

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de
La Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'hydraulique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du Diplôme d'ingénieur d'Etat en Hydraulique.

Thème :

**Etude de la pollution par les nitrates des eaux de la
basse vallée de la Soummam**

Proposé par :

Mr A. Semar

Dirigé par :

Mr A. Semar
Mr Y. Mouloudi

Etudié par :

Mr Boré Yaya

Promotion 2006

Remerciements

- Je tiens à remercier toute ma famille ,(Bella, Souleymane, Adama, Aboubacar, Marna, ma petite soeur adorable Malado et ma fille Djelika) principalement ma mère Altiné Coulibaly qui m'a tout donnée, sans elle tout cela n'aurait pas été possible.
- Je remercie messieurs, Boré Yacouba , Dembélé Soumaila pour leurs aides ;
- Je remercie monsieur Semar pour sa générosité, sa gentillesse et surtout sa patience pour ce travail.
- Mes remerciements à monsieur Mouloudi pour son aide;
- Je tiens également à remercier Mlle Benmamar S;
- Je remercie les membres de jury qui m'ont honoré de leur presence;
- Je remercie l'ensemble des enseignants du département d'hydraulique de l'ENP d'Alger;
- Tous mes remerciements à l'ingénieur Issiaka Sangaré et sa belle soeur Atia.
- Je ne saurais oublier Mamadou K., Siaka D., Abdoulaye M., Kalane C., et Moussa., Mes plus anciens amis.

Ce fut un plaisir !

Je dédie ce travail :

◆ *À la mémoire de mon grand père Baba Coulibaly ;*

◆ *À la mémoire de ma grande mère Korika Guindo ;*

◆ *À ma très chère mère Altinè Coulibaly qui m'a tout donné et je lui souhaite une longue vie et une très bonne santé .*

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I :

Présentation des nitrates

I.1. Position du problème	1
I.1.1. Représentation du cycle de l'eau	1
I.2. Pollution des eaux par les nitrates	2
I.2.1. L'azote	2
I.2.2. Les nitrates	2
I.2.2.1. Les sources de nitrate	4
I.2.2.1.1. Les sources naturelles des nitrates dans les sols	4
I.2.3. La migration des nitrates vers les nappes en profondeurs	7
I.2.6. La classification des terrains suivant leur vulnérabilité à la pollution	10

Chapitre II. Etude de la variabilité spatiale ou la géostatistique 12

II.1 Définition	12
II.2.2. Analyse de la structure spatiale (variographie).....	12
II.2.2.2. Définition du variogramme	13
II.2.2.6. Ajustement du variogramme expérimental à un modèle théorique	16
II.2.3. Krigeage	19
II.4 Présentation des logiciels	23

Chapitre III. Présentation du milieu et application aux données de la basse Soummam 27

III.1. Présentation du milieu physique	27
III.6. Application aux données de la basse Soummam	37
III.6.1. Etude statistique des nitrates	37
III.6.2. Etude géostatistique des nitrates.....	40
II 6.2.2 Krigeage.....	43

Chapitre IV : Comparaison aux autres basses vallées (Isser et le Sebaou) 46

IV.3. Analyse statistique élémentaire	46
IV.4. La variabilité spatiale	52
IV.4.1.3. Krigeage	54
IV.4.3.4. Conclusion	62

Chapitre V : Essai d'optimisation du réseau de surveillance 64

V.1. Introduction	64
V.2. Carte des résidus	64
V.3. Conduite des simulations (cas de la basse vallée de la Soummam)	66
V.4. Conclusion	68

Conclusion général

Introduction

L'eau est en quantité importante sur terre, mais 97,39% du stock est constitué d'océans. Seul 2,60% constitue l'eau douce, soit 360 millions de km³ (Baumgartener et Reichel in ENP ,2004). L'eau constitue aujourd'hui, et demain plus encore, une matière première de toute première importance. Pourtant, les stocks disponibles sont inégalement repartis. Ainsi, nous notons que la majeure partie des réserves en eau se situe au niveau de la calotte polaire antarctique.

L'industrialisation, l'essor de l'agriculture intensive ou encore la croissance démographique et les nouvelles exigences d'hygiène de ce dernier siècle pèsent de tout leur poids sur la gestion de la ressource en eau.

En effet, plusieurs pays sont confrontés à des pénuries d'eau, qui mettent en danger leurs agricultures, leurs industries et leur santé publique. Cette situation est accentuée par la constatation d'une élévation lente mais inexorable et sans amorce de stabilisation de la teneur en certains polluants des eaux souterraines et superficielles.

En raison du danger important des nitrates pour la santé, la présence de ce polluant à des quantités excessives dans les eaux potables est devenue depuis quelques années le principal souci du distributeur. En effet la présence des nitrates dans les eaux potables constitue un danger pour l'homme, particulièrement, pour les nourrissons qui peuvent souffrir voir jusqu'à mourir de la methemoglobinemie, et les adultes par un cancer d'intestin (Encyclopédie médical, 2000). Des réglementations ont été établies dans de nombreux pays pour limiter les taux de nitrates dans l'eau destinée à la consommation humaine. Les normes de l'organisation mondiale de la santé (OMS) sont de 50 mg/l de nitrates dans l'eau potable (Maison, 2000).

Afin d'évaluer la qualité chimique vis-à-vis des concentrations en nitrate de trois nappes côtières (basse vallée de la Soummam, bas Sebaou et la bas Isser), l'étude de la pollution s'impose. La démarche consiste à analyser les teneurs en nitrates du point de vue statistique en vue de les comparer aux normes de l'organisation mondiale de la santé. Il sera également réalisé une comparaison entre les trois vallées côtières afin de déterminer la ressource la plus altérée par les nitrates. Un essai d'optimisation du réseau de surveillance des teneurs en nitrates sera étudié. Pour atteindre ces différents objectifs, notre mémoire est articulé selon cinq chapitres :

- le premier chapitre de ce mémoire est basé sur l'étude bibliographique qui porte sur la présentation des nitrates ;

- le second chapitre également d'ordre bibliographique, rappellera les notions de base de la variabilité spatiale par approche géostatistique ;
- le troisième chapitre porte sur l'application de la statistique et la géostatistique à l'eau souterraine de la Basse vallée de la Soummam. Il sera également rappelé dans ce chapitre le milieu physique ;
- le quatrième chapitre traite la comparaison entre la basse vallée de la Soummam d'une part et les vallées du Sebaou et de l'Isser d'autre part ;
- le cinquième chapitre évalue un essai d'optimisation du réseau de surveillance de la qualité de l'eau vis-à-vis des nitrates de la vallée de Soummam.

Chapitre I : Présentation des nitrates

I.1.Position du problème

Les consommations domestiques, agricoles ou industrielles sont autant de raisons de s'intéresser à la qualité des eaux. L'eau constitue à l'heure actuelle une matière première enviée. Ce bien périssable que constitue l'eau s'avère donc déjà un enjeu formidable en tout point du globe. En effet, les ressources en eaux douces principalement ne sont pas infinies et la détérioration de celles-ci fragilise les utilisateurs directs (usages agricoles, industriels, domestiques,...) et indirects (consommateurs, gouvernements...).

La qualité des eaux se pose donc véritablement depuis quelques années comme un enjeu politique et économique considérable voire une source de conflit. Le pétrole blanc est l'objet d'une attention de plus en plus soutenue et les réglementations à son égard, sur le plan national sont de plus en plus étoffées tant du point de vue de la qualité (normes, contrôles...) que de la quantité (restrictions, suivi des consommations...).

I.1.1. Représentation du cycle de l'eau

Le cycle de l'eau, tel que nous le connaissons, comprend une partie continentale étudiée sous l'appellation d'hydrologie, et une partie océanique sur laquelle se penchent plus volontiers météorologues et océanographes.

Nous pouvons voir (la figure 1.1) les connexions entre chacun des compartiments du cycle de l'eau à l'échelle continentale.

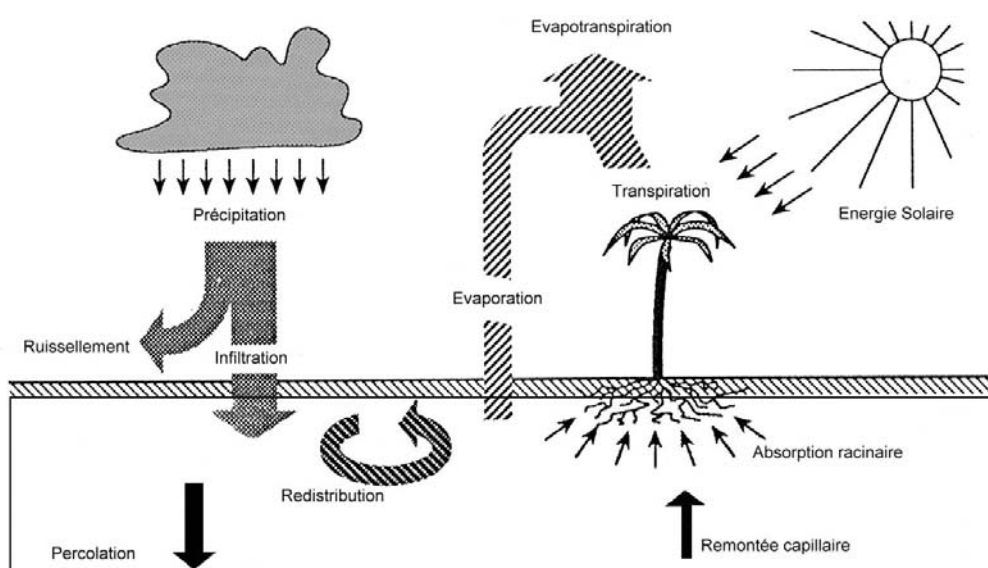


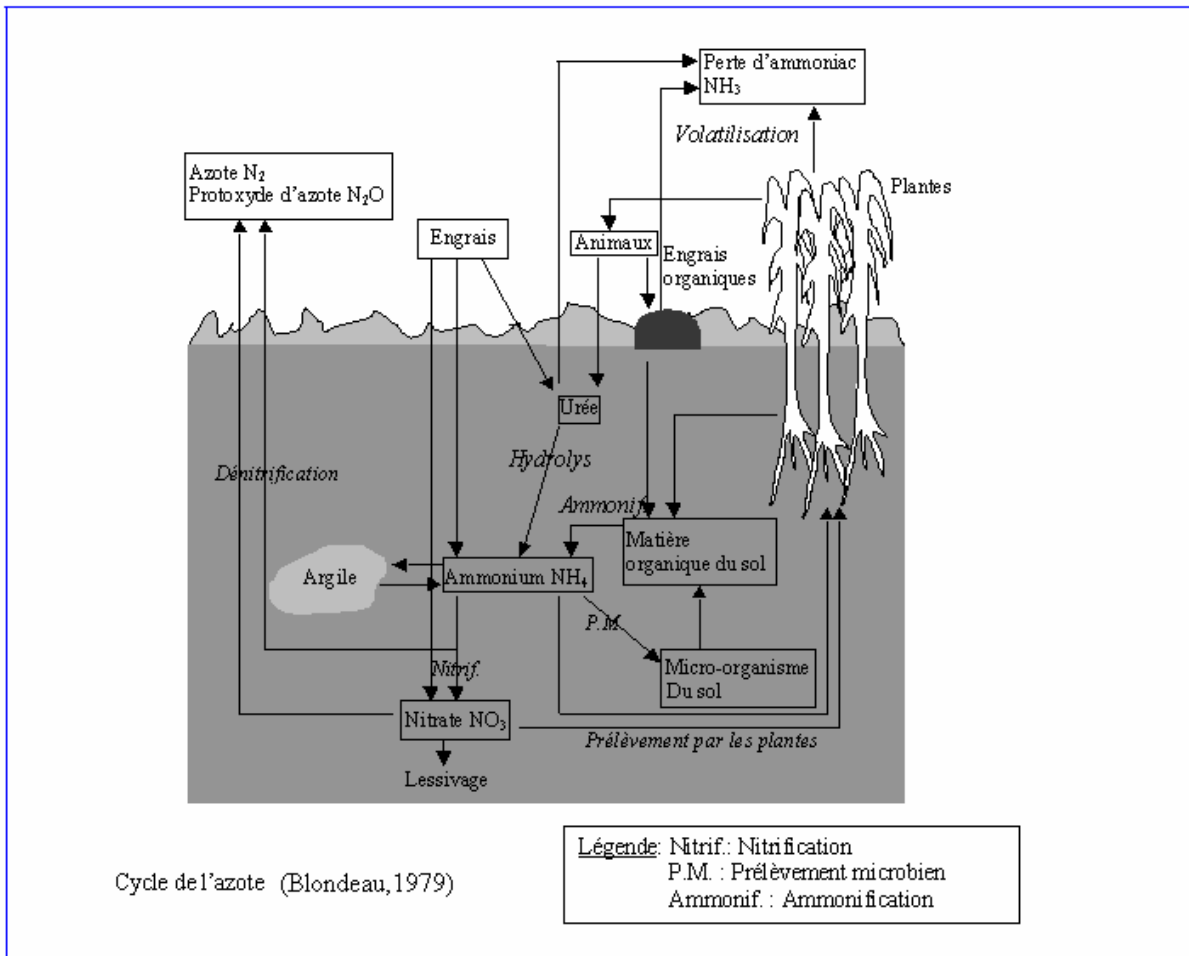
Figure 1.1 : Représentation schématique du cycle hydrologique en bassin versant agricole (Musy et Soutter, 1991 in Maison ,2000)

I.2. Pollution des eaux par les nitrates

Polluer signifie étymologiquement profaner, souiller, salir, dégrader.

I.2.1. L'azote

L'azote est découvert en 1772 par D.Rutherford. Les numéro et masse atomique de l'azote sont respectivement 7 et 14,008. Ce gaz a pour températures d'ébullition et de fusion $195,7^{\circ}\text{C}$ et 210°C . La dimension de son rayon atomique est d'environ 0,07 nm. Gazeux, minéral ou organique, l'azote est au centre d'un système d'échanges fondamental pour la biosphère (Encyclopædia Universalis, 2004).



Les apports azotés dans le sol sont principalement issus de l'épandage d'engrais minéraux. La fertilisation par les engrais minéraux est fonction du type de culture, du rendement souhaité et, dans une moindre mesure de la localisation géographique. L'utilisation de ces engrais peut également être fractionnée pour suivre le plus efficacement la croissance des plantes et ainsi optimiser les rendements. Cette pratique a l'avantage de minimiser les pertes en azote minéral par immobilisation ou par lessivage. Trois formes d'engrais sont utilisées : l'azote nitrique, l'azote ammoniacal et l'urée. L'urée est très rapidement transformée en ammoniacale. L'azote ammoniacal en revanche doit être au préalable transformé en azote nitrique pour être absorbé par les plantes. L'azote nitrique a une action moins brutale et est progressivement absorbée par les plantes. Nous comprenons donc ici que l'utilisation massive d'engrais ne sera pas forcément source de rendement élevé. En effet une quantité trop importante d'engrais nitrique par exemple provoquera inévitablement des pertes car les plantes n'auront pas le pouvoir de tout absorber rapidement.

L'azote que l'on trouve dans le sol peut être sous deux formes différentes : azote inorganique (azote ammoniacal, nitreux et nitrique) et azote organique (azote organique labile et azote organique stable). En ce qui concerne ces deux formes d'azote organique, il est établi que l'azote labile est rapidement très vulnérable à l'activité enzymatique et que les matières organiques stables peuvent persister très longtemps dans le sol.

La Figure 1 donne une représentation du cycle de l'azote, sur lequel nous pouvons voir que les phases principales sont la minéralisation (transformation de l'azote organique en azote ammoniacal par ammonisation et nitrification), la transformation de l'azote minéral en azote organique (immobilisation) et la dénitrification. La plupart des transformations de l'azote dans le sol sont dues aux micro-organismes présents dans le sol. Les processus de minéralisation et d'immobilisation sont fortement influencés par les conditions environnementales (Stanford et al., 1973, Prat, 1982, in Maison, 2000). La température et l'humidité du sol seront en l'occurrence les principaux facteurs influents sur les cinétiques de transformations.

I.2.2. Les nitrates

Les nitrates constituent le stade final de l'oxydation de l'azote, qui provient de la pluie, ou du lessivage des engrais et de l'azote réminéralisé sur les zones de cultures.

I.2.2.1. Les sources de nitrates

Il a été distingué deux sources : les sources naturelles et les sources anthropiques (Marsily G, 1999).

I.2.2.1.1. Les sources naturelles de nitrates dans les sols

En l'absence de toute fertilisation azotée, nous trouvons néanmoins toujours des nitrates dans les sols. Ceux-ci proviennent de la fixation de l'azote atmosphérique par certaines espèces végétales, les légumineuses, qui sont capables, grâce à des bactéries qui vivent en symbiose avec elles, de capter l'azote et de le transformer en matière organique azotée dans leur racines. Quand la plante a fini son cycle saisonnier, cette matière organique azotée est peu à peu décomposée par les bactéries nitrifiantes du sol, et transformée en nitrates. Ces nitrates sont à leur tour utilisés par les autres espèces végétales pour leur propre croissance, car on rappelle que pour se développer, les végétaux ont besoin de trouver dans le sol trois éléments majeurs : nitrates, phosphates, et potassium, qui sont d'ailleurs les principaux fertilisants apportés par l'agriculture industrielle. On estime qu'un sol normal contient environ 1000 kg d'azote (N) par hectare, sous forme de matière organique plus ou moins fraîche ou en cours de décomposition, le cycle de cette matière organique dans les sols pouvant être très

long (plusieurs dizaines d'années de résidence). Chaque année, seule une fraction de cet azote est transformée en nitrates (on dit minéralisé), mais en régime normal, cette fraction minéralisée est remplacée par de la matière organique fraîche, si bien que le stock d'azote est constant. Si la majorité de ces nitrates « naturels » est consommée par la végétation en place, une légère fraction est cependant toujours « lessivée » par l'infiltration de l'eau de pluie en hiver, et se retrouve dans les nappes en profondeur. On estime la concentration « naturelle » en nitrates des eaux souterraines en l'absence de fertilisation à 5 à 15 mg/l (en NO₃). Cependant, tout changement de l'occupation du sol peut venir perturber ce cycle naturel. On sait par exemple que le labourage d'une prairie, le défrichage d'une forêt, l'assèchement d'une zone marécageuse engendrent inmanquablement une augmentation du flux de nitrates vers les nappes, car le stock de matière organique se décompose et s'oxyde plus vite, libérant ainsi des nitrates. Même sans apport d'engrais, de tels changements d'occupation du sol peuvent entraîner une augmentation pendant quelques dizaines d'années des teneurs en nitrates dans les nappes sous-jacentes, jusqu'à ce que le système retrouve un nouvel équilibre (En Israël, des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines dans une zone tourbeuse en cours de drainage ont été relevées au-delà des 50 mg/l alors qu'aucune fertilisation n'était encore pratiquée).

Une autre source naturelle de nitrates dans les eaux moins fréquente est due à l'urine des animaux. Celle-ci contient de l'ammoniac et de l'urée (contenant de l'azote), qui peuvent être rapidement oxydés en nitrates dans les sols. En général, en pays tempérés, cette source de nitrates est diffuse, et négligeable devant les nitrates d'origine atmosphérique. Mais dans les pays arides, les animaux viennent s'abreuver autour des rares points d'eau, et en général urinent en buvant. Les alentours des points d'eau sont alors en général riches en nitrates. Il en va de même des déjections humaines, qui contiennent aussi de l'ammoniac et de l'urée, et qui, si elles sont concentrées en un point, vont engendrer un excès de nitrates. Ainsi à Madagascar, il a été observé des teneurs en nitrates pouvant aller jusqu'à 300 mg/l dans certains forages, alors que les populations n'utilisent pas d'engrais, simplement parce qu'autour de ces forages viennent s'abreuver les troupeaux, et sont rejetées les eaux usées domestiques des villages. Pour être exhaustif, ajoutons que les éclairs peuvent fabriquer des nitrates avec l'azote de l'air, que les termites produisent aussi des nitrates, enfin qu'au Maroc il a été démontré que les cimetières (par décomposition des cadavres) engendrent aussi des nitrates. Mais ces sources là sont entités négligeables devant celles déjà citées.

I.2.2.1.2. Les sources anthropiques de nitrates dans les sols

Le changement d'occupation des sols peut être une source d'origine anthropique des nitrates dans les sols, mais la source majeure est l'apport d'engrais azotés. Cet apport peut se faire soit directement sous forme de nitrates, soit sous forme d'ammoniaque, ou d'urée, lesquels se transformeront dans le sol en nitrates, comme cela se fait pour l'ammoniaque de l'urine ou la matière organique naturelle azotée. Dans le cas d'épandage de lisiers d'élevage, c'est la forme ammoniacuée qui domine. Certains engrais cumulent les deux formes, par exemple le nitrate d'ammonium, qui dans les sols libérera immédiatement les nitrates, puis plus lentement produira un flux de nitrate issu de l'oxydation de l'ammoniac. Les apports en azotes aux cultures se chiffrent en kilo d'azote par hectare. Les agriculteurs parlent en « unité d'azote ». 200 unités, par exemple, signifient un apport de 200 kg par hectare de N, quelle que soit la forme où l'azote est apporté (nitrates, ammoniac, urée, etc...). Les apports varient en général entre 150 et 300 unités. La majorité de cet azote est consommé par les plantes. Cependant, comme pour les nitrates d'origine naturelle, une fraction des nitrates présents dans les sols est lessivée par l'eau de pluie et peut rejoindre soit directement les cours d'eau (par ruissellement ou écoulement dans le réseau de drains enterrés, s'ils existent) soit s'infiltrer vers les nappes. Pour l'agriculteur, il est nécessaire que les nitrates soient présents au niveau des racines des cultures au moment de leur croissance, quand elles en ont besoin. Il fera donc des apports peu après les semis, sous forme directement assimilable (nitrates). Si une pluie survient juste après l'épandage, les nitrates peuvent être lessivés et emportés, source de pollution des eaux, et il faudra refaire un apport. Si l'agriculteur utilise un engrais moins directement assimilable (ammoniaque, urée), il faudra que la décomposition de cet apport (fonction de l'humidité du sol, de la température, etc...) se fasse au rythme de la demande de la végétation, ce qui est plus hasardeux, à moins d'en mettre en excès. L'idéal pour la protection des eaux serait qu'à la fin de la saison culturale, la végétation ait consommé tous les nitrates apportés, afin que la saison pluvieuse qui suit ne puisse lessiver que peu de nitrates. Il faudrait donc viser très juste, et ne mettre que ce dont les cultures ont réellement besoin. C'est faisable, il faut bien mesurer le stock d'azote déjà présent dans le sol en début de culture, et n'apporter que parcimonieusement l'engrais, en plusieurs fois. Mais l'engrais n'est pas cher, le mettre en une fois est moins cher, et, du point de vue du rendement, un excès d'azote est de bien loin préférable à un manque, il est donc fréquent de surfertiliser les sols.

