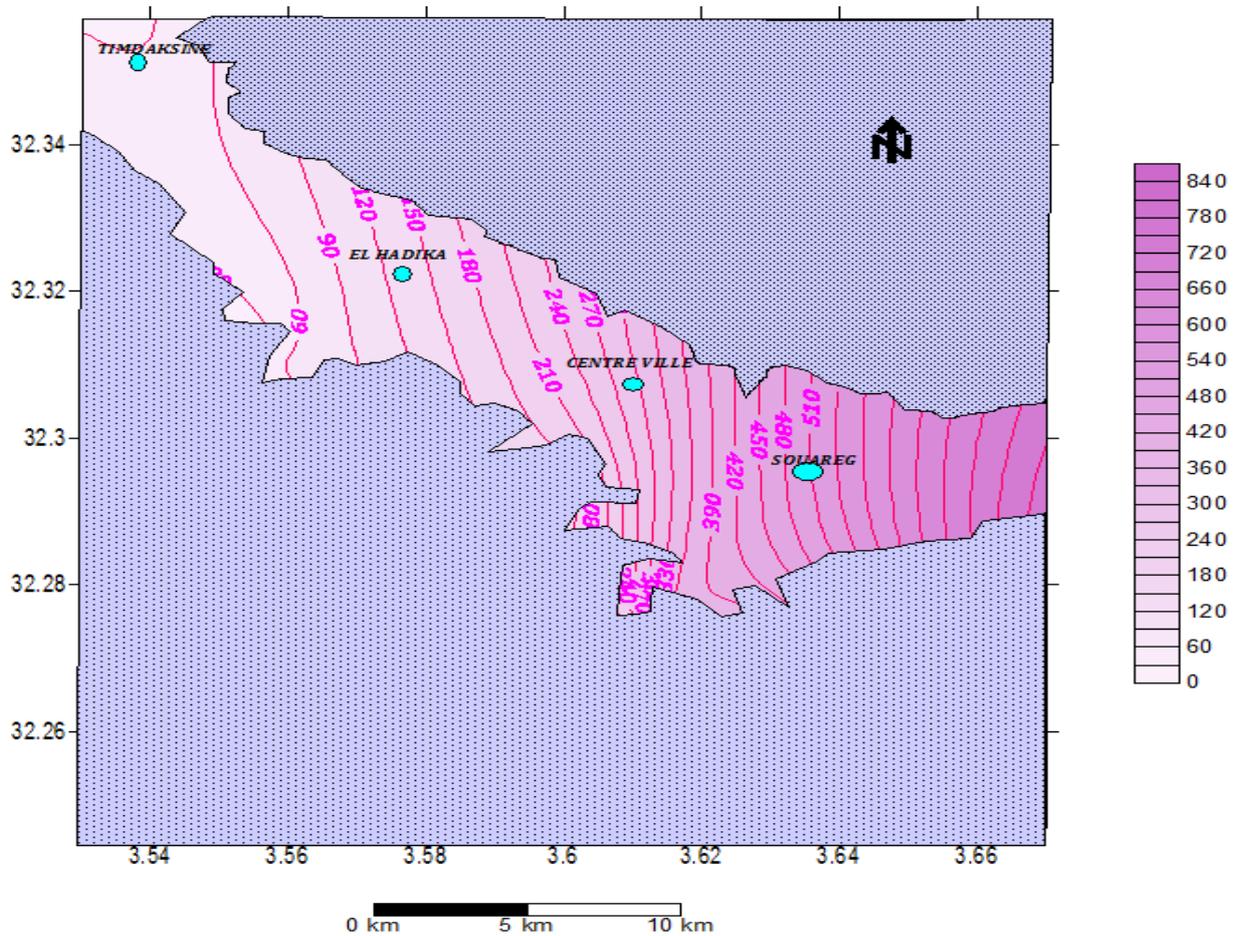


Figure N°35 : la carte de répartition des valeurs de mg^{+2} mg/l

La figure N°35 représente la carte de magnésium réalisé sur le Surfer par la méthode inverse distance. Les teneurs en magnésium compris entre 14.58 mg/l en amont de la vallée au puits 01, et 816.48 mg/l en aval de la vallée notamment au puits 27.

