



**2iE**  
Fondation 2iE

**Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement**  
**International Institute for Water and Environmental Engineering**

**ELABORATION D'UN OUTIL CARTOGRAPHIQUE D'AIDE A LA DECISION  
POUR LA MOBILISATION DES EAUX SOUTERRAINES DE LA REGION  
DU SUD-OUEST DU BURKINA-FASO**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER SPECIALISE EN  
GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU  
(GIRE)**

---

**Présenté et soutenu publiquement le**

**Par  
Joël SIMO**

**Sous la direction de : Dr. Eric Seydou TRAORE**  
*Unité d'enseignement Math – Informatique  
Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de  
l'Environnement (2iE)*

**Jury d'évaluation du stage :**

**Président :**

**Membres et correcteurs :**

*Promotion 2009/2010*

## CITATION



*« L'eau peut être sans la compagnie des humains, mais nous comme humains pouvons seulement être sans eau pendant quelques jours. »*

*DEDICACE*

*Je dédie le présent travail à la*

*FAMILLE MATUEKAM*

## REMERCIEMENT

*Je tiens à remercier le SEIGNEUR pour tout ce qu'il fait pour moi.*

*Je tiens également à porter toute ma gratitude à :*

*Dr Eric Seydou TRAORE pour son encadrement, sa disponibilité et ses conseils ;*

*Les enseignants de la Fondation 2iE pour leur disponibilité ;*

*Toute la promotion 2009/2010 Mastère Spécialisé de la Fondation 2iE.*

## **SYNTHESE**

L'étude soumise à notre réflexion est une contribution à l'amélioration de la connaissance, de la gestion et de la protection des ressources en eaux souterraines de la région du Sud-ouest du Burkina Faso.

Le Burkina est un pays sahélien et par conséquent pauvre en précipitation, principale source d'alimentation des nappes. Les ressources en eaux souterraines de la région du Sud-ouest du pays souffrent d'une pression anthropique qui influe sur sa qualité et sa quantité. Ceci en raison du climat un peu favorable (environ 1000 mm/an). Il est donc indispensable de suivre de près cette ressource afin de la pérenniser. Ainsi, la présente étude essaie donc d'élaborer des outils qui serviront de support à la discussion, communication et de rationalisation entre les intervenants (les associations d'utilisateurs, les élus et l'administration) dans le processus de prise de décision.

Devant la masse de données caractéristique de forage mise à notre disposition une analyse exploratoire nous a permis de se familiariser avec ces dernières et de faire un choix sur les paramètres qui nous permettront d'atteindre nos objectifs. Au terme de cette analyse nous avons retenu les paramètres « niveau piézométrique, pH, débit, profondeur de forage, conductivité et transmissivité ». Nous avons par la suite adopté une approche géostatistique au centre duquel se trouve la variographie, avec le support des logiciels Variowin 2.2 et le module Geostatistical Analyst d'ArcGIS 9.3. L'analyse variographique ressort en condition omnidirectionnel que les variogrammes de la conductivité, pH et profondeur forage s'ajustent au modèle exponentiel, la piézométrie, le débit et la transmissivité respectivement aux modèle sphérique, puissance et gaussien. Les variogrammes directionnels quant à eux montrent qu'excepté le pH et la conductivité qui s'ajustent au modèle exponentiel le reste des paramètres simulent mieux le modèle gaussien. Le krigeage ordinaire nous a permis enfin de ressortir les cartes thématiques des différents paramètres retenus, après une validation croisée des modèles sous la base de paramètre statistique d'estimation d'erreur.

Ces outils développés au cours de cette étude contribuent favorablement à mieux appréhender et assurer la gestion des ressources en eau souterraine. Elles pourront encore être plus efficace si l'on ressortait des cartes de synthèse c'est-à-dire des cartes dérivant de la superposition de plusieurs paramètres et ceci fonction des objectifs visés.

Mots clé : Ressource, Gestion, Outil d'aide à la décision.

## **ABSTRAT**

The present study is a contribution to the improvement of knowledge, management and protection of groundwater resources of the South-western Burkina Faso.

Burkina Faso is a Sahelian country, and is characterised by low rainfall, the main source of recharge. The groundwater of the South-western of Burkina Faso suffer from human pressure which could affected their quality and quantity. Because of the climate (approximately 1000 mm/year). It is therefore essential to monitor this resource to ensure its perennity. Thus, this study therefore attempts to develop tools that will form the basis for discussion, communication and streamlining between the stakeholders (user groups, elected officials and administration) in the process of decision making.

In front of data of drilling at our disposal an exploratory analysis allowed us to become familiar with them and to choose the parameters that we will achieve our goals. After this analysis we selected the parameters "groundwater level, pH, flow drilling, drilling depth, conductivity and transmissivity. We have subsequently adopted a geostatistical approach with the support of software Variowin 2.2 and Geostatistical Analyst module of ArcGIS 9.3. variographic analyst have showed that omnidirectional variograms of the conductivity, pH and deep drilling best fit the exponential model, the groundwater level, flow drilling and transmissivity, respectively, spherical model, Gaussian and power. The directional variograms show that except the pH and conductivity that best fit to the exponential model the remaining parameters better simulate the Gaussian model. The ordinary kriging allowed us finally to obtain thematic maps of various parameters selected after a cross validation of models based on statistical parameter of error estimation.

The tools developed during this study contribute positively to better understand and manage the groundwater resources. They may still be more effective if it derive from the superposition of several parameters.

Keywords: Resource, Management, Tool Decision Support

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

UNESCO : United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation.

ICWE : International Conference on Water and Environment.

PHI : Programme Hydrologique International.

OSS : Observatoire du Sahara et du Sahel.

ONEA : Office National de l'Eau et de l'Assainissement.

ONBAH : Office National des Barrages et Aménagements Hydroagricole.

CLE : Comité Locaux de l'Eau.

CGBK : Comité Gestion du Bassin du Kou.

CILSS : Comité Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse au Sahel.

CIEH : Comité Inter-Africain d'Etude Hydrologique.

ABN : Autorité du Bassin du Niger.

CBLT : Comité du Bassin du Lac Tchad.

OMVS : Organisation de Mise en Valeur de la Vallée du fleuve Sénégal.

RESO : Ressource en Eau de la région du Sud-Ouest.

EDR : Eau et Développement Rural.

UE : Union Européen.

GIRE : Gestion Intégrée des Ressources en Eau.

## SOMMAIRE

CITATION.....	ii
DEDICACE.....	iii
REMERCIEMENT.....	iv
SYNTHESE .....	v
ABSTRAT.....	vi
LISTE DES ABREVIATIONS .....	vii
SOMMAIRE .....	viii
LISTE DES CARTES .....	x
LISTE DES TABLEAUX .....	xi
LISTE DES FIGURES.....	xii
INTRODUCTION.....	1
CONTEXTE.....	1
PROBLEMATIQUE .....	1
OBJECTIFS .....	2
STRUCTURE DU MEMOIRE .....	3
I. : CONTEXTE DE GESTION ET D'EXPLOITATION DES RESSOURCES EN EAU AU BURKINA.....	4
I.1. : Les Organismes internationaux.....	4
I.2. : Les autorités politiques et administratives.....	4
I.2. : Les institutions de recherche.....	5
I.3. : Méthodes d'approche.....	6
II. : MATERIELS ET METHODE .....	10
II.1. : Données de synthèse sur le site de l'étude.....	10
II.1.1. : Situation géographique .....	10
II.1.2. : Le climat .....	10
II.1.4. : Les Sols.....	11
II.1.5. : Géologie.....	13
II.1.6. : Végétation.....	14
II.1.7. : Caractéristique des aquifères .....	14
II.2. : METHODOLOGIE .....	15
II.2.1. : Revue bibliographique.....	15
II.2.2. : Données .....	15
II.2.3. : Traitement des données .....	15
II.2.4. : Interpolation par krigeage.....	15

III. : Analyse exploratoire des données .....	16
III.1. : Paramètres caractéristiques des forages .....	16
III.1.1. : Piézométrie.....	17
III.1.2 : Conductivité .....	18
III.1.3. pH.....	20
III.1.4 : Débit spécifique.....	22
III.5 : Profondeur forage.....	23
III.1.6 : Transmissivité .....	25
IV. : Analyse variographique .....	28
IV.1. : Rappel théorique : Géostatistique, variable aléatoire, variable régionalisée, fonction .....	28
IV.2. : Variogramme « $\gamma(\cdot)$ » .....	29
IV.3. : Application.....	31
IV.3.1. : Nuage et surface variographique.....	31
IV.3.2. : Variogramme expérimental.....	32
IV.3.2.1 : Variogramme omnidirectionnel .....	33
IV.3.2.2 : Variogramme directionnel .....	34
IV.4 : Validation croisée .....	38
IV.5 : Estimation par krigeage.....	39
V.1. : Place des outils d'aide à la décision dans la gestion des ressources en eau .....	41
V.2. : Contribution des cartes thématiques à la gestion intégrée des eaux souterraines.....	41
V.3. : Mise en place des plans d'aménagement.....	43
CONCLUSION .....	44
RECOMMANDATION .....	45
BIBLIOGRAPHIE .....	46
ANNEXES .....	50

## **LISTE DES CARTES**

CARTE II. 1 LOCALISATION SITE DE L'ETUDE .....	10
CARTE II. 2 : COURS D'EAU DE LA REGION DU SUD-OUEST .....	11
CARTE II. 3 : PEDOLOGIE DE LA REGION DU SUD-OUEST .....	12
CARTE II. 4 : GEOLOGIE DE LA REGION DU SUD-OUEST .....	14
CARTE III. 1 : LOCALISATION DES FORAGES .....	16
CARTE III. 2 : LOCALISATION DES FORAGES A PIEZOMETRIE DETERMINE .....	17
CARTE III. 3 : FORAGE A CONDUCTIVITE DETERMINEE .....	19
CARTE III. 4 : FORAGE A PH DETERMINE .....	20
CARTE III. 5 : FORAGE A DEBIT MESURE .....	22
CARTE III. 6 : FORAGE A PROFONDEUR DETERMINEE .....	24
CARTE III. 7 : FORAGE A TRANSMISSIVITE DETERMINEE .....	25

## **LISTE DES TABLEAUX**

TABLEAU III. 1 : PARAMETRE ET NOMBRE DE FORAGE .....	16
TABLEAU III. 2 : SYNTHESE STATISTIQUE .....	27
TABLEAU IV. 1 : SYNTHESE VARIOGRAMME EXPERIMENTAL OMNIDIRECTIONNEL .....	34
TABLEAU IV. 2 : SYNTHESE VARIOGRAMME DIRECTIONNEL .....	38
TABLEAU IV. 3 : RECAPITULATIF DES STATISTIQUES SUR L'ERREUR D'ESTIMATION .....	39

## LISTE DES FIGURES

Figure III.1 : Piézométrie & Fréquence	17
Figure III. 2 : Boîte à moustache piézométrie	17
Figure III.3:Droite d'Henry piézométrie	18
Figure III.4 : Droite d'Henry ln(Piéométrie)	18
Figure III.5 : Conductivité & Fréquence	19
Figure III.6 : Boîte à Moustache conductivité.	19
Figure III.7 : Droite d'Henry Conductivité	19
Figure III.8 : Droite d'Henry ln(Conductivité)	19
Figure III.9 : pH & Fréquence	20
Figure III.10 : Boîte à moustache pH	20
Figure III.11 : Droite d'Henry pH	21
Figure III.12:Débit spécifique & Fréquence	22
Figure III.13 :Boîte à moustache Débit spécifique	22
Figure III.14 :Droite Henry Débit spécifique	22
Figure III.15:Droite Henry ln (Débit spécifique)	22
Figure III.16 : Fréquence & Profondeur forage	23
Figure III.17 : Boîte à moustache Profondeur forage	23
Figure III.18:Droite henry Profondeur Forage	24
Figure III.19:Droite Henry ln(Profondeur forage)	24
Figure III.20 : Fréquence & Transmissivité	25
Figure III.21 : Boîte à moustache Transmissivité	25
Figure III.22 : Droite d'Henry Transmissivité	25
Figure IV.1 : Variogramme	29
Figure IV.2. : Paramètres requis pour calculer un variogramme et surface variographique	31
Figure IV.3 : Variogramme expérimental omnidirectionnel	32
Figure IV.5 : Variogramme directionnel et direction d'anisotropie de la piézométrie	34
Figure IV.5 : Variogramme directionnel et direction d'anisotropie de la piézométrie	34
Figure IV.8 : Variogramme directionnel et direction anisotropie de la transmissivité	36

## **INTRODUCTION**

### **CONTEXTE**

L'eau est l'une des ressources naturelles les plus importantes et un élément clé pour le développement durable de l'Afrique. La communauté internationale aussi bien dans les Objectifs du Millénaire que dans les conclusions du sommet mondial sur le développement durable a souligné que la crise de l'eau constitue une menace au développement économique, à la réduction de la pauvreté et à l'environnement, et par conséquent, à la paix.

Les acteurs de la gestion et de l'aménagement des eaux n'ont souvent qu'une vue sectorielle et locale de par la nature de leurs intérêts et la localisation de leur activités. Ils saisissent difficilement les liens qui peuvent exister entre leurs usages et d'autres usages ou avec les milieux aquatiques.

Prévenir ces fléaux serait d'assurer une gestion durable de nos réserves en eau. En effet, la gestion des ressources en eau doit s'entendre comme un ensemble de mesures destinées à exploiter et maîtriser les apports naturels dans une optique qui soit utile à la société. Mitchell (1990) distingue trois niveaux dans la gestion intégrée des ressources en eau :

\*Prise en compte des différentes dimensions de l'eau (eau de surface/eau souterraine, qualité/quantité), chaque dimension constituant une composante à l'intérieur d'un système et pouvant interagir avec le reste du système ; la gestion d'une composante doit intégrer les relations avec les autres composantes.

\*Le système eau interagit avec d'autres systèmes : Par exemple, l'agriculture entraîne une modification de la quantité et de la qualité des eaux (prélèvement pour l'irrigation, lessivage de produits phytosanitaires), ce qui modifie l'équilibre de la ressource en eau.

\*Prise en compte du développement économique et social dans la gestion des eaux : L'eau peut avoir aussi bien un rôle de ressource économique, que de frein aux activités.

La gestion intégrée des ressources en eau s'avère donc être une priorité pour toutes les nations afin d'assurer la pérennité de cette ressource et donc un développement durable.

### **PROBLEMATIQUE**

Le Burkina est un pays sahélien et continental au cœur de l'Afrique Occidentale et est caractérisé par la rareté et la forte variabilité spatiale des précipitations. En dépit de son caractère sahélien sa zone du sud-ouest recèle cependant d'importantes ressources en terre et en eau.

Cette zone est sujette d'une intense activité de mobilisation et d'utilisation des eaux, conséquence de l'accroissement accru de migrants venant des autres coins du pays, la

présence de la deuxième ville urbaine. Il s'en suit ainsi le développement de divers projets et activités dans les aménagements qui aboutissent à une surexploitation des ressources disponibles en terre et en eau. Entre autre nous pouvons élucider le périmètre sucrier de la SOSUCO (3800 ha), les périmètres rizicoles de la Vallée du Kou (1000 ha) et de Karfiguela (350 ha), 1300 ha de bas-fonds améliorés avec l'opération riz Comoé et la plaine de Douna (400 ha), l'alimentation en eau potable de la ville de Bobo-Dioulasso par l'ONEA...

Des indices de dégradation sont de plus en plus perceptibles sans que l'on puisse caractériser leur ampleur spatiale ni leur impact réel sur les ressources en eau, condition essentielle pour évaluer l'évolution de ces dernières (Zougouri, 2007 ; Kam, 2007).

En plus de cette surexploitation le Sud-ouest du Burkina souffre également de la faible croissance des ressources. Il est fort évident d'apprécier cet état en se basant sur les travaux de Wellens et al. (2009) qui stipule que la quasi-totalité des pluies sont reprises par évapotranspiration et la faiblesse de l'infiltration influe sur l'alimentation des nappes très sollicitées. Cependant Traoré et al., (1997) avait déjà constaté une baisse du niveau piézométrique et du débit des sources.

Le recours aux eaux souterraines pour la satisfaction des besoins a atteint un taux de 85%, pour seulement 15% assurées par les eaux de surface. Les eaux souterraines sont assez importantes et logées dans les roches sédimentaires avec des propriétés hydrogéologiques très favorables non seulement au stockage d'eau mais aussi à la mobilisation de ses réserves. Gardin et al., (2009) démontre que la transmissivité dans le bassin du Kou varie entre  $2,0 \times 10^{-6}$  et  $6,0 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s et le coefficient d'emmagasinement entre 1,5 et  $5,5 \times 10^{-4}$ .

Il s'avère donc indispensable de placer l'exploitation et l'utilisation des ressources en eaux souterraines au Sud-ouest du Burkina dans un contexte de gestion intégrée. À cet effet, mettre sur pied des plates-formes d'information sur les ressources en eau serait indispensable tant à l'échelle nationale que régionale. L'absence de ces informations rend difficile pour les organismes chargés de la planification et de la gestion des ressources en eau, l'évaluation des potentialités réelles d'amélioration de l'utilisation de l'eau.

## **OBJECTIFS**

Dans le cadre de ce travail, il sera question de contribuer à l'amélioration de la connaissance, de la gestion et de la protection des ressources en eaux souterraines à l'échelle régionale.

Il s'agira de :

- Proposer des modèles de plans d'information (Conductivité, transmissivité, piézométrie, qualité des eaux, débit spécifique, profondeur des forages) ;

- Etudier la variabilité spatiale de certaines caractéristiques de la nappe (Conductivité, transmissivité, piézométrie, ...);
- Analyser les informations nécessaires pour la sélection de sites adéquats d'implantation de nouveaux forages ;
- Compléter la base de données nationale sur les eaux souterraines.

## **STRUCTURE DU MEMOIRE**

Le présent mémoire est une approche à la contribution à la gestion des ressources en eau. Il s'articule sur quatre points dont une introduction générale qui essaie de nous statuer sur la problématique, le chapitre premier qui ressort quelques politiques de gestion de l'eau au Burkina. Le second chapitre est intitulé matériel et méthode. Il synthétise la zone d'étude et ressort la méthodologie que nous avons adopté afin d'arriver à nos fins. Il est suivi par le chapitre trois qui ressort les résultats et les chapitres quatre et cinq se consacrent respectivement à l'interpolation et à la discussion. Le mémoire se termine par une conclusion générale et des recommandations.

## **I. : CONTEXTE DE GESTION ET D'EXPLOITATION DES RESSOURCES EN EAU AU BURKINA**

Le Burkina Faso, pays enclavé au centre de l'Afrique de l'Ouest, est situé en zone aride et semi-aride et constitué d'une population à 80% rurale. Le climat est de type soudano-sahélien et est caractérisé par des variations pluviométriques spatiales et interannuelles considérables, allant de 350 mm au Nord (climat sahélien) à 1100 mm au Sud- Ouest (climat-soudanien). Le Burkina se caractérise également par une baisse marquée de la pluviométrie jusqu'environ 20% (Hubert et *al.*, 1989 ; Servat et *al.*, 1997a) depuis près de 25 ans, de l'hydraulicité conduisant parfois à des diminutions des écoulements de plus de 50% (Servat et *al.*, 1997b). Le réseau hydrographique est reparti en quatre bassins versants nationaux (Comoé, Mouhoun, Nakambé et Niger) et comprend deux cours d'eau majeurs permanents : la Comoé et le Mouhoun. Le Burkina fait partie des pays dont la pénurie en eau est une problématique du quotidien. La rareté de cette ressource est un véritable frein à son développement et demande à être gérée de manière à prendre en compte toutes les composantes qui peuvent influencer qualitativement ou quantitativement cette dernière.

### **I.1. : Les Organismes internationaux**

Plusieurs organismes internationaux ont attiré l'attention de l'humanité sur la question sensible des réserves en eau douce et de la manière d'en optimiser l'utilisation à l'avenir. C'est le cas de la conférence internationale de l'eau et de l'environnement (ICWE, Dublin, Janvier 1992). L'UNESCO, dans le cadre du Programme Hydrologique International (PHI) propose de développer les bases scientifiques et technologiques pour une gestion rationnelle des ressources en eau, tant au niveau de la quantité que de la qualité, tout en tenant compte de la protection de l'environnement. L'OSS, depuis 1992, marque un intérêt particulier au développement de plate-forme de concentration entre les pays partageant les ressources en eau non renouvelables.

### **I.2. : Les autorités politiques et administratives**

Le gouvernement burkinabé, conscient de l'état limité de sa ressource s'est organisé sur le plan institutionnel et administratif de manière à assurer une meilleure gestion de cette dernière. Depuis 1984, le Burkina dispose d'un département en charge des questions relatives aux besoins en eau. L'organisation administrative de la gestion de l'eau est assurée par la Direction Générale de l'Hydraulique avec le soutien des Directions Régionales et des services rattachés tels que l'ONEA (Office National de l'Eau et de l'Assainissement), l'ONBAH (Office National des Barrages et Aménagements Hydroagricoles). En septembre 1998, la politique nationale de l'eau est approuvée au Burkina Faso. Elle accorde une place de choix à

la décentralisation des responsabilités, à la gestion et à la protection des ressources en eau, à l'évaluation et la planification des ressources en eau, et au financement du secteur eau et assainissement.

Le secteur de l'eau au Burkina est également régi depuis le 8 février 2001 par la loi d'orientation relative à la gestion de l'eau n° 002-2001/an (Ministère de l'environnement de l'eau du Burkina Faso, 2001b). Celle-ci constitue une avancée majeure et contribue en effet à la mise en œuvre des nouvelles orientations de la politique nationale de l'eau. A cet effet, il en résulte la naissance des Comités Locaux de l'Eau (CLE) des différents bassins au Burkina dans les années 2008. C'est ainsi que le Comité Provisoire de Gestion du Bassin du Kou (CGBK) qui existait depuis les années 1987 a disparu laissant place au CLE.

Un souci de gestion des ressources en eau à une échelle extra-frontalière a guidé les autorités politiques de la région à créer des organismes Inter-Etats ou régionaux. Ce sont par exemple le CILSS (Comité Inter-Etats de Lutte Contre la Sécheresse au Sahel), l'ex. CIEH (Comité Inter-Africain d'Etudes Hydrauliques), le Centre AGRHYMET, l'ABN (Autorité du Bassin du Niger), la CBLT (Commission du Bassin du Lac Tchad), l'OMVS (Organisation de Mise en Valeur de la Vallée du fleuve Sénégal).

Plusieurs projets ont été initiés afin de contribuer à la gestion des ressources en eau, à la conservation des eaux et des sols. Entre autres, nous pouvons citer les projets RESO (Ressources en Eau des régions du Sud – ouest) et le projet EDR (Eau et Développement Rural) actuellement en exécution au Burkina Faso.

Cette organisation institutionnelle et administrative de la gestion de l'eau au Burkina est soutenue par de nombreuses études réalisées par les centres de recherche, des ONGs et des organismes internationaux.

## **I.2. : Les institutions de recherche**

La gestion intégrée des ressources en eau attribue une place importante à la science. En effet, pour prétendre faire une gestion rationnelle de l'eau, des connaissances relatives aux ressources ainsi qu'aux techniques de mobilisation doivent être développées et utilisées pour orienter les décisions relatives à la gestion de l'eau. Ainsi, de nombreux auteurs ont mené des investigations au Burkina sur des thématiques diversifiées.

Albergel dans ses travaux en 1987 ressort l'impact de la sécheresse sur les écoulements des petits bassins versants d'Afrique soudano – sahélienne. Dezetter & al., (1998) soutien sa thèse et démontre également la perturbation des régimes des cours d'eau accentuée par la réalisation de nombreuses retenues et l'augmentation constante de la demande. A cet effet, il propose le

modèle HYDRAM comme outil d'aide à la décision pour la planification et la gestion des ressources en eau. Cependant, Desconnets & *al.*, (1998) par le biais du modèle CEQUEAU-ONU ressort l'impact des aménagements sur les écoulements de la rivière Nakambé. Ici, il essaie d'évaluer et de prévoir l'évolution de la disponibilité de la ressource en eau de surface en fonction des aménagements existants. Au Sud-Ouest du Burkina, particulièrement dans le bassin versant du kou la réalisation du bilan d'eau de surface a nécessité l'utilisation du modèle hydrologique HYSIM (Manley, 2003). Les résultats supposent pour un apport d'eau annuel donné, à l'exutoire 57% proviennent de la pluie et 43% de la nappe. A travers le bassin 77% sont perdus par évapotranspiration, 13% participent au ruissellement et 10% s'infiltré (Wellens et *al.*, 2009). On voit ici l'importance de l'évapotranspiration dans le bilan et la faiblesse de l'infiltration.

Au Burkina, le recours aux eaux souterraines pour la satisfaction des besoins en eau a atteint un taux de 85%, pour seulement 15% assurés par les eaux de surface. Il est donc indispensable d'accorder une très grande importance à la préservation des ressources en eau souterraine. Deux grands types d'aquifère se distingue au Burkina : l'aquifère du socle cristallin et de la zone sédimentaire. Le premier occupe plus de 80% du territoire avec des potentialités d'exploitation très limitées comparé au second qui couvre moins de 20% du territoire. En 2003, Dakouré ressort dans ses travaux que les eaux souterraines de la zone sédimentaire du Burkina Faso sont à faciès bicarbonaté calcique prédominant. L'action anthropique serait la résultante des autres faciès. Des teneurs en Aldrine et d'Endosulfan supérieures aux normes de l'UE pour la boisson ont été rencontrées dans les eaux des villages Dankuy suite aux travaux de Savadogo & *al.* (2006). Cependant, Yéni Yaro (2007) développe un modèle de simulation sur l'infiltration des pesticides dans les nappes en zone cotonnière du Burkina. Dans le bassin versant du kou au Sud-Ouest du Burkina, les failles jouent un rôle considérable dans la réalimentation des eaux souterraines à partir des eaux de surface et assurent également l'acheminement de ces eaux vers les sources particulièrement les sources de Nasso et Guinguette qui alimente Kou (Sauret 2008). La carte de vulnérabilité des eaux souterraines établit par Bieupoudé (2008) par le biais du modèle physique APSU (Brouyère, 2001 ; Popescu et dachy, 2004) renseigne que les eaux souterraines sont les plus vulnérables dans le bassin du Kou le long de la rivière Kou, à forte activité agricole.

### **I.3. : Méthodes d'approche**

Les approches adoptées diffèrent d'un auteur à l'autre. Certains se sont contentés de faire des études d'inventaire, d'autres des modélisations ou simulations et enfin d'autres se sont basés

sur des approches statistiques. Nous nous intéresserons particulièrement aux méthodes d'interpolation spatiale.

