



UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement LGCgE

Ecole polytechnique universitaire de Lille

Discipline: Génie Civil

Année : 2011

N° d'ordre: 40593

Ecole Doctorale des Sciences pour l'Ingénieur EDSPI

THESE DE DOCTORAT

**Contribution des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) à la
gestion et à l'aide à la décision : Approche pluridisciplinaire pour**

l'évaluation des aspects à risques

Site d'application : dans le nord de la France

Présentée pour l'obtention du titre de
Docteur de l'Université Lille Sciences et Technologies

Par

Hanan DARWISHE

Soutenue publiquement le vendredi 21 octobre 2011 devant le jury composé de :

Docteur HDR	Lahcen ZOUHRI	Institut Polytechnique Lasalle-Beauvais	Président /Rapporteur
Professeur	Azzedine HANI	Université d'Annaba (Annaba, Algérie),	Rapporteur
Professeur	Erick CARLIER	Université Lille1	Directeur de thèse
Docteur	Barbara LOUCHE	Université d'Artois	Examinatrice
Docteur	Eric MASSON	Université Lille 1	Examineur
Professeur	Iyad ABBAS	Université de Tichrine (Lattaquié, Syrie)	Examineur
Professeur	Y. BATTIAU-QUENEY	Université Lille1	Membre invitée

Résumé

La nappe de la craie du Nord de la France est actuellement confrontée à des concentrations en nitrates qui dépassent les limites fixées par la directive européenne sur les nitrates. Dans le secteur de Lens (Pas-de-Calais), l'alimentation en eau potable se fait principalement dans cette nappe, où les concentrations en nitrates peuvent atteindre 100 mg/l. A quelques kilomètres au Nord (17 km de Lens), la nappe de la craie devient captive et il se produit une dénitrification naturelle qui assure une bonne qualité de l'eau. La gestion de la ressource en eau dans le secteur de Béthune, nécessite la réalisation d'une modélisation numérique qui s'est avérée comme un outil très performant pour comprendre le fonctionnement hydrodynamique des aquifères.

L'utilisation de Systèmes d'Information Géographique (SIG) offre une plate-forme intégrée de gestion, d'analyse, de modélisation, d'affichage et d'aide à la décision. Une méthodologie basée sur la combinaison des SIG, la modélisation hydrogéologique, la modélisation hydrodispersive et les réseaux de neurones artificiels (RNA), a été adoptée pour orienter la gestion des eaux souterraines. Un modèle hydrodynamique a été créé par le code Modflow à l'aide d'un SIG. Un modèle conceptuel de données MCD préparé selon la méthode HBDS a permis de visualiser les liens qui existent entre les différents phénomènes étudiés. Le modèle physique de données MPD représenté par les *geodatabases*, a été réalisé pour structurer l'information spatiale (géographique) et/ou aspatiale (thématique). Le traitement, la manipulation et la création des données d'entrée ont été réalisés à l'aide d'un modèle conçu dans ArcGIS. Deux simulations ont été faites, en régime permanent pour caler le modèle, puis en régime transitoire pour étudier l'impact de prélèvements dans deux puits situés à Béthune. Le but recherché était de définir les débits optimums de prélèvements d'eau dans ces puits de manière à fournir une alimentation en eau potable dans secteur de Lens tout en préservant la capacité de dénitrification de l'aquifère exploité. Des scénarios de prélèvements, simulés par Modflow et à l'aide du RNA, ont été définis et testés pour des années sèches et humides au cours de la période 1972-2008. Un modèle de transport de nitrates a été créé par le code MT3D, et comparé avec un autre modèle basé sur un couplage entre le (RNA) et le (SIG) pour la prédiction spatiale de pollution par les nitrates des eaux souterraines. Ce modèle couplé permet la création de cartes de distribution spatiale des concentrations en nitrates à différentes échelles de temps, sans création de modèles de transport qui s'appuient sur des équations mathématiques complexes et nécessitent beaucoup de données d'entrée. Afin de mettre à profit les résultats des modèles créés dans cette étude, un outil de consultation et de gestion des données (GWMV) a été créé dans ArcGIS en VBA (Visual Basic for Applications). Cet outil contient des interfaces qui sont créés dans le cadre de la gestion de l'aquifère de Béthune. L'utilisateur peut consulter les bases de données en entrées et en sorties de manière simple et efficace.

Ces travaux, bien qu'appliqués à l'aquifère de Béthune, sont génériques. La méthodologie suivie peut être appliquée à plusieurs types d'aquifères. De même, les travaux de modélisation, d'analyses, de simulation, et de création des interfaces sont adaptables à des problématiques différentes.

Mots-clés : SIG, Modflow, MT3D, RNA, VBA, Applicatif métier, Dénitrification, Gestion de l'eau, Modélisation, HBDS, Nord-Pas-de-Calais.

**Contribution of Geographic Information Systems (GIS) in
management and decision support: multidisciplinary
approach for the risk evaluation**

Application area: northern France

Abstract

The chalk aquifer of northern France is currently facing nitrate concentrations above the levels specified in the European Nitrates Directive. In the urban area of Lens, the drinking water resource occurs mainly in this chalk aquifer, but its nitrate concentrations can reach 100mg/l. This modeling study focuses on the chalk aquifer located in Béthune (17 km from Lens), which provides natural denitrification and ensures a good drinking water quality. The management of Béthune's aquifer requires the implementation of a numerical modeling that has proven to be a powerful tool for understanding the hydrodynamic behaviour of this chalk aquifer. Geographic Information Systems (GIS) offers an integrated platform of management, analysis, modeling, display and decision support. In this research, a methodology, based on the combination of GIS, hydrogeological modeling by Modflow, transport modeling by MT3D and Artificial Neural Networks model (ANN), was adopted to support groundwater management. A numerical flow model was created by the code "Modflow" using a Geographic Information System. A conceptual data model CDM has been prepared according to HBDS method and this is to visualize the relationships between the different studied phenomena. The physical data model PDM presenting by geodatabases has been made mainly in order to structure spatial (geographic) and/or no spatial (thematic) information, treatment, handling and creating input data were performed with a model designed in ArcGIS 9.3.1 software. Two simulations were done, steady state simulation in order to calibrate the model and transient simulation to define an optimum level of water use from two wells located in Béthune's aquifer so as to supply Lens with drinking water without reducing the aquifer's denitrification capacity. Water usage scenarios are defined and tested (in Modflow and using RNA) for dry and for wet years over the period 1972-2008. A nitrate transport model has been created by the code MT3D, and compared with another model based on a coupling between ANN and Geographic Information Systems (GIS) which build for spatial nitrate prediction of groundwater. This coupled model allows to create spatial distribution maps of nitrates at different time scales without creating transport models that rely on complex mathematical equations and that require a lot of input data. To get better the results of models created in this study, a tool of consulting and data management (GWMV) was created in ArcGIS using the VBA. This tool provides interfaces that are created for Bethune's aquifer management. The user can view and consult the inputs and outputs data in a more simple and effective way.

Keywords: GIS, Modflow, MT3D, ANN, VBA, Application software, Denitrification, Water management, Modelling, HBDS, Northern France.

Ce travail de thèse a été effectué au sein du laboratoire

LGCgE

Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement, Lille Nord de France,

Polytech'Lille : Ecole polytechnique universitaire de Lille,

Université Lille 1 - Sciences et Technologies

*Avenue Paul Langevin,
59655 Villeneuve d Ascq cedex
France*

*Je dédie ce travail
A ma mère et à toute ma famille
A toi Fadi
Et à mes deux petits anges Fadi et Alayss*

AVANT-PROPOS

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), département de Géotechnique et Génie Civil (GTGC) à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille, Université des Sciences et technologies de Lille.

Au terme de cette recherche, il m'est très agréable d'exprimer toute ma gratitude, ma reconnaissance et mes très vifs remerciements à tous ceux qui ont attribué de près ou de loin à l'élaboration de ce sujet de thèse.

Je tiens à remercier très vivement et respectueusement Monsieur **Azzedine HANI**, professeur à l'université d'Annaba, et Monsieur **Lahcen ZOUHRI**, professeur à l'Ecole Polytechnique LaSalle Beauvais, qui ont accepté de rapporter ce travail et de me faire profiter de leur expérience. Qu'ils trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements et de ma gratitude. Parallèlement, je remercie Monsieur **Iyad ABBAS**, professeur à l'université de Tishreen, qui a bien voulu examiner ce travail. Je le remercie très sincèrement pour sa sympathie et ses précieux conseils.

J'ai eu l'honneur d'avoir comme directeur de thèse Monsieur **Erick CARLIER**. Je lui suis très reconnaissant d'avoir partagé avec moi son énorme expérience, Je tiens à le remercier vivement pour ses conseils, son soutien, son encouragement et la confiance qu'il m'a accordée.

J'adresse mes vifs remerciements à Mme **Barbara LOUCHE**, Maitre de conférences de l'université d'Artois, qui a encadré aussi ma thèse, elle était une directrice d'une grande écoute et d'une grande vigilance. Je tiens à la remercier infiniment pour sa disponibilité, sa sympathie, ses conseils, scientifiques et amicaux et pour les grandes qualités humaines qui m'ont permis de mener à bout cette thèse.

J'exprime ma profonde reconnaissance à M. **Eric MASSON**, Maitre de conférences de l'université de Lille1, aussi bien pour tout le temps qu'il m'a consacré que pour avoir guidé mes premiers pas scientifiques depuis mon stage de master2. Je le remercie infiniment pour toutes les discussions, suggestions et ses précieux conseils et surtout sa passion contagieuse pour la recherche.

Je tiens à remercier chaleureusement .M. **Jamal EL KHATTABI**, Maitre de conférences de l'université Lille1 d'avoir anticipé et provoqué les réajustements nécessaires avec la préoccupation constante de me donner les moyens de poursuivre mes travaux dans les meilleures conditions et en toute liberté. Je le remercie également pour sa gentillesse et sa bonne humeur de tous les jours.

J'adresse un merci sincère à Monsieur **Hakim HAÏKEL**, Chef de service des Ressources en eau dans le Communauté de Communes de Lens Liévin, qui m'a facilité l'accès aux données nécessaires et qui m'a fait profiter des ses connaissances en hydrogéologie.

J'adresse mes remerciements à Madame **Danièle FABIS**, responsable du service international au CROUS de Lille, qui a géré avec patience et indulgence, tout au long des années, mon dossier de bourse.

Je tiens aussi à mentionner le plaisir que j'ai eu à travailler au sein du laboratoire de Génie Civil et Géo-environnement, et j'en remercie ici tous les membres, merci et bonne chance à tous.

Je tiens à remercier particulièrement tous mes compatriotes qui m'ont accompagné durant ces années et qui ont contribué à rendre cette période plus agréable et dont certains épisodes resteront des souvenirs inoubliables.

Je tiens à remercier vivement mes amies, **Badra** et **Hind** avec qui j'ai partagé une tranche de ma vie et qui m'ont souvent supportée au cours de cette thèse. Merci pour tous les innombrables moments que nous avons partagés ces dernières années, remplies de nos petites et grandes histoires mais surtout de rires et de bonne humeur.

Je remercie de tout cœur mon amie, **Itab**. Son amitié, et son soutien permanent m'ont permis de surmonter toutes sortes de difficultés. Merci d'être toujours à côté de moi.

J'adresse une pensée particulière et pleine de gratitude à mes parents et toute ma famille. Si j'ai réussi aujourd'hui c'est grâce à eux. Ce travail leur est dédié et leur appartient.

Je tiens à remercier tout spécialement mon époux et mon collègue en même temps **Fadi**, pour son soutien scientifique et amical, si important pour moi. Je voudrais enfin remercier le rayon du soleil de ma vie, pleine de couleur et joie, mes deux petits anges **Fadi** et **Alayss**.

TABLE DES MATIERES

RESUME	1
ABSTRACT	3
LISTE DES FIGURES.....	12
LISTE DES TABLEAUX	17
LISTE D'ACRONYMES ET D'ABREVIATIONS	18
PROTOCOLE GENERAL DE TRAITEMENT SUIVI DANS CETTE THESE.....	21
CHAPITRE I : CONTRIBUTION DES SYSTEMES D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES (SIG).....	23
INTRODUCTION	24
I.1. Introduction aux Systèmes d'Informations Géographiques (SIG).	24
I.1.1. Définition du SIG.....	24
I.1.2. Historique du SIG	27
I.1.3. Les composantes du SIG.....	29
I.2. Les informations géographiques et les types des données spatiales	30
I.2.1. La structure des données	30
I.2.2. Les bases de données	31
I.2.3. Le type des données intégrées dans un SIG.....	34
I.3. L'analyse dans le SIG	37
I.3.1. Principales fonctions du SIG	37
I.3.2. Les grandes fonctions d'analyse des données raster	39
I.3.3. Modèle Numérique de Terrain (MNT)	40
I.4. Méthode optimale d'interpolation.....	43
I.5. La modélisation hypergraphique HBDS (Hypergraph Based Data Structure).....	47
I.5.1. Définition	47
I.5.2. Les quatre concepts fondamentaux de la méthode HBDS.....	47
I.5.3. Le Modèle Conceptuel de Données (MCD)	47
I.5.4. Construction d'un Modèle Physique de Données (MPD).....	49
I.6. Tendances actuelles en matière de SIG	50
CONCLUSION	52
CHAPITRE II : GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE : CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES	53
INTRODUCTION	54
II.1. Contexte général.....	54
II.2. Contexte géographique	57

II.3. Contexte géologique général.....	58
II.4. Principales formations géologiques	61
II.4.1. Les terrains du Paléozoïque.....	61
II.4.2. Les terrains du Mésozoïque.....	62
II.4.3. Les terrains du Cénozoïque	63
II.5. Contexte hydrogéologique et hydrologique	65
II.5.1. Eaux souterraines	65
II.5.2. Les eaux superficielles	67
II.5.3. Précipitations	68
II.5.4. Les prélèvements en eau souterraine.....	69
II.6. Les nitrates et la dénitrification de l'aquifère du Béthunois.....	71
II.6.1. La dénitrification de l'aquifère béthunois	71
II.7. Rappel des travaux antérieurs	77
II.8. Histoire des forages F4 et F5	78
CONCLUSION.....	83
CHAPITRE III : COUPLAGE DU SIG ET DE LA MODELISATION	
HYDROGEOLOGIQUE SOUS MODFLOW	84
INTRODUCTION.....	85
III.1. La littérature du couplage SIG avec la modélisation hydrodynamique.....	86
III.2. La méthodologie suivie.....	88
III.2.1. Mise en place d'un système d'information géographique.....	89
III.2.2. Modélisation hydrodynamique	97
III.3. Résultats et discussion	112
III.4. Optimisation des résultats par les réseaux de neurones artificiels	116
CONCLUSION.....	121
CHAPITRE IV : COUPLAGE DU SIG, DES RESEAUX DE NEURONES	
ARTIFICIELS (RNA) ET DU MODELE NUMERIQUE (MT3D) POUR	
LA PREDICTION SPATIALE DE LA CONCENTRATION EN	
NITRATES DANS LES EAUX SOUTERRAINES.....	
	123
INTRODUCTION.....	124
IV.1. Littérature RNA et SIG.....	124
IV.2. Méthodologie	125
IV.2.1. Le modèle RNA	127
IV.2.2. Modèle numérique de transport	132
IV.3. Résultats et discussion	133
CONCLUSION.....	140
CHAPITRE V : CREATION D'UN OUTIL UTILISATEUR EN VBA	
SOUS ARCGIS EN VUE DE CONSULTER LES DONNEES D'ENTREES	

ET DE SORTIES DE LA MODELISATION : MODFLOW, MT3D ET RNA.....	141
INTRODUCTION.....	142
V.1. Interfaces et développement sous ArcGIS	142
V.2. L'éditeur de Visual basic intégré dans ArcGIS.....	143
V.3. Le développement de l'outil GWMV	145
V.4. Résultats : Fonctions et usages de GWMV	146
V.4.1. <i>Groundwater flow modelling</i>	146
V.4.2. L'interface du modèle MT3D.....	154
V.4.3. L'interface du modèle RNA	156
CONCLUSION.....	158
PERSPECTIVES DE RECHERCHE : L'INTERFEROMETRIE DIFFERENTIELLE DU RADAR A SYNTHESE D'OUVERTURE (DINSAR) POUR QUANTIFIER LA SUBSIDENCE DES SOLS CAUSEE PAR DES POMPAGES	160
BIBLIOGRAPHIE	165

Liste des figures

Figure 1 Schéma de synthèse sur le protocole de traitement	22
Figure I-1 Définition du SIG	25
Figure I-2 Pyramide du SIG montre que les analyses et les visualisations commencent de la base de données qui constitue la fondation (Johnson, 2009).	26
Figure I-3 Fonctionnement général d'un SIG.	27
Figure I-4 Composants principaux du SIG.....	30
Figure I-5 Couches superposées abordant des thèmes multiples	31
Figure I-6 Structure hiérarchique, en réseau et relationnelle d'après Burrough et McDonnell, (1998)	32
Figure I-7 Structure orientée objet d'après Burrough et McDonnell (1998).....	32
Figure I-8 Comparaison entre la représentation raster et celle vecteur. Le paysage en (1) est affiché dans une représentation matricielle (2) et dans une représentation vectorielle (3). (T) représente la terre, les arbres de pins (P) et de sapin (S) sont des objets surfaciques. La rivière est un objet linéaire, et la maison (M) est un élément ponctuel (Types of Data Used in a GIS, 2007, modifiée).....	35
Figure I-9 MNT dont les données sont stockées dans plusieurs structures de données.....	41
Figure I-10 Différents types d'échantillonnages utilisés pour collecter les données spatiales à partir des données ponctuelles (Burrough et McDonnell, 1998)	42
Figure I-11 Exemple de variogramme avec la portée, l'effet de pépite et le palier.	45
Figure I-12 Exemples des modèles de variogramme les plus couramment utilisés :.....	46
Figure I-13 Graphisme conventionnel H.B.D.S. (Saint-Gérard, 2002).....	48
Figure II-1 Concentration en nitrates des eaux souterraines du Nord-Pas de Calais pour l'année 2005 (source : la carte de Base :ArcGIS Online, les données de concentration : Agence de l'eau d'Artois-Picardie).....	55
Figure II-2. Localisation de la zone d'étude (Béthune) par rapport à Lens	56
Figure II-3 Localisation de la zone étudiée	57
Figure II-4 Topographie de la zone étudiée	58
Figure II-5. a) Carte géologique simplifiée de la région Nord Pas-de-Calais.....	59
Figure II-6. Bassins versants en Artois-Picardie (source : Agence de l'eau d'Artois-Picardie, 2009).....	65