La variation du magnésium est due à l'influence des formations carbonatées comme les calcaires et la composition des roches sédimentaires rencontrées notamment le calcaire dolomitique. La plupart des sels de magnésium sont très solubles dans l'eau, même le carbonate peut être dissous jusqu'à 300 mg/l . Le magnésium constitue un élément significatif de la dureté de l'eau. Il est présent sous forme de carbonates. (RODIER, 2005)

VII.4. CORRELATIONS ET ACP

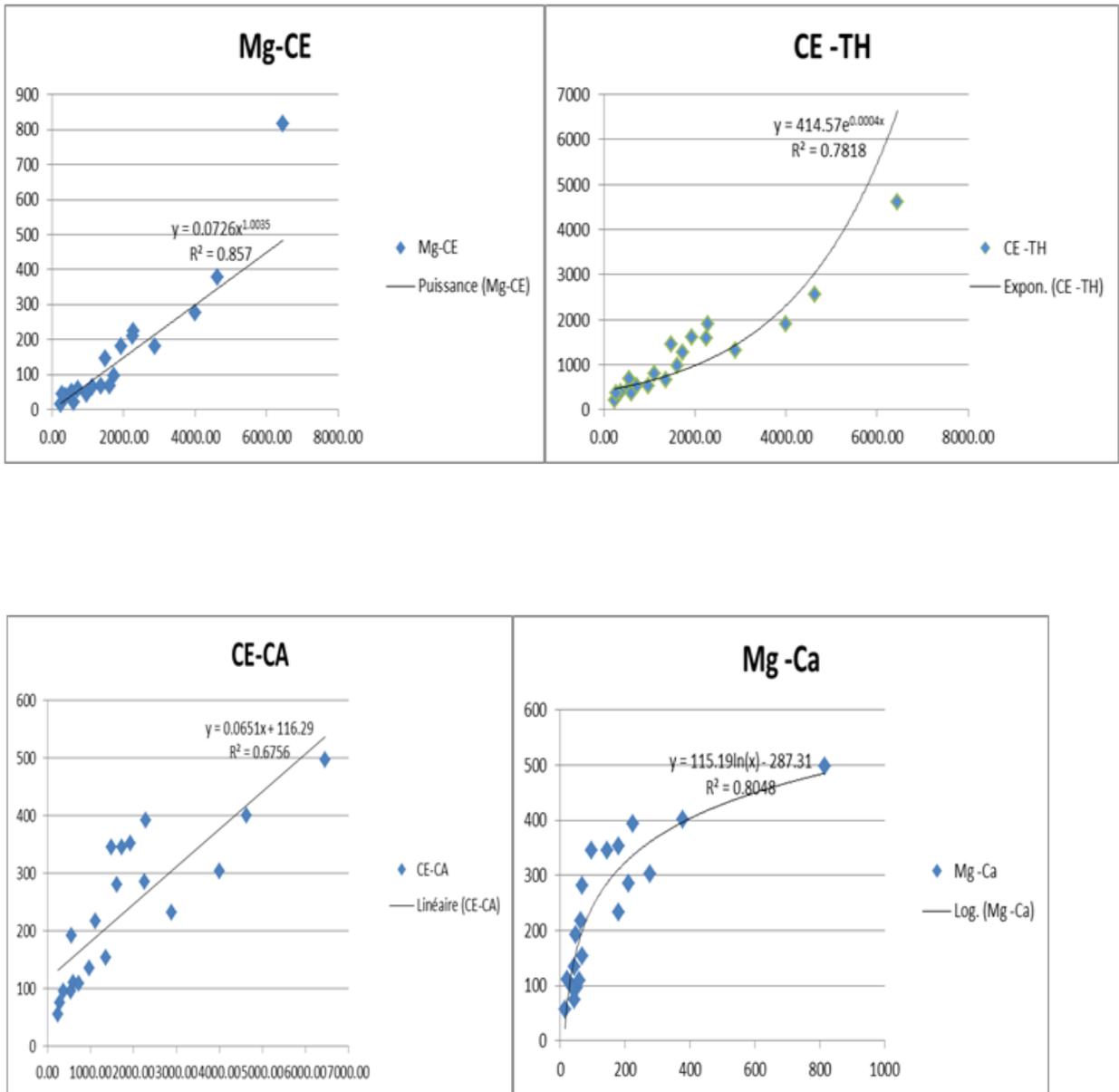


Figure N°36 les graphes de corrélation entre les paramètres étudiées

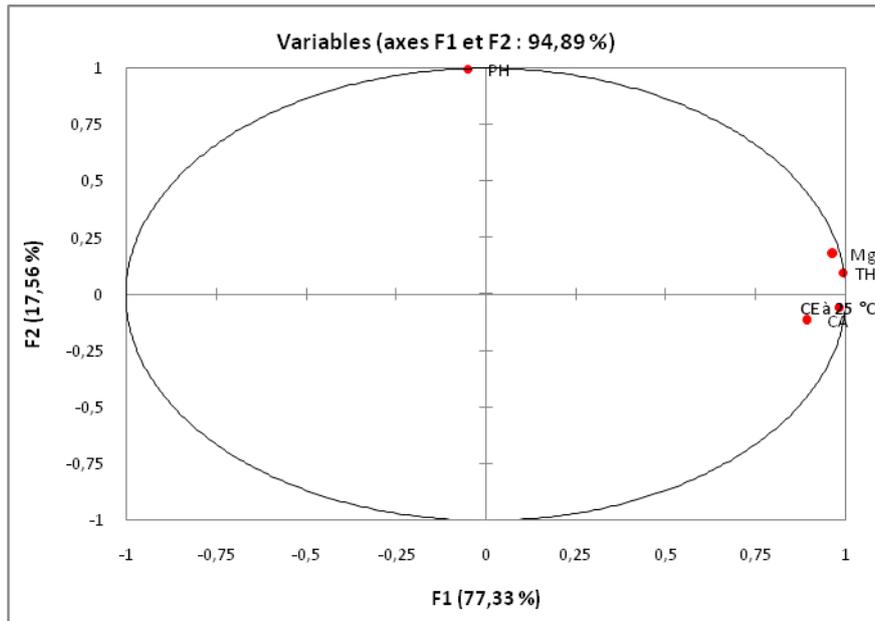


Figure N°37 le diagramme d'ACP

D'après le présent diagramme d'ACP, qui relate les paramètres : PH, CE, MG, CA, TH nous déduisons qu'il y a une forte dépendance entre le Mg, Ca, CE et le TH. En effet, plus une concentration d'un de ces éléments augmente plus l'autre concentration augmente. Cependant on remarque qu'il existe une corrélation négative (régression) entre les dits paramètres et le pH, plus le pH est alcalin plus la concentration diminue.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Il faut tout d'abord rappeler notre objectif de départ qui se résume en une régionalisation stochastique basé sur la géostatistique avec l'utilisation de krigeage comme un outil d'interpolation et la variographie pour étudier la structure spatiale des paramètres étudiés il a été pris comme exemple de mise en œuvre de cette approche les grandeurs piézométriques tel que le niveau statique de la nappe phréatique et quelques paramètres hydrochimiques comme le pH, la conductivité électrique et la dureté totale...etc.

Comme on l'a déjà signalé, que notre but n'était pas l'étude de la qualité des eaux souterraines de la nappe phréatique de la vallée de Metlili, plutôt nous avons abordé la problématique de la cartographie des paramètres piézométriques et hydrochimiques dans le bassin par l'approche statistique classique et l'approche géostatistique (variographie et krigeage) jusqu'à l'élaboration des cartes par le programme Surfer qui est considéré comme un outil puissant de SIG.

On a remarqué que la zone la plus affectée par une élévation excessive de l'ensemble des valeurs des éléments hydrochimiques que nous avons étudiés est localisée dans la zone de ElHadika et ses environs qui sont des zones connues par leur activité agricole et la présence de la structure saline qui peuvent être à notre avis à l'origine de ce déséquilibre hydrochimique des eaux souterraines et aussi le centre-ville et la zone de Souareg qui sont caractérisées par la présence des fosses septiques.

On a voulu montrer que la géostatistique est une technique considérée comme un moyen récent basé sur l'informatique. Dans notre cas on a vu comment on peut détecter les zones de pollution ou les zones menacées par la pollution à travers la répartition spatiale de certains éléments hydrochimiques après l'interpolation dans les zones non échantillonnées.