Supposons que l'apport d'azote soit de 200 unités, et que 90 % de cet azote soient consommés par la plante. Supposons que les 10 % en excès soient lessivés par la pluie, et se retrouvent

dans la nappe. Sachant qu'il s'infiltré chaque année environ 150 mm de pluie, soit 1500 m³/ha, l'eau de la nappe recevra une alimentation contenant déjà près de 60 mg/l en nitrates. On voit donc qu'une très faible erreur (10 %) dans le dosage de l'apport d'azote peut engendrer une très forte contamination des nappes. Si ceci se produit pendant de nombreuses années, l'eau de la nappe sera finalement entièrement contaminée à des concentrations dépassant la norme des 50 mg/l pour l'eau de boisson. Une saison pluvieuse ou froide, où les rendements des cultures sont moindres, aura le même effet, l'apport d'azote prévu pour une année normale à rendement élevé sera en excès par rapport à la consommation, et cet excès sera lessivé.

Le rejet d'eaux usées d'origine domestique et industrielle est un facteur très important. Résultant de l'activité de l'homme. Les eaux usées rejeté dans la nature sans un prétraitement, phénomène dans les pays en voie de développement à un très grand rôle dans la pollution des eaux dans ces régions.

I.2.3. La migration des nitrates vers les nappes en profondeur

Produits naturellement dans le sol superficiel, ou apportés sous forme d'engrais, les nitrates en excès vont être entraînés vers la profondeur par l'eau de pluie qui s'infiltré dans les sols. Cette infiltration va se faire en hiver parce que la pluie qui tombe au printemps et en été ne s'infiltré en général pas en profondeur, elle est reprise rapidement par la végétation et évaporée. Les nitrates descendent donc vers la profondeur, mais cette migration est lente, de l'ordre de 1 à 2 m/an. Cette lenteur s'explique parce que le sol contient déjà de l'eau, maintenue sur le profil vertical par capillarité, et que l'eau nouvelle doit donc pousser vers le bas et remplacer. Si la nappe aquifère sous-jacente est par exemple à 10 m sous la surface du sol (on définit le sommet de la nappe comme la surface de l'eau que l'on peut observer dans les puits), alors il faudra environ entre 5 et 10 ans pour que les nitrates arrivent à la nappe. Sous les plateaux crayeux, par exemple, où la nappe peut être à 50 m sous le sol, c'est cinquante ans après la première fertilisation azotée que l'on va voir commencer à monter les concentrations dans la nappe. Mais cette lente migration vers le bas est inexorable, une fois en route, les nitrates poursuivent leur migration vers le bas sous les sols, ils ne sont en général ni retenus ni dégradés dans ces milieux qui sont en contact avec l'atmosphère.

I.2.4. La migration dans la nappe

Une fois arrivées dans la nappe, les eaux d'infiltration s'écoulent des points hauts vers les points bas. Ces points bas sont les sources, ou encore les forages de captages, ou enfin les rivières qui sont alimentées par les nappes. Au bord de la mer ou des lacs, les nappes se vidangent directement dans ces plans d'eau. Les vitesses de migration des eaux dans les

nappes sont également lentes, de l'ordre du mètre par jour ou moins. Il faut donc plusieurs années pour que les nitrates qui sont transportés par l'eau progressent de l'amont à l'aval. Pour une nappe dont un captage se trouverait à 10 km en aval d'une parcelle qui reçoit un excès de nitrates, c'est encore 10.000 jours, ou 27 ans, qu'il faudra attendre pour que les nitrates se retrouvent dans le captage, sans compter le temps de migration vertical. Les nitrates disparaissent-ils naturellement des eaux de la nappe ? La réponse est en général non : une fois arrivés en profondeur, ils subsistent dans la nappe, pendant tout le temps où ils y migrent. Il y a cependant trois cas importants où une élimination naturelle des nitrates peut se produire. Le premier est le cas où la roche dont est constituée la nappe contient un minéral assez rare, la pyrite. C'est un sulfure de fer, qui est se trouve sous forme de très petits minéraux non visibles à l'oeil nu. Ce sulfure réagit avec l'oxygène contenu dans l'eau et s'oxyde en sulfate de fer, qui est soluble. En l'absence d'oxygène, la pyrite est oxydée par les nitrates, pour former aussi des sulfates de fer, et de l'azote gazeux, qui s'échappe vers l'atmosphère. Cette réaction est réalisée par des bactéries dénitrifiantes du milieu. Cette disparition des nitrates peut être totale, elle se traduit cependant par une augmentation des sulfates dans l'eau, lesquels ont cependant une norme de potabilité plus forte, de 250 mg/l en SO₄, si bien que l'augmentation en sulfates liée à la réduction des nitrates ne rend en général pas les eaux non potables. Mais ce phénomène de dénitrification naturelle n'est en général pas suffisant pour épurer les eaux. Plus les forages sont profonds, meilleure est la probabilité de réduction de la concentration en nitrates, mais malheureusement plus les forages sont profonds, moins la quantité d'eau que l'on peut y pomper est élevée. Cette réduction des nitrates consomme la pyrite, donc cet effet positif n'aura qu'un temps, mais en vérité ce temps est long, plusieurs dizaines ou centaines d'années selon les cas. Un deuxième cas de dénitrification naturelle se produit sans la présence de pyrite, dès que la nappe se trouve isolée de l'atmosphère. Il faut en général que la nappe plonge vers la profondeur, et qu'elle soit surmontée par une couche d'argile formant un écran. L'air du sol ne peut plus communiquer avec l'eau de la nappe, et on constate alors que les bactéries présentes dans l'eau de la nappe et qui ont besoin d'oxygène pour vivre vont le chercher dans l'ion nitrate, dès que l'oxygène dissout a été consommé. Les nitrates disparaissent alors comme par enchantement, l'azote produit diffuse et retourne à l'atmosphère. Il faut simplement que la nappe soit surmontée d'une couche d'argile isolante, ce qui ne se produit que rarement. Un dernier cas à citer est celui des nappes alluviales proches de certains cours d'eau. La seconde explication, plus significative, est que, dans les alluvions, on constate très souvent que les parties graveleuses en profondeur, là où l'eau circule, sont surmontées par des dépôts

fins limoneux. Ce dépôt de limons fins joue alors le rôle de la couche d'argile citée plus haut, et permet une certaine dénitrification naturelle dans les graviers sous-jacents, dénitrification qui n'est en général pas totale, faute de temps pour se réaliser.

I.2.5. La nuisance des nitrates dans l'eau des nappes

La nuisance des nitrates pour la consommation des eaux des nappes pour la boisson mise à part, les nitrates dans les nappes ont d'autres effets pervers. D'abord, ils finissent par arriver dans les fleuves, les lacs ou la mer, qui sont les exutoires naturels des nappes. Ils y engendrent l'eutrophisation. De plus, ils modifient les conditions d'oxydo-réduction du milieu, et donc la teneur en certains autres éléments en solution. Il se pourrait aussi que l'écologie de ces milieux souterrains soit affectée (bactéries, micro-invertébrés souterrains vivant dans les nappes), ceci a été peu étudié jusqu'ici. Si on remonte dans les sols, on sait cependant que l'excès de nitrates peut y engendrer une modification de la végétation naturelle, certaines plantes ne supportant pas les fortes concentrations en nitrates. Les études spécialisées font apparaître que les nitrates en quantité excessive dans l'eau d'alimentation sont toxiques. Dans l'organisme, les nitrates se transforment en nitrites qui induisent la transformation de l'hémoglobine en méthémoglobine. La méthémoglobine produite dans le sang bloque le transport de l'oxygène et il en résulte une asphyxie progressive de l'organisme ou cyanose. Elle provoque aussi l'hypertension chez les nourrissons.

La méthémoglobinémie était une maladie connue dès le début du vingtième siècle. Elle atteint généralement les nourrissons. En effet, deux chercheurs américains (Rosenfield et Huston, 1950), ont montré que sur 146 cas de méthémoglobinémie, 90% étaient des enfants âgés de huit semaines.

Les nitrates peuvent être précurseurs de nitrosamines, produits reconnus pour leurs effets cancérigènes (cancer de l'estomac, de l'œsophage et du nasopharynx) chez certaines personnes qui ont une faible acidité gastrique.

De ce fait, l'utilisation des eaux de captage destinées à l'alimentation en eau potable ne doit être autorisée que si l'eau a une teneur inférieure ou égale à 50mg/l, peut-on traiter les eaux souterraines in situ pour les débarrasser des nitrates ? Certaines expériences ont été tentées dans ce but. La méthode proposée est limitée au voisinage immédiat d'un captage pour l'eau potable. On fore autour de ce captage un grand nombre de trous (une dizaine, par exemple) à une distance de l'ordre de 10 m, et on injecte dans l'eau de la nappe un composé organique tel que du méthanol, ou un sucre, qui va fournir aux bactéries dénitrifiantes le substrat qui

alimente leur métabolisme. Si la nappe est profonde ou protégée de la surface par un écran argileux, alors les bactéries n'auront pas assez d'oxygène pour respirer, et se mettront à consommer les nitrates. La vraie façon de se protéger des nitrates est d'abord d'en moins utiliser en agriculture, éventuellement d'en moduler les apports en fonction des propriétés locales des sols (ce qu'on appelle l'agriculture de précision), et surtout de protéger les bassins versants des captages en en faisant des « Parcs Naturels Hydrologiques ».

I.2.6. Classification des terrains suivant leur vulnérabilité à la pollution

On distingue plusieurs types de terrains suivant leur aptitude à se laisser traverser par de éléments ou composés polluants.

I.2.6.1. Les alluvions

Lorsque celles-ci constituent un système aquifère en elles mêmes. En raison de faibles profondeurs auxquelles se trouve le niveau piézométrique, et de l'épaisseur de la zone aquifère souvent très faible, tout polluant épandu à la surface du sol peut parvenir rapidement à la nappe et affectera la totalité du réservoir.

I.2.6.2. Les terrains à perméabilités d'interstices

Il s'agit de terrains composés de grés ou de sables dans lesquels l'eau percole très lentement, ce qui limite la migration de substances sur de longues distances.

I.2.6.3. Les terrains composés de couches perméables et moins perméables

Se sont des terrains hétérogènes de perméabilités variables, tels que les complexes sablo-argileux, donc la contamination de l'eau de l'aquifère est fonction des terrains rencontrés.

I.2.6.4. Terrains fissurés

Le terrains fissurés sont les terrains les plus exposés à la pollution car la vitesse d'écoulement est élevée, le transit des nitrates jusqu'à la nappe se fait rapidement.

I.3. Conclusion

L'importance de flux d'azote dans le sol cultivé oblige à considérer que l'agriculture étant le premier accusé dans la dégradation de la qualité des eaux souterraines, ceci au même titre que les autres activités utilisant les produits azotés.

Dans les différents terrains cités ci-dessus, nous notons que la pollution se propage plus lentement dans les sables et grés, et de façon très variable dans les alternances de terrains perméables et peu perméables (marines, sables, argiles, limons, calcaire ...etc.) et très rapidement dans les milieu fissurés.

Dans le premier cas, l'écoulement dans les terrains essentiellement perméables par porosité est lent, donc la persistance du polluant dans l'aquifère serait très longue. Dans le milieu fissuré, la propagation des polluants se fait rapidement, ce qui les rend très vulnérable.

Chapitre II : Etude de la variabilité spatiale ou la géostatistique

II.1. Définition de la géostatistique

Selon Journel (1977) in Hachemane (1999) étymologiquement, le terme géostatistiques désigne l'étude des phénomènes naturels. La géostatistique permet de mieux résoudre les problèmes d'estimation d'un paramètre donné et d'évolution de la précision obtenue. La géostatistique a pour objet l'étude de tout phénomène quantitatif qui se développe de façon structurée dans l'espace et/ou le temps. Tout ingénieur est presque fatalement amené à rencontrer des problèmes relevant de techniques géostatistiques : évaluation de réserves naturelles, analyse de séries temporelles, cartographie, et de manière générale, tout traitement de "variables régionalisées" selon la terminologie de G. Matheron, fondateur de la Géostatistique. L'analyse géostatistique comprend deux étapes : d'abord la connaissance de la structure de la fonction aléatoire, puis l'estimation de z en tout point x_0 et le calcul d'un écart-type estimé. (Gascuel-Oudou, 1987).

II.2.2. Analyse de la structure spatiale (variographie)

Les méthodes géostatistiques sont fondées sur l'analyse de la structure spatiale (Gascuel-Oudou et al, 1996). Selon Journel. (1977) in Hachemane (1996) l'analyse de la structure spatiale nous renseigne sur la structure de la variabilité spatiale des propriétés considérées.

II.2.2.1. Notion de variable régionalisée

La géostatistique est basée sur le concept de variable régionalisée possédant une structure dans l'espace (à une ou plusieurs dimensions) ou dans le temps. La donnée d'une variable régionalisée suppose la connaissance de deux volumes géométriques. Un champ géométrique c'est -à dire le domaine dans lequel la variable est susceptible de prendre des valeurs définies et à l'intérieur duquel on étudiera sa variation. Un support géométrique : c'est - à- dire le volume sur lequel la valeur de la variable régionalisée est définie ou calculée.

Pour une teneur, ce sera le volume de l'échantillon prélevé (**Matheron, 1962**).

II.2.2.2. Définition du variogramme

Le calcul du variogramme est le fondement de la théorie des variables régionalisées et il est essentiel pour la mise en application du krigeage. En considérant deux valeurs numérique $z(x_i)$ et $z(x_j)$ d'une propriété (z) du sol en deux points distants de vecteur h , la variance de ces deux points est

$$\sigma^2 = [Z(x_i) - Z(m)]^2 + [Z(x_j) - Z(m)]^2$$

$$\sigma^2 = 1/2 [Z(x_i) - Z(x_j)]^2$$

Z_m c'est la moyenne des deux observations et comme $x_j = x_i + h$ et h le vecteur caractérisant la distance entre les deux observations, on obtiendra donc

$$\sigma^2(h) = 1/2 [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

On considère maintenant qu'il y a "n" couples distants de la même distance « h », la moyenne de ces « h » variance est :

$$\sigma^2(h) = 1/2n \sum [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2.$$

$\sigma^2(h)$ est appelée semi variogramme estimée par une série d'observations $Z(x_i)$

II.2.2.3. L'inférence du variogramme

Selon Gascuel-Oudou (1987), Le problème consiste à rechercher une fonction caractéristique de la structure de la variable étudiée, à partir de l'analyse de variogramme. En premier lieu, on étudie quelques caractéristiques du variogramme :

- Son comportement à l'origine.
- Son comportement à l'infini.
- La présence éventuelle d'une anisotropie.

La présence de structures particulières.

En second lieu, on essaie d'ajuster au variogramme expérimental, un modèle théorique qui rende compte des caractéristiques observées. Les hypothèses émises pour résoudre ce problème sont :

II.2.2.3.1. Stationnarité d'ordre II.

Une fonction aléatoire est dite stationnaire d'ordre II si :

*l'espérance mathématique existe et elle est constante

$$E[Z(x_i)] = m \quad \forall x$$

* La covariance pour chaque couple existe et ne dépend que de l'interdisante.

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

II.2.2.3.2. Hypothèse intrinsèque

On ne peut dire qu'une fonction aléatoire $Z(x)$ est intrinsèque que si tout vecteur h de l'espace, l'accroissement $[Z(x) - Z(x+h)]$ admet une espérance et une variance et qui ne dépendent que de vecteur h . Selon Walter (1990), l'hypothèse intrinsèque suppose les deux conditions suivantes : L'espérance de la variable Z est constante quelle que soit la position x :

$$E [Z(x)] = \text{constante.}$$

Pour toute distance h , la différence $[Z(x) - Z(x+h)]$ a une variance finie, indépendante des coordonnées x .

$$\text{VAR} [Z(x)-Z(x+h)] = E \{ [Z(x) - Z(x+h)]^2 \} = 2 \gamma(h).$$

II.2.2.3.3. Présence d'une dérive

Selon Voltz (1986) 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 :

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

II.2.2.4. Estimation du variogramme

On estime le variogramme pour des valeurs discrètes de h : Si on possède N données, on constituera $(N - 1) \cdot (N - 2) / 2$ couples de points différents. Et on répartit les couples des points par classe de distance en choisissant un pas de calcul prenant en compte la distance entre les deux points de couples et veillant à obtenir suffisamment de couples par classe. On calcul enfin le variogramme pour chaque classe par la formule :

$$\gamma(h) = 1/2N(h) \sum [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2.$$

$N(h)$: nombre paires dont les points sont espacés de h .

Dans le cas d'un échantillonnage quelconque, qu'il soit fait en regroupant les couples de points par classes de distance, en prenant en compte la distance entre les deux points de couple. Dans la pratique, on choisit un pas de calcul régulier a ; les couples des points espacés de $a/2$ vont dans une première classe. Ceux distants de $a/2$ à $3a/2$ vont dans une seconde classe ceux entre $3a/2$ et $5a/2$ dans une troisième, de sorte

que tous les couples de points sont répartis dans une succession de n intervalles : $[na - a/2, na + a/2]$ centrés sur des valeurs multiples de a (Gascuel-Oudoux et al ,1996). L'équation du variogramme devient donc :

$$\gamma(h_j) = 1/2 N(h) \sum [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 .$$

La distance h_j est la distance moyenne de l'ensemble des couples n_j de la classe considérée. Les valeurs $\gamma(h_j)$ sont calculées pour chaque classe. Ce variogramme est appelé variogramme moyen.

II.2.2.5. Comportement du graphe

II.2.2.5.1. Comportement au voisinage de l'origine

D'après Delhomme (1976) in Gascuel- Odoux (1987) selon son comportement à l'origine, on distingue quatre types par ordre décroissante de la régularité (Fig. II .2), qui sont les suivants :

Dérivable ;

Continu ;

Pépitique ;

Aléatoire pur

La discontinuité qui traduit l'irrégularité de la variable étudiée et appelée effet de pépite .Selon

Boivin et Touma (1988), ce comportement peut être dû :

*soit par la présence d'une structure dont [échelle est très inférieure à l'espacement donné et on parle d'une micro régionalisation des données. Soit par le nombre insuffisant de couples mesuré à faible distance introduisant éventuellement une incertitude sur la détermination de l'effet de pépite

Soit par le nombre insuffisant de couples mesurés à faible distance introduisant éventuellement une incertitude sur la détermination de l'effet de pépite.

Soit par l'erreur des mesures due au protocole expérimental.

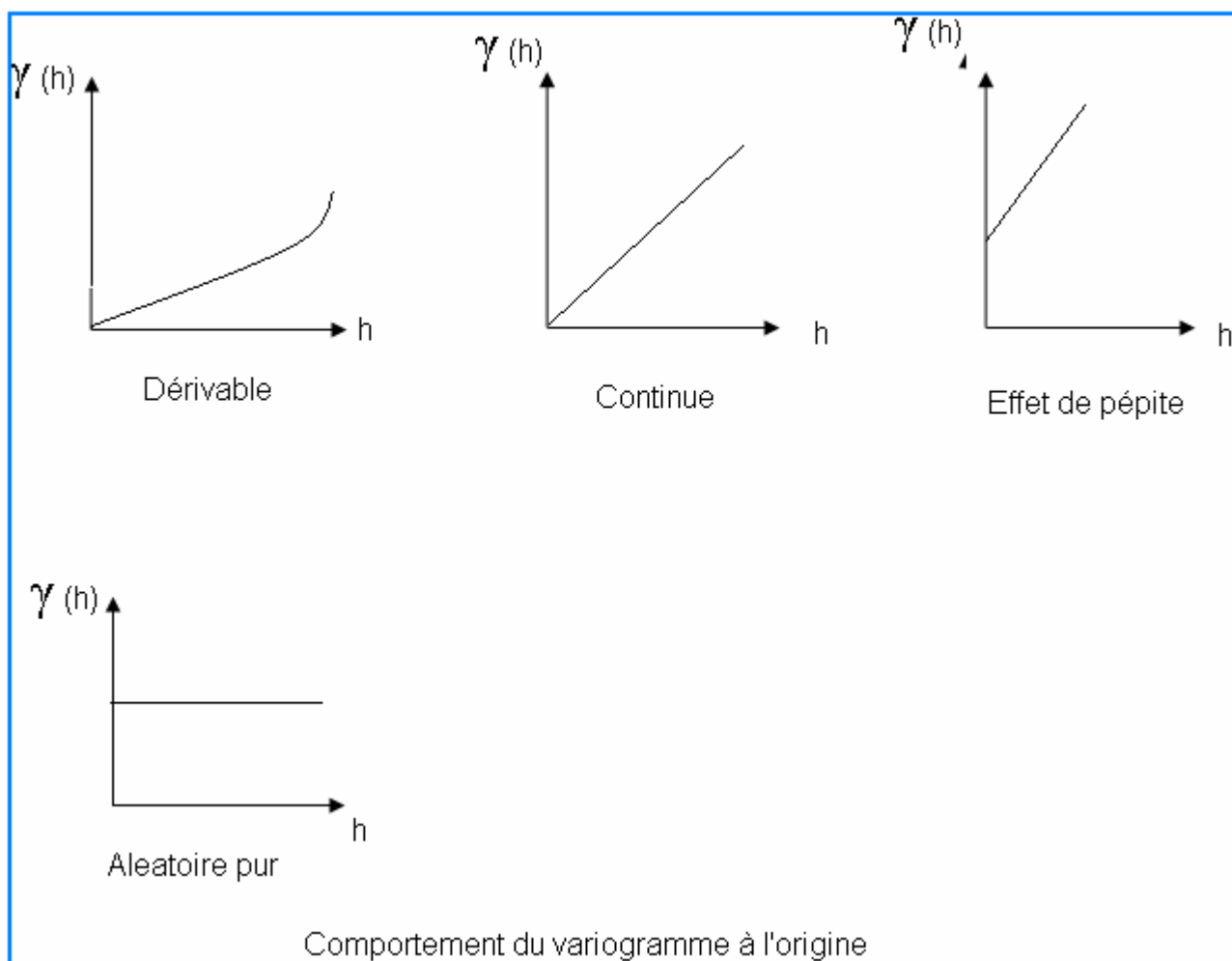


Figure 11.2 comportement du variogramme à l'origine (Delhomme, 1976 in Gascuel-Odoux 1987).