L'interpolation spatiale est une procédure permettant de créer des surfaces, c'est-à-dire chaque point de l'espace possède une valeur déterminée. Ceci se fait en estimant la valeur des sites non échantillonnés, à partir de points mesurés. Le résultat de l'interpolation produit une surface se situant à l'intérieur des limites définies par la position des sites échantillonnés, contrairement à l'extrapolation qui permet de prédire une surface également à l'extérieur des points. Les méthodes d'interpolation sont de deux classes : les méthodes dites déterministe et celles dites stochastique. Contrairement aux méthodes déterministes, les méthodes stochastiques incorporent le concept de hasard. Elles proposent toutes un modèle probabiliste incluant un ou des termes d'erreurs aléatoires pour formaliser le comportement du phénomène naturel à l'étude.

On dénombre trois grandes classes de méthodes déterministes : les méthodes barycentriques, les méthodes d'interpolation par partitionnement de l'espace et les splines. Les méthodes de type barycentrique aussi appelées « moyennes mobiles » (Ripley, 1981) sont très intuitives. Elles prévoient la valeur d'une variable régionalisée en un point non échantillonné par une moyenne pondérée des valeurs régionalisées observées. Cependant, les méthodes d'interpolation par partitionnement de l'espace (Arnaud & *al.*, 2000; Ripley, 1981) forment en fait un sous-ensemble des méthodes barycentriques. Ces méthodes se distinguent par l'utilisation d'un partitionnement du champ d'étude (Okabe *et al.*, 1992) afin de déterminer les poids des observations et le voisinage du point de prévision. L'interpolation à l'aide de splines quant à elle ne s'effectue pas par point comme avec les méthodes barycentriques. Une spline est en fait une famille de fonctions régulières de courbure minimale. Il existe deux catégories de splines : les splines d'interpolation contraintes de passer par les points d'observation et les splines de lissage qui passent seulement à proximité de ces points. En outre, certaines splines permettent d'effectuer de l'interpolation spatiale multi variable, c'est-à-dire de prévoir la valeur d'une variable régionalisée en un site non échantillonné à partir des observations de cette variable, mais aussi à partir des observations d'autres variables régionalisées pertinentes. Les méthodes stochastiques sont constituées de : techniques de régression classique, de régression locale et de krigeage. La régression classique permet d'effectuer une interpolation en ajustant une surface aux valeurs régionalisées observées. Elle suppose que la variable régionalisée à l'étude est une fonction aléatoire. La « régression locale » à la différence de la régression classique les coefficients de la tendance sont maintenant estimés par une méthode locale d'estimation telle les moindres carrés pondérés ou la méthode du maximum de

vraisemblance pondérée. Les deux méthodes stochastiques présentées ci-haut ne prennent pas en considération la dépendance spatiale des données. Le krigeage est la première méthode d'interpolation spatiale à en avoir tenu compte. Le krigeage est défini comme une méthode d'estimation linéaire optimale et non-biaisée qui utilise les propriétés structurales du semi-variogramme. Le krigeage utilise les données deux fois tout d'abord pour générer le semi-variogramme (qui repose sur les propriétés d'auto-corrélation) et ensuite lors de l'interpolation en elle-même. Le krigeage possède aussi d'autres extensions multivariées, notamment le « cokrigeage » (Wackernagel, 2003). Les trois types classiques de krigeage sont:

- Le krigeage simple : variable stationnaire de moyenne connue ou constante ;
- Le krigeage ordinaire : variable stationnaire de moyenne inconnue et constante, sans tendance ;
- Le krigeage universel : variable non-stationnaire (qui contient une tendance). La tendance est une fonction déterministe, la moyenne n'est pas connue et n'est pas constante, elle est donc locale.

L'estimation des erreurs que produit le krigeage est plus fiable que celles produites par les autres méthodes stochastiques, car les postulats de base du krigeage modélisent mieux la réalité pour des données à référence spatiale.

Le modèle sur lequel se base le krigeage suppose la connaissance de la structure de dépendance spatiale de la fonction aléatoire. Cependant, en pratique, celle-ci est rarement connue. L'analyse variographique est une étape préalable au krigeage qui permet de l'estimer. Le variogramme décrit la continuité spatiale et la régularité d'un phénomène. Le semi-variogramme est utilisé pour analyser la dépendance des observations spatiales (Nolin et al., 1997). Il permet de déterminer si la distribution du paramètre étudié est régionalisée (possède une structure spatiale), aléatoire ou périodique. Cette analyse est en fait l'étude du comportement spatial de la variable régionalisée examinée.

Le semi-variogramme possède trois propriétés : la constante de pépité, le palier et la portée. La constante de pépité représente la valeur qui s'apparente à l'erreur d'échantillonnage, aux erreurs de mesure et à la variabilité présente à une distance inférieure à l'intervalle d'échantillonnage. La pépité affectera le krigeage dans la mesure où plus l'effet de pépité est important, moins il y a effet écran. Un effet de pépité important souligne la grande variabilité des valeurs mesurées en des points séparés par une courte distance. Le cas extrême est un effet de pépité pure. Ceci indique que le phénomène étudié ne suit pas une dépendance spatiale et ne peut ainsi pas être interpolé. Le palier est caractérisé par l'atteinte d'un plateau. Si les échantillons sont reliés les uns aux autres, le semi-variogramme prend une allure

linéaire dans sa phase initiale pour ensuite atteindre le palier où aucune relation n'existe entre la position et la valeur des échantillons (Nolin *et al.*, 1997). La portée est la valeur pour laquelle on atteint le palier. Celle-ci s'avère très utile pour fixer l'intervalle optimal d'échantillonnage (entre la pépité et le palier) puisque les échantillons prélevés à une distance inférieure à la portée sont spatialement dépendants, au-delà, l'influence spatiale d'un point sur ses voisins n'existe plus (Nolin *et al.* 1997). En outre, Arnaud et Emery (2000) affirment que le semi-variogramme expérimental n'est pas fiable pour de trop grandes distances, Ils conseillent donc de calculer le semi-variogramme expérimental seulement pour les distances inférieures à la moitié de la distance maximale entre deux points d'observation.

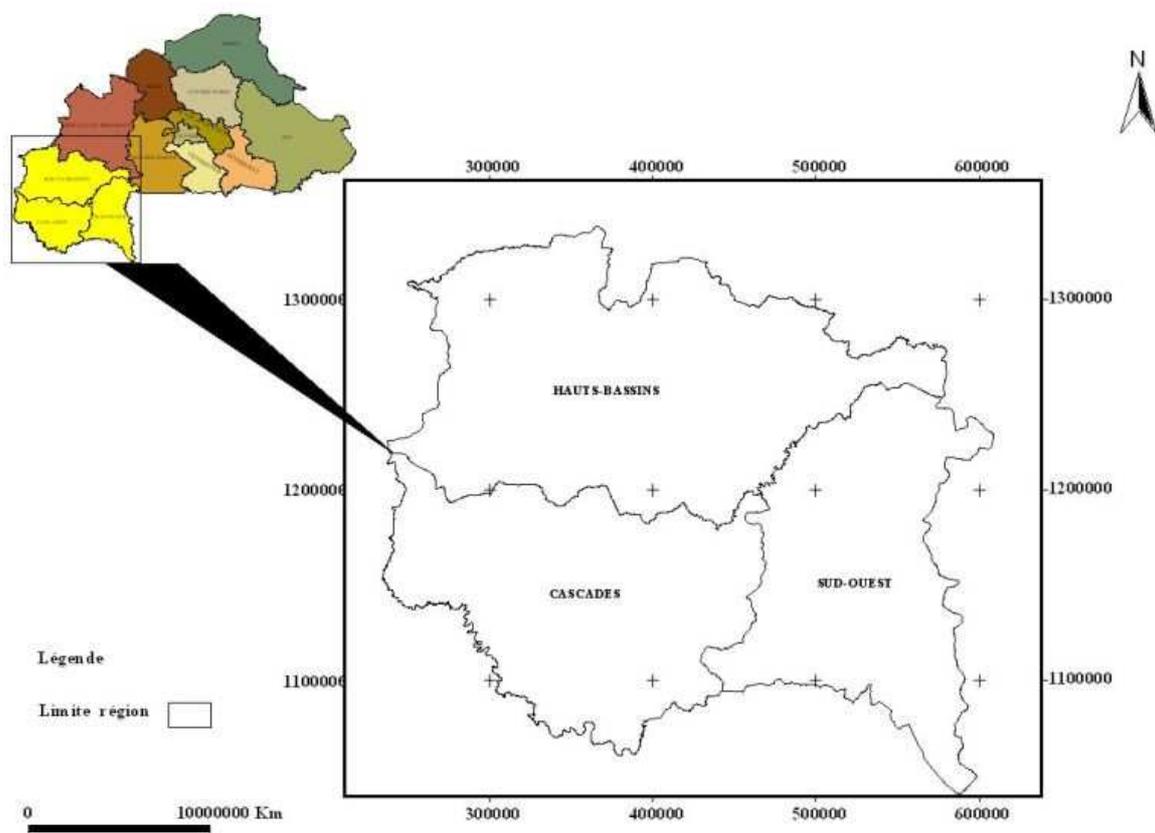
Le cokrigage est une modélisation stochastique qui permet d'exploiter, en plus des relations entre les variables régionalisées, le comportement spatial de chacune de ces variables. Le cokrigage est la seule méthode qui n'exige pas une connaissance exhaustive de ces variables auxiliaires. Cependant, le cokrigage a plus de chance de bien performer comparativement au krigeage s'il y a plus d'observations des variables régionalisées auxiliaires que de la variable régionalisée à interpoler et que ces observations ne sont pas toutes mesurées aux mêmes sites. Certaines faiblesses du krigeage ont mené au développement de méthodes bayésiennes (Gaudard *et al.*, 1999; Banerjee *et al.*, 2004). Ces faiblesses sont principalement liées à la présence de biais dans l'estimation du variogramme en krigeage universel (Cressie, 1993, p.165) et au fait que l'incertitude d'une prévision calculée en krigeage n'incorpore pas l'incertitude associée à l'estimation du variogramme. Le modèle bayésien typique en interpolation spatiale effectue un krigeage avec une fonction de covariance de paramètres inconnus. Un des grands avantages de l'approche bayésienne est la perspective conditionnelle qui permet un raisonnement probabiliste, après observation des données, sans recourir à l'idée d'une répétition de l'expérience, condition souvent difficile à concevoir en géostatistique. Certains utilisent aussi les réseaux de neurones artificiels pour interpoler des données (Bryan et Adams, 2002; Rigol *et al.*, 2001). Les réseaux de neurones agissent alors comme une méthode de régression non paramétrique.

## II. : MATERIEL ET METHODE

### II.1. : Données de synthèse sur le site de l'étude

#### II.1.1. : Situation géographique

La zone du Sud-Ouest du Burkina Faso représente les 1/5 de la superficie du pays, soit 60 000 km<sup>2</sup>. Elle est située entre les longitudes 3° W et 5°50'W et les latitudes 9°10'N et 12°10'N et rassemble les provinces de Bougouriba, Comoé, Houet, Kéné Dougou, Poni, Tuy, Léraba, Loba et Nounbiel. D'une densité de 35 habitants/km<sup>2</sup> elle est peuplée d'environ 2 millions d'habitants.



Carte II. 1 Localisation site de l'étude

#### II.1.2. : Le climat

Le climat est de type soudanien avec deux saisons bien contrastées. La saison sèche s'étend de novembre à mai et la saison pluvieuse de juin à octobre. La zone est comprise entre les isohyètes 900 mm et 1200 mm avec l'évapotranspiration moyenne annuelle d'environ 1750 mm. Les températures extrêmes sont environ 12° et 38°.

#### II.1.3. : Relief et hydrographie

La zone du sud-Ouest du Burkina est la partie du pays la plus accidentée et haute. On y trouve le point culminant du pays (le Ténakourou à 749 m). Le modelé est constitué des roches sédimentaires limitées par des falaises très escarpées pouvant atteindre 150 m de haut (la



Les sols hydromorphes : Ils sont surtout développés dans l'Ouest du pays et sont installés sur des alluvions fluviales ou sur des matériaux d'altération fins.

Les sols bruns eutrophes (Sols à mull) : La présence d'argile gonflante leur confère une forte capacité d'échange et un taux de saturation élevé. Ils sont répartis sur l'ensemble du territoire, par tâches de faible étendue.

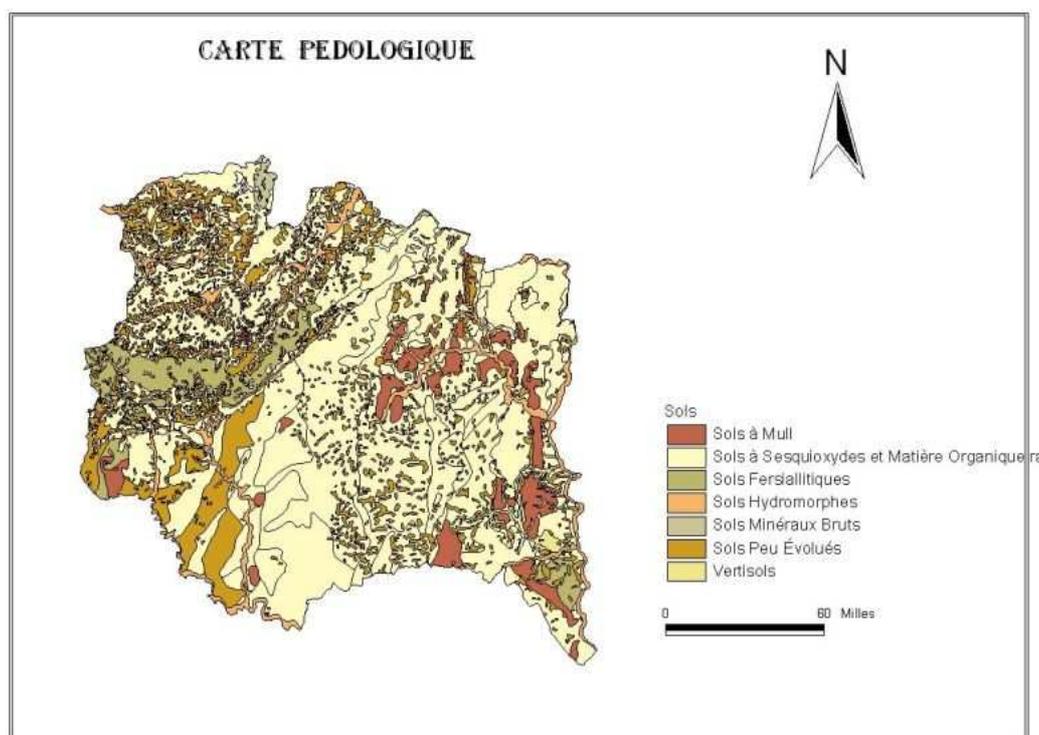
Les vertisols : Ils sont caractérisés par leur position topographique basse. Ce sont des sols beaucoup moins drainés et particulièrement développés dans le Sud-Est et le Centre-Ouest (Vallée du Sourou).

Les sols ferrallitiques : Ils sont localisés dans le Sud-Ouest du pays et occupent une faible surface. Ils constituent de bons supports pour les cultures et pour la végétation naturelle.

Les sols minéraux bruts : Ils sont pauvres et de faible profondeur installés sur la roche-mère ou sur des horizons cuirassés.

Les sols peu évolués d'érosion : Ils dérivent des granites et des migmatites. Sa compacité et son imperméabilité jouent un rôle néfaste pour l'alimentation hydrique et l'enracinement.

Les sols halomorphes ou salés : De texture variée, ces sols ont une structure franchement dégradée. Ce sont des sols pauvres qui supportent des steppes arbustives extrêmement lâches.



Carte II. 3 : Pédologie de la région du Sud-ouest

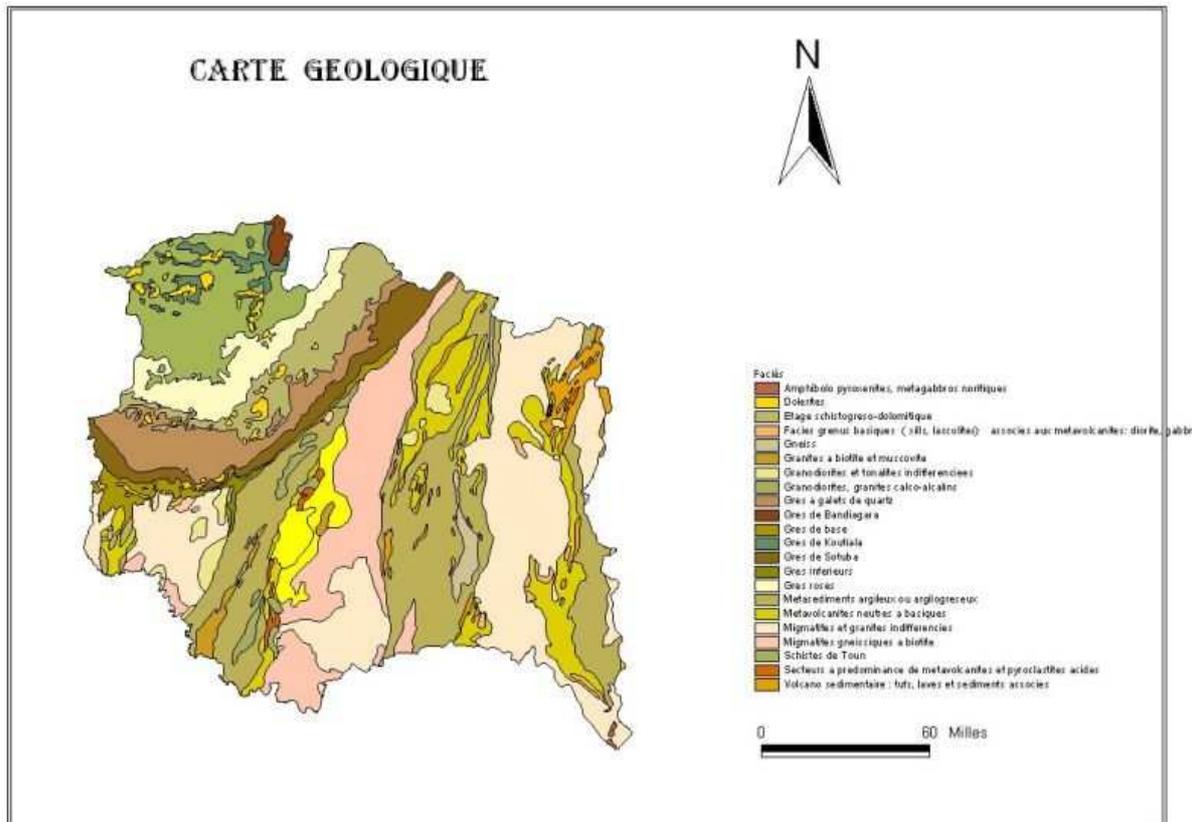
### **II.1.5. : Géologie**

Le Burkina Faso est constitué par des formations précambriennes du craton Ouest africain. On distingue trois groupes de formations géologiques (Castaing et *al.*, 2003) :

- Le socle paléo-protérozoïque, qui comprend des terrains volcano-sédimentaires et plutoniques birimiens. Ceux-ci sont envahis par des granitoïdes batholitiques d'âge éburnéen.
- La couverture sédimentaire néo-protérozoïque, qui repose en discordance sur le socle birimiens dans plusieurs zones. Elle est constituée de dépôts marins de plate-forme épicontinentale.
- Les terrains cénozoïques du continental. Il est constitué de formations fluvio-lacustres avec des alternances d'argiles et de sable ou bien grés-conglomératique.

La zone du Sud Ouest du Burkina est subdivisée en deux domaines :

- Un domaine constitué par les formations sédimentaires de la couverture néo-protérozoïque, paléozoïque et cénozoïque et correspond à la bordure Sud-Est du vaste bassin de Taoudéni. On distingue quatre groupes :
  - Le groupe de Banfora, à la base de la série stratigraphique et correspond à une sédimentation marine.
  - Le groupe de la falaise qui est discordant sur le groupe de Banfora et sur le socle et comporte deux formation essentiellement gréseuses.
  - Le groupe de Bobo qui est discordant sur le groupe de la Falaise et comprend cinq formations.
  - Le groupe de Bandiagara qui est représenté par une seule formation correspondant à des dépôts fluviaux.
- Un domaine constitué par les formations du socle paléo-protérozoïque. Il est caractérisé par les terrains volcaniques, volcano-sédimentaires et plutoniques formant des ceintures birimiennes de Loumana, Banfora, Houndé et Boromo. Entre ces ceintures, affleurent les vastes batholites de granitoïdes éburnéens du massif de Soubakaniédougou-Niangoloko, Mangodara-Sidéradougou et Diébougou-Kampti.



Carte II. 4 : Géologie de la région du Sud-ouest

### II.1.6. : Végétation

La zone du Sud-Ouest du Burkina est caractérisée par la présence de forêts galeries. Les espèces dominantes sont : *Elaeis guinéensis* et *Cola laurifolia* comme espèces guinéennes dans les forêts galeries et *Anogeissus leiocarpus*, *Daniellia olivéri* et *khaya senegalensis* comme espèces soudaniennes. Cependant dans les espaces de culture, le parc est essentiellement constitué de *Acacia albida*, *Borassus aethiopium*, *Butyrospermum paradoxum* et *Parkia biglobosa* ([www.fao.org](http://www.fao.org)).

### II.1.7. : Caractéristique des aquifères

On distingue deux systèmes d'aquifères : le système aquifère de la zone de socle et celui de la zone sédimentaire. Les aquifères du socle ont une structure discontinue et les ressources en eau exploitable sont limitées aux fissures et aux niveaux altérés d'une épaisseur de 10 à plus de 50 mètres. Dans la zone sédimentaire, on rencontre essentiellement une variété gréseuse. Parfois, les roches sont poreuses et contiennent des ressources en eau très importantes. La zone se caractérise également par la présence de nombreuses sources dont les plus connues sont celles de la Guingette, de Nasso et de Pesso. D'autres sources à débit important existent dans la zone mais sont encore mal connues.

## **ii.2. : Méthodologie**

Nous présenterons ici la démarche suivie pour atteindre nos fins.

### **II.2.1. : Revue bibliographique**

Cette phase nous a permis de prendre connaissance de l'état de gestion des ressources en eau au Burkina. Egalement de faire une synthèse sur les travaux qui ont été faites sur le site de l'étude et dans le Burkina en général qui pourrait nous être utile. C'est pendant cette étape que nous avons également prise en main les logiciels Variowin 2.2 et ArcGIS 9.3.

### **II.2.2. : Données**

En plus de la masse de données obtenues de la recherche bibliographique il a été mis à notre disposition des paramètres caractéristiques des forages implantés dans la zone d'étude. Ces derniers nous permettrons de ressortir les outils qui faciliteront la gestion des ressources en eau souterraine.

### **II.2.3. : Traitement des données**

Le traitement des données à consister en plusieurs étapes :

\*Une analyse exploratoire des données nous a permis de se familiariser avec ces dernières. Cette analyse à été la tâche de la combinaison de plusieurs logiciels d'analyse statistique. Elle a permis d'avoir une idée sur la représentativité des données, des anomalies et la loi de distribution sur le site. Il a été également question de préparer les données afin de les compiler avec les outils Variowin et ArcGIS.

\*Une Analyse variographique qui donne une bonne interprétation structurale des données. Elle est subdivisée en quatre étapes dont la détermination du nuage variographique (qui met en évidence les anomalies dans les données), du variogramme surfacique (qui ressort les directions d'anisotropie), du variogramme expérimental (qui ressort l'évolution de la dissimilarité entre les données) et enfin l'ajustement ou modélisation (qui ressort une équation, qui permettrait d'attribuer au variogramme une valeur pour toute valeur de la variable « distance »). Ces différentes étapes permettent de déceler la force d'autocorrelation des données dans l'espace.

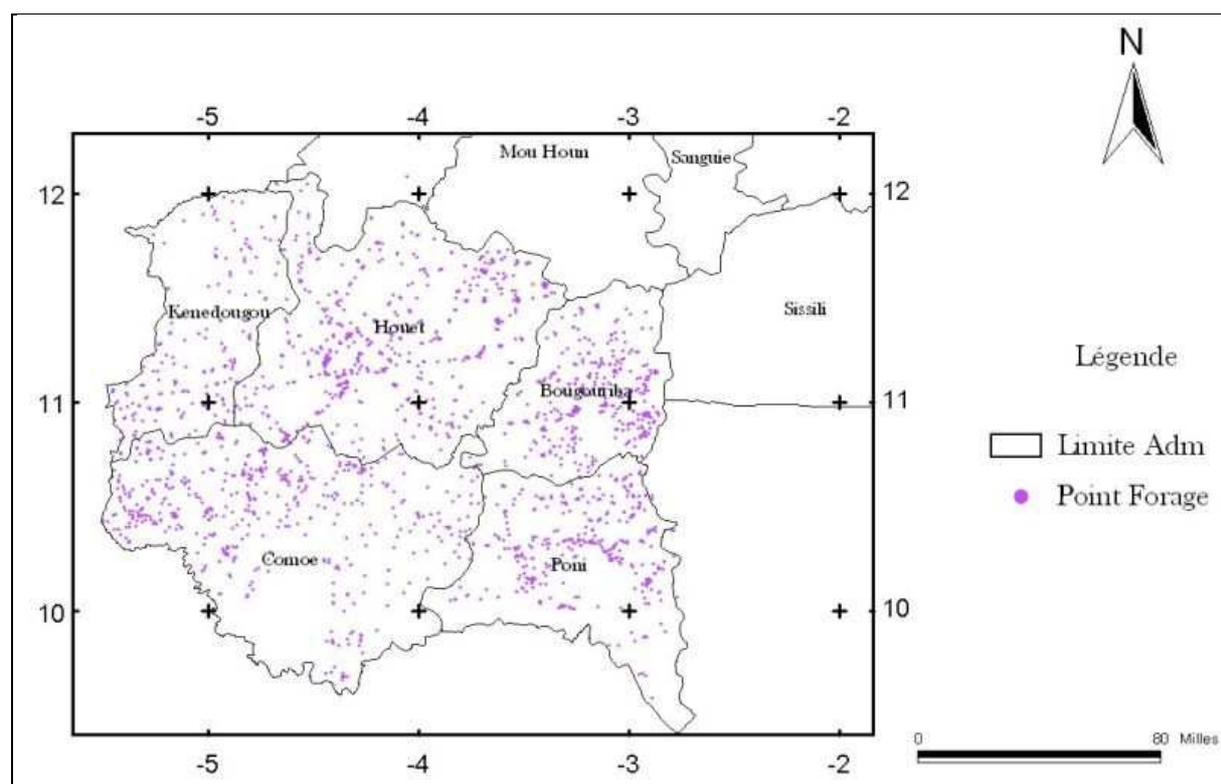
\*Une validation croisée qui permet d'évaluer le modèle.

### **II.2.4. : Interpolation par krigeage**

Elle a été la tâche particulière du module « Geostatistical Analyst » d'ArcGIS. Cette étape nous a permis de réaliser les différentes cartes thématiques.