Figure II-7 Rivières dans le bassin Lys-DEULE.....	67
Figure II-8 Pluie efficace (recharge) calculée de 1972 jusqu'à 2008.....	69
Figure II-9 Localisation des prélèvements d'eau souterraine.....	70
Figure II-10 Evolution des prélèvements (1972-1996)	70
Figure II-11 Evolution de la concentration en nitrates dans les puits «00192X0030/F1» à Hinges , «00191X0158/F2» à Chocques, «00198X0004/F1» à Hulluch respectivement implantés dans l'aquifère de la craie en position captive, limite de captivité et libre.....	72
Figure II-12 Profil hydrogéochimique typique du phénomène de dénitrification lors du passage en captivité de la nappe. (Edmunds, <i>et al.</i> , 1982 dans Mariotti, 1986).....	74
Figure II-13 Représentation du mécanisme de dénitrification naturel (Sogreah ingénierie, 1998).....	76
Figure II-14 Photos présentant les forages F4 et F5.....	79
Figure II-15 Coupe lithologique et technique dans le forage F4 (Burgéap, 1999; AMODIAG, 2006).....	81
Figure II-16 Coupe lithologique et technique dans le forage F5 (Burgéap, 1999; AMODIAG, 2006).....	82
Figure III-1 Interaction des SIG avec les logiciels de modélisation des eaux souterraines, adaptée par (Watkins, McKinney, et Maidment, 1996) d'après (Carrera-Hernández et Gaskin, 2006)	88
Figure III-2 Méthodologie suivie	89
Figure III-3: Modèle conceptuel de données (MCD) selon la méthode HBDS présentant les hypergraphes, les hyperclasses, les classes, les attributs et les associations - Modèle physique de données (MPD)	91
Figure III-4 Modèle « Hydrology tool » selon model builder.....	92
Figure III-5 Aperçu des étapes pour obtenir des caractéristiques hydrologiques de la surface à partir d'un MNT (<i>workflow</i> de l'outil <i>Hydrology</i> d'ArcGIS (Johnson,2009), modifié) ..	93
Figure III-6 Carte du réseau des talwegs.....	94
Figure III-7 Carte des rivières extraites du modèle	94
Figure III-8 Modèle construit pour la préparation des données de Modflow	95
Figure III-9 Localisation des forages utilisés pour la modélisation hydrogéologique	96
Figure III-10 Etapes de la construction d'un modèle hydrodynamique numérique (d'après Anderson et Woessner, 1992).	98
Figure III-11 Exemple de discrétisation d'un aquifère selon un maillage rectangulaire (McDonald et Harbaugh, 1988).....	100

Figure III-12 Maillage de la zone à modéliser	101
Figure III-13 Carte piézométrique initiale en 1972.....	103
Figure III-14 Carte de répartition des conductivités hydrauliques obtenue lors du calage....	104
Figure III-15 Cotes piézométriques observées par rapport à celles prédites lors de la modélisation dans 12 forages de la nappe de la craie en 1972.....	105
Figure III-16 Sens d'écoulement, courbes piézométriques simulées et observées dans l'aquifère crayeux.....	105
Figure III-17 Localisation des piézomètres.....	107
Figure III-18 Evolution du piézomètre de Beuvry, 00193X0167/PZ28	107
Figure III-19 Evolution du piézomètre de Bruay-la-Buissière, 00195X0087/P2	108
Figure III-20 Evolution du piézomètre de Mazingarbe 00197X0049/F2.....	108
Figure III-21 Evolution du piézomètre de Hulluch, 00198X0087/P.....	108
Figure III-22 Comparaison entre l'histogramme de la recharge avec celui des cotes piézométriques dans les forages F4 et F5 (de l'année 1972 à 2008).....	110
Figure III-23 Recharge et variations de charge hydraulique dans les puits F4 et F5 de 1972 à 2008.....	111
Figure III-24. Piézométrie calculée pour deux scénarii de recharge : année sèche et année humide.....	112
Figure III-25 Charge de la nappe de la craie sous la couverture argileuse pour une année déficitaire (150 mm/an).....	115
Figure III-26 Charge de la nappe de la craie sous la couverture argileuse pour une année pluvieuse (400 mm/an).....	116
Figure III-27 Représentation d'un perceptron à une couche cachée pour la prédiction des débits optimums de prélèvements de F4 et F5, Propagation avant (feedforward).....	118
Figure III-28 Régression linéaire entre les débits mesurés et calculés par le modèle RNA ..	119
Figure III-29 Charge de la nappe de la craie sous la couverture argileuse pour une année pluvieuse (150 mm/an).....	119
Figure III-30 Charge de la nappe de la craie sous la couverture argileuse pour une année pluvieuse (400 mm/an).....	120
Figure IV-1 Méthodologie suivie	125
Figure IV-2 Forages d'observation des concentrations en nitrate dans la zone d'étude.....	126
Figure IV-3 Eléments basiques de réseaux de neurones artificiels	127
Figure IV-4 Représentation d'un perceptron à une couche cachée pour la prédiction de la concentration en nitrates dans la nappe de Béthune, Propagation avant (feedforward).	129

Figure IV-5 Régression linéaire entre la concentration mesurée et celle calculée par le modèle RNA.....	131
Figure IV-6 Régression linéaire entre la concentration mesurée et celle calculée par le modèle MT3D	133
Figure IV-7 Comparaison de la concentration en nitrates (mg/l) mesurée et prédite selon le modèle (RNA et MT3D) pour les années 2003 et 2004.....	135
Figure IV-8 Cartes de différence de la concentration en nitrates (mg/l) mesurée et prédite selon le modèle (RNA et MT3D) pour les années 2003 et 2004	136
Figure IV-9 Concentration prévisionnelle en nitrates (mg/l) selon le modèle RNA pour l'année 2025 avec une recharge éventuelle de 150 et 500 mm/an	137
Figure IV-10 Comparaison de la distribution spatiale de la concentration prévisionnelle en nitrates (mg/l) selon le modèle RNA pour l'année 2025 en fonction de la pluviométrie.	138
Figure IV-11 Comparaison de la distribution spatiale de la concentration prévisionnelle en nitrates (mg/l) selon le modèle RNA pour l'année 2025 en fonction de la pluviométrie.	138
Figure IV-12 Variation géographique de la limite de 50 mg/l de nitrates entre une année déficitaire et une année pluvieuse	139
Figure V-1 Fenêtre de l'éditeur de Visual basic intégrée dans ArcGIS	144
Figure V-2 Barre d'outils « GWMV » pour gérer les données d'entrée et de sortie de la modélisation hydrogéologique	145
Figure V-3 Interface du modèle conceptuel de données (MCD) créé selon HBDS et le modèle physique de données (MPD)	146
Figure V-4 Interface de la consultation des données géologiques (les points d'échantillonnages de la surface avec une distribution spatiale raster de la surface)	147
Figure V-5 Interface de la consultation des données géologiques (une distribution spatiale en mode vecteur du toit de la couche de la craie)	148
Figure V-6 Interface de la consultation des données hydrogéologiques (photographie aérienne, forages d'observations)	149
Figure V-7 Interface de la topographie (Scanne 25, Modèle numérique de terrain (TIN)) ...	150
Figure V-8 Interface du système de l'eau surfacique (Accumulation de flux)	150
Figure V-9 Interface des débits entrants et sortants du modèle (débits de pompages des forages de l'eau potable pour l'année 1972)	151
Figure V-10 Interface du modèle hydrodynamique Modflow	152

Figure V-11 Interface des principales étapes de la modélisation hydrodynamique Modflow (les deux forages F4 et F5, le maillage, scanne 25)	153
Figure V-12 Interface des résultats de la modélisation hydrodynamique Modflow (carte piézométrique résultante pour l'année 1972)	154
Figure V-13 Interface du modèle hydodispersif de transport des nitrates par MT3D	155
Figure V-14 Interface des étapes principales de la modélisation dispersive MT3D (Carte de la différence entre la concentration en nitrates mesurée et calculée en 2003)	155
Figure V-15 Interface des résultats de la modélisation hydrodispersive MT3D (Carte de la distribution spatiale prédite pour l'année 2004).....	156
Figure V-16 Interface du modèle du réseau de neurones artificiels RNA	157
Figure V-17 Interface du modèle du réseau de neurones artificiels RNA	157
Figure V-18 Interface du modèle du réseau de neurones artificiels RNA	158

Liste des tableaux

Tableau I-1 Les avantages des deux modes, vecteur et raster	36
Tableau I-2 Les contraintes (Inconvénients) des deux modes, vecteur et raster	36
Tableau I-3 : Liste de six grandes catégories de données et le type des couches thématiques associées à chacune (ESRI, 1986)	37
Tableau I-4 Liste des fonctions incluses dans chacune des 11 catégories d'analyse dans un SIG d'après Johnson, (2009)	39
Tableau I-5 Correspondances entre concepts hypergraphiques et concepts géographiques, relationnels, ensemblistes (Hamel, 1996).....	49
Tableau I-6 Terminologie du logiciel ArcGIS et la modélisation HBDS (Pirot et Saint-Gérard, 2004, modifié)	50
Tableau II-1 Essai de pompage par paliers des forages F4 et F5	78
Tableau III-1 Paramètres hydrologiques utilisés dans la modélisation en régime permanent.	102
Tableau III-2 Bilan des flux lors de la période de 1972	106
Tableau III-3 Scénarii des prélèvements du F4.....	113
Tableau III-4 Scénarii des prélèvements du F5	114
Tableau III-5 Nouveaux scénarii des prélèvements des forages F4 et F5	117
Tableau III-6 Données d'entrée du modèle RNA	118
Tableau III-7 Scénarios des débits de pompages calculés par le modèle RNA	120
Tableau IV-1 Paramètres d'entrée du modèle de réseaux de neurones artificiels.....	130

Liste d'Acronymes et d'abréviations

AEP	Alimentation en Eau Potable
ANN	Artificial Neural Networks
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minière
BSS	Banque de données du Sous-Sol
CDM	Conceptual Data Model
CGIS	Canada Geographic Information System
COM	Component Object Model
DSS	Decision Support System
ENSG	Ecole Nationale des Sciences Géographiques
ESRI	Environmental Systems Research Institute
ETP	Evapotranspiration Potentielle
ETR	Évapotranspiration Réelle
FICCDC	Federal Interagency Coordinating Committee on Digital Cartography
GIS	Geographical Information System
GMS	Groundwater Modeling System
GPS	Global Positioning System
GRNN	General Regression Neural Network
GWMV	Ground Water Modelling Viewer
HBDS	Hyper Graph Based Data Structure
IDW	Inverse Distance Weighting
IGN	Institut Géographique National
LIDAR	Light Detection and Ranging
MCD	Modèle Conceptuel de Données
MLP	Multilayer Perceptron
MNA	Modèle Numérique d'Altitude
MNE	Modèle Numérique d'Élévation
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MOC	Method of Characteristics
MPD	Modèle Physique de Données
MT3D	Model Transport in 3 Dimensional
PDM	Physical Data Model
PMC	Perceptrons Multicouches
PPIGE	Plate-forme Publique de l'Information Géographique Nord Pas-de-Calais
RBF	Radial Basis Function
RNA	Réseaux de Neurones Artificiels
S.A.R	Synthetic Aperature Radar
SIG	Système d'Information Géographique
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TIN	Triangulated Irregular Network
RFU	Réserve Facilement Utilisable
VBA	Visual Basic for Applications

Introduction générale

La protection de l'environnement, qui est un ensemble d'éléments naturels, comme l'air, l'eau, l'atmosphère, les roches, les végétaux, les animaux, et l'ensemble des phénomènes et interactions s'y déroulant, est devenue un enjeu majeur à cause des effets des activités humaines qui sont omniprésentes. Dans cette situation, les meilleurs outils disponibles doivent être utilisés pour caractériser l'environnement, prévoir les impacts, et élaborer un système de gestion de l'environnement. La modélisation est un outil efficace de la représentation du monde réel pour comprendre, simuler, agir ou décider.

Un (SIG) représente l'outil idéal pour modéliser le monde réel, classer, observer des phénomènes et prévoir les changements à venir. Le SIG est devenu de plus en plus un moyen important pour la compréhension et le traitement des problèmes environnementaux. Les technologies et les concepts du SIG aident à rassembler et organiser les données sur ces problèmes et comprendre leurs relations spatiales.

Cette étude est concernée par l'utilisation du SIG seul ou couplé avec d'autres modèles comme un outil de modélisation pour répondre aux questions concernant plusieurs problématiques.

Dans le nord de la France (région du Nord-Pas de Calais), les concentrations en nitrates mesurées dans la nappe de la craie atteignent ou dépassent assez fréquemment le seuil de la potabilité fixé à 50 mg/l par la Directive Cadre Européenne transcrite en droit français (2000/60/EC). L'alimentation en eau potable du secteur Lens-Liévin, dans la région du Pas-de-Calais, est assurée par des prélèvements en eau souterraine effectués principalement sur place, dans le bassin minier. La qualité physico-chimique des eaux prélevées est médiocre, la concentration en nitrates des eaux de la nappe de la craie dans cette zone avoisine 100 mg/l. A une distance de 17 km de Lens-Liévin, en bordure nord du Bassin Minier, la nappe de la craie dans le secteur de Béthune présente des caractéristiques très favorables aussi bien sur le plan quantitatif que qualitatif. La craie est à cet endroit recouverte par des formations sableuses et argileuses du Cénozoïque, ce qui provoque la mise en captivité de la nappe. Le caractère captif de la nappe permet l'existence du processus naturel de dénitrification, conduisant à la dégradation rapide des nitrates et se traduisant par l'obtention d'une eau de bonne qualité. Une nette différence de la concentration en nitrates existe dans la partie captive de la nappe avec une teneur de 0.5 mg/l avec la partie libre où la concentration dépasse la limite admissible de 50 mg/l. Par contre, une surexploitation de la nappe captive béthunoise pourrait

potentiellement désactiver le processus de dénitrification et en conséquence engendrer un impact négatif sur la qualité des eaux souterraines. La problématique consiste donc d'une part à développer une méthodologie pour soutenir la gestion quantitative des eaux souterraines en déterminant les débits optimaux de prélèvement permettant, à la fois, d'alimenter la population de Len-liévin et de préserver en même temps le caractère captif de l'eau souterraine dans le Béthunois. D'autre part, elle consiste à créer un outil d'une meilleure gestion de cette ressource en eau, autant en quantité qu'en qualité, par la réalisation de cartes de prédiction de la répartition spatiale de la pollution en nitrates. L'objectif général de ce travail est de développer un outil de gestion et d'aide à la décision en profitant de la grande capacité du SIG dans la mise en évidence des phénomènes, la comparaison à différentes époques, la simulation d'hypothèses, le partage et l'exploitation de l'information géographique numérique.

Le présent mémoire est articulé autour de cinq chapitres :

- le premier chapitre présente une introduction à la technologie des (SIG) et sa contribution dans la résolution de différentes problématiques.
- le deuxième chapitre concerne une caractérisation géologique et hydrogéologique de la zone étudiée (Béthune).
- le troisième chapitre aborde un couplage du SIG, de la modélisation hydrogéologique par Modflow et des RNA. Cette solution de modélisation est un modèle élaboré pour prédire le taux des prélèvements optimaux à partir de deux forages situés à Béthune.
- le quatrième chapitre présente un couplage du SIG, du RNA et du modèle numérique (MT3D) pour la prédiction spatiale de la concentration en nitrates dans les eaux souterraines.
- le cinquième chapitre montre la création d'un outil utilisateur (GWMV) en VBA dans ArcGIS en vue de consulter les données d'entrées et d'exploiter les données de sorties des trois modèles créés: le modèle hydrodynamique (Modflow), le modèle hydrodispersif (MT3D) et le modèle de RNA.

Protocole général de traitement suivi dans cette thèse

La méthodologie suivie dans cette étude (Figure 1) s'articule autour de six étapes au sein desquels l'outil SIG occupe une place centrale de préparation, d'échanges et de visualisation des données.

La première étape a d'abord consisté à collecter toutes les données brutes disponibles de la zone étudiée et puis de les intégrer à un SIG.

Ces données ont été préparées à l'aide des fonctions et des outils avancés d'ArcGIS 9.3.1 pour être ensuite intégrées dans une deuxième étape au logiciel «Visual Modflow» afin de réaliser la modélisation hydrodynamique de l'aquifère de Béthune.

Les données de sortie du modèle «Modflow» ont ensuite été traitées dans une troisième étape par le code MT3D pour obtenir une modélisation des flux de nitrate à l'aide d'un modèle hydrodispersif.

Dans une quatrième étape, les données brutes ont été intégrées à une modélisation par réseau de neurones dans le logiciel Statistica Neural Networks 4 pour établir des prédictions ponctuelles de taux de nitrates sur l'ensemble des points de mesure de l'aquifère de Béthune.

La cinquième étape avait pour objectif de spatialiser les données ponctuelles de prédiction sous ArcGIS 9.3.1 à l'aide de l'outil *Geostatistical Analyst*® et de sa fonction d'interpolation spatiale par krigage.

Enfin la sixième et dernière étape a consisté à développer un outil de gestion de l'information géographique adapté à l'aide à la décision en matière de suivi qualitatif (nitrates) et quantitatif (ressources hydrologiques) de l'aquifère de Béthune. Cette étape a été réalisée par le développement d'une interface de visualisation et d'archivage en VBA destinée à un acteur de la gestion de l'eau non spécialiste des traitements SIG et de la modélisation hydrogéologique.