II.2.2.5.2. Comportement du graphe à l'infini

Selon Voltz (1986) ce comportement pourra être borné ou non borné autour d'une valeur appelée palier, égale à la variance sur l'ensemble des données. Cette valeur donne la distance au --de là de la quelle elles sont indépendantes. Dans ce cas, la stationnarité d'ordre II est vérifiée. Mais, dans le variogramme non borné, la stationnarité d'ordre II n'est pas vérifiée et le variogramme continue à croître sans jamais atteindre un palier.

II.2.2.6. Ajustement du variogramme expérimental à un modèle théorique

L'ajustement rend compte de la structure de la variable considérée qui sera utilisée par la suite, lors du krigeage, donc ce modèle rend compte des caractéristiques

observées. Selon

Gascuel Odoux (1984), ce modèle structurel est une fonction simple du type :

- Linéaire
- Sphérique
- Exponentiel
- Gaussien

Ces quatre ajustements sont les plus courants, ils sont représentés dans la figure II.3.

Mais il faut noter que le modèle doit respecter les deux conditions suivantes

$\gamma(h)$ doit être une fonction positive

$\gamma(h)/h_2$ doit tendre vers 0 lorsque h tend vers l'infinie.

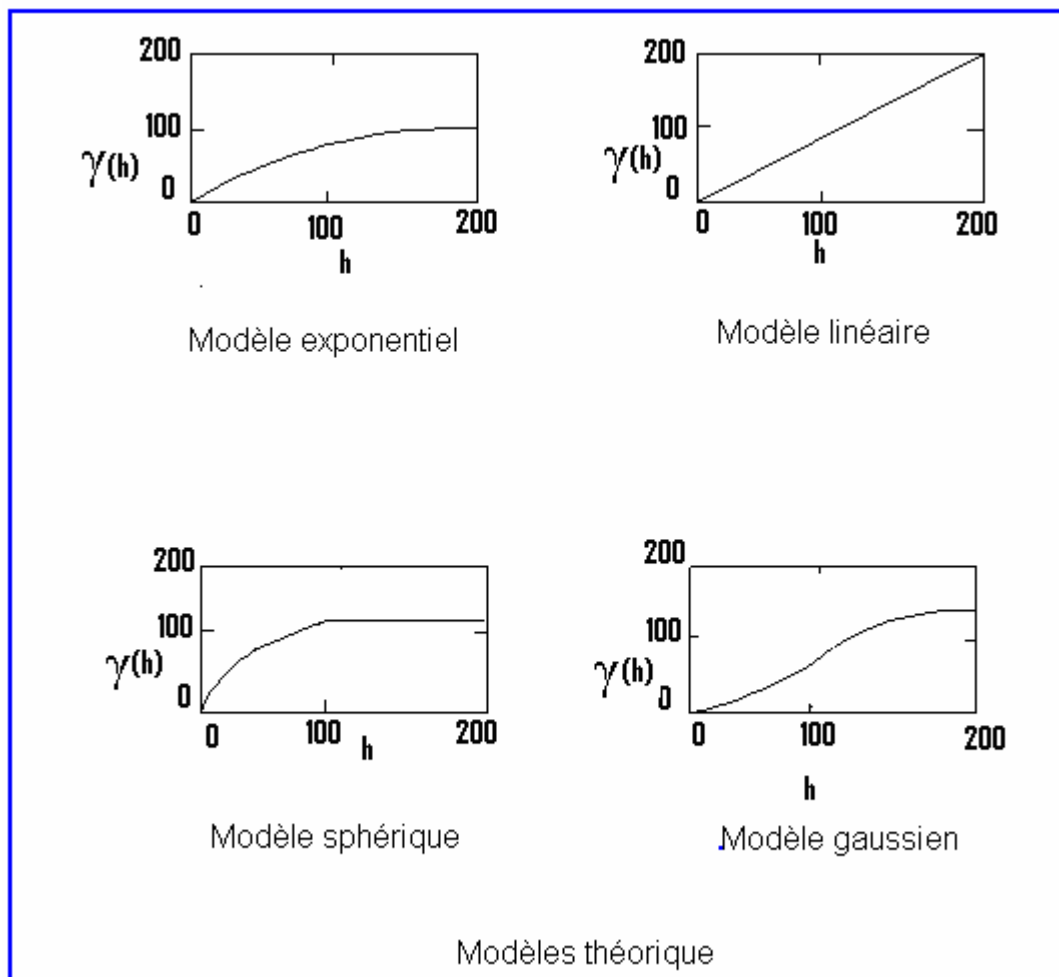


Fig II .3 : Principaux modeles d'ajustement (Delhomme ,1976 in Gascuel – Odoux, 1984).

II.2.2.2.6.1. Robustesse du variogramme

Un variogramme robuste est un variogramme qui présente la même structure du phénomène à étudier même si on change l'échantillonnage. Deux conditions sont nécessaires pour arriver à ce variogramme :

le variogramme doit être calculé sur la moitié de la distance existante entre les deux points de mesure les plus éloignés. Le nombre de couples par classe doit être compris entre 50 et 100.

II.2.2.2.6.2. L'anisotropie

Un phénomène est dit anisotrope lorsque son modèle de la variabilité spatiale change avec la direction, la modélisation de l'anisotropie fait appel à des fonctions qui dépendent du vecteur h plutôt que la distance h seulement (**Goovoerts, 1997**).

On distingue deux types d'anisotropie :

*Anisotropie géométrique : où les variogrammes directionnels présentent des portées différents avec un même palier.

*Anisotropie zonale : si on observe des paliers différents ou si les portées ne décrivent pas une ellipse.

II.2.2.2.6.3. Variogramme directionnel

Selon Laudelaut et al. (1994), le variogramme directionnel est calculé à partir des couples de points répartis, en plus des classes de distance, dans différentes classes de directions en fonction de l'orientation du vecteur h . Dans la pratique, on ajoute au choix du pas de distance, le choix d'un pas d'angle et on répartit les couples en différentes classes selon ces deux critères.

II.2.2.2.7. Validation du modèle choisi

La validation se fait automatiquement par l'indice IGF (indicatif Goodness of Fit), calculé en prenant en compte les paramètres du variogrammes. C'est un nombre sans unité, indiquant un bon ajustement quand il est proche de 0.

$$IGF = \sum_{K=1}^N \sum_{I=0}^{n(K)} [P(i) / \sum P(i)]. [D[K] / D(i)] [\gamma(i) - \gamma(i) / \gamma^2]$$

N : nombre des variogrammes directionnels ;

$P(i)$ nombre de classes relatives au variogrammes k

$D(i)$ la moyenne de la distance par classe de variogramme k

$D(k)$ la distance maximale relative au variogramme k ;

$\gamma(i)$: les mesures expérimentales de la continuité spatiale pour le pas de calcul i ;

$\hat{\gamma}(i)$ les mesures estimées de la continuité spatiale pour $d(i)$.

II.2.3. Le krigeage

II.2.3.1. Définition

Le krigeage est une méthode statistique qui résume l'organisation du phénomène étudié à l'aide d'une fonction de structure, puis le reconstitue en tout points du domaine d'étude par pondération des valeurs mesurées (Creutin, 1977). Selon Gascuel-Oudoux (1987), cette méthode présente trois caractéristiques : Elle est linéaire, c'est-à-dire que l'estimation de Z en X_i est une combinaison linéaire des valeurs expérimentales Z_i au point X_i . Elle est non biaisée, c'est un choix selon lequel l'erreur moyenne doit être nulle. Elle prend en compte une condition d'optimalité, minimisant la variance de l'écart entre Z et son estimation.

II.2.3.2. Différents types de krigeage

II.2.3.2.1. Krigeage simple en covariance

C'est le cas dans lequel la fonction aléatoire est stationnaire d'ordre II, d'une autre façon c'est quand son espérance mathématique existe et est égal à une valeur constante.

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

$$C(h) = E [Z(x), z(x+h)] - m^2.$$

II.2.3.2.2. Krigeage dans le cadre de l'hypothèse intrinsèque

Cette fois-ci, ce sont les accroissements $[Z(x)-Z(x+h)]$ qui sont stationnaires d'ordre II.

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 .

$$\text{VAR} [Z(x)-Z(x+h)] = 2 \gamma (h).$$

II.2.3.2.3. 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 :

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

$$E [Z(x)-Z(x+h)] = 0.$$

Dans ce cas, l'estimation du variogramme par l'équation habituelle n'est plus valable et devient :

$$Y \text{ réel } (h) = \gamma \text{ estimé } (h) - 1/2 [m(x) - m(x+h)]^2$$

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

II.3. Analyse Statistique élémentaire

II.3.1. Introduction

Les statistiques sont une science qui utilise des méthodes scientifiques pour collecter, organiser, synthétiser, présenter et analyser les données de tel ou tel phénomène. Elles permettent aussi de tirer des conclusions valables et de prendre des décisions raisonnables sur la base de ces analyses.

Les statistiques permettent d'exploiter les informations recueillies pour établir toute relation de causalité par l'interprétation et l'analyse.

Les statistiques sont appliquées dans presque tous les domaines de l'activité scientifique.

Pour cette étude les données hydro-chimiques nous ont été données à l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydriques). Ces données de 60 points de prélèvement d'eau souterraine et 3 d'eau de surface ont été analysées en 1983 à l'ANRH

II.3.2. Statistique élémentaire

Il s'agit de la statistique descriptive qui a pour but de présenter les données observées sous une forme telle que l'on puisse en prendre connaissance facilement. Quelques précisions essentielles quant à la nature des données.

Pour notre étude, les données sont prélevées sur un certain nombre de points. Les variables sont des teneurs en nitrate (mg/l) des eaux souterraines de trois aquifères côtiers.

II.3.2.1. Moyenne arithmétique

Elle est égale à la somme des valeurs correspondant aux divers éléments d'une série divisée par le nombre d'éléments de cette série.

C'est la mesure de la valeur centrale la plus utilisée en statistique.

II.3.2.2. Médiane

La médiane d'une série de chiffres ordonnés est la valeur du milieu, c'est-à-dire celle qui partage l'échantillon en deux parties égales.

Géométriquement, la médiane est la valeur de l'abscisse X qui correspond à la verticale qui divise l'histogramme en deux parties d'égale surface.

II.3.2.3. Variance

La variance d'une série de valeurs est la moyenne arithmétique des carrés des écarts entre ces valeurs et leur moyenne

II.3.2.4. Ecart-type

L'écart-type est égal à la racine carrée de la variance. Il mesure la dispersion des valeurs étudiées autour de la moyenne.

II.3.2.5 Corrélation entre les variables

le coefficient de corrélation repose sur l'hypothèse nulle du test de conformité (Lefevre,1983). Ce test de conformité permet de comparer une valeur observée et une valeur autre théorique en utilisant la table de Student.

$$t_{\text{obs}} \geq t_{1-\alpha/2}.$$

D'après la table de Student et pour que le coefficient de corrélation soit significatif, il faut que :

$$t_{\text{obs}} > 0,225 \quad \text{pour } \alpha = 0,975 ;$$

$$t_{\text{obs}} > 0,19 \quad \text{pour } \alpha = 0,95 ;$$

$$t_{\text{obs}} > 0,148 \quad \text{pour } \alpha = 0,90.$$

Et comme le seuil critique de signification est à 5%, le coefficient de corrélation est de 0,19 donc toutes les valeurs supérieures à 0,19 ont une corrélation significative.

II.3.2.6. Coefficient d'asymétrie

Coefficient caractérisant le degré d'asymétrie d'une distribution par rapport à sa moyenne. Pour une distribution gaussienne (loi normale), l'asymétrie vaut 0. Une valeur négative correspond à la présence d'une queue de distribution vers la gauche

tandis qu'une valeur positive correspond à une queue de distribution vers la droite,

II.3.2.7. Coefficient d'aplatissement

Coefficient caractérisant la forme de pic ou l'aplatissement d'une distribution par rapport à une distribution gaussienne. Pour une distribution gaussienne (loi normale), l'aplatissement vaut 0. Une valeur négative correspond à une distribution plus plate que la loi normale (distribution platicurtique) tandis qu'une valeur positive correspond à une distribution plus pointue que la loi normale (distribution leptocurtique),

II.3.2.8. Coefficient de variation

Il a pour intérêt de comparer la variabilité relative de plusieurs série statistiques ou de plusieurs distributions dont les ordres de grandeurs sont très différents et il sont nuls que si les valeurs observées sont égales entres elles, et donc égales à leur moyenne. Ces coefficients sont estimés en pourcentage.

II.4. Présentation des logiciels

Dans cette partie nous présentons les logiciels qui ont été utilisés.

II.4.1. Xlstat

Les différentes études statistiques ont été faites par Xlstat version 6.0. Xlstat est une marque déposée de Addinsoft SARL. XLSTAT est le principal produit d'Addinsoft. Le développement de XLSTAT a démarré dès 1993, puis a connu une très forte accélération en 1996 avec la commercialisation du produit sur Internet. XLSTAT est aujourd'hui le produit d'analyse de données pour Excel le plus utilisé dans le monde.

II.4.1.1 Statistique élémentaire

Les statistiques présentent dans ce module sont appelées par convention Statistiques

Elémentaires et sont souvent présentées ensemble parce qu'elles sont habituellement utilisées lors de la phase préparatoire de l'analyse. En fait, il s'agit de tests ayant différents objectifs. Dans cette introduction, nous présenterons brièvement chacune des statistiques élémentaires disponibles dans ce module et surtout ceux utilisés pour ce travail.

Les types spécifiques de statistiques élémentaires et de tables disponibles dans ce module, ainsi que leur vocation, sont décrits en détails dans ce qui suit.

II.4.1.1.1. Statistiques descriptives

Cette option permet de calculer le coefficient de corrélation de Pearson. Grâce au module Statistiques Élémentaires, vous pouvez calculer des matrices de corrélations carrées ou non, ainsi que des matrices de corrélations à un format étendu avec des niveaux de significativité en ignorant les valeurs manquantes.

II.4.1.1.2. Statistiques descriptives

Cette option permet de calculer diverses statistiques descriptives telles que la moyenne, l'écart-type, la matrice de corrélation, ..., etc. décomposées selon une ou plusieurs variables catégorielles.

II.4.2. Variabilité spatiale

La partie géostatistique a été traitée par le variowin 2.2 (Pannatier, 1996).

II.4.3. La cartographie

Pour la cartographie nous avons utilisé le surfer version 7.00. Au marché depuis le 25 Aout 1999 à Colorado (USA).

Les options utilisées sont.

"Grid": cette option nous permet de spécifier le nom du fichier et de calculer les résidus par "Data" et "residuals".

"Map": permet de faire la carte par "contour Map"

II.4.4. Variographie

L'étude géostatistique a été faite par le variowin 2.2 (Pannatier, 1996). Les fonctions utilisées dans cette étude sont :

II.4.4.1. PREVAR

La construction des couples est réalisée par le programme PREVAR donne les classes et la distance moyenne de chacune d'elles. Le fichier de sortie à une extension PCF (Pair Comparaison Pile).

Le nombre de couples formés est égale $(N(N-1))/2$ tel que N le nombre d'observation . Les différentes options de ce programme sont :

"FILES": spécifie le nom du fichier.

"VARIABLE": Indique la variable utilisée.

"EXECUTE": Exécution du calcul.

II.4.4.1. VARIO2DP

Le fichier PCF du programme PREVAR serait utilisé pour le calcul du variogramme. Le menu du programme Vario est :

"DATA": Introduire le nom du fichier PCF.

"VARIABLE": Spécifie la variable utilisée pour le calcul du variogramme.

""TOLERANCE": pour l'introduction d'angle.

"EXECUTE": Pour pouvoir afficher les résultats.

"TYPE": Choisir le type d'estimateur.

""PLOT": Permet de visualiser le variogramme.

"MODEL": Permet de choisir le modèle théorique à ajuster au variogramme expérimental, (cela en introduisant les différents paramètres : pépite (Nugget); palier (Sill) et la portée (range).

En utilisant l'option "PLOT", on visualise le variogramme avec l'ajustement. En utilisant "OPTION", on donne le titre au graphe obtenu.

II.4.4.2. indicatif Goodness of Fit "IGF"

L'étape de validation est assurée par le programme "IGF". Ce dernier permet de juger si l'ajustement est bon ou mauvais.

Le choix d'un modèle est lié à ce programme quand il tend vers 0.

Chapitre III : Présentation du milieu et application aux données de la basse Soummam

III.1. Présentation du milieu physique

III.1.1. Situation géographique

La vallée de la basse Soummam est le prolongement oriental de la grande vallée de la Soummam. Située au Nord-Est d'Alger, entre 3°40' et 5°45' de longitude, 3° et 36°45' de latitude. Sa superficie est de 9125km² (fig.III.1), il est subdivisé en 10 sous bassins dont celui de la basse Soummam. Il est limité :

- Au Nord par les monts de Taourit Ighil, de Gouraya et Arbalou ;
- Au Sud par les collines de Oral-Hadja et les chaînons des babors ;
- A l'Est par la mer Méditerranée ;
- A l'Ouest par le seuil de Sidi-Aich.

III.1.2. Aspect socio-économique

La basse Soummam est une région à diverses activités économiques, parmi lesquelles, nous pouvons citer :

- les activités agricoles ;
- les activités industrielles.

III.1.2.1. Activité agricoles

La basse Soummam est une région à vocation agricole, on y cultive des céréales, des oliviers, des vignes, des maraîchages, des agrumes et d'autres arbres fruitiers.

III.1.2.2. Activités industrielles

L'industrie occupe une place importante dans cette région. Parmi les principales industries existantes, nous trouvons : les unités textile, unités de production de matières grasses (ENCG complexe, ENCG UP8 Cevital spa),...etc.

La région possède un potentiel humaine très important ce qui induirait automatiquement de fortes consommation en eaux.

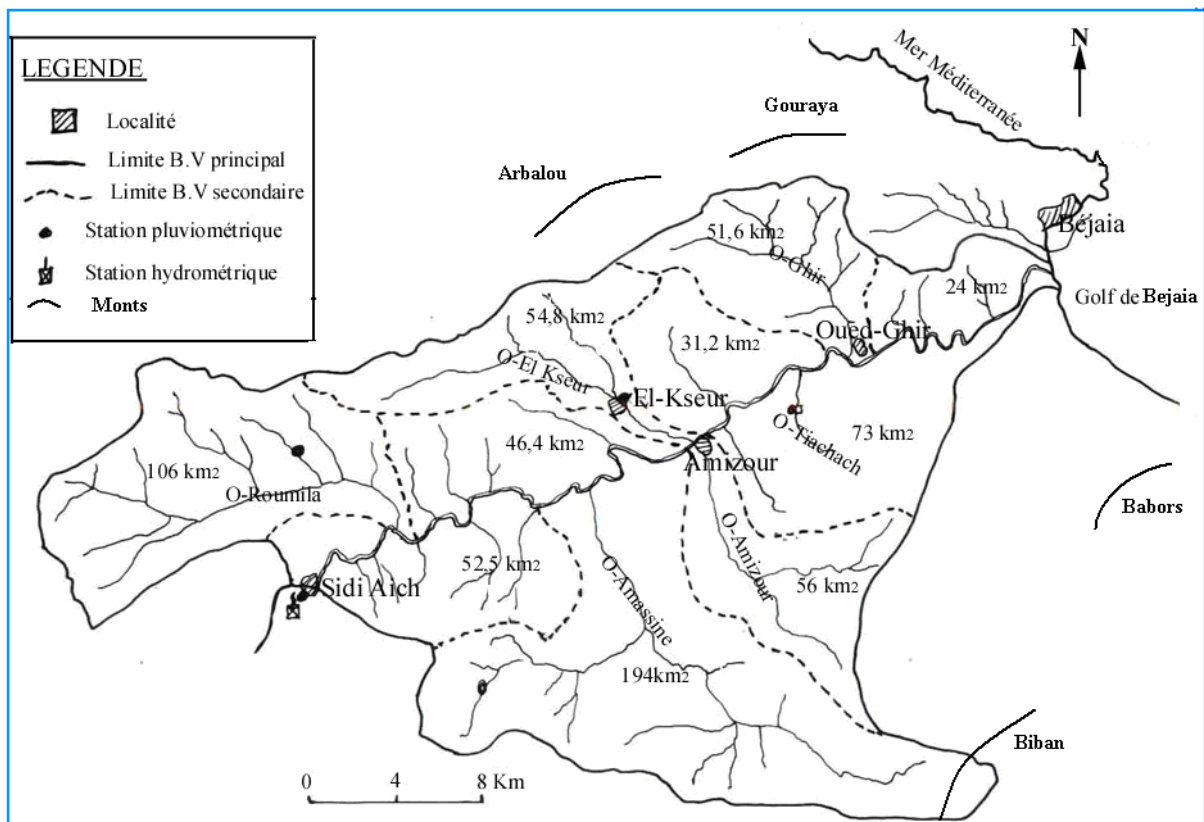


Fig.III.1. Bassin versant de la basse Soummam (Chibane, 2000).

III.2. Synthèse hydroclimatologique

Introduction

L'influence des paramètres hydroclimatologique sur le transfert des nitrates de la surface du sol vers les eaux souterraines est largement admise. En effet les engrais répandus sur la surface du sol sont en relation direct avec le caractère climatique de la région. En particulier du régime des précipitations. Le transfert des engrais en profondeur est directement lié à l'apport d'eau de surface (climatique ou provoqué par l'irrigation).

Dans cette partie nous présenterons les principaux résultats portant sur les paramètres climatiques.