### III. : ANALYSE EXPLORATOIRE DES DONNEES

L'étude exploratoire a pour but d'apprécier la distribution des données dans l'espace, d'appréhender leur degré d'homogénéité, de rechercher et de visualiser les observations atypiques ou tout simplement de se familiariser avec les variables. Dans le cadre de cette étude, nous travaillons sur des paramètres caractéristiques de 2128 forages, mis à notre disposition par notre encadreur M. Eric Seydou TRAORE. Ces forages sont concentrés dans la zone du Sud-Ouest du Burkina comme l'illustre la carte III.1.



Carte III. 1 : Localisation des forages

#### III.1. : Paramètres caractéristiques des forages

Dans la masse de données mise à notre disposition, il est à noter que tous les paramètres caractéristiques n'ont pas été déterminés pour chaque forage (Tableau III.1).

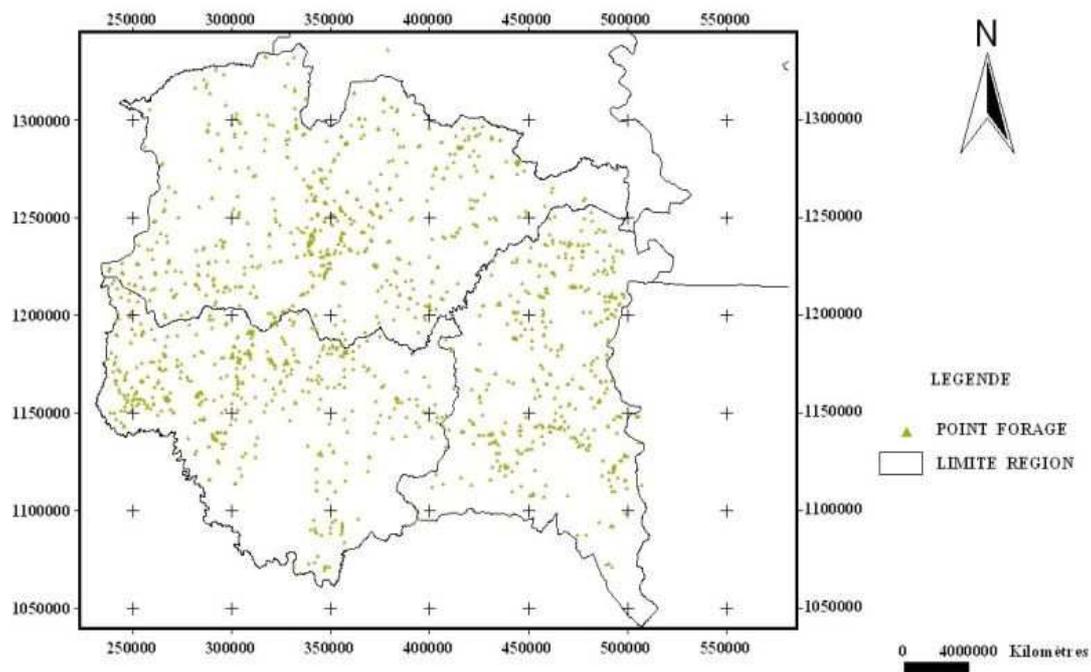
Tableau III. 1 : Paramètre et nombre de forage

	Piézo	Cond	Trans	pH	Na	K	Mg	Ca	Fe	Cl	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>
Nbre	1434	1378	501	1355	43	55	159	172	44	184	147	88	95
Manque	694	750	1627	773	2085	2073	1969	1956	2084	1944	1981	2040	2033
%	67%	65%	24%	64%	2%	3%	7%	8%	2%	9%	7%	4%	5%

Ce tableau représente les paramètres en fonctions du nombre de forage où ces derniers ont été déterminés et non déterminés. A première vue, il est évident de déduire que les paramètres sont faiblement représentés sur le site d'étude si nous nous basons sur la quantification. Par conséquent, il est problématique de faire un choix sur les paramètres qui nous permettrons d'atteindre nos fins. A cet effet, nous nous proposons de cartographier chaque paramètre afin de mieux apprécier sa distribution sur la zone de l'étude.

### III.1.1. : Piézométrie

Les forages où ce paramètre a été déterminé sont représentés par la carte III.2.



Carte III. 2 : Localisation des forages à piézométrie déterminé

Elle indique le niveau d'eau dans le sol. La fourchette des données est comprise entre 0,5 et 128,4 m avec une moyenne et une médiane respectivement de 12 m et 10 m. La distribution est dissymétrique étalée vers la droite vers les valeurs élevées (Figure III.1 & 2) et le coefficient d'aplatissement s'éloigne de zéro et est différent du « skewness » (Tableau III.2).

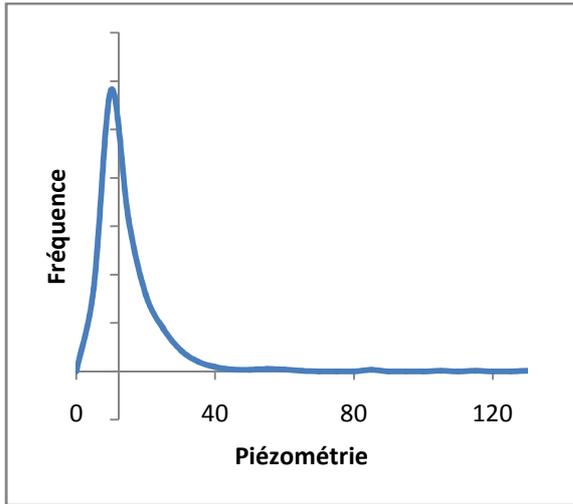


Figure III. 1 : Piézométrie & Fréquence

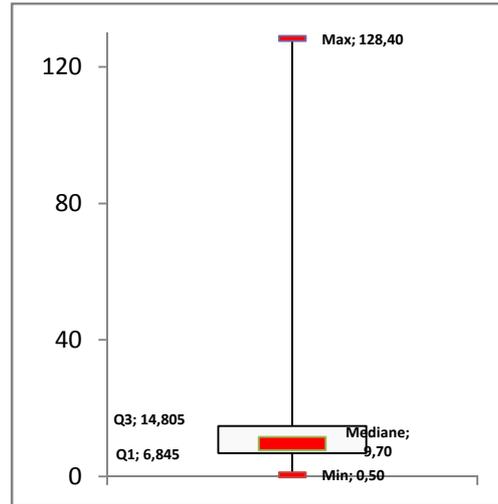


Figure III. 2 : Boîte à moustache piézométrie

La moitié des forages montre que le niveau d'eau dans le sol est compris entre 6,8 et 14,8 m. La piézométrie entre le premier et le dernier quart des forages est comprise respectivement entre 0,5 et 6,8 m et entre 14,8 et 128,4 m (Figure III.1 & 2). Les moustaches sont dissymétriques. 78 valeurs atypiques sont identifiées sur la boîte à moustache également par Tanagra d'après la règle Inner Fence. La droite d'Henry (Figure III.3) se présente comme une courbe dont la pente diminue avec les valeurs piézométriques élevées. Un passage à une échelle logarithmique nous donne une tendance linéaire (Figure III.4), à cet effet, nous devons prendre en compte les logarithmes des observations pour toute modélisation de la distribution suivant une loi Gauss.

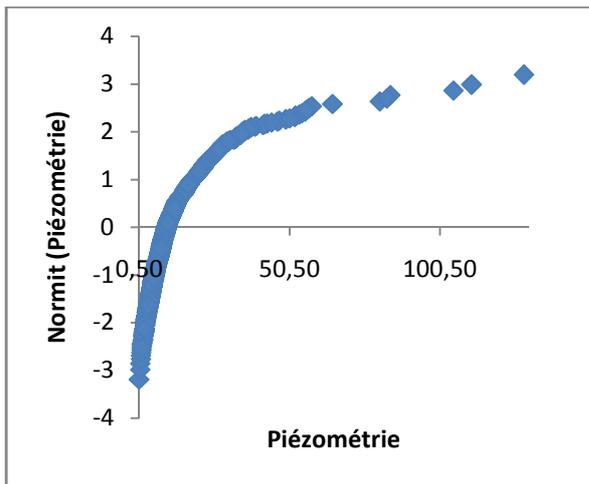


Figure III.3: Droite d'Henry piézométrie

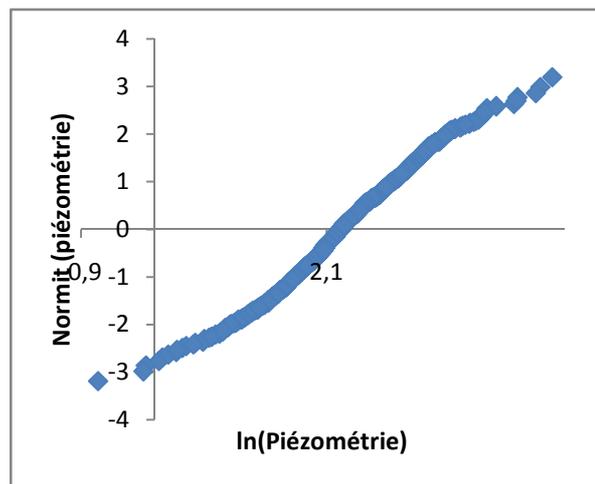
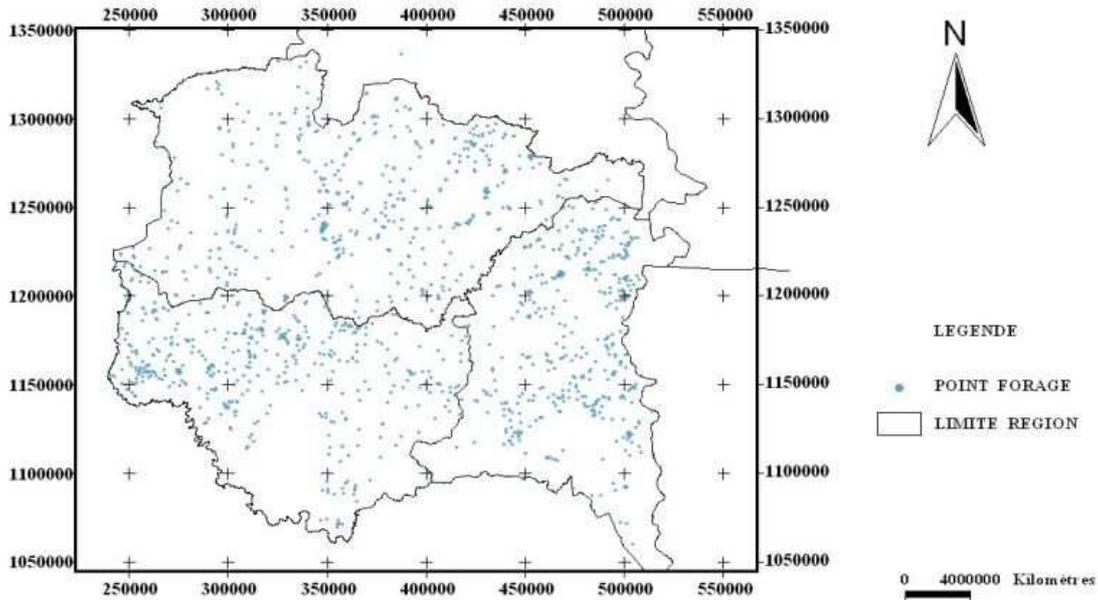


Figure III.4 : Droite d'Henry ln(Piézométrie)

### III.1.2 : Conductivité

La carte III.3 ci-dessous illustre les forages où la conductivité a été déterminée.



Carte III. 3 : Forage à conductivité déterminée

Comprise entre 10 et 1990  $\mu\text{S/m}$ , elle a une moyenne de 262  $\mu\text{S/m}$  et une médiane de 220  $\mu\text{S/m}$ . La moitié des forages ont une conductivité comprise entre 137 et 340  $\mu\text{S/m}$ , cependant celles du premier et du dernier quart des forages sont respectivement comprises entre 10 et 137  $\mu\text{S/m}$  et entre 340 et 1990  $\mu\text{S/m}$  (Figure III.5 & 6). Tanagra (suivant la règle Inner Fence) et la boîte à moustache dénombrent 48 valeurs atypiques. La distribution est dissymétrique, de même que les moustaches, étalée vers la droite vers les valeurs élevées de conductivité (Figure III.5 & 6). Comme dans le cas de la piézométrie le coefficient d'aplatissement s'éloigne de zéro et est différent du « skewness ».

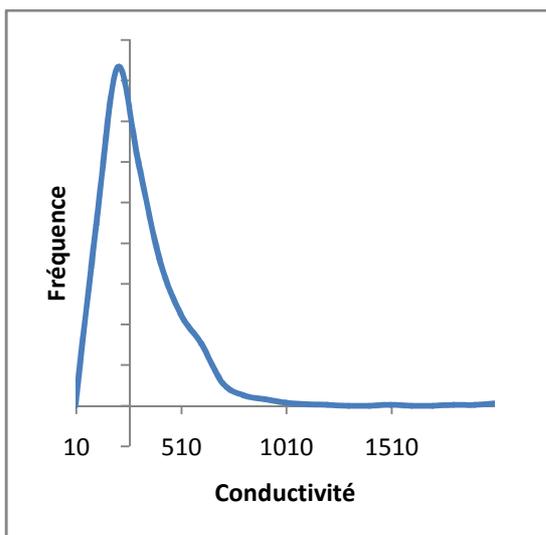


Figure III.5 : Conductivité & Fréquence

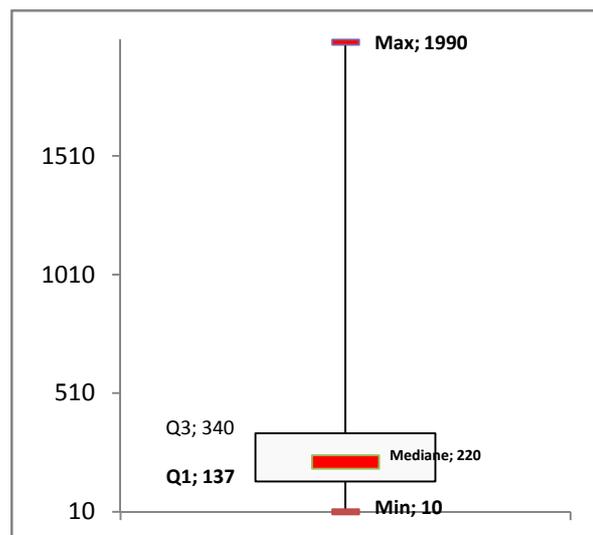


Figure III.6 : Boîte à Moustache conductivité.

La droite d'Henry (Figure III.7) est similaire à celui des données piézométriques. On observe également la diminution de la pente avec les valeurs élevées de conductivité, traduisant ainsi

la dissymétrie de la distribution. Le passage à l'échelle logarithmique (Figure III.8) nous donne une tendance linéaire subdivisée en deux séquences.

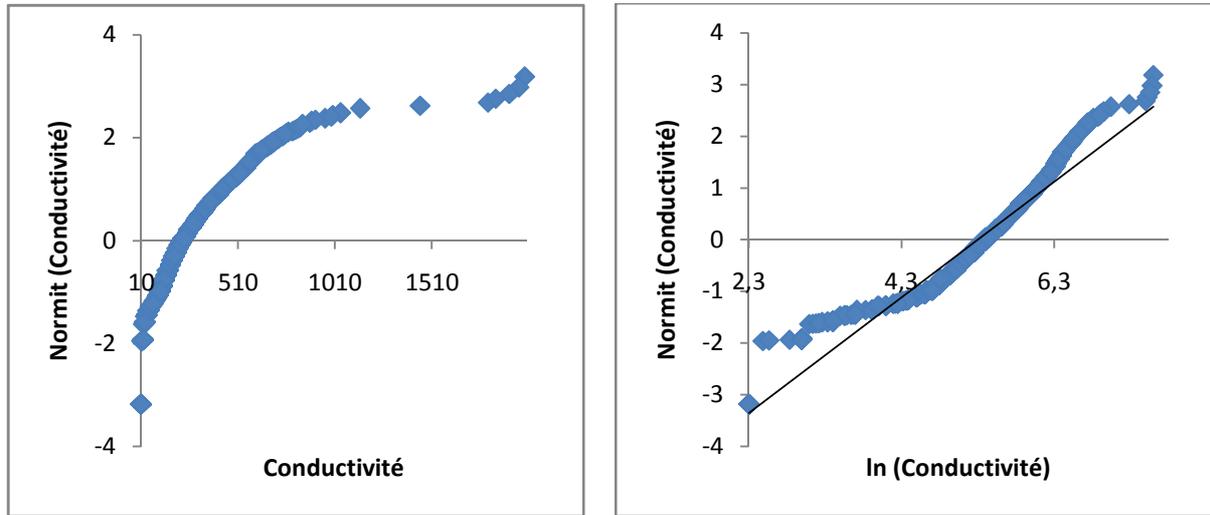
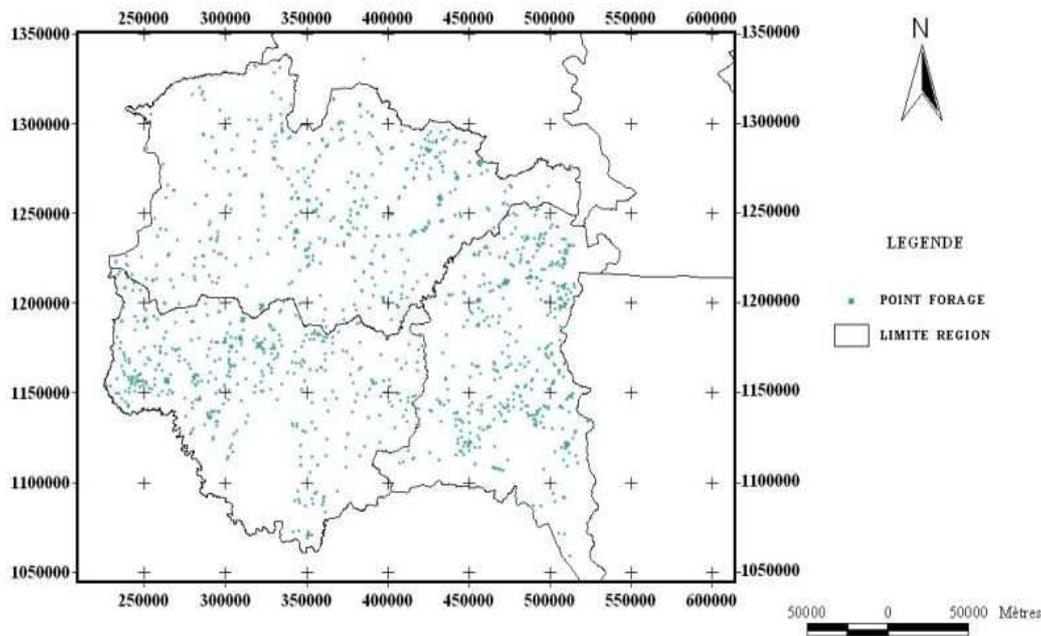


Figure III.7 : Droite d'Henry Conductivité

Figure III.8 : Droite d'Henry ln(Conductivité)

### III.1.3. pH

Le pH est représenté sur le site de l'étude d'après la carte III.4.



Carte III. 4 : Forage à pH déterminé

Il mesure l'acidité ou l'alcalinité des eaux. Les valeurs sont comprises entre 4,9 et 10,3 et de 7,3 pour la moyenne. La moitié des forages ont un pH qui varie entre 7 et 7,8 tandis que le premier et le dernier quart des forages ont des pH comprises respectivement entre 4,9 et 7 et entre 7,8 et 10,3 (Figure III.9 & 10). La distribution est dissymétrique étalée vers la gauche et les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement se rapprochent vers zéro (Tableau III.2). La boîte à moustache présente une presque symétrie entre les moustaches.

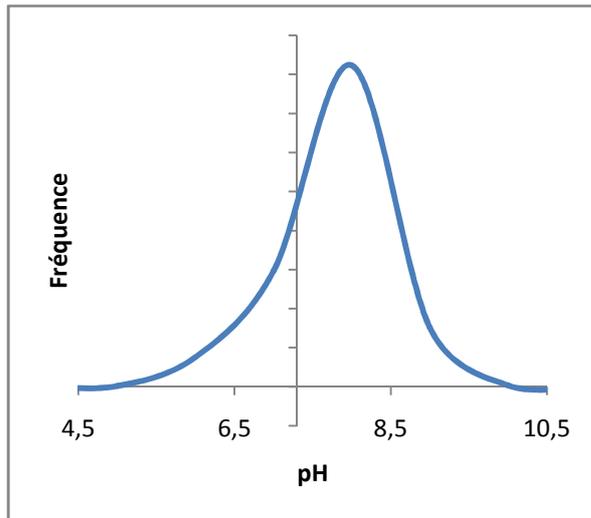


Figure III.9 : pH & Fréquence

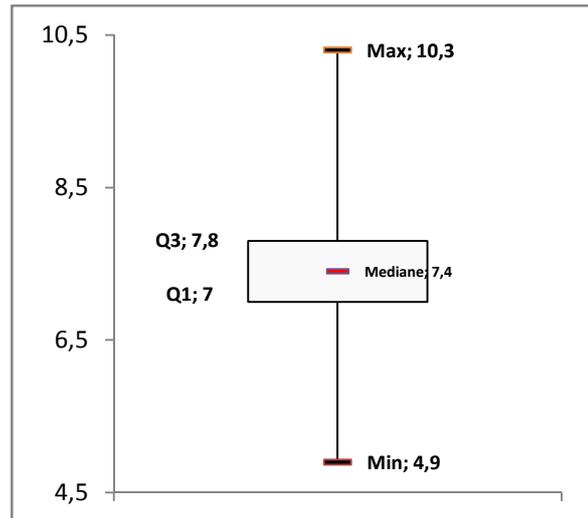


Figure III.10 : Boîte à moustache pH

La détection des valeurs atypiques par Tanagra ressort d'après la règle Inner Fence 39 variables idem à la boîte à moustache. Cependant, la droite d'Henry a une tendance linéaire (Figure III.11).

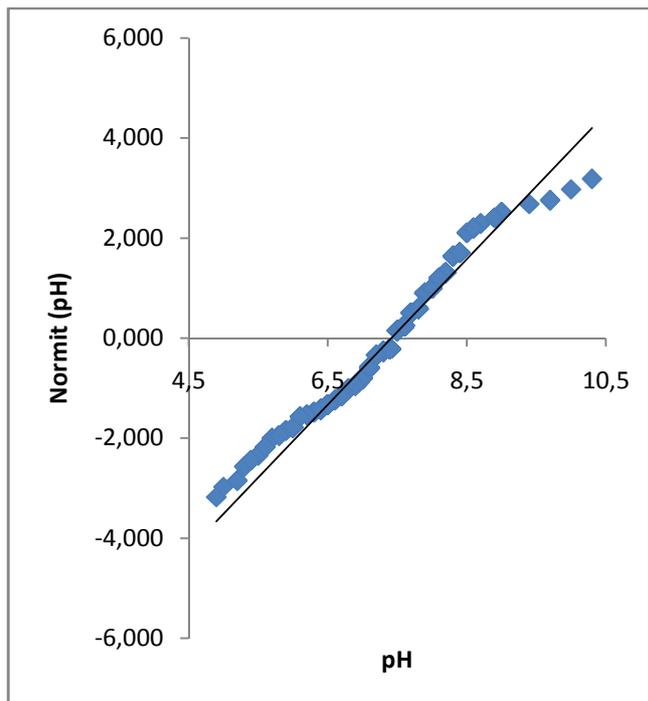
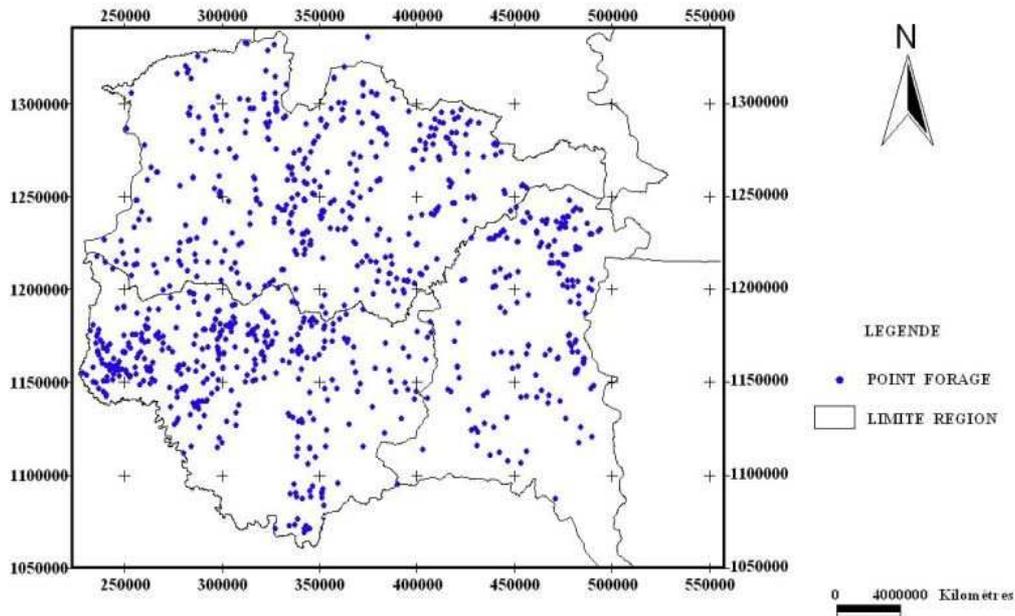


Figure III.11 : Droite d'Henry pH

### III.1.4 : Débit spécifique

La carte III.5. représente les forages où les débits spécifiques ont été mesurés.



Carte III. 5 : Forage à débit mesuré

Il s'agit du débit que l'on peut obtenir en régime permanent. Il varie de 0,01 à 71,2 avec une moyenne de 0,93 et une médiane de 0,25. Le premier et le dernier quart des forages ont des débits respectivement compris entre 0,01 et 0,11 et entre 0,63 et 71,2. Entre autre, la moitié des forages ont un débit oscillant entre 0,11 et 0,63 (Figure III.12 & 13). La distribution est asymétrique étalée vers la droite vers les valeurs élevées et les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement s'éloignent de zéro (Tableau III.2).