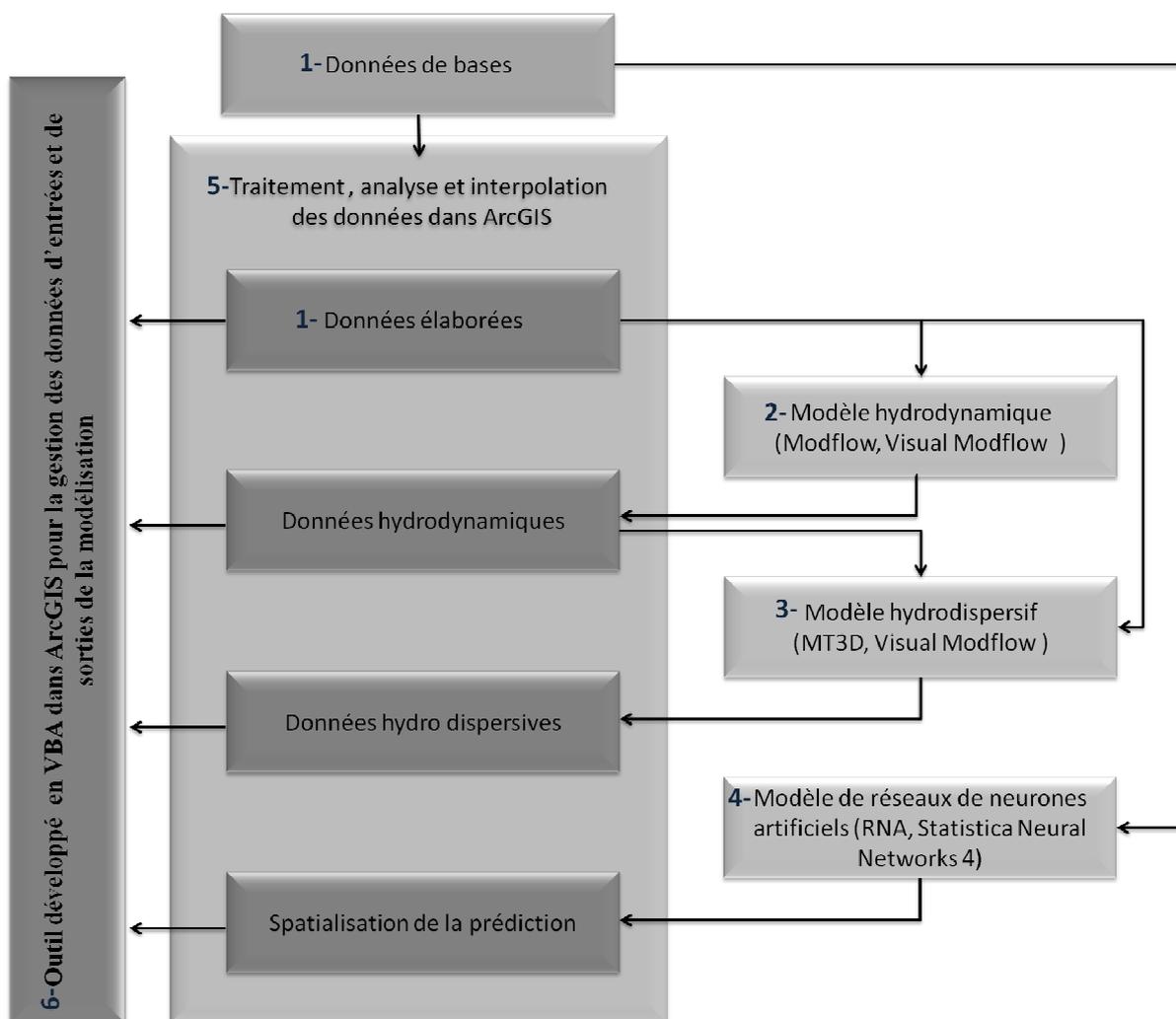


Figure 1 Schéma de synthèse sur le protocole de traitement

Chapitre I : Contribution des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG)

Introduction

Les (SIG) sont l'une des technologies les plus prometteuses et passionnantes de ces dernières décennies en particulier depuis la création du SIG ArcInfo en 1981 qui est un produit édité par ESRI (*Environmental System Research Institute*). Ce logiciel est devenu la référence dans le domaine du SIG, Il s'agit d'une association d'une base de données relationnelle (INFO) à un logiciel de manipulation d'objets géographiques codés sous forme d'arcs (ARC) (Paegelow, 2004). Un SIG est un système informatisé qui permet d'étudier les différents phénomènes dans l'espace. À cette fin, le SIG permet de fournir des réponses aux questions à partir d'une base de données réparties géographiquement. Il existe plusieurs fonctions et procédures pour collecter, stocker, récupérer, analyser, manipuler et afficher les données géographiques. Ce chapitre est entièrement consacré aux fonctionnalités et usages des SIG. Plusieurs définitions du SIG sont offertes pour introduire les concepts et les technologies qui le composent. L'accent sera mis sur la compréhension de la nature du SIG, en introduisant la façon dont un SIG est utilisé pour développer et analyser des données géographiques, en distinguant les différents types de données. Les concepts qui seront utilisés dans les chapitres suivants sont également introduits comme par exemple le modèle numérique de terrain et la méthode optimale d'interpolation. La modélisation conceptuelle des données selon la méthode HBDS (Hyper Graph Based Data Structure) sera abordée. Le chapitre se termine par l'application du SIG dans les différents domaines et la tendance actuelle du SIG.

I.1. Introduction aux Systèmes d'Informations Géographiques (SIG).

I.1.1. Définition du SIG.

Une recherche de qualité commence par des définitions claires. Dans le cas du SIG, les définitions ont été quelque peu difficiles à établir. En conséquence, différentes définitions ont évolué au cours du temps. Il n'est donc pas surprenant, alors, qu'un SIG puisse être défini de plusieurs manières. La définition qu'on choisit dépend donc de ce que l'on veut du SIG (Clarke, 1998). On peut dire en général qu'un SIG est un outil informatique permettant de représenter et d'analyser toutes les choses qui existent sur terre (Figure I-1) ainsi que tous les événements qui s'y produisent (ESRI France, 2009,a). Plusieurs définitions ont été données de l'expression du SIG depuis son apparition en 1962. Peter Burrough, dans son ouvrage pionnier, a défini le SIG comme un ensemble d'outils puissants pour stocker, récupérer,

transformer et afficher des données spatiales du monde réel pour un ensemble particulier d'objectifs (Burrough, 1986).



Figure I-1 Définition du SIG

Le SIG se compose de cinq éléments de base (Dangermond, 1988): les données, les matériels, les logiciels, la procédure et les hommes. La définition américaine émanant du comité fédéral de coordination inter-agences pour la cartographie numérique (FICCDC, 1988), considère que le SIG est un système informatique de matériels, de logiciels, et de processus conçus pour permettre la collecte, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation et l'affichage de données à référence spatiale afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement et de gestion. Carter (1989) a introduit un nouveau concept du SIG. Il l'a estimé comme une entité institutionnelle qui reflète une structure organisée en intégrant la technologie avec une base de données, d'expertise et du support financier continu dans le temps. Star et Estes (1990) ont mis l'accent dans la définition du SIG, sur la notion de données référencées par des coordonnées spatiales ou géographiques. Le SIG, selon la définition de l'économiste français Michel Didier, est un ensemble de données repérées dans l'espace, structurées de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision (Didier, 1990). Selon Maguire (1991) le SIG comprend quatre éléments de base qui fonctionnent dans un contexte institutionnel : les matériels, les logiciels, les données et le savoir faire. À cet ensemble Clarke (1995) a ajouté dans la définition du SIG les fonction de base du SIG qui permettent de saisir, stocker, extraire, analyser et afficher des données spatiales. Un SIG peut être considéré aussi

comme un système de gestion de données qui permet l'accès et la manipulation des données spatiales, la représentation visuelle des données, ainsi que l'analyse des résultats (Johnson, 2009). Les technologies du SIG proviennent d'une grande variété de domaines. Le SIG est devenu un terme générique qui renvoie à tous les systèmes automatisés utilisés principalement pour la gestion des données et des cartes géographiques. Mais, le SIG est distingué des autres systèmes informatiques par l'utilisation des données géoréférencées (Johnson, 2009) ; de plus, le SIG offre un environnement compréhensif pour l'intégration de données et l'analyse spatiale.

Une pyramide du SIG (Figure I-2) montre que le SIG est construit sur une base de données spatiales et attributaires, et que les utilisateurs peuvent accéder à la base de données pour effectuer des analyses et générer des visualisations de données. Les analyses accèdent directement à la base de données, et les interactions visuelles peuvent se produire entre l'utilisateur, la base de données et les analyses. Pratiquement, le volume de la pyramide attaché à la base de données est indicatif du temps et des efforts nécessaires pour construire un bon SIG (Johnson, 2009).

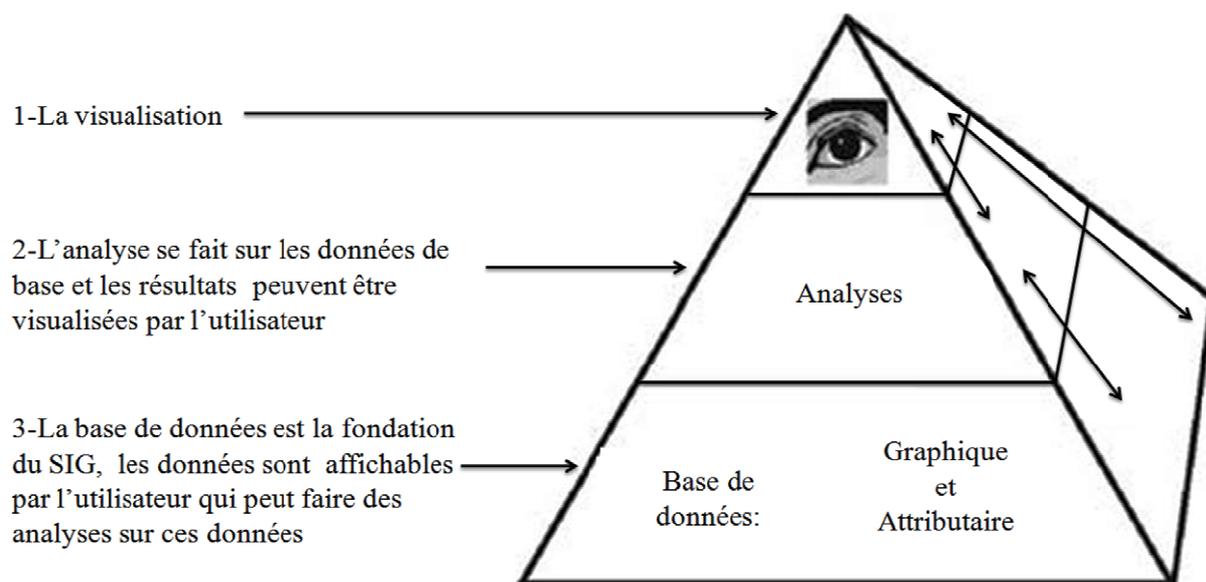


Figure I-2 Pyramide du SIG montre que les analyses et les visualisations commencent de la base de données qui constitue la fondation (Johnson, 2009).

Le fonctionnement général d'un SIG peut se résumer par le schéma ci-dessous (Figure I-3). La première étape consiste à regrouper les différentes sources d'objets à partir des données mesurées et observées dans la réalité en vue de leur intégration au SIG selon le problème à

étudier. La qualité de l'acquisition des données définira la qualité de toutes les étapes suivantes. Le SIG organise ensuite des bases de données avancées à partir des données de la réalité. La deuxième étape est l'analyse et le traitement des informations au travers d'outils statistiques et d'autres outils d'analyse. Des techniques avancées de la représentation graphique et de la modélisation permettent de faire des simulations et de représenter une modélisation visuelle très efficace, pouvant fournir un cadre pour la représentation spatiale des informations pertinentes et utiles. Ces dernières vont permettre une gestion efficace du phénomène étudié et une prise de décisions réfléchie.

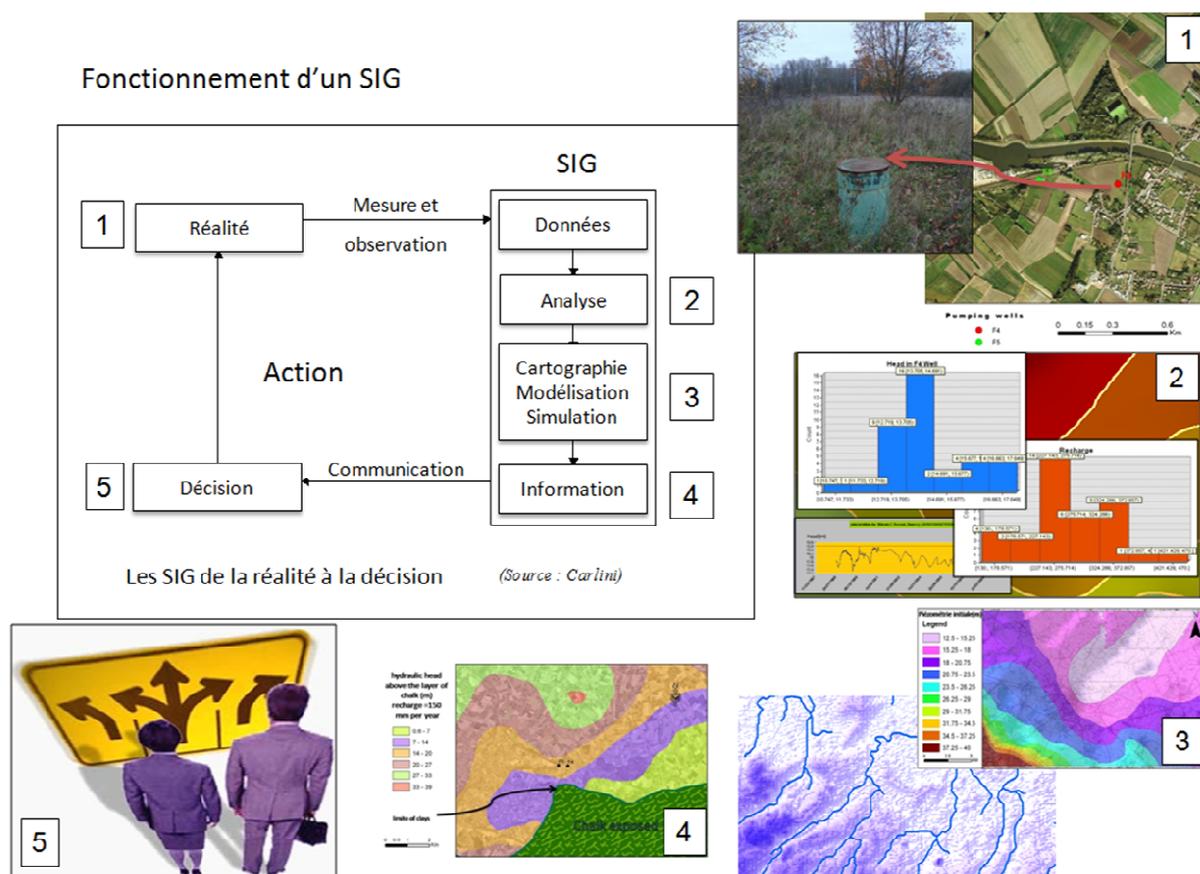


Figure I-3 Fonctionnement général d'un SIG.

I.1.2. Historique du SIG

L'idée de représenter différentes couches de données sur une série de cartes référencées et de simuler des objets liés géographiquement, a été beaucoup plus utilisée historiquement que d'un point de vue informatique (Klinkenberg, B., 2009). Plusieurs exemples de l'utilisation des cartes superposées avant l'apparition du SIG, comme par exemple les cartes superposées de la bataille de Yorktown (Révolution américaine) dessinées par le cartographe français

Louis-Alexandre Berthier, contenaient des éléments articulés pour montrer le mouvement des troupes (Paegelow, 2004). Au milieu du 19^e siècle "Atlas du deuxième rapport de la commission irlandaise des chemins de fer" a montré la population, la circulation, la géologie et la topographie superposées sur la même carte de base. La première application souvent citée de l'analyse spatiale en épidémiologie est l'étude menée avec succès par le docteur John Snow (Paegelow, 2004) pendant l'épidémie de choléra dans le quartier de Soho à Londres en 1854 : ayant représenté sur un plan la localisation des malades et l'endroit où ils puisaient leur eau, il détermina que c'était l'eau d'un certain puits qui était le foyer de contamination (Kodjo, 2008). Dans les années 1960, les cartes de l'Afrique de l'Est, trop peu nombreuses pour permettre de localiser les meilleurs endroits pour créer de nouvelles implantations forestières, font naître l'idée d'utiliser l'informatique pour traiter les données géographiques (Klein et Laurin, 1999). La technologie SIG a été conçue dans les années 1960 comme un système des couches numériques. L'année 1962 a vu le développement du premier véritable SIG opérationnel à Ottawa, Ontario, Canada par le ministère fédéral des forêts et du développement rural (Gregory et Ell, 2008). Développé par le Dr Roger Tomlinson, il a été appelé le "Canada Geographic Information System" (CGIS). Il a été utilisé pour stocker, analyser et manipuler de façon rapide et précise des données recueillies sur le terrain à l'échelle de 1:50,000, dans le but d'aider à gérer l'utilisation du territoire et contrôler les ressources du Canada. Les processus automatisés qu'ils ont ainsi conçus pour stocker et traiter un grand nombre de données ont permis au Canada de débiter un projet national de gestion des terres et de devenir un des pionniers dans le domaine des SIG (Gregory et Ell, 2008). Le SIG civil aux États-Unis a commencé par le SIG militaire en s'appuyant sur l'intelligence des programmes d'imagerie des années 1960 (Shamsi, 2005). De nos jours, puisque la technologie a changé notre mode de vie et les habitudes de travail, elle a également changé le SIG. Il n'y avait que quelques dizaines de fournisseurs de logiciels SIG avant 1988 (Kindleberger, C., 1992). En 2001, le nombre était passé à plus de 500 (Shamsi, 2005). Cette révolution a dirigé le SIG à partir d'une industrie axée sur une technologie elle-même orientée par ses applications professionnelles et scientifiques (Jenkins, 2002). Maguire (1991) a distingué trois périodes principales dans l'évolution du SIG :

- fin des années 1950 – milieu des années 1970 : début de l'informatique, premières cartographies automatiques.
- milieu des années 1970 - début des années 1980 : diffusion des outils de cartographie automatique/SIG dans les organismes d'État (armée, cadastre, services topographiques, ...etc).

- depuis les années 1980 : croissance du marché des logiciels, développement des applications sur PC, mise en réseau (bases de données distribuées, avec depuis les années 1990, des applications sur Internet) et une banalisation de l'usage de l'information géographique (cartographie sur Internet, calcul d'itinéraires routiers, utilisation d'outils embarqués liés au GPS...).

De nos jours, la technologie « WEBGIS » constitue l'un des aspects novateurs dans le domaine du SIG. Explorée depuis la fin des années 1990, elle représente un SIG qui permet la cartographie interactive sur le Web. Les principaux avantages de cette technologie sont la visualisation, l'exploration et le partage des informations géographiques stockées sur serveur SIG. De nombreux sites Internet proposent désormais une cartographie vectorielle paramétrable en ligne par l'utilisateur. Ce type d'applications se généralise aussi bien dans le domaine des cartothèques que dans le secteur du tourisme (Paegelow, 2004).