Nous recommandons en particulier une continuité du protocole de mesure des niveaux piézométriques au long de toute l'année pour obtenir des résultats plus significatifs sur la variation piézométrique de la nappe phréatique, ainsi d'augmenter le nombre des points d'échantillonnage et de prélèvements dans la région, une poursuite des prélèvements et analyses des eaux des puits et forages pour

l'échantillon étudié et une exploitation des données dans le sens d'une prévision de la qualité des eaux dans la région.

Il est souhaité d'accomplir les études des caractéristiques physico-chimiques des eaux par d'autres analyses plus sensibles telles que :

- ✓ Le taux des métaux lourds
- ✓ Les analyses des paramètres microbiologiques
- ✓ Le dosage des éléments minéraux
- ✓ Le taux des cations et des anions (surtout les éléments de pollution)

Nous recommandons enfin, une meilleure diffusion des résultats vers les pouvoirs publics en particulier en ce qui concerne les points d'eaux contaminés

Références Bibliographique

Abdlhafidi (2005) contribution à l'étude qualitative des ressources hydriques souterraines en zones semi-arides, cas de synclinal Nord de Djelfa ,p75 , thèse d'ingénieur, Ed CU. Djelfa

Arnaud et Emery (2000) Estimation et interpolation spatiale p.107 .Hermes

Azouzi (1993) contribution à la cartographie automatique des grandeurs hydrogéologiques ,application à la Mitidja.p163,thèse de magistère ,Ed INA d'EL Harrach ,Alger.

Barkani et Benarfa(2005) contribution à l'étude de la qualité des eaux d'irrigation des zones semi-arides, cas de le région de Deldoul (plaine de OuledTolba) p86,thèse d'ingénieur, Ed CU. Djelfa.

Baza (2005)contribution à la qualité des eaux d'irrigation des zones semi-arides, cas de la zone Ain El Ibel. P93, thèse d'ingénieur, Ed CU. Djelfa.

Castany G(1998) : Hydrologie. Principes des méthodes. p238 .Ed. Dunod, Paris

Charbonnel.A(2005) thèse Synthèse Sur Les Projections Cartographiques Simples 1/6 ,ENMM Le Havre. P 1,4 volume1

Detay(1997) la gestion active des aquiferes.p416,Ed .Masson ,Paris

DIDIER M(1990) utilité et valeur de l'information géographique.p255.Ed.Ecoomica,Paris

DPAT (2009) Atlas de Ghardaïa ,132 p

Farida.A (2010) Cartographie de la qualité des eaux souterraines de la Mitidja Ouest : Cas du bassin versant de Sidi Rached (Tipaza).Ecole Nationale Superieure Agronomique El-Harrach .Alger. Soutenu le : 13-07-2010

Guy(2003) irrigation water quality standards and salinity management strategies.p18,TheTexas A&M University system. USA

Jean Baptiste.H(2001) Cours de Topographie et Topométrie Générale université de louis pasteur Strasbourg p6,7,8,9.

Journel A.G(1977) Géostatistique minière. Centre de géostatistique.p737 .Ecole des mines, Fontaine bleu.

Journel et Huijbergts,(1993) Mining Geostatistics, p37.Academic Press

Julio.G(2010) Modélisation en hydrogéologie: de la carte piézométrique au modèle numérique .Maître de conférence UPMC Journées « modélisation en environnement » ECCOREV, 22-26/02/2010

Marcotte, D (2003)Comment on "Understanding Anisotropy Computations" by M. Eriksson and P. P. Siska. MathematicalGeology, vol. 35, n. 5, p. 643-646.

Moll D.(2005): Analyse de l'eau et normes d'eau potable (Site Web : [http:// grenoble.eau.pure.free.fr/ analyses. htm](http://grenoble.eau.pure.free.fr/analyses.htm)).

Mouissa H(2005).mise en œuvre d'un SIG pour l'aménagement d'une forêt, cas foret Senlbsgharbi série XIV.p109. thèse magistère, Ed INAd' EL HARACH, Alger

O.N.M.(2011): Données météorologiques de la wilaya de Ghardaïa ,3p

RODIER. J(2005) analyse de l'eau :eaux naturelles eaux résiduaires et de mer Ed de Nord Paris science, vol. 3, Springer.