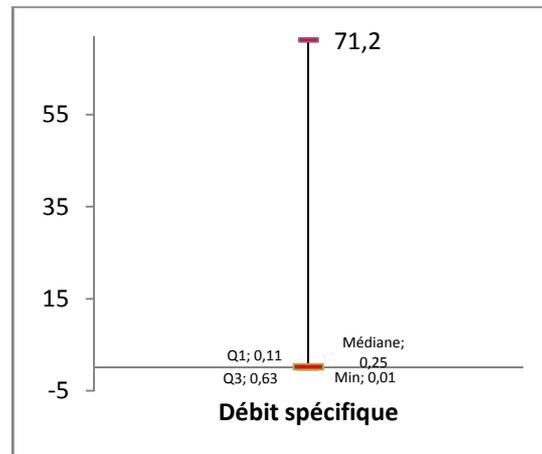
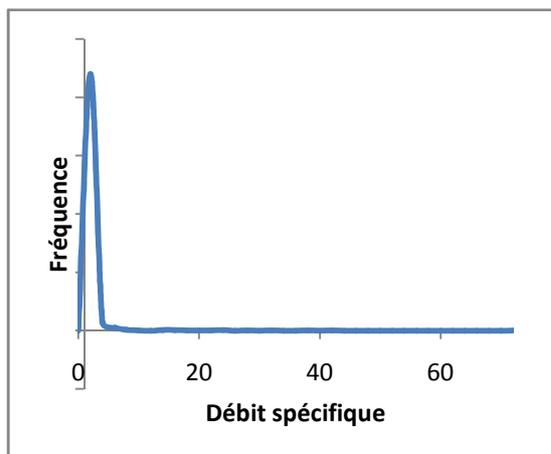


Figure III.12: Débit spécifique & Fréquence Figure III.13 : Boîte à moustache Débit spécifique  
L'analyse par Tanagra ressort 101 valeurs atypiques idem à la boîte à moustache. Le diagramme d'Henry (Figure III.14) présente une tendance dont la pente diminue avec les

valeurs élevées de débit. A l'échelle logarithmique, elle donne une tendance linéaire (Figure III.15).

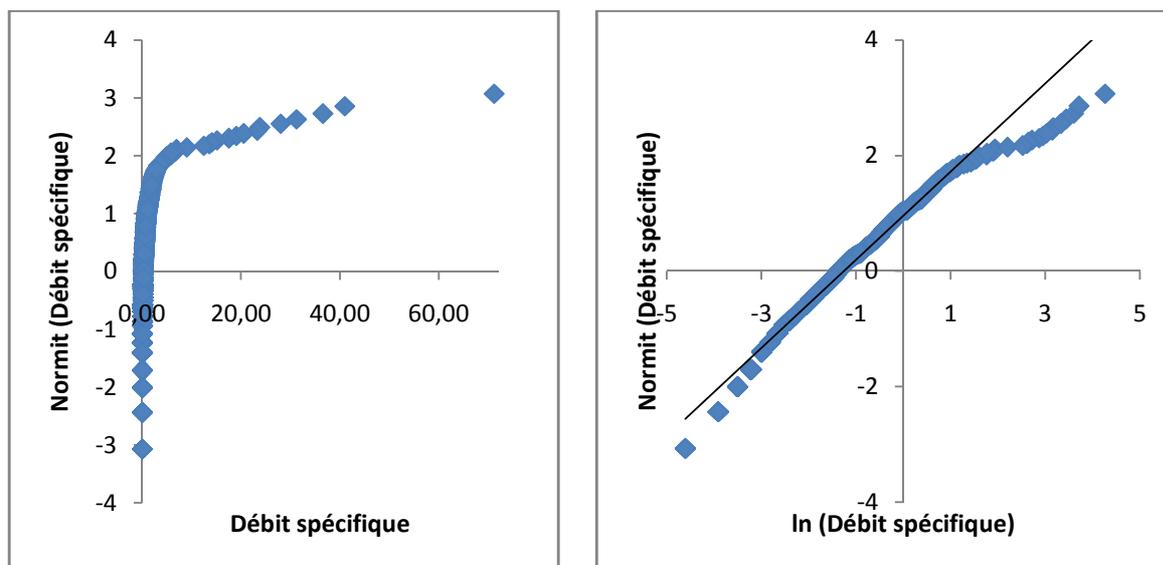
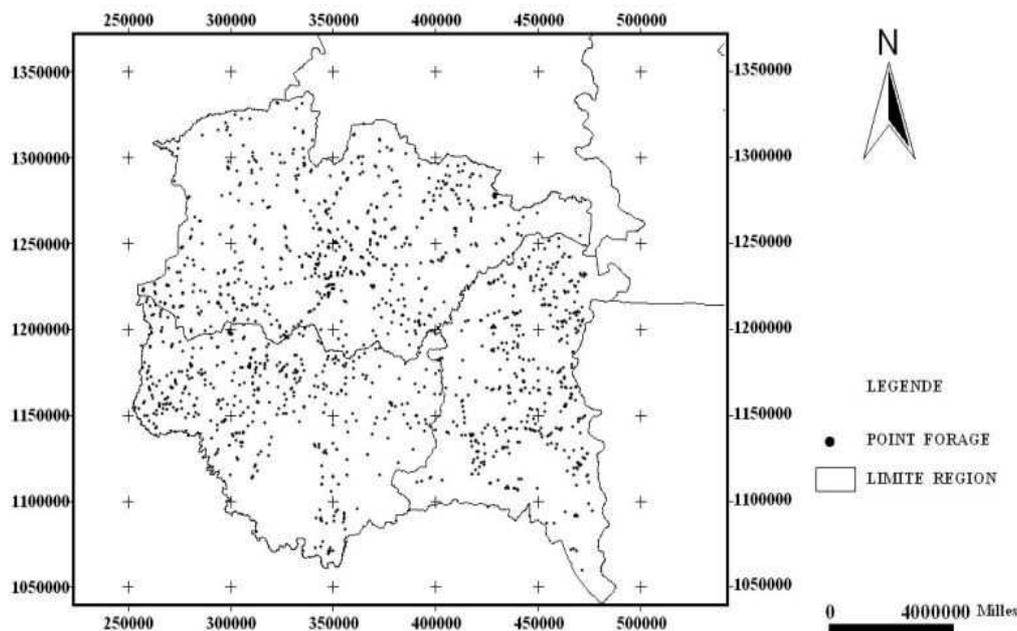


Figure III.14 :Droite Henry Débit spécifique Figure III.15:Droite Henry ln (Débit spécifique)

### III.5 : Profondeur forage

Elle est illustrée par la carte III.5.

Les données de profondeur de forage sont comprises entre 20 et 219 m. La moyenne est de 52,6 tandis que la médiane et le mode sont respectivement de 49,5 et 55. La distribution autour de la moyenne est de 19,3 et les valeurs du coefficient d'asymétrie et d'aplatissement s'éloignent de zéro. La moitié des forages a une profondeur comprise entre 40,1 et 61 m cependant le premier et le dernier quart de forage ont des profondeurs comprises respectivement entre 20 et 40,1m et entre 61 et 219 m (Figure III.16 & 17). La distribution est asymétrique et également étalé vers les valeurs élevées de profondeur.



Carte III. 6 : Forage à profondeur déterminée

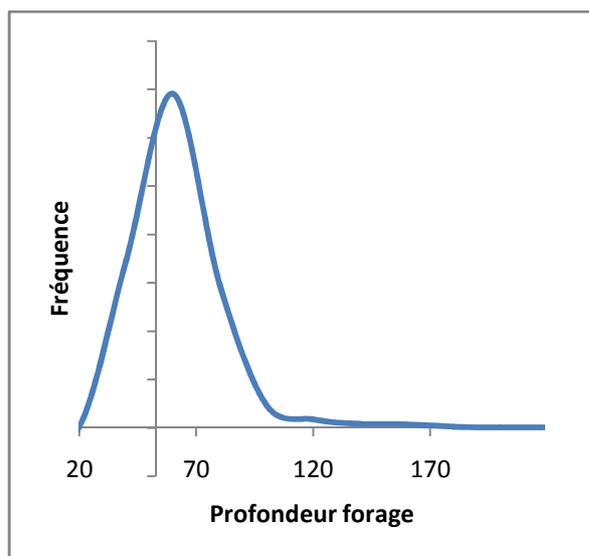


Figure III.16 : Fréquence & Profondeur Forage

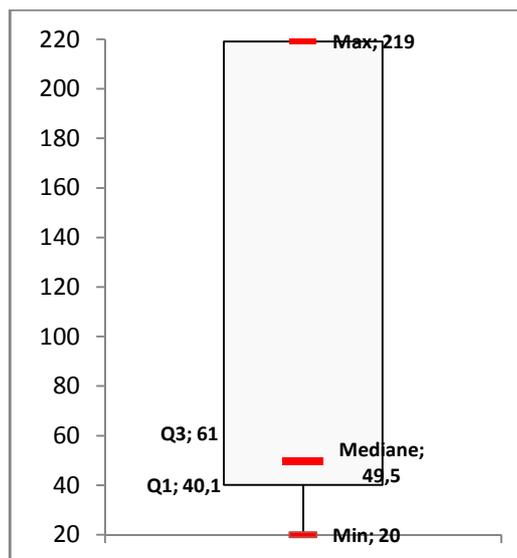


Figure III.17 : Boîte à moustache Profondeur Forage

La droite d'Henry décroît suivant les valeurs élevées de profondeur des forages. Toutefois, cette tendance change et devient presque linéaire lorsqu'on passe à une échelle logarithmique (Figure 18 & 19). L'on dénombre d'après Tanagra (d'après « Inner Fence rule ») et la boîte à moustache 49 valeurs atypiques.

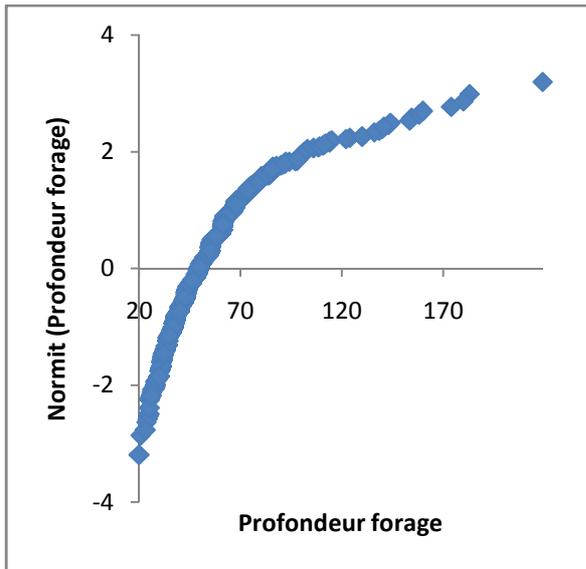


Figure III.18:Droite henry Profondeur Forage

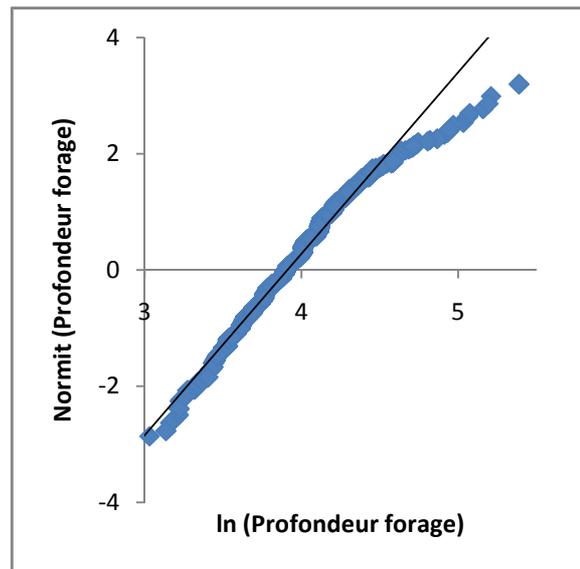
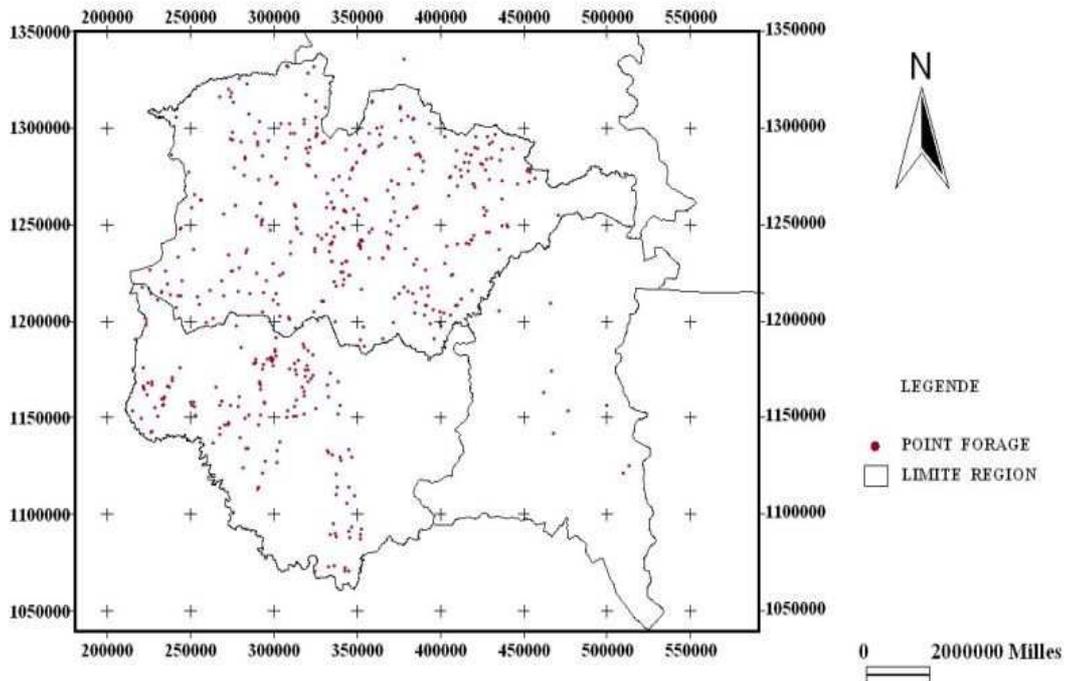


Figure III.19:Droite Henry ln(Profondeur forage)

### III.1.6 : Transmissivité

La carte III.6 illustre les forages où la transmissivité a été déterminée.



Carte III. 7 : Forage à transmissivité déterminée

Elle est comprise entre 0 et 19,9 avec une moyenne de 0,19 et une médiane de 0,045. La moitié des forages a une transmissivité comprise entre 0,01 et 0,12 tandis que le premier et le dernier quart sont compris respectivement entre 0 et 0,01 et entre 0,12 et 19,9. La distribution est asymétrique étalée vers les valeurs élevées de transmissivité. La distribution autour de la moyenne est de 1,025 et le coefficient d'asymétrie et d'aplatissement s'éloignent de zéro.

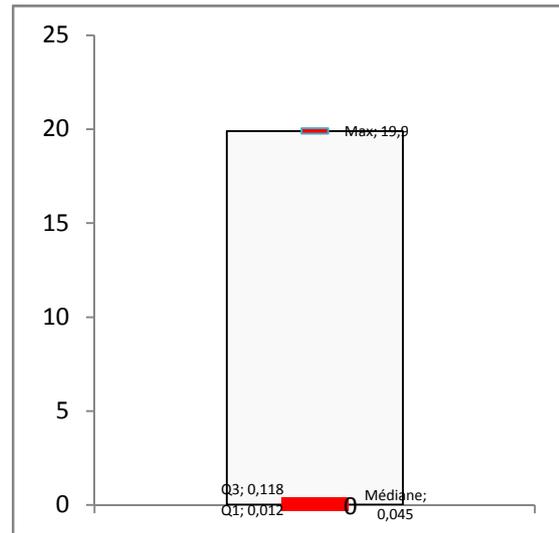
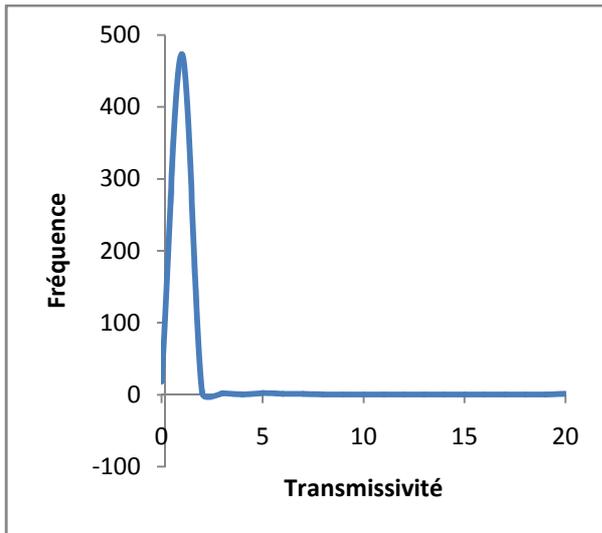


Figure III.20 : Fréquence & Transmissivité    Figure III.21 : Boîte à moustache Transmissivité

Au regard de la droite d'Henry nous pouvons dire qu'elle se présente comme une courbe dont la pente décroît suivant les valeurs élevées de transmissivité.

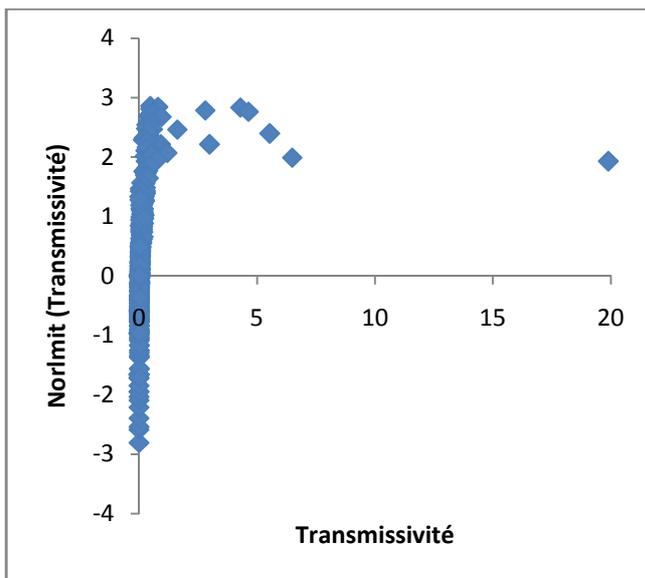


Figure III.22 : Droite d'Henry Transmissivité

Le rapport entre l'écart absolu moyen et l'écart type pour une loi normale doit être asymptotiquement égal à  $\sqrt{2/\pi}$  ( $\approx 0,7979$ ). Dans le tableau III.2, ce rapport montre des valeurs proches de  $\sqrt{2/\pi}$  excepté celles des paramètres débit et transmissivité. L'éloignement des coefficients d'asymétrie et d'aplatissement des différents paramètres caractéristiques des forages, excepté le pH, de zéro (Tableau III.2) pourrait justifier l'application logarithmique à ces derniers afin d'avoir une tendance au rapprochement à la loi normale.

Tableau III. 2 : Synthèse statistique

	Piézométrie (m)	Conductivité ( $\mu\text{s}/\text{m}$ )	pH	Débit Spécifique	Profondeur	Trans- missivité
Moyenne	12	262	7,3	0,93	52,56	0,19
Médiane	10	220	7,4	0,25	49,5	0,045
1 <sup>er</sup> Quartile	6,83	132	7	0,11	40,1	0,01
3 <sup>eme</sup> Quartile	14,8	340	7,8	0,63	61	0,12
Mode	10	150	7,4	0,04	55	0,003
Ecart type	10	203	0,66	3,72	19,3	1,025
MAD	6,09	142	0,49	1,09	13,24	0,24
Kurstosis	34	16	1,31	169,81	11,56	278,79
Asymétrie	4	3	-0,48	11,52	2,46	15,37
MAD/Ecart type	0,62	0,70	0,75	0,29	0,68	0,24
Minimum	0,5	10	4,9	0,01	20	0
Maximum	128	1990	10,3	71,2	219	19,9
Nbre Echantillon	1434	1378	1355	936	1419	501
Données manquantes	694	750	773	1192	709	1627
Représentativité	67%	65%	64%	44%	67%	24%

\*MAD : Ecart Absolu Moyen

#### **IV. : ANALYSE VARIOGRAPHIQUE**

Dans le cadre de cette étude le traitement des données s'est effectué avec les logiciels Variowin 2.2 et ArcGIS 9.3 par son module « Geostatistical Analyst ». Pour y arriver nous avons adopté une approche géostatistique dont nous nous donnons le plaisir de faire un rappel théorique dans l'optique d'imprégner le lecteur non averti de ces concepts de base à mieux comprendre la démarche à suivre. Puis suivra l'analyse structurale des variogrammes et enfin la modélisation.

##### **IV.1. : Rappel théorique : Géostatistique, variable aléatoire, variable régionalisée, fonction aléatoire**

La géostatistique est une approche mathématique conduisant à la régionalisation de variables d'intérêt selon des méthodes d'interpolation de type géostatistique. Elle est fondée sur la théorie des variables aléatoires et s'oppose aux méthodes d'interpolation de type déterministes. Les techniques de la géostatistique diffèrent des méthodes déterministes au sens où elles introduisent la notion d'autocorrélation spatiale entre les valeurs mesurées. En outre, elles se basent sur des concepts de similarité qui stipulent que les points les plus proches les uns des autres tendent à être plus similaires que les points plus éloignés.

Une variable aléatoire est une variable dont les valeurs sont aléatoirement réalisées en accord avec un mécanisme probabiliste.

La variable régionalisée quant à elle est une variable distribuée dans l'espace et utilisée pour représenter un phénomène naturel. Cependant, toutes séries de variable aléatoire dont la dépendance entre elles est spécifiée par un mécanisme probabiliste est une fonction aléatoire ( $Z(x)$ / point  $x$  appartient à la région étudiée). Elle exprime les aspects aléatoires de la manière suivante :

\*Localement, au point  $x$ , la valeur  $Z(x)$  est considérée comme une variable aléatoire.

\*Cette valeur  $Z(x)$  est aussi considérée comme une fonction aléatoire, dans le sens que pour chaque paire de point  $x_i$  et  $x_i+h$  les variables aléatoires correspondantes  $Z(x_i)$  et  $Z(x_i+h)$  ne sont pas indépendantes mais liées par une corrélation exprimant la structure spatiale du phénomène.

L'approche géostatistique admet des mesures corrélées en fonction de la distance tout de même que les modèles statistiques utilisés par les techniques géostatistiques d'interpolation tiennent compte des autocorrélations spatiales entre les points échantillonnés. Ces relations se précisent à l'aide d'une analyse structurale des données, au centre de laquelle se trouve la variographie. Cette analyse structurale admet l'hypothèse de stationnarité à la fonction aléatoire  $Z(x)$ .

La stationnarité stricte signifie une invariance en translation du comportement d'un phénomène. Lorsque celui-ci est décrit par une fonction aléatoire ce sont les caractéristiques de la fonction aléatoire qui sont invariantes en translation :

Si  $F_{X_i}$  est la distribution de probabilité de la variable aléatoire  $Z(x_i)$  à la station  $i$  ( $i=1, \dots, 19$ ), i.e.  $P(Z(x_i) \leq z)$ , alors  $F_{X_1, \dots, X_{19}}(z_1, \dots, z_{19})$  est la fonction de distribution multiple (pour l'ensemble des stations) pour les 19 variables aléatoires. Dans ce cas la stationnarité stricte est définie comme :

$$F_{X_1, \dots, X_{19}}(Z_1, \dots, Z_{19}) = F_{X_1 + h, \dots, X_{19} + h}(z_1, \dots, z_{19})$$

La stationnarité stricte étant une condition difficile à remplir (puisqu'elle suppose la connaissance de la fonction de distribution multivariée) elle est généralement remplacée par la notion de stationnarité intrinsèque. La stationnarité intrinsèque d'une fonction aléatoire suggère l'invariance en translation des caractéristiques de la distribution de l'écart entre paires de valeurs échantillonnées ( $Z(x+h) - Z(x)$ ). Cette hypothèse ne nécessite donc plus que la connaissance de la fonction de distribution de l'écart entre paires de variables. La stationnarité intrinsèque d'une fonction aléatoire est donc vérifiée lorsque les conditions suivantes sont remplies :

$$\mu(h_{kl}) = E[Z(x_i+h_{kl})] = E[Z(x_k)] = \text{cste}$$

$$\sigma^2(h_{kl}) = \text{Var}[Z(x_k+h_{kl})-Z(x_k)] = \text{Cov}[Z(x_k+h_{kl}), Z(x_k)] = C(h_{kl})$$

Où  $k$  et  $l$  identifie les points de mesures  $x_i$  ( $i = 1, \dots, 19$ ).

Les deux premiers moments caractérisent entièrement la distribution des écarts  $F_{h_{kl}}(z_k, z_l)$  dans le cas d'une distribution normale. Il s'agit alors de la moyenne arithmétique et de l'écart type. La moyenne doit être constante et la variance ne doit dépendre que de la distance  $h$  séparant les points de mesure sur l'ensemble de l'espace géographique considéré.

#### IV.2. : Variogramme « $\gamma(\cdot)$ »

La fonction  $\gamma(\cdot)$  se définit comme suit :

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

Où  $x$  et  $x+h$  désignent deux points quelconques de l'espace séparés par une distance  $h$ .

Compte tenu des hypothèses faites,  $E(Z(x+h)-Z(x)) = 0$  pour tout  $h$ , et on a donc :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2}(E((Z(x+h)-Z(x))^2))$$

Le variogramme indique comment les valeurs de la variable  $Z(\cdot)$  diffèrent en moyenne lorsque l'on considère des sites distants de  $h$  (sans direction particulière du fait de l'isotropie).

La figure IV.1 donne une représentation typique d'un variogramme  $\gamma(\cdot)$ . Par définition on a  $\gamma(0)=0$ . Intuitivement, lorsque les réalisations de  $Z(x+h)$  et de  $Z(x)$  sont proches, c'est-à-dire

« se ressemble », la valeur de la fonction  $\gamma(h)$  sera faible. La croissance plus ou moins rapide de  $\gamma(h)$  lorsque  $h$  augmente nous renseigne donc sur l'évolution de la dissimilarité moyenne entre les réalisations de la variable étudiée pour les sites de plus en plus éloignés spatialement. Cela permet de voir comment s'atténue avec la distance  $h$  l'influence moyenne des valeurs en  $x+h$ . Sur la figure IV.1, le variogramme atteint une valeur palier pour  $h = r$ , ce qui signifie qu'en moyenne la dissimilarité entre mesure situées à distance supérieure ou égale à  $r$  est constante. En d'autres termes, il n'y a plus de dépendances spatiales pour des sites distants de plus de  $r$ . Cette distance  $r$  est appelée la « Portée du variogramme ». La valeur  $\gamma(r)$  repérée sur la figure IV.1 par le trait en pointillé horizontal est appelé « Palier du variogramme ». Et la valeur  $\epsilon$  correspond à l'effet de pépite qui est la valeur de la discontinuité à l'origine. De manière générale, le variogramme est caractérisé par la forme de la courbe d'ajustement des valeurs du variogramme (Elle peut être linéaire, sphérique, exponentielle, gaussienne, ou une combinaison de celles-ci), la portée, le palier et la pépite.

Toutefois, le comportement du variogramme à l'origine est très important puisqu'il reflète la régularité spatiale de la variable  $Z(\cdot)$ .