I.1.3. Les composantes du SIG

Un SIG est constitué de 5 composants majeurs (Figure I-4) (ESRI France, 2009,b):

Matériel : Les SIG fonctionnent aujourd'hui sur une très large gamme d'ordinateurs, des serveurs de données aux ordinateurs de bureaux connectés en réseau local (fermé ou à accès limité) ou global (web) ou utilisés de façon autonome

Logiciels : Les logiciels de SIG offrent les outils et les fonctions pour stocker, analyser et afficher toutes les informations.

Principaux composants logiciel d'un SIG : - Outils pour saisir et manipuler les informations géographiques - Système de gestion de base de données - Outils géographiques de requête, analyse et visualisation. - Interface graphique utilisateur pour une utilisation facile

Données : Les données sont certainement les composantes les plus importantes des SIG. Les données géographiques et les données tabulaires associées peuvent, soit être constituées en interne, soit acquises auprès de producteurs de données (bases de données partagées ou non et simple fichier texte)

Utilisateurs : Un SIG étant avant tout un outil, c'est son utilisation (et donc, son ou ses utilisateurs) qui permet d'en exploiter les fonctionnalités. Les SIG s'adressent à une très grande communauté d'utilisateurs depuis ceux qui créent et maintiennent les systèmes, jusqu'aux personnes utilisant dans leur travail quotidien la dimension géographique. Avec

L'avènement des SIG sur Internet et les logiciels SIG libres (open source), la communauté des utilisateurs de SIG s'agrandit de façon importante chaque jour et il est raisonnable de penser qu'à brève échéance, nous serons tous à des niveaux différents des utilisateurs de SIG.

Méthodes : La mise en œuvre et l'exploitation d'un SIG ne peut s'envisager sans le respect de certaines règles et procédures propres à chaque organisation ou discipline scientifique et chaque projet SIG

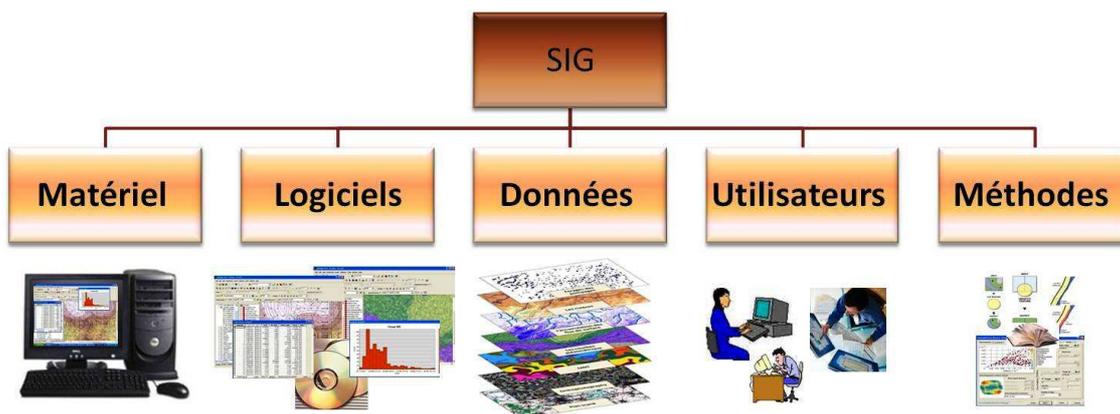


Figure I-4 Composants principaux du SIG

I.2. Les informations géographiques et les types des données spatiales

I.2.1. La structure des données

La base de données SIG est organisée par une série de couches dont chacune contient un thème d'informations différent. Ces couches sont géographiquement référencées et liées à une projection commune (Figure I-5).

Chacune des cartes thématiques représente une couche superposée sur les autres afin que chaque emplacement soit adapté à son emplacement correspondant sur toutes les autres cartes. La couche inférieure de ce diagramme est très importante, elle représente le système de référence de localisation à laquelle toutes les cartes ont été correctement calées. Une fois que ces cartes ont été co-enregistrées dans un système de référence, les informations affichées sur les différentes couches peuvent être comparées et analysées selon une méthodologie combinatoire.

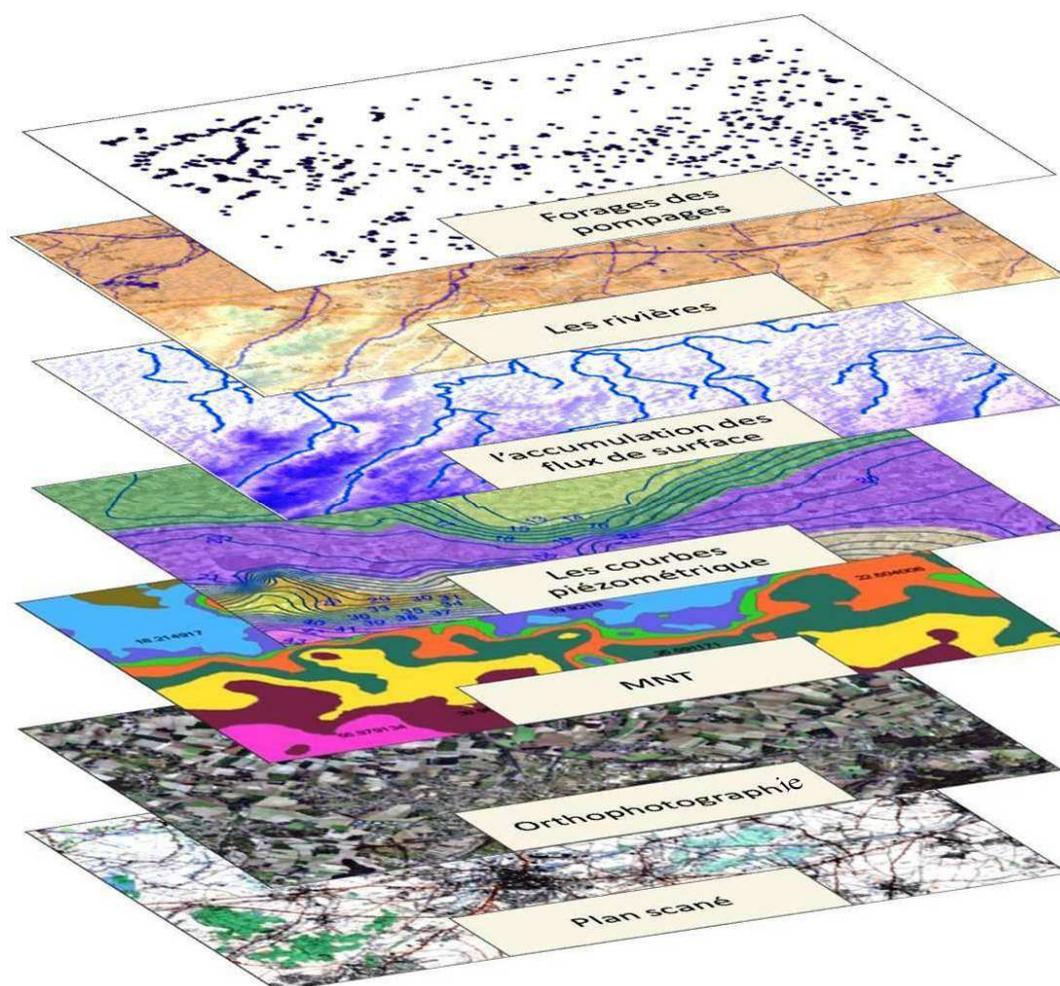


Figure I-5 Couches superposées abordant des thèmes multiples

I.2.2. Les bases de données

Les données géographiques doivent être organisées dans un SIG afin de permettre l'accès, la récupération et la manipulation efficace (Burrough et McDonnell, 1998). En général, le SIG organise les données par le biais des bases de données hautement structurées. Une base de données est une collection de données non-redondantes représentant les besoins d'un ensemble d'utilisateurs (Laurini et Thompson, 1992). Une autre définition d'une base de données est introduite par (Antenucci, *et al.*, 1991) : la base de données est un ensemble structuré de données graphiques et non-graphiques permettant de décrire un plan d'information, de définir des relations spatiales et des caractéristiques d'un site donné. La construction de la base de données dans un SIG est l'étape la plus coûteuse, la plus longue, elle constitue un des points les plus lourds de la mise en œuvre du SIG. Dans une base de

données, les données spatiales peuvent être codées de plusieurs manières pour soutenir les différentes opérations d'un SIG. Il existe quatre structures d'organisation des données, apparues chronologiquement : la structure hiérarchique, la structure en réseau, la structure relationnelle et la structure orientée objet.

Ces quatre structures sont présentées ci-dessous (Figure I-6, Figure I-7)

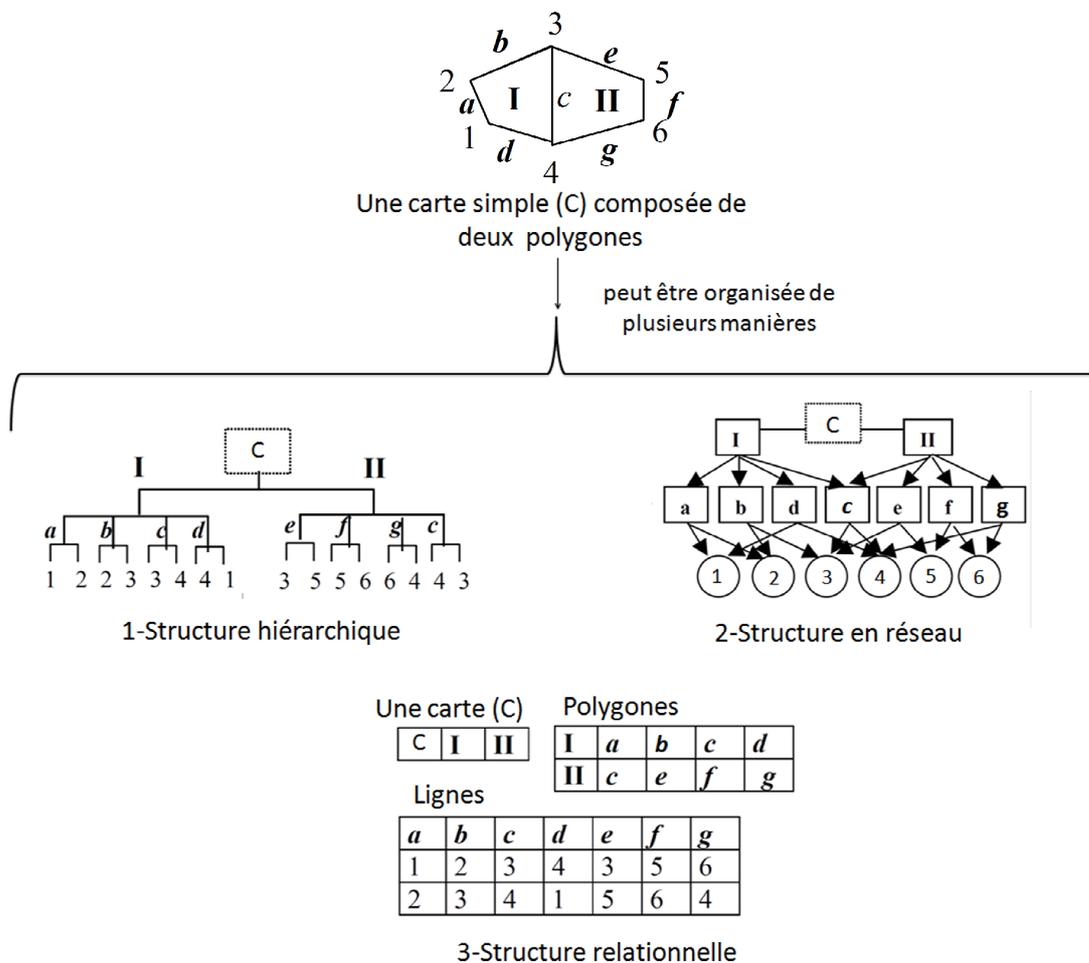


Figure I-6 Structure hiérarchique, en réseau et relationnelle d'après Burrough et Mcdonnell, (1998)

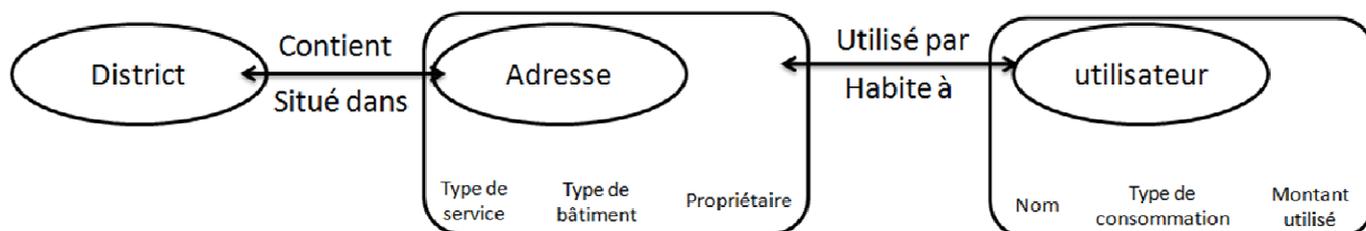


Figure I-7 Structure orientée objet d'après Burrough et Mcdonnell (1998)

Selon le modèle hiérarchique classique, tous les enregistrements sont dépendants et disposés en structures à plusieurs niveaux qui consistent en un enregistrement racine et un nombre donné de niveaux subordonnés (O'Brien et Marion, 1997). Ainsi, parmi les fichiers, toutes les relations sont co-univoques, puisque chaque élément d'information n'est relié qu'à un élément supérieur. L'élément d'information ou l'enregistrement du plus haut niveau de la hiérarchie s'appelle l'élément racine. On peut avoir accès à n'importe quel élément d'information en descendant progressivement d'une racine aux branches de l'arbre, jusqu'à la localisation de l'enregistrement désiré (O'Brien et Marion, 1997). Lorsque les données ont des relations parent/enfant ou un/plusieurs, la structure hiérarchique ou arborescente fournit des moyens rapides et faciles d'accès aux données. L'un des avantages de cette structure est sa simplicité et sa facilité d'accès via des clés qui définissent la hiérarchie. L'approche hiérarchique convient aux bases de données où l'on souhaite segmenter l'information spatiale en différents thèmes de gestion (Burrough et McDonnell, 1998). La structure en réseau peut représenter des relations logiques complexes plus nombreuses. Elle autorise les relations de multivoques entre fichiers : c'est-à-dire que le modèle en réseau peut accéder à un élément d'information en suivant plusieurs chemins, parce que tout élément d'information ou tout fichier peut être relié à n'importe quel nombre d'éléments d'information (O'Brien et Marion, 1997). La structure en réseaux est adaptée à la gestion des liens entre les entités "lignes" et "polygones" contenues dans une base de données (Burrough et McDonnell, 1998). Selon la structure relationnelle, tous les éléments d'information de la base de données sont stockés sous forme de simples tables. Les progiciels de système de gestion de bases de données fondés sur le modèle relationnel peuvent lier les éléments d'information de tables variées afin d'offrir de l'information aux utilisateurs (O'Brien et Marion, 1997). L'approche relationnelle est utilisée préférentiellement pour extraire des informations selon leurs caractéristiques ou pour créer de nouveaux attributs aux éléments présents dans la base (Burrough et McDonnell, 1998). Dans le modèle de base de données orienté objets, un objet est un ensemble de valeurs de données décrivant les attributs et les liens d'une entité, ainsi que les méthodes et les processus que l'on peut appliquer aux données. Cette fonction a pour nom l'encapsulation (O'Brien et Marion, 1997) et permet au modèle orienté objets de manipuler certains types de données complexes (graphiques, images, texte) mieux que les autres structures de base de données (O'Brien et Marion, 1997). Le modèle orienté objets prend également en charge l'héritage, c'est-à-dire que de nouveaux objets peuvent être automatiquement créés en reproduisant certaines ou toutes les caractéristiques d'un ou de plusieurs objets parent. (O'Brien et Marion, 1997). La structure orientée objet est requise pour les bases où l'on souhaite privilégier les interactions

entre objets, l'utilisation de cette structure permet de combiner la rapidité des approches hiérarchiques et de types réseaux avec la flexibilité des approches relationnelles (Burrough et Mcdonnell, 1998).

La recherche actuelle concernant les bases des données des SIG aime à concevoir des structures beaucoup plus souples, qui peuvent tenir compte de l'évolution spatiale et temporelle des données comprises dans les bases de données.

I.2.3. Le type des données intégrées dans un SIG

Les SIG se distinguent des systèmes de gestion de bases de données classiques par le fait qu'ils intègrent des données graphiques et non-graphiques. Les données graphiques contiennent des éléments cartographiques sous forme numérique et sont représentées spatialement (Burrough, 1986). Les données non-graphiques contiennent les caractéristiques et les qualités des données graphiques et leurs relations (Antenucci, et al., 1991). Les structures principales des données spatiales utilisées à ce jour sont les données vectorielles et matricielles, divisant l'espace soit en une série de points, lignes et surfaces, ou en des mailles régulières ou non. Dans un SIG, la nature de la représentation de données a une forte influence sur l'analyse qui peut être appliquée (Johnson, 2009). Elle est même considérée comme une raison principale du succès ou de l'échec d'un SIG. La manipulation inappropriée de la représentation des données conduit de façon prévisible à un SIG inadapté (Galati, 2006). D'où, deux modes de représentation de l'information géographique : le mode raster et le mode vecteur.

A. Données raster

Le format raster des données (Figure I-8) représente la réalité par des cellules de grille uniformes d'une résolution spécifique. Chaque carré (ou cellule de grille) référencée par un numéro de colonne et de ligne couvre une place géographique donnée et une valeur d'attribut est assignée à la cellule. La cellule de grille est la plus petite unité géographique dans un SIG raster, elle est connue comme « l'unité cartographique minimale » (Geographical Information Systems , 2010). La résolution dépend de la taille de la cellule de la grille : Plus la cellule représente une grande surface de la réalité, moins l'information est précise et réciproquement. De même, plus la grille est grande pour une représentation spatiale de la réalité précise plus la base de données est grande parce qu'il y a plus de détails disponible sur la zone d'intérêt.