Taha(2002) évolution de la qualité des eaux (salinité ,azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline agricole et industrielle. P199,Thèse de Doctorat. Ed Franche- Comté. France

Webster .R(1985.) Quantitative spatial analysis of soil in the field. In advances in soil

Wilfried (2006) Rapport de stage « Méthodes géostatistique pour l'interpolation et la modélisation en 2D/3D des données spatiales. » thèse de Master .Date de soutenance : Juin 2006.

Logiciels utilisees:

Encarta(2005) 1993-2004 Microsoft corporation. Version 14.0.0603 .Product ID :75947-442-0944812-04629

Surfer version 8.00 Aug 25 1990 surface mapping copyrigh 1993-1999.serial number :WS42868 golden software, Inc 809 14th street, golden, Colorado 80401 1866.USA

Annexe

points d'eau	NP(m)	NS (m)	Nom
Pt1	521.8	26.2	BellaouarCh
Pt2	520	26	Ben Naoui H
Pt3	519	27	Dahmen A
Pt4	501.5	41	Hainana
Pt5	507.5	29.5	/
Pt6	506.5	26.5	ktaila
Pt7	505.9	24.1	Ben sedik k
Pt8	508	25	Lakhel
Pt9	499.5	22.5	Tarbagou B
Pt10	499	15	BAHAZ A
Pt11	498.5	14.5	BEN SAHA
Pt12	502	22	ZEHI
Pt13	497.8	21.2	BELLAOUAR
Pt14	499	17	BORDJ
Pt15	481	42	TAHER.H
Pt16	466	32	BALKO
Pt17	460	35	BOUMEHRES
Pt18	469	23	DAHMEN. A
Pt19	489	10	BAMOUN
Pt20	480	18	BOUGELMOUNA
Pt21	476	9	/
Pt 22	478	10	HASSINI
Pt23	483	6	LAANAG
Pt24	469	3	BOUCHAREB.K
Pt25	462	6	BOUCHAREB.B
Pt26	458	10	FATMIS
Pt27	456	11	AZAOUI.M
Pt28	453	13	BOUCHEREB.T
Pt29	446	19	/
Pt30	478	17	CHAMKHA
Pt31	494.2	8.8	BEN BADA
Pt32	486.5	22.5	TAGER K
Pt33	521	26	BEN SAIFIA.M
Pt34	496	15	/

tableau des données piézométriques

points d'eau	PH	CE à 25 °C	TH(mg/l)	CA(mg/l)	Mg(mg/l)
Pt1	8.86	237.38	200	56.112	14.58
Pt2	8.27	470.71	284	88.2	/
Pt3	8.22	545.7	448	96.192	50.544
Pt4	7.78	973.12	516	134.669	43.74
Pt5	8	476.97	404	120.33	/
Pt6	7.94	606.07	368	110.621	22.356
Pt7	8.19	874.07	420.02	280	
Pt8	8.04	1116.96	804	216.432	64.152
Pt9	7.8	1360.85	664	153.907	68.04
Pt10	7.42	1732.3	1260	344.688	97.2
Pt11	7.14	2883.14	1324	232.464	180.792
Pt12	7.16	3187.63	2112	384.768	/
Pt13	7.4	4479.91	780	/	/
Pt14	7.6	2486.43	640	320	/
Pt15	7.51	1804.73	2680	/	/
Pt16	7.21	3883.17	1904	/	/
Pt17	7.37	4000.6	1892	303.005	276.048
Pt18	7.38	4629.16	2556	400.8	378.108
Pt19	7.65	1485.29	1456	344.688	144.828
Pt20	7.54	2281.55	1900	392.784	223.56
Pt21	7.76	2256.36	1580	285.37	210.924
Pt 22	7.64	2136.57	1820	/	/
Pt23	8.18	1934.26	1620	352.704	179.82
Pt24	8	2901.26	2224	0	540.432
Pt25	7.9	1615	980	280.56	68.04
Pt26	8.6	867.63	4800	290	/
Pt27	8.83	6453.5	4600	496.992	816.48
Pt28	8.44	2051.83	1620	/	/
Pt29	7.77	1595.99	1180	/	286.74
Pt30	8.77	561.57	680	192.384	48.6
Pt31	7.85	437.68	2300	/	/
Pt32	8.22	376.88	400	96.192	38.88
Pt33	7.62	278.91	366.4	74.86	43.64
Pt34	7.4	731.36	520	109.25	59.87