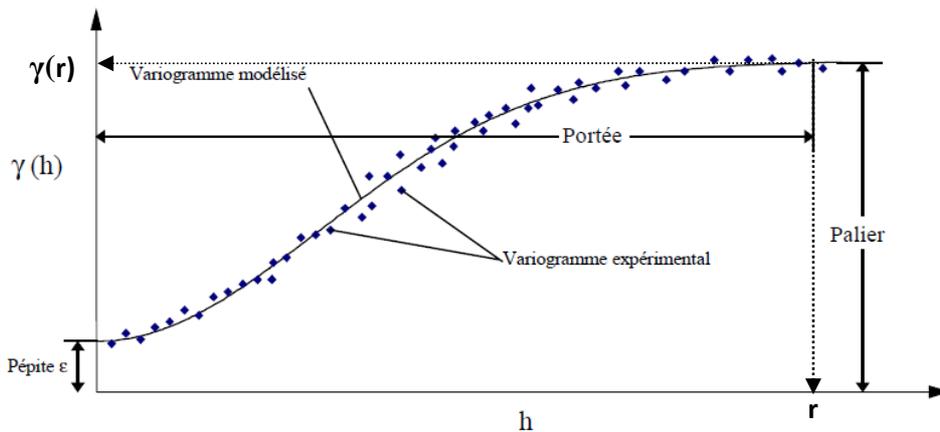


Figure IV.1 : Variogramme

Outre les paramètres mentionnés ci-haut, le variogramme fournit également des renseignements sur la nature isotrope ou anisotrope de la variable régionalisée (Confère IV.3.1). Dans ce cas le variogramme n'est autre qu'une coupe dans le variogramme surfacique (Confère paragraphe IV.3.1) en fonction des directions principales d'anisotropie si celle-ci existe.

### IV.3. : Application

Après une analyse descriptive de la masse de données soumise à notre étude (Confère III), nous avons retenus six paramètres dont nous nous proposons de faire une interpolation afin d'obtenir des cartes de prédiction ou de distribution spatiale. Ces paramètres ont été retenus sur la base de leur représentativité quantitative et spatiale ; il s'agit du niveau piézométrique, de la conductivité, du pH, du débit, de la profondeur des forages et à la transmissivité.

#### IV.3.1. : Nuage et surface variographique

Le nuage variographique est un premier outil dans l'analyse du variogramme qui permet de mettre en évidence les valeurs « anormales », les hétérogénéités d'échantillonnage, éventuellement les tendances. A un point du nuage correspond un couple de données. Le nuage trace le variogramme expérimental pour chaque couple en fonction de la distance qui sépare les points de ce couple. Cependant, le nuage variographique est difficile à modéliser, ainsi les couples de données sont rangées dans un réseau de classes d'égale distance. La valeur  $\gamma(h)$  attribuée à chaque classe est calculée d'après :

$$\gamma(h) = 1/2N \sum_j (\Delta z_j)^2$$

où  $h_j = j\Delta h$ , N est le nombre de couple de points  $z_1, z_2$ , tels que leur distance est comprise entre  $h_j \pm \Delta h/2$  et que  $\Delta z = z_1 - z_2$ . Le logiciel a besoin d'au moins cinq paires par classe pour pouvoir la prendre en compte. Il faut donc faire un compromis entre la finesse des classes ( $\Delta h$  petit) et un nombre élevé de paires par classe ( $\Delta h$  grand).

Les graphes illustrant le nuage variographique de chaque paramètre soumis à notre étude sont représentés en Annexe I. Ces derniers ont été obtenus en ajustant les paramètres du logiciel que sont la distance maximale et l'angle de tolérance que nous avons fixé à 90° (omnidirectionnel).

Au regard de ces graphes, nous constatons que les nuages de point pour chaque paramètre sont sectionnés en deux grands blocs qui diffèrent par leur densité. Cette différence de densité résulterait des anomalies dans les données (les données qui s'écartent de l'ensemble) ou de la variation du comportement de la variable dans l'espace. Cependant, deux graphes (piézométrie et débit) se distinguent par le fait que leur bloc à faible densité de nuage se divise à nouveau en trois bandes.

Il est indispensable d'analyser également le variogramme surfacique afin de compléter les paramètres à prendre en compte pour la construction du variogramme expérimental.

Le variogramme surfacique n'est autre qu'une représentation en plan du variogramme expérimental. Il permet de visualiser la valeur du variogramme expérimental  $\gamma(h)$ , dont le

vecteur  $h$  est décomposé selon les directions X et Y. La figure IV.2 ressort les divers paramètres à ajuster afin de ressortir le variogramme surfacique par Variowin pour ressortir.

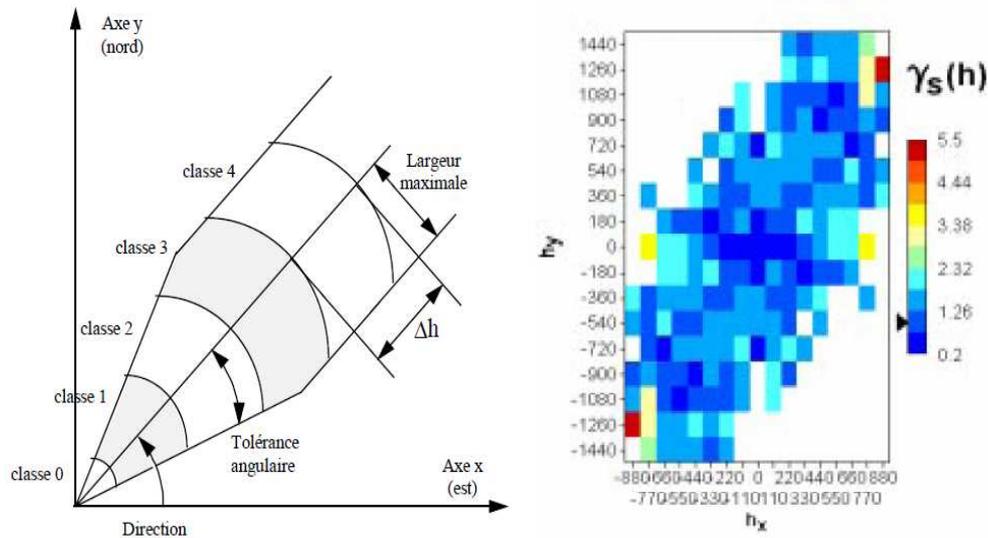


Figure IV.2. : Paramètres requis pour calculer un variogramme et surface variographique  
 Ces paramètres sont :  $\Delta h$ , la direction, le demi-angle de tolérance et la demi-largeur maximale. Les variogrammes surfaciques de nos paramètres de forage sont présentés également en Annexe I. Les couleurs fortes correspondent aux fortes valeurs du variogramme et les couleurs froides aux faibles. C'est à travers cette variation de couleur que ressortent les différentes directions d'anisotropie. En effet, l'anisotropie se conçoit comme un changement de la structure spatiale de la variable non seulement en fonction de la distance mais également de la direction. Il existe deux types : zonale et géométrique. Pour cette étude nous nous limiterons à l'anisotropie géométrique dont la présence est marquée par la stabilité dans toutes les directions de la variance maximale (seuil) et de la pépite par opposition à la distance d'extension (portée) de l'autocorrélation.

#### IV.3.2. : Variogramme expérimental

Le variogramme expérimental constitue la base du variogramme modélisé (théorique) et se construit en fonction de la synthèse des représentations en nuage de point et surfacique. En général, le variogramme expérimental est plus synthétique que la nuée variographique et permet une bonne interprétation structurale des données. Par ailleurs, il n'est pas utilisable immédiatement dans la mesure où il doit être exprimé par une équation, qui permettrait de lui attribuer une valeur pour toute valeur de la variable « distance ». C'est ainsi que la phase la plus déterminante d'une analyse variographique reste donc l'ajustement « au mieux » sur le variogramme expérimental d'une courbe d'expression théorique connue.

### IV.3.2.1 : Variogramme omnidirectionnel

Le variogramme omnidirectionnel de chaque paramètre caractéristique des forages (figures IV.3) a été ajusté aux différents modèles que propose VarioWin. La portée, la pépite et le palier ont été les paramètres qui ont permis de caler le modèle et le facteur d'ajustement nous a permis de choisir le meilleur variogramme modélisé (Annexe II).

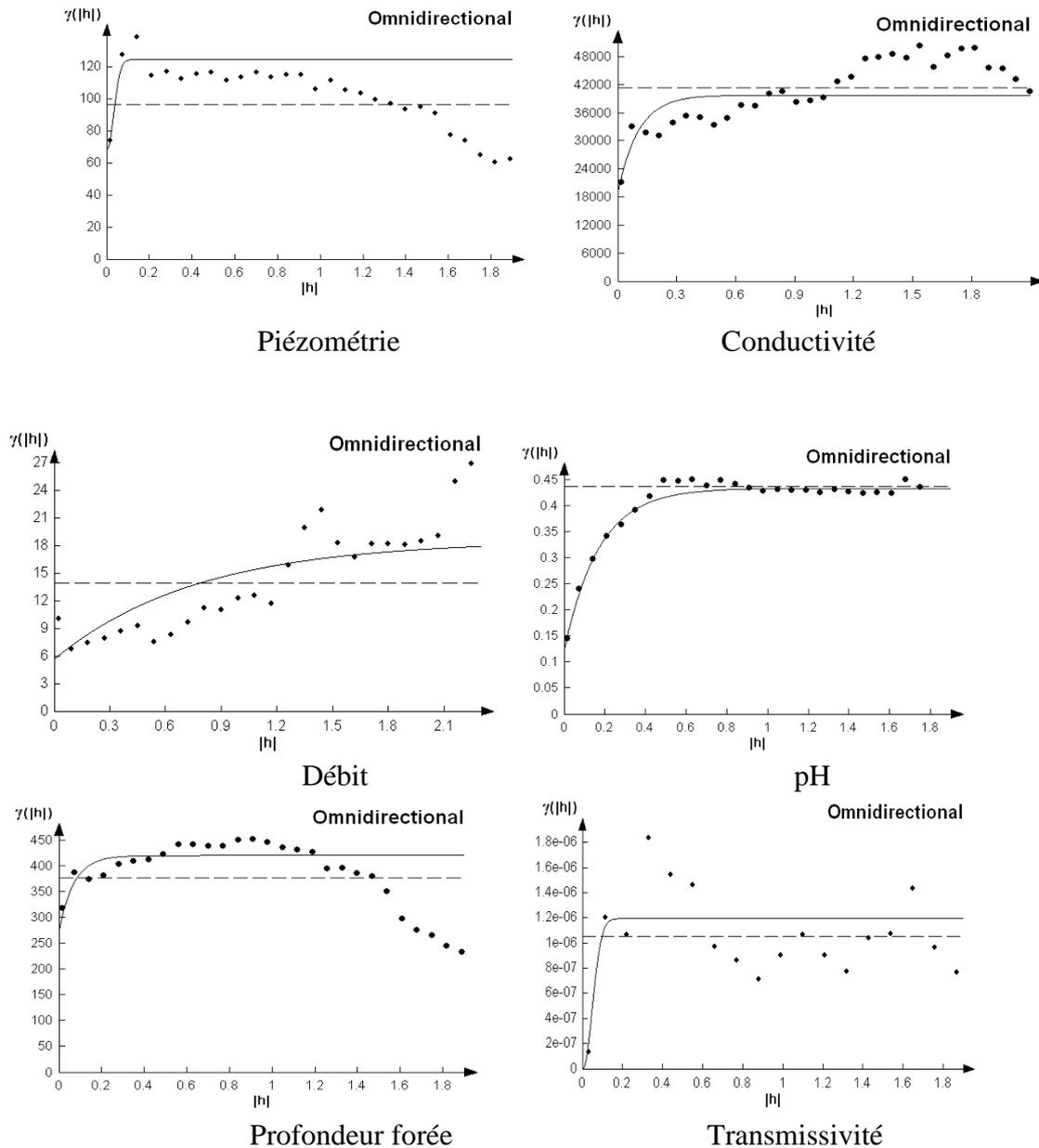


Figure IV.3 : Variogramme expérimental omnidirectionnel

En pointillé noir c'est le variogramme expérimental et en trait continu noir c'est le variogramme modélisé. Nous constatons l'existence d'un effet de pépite chez tous les variogrammes. Le tableau IV.1 récapitule l'ajustement de nos variogrammes expérimentaux.

Tableau IV. 1 : Synthèse variogramme expérimental omnidirectionnel

Caractéristique modèle	Piézométrie	Conductivité	Débit spécifique	pH	Profondeur forée	Transmissivité
Type modèle	Gaussien	Exponentiel	Puissance	Exponentiel	Exponentiel	Gaussien
Pépite	68,87	19320	7,56	0,125	277,4	0
Portée	0,076	0,3149		0,551	0,209	0,114
Palier	56,26	20580		0,31	20580	$1,2 \times 10^{-6}$
Pente			1,58			
Puissance			4,29			
Facteur d'ajustement	$8,4952 \times 10^{-2}$	$3,8910 \times 10^{-2}$	$4,2874 \times 10^{-2}$	$3,0794 \times 10^{-3}$	$3,8910 \times 10^{-2}$	$2,9525 \times 10^{-1}$

#### IV.3.2.2 : Variogramme directionnel

Les figures IV.4 à 9 illustrent les variogrammes directionnels et les angles d'anisotropie de nos paramètres de forage. Dans la partie supérieure de ces figures est représenté le variogramme (en violet est le variogramme modélisé et en rouge le nuage de point) et la partie inférieure à gauche montre le variogramme surfacique avec au dessus l'ellipsoïde d'anisotropie orienté vers la direction de grande anisotropie. Cette anisotropie est également marquée sur ces figures par la variation brusque du comportement du nuage variographique.

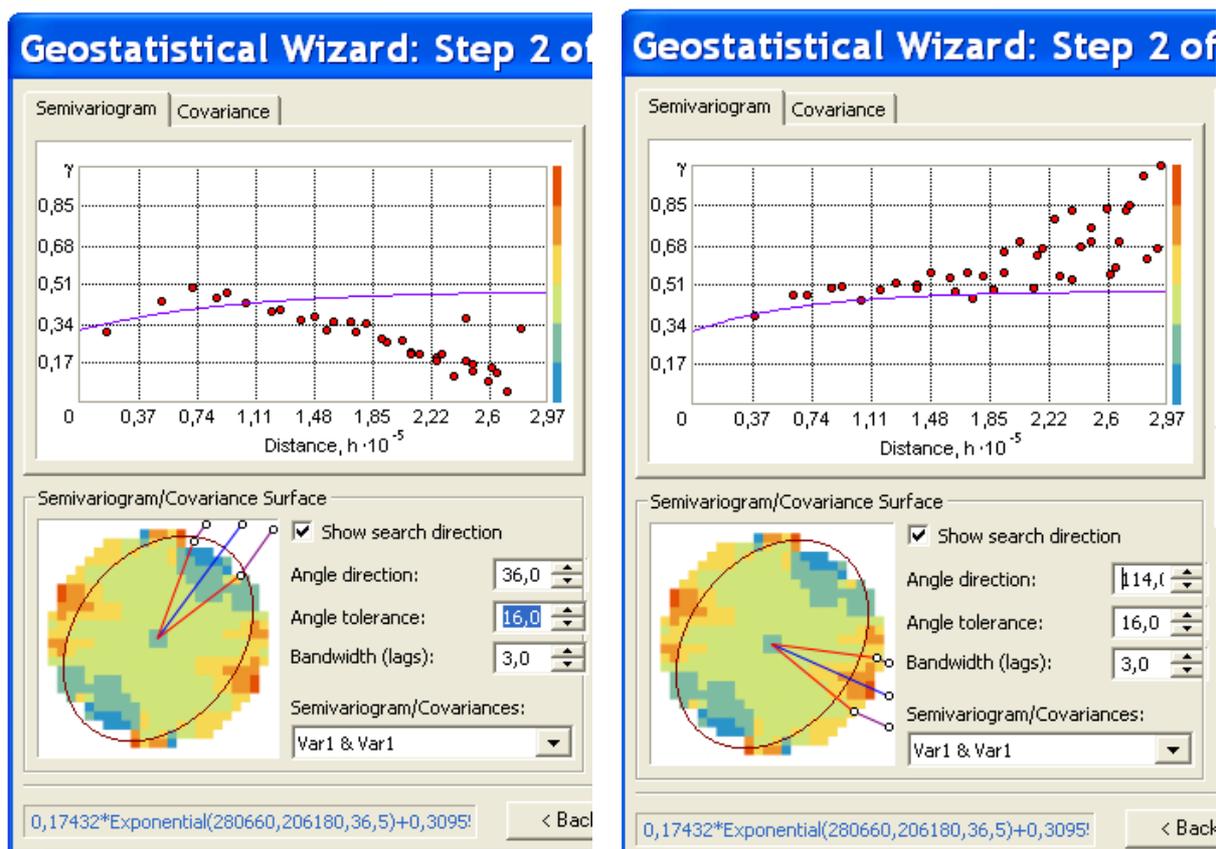


Figure IV.4 : Variogramme directionnel et direction d'anisotropie du pH

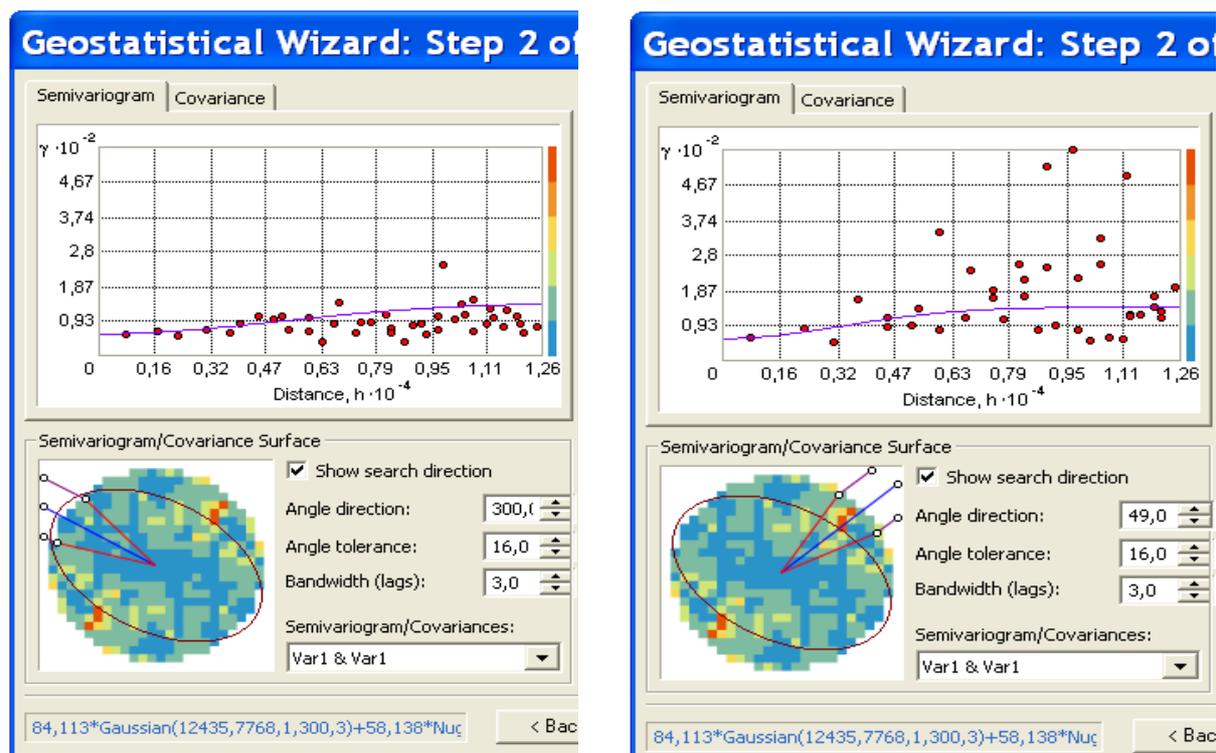


Figure IV.5 : Variogramme directionnel et direction d'anisotropie de la piézométrie

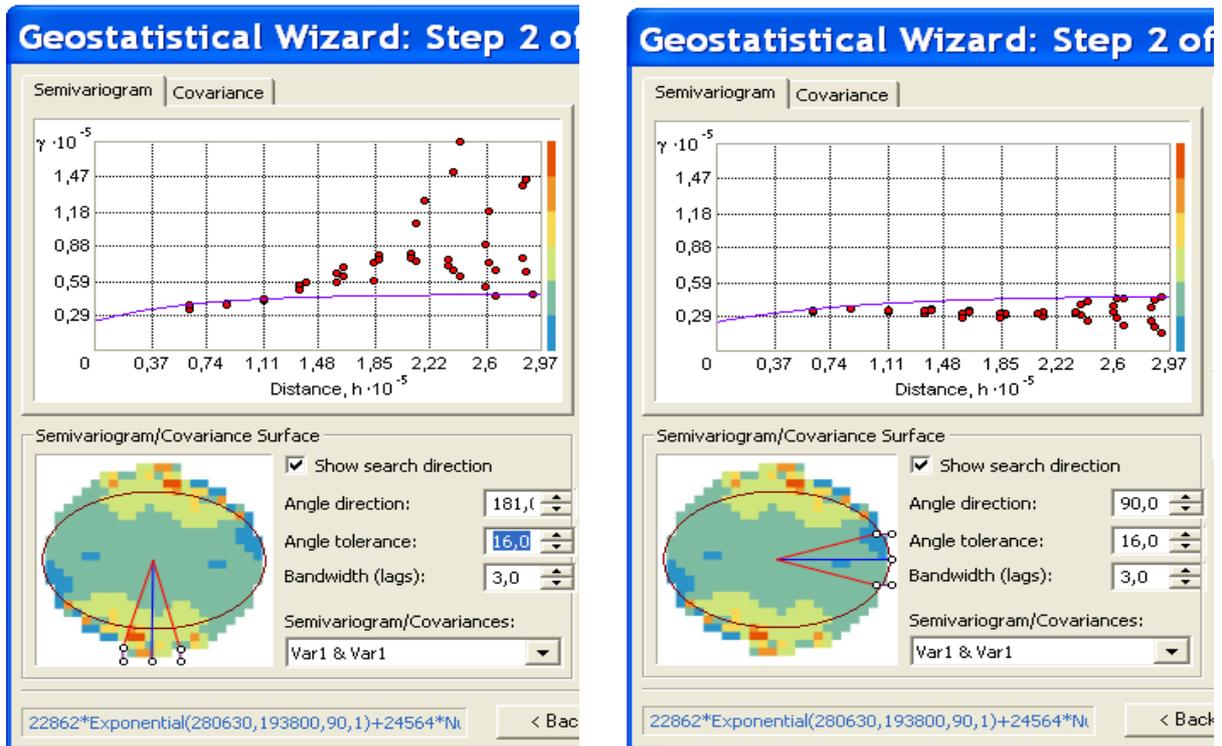


Figure IV.6 : Variogramme directionnel et direction anisotropie de la conductivité

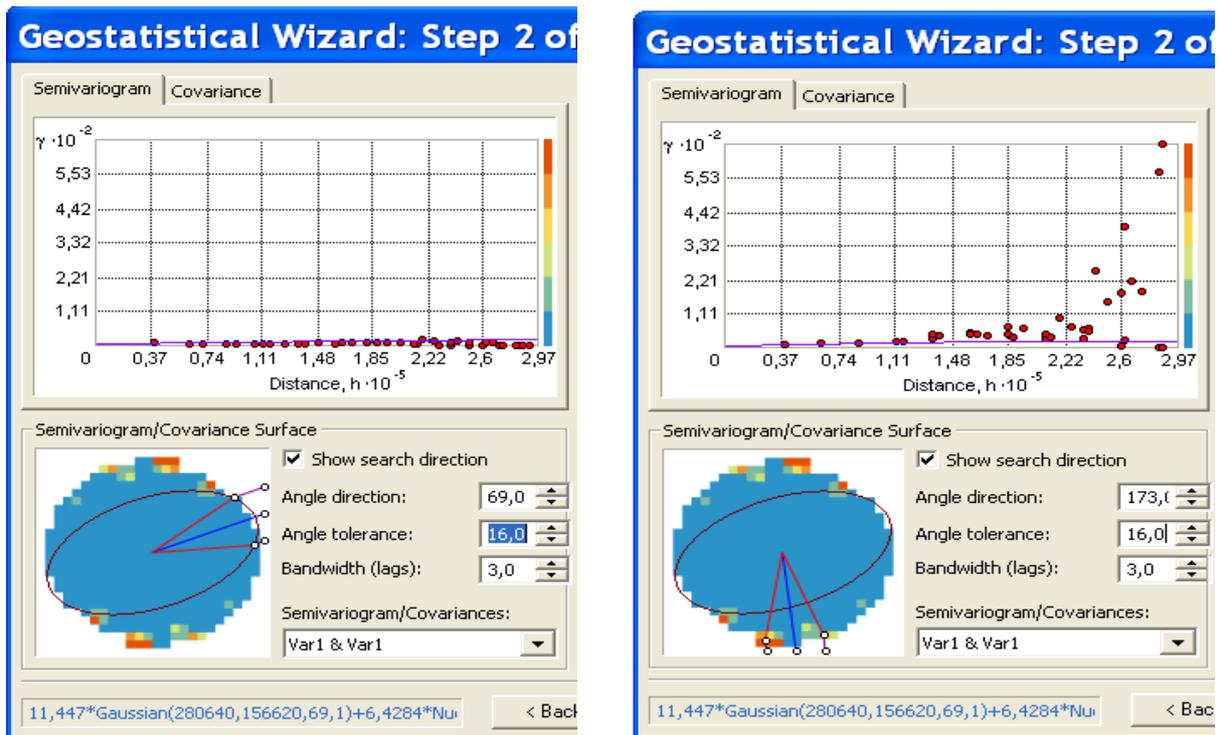


Figure IV.7 : Variogramme directionnel et direction d'anisotropie du débit spécifique

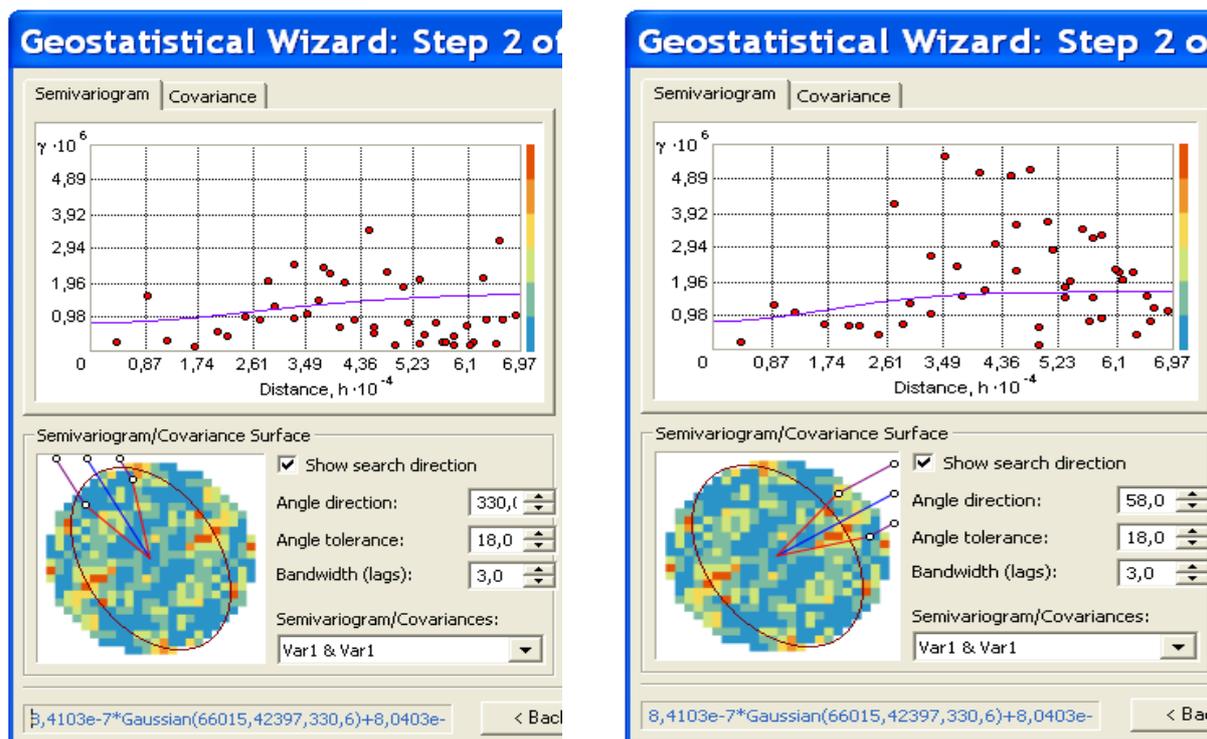


Figure IV.8 : Variogramme directionnel et direction anisotropie de la transmissivité

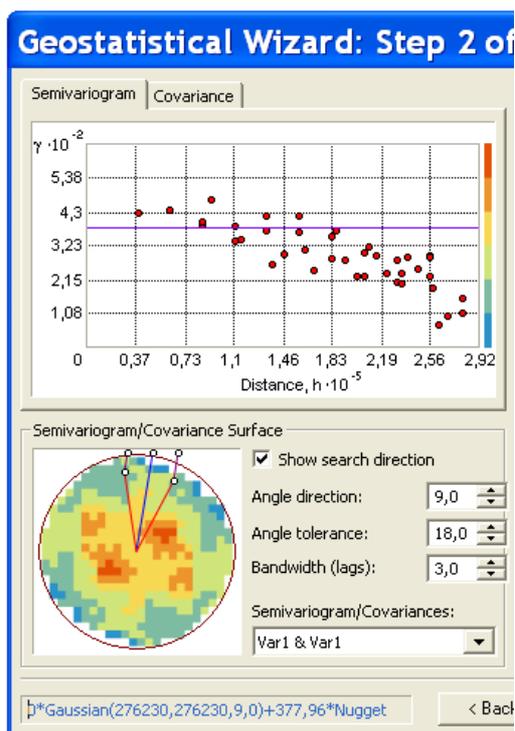


Figure IV.9 : Variogramme directionnel et direction d'anisotropie de la profondeur forée

Le tableau IV.2 fait un bilan de ces différentes figures.