B. Données vectorielles

Un système basé sur le mode vectoriel affiche les données graphiques comme étant des points, des lignes ou des polygones (Figure I-8) qui sont précisément positionnés dans une carte. En outre, chaque objet dans la représentation vecteur comprend de l'information topologique qui décrit sa relation spatiale à des objets voisins. Les relations topologiques exploitées dans ce contexte sont l'adjacence, la connectivité, l'inclusion et l'intersection. Cette définition explicite et claire des liens entre les objets rend la structure vecteur attrayante et permet l'analyse automatique et l'interprétation des données spatiales dans l'environnement du SIG (Meijerink, *et al.*, 1994)

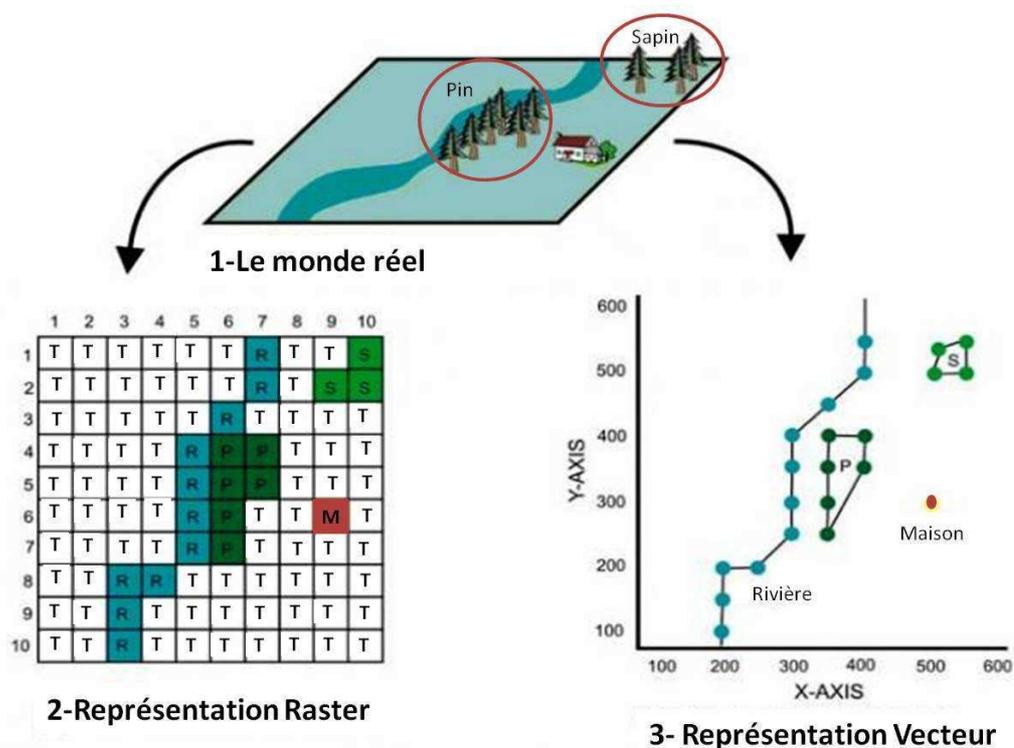


Figure I-8 Comparaison entre la représentation raster et celle vecteur. Le paysage en (1) est affiché dans une représentation matricielle (2) et dans une représentation vectorielle (3). (T) représente la terre, les arbres de pins (P) et de sapin (S) sont des objets surfaciques. La rivière est un objet linéaire, et la maison (M) est un élément ponctuel (Types of Data Used in a GIS, 2007, modifiée)

Les avantages des deux modes sont résumés ci-dessous (Burrough et Mcdonnell,1998) :

Vecteur	Raster
bonne représentation de la structure des données	structure simple de données
structure compacte	accès aux attributs simplifiés
topologie explicite permettant une bonne analyse en réseau	facilité d'analyse spatiale (filtre) Cartes d'occupation biophysique des sols
projection géographique et translation aisée	modélisation simplifiée du fait de la forme régulière des cellules
qualité de représentation aux différentes échelles	technologie bon marché
l'extraction, la mise-à-jour et la généralisation des données sont possibles	supports idéaux pour de nombreux types de données

Tableau I-1 Les avantages des deux modes, vecteur et raster

Les contraintes (Inconvénients) des deux modes sont résumées ci-dessous (Burrough et Mcdonnell, 1998) :

Vecteur	Raster
structures complexes de données	volume des données
intersection nécessitant une puissance de calcul	perte d'information due au choix des cellules
visualisation et impression nécessitant un important temps d'affichage	moins bonne qualité esthétique
contenu homogène de chaque polygone rendant l'analyse spatiale impossible	projections géographiques nécessitant des algorithmes adaptés pour éviter la distorsion de la grille
simulation difficile car chaque polygone a une forme propre	

Tableau I-2 Les contraintes (Inconvénients) des deux modes, vecteur et raster

Les applications possibles du SIG couvrent toutes les échelles spatiales. Elles peuvent être triées à partir du type de la technologie utilisée dans l'acquisition des données soit par

télédéttection à partir d'avions et de satellites, images à partir des systèmes optiques ou radar, systèmes de positionnement global (GPS), la photogrammétrie et analyse d'image numérique (Walsh et Davis, 1994). Le tableau ci-dessous montre une liste de six grandes catégories de données et le type des couches thématiques associées à chacune :

catégories de données	Exemple de couche
Cartes de base	Points de contrôle ; Contours topographiques ; Empreintes des bâtiments ; Références de localisation
Cartes thématiques	Occupation du sol ; Démographie ; Taux d'imposition ; Services d'urgence
Cartes environnementales	Cartes de types des sols ; Lignes d'écoulements des eaux ; Carte des inondations ; Cartes d'occupation biophysique des sols
Cartes de réseaux d'installation	Réseau d'eau ; Système d'égouts et d'assainissement ; Télécommunications ; Réseau électrique
Cartes de réseaux de transport	Lignes médianes des rues ; Intersections de routes ; Lignes de chemin de fer
Le registre foncier	Limites des parcelles ; Servitudes et droits de passage

Tableau I-3 : Liste de six grandes catégories de données et le type des couches thématiques associées à chacune (ESRI, 1986)

I.3. L'analyse dans le SIG

I.3.1. Principales fonctions du SIG

La capacité d'analyse du SIG est spécifiquement accordée avec le domaine de l'analyse spatiale. La fonction principale d'un SIG est de permettre le croisement de couches de données et d'attributs et de superposer des données thématiques spatialisées. Les différentes procédures et fonctions peuvent être utilisées pour identifier une éventuelle correspondance entre les multiples couches de données. Les autres fonctions les plus usuelles du SIG comprennent des opérations de réseaux et de la connectivité, l'analyse de terrain, l'interpolation statistique, des procédures de voisinage, ainsi que des fonctions pour le développement de bases de données spatiales. Johnson (2009) a regroupé les principales fonctions du SIG dans 11 catégories d'analyse (Tableau I-4).

<p>La saisie et la maintenance des données spatiales</p> <p>Digitalisation Numérisation Conversion de format COGO Développement des données photogrammétriques Télédétection et traitement d'images Arpentage GPS Identification et édition des objets Transformations géométriques Conversions de la projection L'ajout et l'édition et des attributs Métadonnées</p>	<p>Opérations de surface</p> <p>Tessellations réguliers et irréguliers (TIN) Volume; remblais/déblais Étendre et chercher Intervisibilité Illumination; vue en perspective Les bassins versants et la modélisation de la surface</p>
<p>la géométrie et les mesures</p> <p>Intersections Distances, distances pondérées Périmètre, superficie</p>	<p>Superpositions et l'algèbre des cartes</p> <p>Superposition (raster et vecteur) Algèbre des cartes Modélisation cartographique Évaluation de la qualité</p>
<p>Les requêtes spatiales et non spatiales; classifications</p> <p>Sélection Fenêtrage Visualiser, trouver, naviguer, faire des rapports Trier, enregistrer, restreindre, calculer Relations et jointures relationnelles (SQL) Classification et généralisation Analyse en Composantes Principales</p>	<p>Statistiques spatiales</p> <p>Les statistiques descriptives Les échantillons et les unités Polygones de Thiessen Surfaces de tendance Interpolation L'analyse multivariée</p>
<p>Opérations de voisinage</p> <p>Rechercher Proximité Tampon Filtres Pente, exposition, convexité</p>	<p>Traitement des images</p> <p>Correction radiométrique et géométrique Amélioration des 'images Classification des images</p> <p>Affichage, interfaces, intégration</p> <p>Conception des cartes Symbologie Représentation des couleurs Interface Rapports Visualisation et animation Intégration des modèles</p>

Différences finies, éléments finis	Internet et l'accès au réseau
Arrangement spatial et fonctions de connectivité	Les modèles de gestion
Topologie	Simulation
Adjacence	Critères multiples
Contiguïté	Optimisation (LP, PNL, DP)
Réseaux	Des objectifs multiples
Chemin optimal	Systemes d'aide à la décision

Tableau I-4 Liste des fonctions incluses dans chacune des 11 catégories d'analyse dans un SIG d'après Johnson, (2009)

I.3.2. Les grandes fonctions d'analyse des données raster

Plusieurs fonctions d'analyse permettent de générer de nouvelles informations par des opérateurs logiques et des fonctions mathématiques appliqués aux données en mode raster. Par exemple, le terme «algèbre des cartes» qui a été introduit dans les années 1970 représente une série de conventions, de capacités et de techniques d'analyse qui ont été largement adoptées pour les données raster. L'algèbre des cartes est principalement orienté vers des données qui sont statiques. Chaque opération d'algèbre de carte accepte une ou plusieurs couches en entrée et génère une seule nouvelle couche de résultat en sortie. Alors que les fonctions individuelles sont strictement définies, l'éventail des possibilités de combiner ces fonctions est entièrement ouvert. Ces fonctions peuvent être classées en trois types d'opérations en partant du principe que chaque opération se rapporte à une seule localisation même si plusieurs couches d'information sont utilisées (Tomlin, 1990). Les fonctions locales s'appliquent sur une seule cellule et calculent un jeu de données raster en sortie dans lequel la valeur en sortie de chaque emplacement est définie en fonction de la valeur associée à cet emplacement dans un ou plusieurs jeu de données raster en entrée (Piro, et al., 2005). Les fonctions focales (ou de voisinage) : elles produisent un jeu de données raster en sortie dans lequel la valeur en sortie de chaque emplacement correspond à une fonction de la valeur en entrée d'un emplacement et des valeurs des cellules d'un voisinage spécifié autour de cet emplacement (rectangle, cercle, anneau ou secteur) (ESRI, 2010). Les fonctions zonales : elles sont similaires aux fonctions focales, sauf que la définition du voisinage dans une fonction zonale correspond à des zones ou des entités de jeu de données en entrée, et non à une forme de voisinage spécifié. A ces trois fonctions on peut ajouter les fonctions globales (ou par raster) qui produisent un jeu de données raster en sortie dans lequel la valeur en sortie de

chaque emplacement de cellule correspond potentiellement à une fonction de toutes les cellules des jeux de données raster en entrée (ESRI, 2010).

I.3.3. Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Un MNT est une représentation numérique spatialisée du relief généralement constitué de cellules de grille de taille égale, ayant chacune une valeur d'élévation dans un référentiel géodésique. La structure simple des données et leur large disponibilité à l'échelle globale depuis le projet SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de la NASA (NASA, 2009) en ont fait un outil très populaire pour l'aménagement du territoire, la dérivation des caractéristiques géomorphologiques, la modélisation hydrologique, la cartographie à grande échelle (Le Coz, *et al.*, 2009 ; Dobos, *et al.*, 2001 ; Siart, Bubenzer, et Eitel, 2009). La topographie influence de nombreux processus liés à la géographie de surface terrestre, comme par exemple la température et les précipitations, les écoulements de surface. Le SIG est un outil permettant la représentation du relief d'une manière très précise parce que l'incertitude spatiale des données topographiques liées au MNT peut entraîner de mauvaises décisions dans le domaine de l'environnement (Shamsi, 2005).

A. Structures de données MNT

Le MNT stocke les données de terrain (les coordonnées et les valeurs correspondantes de l'altitude) dans une structure déterminée. En général, Il existe trois types de structures de données, (Figure I-9) (Shamsi, 2005) :

- Raster
- Réseau triangulaire irrégulier (TIN, *Triangular Irregular Network*)
- Contours des niveaux

Dans le format grille, le MNT est défini par les données (X, Y, Z), où X et Y représentent les coordonnées et Z représente les valeurs de l'altitude. Le maillage peut être carré, rectangulaire ou triangulaire (TIN).

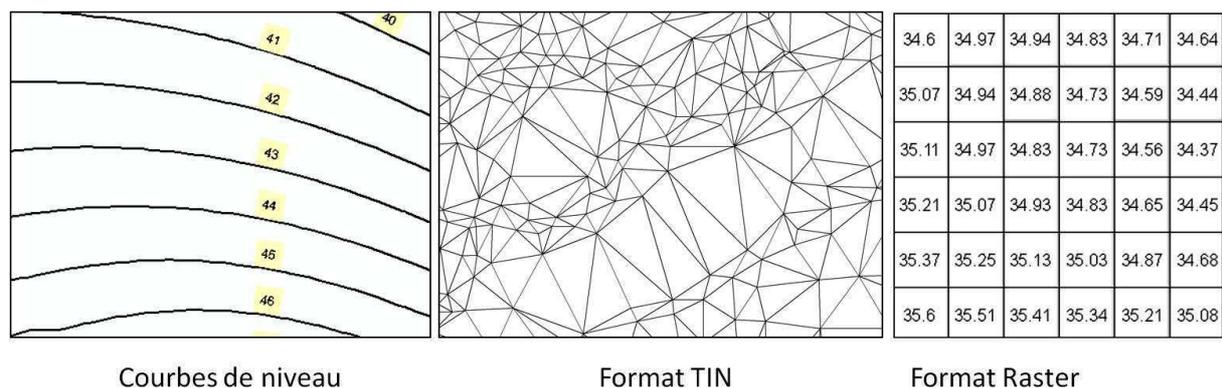


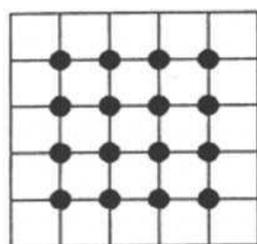
Figure I-9 MNT dont les données sont stockées dans plusieurs structures de données

La plupart des MNT utilise un maillage régulier carré pour les petites zones, ou un maillage pseudo carré dont les côtés sont des méridiens et des parallèles pour les grandes zones (Techno-Science.net, 2009). Le format TIN utilise un maillage triangulaire irrégulier. Ce type est couramment utilisé dans les logiciels SIG. Il est l'une des techniques standard pour la représentation en mode réalité/2D augmentée sur des modèles numériques de terrain.

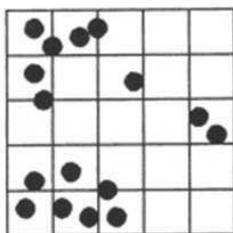
B. Construction et disponibilité d'un MNT

Plusieurs méthodes sont disponibles pour construire un MNT

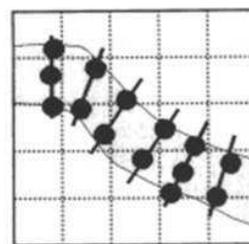
- **La Méthode classique** : elle se déroule en trois étapes : L'échantillonnage, l'interpolation et la représentation des données. L'échantillonnage peut se faire par la numérisation des courbes de niveau d'une carte, par saisie directe des coordonnées (x, y, z) des points du terrain mesurées par GPS, triangulation au tachéomètre (par des géomètres). Les acquisitions de mesures topographiques sur le terrain sont les plus précises, mais ce type de méthode demande un travail fastidieux et coûteux en temps et en moyens humains. L'interpolation à partir des données ponctuelles se fait à partir de plusieurs types d'échantillonnage (Figure I-10).



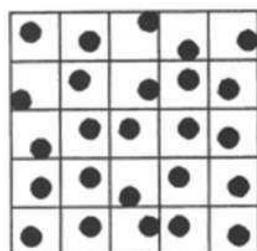
Échantillonnages réguliers



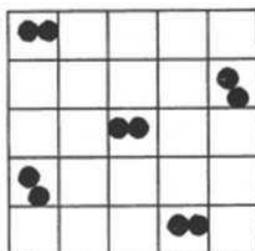
Échantillonnages aléatoires



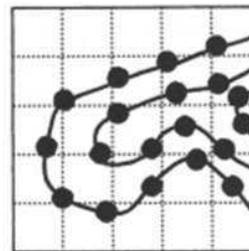
Échantillonnages sectionnés



Échantillonnages stratifié



Échantillonnages voisines



Échantillonnages des contours

Figure I-10 Différents types d'échantillonnages utilisés pour collecter les données spatiales à partir des données ponctuelles (Burrough et McDonnell, 1998)

- **La corrélation d'images stéréo** : une stéréoscopie est faite à partir d'un couple d'images aériennes (photogrammétrie) ou prises par satellite. L'estimation des données d'altitude s'effectue en mesurant le déplacement de la parallaxe entre une paire de points.

- **l'interférométrie radar**: elle est une technique récente de génération de (MNT). Elle utilise des variations géométriques sub-pixeliques présentes dans les différences de phases d'images radar complexes recalées (Dupont & Berthod, 1994). L'imagerie S.A.R. (Synthetic Apeature Radar) avec plusieurs angles de vue semble être une technique prometteuse, en fait les images SRTM couvrent plus de 80% de la Terre entre les latitudes 60 degrés nord et 56 degrés Sud, avec des images disponibles gratuitement sur l'internet.

- **L'altimétrie par système laser aéroporté (LIDAR « Light Detection and Ranging »)**: la mesure de l'altitude au laser est une méthode capable de reproduire une topographie avec une résolution verticale centimétrique. Elle permet aussi de représenter le relief sous couvert forestier.

C. Différence entre MNT, MNA et MNE

On utilise le terme de modèle numérique d'altitude (MNA) pour faire référence aux modèles avec des informations d'altitude, tandis que l'expression du modèle numérique de terrain (MNT) fait référence à une notion beaucoup plus large de la représentation du terrain, y compris des paramètres tels que la pente et l'exposition, et des caractéristiques du terrain telles

que les crêtes et les vallées (Zhou, Lees, et Tang, 2008). Le modèle numérique d'élévation (MNE) est un modèle numérique d'altitude qui n'est pas calé sur un référentiel géodésique mais sur un point initial dont la position et l'altitude sont aléatoires mais il sert de référence.

Les deux modèles (MNA) et (MNE) sont des modèles tridimensionnels représentants, sous forme numérique, le relief d'une portion de territoire, incluant les bâtiments et la végétation. Ils se distinguent du modèle numérique de terrain par le fait que ce dernier ne tient pas compte du sursol (bâtiments et végétation).