Tableau des paramètres hydrochimiques



Le conductivité mètre- JANWAY



Le pH-mètre JANWAY



Le Titrage De Calcium



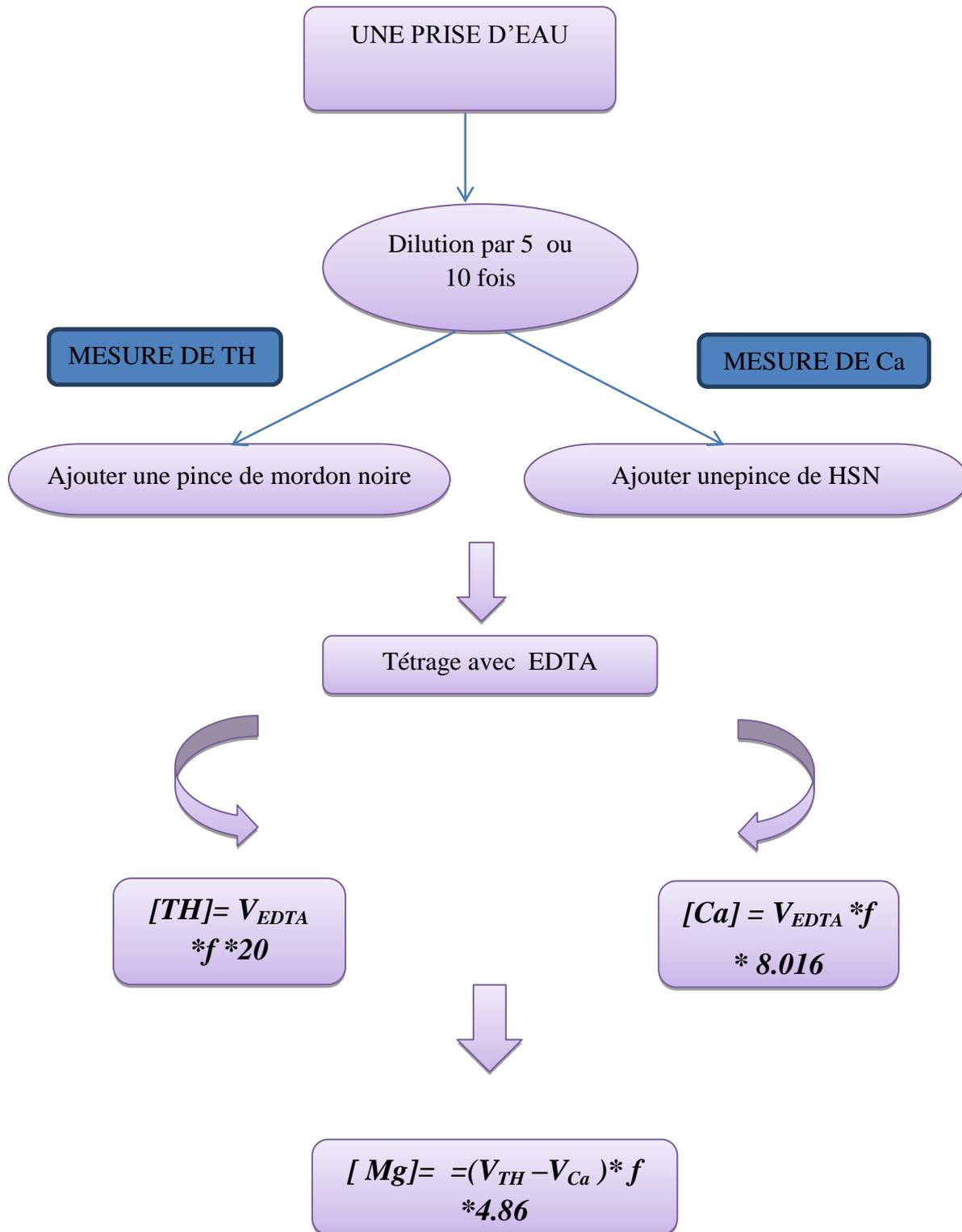
Le Titrage De La Dureté Totale



Les bouteilles des échantillons



La solution tampon



Organigramme des analyses de TH et Ca