Précipitations mensuelles

Selon les travaux récents (Amare, 2005 et Azzemou, 2005), les précipitations mensuelles (période 1975/1996) au niveau des stations de Sidi-Aich, Domaine Maouche Ahmed et Tifra se comportent comme suite :

- les précipitations sont maximales au mois de décembre pour la station de Tifra (137,6 mm), au mois d'octobre pour la station de (70,9 mm), et en février pour la station de Sidi Aich (65,8 mm).
- Les précipitations sont minimales au mois de juillet (3,7 mm) pour la station de Tifra, au mois de juillet (1,1 mm) pour la station de Domaine Maouche Ahmed et au mois de juillet (2,3 mm) pour la station de Sidi Aich.
- Les précipitations annuelles sont, de 709,36 mm pour la station de Tifra, de 445,6 mm pour la station de Domaine Maouche Ahmed et de 457,4 mm pour la station de Sidi Aich (tableau II.1 et tableau II.2)

Tableau III.1 : Nomenclature, équipement et période de fonctionnement des stations pluviométriques du BV de la Soummam

station	code	Altitude (m)	coordonnées		Equipt	Période de fonctionnement	Durée (ans)
			X(km)	Y(km)			
Sidi Aich	151001	80	678.20	369.25	Pluviomètre	1975-1996	22
Tifra	151007	450	678.25	375.75	Pluviomètre	1975-1996	22
Domaine Maouche Ahmed	151004	50	692.75	373.4	Pluviomètre	1975-1996	22

Tableau III.2 : Précipitations moyennes mensuelles et annuelle en (mm) période 1975/1996

Station	Sidi Aich	Domaine Maouche Ahmed	Tifra
Mois			
SEP	25	24.2	25.2
OCT	40.2	70.9	56
NOV	46.1	46.1	81.2
DEC	79	77.9	137.6
JAN	63.5	51.9	108
FEV	65.8	51.4	93.6
MAR	43.1	53.9	82.3
AVR	48.3	37.1	69.2
MAI	30.1	18.2	32.4
JUI	8.4	7.1	13.5
JUL	2.3	1.1	3.7
AOUT	7.6	5.2	6.5
P(mm)	457.4	445.6	709.36

III.4. Aperçu géologique

Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons brièvement la structure géologique et la description lithologique de la basse vallée de Soummam. Il sera également décrit le comportement hydrogéologique des différentes formations, en s'appuyant sur les données disponibles

Les zones d'étude s'intègrent dans le Tell septentrional Kabyle, qui a été affecté par l'orogénèse alpine.

Ce domaine est caractérisé par un empilement de nappes contenues dans un édifice structural complexe.

Les plaines alluviales sont des bassins infra- montagneux allongés suivant une direction W-SW et E-NE, où se sont accumulées les formations néogènes et quaternaires.

Dans cette étude nous nous intéressons à la lithologie et à la structure géologique dans le but d'identifier les horizons aquifères.

III.4.1 Aperçu géologique sur l'Algérie septentrionale

La chaîne des Maghrébides est une partie de la chaîne alpine périméditerranéenne qui se raccorde à l'Ouest et vers le Nord au niveau de l'arc de Gibraltar. Il s'agit d'un domaine très affecté par des formations d'âges mésozoïque et cénozoïque.

La région est divisée en 2 zones du point de vue géologique (Clinks, 1973); Zone interne; Zone externe.

Les zones internes comprenant le socle cristallin et sa couverture d'âge paléozoïque, sur ce paléozoïque viennent en discordance des termes argileux gréseux d'âge triasique, des calcaires et marno- calcaire d'âge jurassique.

Dans ces zones, on trouve aussi une zone de flyschs constituées de sédiments flyschyodes (quartzo- pellitiques, conglomérats, marno- calcaire et des micro- brèches).

Dans cette région, on distingue deux types de flyschs :

- flyschs mauritaniens ;
- Flyschs massyliens.

Les Zones externes sont constituées par un ensemble d'unités paraautochtones et allochtones, on y distingue :

Des nappes épi telliennes : comportant un trias gypsique, un crétacé inférieur marneux et un crétacé supérieur sous forme de marnes d'épaisseur kilométrique ;

Des nappes ultra telliennes de formation d'âge Néocomien à Eocène moyen ;

Des nappes infra telliennes : sont composées d'un empilement d'unité dont l'âge va du Sénonien et Eocène. Le Crétacé est composé d'argile, l'éocène de calcaire et de marne et l'Oligocène de marne gréseuse.

Enfin, dans cette région, on trouve aussi, une nappe numidienne, composée d'épais banc de grés grossier essentiellement quartzeux de teinte calcaire et de puissantes assises basaltiques ou argileuses de teintes grisantes d'âge oligocène supérieur à la base.

III.4.2 Cadre géologique local

III.4.2.1. Description litho stratigraphique

La série stratigraphique affleurant au niveau de la région de la basse Soummam en partant de la plus anciennes à la plus récente (fig.III.3) et la suivante :

Trias

Il est présent dans la région d'étude sous forme de pointements locaux, on le trouve sous forme d'intrusion le long des accidents, est il formé essentiellement de masses gypsosaline, d'argile versicolore, et de formations grésos - dolomitique.

Jurassique

Il affleure essentiellement au nord du bassin, au niveau du Djebel Aghbalou-Gouraya et au sud-est de Sidi-Aich.

Le jurassique est constitué de :

- Calcaires dolomitique plus ou moins stratifiés ; -
- Calcaires noires, et de mammo- calcaire.

Crétacé

Dans la région étudiée, le crétacé est caractérisé par une grande diversification de faciès.

Pour simplifier les descriptions lithologiques, nous distinguerons deux types de faciès :

Un faciès tellien constituant principalement les unités de Gouraya, Aghbalou et de Barbacha ;

Un faciès flysch représenté essentiellement par les flyschs massyliens. Le Crétacé tellien n'affleure qu'en rive droite de la Soummam (de Sidi-Aich à Oued Amizour), il est essentiellement formé de marnes schisteuses noires et de marnes calcaires; Le crétacé à faciès flysch affleure largement sur le versant nord de la vallée de la Soummam, où il repose, par l'intermédiaire d'un contact anormal de base, sur les formations du Crétacé tellien.

Miocène

Dans la région de la basse vallée de la Soummam, on en rencontre que le miocène II (miocène post-nappe). Il affleure sur la rive gauche de la Soummam (de Sidi-Aich) à la Réunion Oued Ghir), et sur la rive droite au sud de Bejaia à Oued Amizour. Il est représenté par :

- Des formations sédimentaires d'âge Langhien ;
- Des formations éruptives.

Pliocène

Il est représenté par deux faciès marins marneux passant latéralement à des argiles. Il affleure sur les bordures de Oued Ghir à Djabira. Un faciès continental formé de brèches et des poudings affleurent au pied du Djébel Gouraya et Bejaia ville.

Quaternaire

Ce dernier est formé essentiellement :

- D'alluvions anciennes constituées de galets, de graviers et de sables à matrices sableuse;
- D'alluvions récentes formées de limons, de sables et de cailloutis au niveau du lit majeur de la Soummam ;
- Des brèches de pentes consolidées et de cônes d'éboulis récentes;
- De cônes de déjection des principaux affluents.

Tectonique

La tectonique dans la région est composée de quatre phases tectoniques d'âge mésozoïque :

- La phase Néocomienne ;
- La phase Sénonienne ;
- La phase Paléogène ;

La phase Miocène. Les phases tectoniques ont profondément fracturés cette région. On y décèle deux grandes familles de failles de direction NO et NE (Coutelle, 1979)

Cette dernière famille de failles a constitué de vraies zones de drainage dans certains endroits et donnent de véritables réseaux de drainage naturels d'eaux.

III.4.2.2. Caractéristiques hydrogéologiques des différentes formations

Les descriptions lithologiques et tectoniques permettent d'apprécier les caractéristiques hydrogéologiques des différentes formations :

-Les formations calcaires jurassiques de l'Arbalou-Gouraya et de Timezrit constituent des milieux compétents où la circulation des eaux souterraines ne peut s'effectuer qu'à la faveur des discontinuités à circulation fissurale et à porosité de fracture.

Cependant, il existe quelques sources de résurgences à débits relativement importants telle que la source de Toudja (intersection de l'accident d'Argbalou N 140 avec N70). Ces formations peuvent constituer un bon aquifère mais leurs positions anticlinales ne permettent pas la constitution de réserves;

- Les formations des grés numidiens présentent une grande extension géologique et une granulométrie grossière favorable à l'infiltration des précipitations. Il a été décrit une existence de puits et sources alimentant plusieurs villages en eau potable. Cette nappe est constituée par une alternance de grés et de pelites noires et à la base d'argiles, ce qui témoigne d'un aquifère multicouche;

Les formations sédimentaires sont représentées par les terrasses alluviales très perméables. Elles constituent un bon aquifère.

Par leur épaisseur importante en éléments grossiers et leur porosité d'interstice.

Actuellement, ce sont les plus sollicitées dans l'aménagement des ressources souterraines du bassin hydrogéologique;

Les formations éruptives du massif d'Amizour-Bejaia représentées par des laves et les granodiorites peuvent constituer des milieux favorables à l'exploitation des eaux souterraines du fait de degré de fracturation et d'altération très élevé des formations volcaniques ainsi que leur position structurale favorable à l'infiltration des précipitations

III.4.3. Conclusion

La région d'étude, caractérisée par une tectonique très complexe, constitue une zone de transition entre le domaine interne et le domaine externe. Elle fait partie du tell septentrional, structurée lors de l'orogénèse Alpin.

C'est au plio- Quaternaire que s'effectue l'ouverture des basses vallées qui suit une direction SSE - NNW sans doute liée à un décrochement de direction NW - SE (Raymond, 1976). Les terrains méso- cénozoïques sont représentés par des terrains de nature lithologique variés, ce sont essentiellement des formations sédimentaires (marnes, argiles, molasses, conglomérats et grés) du Miocène qui affleurent la vallée de l'Oued Soummam. Elles reposent en discordance sur le socle ancien métamorphique qui apparaît en fenêtres. Le remplissage quaternaire constitue en raison de l'importance de son développement et sa caractéristique hydrogéologique le meilleur aquifère de la région.

III.5. Hydrogéologie

III.5.1. Introduction

Le principal objectif de notre étude hydrogéologique, est de décrire l'écoulement des eaux souterraines ainsi que l'évaluation des paramètres hydrogéologiques.

III.5.2. Piézométrie

Afin de connaître la répartition spatiale des nitrates l'étude piézométrique est capitale car il nous donne le sens de l'écoulement souterrain, de déterminer les gradients hydrauliques ainsi que les zones d'écoulement. L'interprétation de la carte piézométrique (Azzemou, 2005) montre :

Pour savoir l'évolution des nitrates, cette étude est capitale car il nous donne le sens de l'écoulement souterrain.

D'après l'interprétation de la carte piézométrique (Benaïssa, 2003 in Azzemou, 2005) fig.III.5.2, cette carte montre :

Une direction parallèle à l'allongement de la vallée d'orientation générale SW-NE ;

Une direction normale à l'axe de la vallée d'orientation générale SE-NW ;

L'écoulement de la nappe aquifère se fait du SW vers le NE, le sens d'écoulement caractérise la circulation principale du bassin hydrogéologique du remplissage alluvial, de l'amont vers l'aval, s'écoulant ainsi vers la mer ;

- L'écoulement principal de la nappe est convergent d'amont en aval, et divergent dans la plaine côtière ;
- Les axes de drainage des eaux souterraines sont nettement individualisés :

Un axe principal à la partie de la plaine ;

Des axes secondaires se superposent aux vallées des principaux affluents ;

Les eaux souterraines convergent toutes vers l'axe principal, sauf dans la plaine côtière.

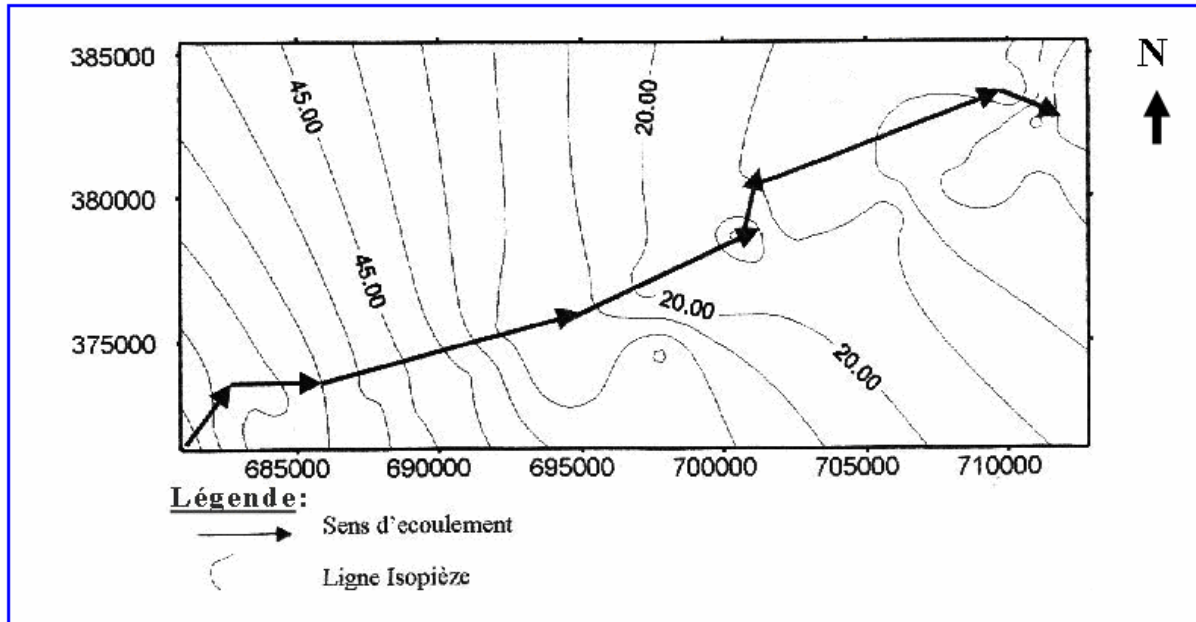


Fig.III.5.2 : Carte piézométrique de la plaine alluviale période 1971(Chibane, 2000)

III.5.3. Gradient hydraulique

Dans la vallée de la Soummam. A l'Ouest d'El-Maten (cône de déjection de l'Oued Roumila), le gradient hydraulique est de l'ordre de 12%, il diminue ensuite jusqu'à 4.5% vers l'aval par suite de l'élargissement de la vallée.

Au niveau du seuil d'Aguellal, les isopièzes se ressent normalement et le gradient est d'environ 8%, vers l'aval de l'Oued Amassine, le gradient augmente jusqu'à 15%. Au niveau d'El-Kseur, la vallée s'élargit et le gradient passe à 4.5% enfin vers l'aval et jusqu'à l'exutoire, les variations du gradient sont irrégulières.

Sur le versant Nord et aux débouches des principaux affluents, les gradients restent forts (10 à 15%).

III.5.4. Paramètres hydrodynamiques

L'évaluation des principaux paramètres hydrodynamiques de l'aquifère alluvial de la basse Soummam a fait l'objet de plusieurs études (Lindberg en 1972, Clinckx en 1973, Zerourou en 1983).

III.5.4.1 Perméabilité

La perméabilité (K) d'une formation s'obtient par la relation suivante :

$$K=T/e$$

K : la perméabilité de la formation (m/s); T : la transmissivité de l'aquifère (m²/s); e : épaisseur de l'aquifère (m).

Dans la basse vallée de Soummam la perméabilité est très faible de l'amont jusqu'au centre de la vallée, elle est très élevée au centre de la vallée jusqu'à la partie avale.

III.5.4.2 La transmissivité

La transmissivité varie dans les larges proportions, elle est de 4.10⁻² m²/s, on distingue deux zones particulières (Amghar 1991) :

la première, située entre Sidi-Aich et Oued-Amizour où les valeurs sont plus élevées allant de 9.10⁻² à 3.10⁻¹ m²/s ; à cause de l'importance de l'épaisseur des formations grossières et à la porosité d'interstice assez élevée ;

la seconde est située entre Oued-Amizour et l'embouchure de l'Oued-Soummam. Les valeurs de la transmissivité sont faibles, de 2.10⁻⁴ et 9.10⁻³ m²/s, ceci pourrait s'expliquer par l'épaississement du recouvrement limono-argileux qui réduit l'épaisseur de la formation grossière.

Nous pouvons remarquer qu'en générale, les valeurs de la transmissivité augmentent des terrains de bordures vers l'axe de l'Oued et également dans le sens d'écoulement des eaux.

III.5.4.3. Le coefficient d'emmagasinement

Le coefficient d'emmagasinement est le paramètre le moins caractérisé en raison du nombre limité de piézomètres. Il varie de 0.17% de 0.74% dans la zone amont et de 0.15% dans la zone avale.

III.5.5.Conclusion

L'étude hydrodynamique, nous a permis de définir l'aquifère ainsi les alluvions du quaternaire. Celui-ci montre de très bonnes caractéristiques hydrodynamiques (T, K, S).

Ces paramètres sont très importants pour l'établissement du bilan hydrogéologique et des réserves en eaux souterraines de la nappe alluviale de la basse Soummam.

- Les valeurs de la perméabilité et de la transmissivité reflètent, de façon globale, la nature des formations constituant l'aquifère.

III.6. Application aux données de la basse Soummam

III.6.1. Etude statistique des nitrates (NO_3)

Les nitrates (tableau III.1), présente une valeur minimale de 0,01 mg/l et une valeur maximale de 124 mg/l.

- La valeur de l'étendue (123,99 mg/l) montre l'hétérogénéité des différents teneurs en nitrate de la basse vallée de la Soummam.

- la valeur moyenne étant de 24,07 mg/l n'est pas tout fait représentative du comportement de la variable, effet l'étendue étant importante, la moyenne arithmétique n'est pas significative.

- La médiane est de 12,4 mg/l ce qui veut dire 50% de valeurs sont inférieurs à 12,4 et 50% des valeurs sont supérieures à 12,4 mg/l. Avec une variance de 712,63 mg/l elle correspond au carré de l'écart-type. 114% correspond au coefficient de variation, indique une variation importante des nitrates dans la région. Cette valeur nous montre que la distribution est loin de la loi normale. Le coefficient d'aplatissement est de 1,38, avec une valeur différente de zéro et l'aplatissement étant une mesure de hauteur ce qui nous prouve encor que la distribution est loin de la loi normale, la courbe est étalée à droite. Le coefficient d'asymétrie est de 1,35 indique une distribution loin de la loi normale.

Tableau III.1. Paramètres statistiques des NO_3^-

Variable	NO_3^- (mg/l)
Taille	60
Minimum	0,01
Maximum	124
Etendue	123,99
moyenne	24,07
Médiane	12,40
Variance	712,63
Ecart-type	26,69
Coefficient de variation (%)	1,14
Coefficient d'aplatissement	1,38
Coefficient d'asymétrie	1,35
Nombre de valeur minimale	16

L'histogramme de fréquence (fig.III.1) des nitrates présente deux groupes de classe dont le premier est caractérisé par plusieurs classes réunies et le deuxième contient une seule classe. La plus dominante est le premier groupe de classe dans l'intervalle (0 ;10 mg/l], qui renferme environ 43,33% de l'effectif total suivi d'une deuxième classe de (20 ;30 mg/l] présentant 16,66% et une troisième classe de (60 ;70mg/l] environ 14,16 % de l'effectif total et la plus petite classe se trouve dans ce même groupe dans l'intervalle (40 ;60 mg/l] et (70 ;80 mg/l] soit environ 8,33 % de l'effectif. Nous trouvons une seule classe dans le second groupe dans l'intervalle (120 ; 130 mg/l] avec 8.33%.

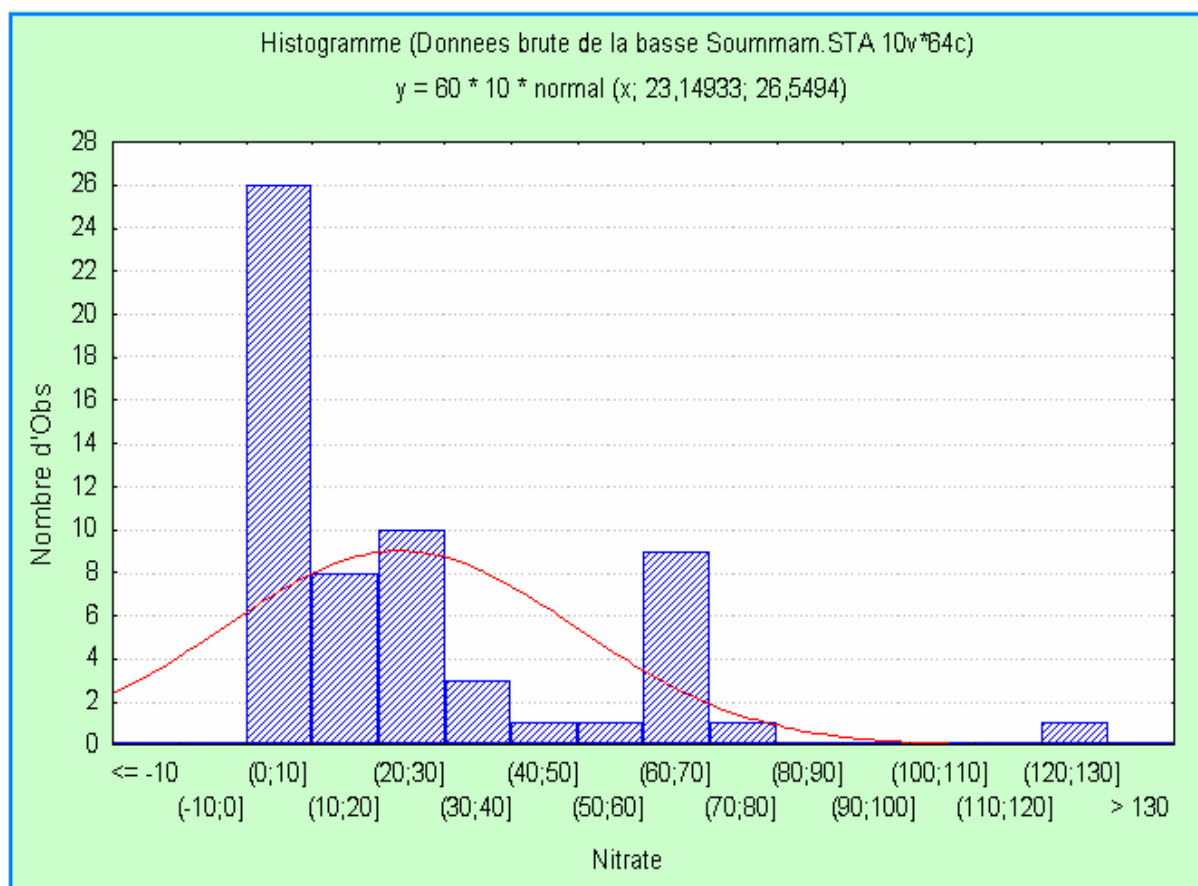


Fig.III.1. Histogramme de fréquence des nitrates de la basse vallée de la Soummam

III.6.1.1 Matrice de corrélation

D'après la matrice de corrélation (tableau III.1.1), nous constatons une faible corrélation entre les nitrates et les bicarbonates. Cette corrélation est reliée probablement à la présence du gaz carbonique dans le sol. D'autre part, les nitrates ne sont reliés à aucun autre élément ce qui démontre l'origine externe des nitrates par rapport au contexte géologique.