I.4. Méthode optimale d'interpolation

L'interpolation est importante et fondamentale afin de déterminer la distribution spatiale d'un phénomène à partir d'un ensemble d'échantillons, en prédisant des valeurs à partir des données observées connues. Une analyse locale des données est indispensable, et le choix de la méthode très important. On peut classer les méthodes de l'interpolation en deux approches : l'approche globale et l'approche déterministe locale (Burrough et McDonnell, 1998). La méthode globale de l'interpolation utilise toutes les données disponibles pour fournir la prédiction pour l'ensemble de la zone d'intérêt. Alors que la méthode locale est faite dans une petite zone autour des données interpolées, les estimations sont faites uniquement pour la zone contenant les données. Lam (2009) a distingué les méthodes d'interpolation à partir des points de celle à partir des surfaces. L'interpolation à partir des points est classée en deux catégories : "exacte" et "approximative". La distance inverse pondérée (IDW) et le krigeage sont des exemples de la méthode exacte, alors que des exemples de la méthode approximative comprennent la méthode «spline» et la méthode de la tendance de surface. Lorsque les données sont abondantes, la plupart des méthodes d'interpolation donnent des résultats similaires, mais quand il ya un manque de données, le choix de la méthode et ses paramètres devient crucial si l'on veut éviter des mauvais résultats (Burrough et McDonnell, 1998). Le krigeage est une méthode géostatistique qui s'est avérée utile et performante dans de nombreux domaines (Gratton, 2002), Le krigeage a été largement utilisé dans la géoscience (Journel et Huijbregts, 1981). La géostatistique est une branche de la statistique appliquée qui met l'accent sur le contexte spatial et des relations spatiales entre les données. Elle fournit des outils pour la quantification et l'exploitation d'autocorrélation spatiale, et des algorithmes pour l'interpolation des données et la quantification des incertitudes (Isaaks et Srivastava, 1989). Le krigeage porte le nom de son précurseur, l'ingénieur minier d'Afrique du Sud DG Krige (Krige, 1951) qui a développé une série de méthodes statistiques empiriques afin de

déterminer la distribution spatiale de minerais à partir d'un ensemble de forages. C'est cependant le français Matheron (Matheron, 1963) qui a formalisé l'approche en proposant les bases conceptuelles de la géostatistique. Au cours des dernières décennies, le krigeage est devenu un outil fondamental dans le domaine de la géostatistique (Gratton, 2002).

Il existe trois types de krigeage univarié (i.e. à une seule variable) : le krigeage simple, le krigeage ordinaire et le krigeage universel (Gratton, 2002). La différence entre ces types d'estimation réside dans la connaissance de la statistique de la variable à interpoler. Dans le paragraphe suivant, nous nous restreindrons au krigeage ordinaire (Cressie, 1986, 1990), aussi appelé krigeage ponctuel par certains auteurs, car il est le plus fréquemment utilisé (par exemple : Bertazzon, *et al.*, 2006 ; Yang, *et al.*, 2008 ; Woo, *et al.*, 2009)

L'estimateur de krigeage ordinaire est présenté par l'équation (I-1)

$$Z(S) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(S_i) \quad (\text{Équation I-1})$$

Où

n est le nombre des mesures considérées,

Z est la valeur d'attribut correspondant dans un point S_i qui a une localisation (x_i, y_i)

et λ_i est le poids du point S_i .

L'interpolation spatiale est un problème classique d'estimation du poids des points. Contrairement à la méthode d'interpolation de la distance inverse pondérée (IDW), le krigeage est basé non seulement sur la distance entre les points, mais aussi sur les attributs de ces points. Le krigeage, tente d'optimiser l'interpolation en utilisant le variogramme qui exprime la variation spatiale de la valeur attributaire, il minimise l'erreur de prédiction entre les valeurs qui sont estimées et celles prévues selon l'équation I-2, ce qui permet de calculer l'erreur d'estimation. On peut l'utiliser autant pour l'interpolation que l'extrapolation.

$$[Z(S_0) - \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(S_i)]^2 \quad (\text{Équation I-2})$$

Le krigeage utilisera alors le semi-variogramme pour déterminer les poids dans l'équation (I-1), Il est décrit par l'équation (I-3) :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{var}[Z(s+h) - Z(s)] \quad (\text{Équation I-3})$$

Où h est un vecteur et $h > 0$ (Haining, 1997).

L'estimation d'un modèle de semi-variogramme s'appuie sur deux hypothèses importantes: la quantité de $\gamma(h)$ existe pour tous les choix de h et s , et la moyenne et la variance de la fonction $z(s)$ sont stationnaires, c'est-à-dire qu'elles ne dépendent pas de la position des points mais seulement de la distance entre les points.

La Figure I-11 présente un exemple de variogramme $\gamma(h)$ Il suffit d'ajuster une fonction à tous ces points à l'aide du variogramme expérimental qui nous permet de trouver le modèle qui sera utilisé pour l'estimation.

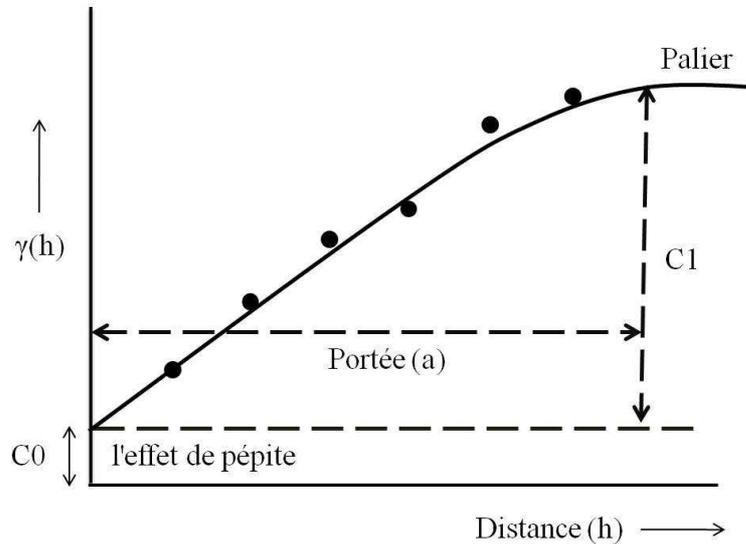


Figure I-11 Exemple de variogramme avec la portée, l'effet de pépité et le palier.

La Figure I-12 nous montre l'allure des quelques modèles de variogramme les plus couramment utilisés.

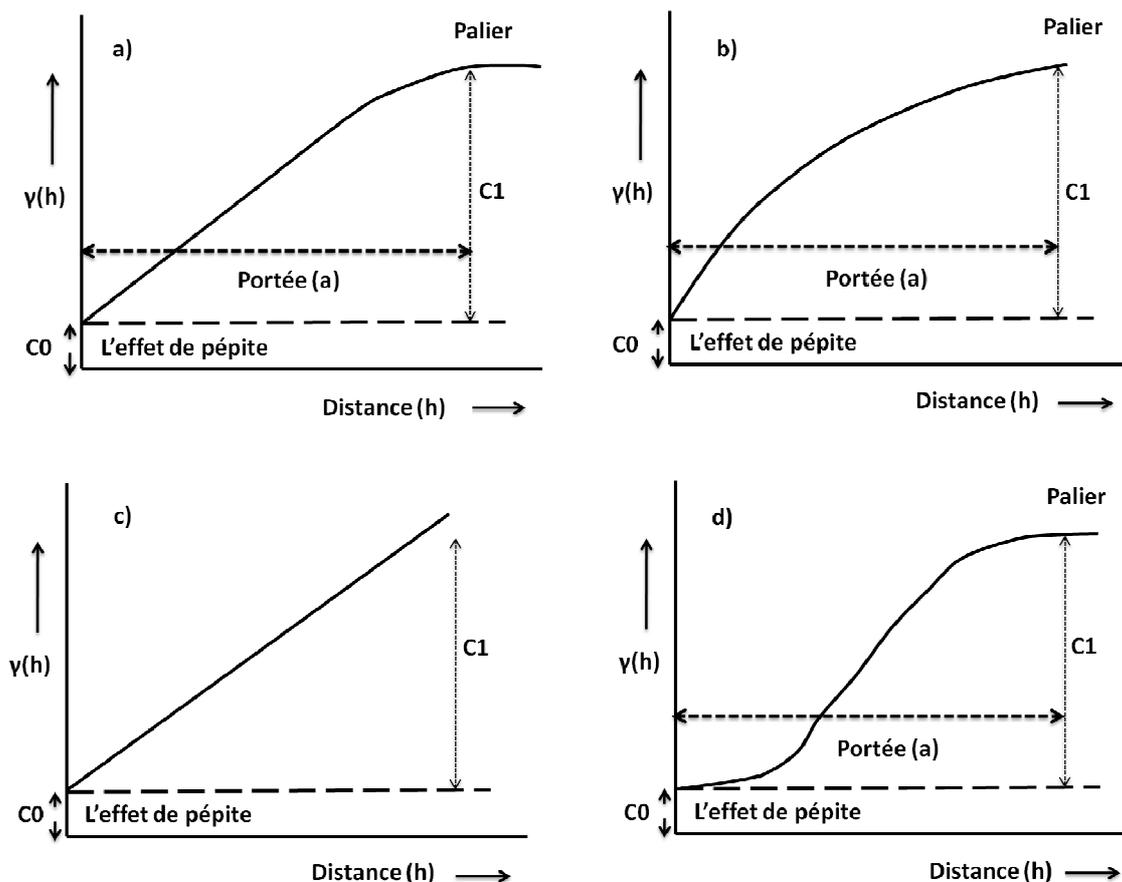


Figure I-12 Exemples des modèles de variogramme les plus couramment utilisés :

(a) sphérique ;(b) exponentiel ; (c) linéaire et (d) gaussien (Burrough et McDonnell, 1998)

Le Krigage consiste ensuite à calculer les poids λ_i de l'équation (1) à l'aide des valeurs de la fonction $\gamma(h)$ correspondant aux n points choisis. Le calcul des poids se fait selon l'équation suivante :

$$\Gamma * \lambda = g$$

Où

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11} & \dots & \gamma_{1N} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{1N} & \dots & \gamma_{NN} & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_N \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \vdots \\ \gamma_{N0} \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\lambda = \Gamma^{-1} * g$$

Où : La matrice Γ est la valeur de semi variogramme calculé selon la distance entre les paires de points. La matrice λ est la matrice des poids qu'on doit calculer. La matrice g est la matrice de semi variogramme calculé à partir des locations des points à prédire.

Une des forces d'utiliser cette approche statistique est qu'il est aussi possible de calculer l'incertitude de la prévision. La variance de l'estimation σ^2 , c'est-à-dire le carré de l'écart type de chaque point, est obtenue par la relation : $\sigma^2 = \lambda_i * g$

I.5. La modélisation hypergraphique HBDS (Hypergraph Based Data Structure)

I.5.1. Définition

La méthode HBDS (Hypergraph Based Data Structure) inventée par le Pr. François Bouillé (Bouillé, 1977) dans sa thèse « Un modèle universel de banque de données, portable et simultanément partageable » en 1977 est (comme son nom l'indique) une méthode de modélisation des données s'appuyant sur la théorie des hypergraphes. Le modèle HBDS est une méthode générale de la structuration de l'information spatiale, thématique et temporelle qui s'appuie sur une approche phénoménologique, fondée sur la théorie des ensembles, qui régit les phénomènes de toutes natures ainsi que leur organisation, et sur la théorie des graphes y compris le concept d'hypergraphe (Berge, 1970).

I.5.2. Les quatre concepts fondamentaux de la méthode HBDS

La méthode HBDS utilise quatre éléments basiques dans sa conception : **Classe, objet, attribut et association**. La classe est l'ensemble des éléments appelés objets. Les hyperclasses regroupent les classes sémantiques qui font partie d'un même sujet. Les objets d'une classe sont caractérisés par des attributs et peuvent avoir des relations avec des objets de la même classe ou avec d'autres classes appelé lien entre classes (Bouillé, 1977). La classe est donc l'ensemble de données (objets) possédant des caractéristiques communes. Le lien est la possibilité de relation entre deux objets et l'attribut correspond aux caractéristiques permettant la description d'un objet (Pelle, 2002).

I.5.3. Le Modèle Conceptuel de Données (MCD)

Le Modèle Conceptuel de Données (MCD) est un schéma HBDS qui décrit les types d'éléments HBDS que l'on peut utiliser pour modéliser les données (Pelle, 2002). Le modèle est représenté par un projet conceptuel, formalisant graphiquement les hyperclasses, les classes, les attributs et les liens qui expriment les phénomènes simples ou complexes du monde réel. L'étape de la création du modèle conceptuel de données (MCD) est essentielle et permet de faire le lien entre la problématique de l'étude et la construction du SIG (Saint-

Gérand, 2002). Le MCD va permettre également de visualiser les liens qui existent entre et à l'intérieur des différents phénomènes étudiés. La construction du MCD est une étape indispensable et précède toute création d'un SIG. Il doit être évolutif afin de permettre l'intégration de nouveaux phénomènes (Arab, Minelli, et Pirot, 2005). Les concepts de la méthode, dans le graphisme du MCD, deviennent sommets, classes, évaluations, liens. Leur sémiologie est la suivante (Saint-Gérand, 2002) (Figure I-13):

- Les sommets de l'hypergraphe représentent des objets (ou éléments).
- Les arêtes de l'hypergraphe délimitent des classes (ou ensembles) ; elles sont associées à des sommets les représentant.
- Les sommets sont porteurs d'évaluations représentant les attributs (ou propriétés) des objets et des classes.
- Les arcs entre sommets représentent les liens entre objets et les liens entre classes.

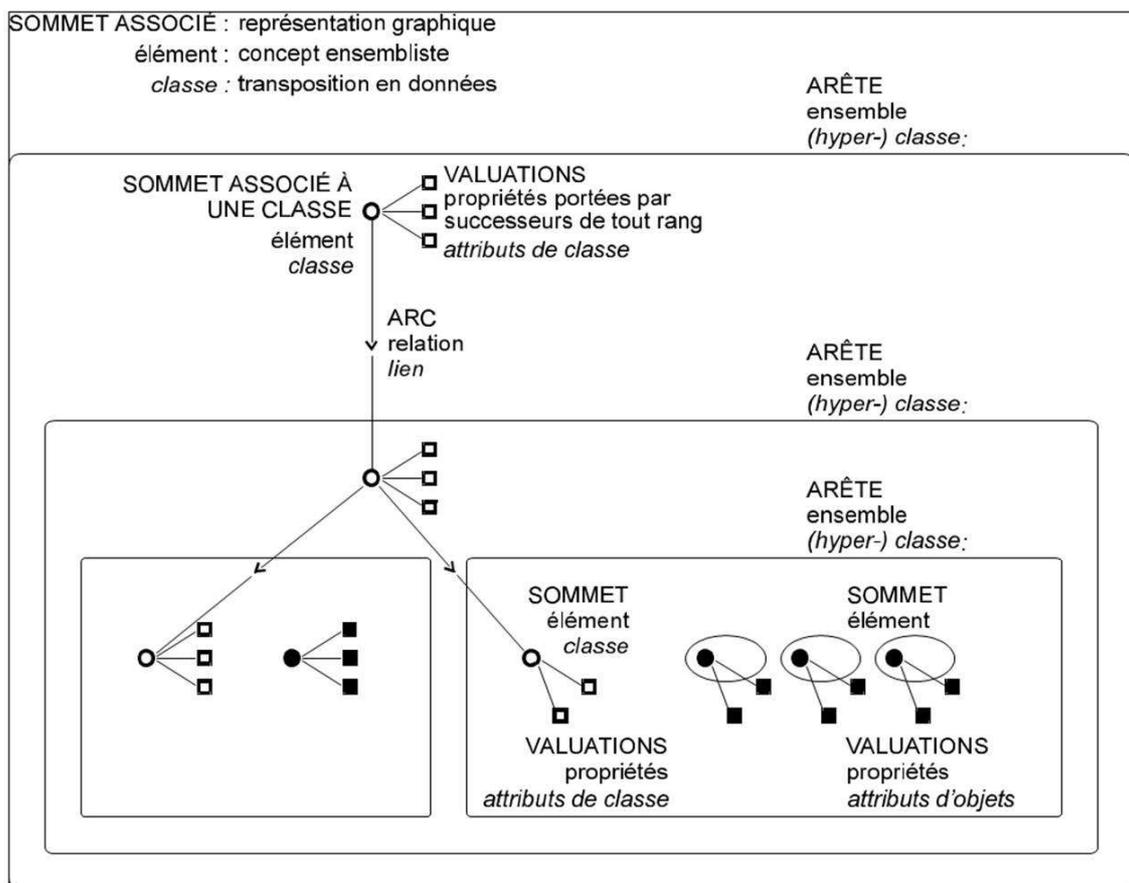


Figure I-13 Graphisme conventionnel H.B.D.S. (Saint-Gérand, 2002)

On peut exprimer de plusieurs façons la description du monde réel, les entités, les caractères et les relations (Hamel, 1996) :

Monde réel	Entité	Caractère	Relation	Classe
Espace géographique	Objet géographique	Descripteur	Relation	Classe
Structure de données	Objet	Attribut	Lien	Classe
Ensembles	Élément	Propriété	Relation	Ensemble
Hypergraphe	Sommet	Évaluation	Arc	Arête

Tableau I-5 Correspondances entre concepts hypergraphiques et concepts géographiques, relationnels, ensemblistes (Hamel, 1996)

I.5.4. Construction d'un Modèle Physique de Données (MPD)

L'élaboration du MCD est indépendante des techniques des logiciels de SIG, tandis que la création d'un Modèle Physique de Données (MPD) nécessite une plate forme qui représente son support physique (Bouillé, 1977). Dans le cadre de notre étude, nous avons travaillé avec les produits proposés par ESRI notamment ArcGIS. Pour créer un modèle physique de données, on doit commencer par la création d'une géodatabase. La modélisation a pour but de d'identifier l'information spatiale (géographique) ou spatiale (thématique) nécessaire à une problématique en vue de la structurer (modélisation logique des données), de la stocker (modélisation physique des données) afin de la gérer (sciences 'informatique), de la traiter, de la manipuler, de la créer, de la recréer puis de pouvoir l'interroger, l'analyser, faire des simulations et créer des scénarii en vue de vérifier et de tester des hypothèses émises au départ (théorie de l'information spatiale) (Pirrot et Saint-Gérard, 2004). Le logiciel ArcGIS Desktop propose une structure évolutive et une plate-forme SIG complète qui permet d'élaborer un SIG. Il peut être fourni sous forme de trois logiciels offrant trois niveaux de fonctionnalité supérieure : ArcView, ArcEditor et ArcInfo. De plus, il comprend une suite d'applications parmi lesquels ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox sont les principales. La modélisation physique commence par l'utilisation de l'application ArcCatalog, car il permet d'accéder à un modèle de données nommé la « geodatabase » qui constituera la plate-forme pour créer le MPD. L'objet, ou l'entité dans ArcGIS, est un élément d'une classe. Les attributs caractérisent

l'objet. Chaque élément basique du modèle hypergraphique a sa propre représentation graphique dans ArcGIS (Tableau I-6).