Tableau IV. 2 : Synthèse variogramme directionnel

	pH	Piézométrie	Conductivité	Débit	Transmissivité	Profondeur forée
<b>Anisotropie</b>	36°	300°	90°	69°	300°	9°
	114	49°	181°	173°	58°	
<b>Modèle</b>	Exponentiel	Gaussien	Exponentiel	Gaussien	Gaussien	Gaussien

A la différence des autres, le paramètre « Profondeur forée » montre un variogramme modélisé « plat ».

#### IV.4 : Validation croisée

La validation croisée est la démarche qui permet d'évaluer différents modèles dans la mesure où elle fournit des critères statistiques de sélection dans le choix d'un modèle de variogramme. Le principe de la validation croisée consiste à éliminer temporairement un point de l'ensemble des données puis à estimer sa valeur par krigeage à l'aide des données restantes et du modèle de variogramme qui a été ajusté. Le résultat devrait s'approcher le plus possible d'une droite de pente 1 :1. Les paramètres statistiques que compile ArcGIS et qui nous permettent de choisir le meilleur modèle sont :

- L'erreur moyenne, c'est-à-dire la moyenne des erreurs d'estimation : Une bonne estimation fait tendre ce terme vers 0 ;
- L'écart type des erreurs d'estimation : Plus ce terme est faible et plus stable est l'estimateur. Pour une bonne estimation, ce terme est à 1 ;
- La moyenne de l'écart type de krigeage : Plus l'estimation est précise et plus l'écart type est petit, une bonne estimation va donc tendre à minimiser ce terme ;
- La moyenne de l'erreur réduite : Une bonne estimation approche ce terme de 0 ;
- L'écart type de l'erreur réduite : Pour une bonne estimation, ce terme tend vers 1.

Le tableau IV.3 ressort le bilan statistique sur l'erreur d'estimation par krigeage des différents modèles qui ont été retenus pour chaque paramètre de forage. Pour y arriver, nous avons compilé chaque paramètre suivant différent modèle que propose ArcGIS. Par la suite nous avons comparé les bilans statistiques des erreurs d'estimation dans l'optique de valider le modèle. Pour ces modèle qui ont été retenu, nous avons représenté en annexe III les graphes illustrant le rapprochement de la droite de régression linéaire (en bleue) des valeurs estimées à la droite de pente 1 :1 (point noir). L'axe des ordonnées représente les valeurs vraies et en abscisse sont les valeurs estimées.

Tableau IV. 3 : Récapitulatif des statistiques sur l'erreur d'estimation

	<b>Erreur moyenne</b>	<b>Ecart type des erreurs d'estimation</b>	<b>Moyenne de l'écart type de krigeage</b>	<b>Moyenne de l'erreur réduite</b>	<b>Ecart type de l'erreur réduite</b>
<b>pH</b>	-0,000670	0,5272	0,5834	-0,001409	0,9009
<b>Piézométrie</b>	0,04129	9,213	9,756	0,001535	0,9781
<b>Conductivité</b>	0,5017	178,3	165,8	0,002596	1,075
<b>Débit</b>	0,006867	3,749	2,608	0,003211	1,425
<b>Transmissivité</b>	0,0000055	0,001059	0,000959	0,006087	1,11
<b>Profondeur forée</b>	-0,1752	17,18	19,94	-0,008793	0,8619

#### IV.5 : Estimation par krigeage

Le krigeage est un interpolateur exact (la valeur estimée sur un point de mesure est égale à la valeur du point de mesure) et optimal (il minimise la variance sur l'erreur d'estimation). Il permet d'estimer des valeurs locales d'une variable en considérant la structuration spatiale des variables étudiées. La théorie du krigeage stipule que les données sont continues dans l'espace, soit de manière uniforme (isotrope) ou de manière sélective (anisotropie), angulaire ou par distance d'influence. Une fois la forme du variogramme expérimental connu, il est possible d'estimer les valeurs pour les sites où l'on ne dispose pas de données en appliquant un modèle sur le variogramme.

Plusieurs types de krigeage existent, mais nous nous attarderons dans le cadre de la présente étude sur le krigeage ordinaire. Ce dernier nous a permis d'obtenir les cartes en annexe IV.

La carte de pH montre que les teneurs comprises entre 6 et 7 sont dominantes sur le site de l'étude. Les concentrations basiques se retrouvent dans les départements de Tiéora, Sideradougou, Djigouera, Banzon, Zambo, Dissin, Bereba, Taho. La ville de Bobo-Dioulasso a un pH qui varie entre 4 et 7.

Les débits élevés se retrouvent, d'après la carte des débits, dans les Hauts-Bassins, dans le Sud-Ouest particulièrement dans les départements de Dissin, Gaoua, Zambo, Gueguere.

La conductivité est très élevée vers la région de la Boucle du Mouhoun (les départements de Boromo, Bagassi, Pa), dans les Hauts-Bassins, au Sud des Cascades et dans la région du Sud-

Ouest. Ils sont très faibles à la limite entre la région des Cascades et les Hauts-Bassins. La ville de Bobo-Dioulasso se caractérise par une variabilité des conductivités.

Les grandes profondeurs de forage sont concentrées dans la région des hauts-bassins et du Sud-Ouest et les faibles dans les Cascades. Toutefois, le Nord-Ouest des Hauts-Bassins présente également des profondeurs faibles. La ville de Bobo-Dioulasso présente des forages profonds.

Le niveau d'eau dans le sol est très bas dans les Hauts-Bassins vers la limite avec les Cascades et vers la limite avec la Boucle du Mouhoun (Département de Boni, Houndé). Bobo-Dioulasso présente des niveaux très bas d'eau souterraine, conséquence des forages profonds que présente la carte des profondeurs de forage.

Les valeurs élevées de transmissivité sont retrouvées dans la région des Hauts-Bassins dans les départements de Satiri, Bondokuy et au Sud-Ouest des Hauts-Bassins à la limite avec les Cascades.

## **V. : DISCUSSION**

### **V.1. : Place des outils d'aide à la décision dans la gestion des ressources en eau**

La région du Sud-ouest du Burkina Faso souffre d'une pression sur les ressources naturelles parmi lesquelles la ressource eau. Cet état est une conséquence de la croissance démographique, l'urbanisation et les progrès réalisés en termes d'industrialisation qui se combinent pour créer une demande en eau toujours plus importante. Cette augmentation de la demande encourage le pompage des terrains aquifères conduisant à une surexploitation des nappes souterraines. En plus de cette surexploitation, cette ressource court de risque de dégradation de sa qualité. Palier à ce fléau revient à mettre sur pied une plate forme de gestion qui devra concourir à pérenniser la ressource. En effet il s'agit d'une plate forme qui prendra en compte toutes les parties prenantes pouvant influencer directement ou indirectement sur la ressource eau. Pour ce faire il est indispensable de pouvoir concevoir des schémas qui pourront mettre en exergue tous ces paramètres susceptibles d'avoir des impacts sur la ressource en eau souterraine. Ces derniers serviront de support à la discussion et de communication et de rationalisation entre les intervenants (les associations d'usagers, les élus et l'administration) dans le processus de prise de décision. Ils permettront de mieux appréhender la problématique qui suscite une menace sur la ressource en eau et de mieux cerner de manière optimale la résolution à prendre pour y remédier. C'est donc cela un outil d'aide à la décision. C'est également la prise en compte de l'expérience, des données, et des connaissances spécifiques d'un problème, l'analyse et l'intégration de cette information pour produire un résultat aidant les décideurs (Clarinet, WG2, 2002). Ils aident à rendre la prise de décision robuste, consistante, reproductible et transparente.

Pour cette étude nous avons consacré nos investigations à travers les méthodes cartographiques afin de contribuer à l'élaboration de ces outils. Il a été question de faciliter la visualisation de concepts spatiaux nécessaires à la compréhension d'un phénomène et permettre de croiser les couches d'information pour permettre de prendre des décisions. En outre la mise en place de structures de décision concertée doit pouvoir permettre aux usagers d'élargir leur champ de vision en faisant apparaître la diversité du milieu naturel et les usages des autres acteurs sur l'ensemble du territoire considéré.

### **V.2. : Contribution des cartes thématiques à la gestion intégrée des eaux souterraines**

La qualité des eaux dans la région du Sud-ouest est menacée. Dans la mesure où on note dans cette zone la présence du deuxième centre urbain du pays, de centre industriel, importante activités agricoles. Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes servis des données

caractéristiques des forages de la région afin de contribuer à la gestion intégrée des ressources en eau souterraine. A cet effet, nous avons mis sur pied six cartes thématiques représentant chacune la répartition spatiale du pH, du débit, du niveau piézométrique, de la conductivité, de la transmissivité et la profondeur des forages.

Il est évident que la nature de l'encaissant conditionne le caractère acide, basique ou neutre des eaux souterraines. Cependant, cette qualité est hautement influencée par les activités anthropiques comme l'agriculture, les rejets industriels et domestiques. Dans le souci de préserver les normes de pH de consommation en eau, comprises entre 6,5 et 9, il nous a paru nécessaire de mettre sur pied une carte qui pourra représenter sur toute la région du Sud-ouest du Burkina la distribution spatiale du pH. Cet outil renseignera le gestionnaire du territoire sur les types d'activité à effectuer en vue d'occuper les sols, et ainsi de préserver la ressource eau souterraine.

Si l'on considère exclusivement la distance qui sépare le niveau piézométrique et la surface du sol, il est certain que cette distance croît disproportionnellement avec la vulnérabilité de la nappe. De ce fait, il est possible à travers la représentation cartographique du niveau piézométrique de localiser les zones où l'accessibilité à la ressource est évidente, donc susceptible de pollution ou de pompage. Et par ailleurs orienter les activités pouvant avoir des impacts sur la ressource dans ces zones. Les cartes piézométriques sont des outils de contrôle du niveau d'eau dans le sol afin de suivre son évolution et de prévoir les effets de pompage de la nappe ou des impacts climatiques. Les cartes piézométriques orientent également sur la dynamique des nappes, c'est-à-dire les directions d'écoulement de ces dernières. Toutefois, elles sont également des premiers outils à consulter pour la mise en place des AEP. Il n'est pas à ignorer que les AEP sont des stratégies adoptées pour permettre l'accessibilité à l'eau potable par tous (GWP). Et également de minimiser l'exploitation anarchique et abusive des ressources en eau souterraine par la construction des points d'eau communautaire. Cependant, les paramètres comme le débit que peut fournir un forage reste également indispensable dans les projets d'AEP.

Les débits utilisés pour cette étude sont particuliers aux forages. En effet la carte de débit qui a été représentée oriente sur la capacité de production d'un forage. Il permet de quantifier la ressource que peut fournir un forage pour une population bien connue afin de spéculer sur le nombre de point d'eau à mettre dans cette localité. En effet, le débit est un paramètre à prendre en compte dans la gestion des ressources en eau souterraine dans la mesure où il permet d'estimer la durée d'exploitation de la nappe en fonction de la population et bien d'autre paramètre comme la pluviométrie. La superposition de la carte des débits à celle du

niveau piézométrie permet de répertorier les zones optimales d'implantation des points d'eau. Toutefois, il est à noter que seuls ces deux paramètres ne suffisent pas pour conclure sur l'implantation d'un forage. Ainsi, à travers la carte des débits, il est évident d'avoir une idée sur la productivité des forages par zone ou secteur dans le Sud-ouest du Burkina.

La conductivité et la transmissivité sont également des paramètres qui caractérisent le dynamisme des forages voire des nappes. La conductivité est une propriété intrinsèque du milieu qui définit sa capacité à laisser circuler l'eau ; elle croit proportionnellement avec la porosité du milieu. La recherche des contrastes des paramètres pH et conductivité entre différents points de mesure facilite la mise en évidence de zone d'alimentation, de pollution ou de géologie différente. La transmissivité quant à elle permet d'évaluer le débit que peut capter un forage. Bref il caractérise la productivité d'un aquifère.

La profondeur forée est également un paramètre qui oriente les responsables de projet d'AEP sur la profondeur max des forages, ainsi sur la valeur économique.

### **V.3. : Mise en place des plans d'aménagement**

Avec l'adoption en 2003 du Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressource en Eau (PAGIRE) par le gouvernement Burkinabé, il s'en suit également la formation des CLE qui sont des Comités Locaux de l'Eau et qui devraient prôner pour une gestion durable des ressources. Il s'agit d'un ensemble constitué des associations d'usagers, des élus et de l'administration, qui prennent des décisions en vue d'assurer la gestion durable des ressources. Pour mieux faire véhiculer les messages et mieux appréhender les problématiques de gestion des ressources en eau, nous pensons que ces cartes thématiques sont des outils de base dont ces CLE doivent se référer avant de prendre des décisions. En outre, une GIRE efficace repose sur une bonne connaissance des ressources en eau de surface ainsi que souterraine. Et ces plans d'information nous renseignent sur la nature des eaux souterraines afin de mieux les connaître et de les gérer. Il est démontré que tout aménagement du territoire ne saurait se passer de la carte piézométrique ou de la carte de qualité des eaux comme le pH. Bien qu'étant à l'échelle de toute une région, ces plans d'information vont dans le même sens que la carte de vulnérabilité des ressources en eau établit par Bieupoudé (2008) sur le bassin versant du Kou.

## **CONCLUSION**

La présente étude intègre le contexte de la gestion intégrée des ressources en eau dans la région du Sud-ouest du Burkina Faso. Il s'agit d'une contribution à la gestion et à la protection des ressources en eau souterraine par le développement d'outil d'aide à la mobilisation de ces dernières.

La région du Sud-ouest est la plus pluvieuse du Burkina et donc très sollicitée. Par conséquence elle souffre d'un accroissement démographique et est la cible de l'implantation de nombreuses industries. Ainsi, ses ressources en eau sont menacées sur les plans quantitatif et qualitatif.

Nous avons retenu six paramètres (Piézométrie, conductivité, débit, pH, transmissivité et profondeur de forage) après une analyse exploratoire de la masse de données caractéristiques des forages. L'analyse variographique, par le biais des logiciels ArcGIS et Variowin, nous a permis de ressortir les variogrammes omnidirectionnel et directionnel. Et les différentes cartes thématiques ont été obtenues par krigeage ordinaire.

A travers ces cartes nous pouvons apprécier la répartition spatiale de nos paramètres, voire cibler les zones à forte ou faible teneur de ces paramètres. Ces cartes d'information sont des critères qui devraient être pris en compte dans le cadre de projet d'approvisionnement en eau des populations, d'aménagement du territoire et de suivi des ressources en eau de la zone d'étude.

## **RECOMMANDATION**

Le développement d'outil cartographique d'aide à la décision est un moyen efficace de contribution à la gestion intégrée des ressources en eau dans le Sud-ouest du Burkina. Cependant, pour une exploitation optimale de ces cartes il est judicieux de les superposer avec d'autres cartes d'information afin de ressortir des plans de gestion plus souple. Pour des raisons de très faible représentativité des données, la qualité chimique des eaux a été abordée très partiellement au cours de cette étude. Il est opportun d'élaborer des cartes de qualité chimique des eaux souterraines du Sud-ouest du Burkina par des techniques comme le cokrigeage. Toutefois, il est indispensable de consolidé ces données dan une base afin de la réactualiser chaque fois et ainsi assurer le suivi des ressources en eau de la région.

## **BIBLIOGRAPHIE**

Albergel Jean (1987) : Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface – Application aux petits bassins du Burkina Faso. IAHS Publ. n°168, 355-365.

Ardoin S. (2004) : Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de doctorat Science de l'eau dans l'environnement continental. Université de Montpellier II. 437p.

Arnaud, M. et Emery, X. (2000) : Estimation et interpolation spatiale. Hermes Science Publications, Paris.

Bieupoudé, G. P., (2008) : Mapping groundwater intrinsic vulnerability using a new physical based modelling in Kou basin (Bobo-Dioulasso, Burkina faso). Mémoire pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'Équipement Rural. Institut International de l'eau et de l'Environnement (2iE). 83p.

Boulet R. (1976) : Notice et carte des ressources en sol de la Haute-Volta en 5 coupures au 1/500 000. ORSTOM, Paris.

Brouyère S., P. Y. Jeannin, A. Dassargues, N. Goldscheider, I. C. Popescu, M. Sauter, I. Vadillo et F. Zwahlen, (2001) : Evaluation and validation of vulnerability concepts using a physically based approach. Actes du 7<sup>ème</sup> Colloque d'hydrogéologie en pays Calcaire et Milieu Fissuré, Besançon, France, 20-22 sept 2001.

Clarinet (2002) : Review of Decision Support Tools for Contaminated Land Management, and their Use in Europe.

Cressie, N. A. C. (1993) : Statistics for spatial data. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics : Applied Probability and Statistics. John Wiley & Sons Inc., New York. Revised reprint of the 1991 edition. A Wiley-Interscience Publication.

Cressie Noel A. C. (1993) : Statistic for spatial data – Revised Edition – Wiley Hurbert Jayet (1993) – Analyse spatial quantitative – Economica

Dezetter, A. ; Traore, S. & Bicaba, K. (1998) : Gestion intégrée et variabilité des ressources en eau dans le Sud-Ouest du Burkina Faso. IAHS Publ. n°252, 387-394.

Desconnets Jean-Christophe ; Diallo Amadou ; Traoré Oumar ; Chene Jean-Michel ; Morin Guy (1998) : Exemple d'application du modèle CEQUEAU-ONU : Evaluation de l'impact des aménagements sur les écoulements de la rivière Nakambé, Burkina Faso. IAHS Publ. n°252, 375-385.

Fontès J. et Guinko S. (1995) : Carte de la végétation et de l'occupation du sol du Burkina Faso. Notice explicative. Toulouse, Institut de la Carte Internationale de la Végétation ; Ouagadougou, Institut du Développement Rural-Faculté des Sciences et Techniques, 67p.

Gardin N., Sauret S., Diallo M., Derouane J., Brouvère S., (2009) : Appui à la gestion et à la protection des ressources en eau souterraine exploitées dans la région de Bobo-Dioulasso-Rapport technique n°1 (2005-2008) Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques des Hauts-Bassins, Dobo-Dioulasso.

Girard, G. ; Goula-Bi-Tie, A. ; Triboulet, J. P. (1991): Apport de la modélisation hydrologique à l'étude des bilans hydriques dans la région soudano-sahélienne. IAHS Publ. n° 199, 523-530.

Gouvernement du Burkina Faso (1997) : Constitution du Burkina Faso. Loi n°002/97/AD. Ouagadougou. 34p.

Hubert, P. ; Carbonnel, J. P. & Chaouche, A. (1989): Segmentation des séries hydrométriques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.* 110, 349-367.

Kam A., (2007) : Caractérisation des sources de pollution agricoles dans le bassin du Kou et première ébauche de cartographie de la vulnérabilité des aquifères APEFE/DRI/CGRI – Projet « Appui à la gestion et à la protection des ressources en eau souterraines exploitées dans la région de Bobo-Dioulasso », Bobo-Dioulasso, pp. 68.

Manley, R. E. (2003) : Guide to using HYSIM. Water resource association Ltd. Great-Britain. 105 p.

Ministère de l'environnement de l'eau du Burkina Faso, (2001b) : Loi d'orientation relative à la gestion de l'eau. Loi n° 002-2001/an. Ouagadougou.

Ministère de l'Eau et de l'Environnement du Burkina Faso (2001) : Etat des lieux des ressources en eau et de leur cadre de gestion.

Nolin M. C., Cambouris A. N. et Simard R. R. (1997) : La variabilité des sols : Son origine et sa gestion. Pages 35-77 dans Editeur (ed.). Actes du Colloque : Nouvelle technologie en agriculture, campus du fort St-Jean.

Okabe A., Boots B. et Sugihara K. (1992) : Spatial tessellations : Concepts and applications of Vorono, diagrams. Wiley Series in probability and Mathematical Statistics : Applied Probability and Statistics. John Wiley & Sons Ltd., Chichester. With a foreword by D. G. Kendall.

Ouedraogo Mahaman (2001) : Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau de l'Afrique de l'Ouest – Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale. Thèse Science de l'eau dans l'environnement continental. Université de Montpellier.

Popescu I. C. et M. Dachy, (2004) : Tests d'une méthode de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque applicable aux nappes aquifères de la région Wallonne. Application à l'aquifère calcaire du Néblon. Rapport final. Université de Liège. 155p.

Rescan Mathieu (2005) : Préviation des ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale jusqu'en 2009 par application des sorties du modèle d'évolution du climat HadCM3 au modèle hydrologique GR2M. DEA Science de l'eau et de l'environnement continental. Univ. Montpellier II. 103p.

Ripley B. D. (1981) : Spatial statistics. John Willey & Sons Inc., New York. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics.

Sauret E., (2008) : Contribution à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du système aquifère dans le bassin du Kou. Mémoire de fin d'étude de Diplôme d'Etudes Approfondies en Sciences Appliquées. Université de Liège (Belgique). 96p.

Savadogo Paul W. ; Traore Oula ; Topan Marian ; Tapsoba K. Hermann ; Sedogo P. Michel & Bonzi-Coulibaly L. Yvonne (2006) : Variation de la teneur en résidus de pesticides dans les sols de la zone cotonnière du Burkina Faso. Journal Africain des Sciences de l'Environnement, Numéro 1, 29-39.

Serval, E. ; Paturel, J. E. ; Lubes-Niel, H. ; Kouame, B. & Masson, J. M. (1997a) : Variabilité des régimes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. CR. *Acad. Sei., Paris 324*, série Ha, 835-838.

Servat, E. ; Paturel, J. E. ; Lubes-Niel, H. ; Kouame, B. ; Travaglio, M. & Marieu, B. (1997b) : De la diminution des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale. CR. *Acad. Sei., Paris 325*, série Ha, 679-682.

Traoré S., Gombert P., (1997) : Variations des débits interannuels de la source de la Guinguette. Rapport Interne : Direction Régionale de l'Hydraulique des Hauts-Bassins, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 8p.

Wackernagel H. (2003) : Multivariate Geostatistics : an Introduction with Applications. Springer-verlag, Berlin. Third completely revised edition.

Wellens, J., F. Traoré, M. Diallo, D. Dakouré et N. F. Compaoré, (2009) : Renforcement structurel de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou. Rapport Technique 2. APEFE-DRI/CGRI. Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 131 p.

Yéni Yaro (2007) : Modélisation de la pollution des nappes liées à l'utilisation des pesticides en zone cotonnière au Burkina. Projet de recherche financé par la Fondation Internationale pour la Science. Journées scientifiques du 2ie et du forum du réseau CREPA. 5 et 6 mars 2007. Ouagadougou, Burkina.

Zougouri T., (2007) : Rapport de campagne d'analyses des eaux résiduaires industrielles de la ville de Bobo-Dioulasso du 12 au 15 mars 2007. Laboratoire National d'Analyse des Eaux, Ouagadougou, pp. 10.