Tableau III.1.1. Matrice de corrélation entre les variables de la basse vallée de la Soummam

	NO ₃	CE	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃
NO ₃	1						
CE	0,132	1					
Ca	0,143	0,823	1				
Mg	0,163	0,904	0,699	1			
Cl	0,102	0,879	0,651	0,782	1		
SO ₄	-0,087	0,827	0,815	0,729	0,600	1	
HCO ₃	0,225	0,553	0,498	0,581	0,341	0,327	1

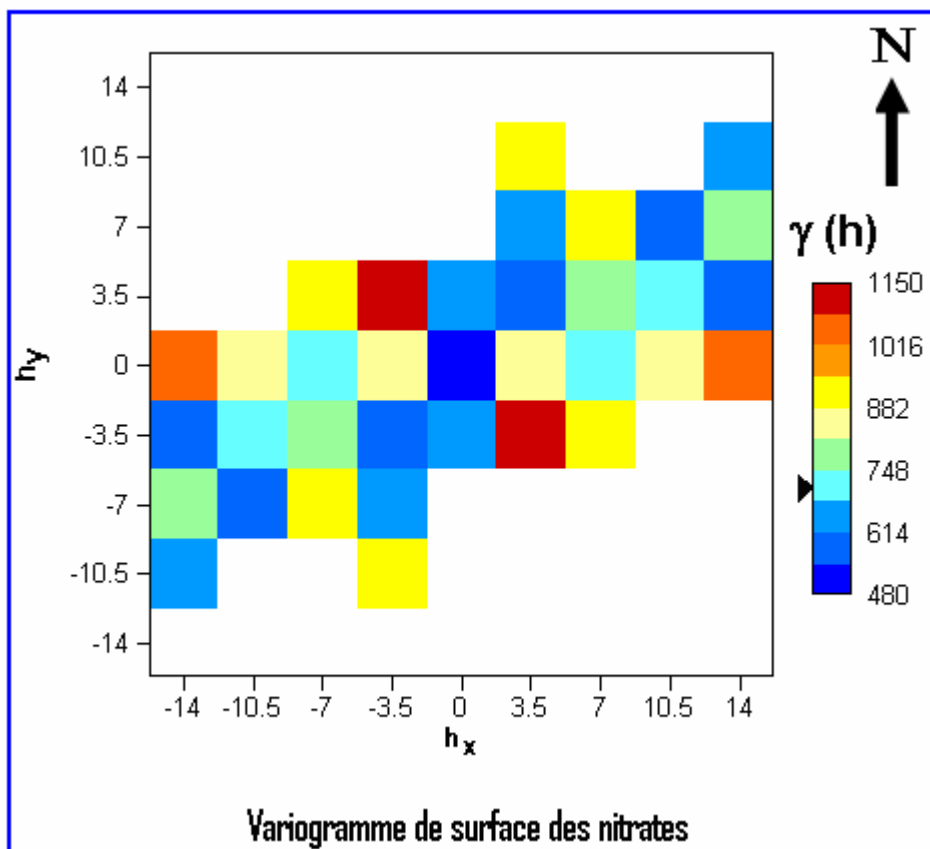
En gras, valeurs significatives au seuil $\alpha=0,050$

III.6.2. Etude géostatistique des nitrates (NO_3)

III.6.2.1. Etude des variogrammes

III.6.2.1.1. Variogramme de surface

A partir du variogramme de surface, nous pouvons identifier la direction principale de l'évolution du phénomène étudié (nitrates). La figure VIII.2.1.1 montre une continuité maximale dans la direction 45° qui est égal à la direction d'isotropie et la direction d'anisotropie correspondante à cette direction est de 135° . Pour déterminer le rapport d'anisotropie, nous allons procéder à l'établissement des variogrammes expérimentaux directionnels selon les deux directions principales, d'isotropie 45° et d'anisotropie 135° . Ce variogramme est nécessaire pour le krigeage.



La figure VIII.2.1.1. Variogramme de surface de la basse vallée de la Soummam

III.6.2.1.2. Variogramme directionnels

Le variogramme de surface nous permet aussi de tracer le variogramme directionnels. Selon les deux directions (d'isotropie et d'anisotropie) nous avons construit deux variogrammes directionnels ou variogrammes expérimentaux (fig.III.2.1.2), avec un nombre de classe de 4 et de calcul de 1,04 km.

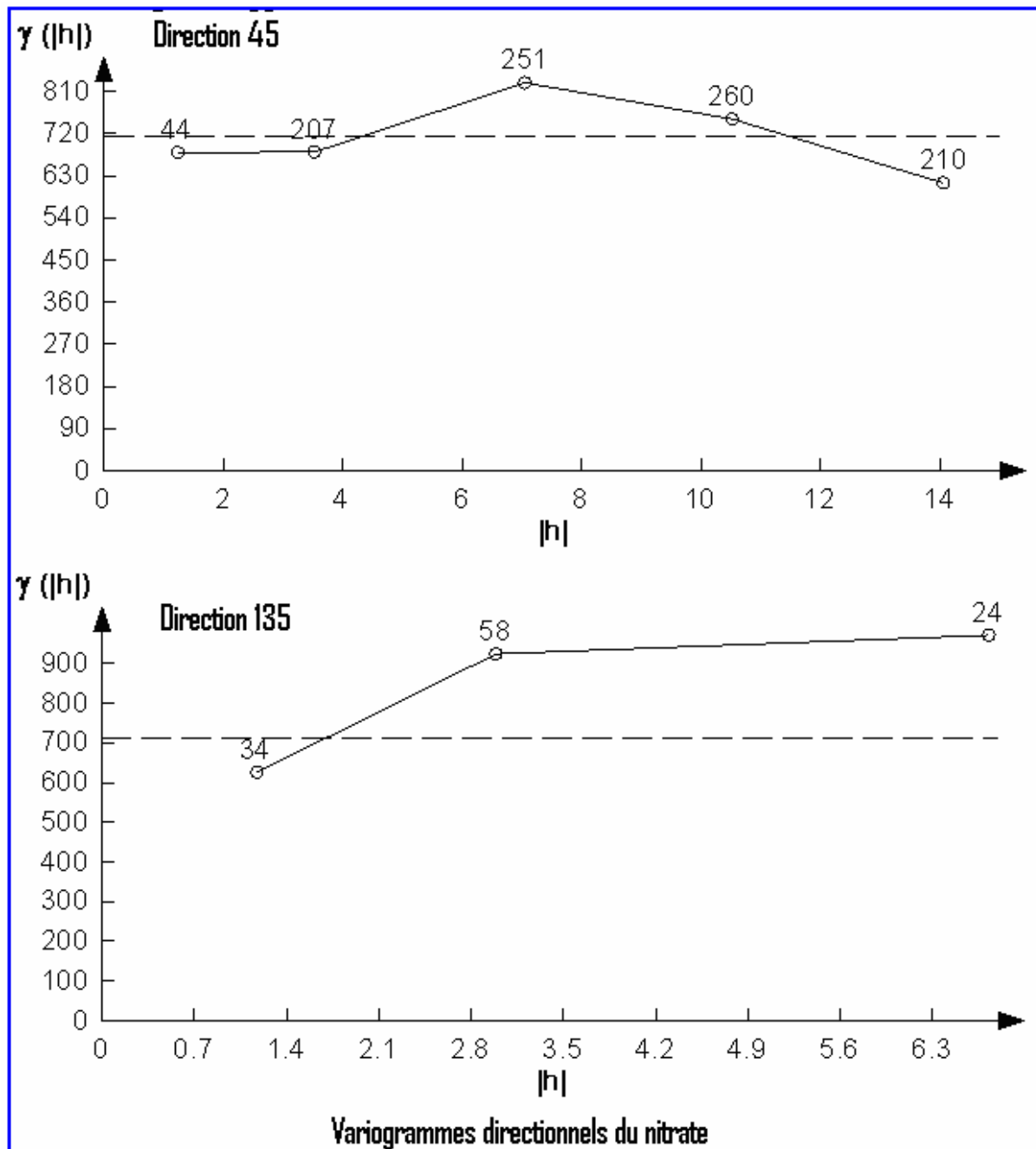


Fig.III.2.1.2. Variogrammes experimentaux des nitrates de la basse vallée de la Soummam

III.6.2.1.3. Variogrammes ajustés aux nitrates

Les variogrammes précédents nous a permis de faire l'ajustement. Le modèle qui s'ajuste mieux aux deux variogrammes expérimentaux est le modèle sphérique (figIII.2.1.3). Ces variogrammes sont caractérisés par un IGF de $2,2162 \cdot 10^{-2}$, un effet de pépite de 691,2, un palier de 50,4 km et un rapport d'anisotropie de 1,4. La validation des modèles est liée à IGF. Pour avoir un meilleur ajustement il faut que IGF tend vers 0.

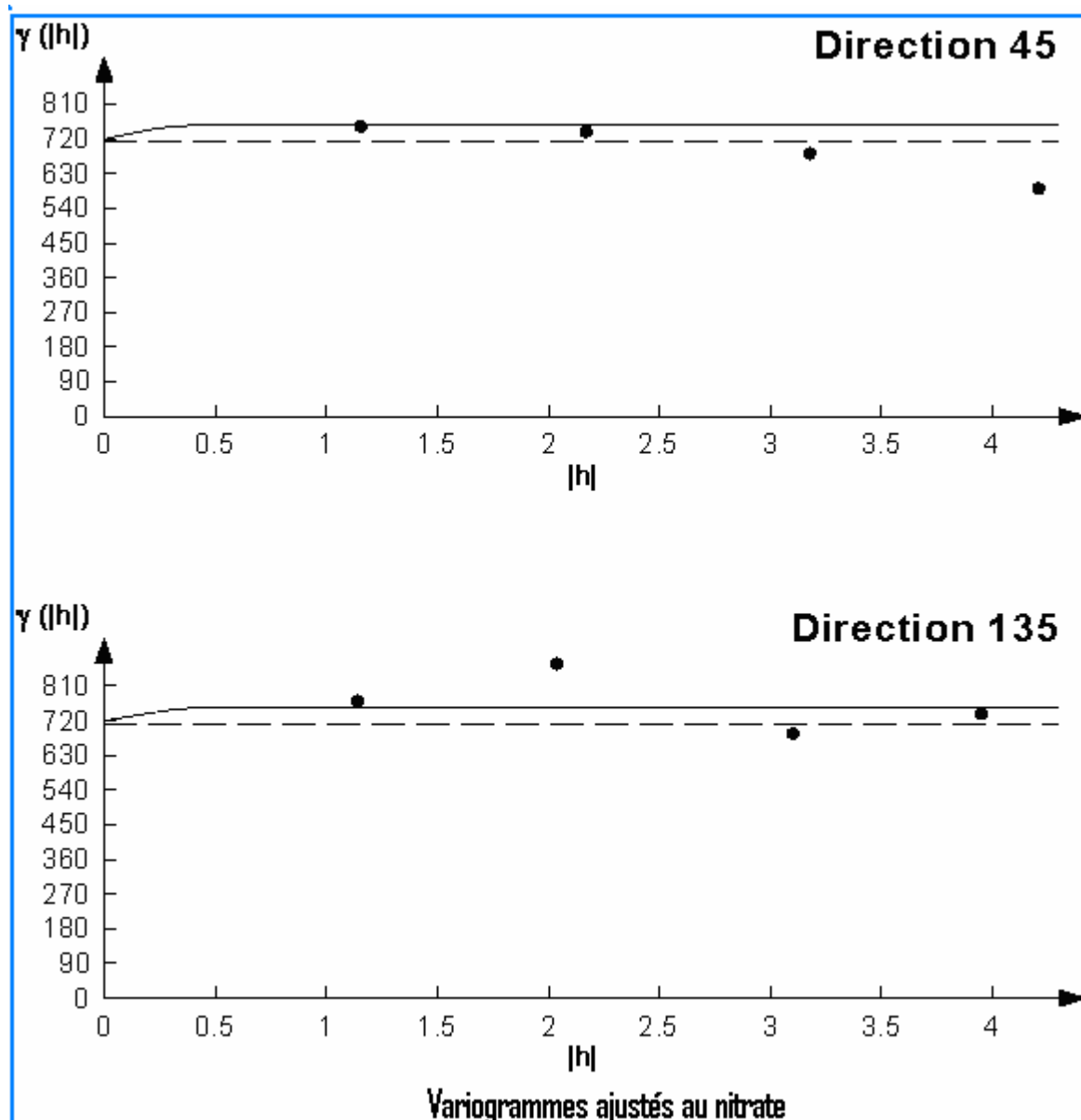


Tableau III.2.1.3. Variogrammes ajustés aux nitrates

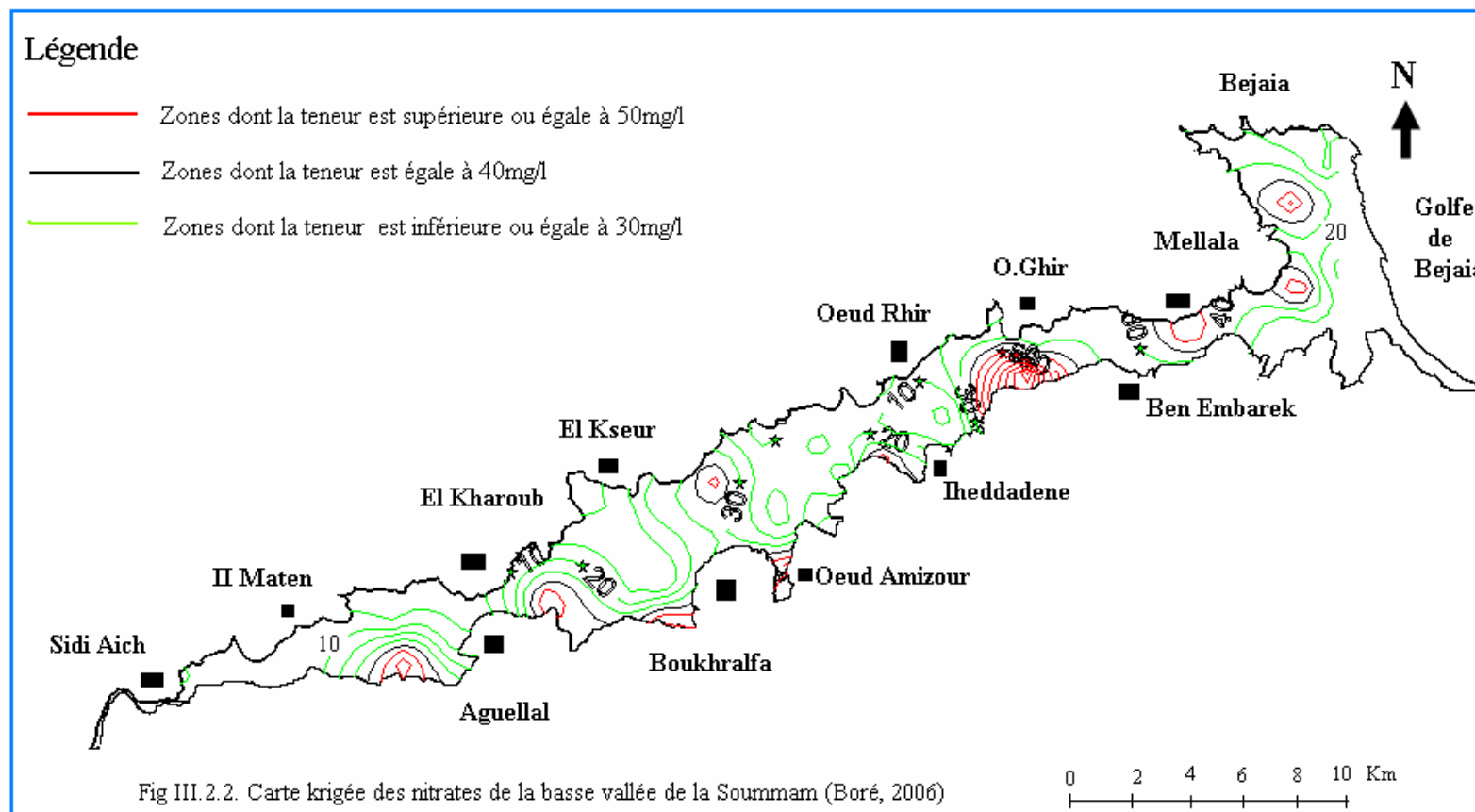
III.6.2.2. Krigeage

La carte en isovaleur en isovaleur réalisée est basée sur les normes d'interprétation de la classification des eaux selon l'organisation mondiale de la santé.

- De 0 à 40 mg/l l'eau est apte à la consommation.
- De 40 à 50 mg/l acceptable.
- De 50 mg/l et plus l'eau est interdite à la consommation.

III.6.2.2.1. Carte krigeagée des nitrates

L'observation de la carte krigée du nitrate montre, que la partie Sud-Est et quelques points du Sud au Nord (les zones en couleurs rouge) de la zone étudié ont des teneurs qui dépasse la norme de l'organisation mondiale de santé (OMS). Ces zones constituent un reel dangereux pour la santé. Les zones en orange et verte sont des zones acceptables (Fig.III.2.2.).



III.3. Conclusion

Dans la vallée de la basse Soummam nous pouvons retenir que: Les études statistiques viennent de nous montrer que les nitrates ne sont pas corrélés avec les autres éléments chimiques présents dans la nappe, mais une faible corrélation avec les bicarbonates. Nous pouvons dire que les nitrates sont des éléments exogènes à la nappe.

L'analyse variographique montre que la variabilité spatiale des nitrates est faible suivant la direction 45° . La carte krigée nous montre le long de l'axe de la vallée de la basse Soummam nous observons des anomalies. La plus importantes est celle localisée au niveau de l'agglomération de l'oued Ghir. Cette zone présente des teneurs en nitrates qui dépasse largement les normes de l'organisation mondiale de la santé, ces eaux souterraines constituent un réel risque quant leur utilisation dans le domaine de l'alimentation en eaux potable.

Nous attribuons à ces teneurs anormales, à une origine agricole d'une part et d'éventuels rejet d'eaux usées d'autre part.

Chapitre IV : Comparaison aux autres basses vallées (l'Isser et Sebaou)

Cette partie de notre étude a pour objet de faire ressortir s'il y a lieu des traits communs entre ces trois régions et les zones dont la nappe est pratiquement contaminée et le sens de l'évolution de la pollution. Du point de vue comportement hydrochimiques ces vallées côtières ont fait l'objet d'une étude (Azzemou, 2005).

IV.1. Situation géographique

IV.1.1. La vallée de l'Isser

La région d'étude est située dans le bassin versant du bas Isser à 60 km à l'Est d'Alger, entre les altitudes 36°56' et 36°85' Nord et les longitudes 3°84' Est. Elle est limitée au Nord par la mer Méditerranée, au Nord-Est par le massif de Cap-Djenet, à l'Est par les massifs de Raicha et Chender, à l'Ouest par le Dj-Bou-Arous, les Mont de Lala-Taoula et les colline de Isser-Ouidéne, au Sud par les contreforts de la dorsale Kabyle et du Djbel-Ahmed.

La séparation entre le bassin versant du bas et moyen Isser est marquée par le massif de Krachena.

IV.1.2. La vallée du Sebaou

La vallée du bas Sebaou s'étend sur une superficie proche de 229km²; localisée entre 3°48' et 3°58' de longitude Est, 36°50' et 36°62' de latitude Nord. Elle se situe à 80 km à l'Est d'Alger. Il est limité :

- au Nord par la mer Méditerranée ;
- au Sud par le massif de Sidi-Ali Bounab, au Sud-Est par le Djebel Tamerabet et le relief de Draa Karrouch et au Sud-Ouest par le massif de Naciria ;
- à l'Est par les collines de Dar Beida ;
- à l'Ouest par les djebels Bouberak et El-Gueblia.

IV.2. Aspect socio-économique

Le bas Isser et le bas Sebaou sont aussi des régions à diverses activités économiques, parmi lesquelles nous pouvons citer :

- les activités agricoles
- les activités industrielles.

IV.3. Analyse statistique élémentaire

IV.3.1. Les nitrates de la basse vallée de l'Isser

D'après le tableau IV.3.1., les nitrates présentent une valeur maximale de 235 mg/l, cette valeur est égale a celle de l'étendue. Ce qui nous traduit une grande variabilité ou

irregularité des teneurs en nitrate. Le coefficient de variation est de 125% , il nous montre que la variation des nitrates est importante dans cette région. Le coefficient d'aplatissement est de 5,79, l'aplatissement étant une mesure de hauteur avec cette valeur la distribution est loin de la loi normale, la courbe est étalée à droite. Le coefficient d'asymétrie est de 2,09 indique une distribution loin de la loi normale.