Terminologie ArcGIS	Terminologie HBDS (F. Bouille)
<i>Geodatabase</i>	<i>Hypergraphe</i> , ex : « surface », « sous sol »
<i>Feature dataset</i>	<i>Hyperclasse</i> , ex : « Topographie », « Géologie »
<i>Feature class</i>	<i>Classe</i> , ex : « couche de la craie »
<i>Relationship class</i>	<i>Lien (HBDS), Relation topologique</i> , ex : lien entre la classe « Forages et sondages » et la hyperclasse de « Géologie »
<i>Objet, (point, polygone, polyline)</i>	<i>Objet</i>
<i>Topology</i>	<i>Topologie</i>
<i>attribut</i>	<i>Attribut</i> , ex : « La perméabilité de la craie »

Tableau I-6 Terminologie du logiciel ArcGIS et la modélisation HBDS (Pirrot et Saint-Gérand, 2004, modifié)

I.6. Tendances actuelles en matière de SIG

Le SIG est une technologie en évolution continue mais qui a atteint une certaine maturité ces dernières années (Burrough et McDonnell, 1998). Son développement s'est appuyé sur les innovations faites dans de nombreuses disciplines : la géographie, le génie civil, la photogrammétrie, la télédétection, l'arpentage, la géodésie, les statistiques, l'informatique, la recherche opérationnelle, la démographie, et de nombreuses autres branches de l'ingénierie et des sciences naturelles et sociales. La communauté des utilisateurs du SIG s'est considérablement élargie ces dernières années en termes de domaines d'application et de zones d'études. La répartition du marché mondial du SIG, toutefois, n'est pas également répartie entre les régions. En 2000 par exemple, l'Europe était le plus grand marché avec 36.6%, suivie par l'Amérique du Nord et les Caraïbes, avec 27.5%, puis en Asie avec 21,6% du marché mondial et 14.3% pour le reste du monde (Icon Group Ltd, 2002). Divers problèmes dans diverses spécialités ont ainsi été traités par le SIG. Le SIG a été utilisé dans les études de la distribution spatiale de plusieurs phénomènes comme par exemple : la chute des roches (Abdallah, 2010), la distribution des métaux lourds (Zhou, Guo, et Hao, 2007 ; Bou Kheir, *et al.*, 2010). Il a été utilisé également dans l'estimation du stock de carbone dans les forêts de la région Castilla y Leon en Espagne pour évaluer la distribution spatiale de la

biomasse résiduelle pour la bioénergie (Gil, *et al.*, 2011). Une base de données géoréférencée a été construite dans un SIG portant sur la zone littorale du lac de Léman afin d'examiner l'hétérogénéité spatiale des plantes aquatiques (Lehmann, Jaquet, et Lachavanne, 1997). Le SIG a été utilisé aussi pour prédire la répartition spatiale des animaux et des plantes (par exemple, Haslett, 1990 ; Koutnik et Padilla, 1994 ; Narumalani, *et al.*, 1997 ; Michel, *et al.*, 2002).

La technologie SIG est actuellement l'objet d'une expansion rapide dans le domaine de l'écologie et de la modélisation (Wheeler., 1993). Loin d'être seulement un outil plébiscité dans le domaine des sciences environnementales et sociales, le SIG fournit un ensemble cohérent de procédures visant à relier spatialement les données géographiques (par ex Welch et Remillard, 1988, 1992 ; Davis, Stine, et Stoms, 1994) et d'élaborer des modèles d'habitat basée sur le SIG à l'aide de la régression multiple: (par exemple, Pereira et Itami, 1991). Une approche SIG a été utilisée pour l'analyse spatiale des collections paléontologiques et archéologiques de Kents Cavern en Angleterre (Mihai, *et al.*, 2010). Le SIG a été appliqué dans les sciences sociologiques comme par exemples l'étude de la distribution spatiale du suicide dans le Queensland en Australie (Qi, Tong, et Hu, 2010), ou pour cartographier de la criminalité (Chainey et Ratcliffe, 2005). Il a été également utilisé dans le domaine de l'épidémiologie (Clarke, McLafferty, et Tempalsk, 1996).

Le SIG constituent également un moyen de visualisation des données géoréférencées en couleurs, en 3 dimensions et en mode d'animation, ce qui aide beaucoup à communiquer des informations complexes à un large éventail d'utilisateurs, ce qui améliore la compréhension et en conséquence la prise des bonnes décisions. En fait, Le SIG est devenu un composant de plus en plus intégré dans les activités de gestion et d'aide à la décision dans tous les domaines et à travers le monde. Un système d'aide à la décision (DSS) basée sur le SIG a été développé par (Zhang, Zhao, et Liu, 2010) pour la gestion du commerce de l'eau afin de prédire le changement de la qualité et de la quantité d'eau qui sera utilisée dans le but de la lutte contre la pollution. Un système d'aide à la décision a été développé pour la gestion éco-environnementale des ressources naturelles en Asie du Nord (Liu, *et al.*, 2010). Les ressources en eau et l'environnement ont intrinsèquement une nature géographique (Johnson, 2009). Donc, une base de données cartographique permet d'acquérir une connaissance d'une région et de formuler des plans de gestion. La littérature est riche des expériences dans ce domaine (McKinney et Cai, 2002 ; Chen, *et al.*, 2010). Le SIG a fortement influencé le champ de l'ingénierie des ressources en eau, surtout en ce qui concerne la planification et la gestion. La

capacité de l'analyse du SIG, les fonctions et les modèles mathématiques liés fournissent des moyens de la modélisation des données hydrologiques et permettent d'examiner des plans et des modèles de conception alternatifs et de donner la synthèse des informations, ce qui contribue à soutenir les décisions pour la gestion des ressources à tous les niveaux, du local au global (Shamsi, 2005).

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé les concepts liés aux Systèmes d'Information Géographique, nous nous sommes focalisés sur les grandes fonctions d'analyse des SIG et sur la modélisation conceptuelle selon la méthode HBDS. Un intérêt particulier se dégage de l'utilisation des SIG car ces systèmes permettent une perspective spatiale sur des problématiques différentes. Employés à leur niveau optimal, ils sont en effet un outil puissant de modélisation de l'information et présentent un potentiel certain pour ce qui relève de la gestion et de l'aide à la décision.

Chapitre II : Généralités sur la zone d'étude : caractéristiques géologiques et hydrogéologiques

Introduction

La modélisation par un SIG demande une étude détaillée de la zone d'intérêt. Dans ce chapitre, un examen du cadre géographique, géologique et hydrogéologique a été effectué afin de bien identifier les différentes caractéristiques du terrain et de situer l'objet de recherche centré sur des problématiques différentes.

II.1. Contexte général

Dans le nord de la France, l'exploitation minière aux XIX^{ème} et XX^{ème} siècles, le développement rapide et non raisonné de l'urbanisation et d'activités industrielles polluantes, l'essor de l'agriculture intensive des années soixante et les réseaux d'assainissement déficients ont provoqué la contamination des ressources en eau, en particulier des eaux souterraines (Préaux, 1986 ; Maison, 2000 ; Lacherez-Bastin, 2005 ; Serhal, 2006, Serhal, et al., 2009). En effet, les concentrations en nitrates mesurées dans la nappe de la craie, qui fournit 97 % de la totalité des eaux potables distribuées, atteignent ou dépassent fréquemment le seuil de la potabilité fixé à 50 mg/l par la Directive Cadre Européenne transcrite en droit français (2000/60/EC) (Figure II-1).

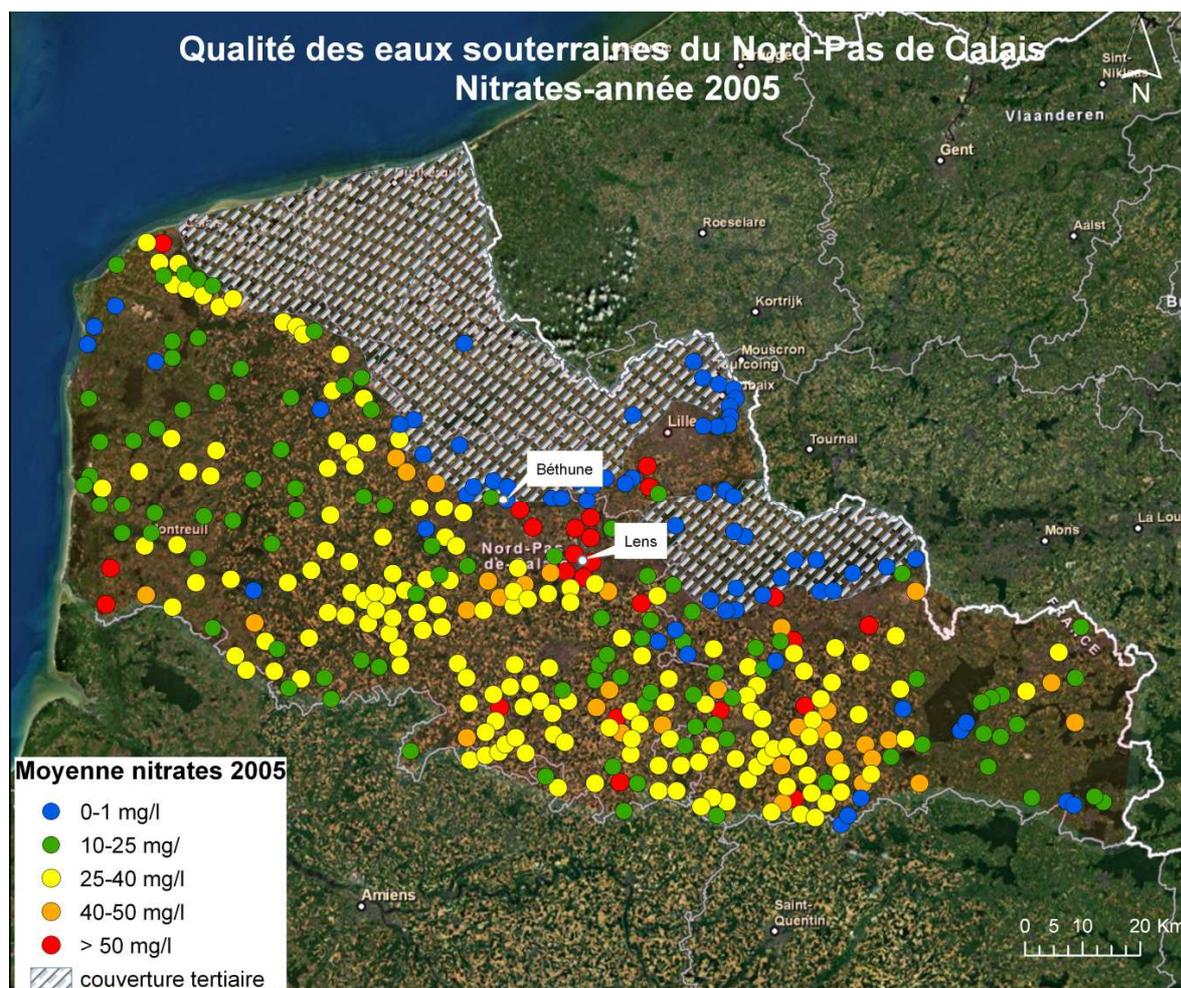


Figure II-1 Concentration en nitrates des eaux souterraines du Nord-Pas de Calais pour l'année 2005 (source : la carte de Base :ArcGIS Online, les données de concentration : Agence de l'eau d'Artois-Picardie)

Plus particulièrement, l'alimentation en eau potable du secteur Lens-Liévin (Figure II-2), dans la région du Pas-de-Calais, est assurée par des prélèvements en eau souterraine effectués principalement sur le territoire même du secteur, dans le bassin minier. La qualité physico-chimique des eaux prélevées est médiocre. La concentration en nitrates des eaux de la nappe de la craie dans cette zone avoisine 100 mg/l (Burgéap, 1999). La mauvaise qualité des eaux souterraines du secteur Lens-Liévin nécessite donc l'installation d'unités de dénitratisation pour alimenter la population de la Communauté, en eau conforme à la réglementation sanitaire. Ces solutions n'étant que provisoires, des recherches ont été menées pour trouver de nouvelles ressources en eaux potables pour cette zone. La recherche s'est orientée vers le réservoir de la craie, en bordure nord du bassin minier dans le secteur de Béthune (Figure II-2). La nappe de la craie dans le secteur situé dans la région béthunoise présente des caractéristiques très favorables, comme par exemple :

- la forte productivité des forages.
- la nappe de la craie est protégée par une couverture de terrains tertiaires sablo-argileux jouant un triple rôle : filtre, tampon et écran peu perméable vis-à-vis des flux de pollution émis à la surface.
- l'existence du phénomène de dénitrification sous cette couverture aux conditions d'anaérobiose. En effet, la nappe de la craie, par sa mise en captivité, bénéficie de processus naturels de dénitrification conduisant à la dégradation très rapide des nitrates.

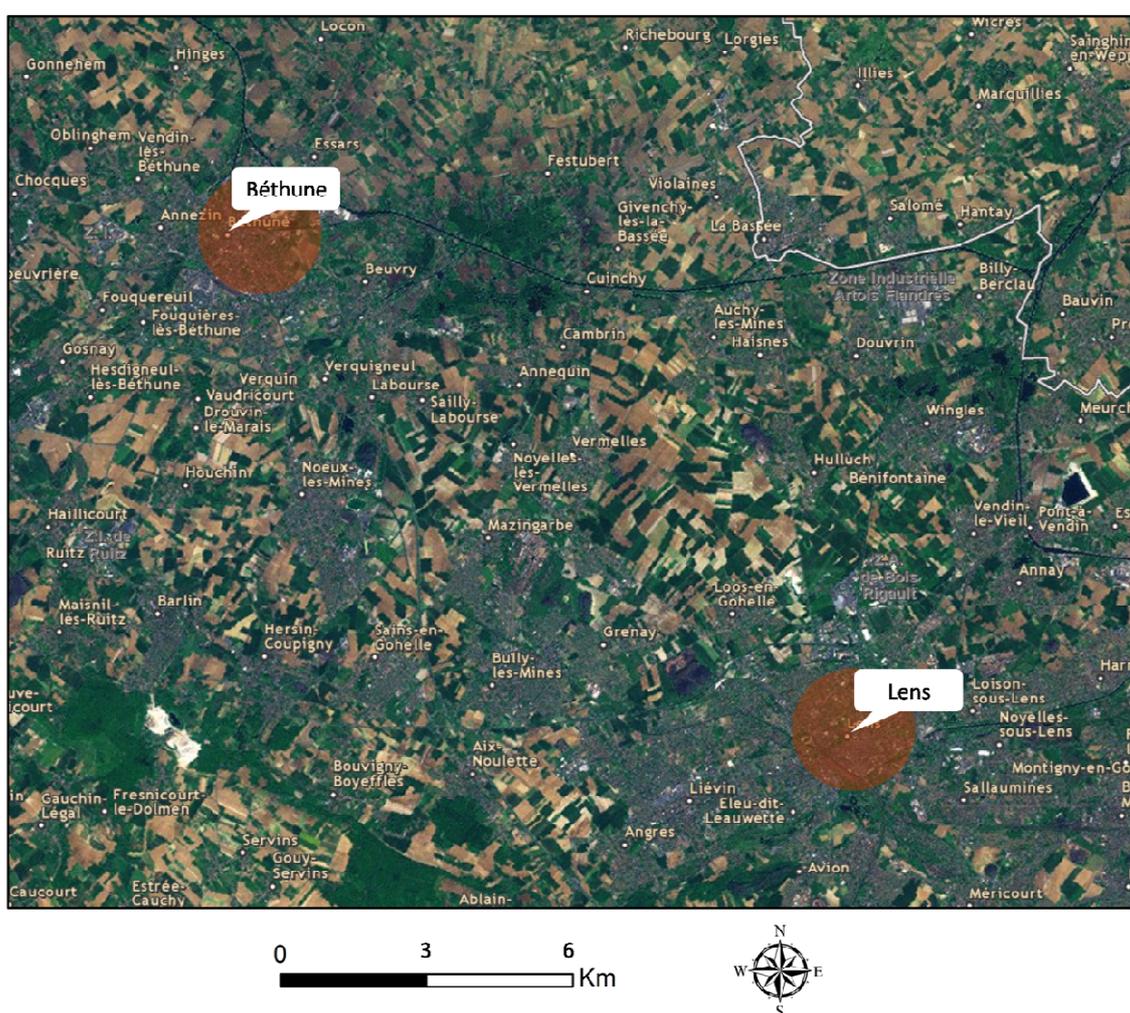


Figure II-2. Localisation de la zone d'étude (Béthune) par rapport à Lens

II.2. Contexte géographique

La zone étudiée se situe dans la région Nord Pas-de-Calais, au Nord de la France. Elle est centrée sur Béthune et s'étend sur 377 km² (Figure II-3). Elle comprend 54 communes et s'inscrit dans une fenêtre de 23892m*15795 m, dont les coordonnées sont (Lambert II étendu):

X min = 611887.65 et X max = 635779.52

Y min = 2608062.1 et Y max = 2623857.7

L'altitude du sol est comprise entre 10 et 110 m NGF (Figure II-4).