Site internet :

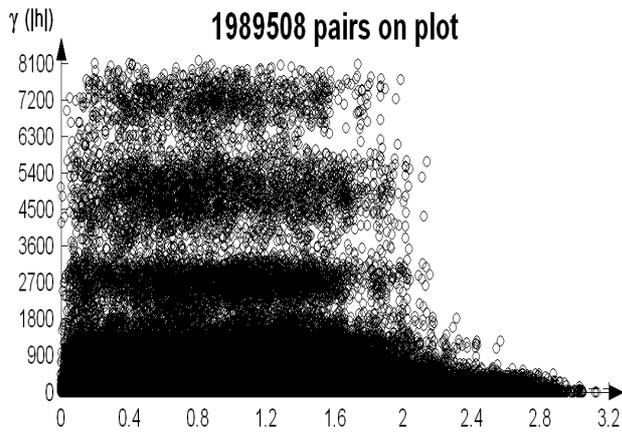
[www.planete-burkina.com/geographie\\_burkina.php](http://www.planete-burkina.com/geographie_burkina.php)

[www.fao.org/ag/AGP/agps/pgrfa/pdf/burkina/pdf](http://www.fao.org/ag/AGP/agps/pgrfa/pdf/burkina/pdf)

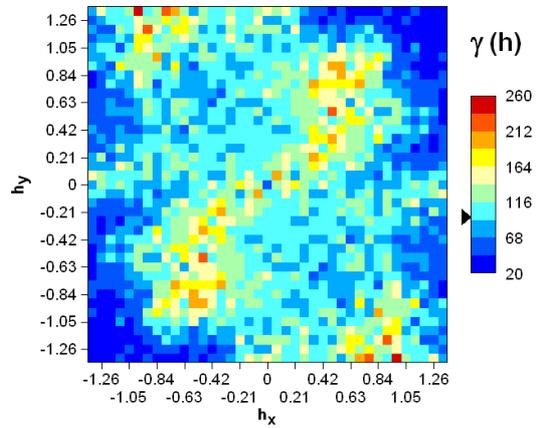
[www.ontb.bf/burkina./geo-climat.htm](http://www.ontb.bf/burkina./geo-climat.htm)

**ANNEXES**

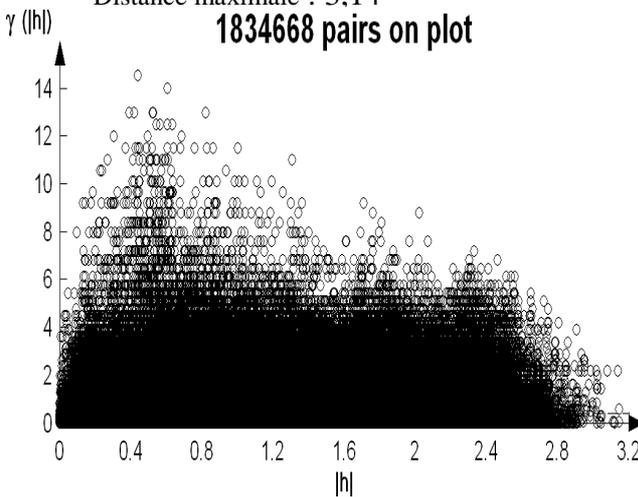
**Annexe I : Nuage et surface variographique d'après Variowin 2.2**



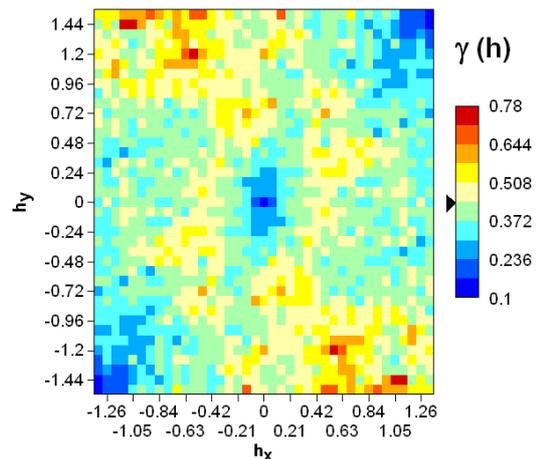
Nuée variographique piézométrie  
Angle tolérance : 90°  
Distance maximale : 3,14



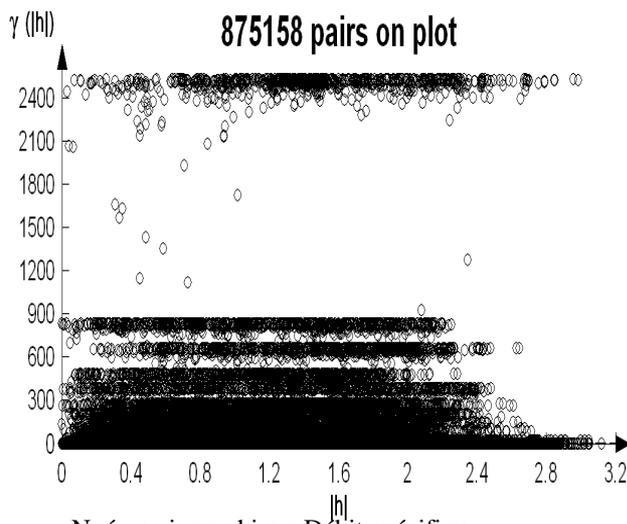
Variogramme surfacique piézométrie  
Lag spacing : 0,07  
Number of lag : 19



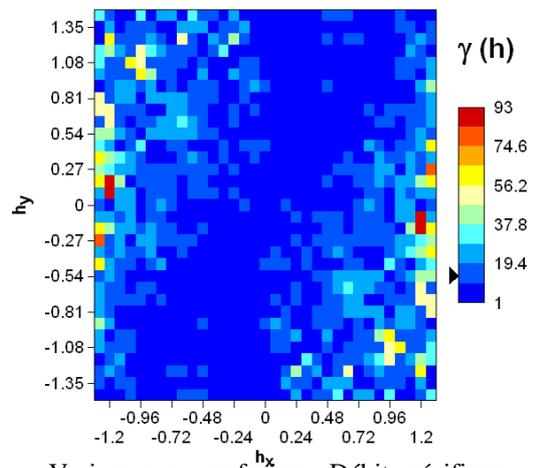
Nuée variographique pH  
Angle tolérance : 90°  
Distance maximale : 3,24



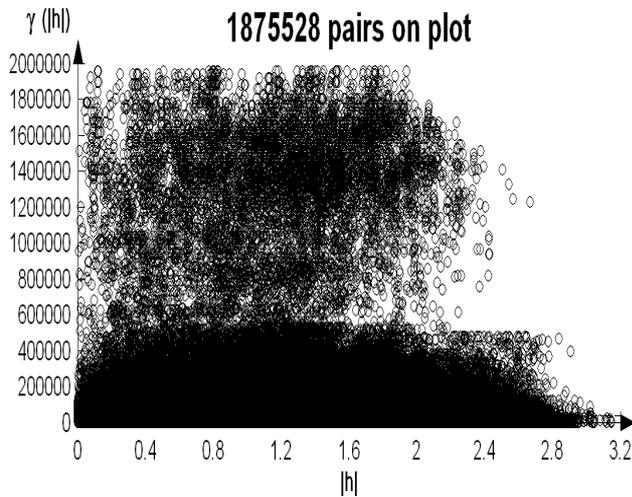
Variogramme surfacique pH  
Lag spacing : X = 0,07 et Y = 0,08  
Number of lag : 19



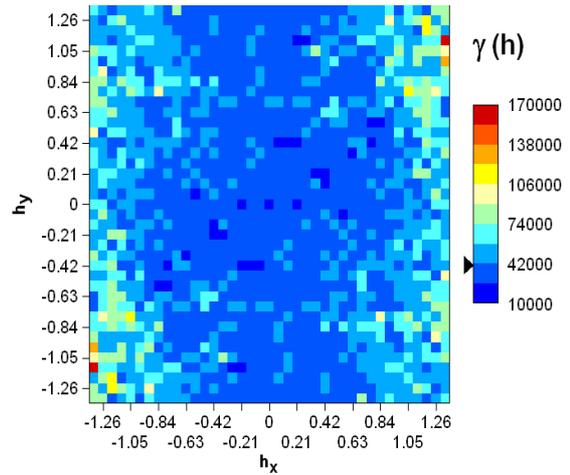
Nuée variographique Débit spécifique  
Angle tolérance : 90°  
Distance maximale : 3,14



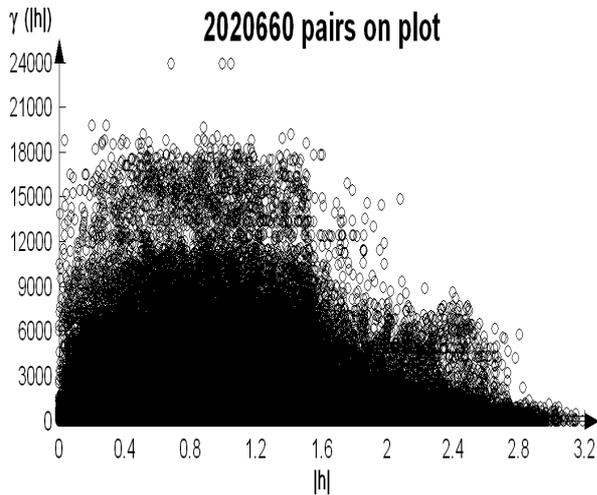
Variogramme surfacique Débit spécifique  
Lag spacing : X = 0,08 et Y = 0,09  
Number of lag : 16



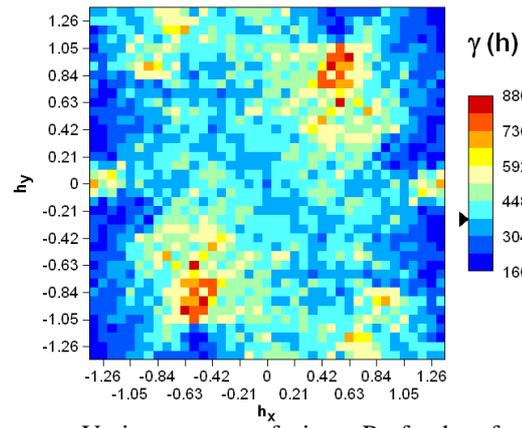
Nuée variographique Conductivité  
Angle tolérance : 90°  
Distance maximale : 3,24



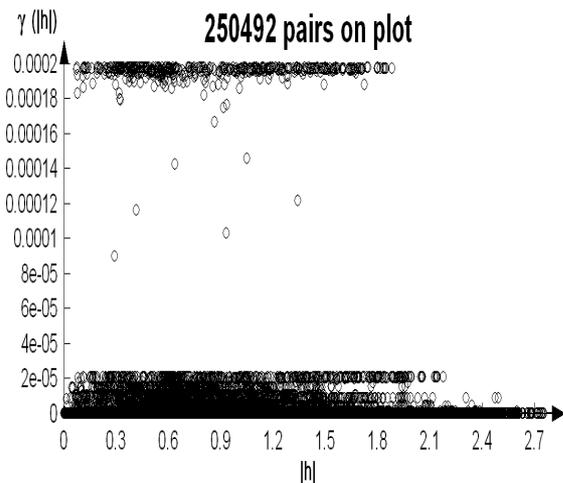
Variogramme surfacique Conductivité  
Lag spacing : 0,07  
Number of lag : 16



Nuée variographique Profondeur forée  
Angle tolérance : 90°  
Distance maximale : 3.24



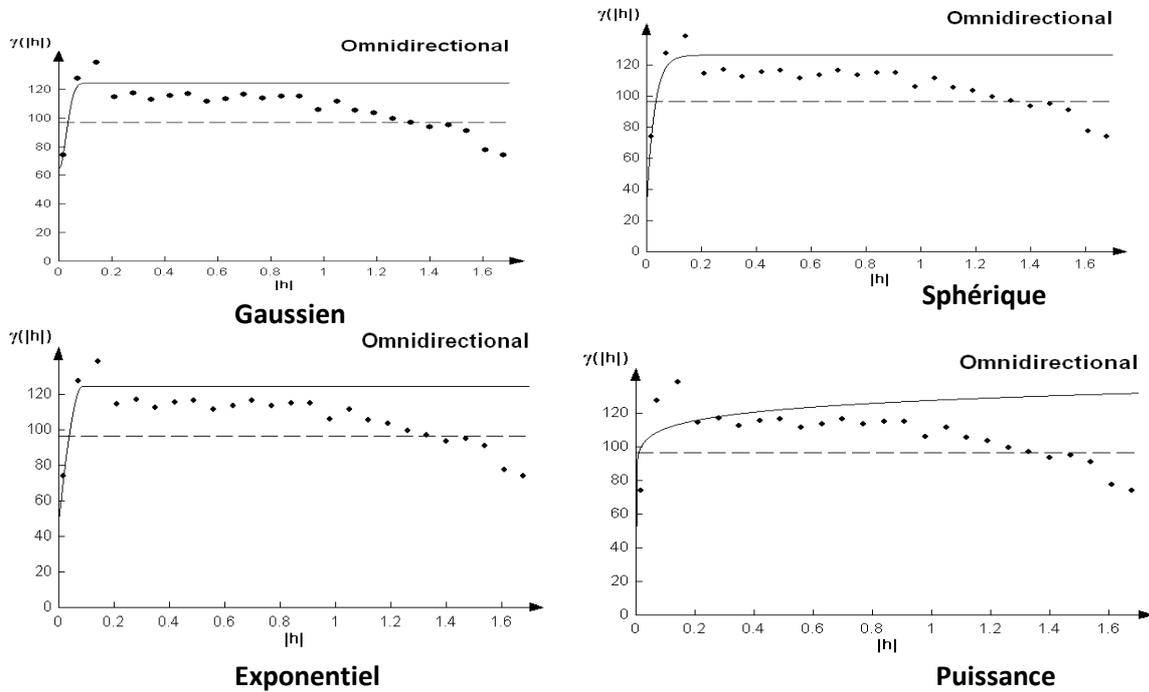
Variogramme surfacique Profondeur forée  
Lag spacing : 0,07  
Number of lag : 19



Nuée variographique Transmissivité  
Angle tolérance : 90°  
Distance maximale : 2.8

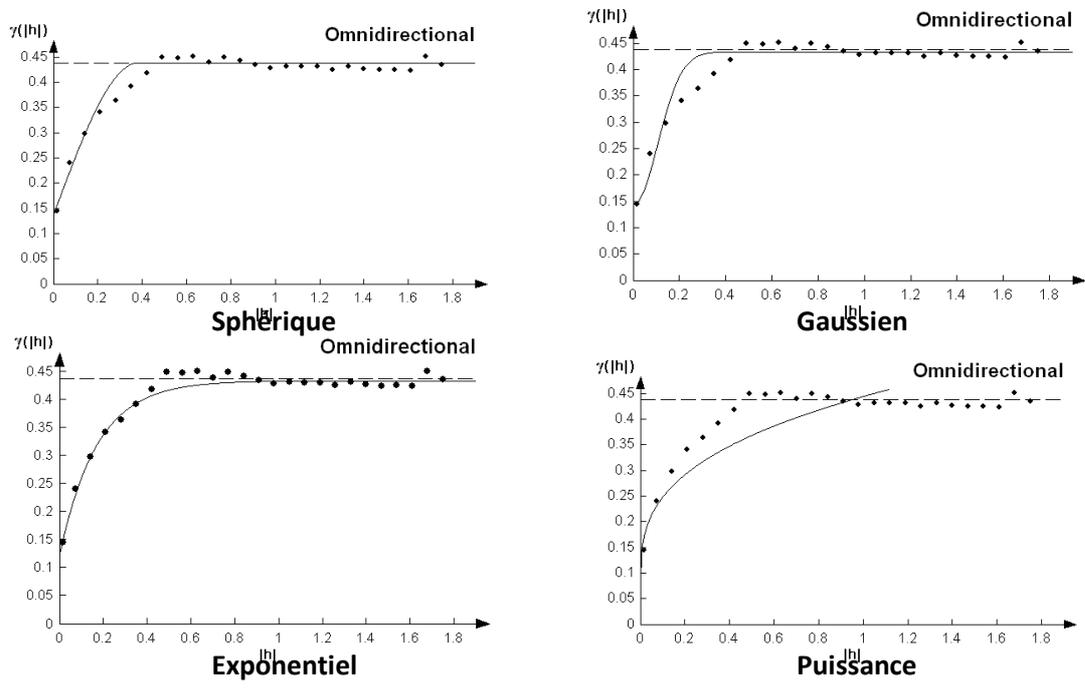
## Annexe II : Variogramme omnidirectionnel

### Variogramme expérimental piézométrie



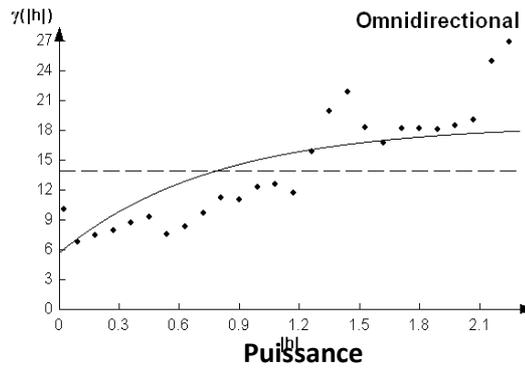
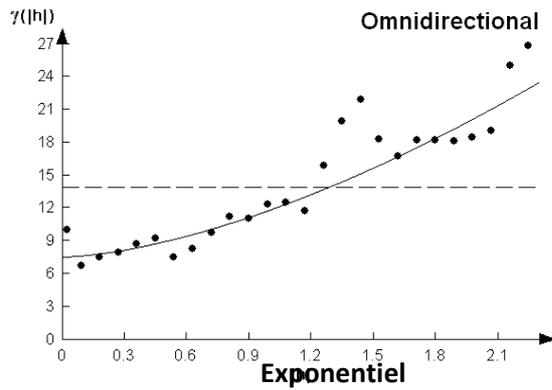
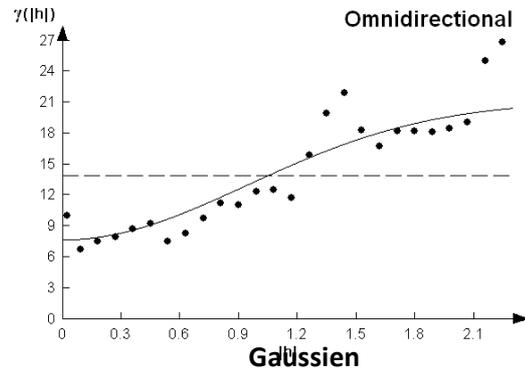
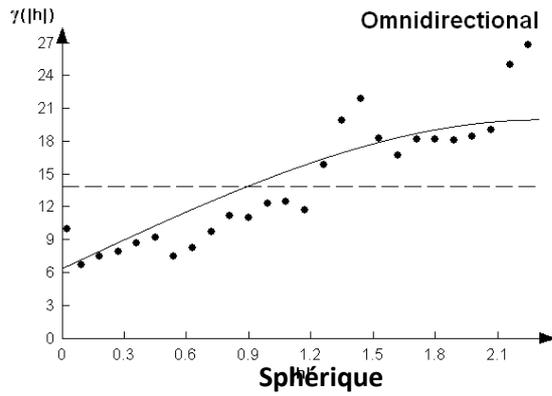
Type modèle	Gaussien	Sphérique	Exponentiel	Puissance
Pépite	63,99	49,47	30,07	15,52
Portée	0,068	0,085	0,085	
Palier	60,14	75,66	97	
Pente				112,8
Puissance				0,07
Direction	0	0	0	0
Anisotropie	1	1	1	1
Facteur d'ajustement	7,2224e-2	7,1593e-2	8,3478e-2	2,9437e-1

### Variogramme expérimental pH



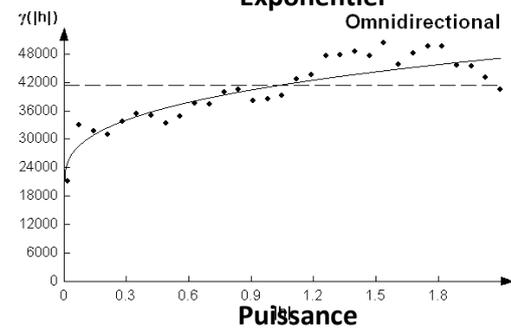
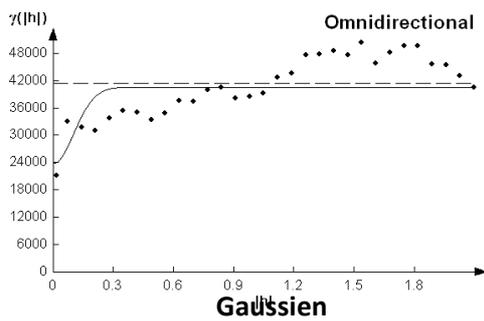
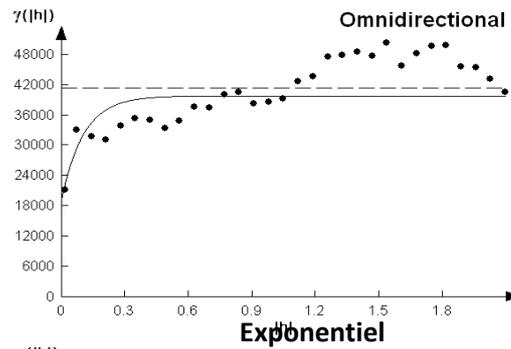
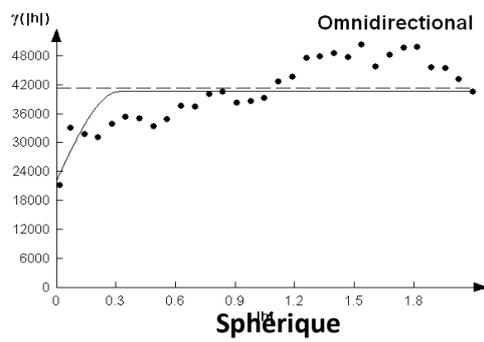
Type modèle	Sphérique	Gaussien	Exponentiel	Puissance
Pépite	0,14	0,145	0,125	0,085
Portée	0,38	0,247	0,551	
Palier	0,3	0,29	0,31	
Pente				0,34
Puissance				0,30498
Direction	0	194,9	90	90
Anisotropie	1	12	0,093	0,61
Facteur d'ajustement	6,9096e-3	1,9273e-2	3,0794e-3	3,2194e-2

Variogramme expérimental débit spécifique



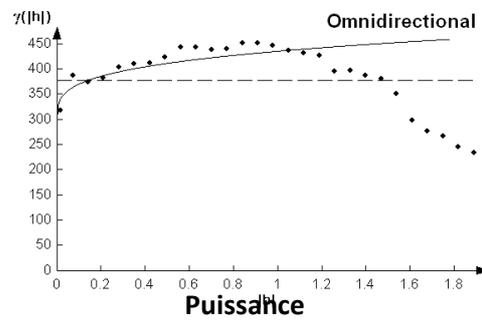
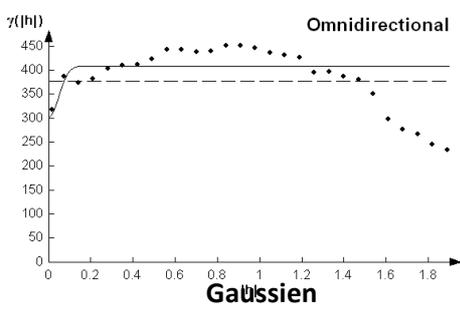
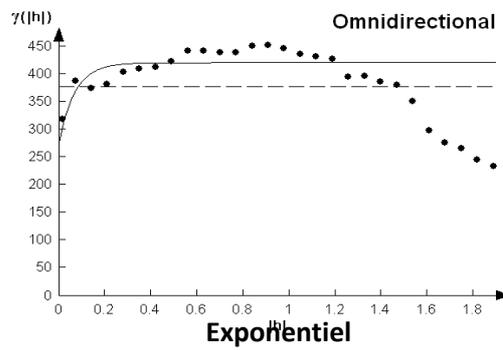
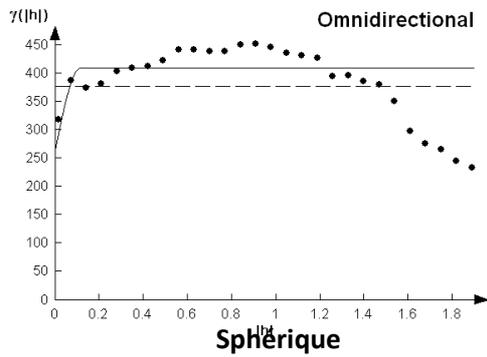
Type modèle	Sphérique	Gaussien	Exponentiel	Puissance
Pépite	6,44	7,7	5,74	7,56
Portée	2,3	2,37	2,3	
Palier	13,58	13,44	12,8795	
Pente				1,58
Puissance				4,29
Direction	0	0	0	0
Anisotropie	1	1	1	1
Facteur d'ajustement	8,0277e-2	5,0655e-2	1,3374e-1	4,2874e-2

## Variogramme expérimental conductivité



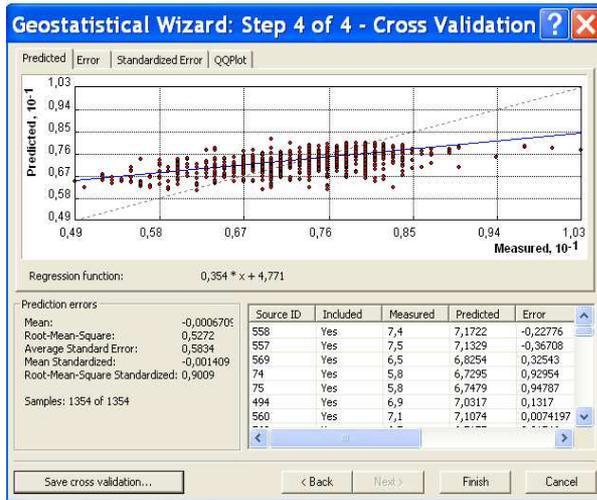
Type modèle	Sphérique	Exponentiel	Gaussien	Puissance
Pépite	22260	19320	23940	16740
Portée	0,315	0,3149	0,252	
Palier	18480	20580	16800	
Pente				21600
Puissance				0,33
Direction	0	0	0	0
Anisotropie	1	1	1	1
Facteur d'ajustement	5,2258e-2	3,8910e-2	6,7585e-2	5,7686e-2

Variogramme expérimental profondeur forée

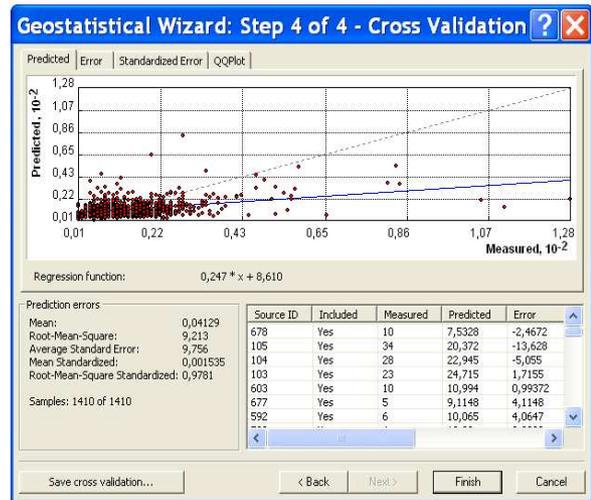


Type modèle	Sphérique	Exponentiel	Gaussien	Puissance
Pépite	266	277,4	304	296,4
Portée	0,114	0,209	0,114	
Palier	144,4	144,4	106	
Pente				140
Puissance				0,27
Direction	0	0	0	0
Anisotropie	1	1	1	1
Facteur d'ajustement	2,5851e-2	1,7069e-2	2,3306e-2	2,0015e-2