Tableau IV.3.1.Parametres statistiques des Nitrates

Variable	NO ₃ ⁻ (mg/l)
Taille	25
Minimum	0,00
Maximum	235,00
Etendue	235,00
moyenne	43,00
Médiane	20,00
Variance	2757,44
Ecart-type	52,51
Coefficient de variation (%)	1,25
Coefficient d'aplatissement	5,79
Coefficient d'asymétrie	2,09
Nombre de valeur minimale	4

L'histogramme de fréquence (fig.IV.3.1) des nitrates présente deux groupe de classe dont le premier est caractérisé par plusieurs classes réunies et le deuxième contient une seule classe. La plus dominante est le premier groupe de classe dans l'intervalle (0 ;20 mg/l], qui renferme environ 40% de l'effectif total suivi d'une deuxième classe de (80 ;100 mg/l] présentant 20% et la plus petite classe se trouve dans ce même groupe dans l'intervalle (40 ;60 mg/l] soit environ 4 % de l'effectif. Nous trouvons une seule classe dans le second groupe dans l'intervalle (220 ; 240 mg/l] avec 4%.

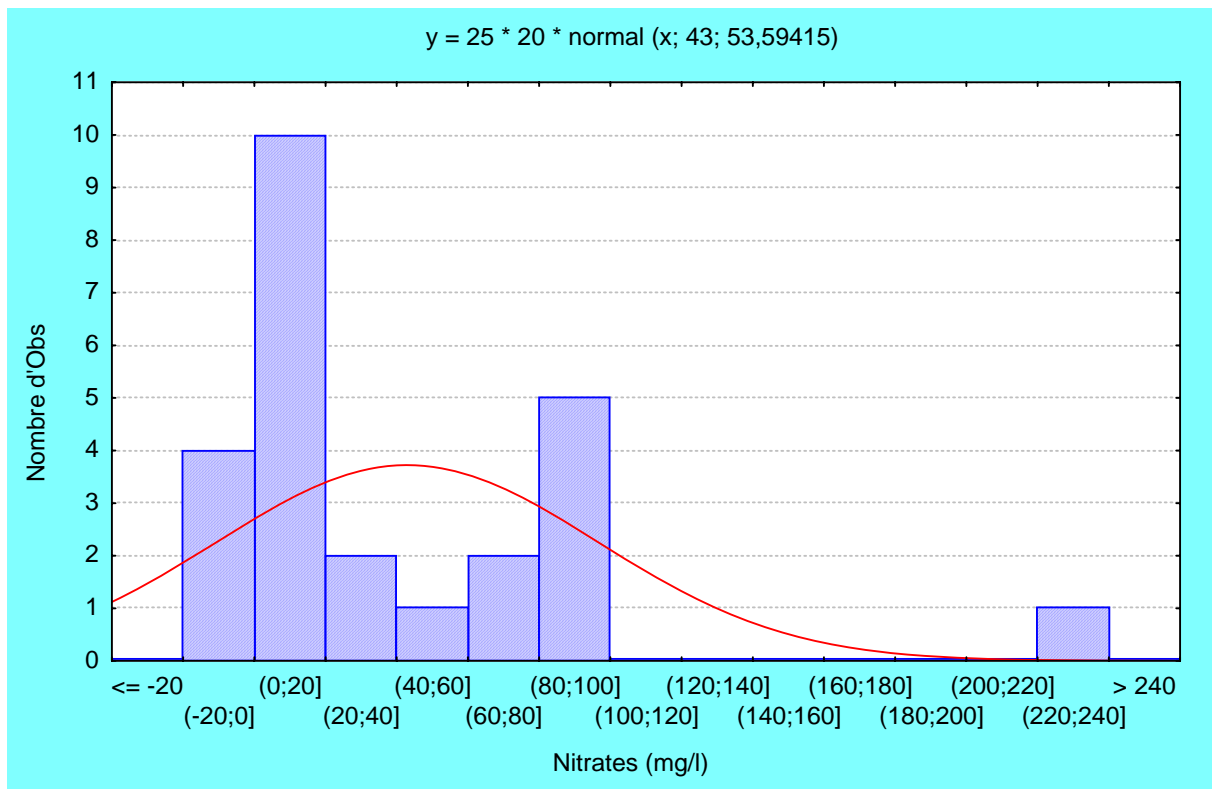


Fig IV.3.1. Histogramme de fréquence des nitrates du bas Isser

IV.3.1.1. Matrice de corrélation

D'après la matrice de corrélation (tableau IV.3.2.), il n'y a que les bicarbonates qui sont en faible corrélation avec les nitrates. Certains auteurs attribuent la relation négative entre les nitrates et les bicarbonates à la conversion de l'ammoniaque en nitrates qui s'accompagne par une réduction des bicarbonates. L'absence de corrélation entre les nitrates et les autres variables est due à l'origine des nitrates qui est exogène au milieu géologique.

Tableau IV.3.1.1. Matrice de corrélation entre les variables de la basse vallée de l'Isser

	NO ₃	CE	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃
NO ₃	1						
CE	-0,001	1					
Ca	0,069	0,737	1				
Mg	0,101	0,852	0,544	1			
Cl	0,083	0,829	0,782	0,809	1		
SO ₄	-0,022	0,863	0,725	0,835	0,708	1	
HCO ₃	- 0,508	0,222	0,202	0,333	0,191	0,287	1

En gras, valeurs significatives avec les nitrates au seuil $\alpha=0,050$

IV.3.2. Les nitrates de la basse vallée du Sebaou

D'après le tableau IV.3.2., les nitrates présentent une valeur maximale de 125 mg/l. Cette valeur est égale à celle de l'étendue cela traduit une irrégularité et hétérogénéités des teneurs en nitrate. Le coefficient de variation est de 110%, il nous montre que la variation des nitrates

est importante dans cette région. Le coefficient d'aplatissement est de 10,88, l'aplatissement étant une mesure de hauteur avec cette valeur la distribution est loin de la loi normale, la courbe est étalée à droite. Le coefficient d'asymétrie est de 2,88 indique une distribution loin de la loi normale.

Tableau IV.3.2. Paramètres statistiques des nitrates

Variable	NO ₃ ⁻ (mg/l)
Taille	26
Minimum	0,00
Maximum	125,00
Etendue	125,00
moyenne	22,71
Médiane	15,50
Variance	606,38
Ecart-type	24,62
Coefficient de variation (%)	1,10
Coefficient d'aplatissement	10,88
Coefficient d'asymétrie	2,88
Nombre de valeur minimale	2

L'histogramme de fréquence (fig.IV.3.2) des nitrates présente deux groupes de classe dont le premier est caractérisé par plusieurs classes réunies et le deuxième contient une seule classe. La plus dominante est le premier groupe de classe dans l'intervalle (10 ;20 mg/l], qui renferme environ 38% de l'effectif total suivi d'une deuxième classe de (0 ;10 mg/l] et (30 ;40] présentant 15% et la plus petite classe se trouve dans ce même groupe et le second dans l'intervalle (40 ;70 mg/l] et (120,130] soit environ 3,8 % de l'effectif. Et nous remarquons que la courbe est étalée à droite confirme les résultats obtenues précédemment.

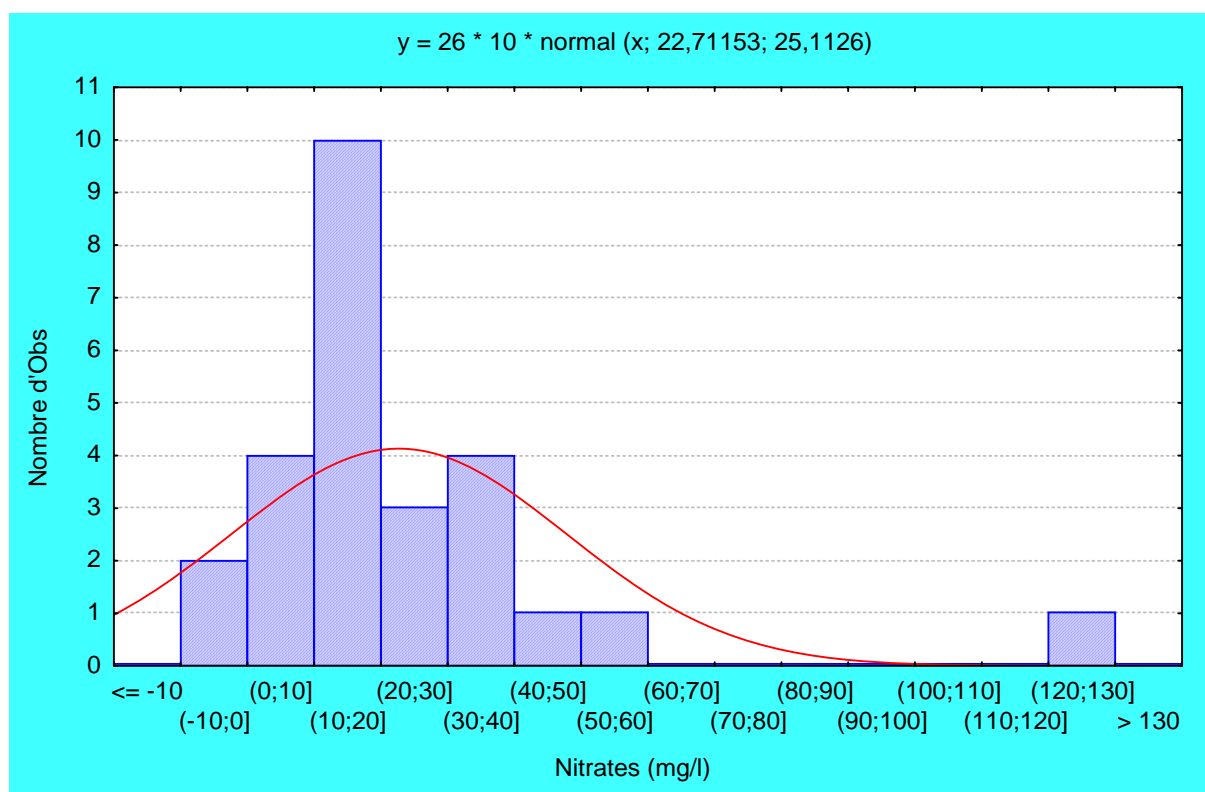


Fig.IV.3.2. Histogramme de fréquence des nitrates du bas Sebaou

IV.3.2.1. Matrice de corrélation

D'après la matrice de corrélation (tableau IV.3.2.1). Nous retenons également au niveau de la basse vallée du Sebaou l'absence de corrélation entre les nitrates et les autres variables (CE, Mg, Cl, SO₄, HCO₃). La relation positive étroite (0,64) entre les nitrates et les calciums peut être attribuée au type d'engrais éventuellement utilisé. Cette hypothèse à vérifier sur le terrain.

Tableau IV.3.2.1. Matrice de corrélation entre les variables de la basse vallée du Sebaou

	NO ₃	CE	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃
NO ₃	1						
CE	0,449	1					
Ca	0,643	0,885	1				
Mg	0,089	0,502	0,274	1			
Cl	0,183	0,824	0,555	0,480	1		
SO ₄	0,306	0,815	0,701	0,623	0,655	1	
HCO ₃	0,313	0,773	0,855	0,419	0,394	0,609	1

En gras, valeurs significatives avec les nitrates au seuil $\alpha=0,050$

IV.3.3. Tableau récapitulatif des paramètres statistique des nitrates

Le tableau.IV.3.3. Montre que :

- Que l'effectif des points d'eau échantillonnée est important au niveau de la basse vallée de la Soummam par rapport aux autres vallées. Cela démontre l'importance de l'extension du réservoir hydrogéologique de la région de Bejaia.
- Certains points d'eau présentent une absence de nitrate étant donné que les valeurs minimales sont nulles.

Les valeurs maximales oscillent entre 235 mg/l au niveau de la vallée de l'Isser et sont d'ordre 125 mg/l pour la basse Soummam et le bas du Sebaou. Ces différentes concentrations dépassent largement les limites de potabilité des eaux recommandés par l'organisation mondiale pour la santé. L'étendue et les valeurs des coefficients de variation indiquent une grande inégalité et une hétérogénéité des données des nitrates. La distribution de cette variable est loin de la loi normale. Ce qui est d'ailleurs confirmé par le degré d'aplatissement et le coefficient d'asymétrie.

Tableau.IV.3.3. Paramètres statistique des nitrates

	Soummam NO ₃ (mg/l)	Sebaou NO ₃ (mg/l)	Isser NO ₃ (mg/l)
Taille	60	26	25
Minimum	0,01	0,00	0,00
Maximum	124	125,00	235,00
Etendue	123,99	125,00	235,00
Moyenne	24,07	22,71	43,00
Médiane	12,40	15,50	20,00
Variance	712,63	606,38	2757,44
Ecart-type	26,69	24,62	52,51
Coefficient de variation (%)	1,14	1,10	1,25
Coefficient d'aplatissement	1,38	10,88	5,79
Coefficient d'asymétrie	1,35	2,88	2,09
Nombre valeur minimale	16	2	4

IV.4. La variabilité spatiale

IV.4.1. Variogramme de surface de la basse vallée de l'Isser

Nous pouvons déterminer à partir de cette variogramme la direction principale d'évolution des nitrates. La fig.IV.4.1 montre une continuité maximale dans la direction 45° , cette direction correspond à la direction d'isotropie. La direction d'anisotropie est de 135° . Pour déterminer le rapport d'anisotropie, nous procédons à l'établissement des variogrammes directionnels selon les directions principales 45° et 135° . Ce rapport est nécessaire pour le krigeage .

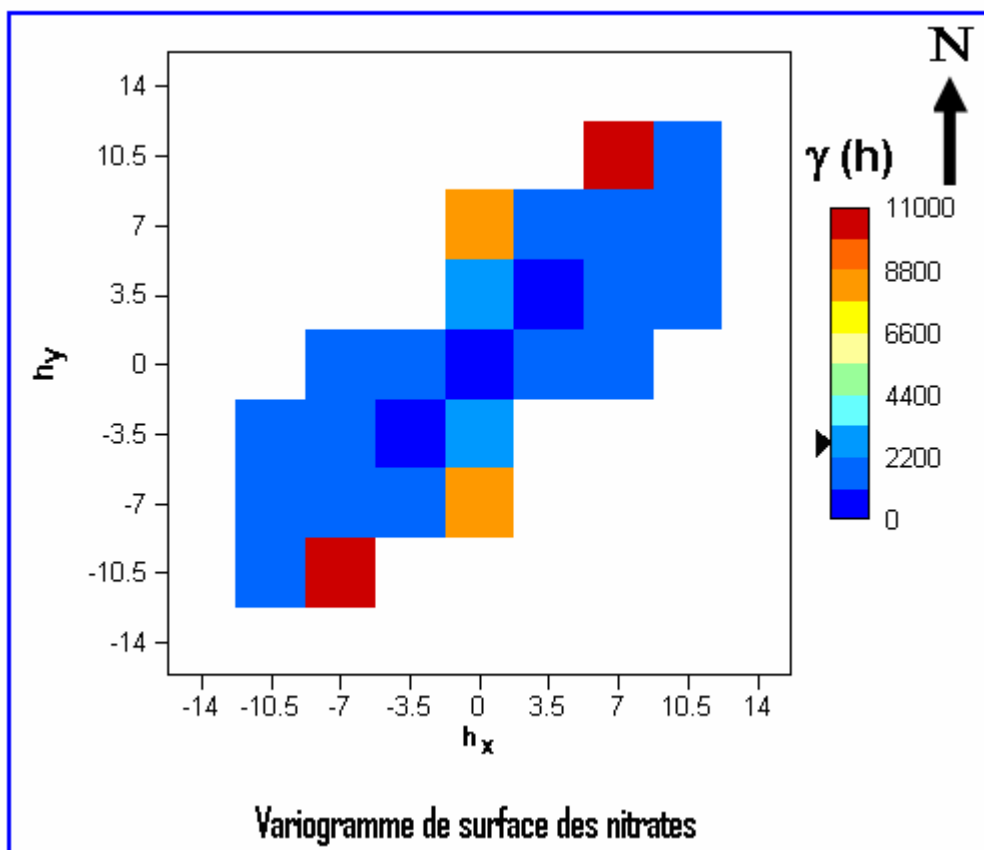


Fig.IV.4.1. Variogramme de surface des nitrates

IV.4.1.1. Variogrammes directionnels

La fig.IV.4.1.1 représente les deux variogrammes directionnels de 45° et 135° avec un nombre de classe de 4 et pas de calcul de 1,04 km.

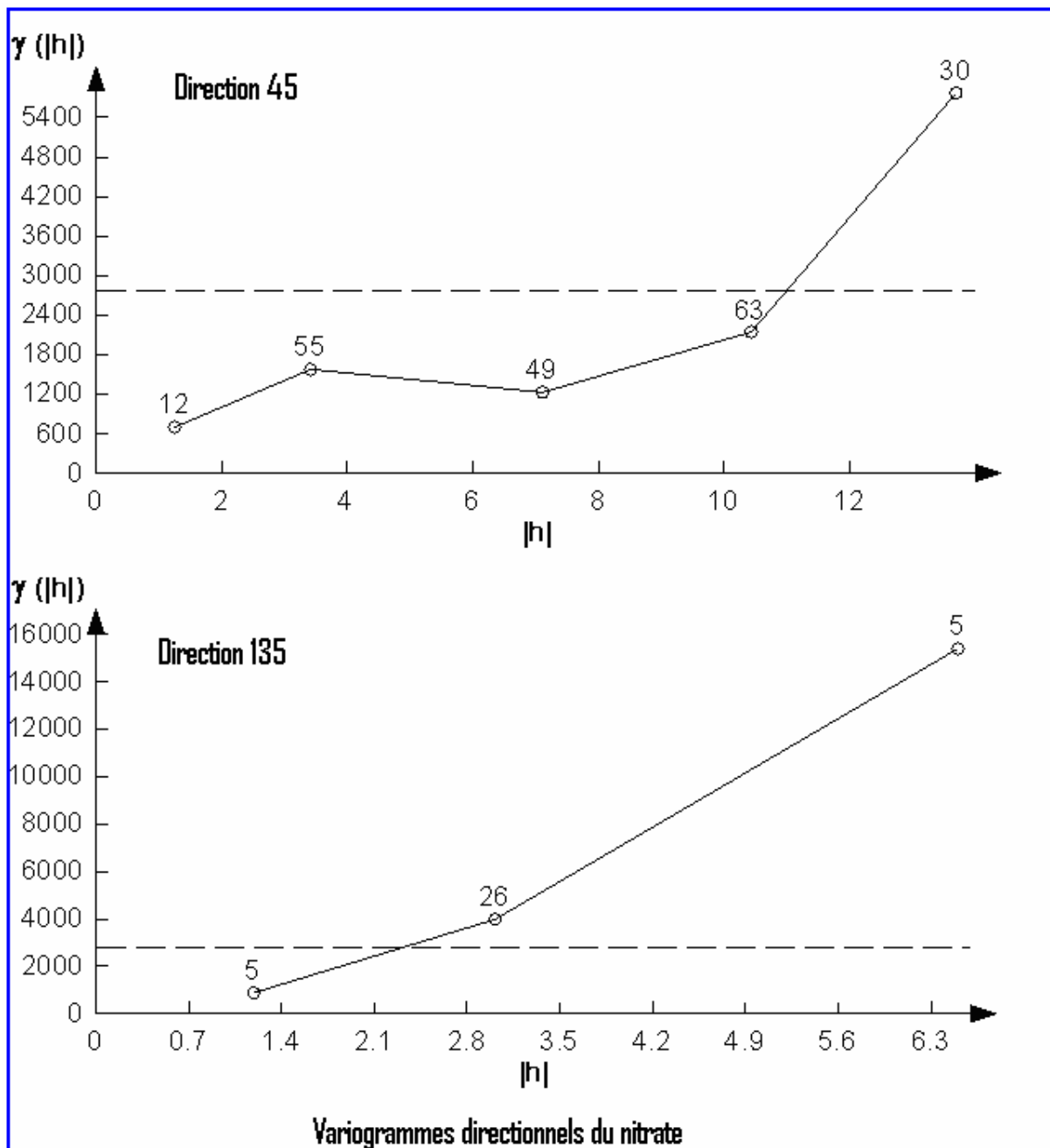


Fig.IV.4.1.1. Variogrammes expérimentaux des nitrates

IV.4.1.2. Les variogrammes ajustés aux teneurs en nitrates

Selon la fig.IV.4.1.2 le variogramme théorique ajusté selon les directions 135^0 et 45^0 présentes le modèle exponentiel, l'effet de pépite est de 532 (mg/l)^2 , les valeurs du palier et de la portée qui sont respectivement de $2547,81 \text{ (mg/l)}^2$, et de 4,2 km, le rapport d'anisotropie est de 9,2 avec l'IGF est égal à $7,84 \cdot 10^{-2}$.

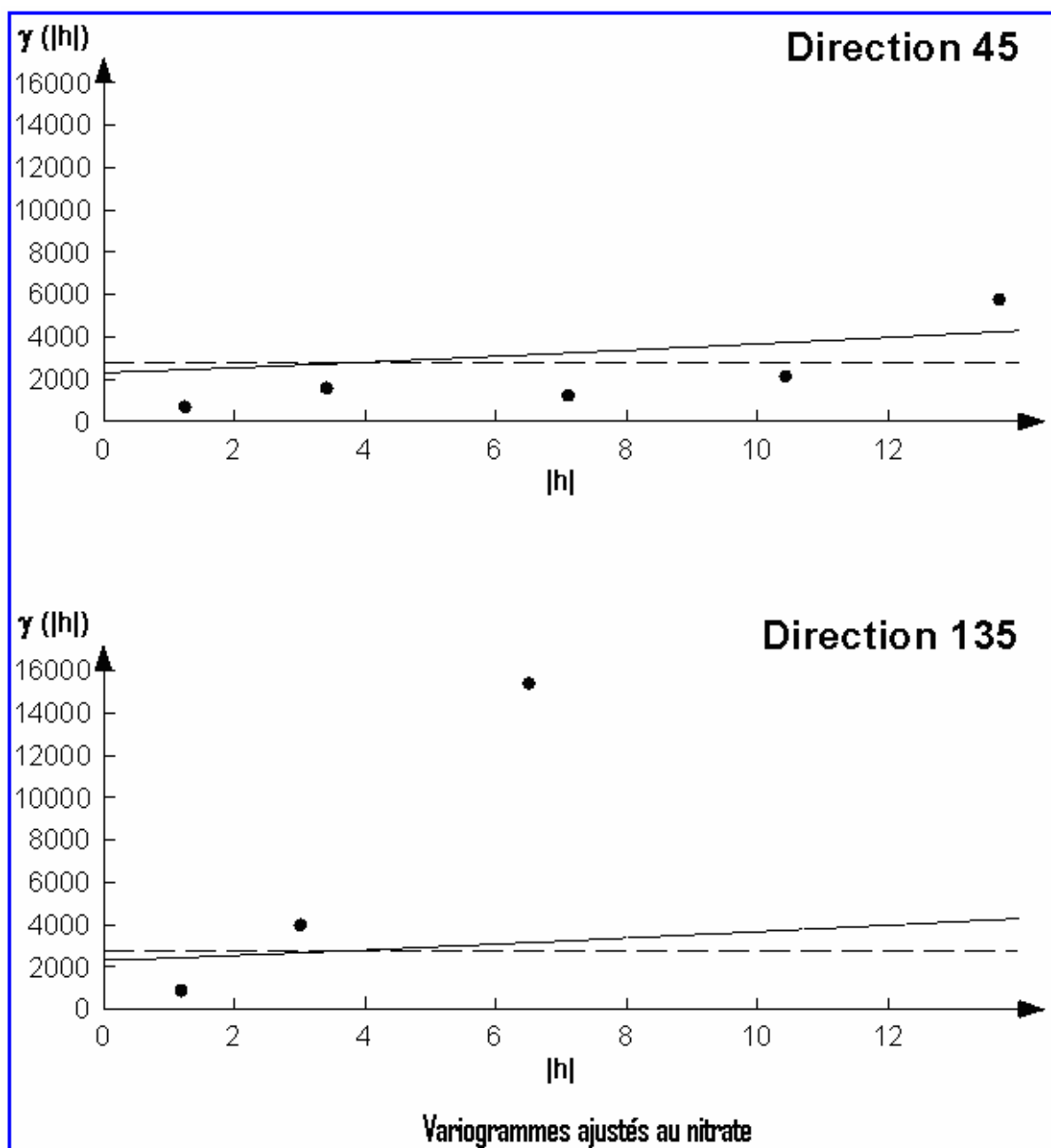


Fig.IV.4.1.2. Variogrammes ajustés aux nitrates

IV.4.1.3. Krigeage

La fig.IV.4.1.3 montre que du point de vue potabilité nous avons deux plages :

- la première plage concerne les eaux impropre à la consommation puisqu'elle dépasse largement les limites recommandées par l'organisation mondiale pour la santé. Elle se localise selon trois zones. La première zone qui est la plus importante est située du centre de la vallée jusqu'à sa partie Nord. Une deuxième zone de moindre importance

localisée à la partie Sud-Est de la zone d'étude et enfin une troisième zone de très faible extension située au Sud-ouest du secteur étudié.

La seconde plage correspond a une potabilité acceptable dont la limite est inférieure à 50mg/l. l'extension va de Sud-Ouest pour le Nord-Est, selon une bande large au Sud du secteur étudié pour devenir étroite à la partie Est.

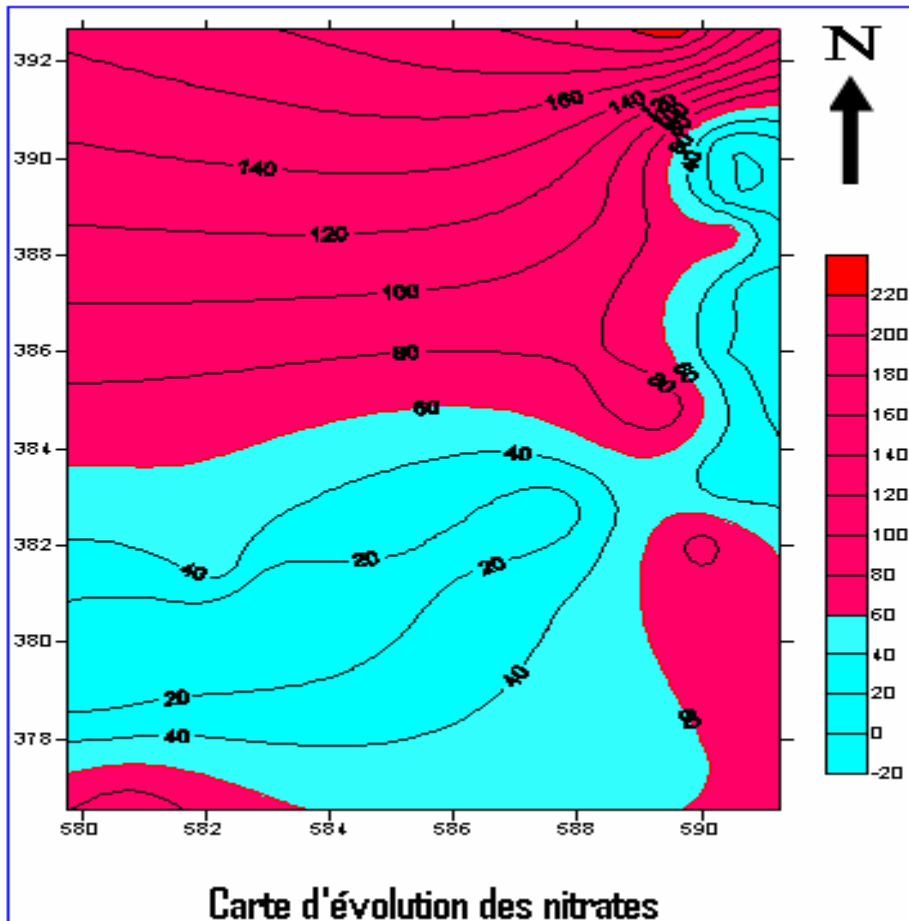


Fig.IV.4.1.3.Carte krigée des nitrates

IV.4.2. Variogramme de surface de la basse vallée du Sebaou

Le variogramme de surface (fig.IV.4.2.) montre une direction principale 45° qui la direction d'isotropie et la direction d'anisotropie est à 135° . La première direction est celle qui correspond à une continuité maximale.

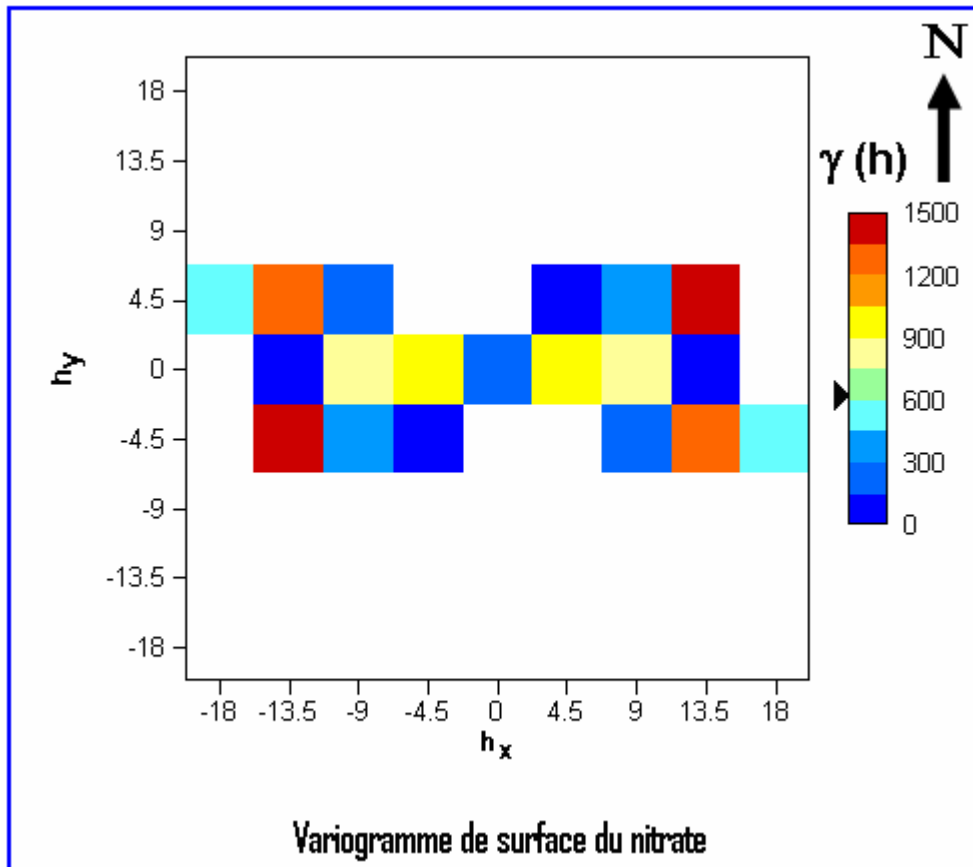


Fig.IV.4.2.Variogramme de surface des nitrates

IV.4.2.1. Variogrammes directionnels

Le variogramme de surface, nous permet de tracer deux variogrammes directionnels selon les deux directions citées 45^0 et 135^0 , (fig.VIII.13.) avec une classe de 4 et un pas de calcul de 2,9 Km.

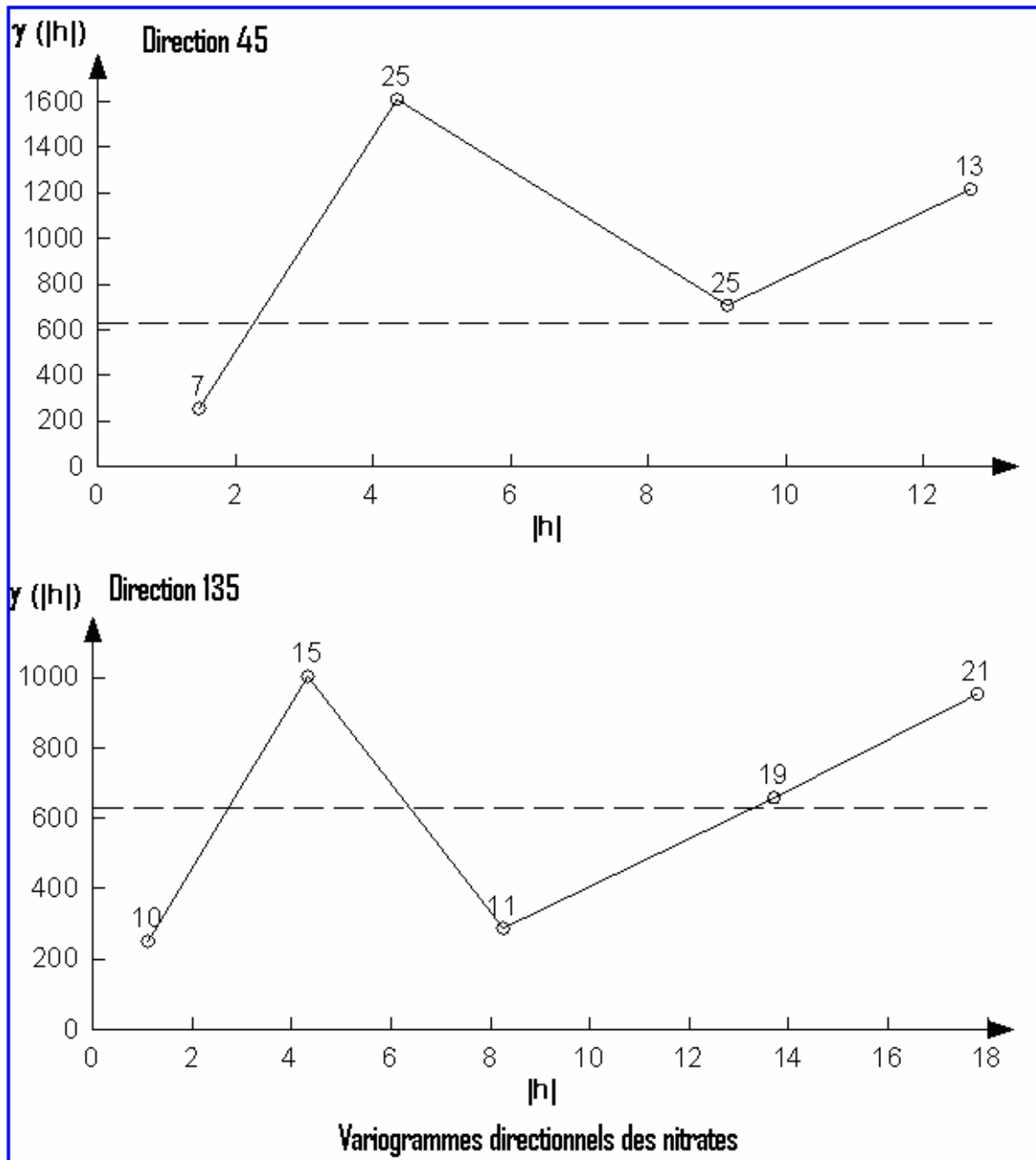


Fig.VIII.13.Variogrammes directionnels des nitrates

IV.4.2.2.Variogrammes ajustés aux nitrates

Les variogrammes directionnels s'ajustent à un modèle de type Gaussien (fig.VIII.14.), ils sont caractérisés par un effet de pépité de $422,1 \text{ (mg/l)}^2$ un palier de $296,079 \text{ (mg/l)}^2$ et une portée de 1,39 km .Le rapport d'anisotropie est égal à 2,08 avec l'IGF égal à $1,32 \cdot 10^{-1}$.

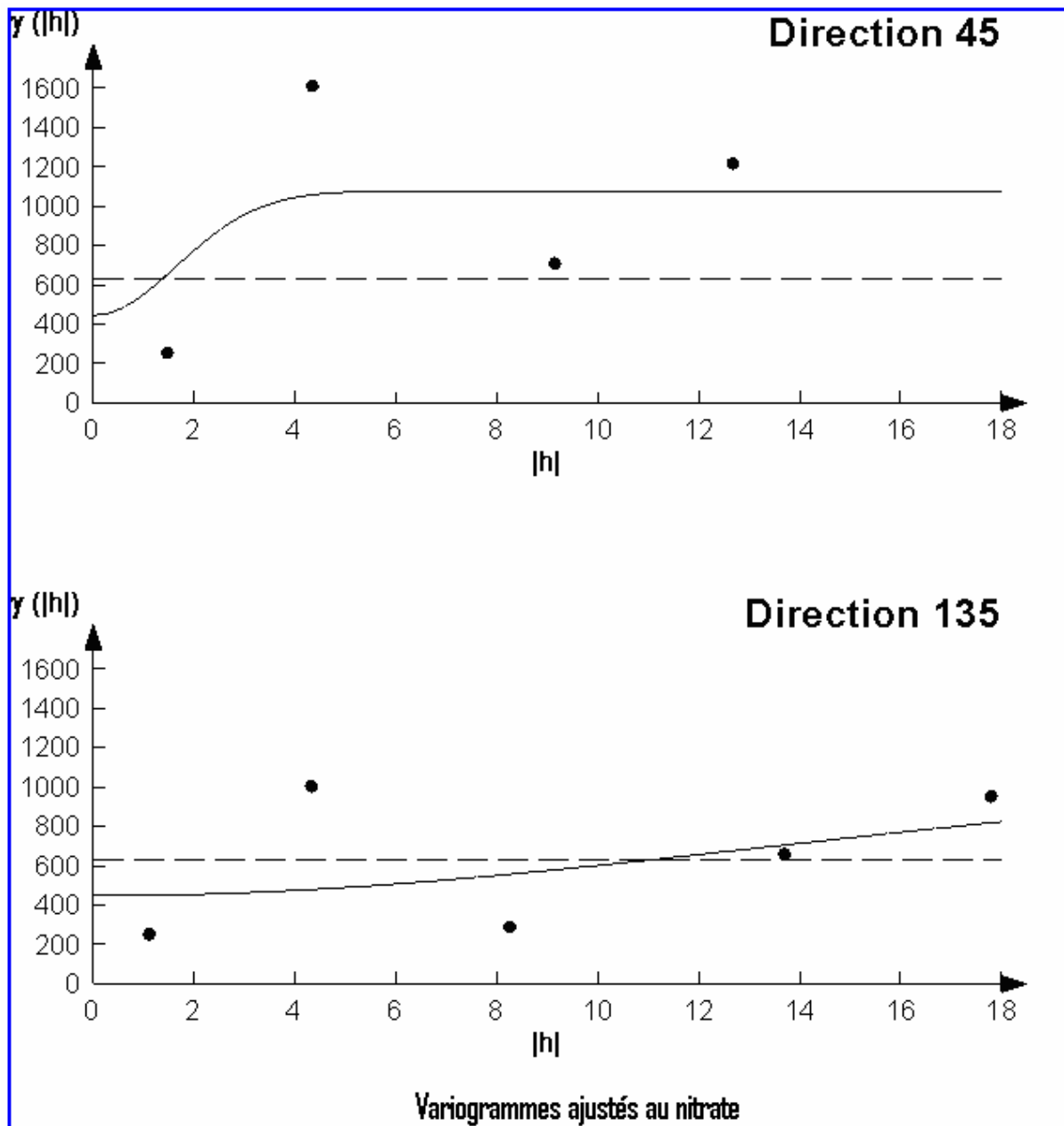


Fig.IV.4.2.2.Variogrammes ajustés aux nitrates

IV.4.2.3. Krigeage

L'observation de la carte de la carte krigée des nitrates montre une plage au Sud dont la teneur dépasse les normes de potabilité. Les autres zones ne présentent pas de danger réel pour le moment. Nous remarquons également plus que le gradient des concentrations sont serrée plus la teneur en nitrate est importante, (fig.IV.4.2.3.).

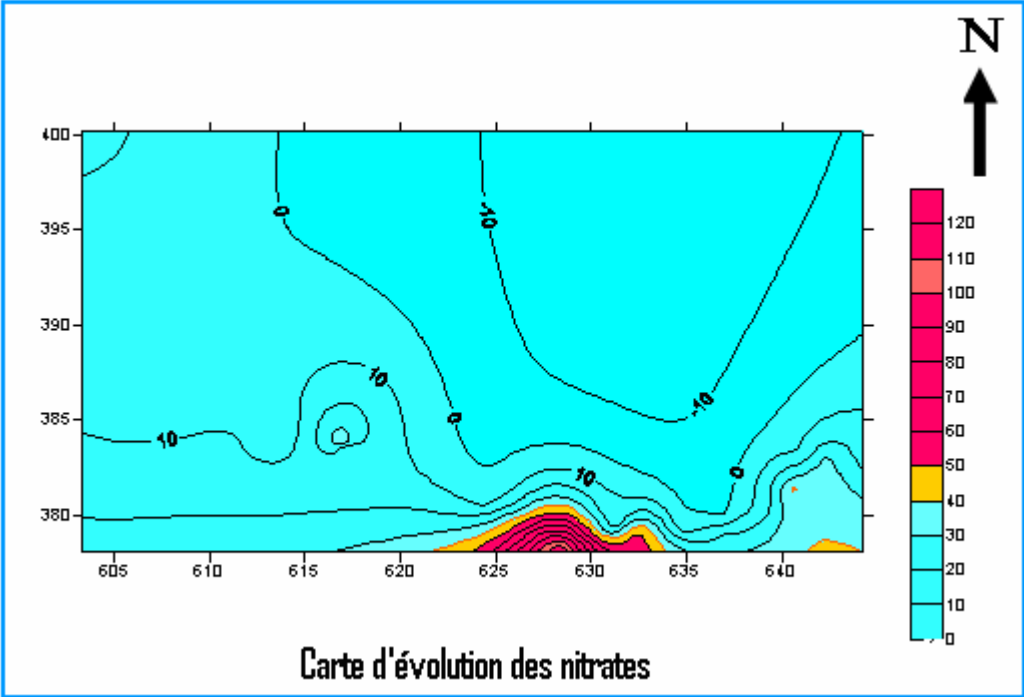
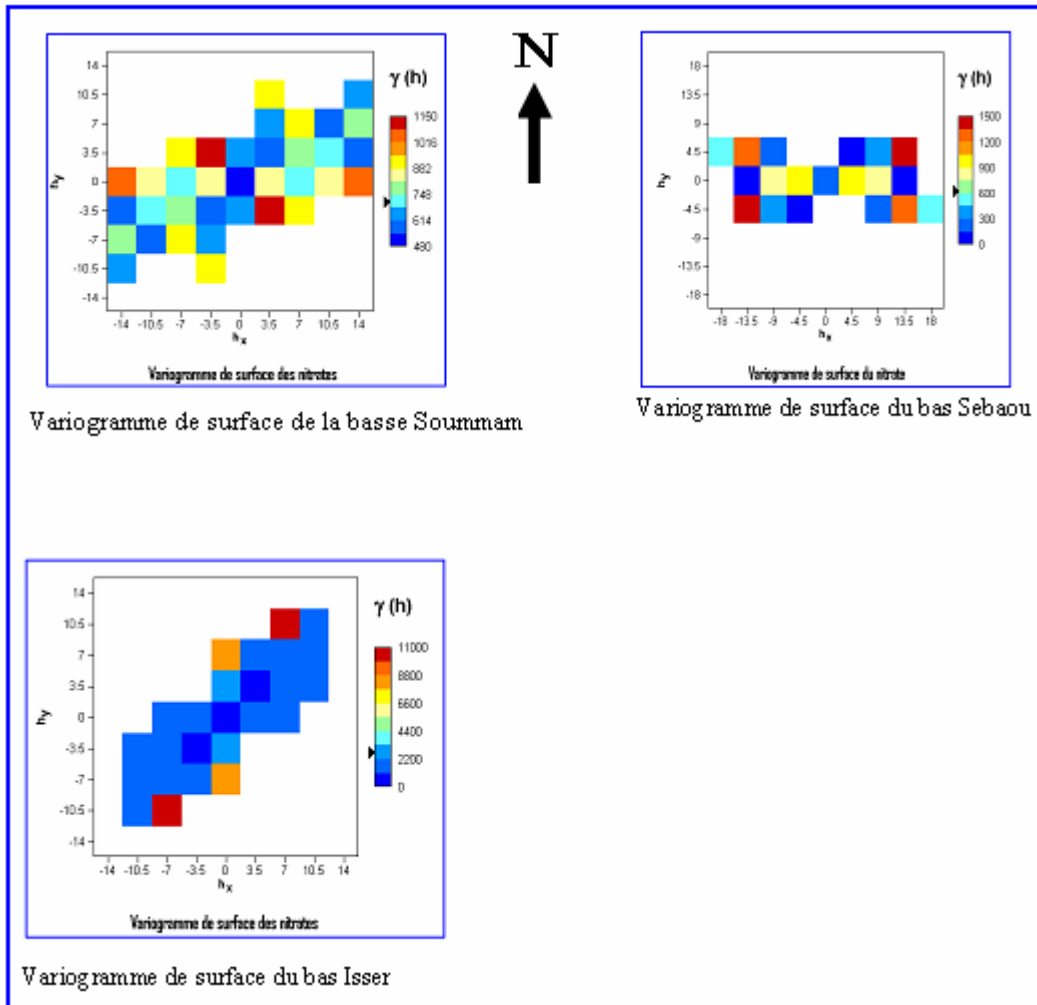