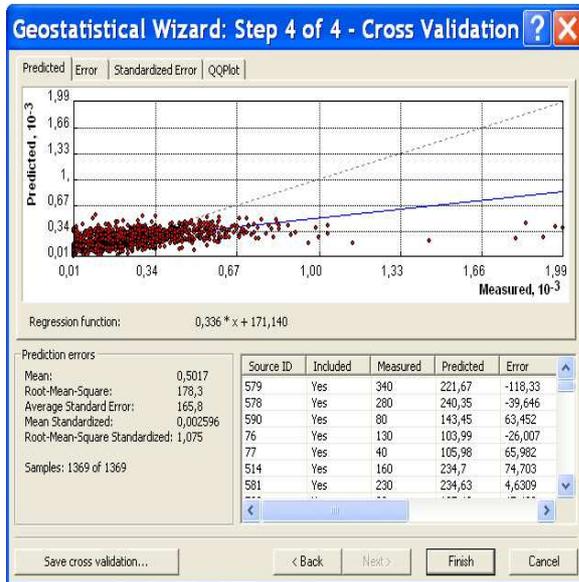
Annexe III : Validation croisée



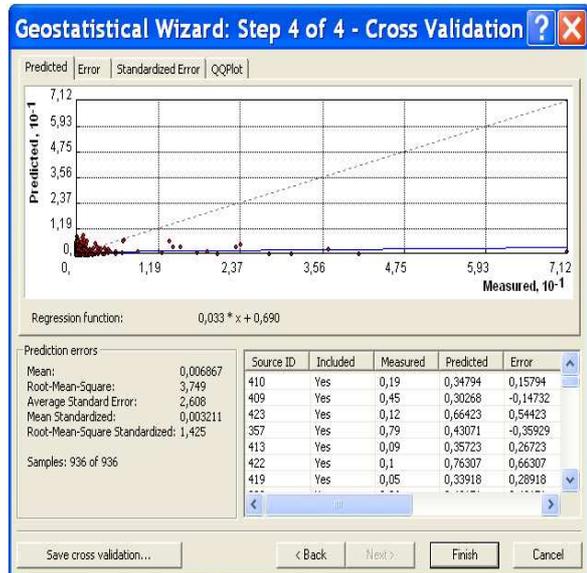
pH



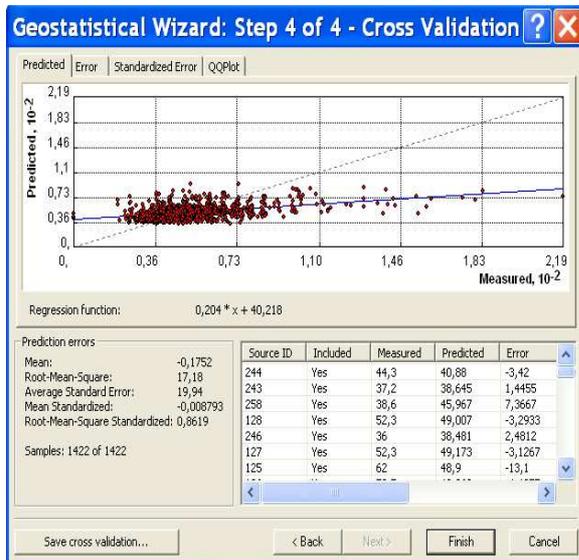
Piézométrie



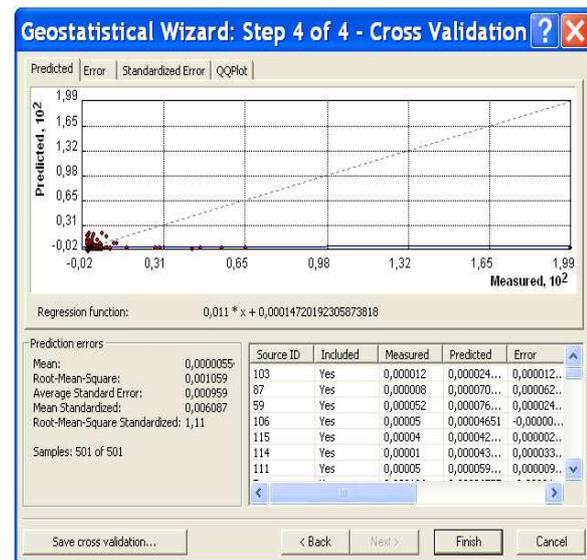
Conductivité



Débit

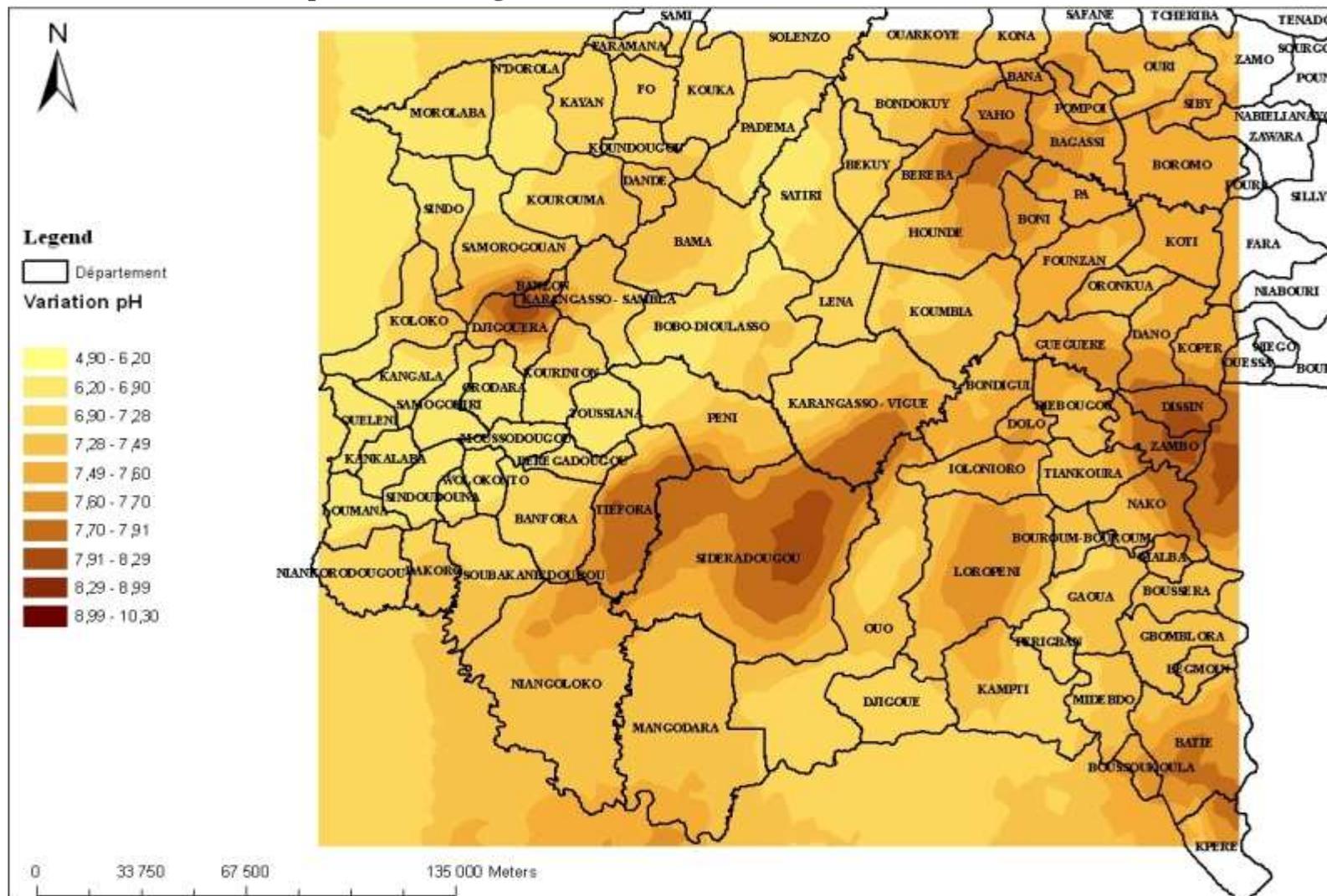


Profondeur forée

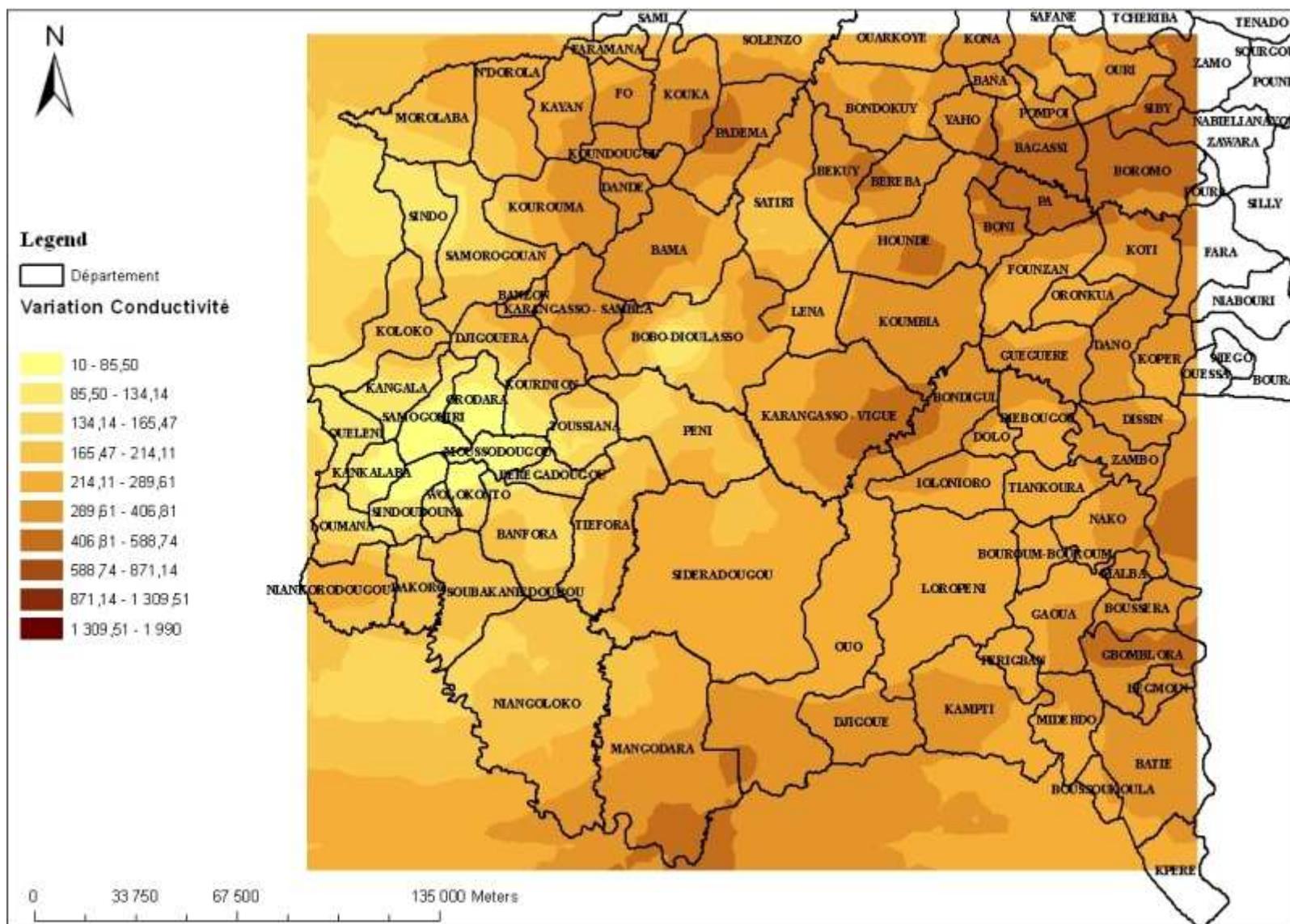


Transmissivité

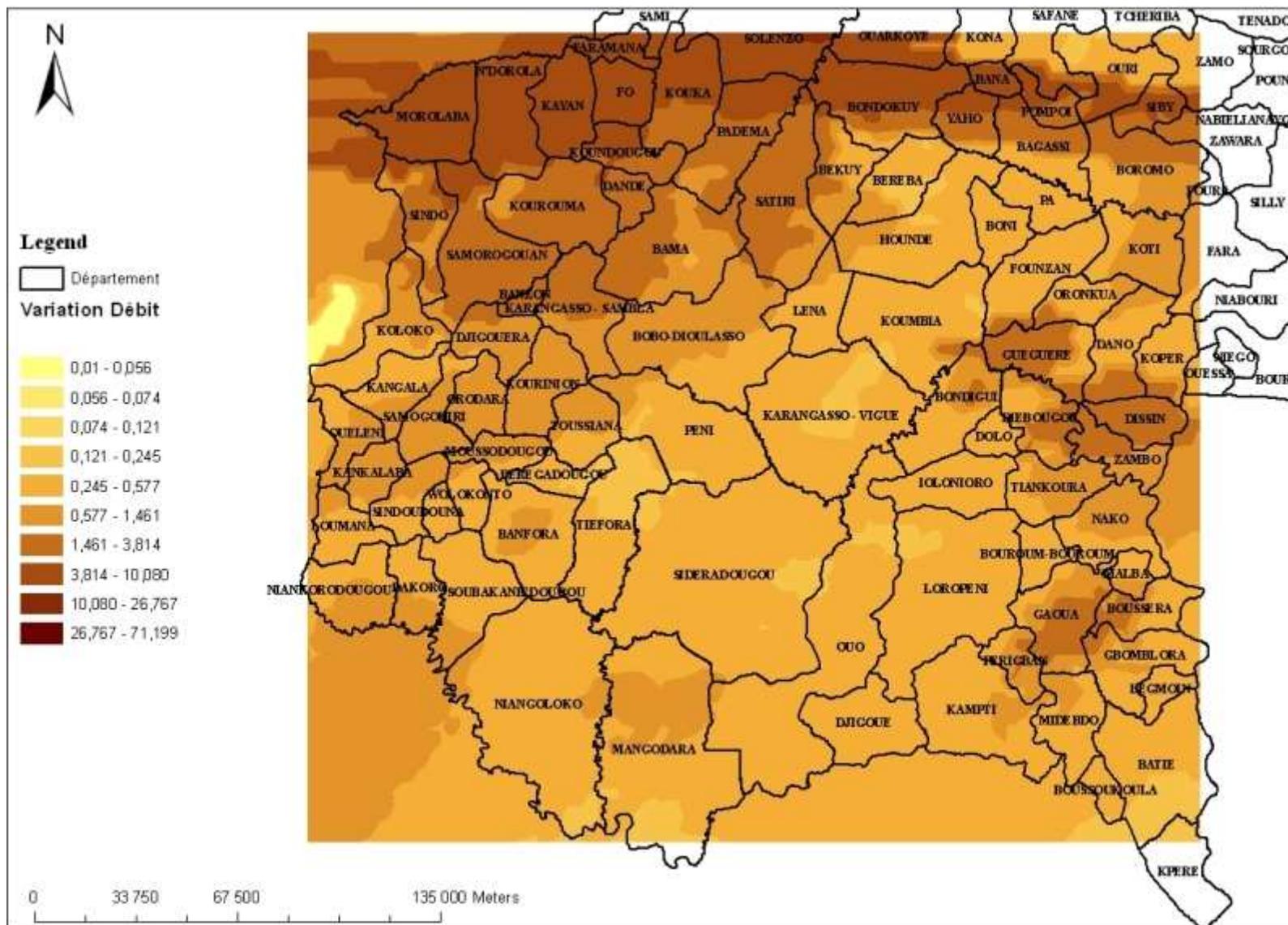
Annexe IV : Cartes divers paramètres forages



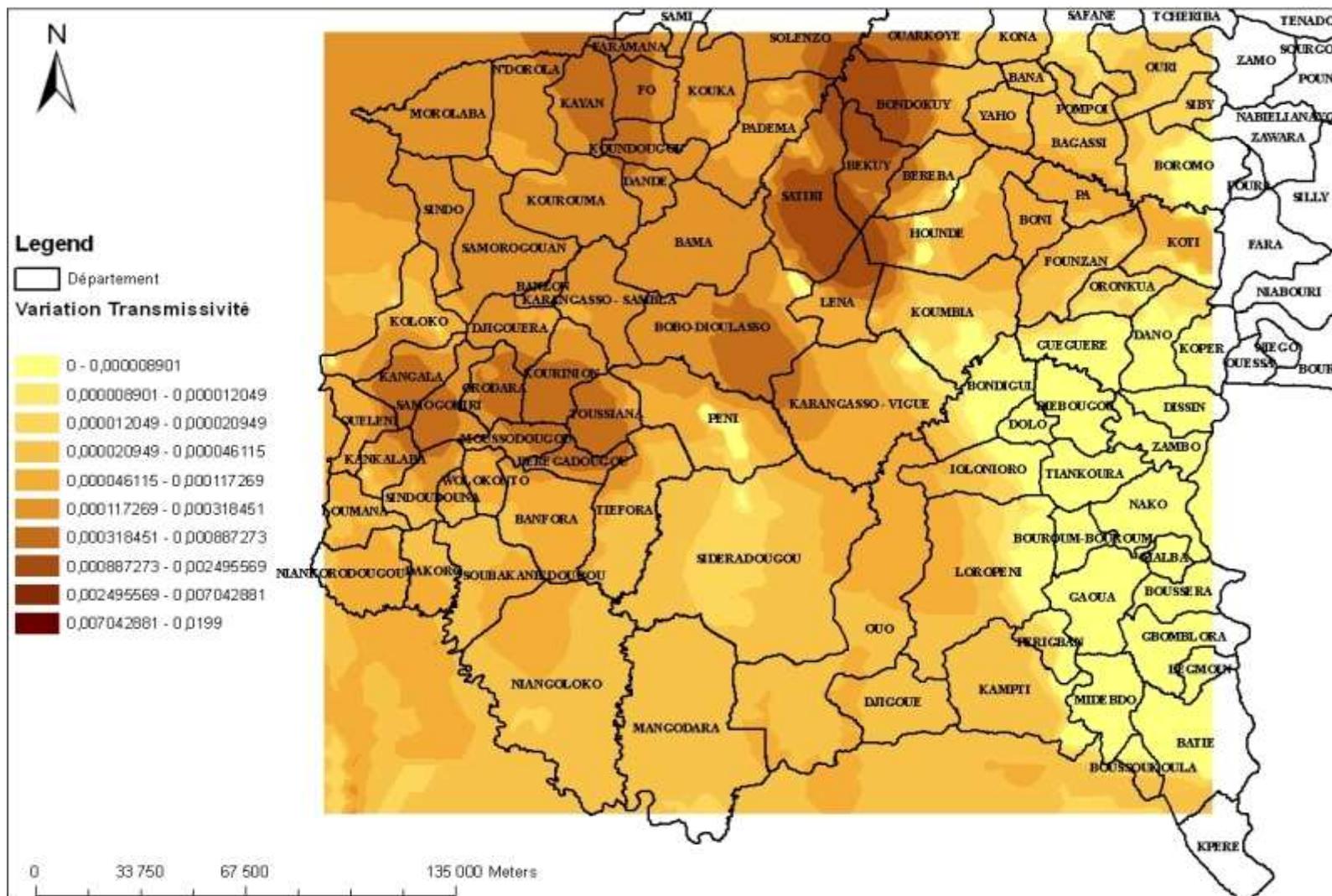
Carte distribution spatiale pH



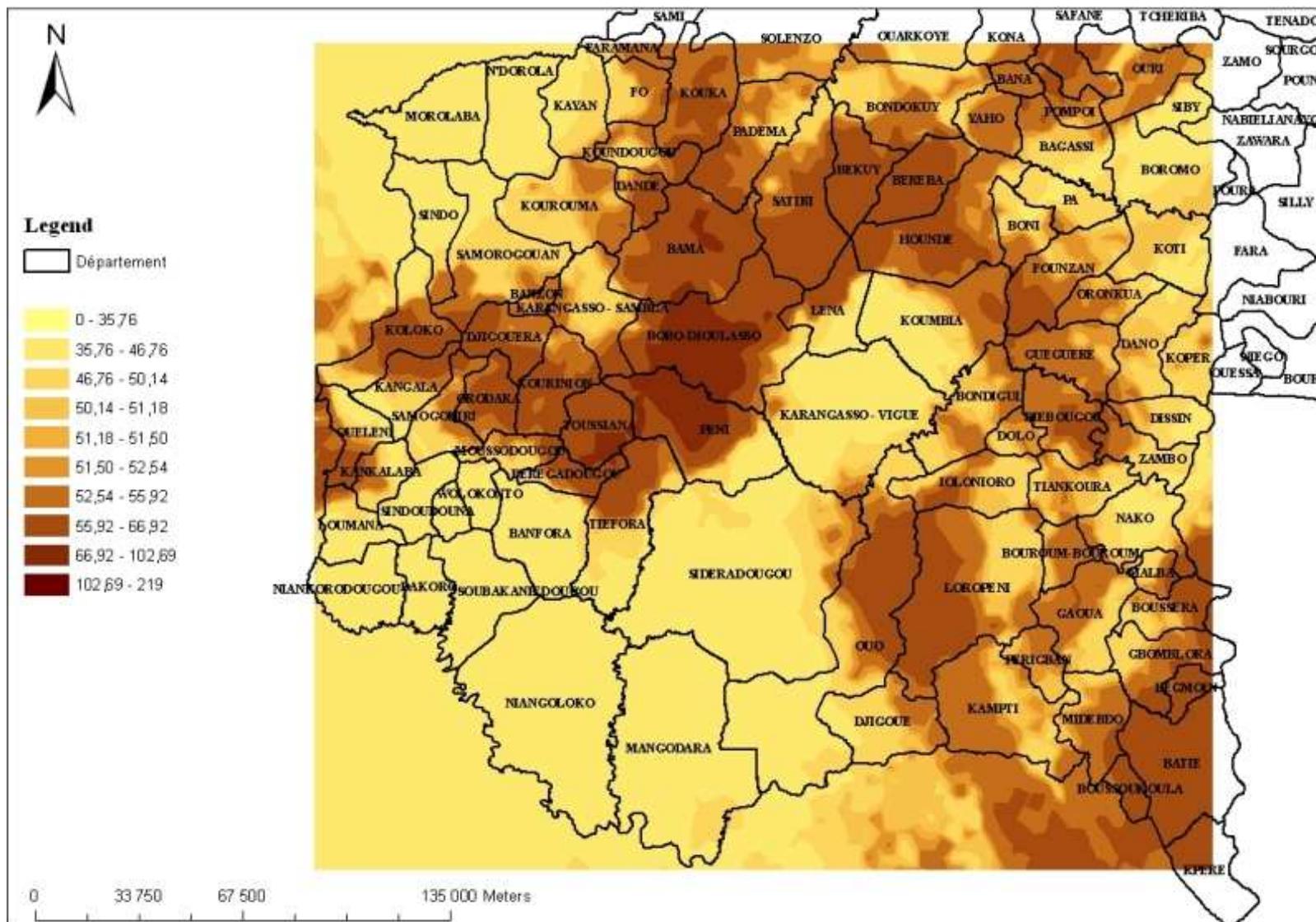
Carte distribution spatiale Conductivité



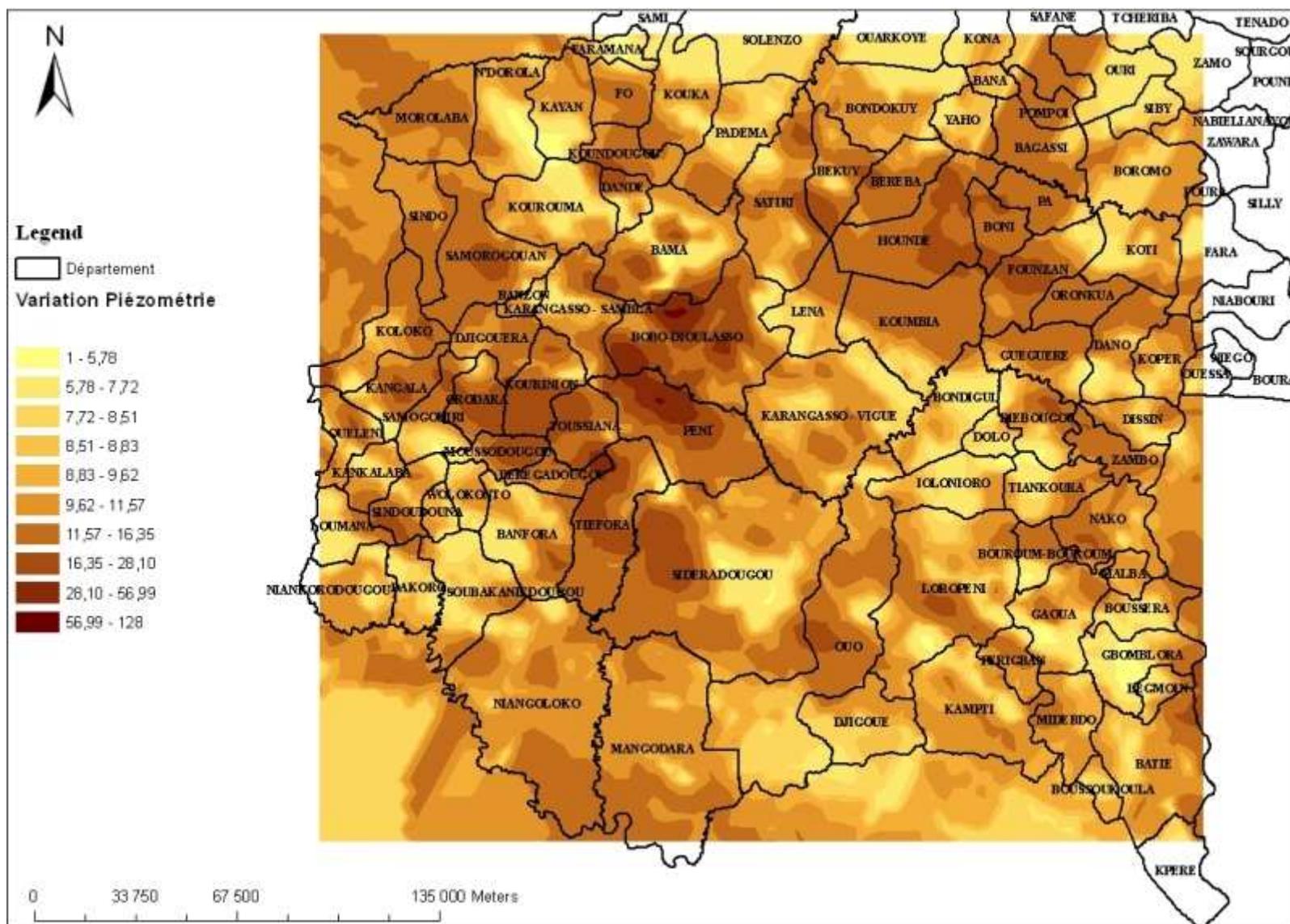
Carte distribution spatiale Débit



Carte distribution spatiale Transmissivité



Carte distribution profondeur forage



Carte distribution piézométrie