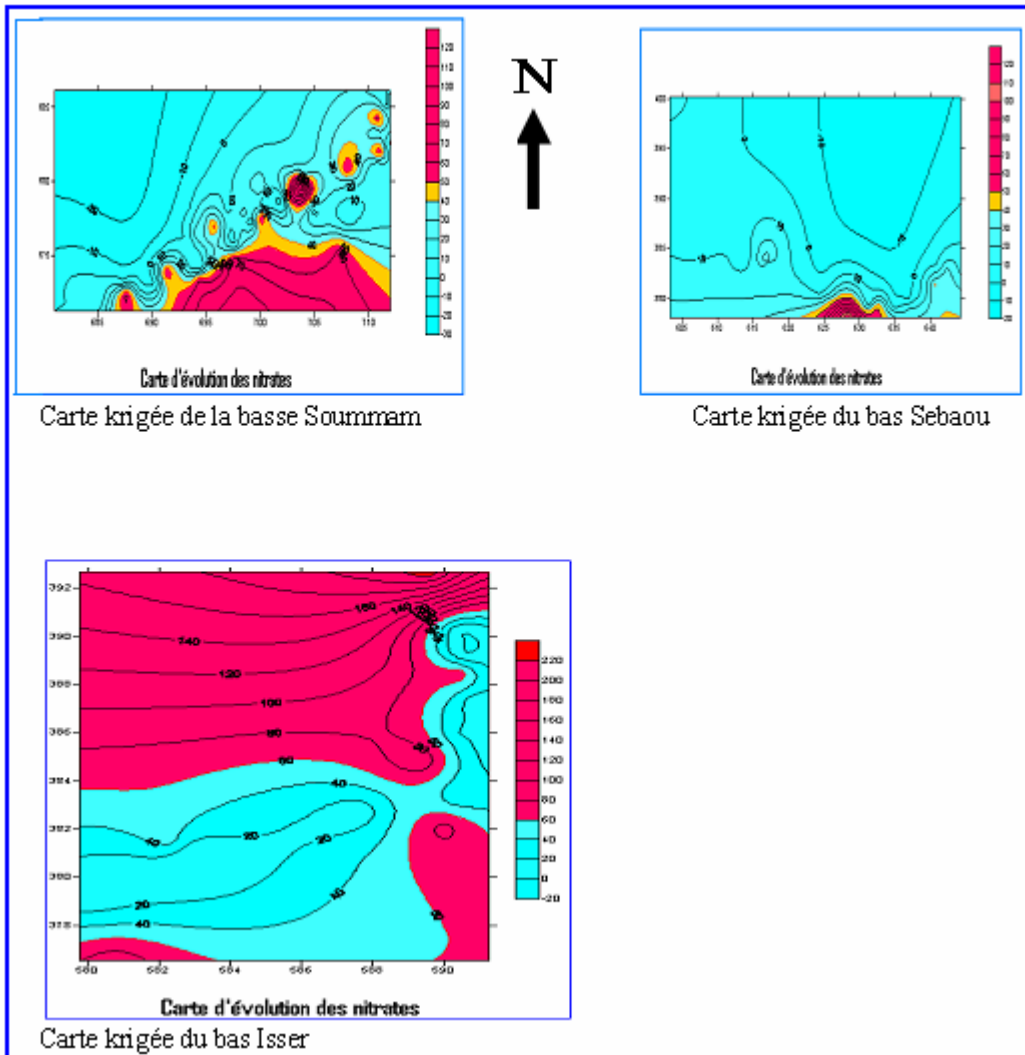
Fig.IV.4.2.3.Carte krigée des nitrates

Tableau IV.4.2.3. Caractéristique des différents variogrammes.

Régions	Nombre de classe	Pas de calcul	Direction d'isotropie	Direction D'anisotropie	Modèle	Effet de pépite (mg/l) ²	Palier (mg/l) ²	Portée (Km)	Rapport d'anisotropie	IGF
Soummam	4	1,04	45°	135°	Sphérique	691,2	50,4	0,301	1,4	2,21.10 ⁻²
Sebaou	4	2,9	45°	135°	Gaussien	422,1	296,07	1,39	2,08	1,32.10 ⁻¹
Isser	4	1,04	45°	135°	Exponentiel	532	2547,81	4,2	9,2	7,84.10 ⁻²



FigIV.4.2.4. Variogrammes de surface des nitrates des trois régions



FigIV.4.2.5. Cartes d'évolution des nitrates dans les trois régions

VIII.4.3.4. Conclusion

D'après les analyses statistiques, la basse vallée de l'Isser présente un réel danger de potabilité d'eaux souterraines. Avec un maximum de 235 mg/l, une étendue de 235 mg/l, une moyenne de 43 mg/l et une médiane de 20 mg/l ces valeurs correspondent presque au double des deux autres régions. D'après cette même analyse les nitrates n'ont presque pas de corrélation avec les autres éléments présents dans la nappe au niveau de ces trois régions. Nous pouvons confirmer dans ce cas que les nitrates sont des éléments exogènes dans les nappes de ces régions.

Il a été déterminé une continuité maximale à la direction 45° au niveau des trois régions. Cette direction 45° correspond à la direction d'isotropie qui correspond approximativement à la direction d'écoulement souterraine. La cartographie par krigeage confirme encore de

plus le cas du bas Isser qui connaît une grande extension des teneurs en nitrates dépassent les normes de potabilité.

Chapitre V : Essai d'optimisation du réseau de surveillance

V.1. Introduction

La variance de krigeage étant indépendante des valeurs mesurées, mais fonction seulement de leur position, on peut donc ajouter des points fictifs et procéder à une nouvelle estimation assortie d'une nouvelle variance. C'est cette démarche, appelé "méthode du point fictif", que nous avons adoptée. Nous pouvons aussi supprimer des points de mesures, là où il y a particulièrement des redondances et voir comment la variance d'estimation va évoluer.

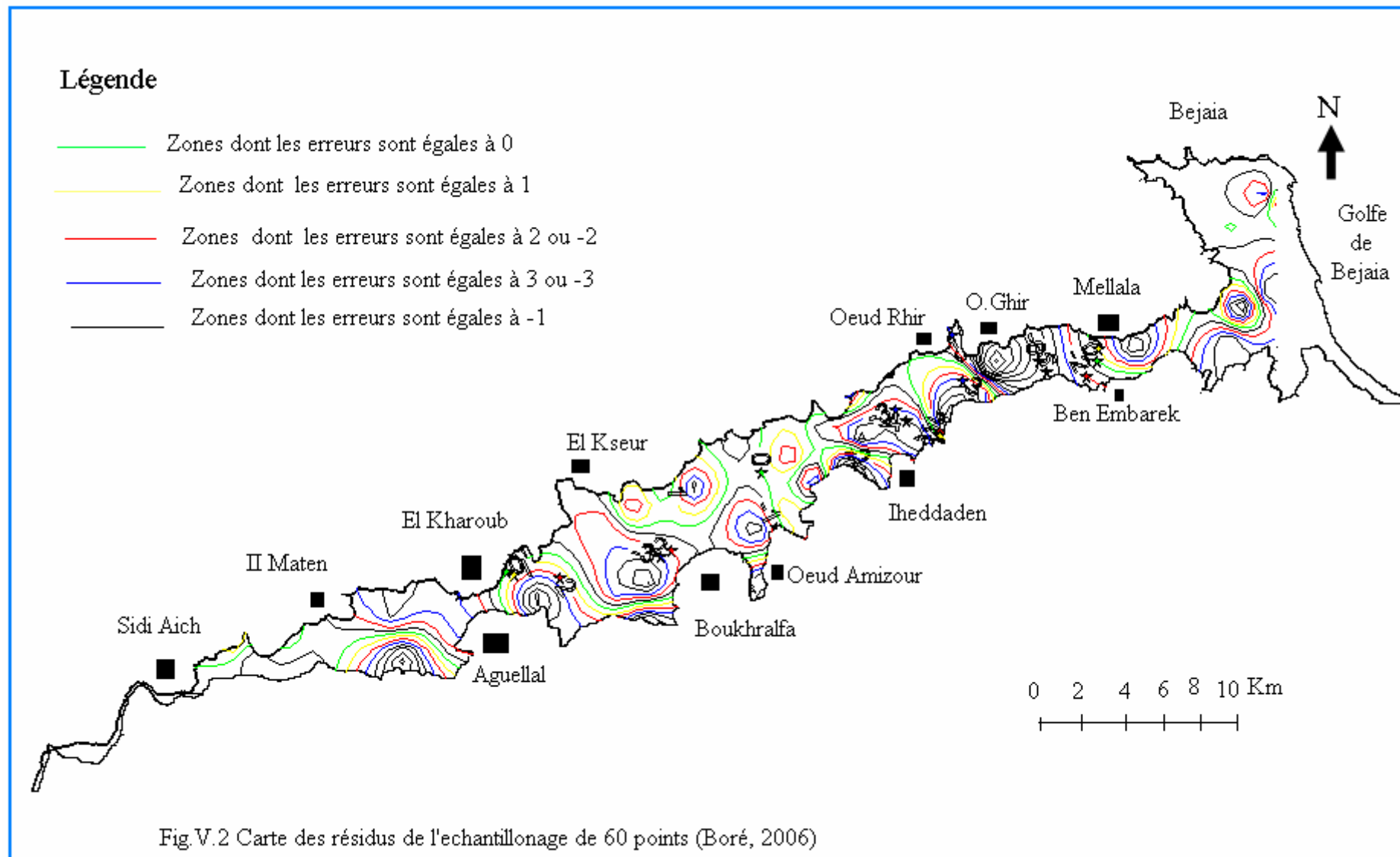
Mais l'efficacité de la méthode dépend bien sûr de la structure et de la configuration géométrique des données:

* si le phénomène est régulier, un minimum de points de mesures bien localisés donnera très rapidement une estimation des plus optimales; il suffit, en effet, de combler les lacunes et d'éliminer les redondances.

** En revanche, si le phénomène s'avère irrégulier, (comme c'est le cas ici des nitrates et des résidus dont la discontinuité et l'irrégularité ont été mises en évidence par les variogrammes présentés en figure V.2. et III.2.2, il faudrait davantage de points de mesures, là où la variance de krigeage est élevée.

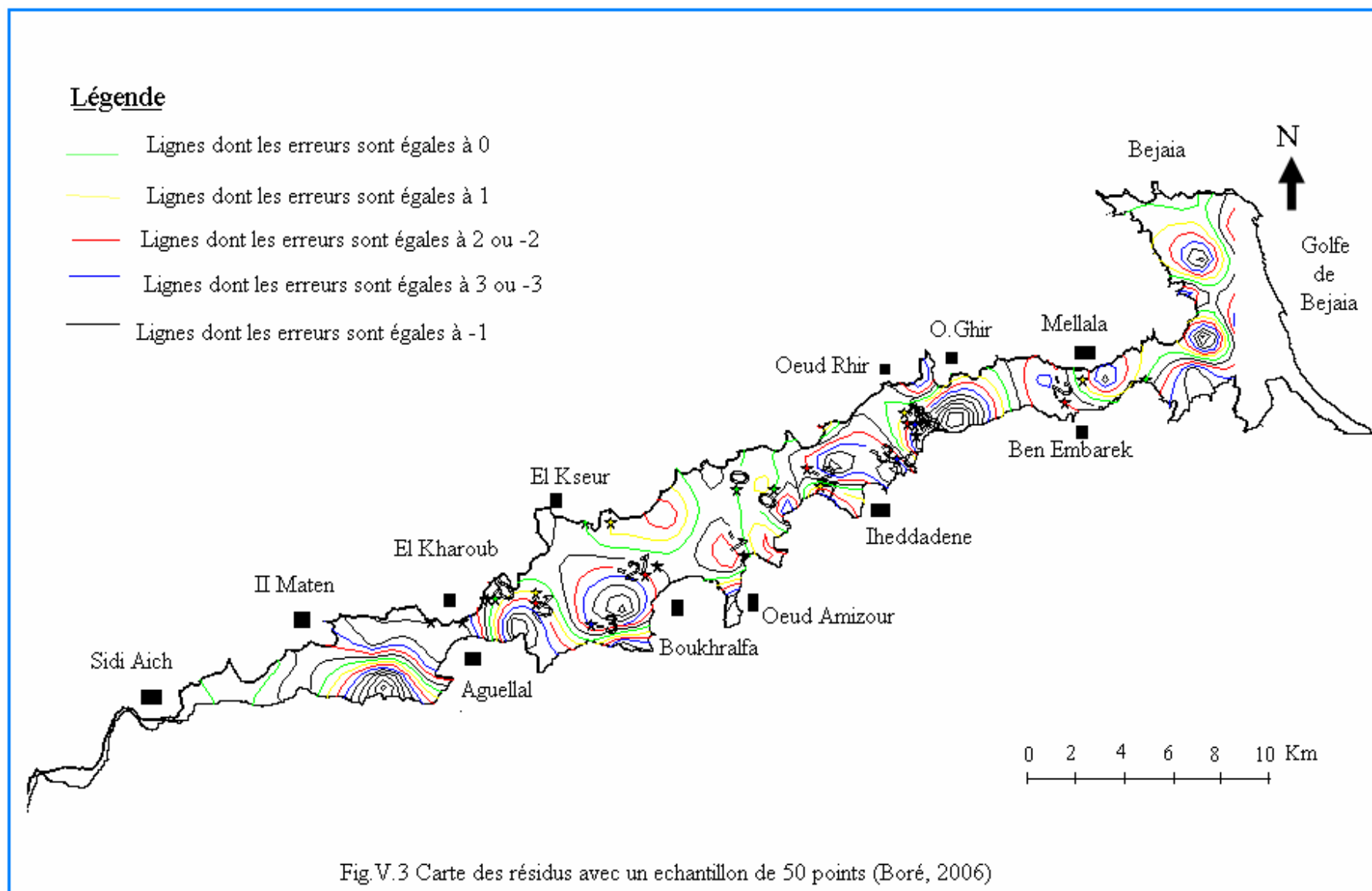
V.2. carte des résidus

Les résidus des données initiales portant sur 60 échantillon nous ont permis d'établir une carte de nitrate entre les valeurs mesurées et estimées (par krigeage) pour la comparer à celle des données brutes afin de localiser la répartition spatiale des erreurs. D'après la figure V.2, nous remarquons une ressemblance dans l'allure des courbes. Nous trouvons une erreur de 3% au niveau d'Aguellal, 7% au niveau de Boukhralfa, 9% vers Oued Amizour et 4% au niveau de Mellala.



V.3. Conduite des simulations (Cas de la basse vallée de la Soummam)

Nous éliminons 10 points d'eau qui sont apparemment redondants. La nouvelle carte des résidus krigé reste similaire à la carte initiale, avec presque les mêmes nombres de courbes isovaleurs et un petit élargissement de celles-ci au centre (Fig.V.3). Cela nous laisse à supposé qu'au lieu de travailler avec les 60 points de départ nous pouvons les remplacer par 50 points et nous gagnerons en temps pour les mesure et en argent car les analyses sont coûteuses.



V.4. Conclusion

A la suite des conduites de simulations entreprise au niveau des points d'eau de la basse vallée de la Soummam, afin d'estimer le réseau optimal de surveillance des eaux souterraines de teneurs en nitrates, nous avons obtenu en termes un échantillonnage de 50 points assez bien reparti sur l'ensemble de la zone d'étude. Les résidus obtenus sont de l'ordre de 3% à 7%. Ce qui largement admis dans les mesures des variables environnementales. Ces résultats constituent un gain de temps et d'argent aux gestionnaires de la ressource en eau.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail de ce mémoire a pour but principal de contribuer à une meilleure compréhension et une meilleure connaissance de la pollution des eaux par les nitrates. Il s'appuie sur les données collectées à l'agence nationale des ressources hydrique d'Alger.

Dans la vallée de la basse Soummam, nous pouvons retenir que: Les études statistiques viennent de nous montre que les nitrates ne sont pas corrélés avec les autres éléments chimiques présents dans la nappe, mais une faible corrélation avec les bicarbonates. Nous pouvons dire que les nitrates sont des éléments exogènes à la nappe. Cette même étude nous montre que, la basse vallée de l'Isser présente un réel danger de potabilité d'eaux souterraines. Avec un maximum de 235 mg/l, une étendue de 235 mg/l, une moyenne de 43 mg/l et une médiane de 20 mg/l ces valeurs correspondent presque au double des deux autres régions. L'analyse nous montre que les nitrates n'ont presque pas de corrélation avec les autres éléments présents dans la nappe au niveau de ces trois régions. Nous pouvons confirmés dans ce cas que les nitrates sont des éléments exogènes dans les nappes de ces régions.

L'analyse variographique montre que la variabilité spatiale des nitrates est faible suivant la direction 45° . La carte krigée nous montre le long de l'axe de la vallée de la basse Soummam des anomalies. La plus importantes est celle localisée au niveau de l'agglomération de l'oued Ghir. Cette zone présente des teneurs en nitrates qui dépasse largement les normes de l'organisation mondiale de la santé, ces eaux souterraines constituent un réel risque quant leur utilisation dans le domaine de l'alimentation en eaux potable. Nous attribuons à ces teneurs anormales, une origine agricole d'une part et d'éventuels rejet d'eaux usées d'autre part. Il a été déterminé une continuité maximale à la direction 45° au niveau des trois régions. Cette direction 45° correspond à la direction d'isotropie qui correspond approximativement à la direction d'écoulement souterraine. La cartographie par krigeage confirme encore de plus le cas du bas Isser qui connaît une grande extension des teneurs en nitrates dépassent les normes de potabilité.

A la suite des conduites de simulations entreprise au niveau des points d'eau de la basse de la Soummam, afin d'estimer le réseau optimal de surveillance des eaux souterraines de teneurs en nitrates, nous avons obtenue en termes un échantillonnage de 50 points assez bien reparti sur l'ensemble de la zone d'étude. Les résidus obtenus sont de l'ordre de 3% à 7%. Ce qui largement admis dans les mesures des variables environnementales. Ces résultats constituent un gain de temps et d'argent aux gestionnaires de la ressource en eau.

Conclusion générale

En guise de recommandation, il y a lieu de déterminer les différentes sources de pollution afin de protéger par des périmètres de protection la ressource en eau

Bibliographie

1. Amghra M, 1991 : Synthèse hydrogéologie de la plaine de la basse vallée de la Soummam.
Thèse d'ing, USTHB.
2. ANRH : Archives des données pluviométrique, données chimiques de l'agence nationale des ressources hydrique.
Bir Mourad Rais, Alger.
3. Azzemou A, 2005 : Comportement hydrochimique de quelques aquifères côtiers : Isser, Soummam et Sebaou.
Thèse d'ing, ENP
4. Bensaid, 2000 : Cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale de la basse vallée de la Soummam.
Thèse d'ing, USTHB.
5. Blondeau R: Fixation biologique de l'azote atmosphérique.
Edition vuibert 1979, p 101.
6. Clincks C, 1973 : Etude hydrogéologique de la nappe alluviale de la basse Soummam
Rapport de l'A.N.R.H, Alger.
7. Lefevre J: introduction aux analyses statistiques multivariables.
Edition Eyroles 3^{ème} édition, 1983.
8. L'ENP (LRS-Eau) et L'INRIA ,2004: Workshop sur l'apport des technologies de l'information et du calcul intensif distribué dans la gestion et la modelisation des ressources en eau.
www.enp.edu.dz
9. Maison P, 2000 : Un modèle hydrologique de suivi de la pollution diffuse en bassin versant.
Thèse doctorat, I.N.P de Toulouse.
10. Pannatier, Y variowin: Software for spatial data analysis in 2D.
Springer- verlag, New York, 1996.

الملخص : تقع على حافة البحر و بالخصوص في منطقة باسباو وبا اسر باس صومام التي تتمتع بكميات معتبرة من المياه من الناحية الكيميائية المياه الجوفية قليلة المعادن ولكن في بعض الحالات يمكن ان نجد كميات هائلة من المعادن الناتجة عن الطبيعة الجيولوجية نفاذ مياه البحر ومن جهة من التلوث تحليل المعطيات الهيدروكيميائية بالمركبات الرئيسية بينت وجود ثلاثة محاور عاملية على حساب هذه المحاور الخرائط أنشئت .
الكلمات المفتاحية: المناطق الساحلية الهيدروكيميائية , المركبات الرئيسية , انشاء الخرائط.

Résumé

La pollution par les nitrates représente un problème majeur de contamination des eaux en particulier souterraines largement exploitées pour satisfaire les besoins en eaux potable. L'étude a porté sur la répartition spatiale par approche géostatistique des concentrations en nitrates au niveau de 3 vallées côtières (basse Soummam, bas sebaou et le bas Isser). Les résultats ont montré que les nitrates sont présents au niveau des 3 zones d'étude. D'origine essentiellement agricole, les nitrates prédominent au niveaux de la vallée de l'Isser et moindre au niveau de 2 autres aquifères côtiers.

Mots clés : Nitrates, eau souterraines, aquifères côtiers, krigeage

Abstract

Pollution by nitrates represents a major problem of contamination of water particularly underground water largely exploited to satisfy the requirements out of drinking waters. The study related to the space distribution by geostatistic approach of the nitrate concentrations on the level of the 3 coastal valleys (low Soummam, low Sebaou and low Isser) The results showed that the nitrates are present at the level of the 3 zones of study. Primarily of agricultural origin, the nitrates prevail on the levels of the valley of Isser and less on the level of the 2 other aquifers coastal.

Key words: Coastal nitrates, subsoil water, aquifers, kriging