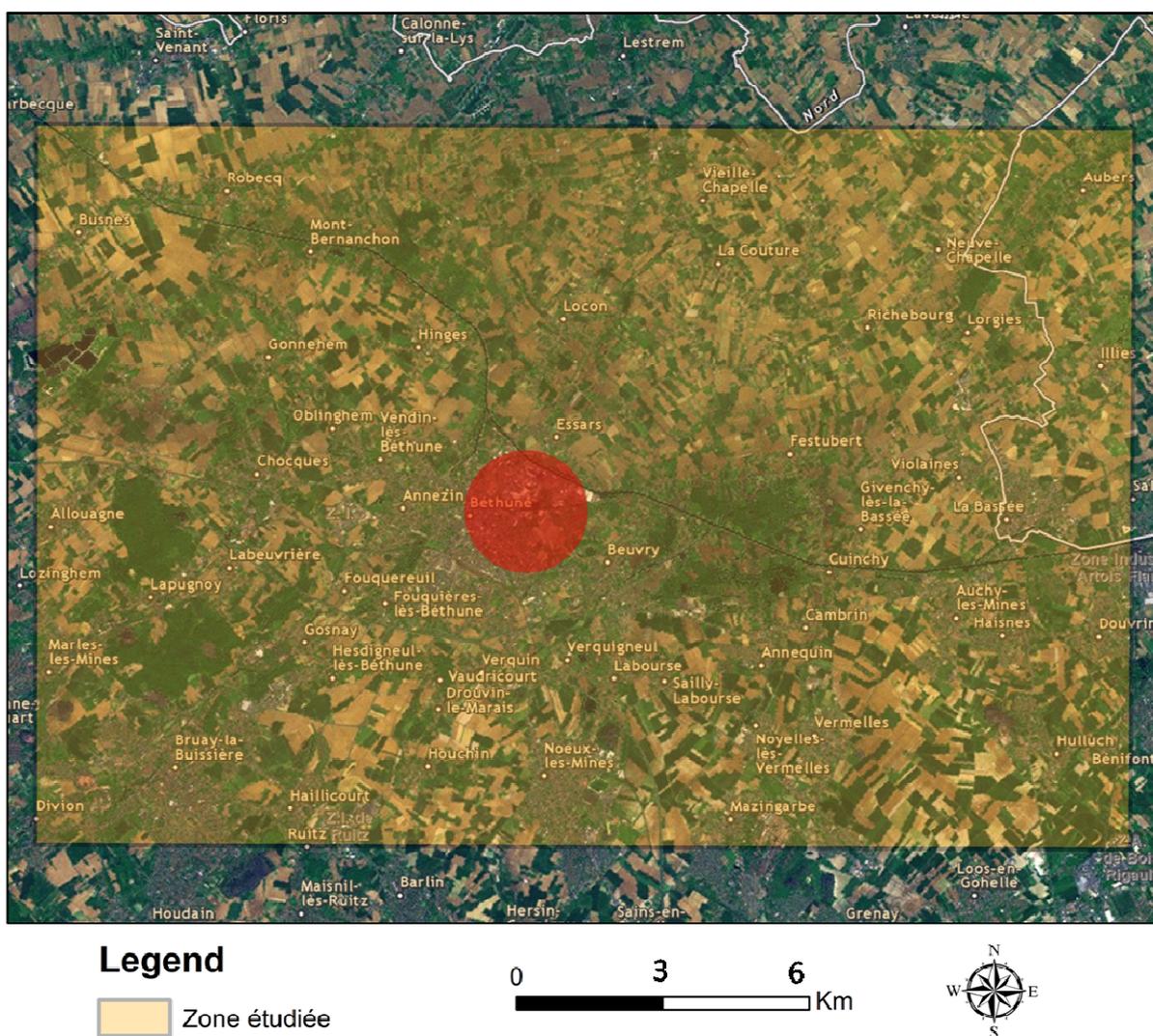


Figure II-3 Localisation de la zone étudiée

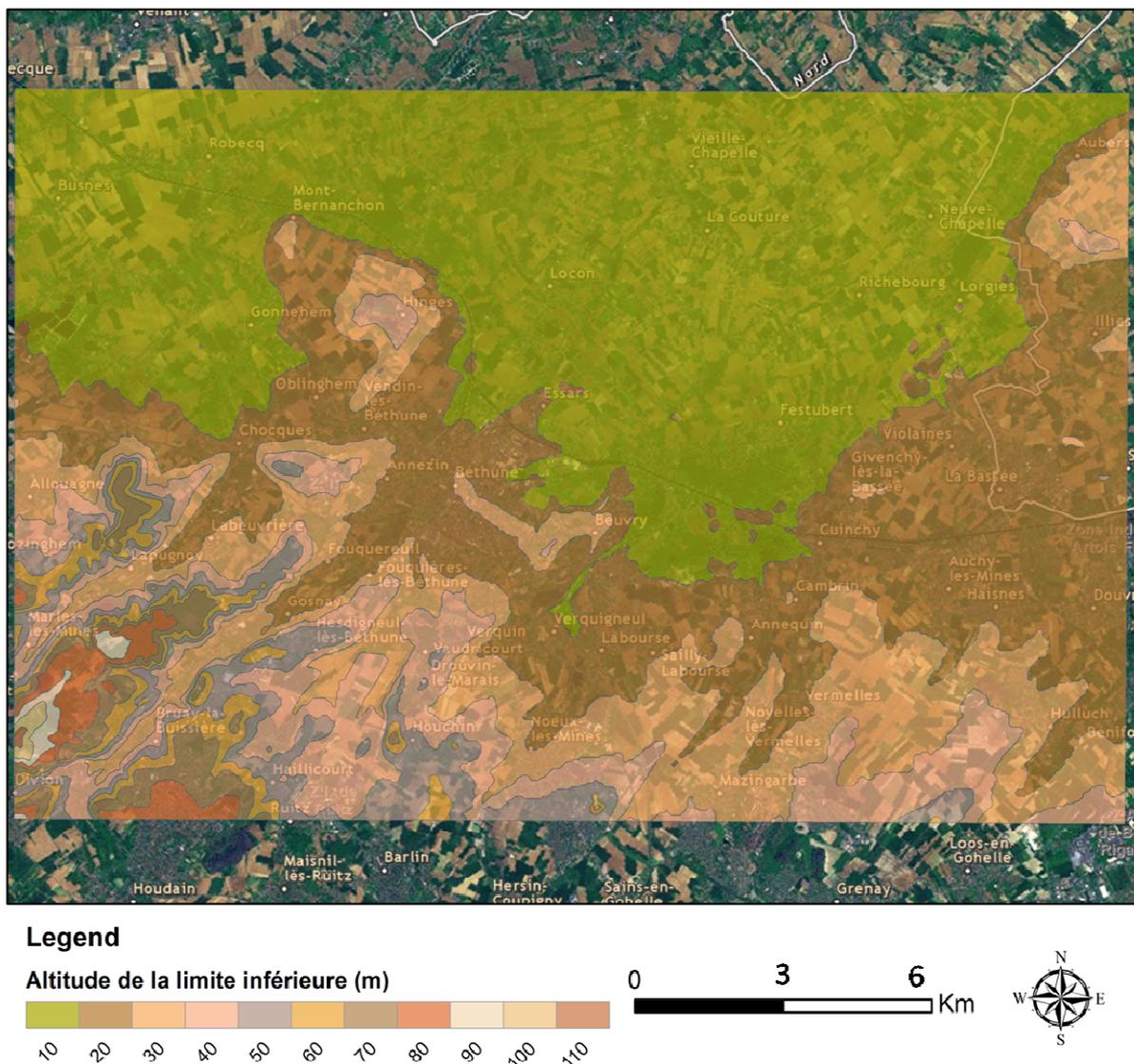


Figure II-4 Topographie de la zone étudiée

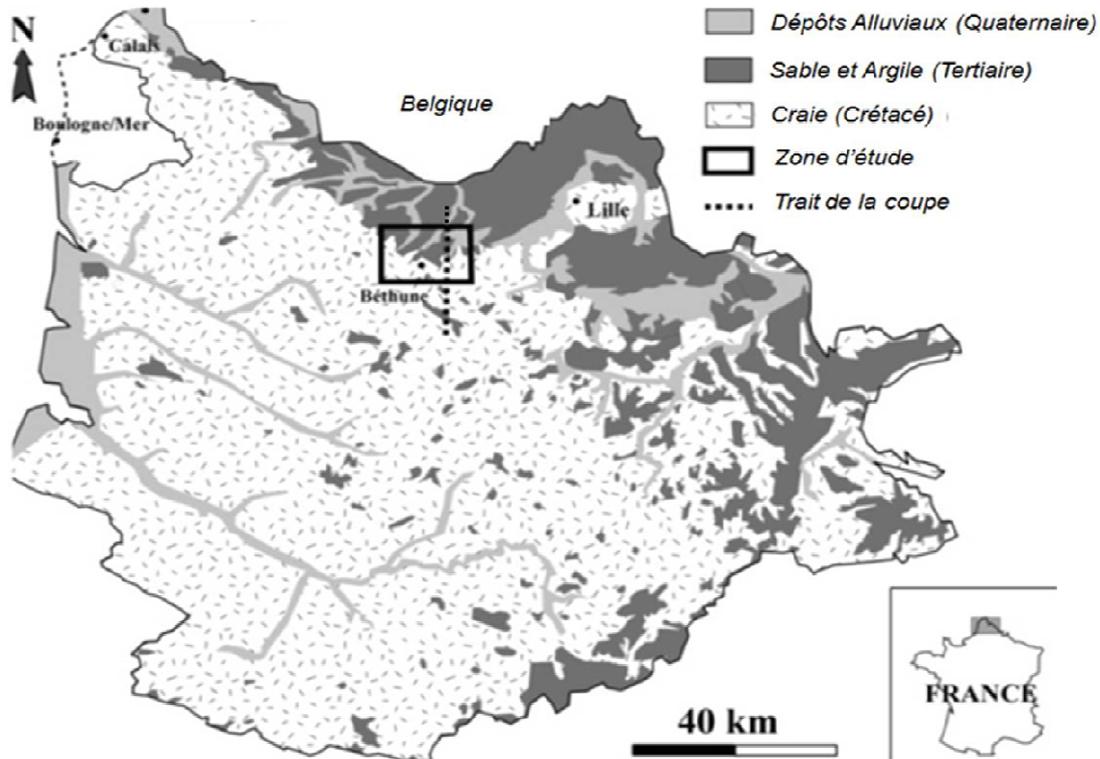
II.3. Contexte géologique général

La carte géologique de Béthune, la compilation des données existantes au sein de la BSS (Banque de Données du Sous-Sol) du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) et les rapports des études précédentes réalisées sur la zone d'étude (Burgéap, 1999 ; AMODIAG, 2006) mettent en évidence l'existence de deux contextes géologiques (Figure II-5, a):

- dans la partie sud, la craie datant du Seno-Turonien est affleurante.

- plus au nord, les couches de craie plongent en profondeur vers le nord sous une épaisseur croissante de formations tertiaires sableuses et argileuses en proportion variable : le Thanétien.

a)



b)

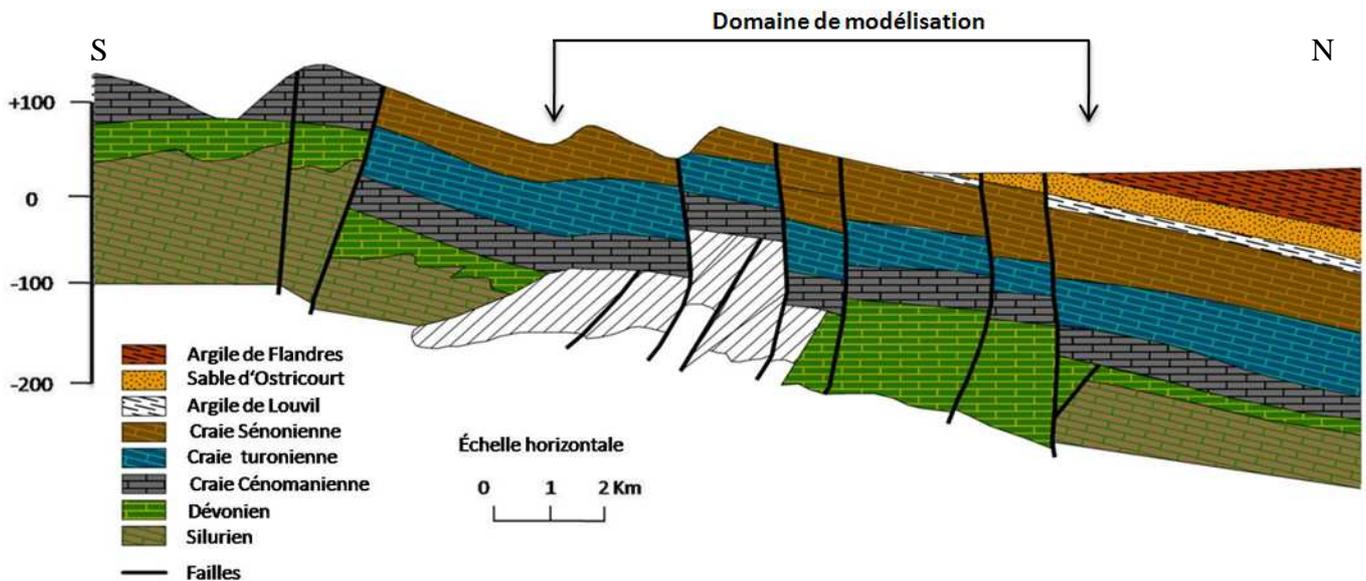


Figure II-5. a) Carte géologique simplifiée de la région Nord Pas-de-Calais

b) Coupe géologique Nord-Sud dans la zone d'étude

Le cadre géologique général se caractérise par les terrains suivants, du haut vers le bas (Figure II-5, b) (Burgéap, 1999):

- **les argiles de Flandres** (ou argiles d'Orchies) : de l'Yprésien inférieur. Présentes uniquement dans la partie nord du secteur d'étude, elles s'épaississent rapidement vers le Nord pour atteindre une centaine de mètres.
- **les sables d'Ostricourt** (Thanétien supérieur, ex-Landénien supérieur) : d'une épaisseur moyenne de 10 à 15 m, ils sont glauconieux très fin, plus ou moins argileux de couleur vert-foncé à noirâtre.
- **les argiles de Louvil** (Thanétien inférieur, ex-Landénien inférieur) : épais de 10 à 15 m, ce niveau est constitué soit de sable, tuffeau et argile sableuse, soit d'argiles plastiques, plus ou moins silteuses, de couleur gris foncé à noirâtre.
- **la craie du Sénonien et du Turonien supérieur** : son épaisseur est de l'ordre de 50 m, les craies sont plutôt grises, d'où le nom de « GRIS » donné par les mineurs. La craie sénonienne est une craie blanche à silex, d'une épaisseur de l'ordre de 50 m, elle surmonte la craie du turonien supérieur. Cette dernière a une épaisseur moyenne d'une dizaine de mètres.
- **Les marnes du Turonien moyen** : désignées sous le nom de « bleus » par les mineurs en raison de leur teinte parfois bleuâtre, leur épaisseur moyenne est d'une quarantaine de mètres et leur perméabilité très faible.
- **la craie du Cénomanién** : la partie supérieure est constitué de marnes crayeuses ou « dièves blanches », la partie médiane de marnes grises ou verdâtres à glauconie, la partie inférieure par un conglomérat à ciment calcaire, le « tourtia »
- **les sables et argiles de l'Albien** (argiles de Gault) : il s'agit du mur la nappe développée dans la série Sénonien à Cénomanién.
- **les terrains primaires du Dévonien et du Silurien** : il s'agit du un mélange composé de grès très fin emballés dans un ciment argileux et dolomitique, et des schistes.

II.4. Principales formations géologiques

Les principales formations rencontrées sur le secteur sont les suivants ci-après:

II.4.1. Les terrains du Paléozoïque

Les terrains primaires n'ont été atteints que par un petit nombre de sondages exécutés pour des objectifs différents :

- la recherche charbonnière dans les années 1850 : sondages de Busnes, Haverskerque et Morbecque ;
- l'alimentation en eau des communes et de certaines industries, essentiellement vers les années 1900 : forages de Bailleul, Armentières, Merville et Hazebrouck
- la recherche pétrolière des années 1963-1964 : core-drills de Merville et Bailleul.

A la suite de ces campagnes, les géologues pétroliers ont réalisé une synthèse des informations sur le Primaire, traduite sous la forme d'un écorché infra-mésozoïque. Celui-ci montre l'existence d'une bande de Silurien centrée sur Merville, orientée O.N.O—E.S.E, de part et d'autre de laquelle se développent les formations dévoniennes et carbonifères. Dans le quart nord-est, est matérialisé un accident à caractère subvertical de direction N 130-140° E, passant par Bailleul et se dirigeant vers le Sud d'Armentières (Leplat, 1985 ; BRGM, 2009).

A. Silurien

Le Silurien est représenté dans la plupart des sondages par des argilites schisteuses gris-noir, micacées, contenant de fines intercalations de siltite ou de grès à grain fin gris clair. (Leplat, 1985).

B. Dévonien

Sur le Silurien présumé repose en effet un poudingue à éléments de grès très fin, rougeâtre ou verdâtre, emballés dans un ciment argileux et dolomitique également rouge ou verdâtre, attribué au Couvinien. La présence d'un grès à grain fin, argileux, finement micacé, est rapportée au Givétien basal et la dolomie cristalline beige ou grise superposée à une argilite très finement gréseuse, noire, au Givétien terminal. Ensuite, les schistes furent datés du Dévonien supérieur par Du Souich (1856).

II.4.2. Les terrains du Mésozoïque

A. Cénomanién

Le Cénomanién n'a été mis en évidence que dans les sondages atteignant le Primaire. Les core-drills pétroliers font état d'une « argile calcaire gris foncé », alors que le sondage de Merville mentionne une « diève blanche compacte ». Relativement bien développé vers l'Ouest et dans le centre, où son épaisseur approche les 25 m, le Cénomanién se réduit considérablement vers le Sud (12 m à Merville), le Nord (3,5 m au Nord de Bailleul) et surtout l'Est (Armentières) où il n'est, semble-t-il, pas représenté (Leplat, 1985 ; BRGM, 2009).

B. Turonien

Le Turonien débute par des marnes argileuses gris bleuâtre, appelées « dièves ». Il se poursuit par une alternance de niveaux marneux et de bancs crayeux. (Leplat, 1985 ; Burgéape, 1999 ; AMODIAG, 2006 ; BRGM, 2009).

B.I. Turonien moyen : Marnes crayeuses à *Terebratulina rigida*

Cette assise est représentée par des marnes crayeuses de teinte bleuâtre à l'état frais, d'où le vocable de « BLEUS » utilisé par les mineurs, au sein desquelles s'individualisent des bancs d'une craie marneuse blanchâtre, souvent caractérisée par une densité supérieure à la normale « craie lourde ». En profondeur, ces bancs crayeux se raréfient puis disparaissent, et l'on passe souvent insensiblement aux « dièves vertes » sous-jacentes. Au sommet de l'assise, un lit d'épaisseur centimétrique d'une argile plastique verte marque fréquemment les passages aux craies du Turonien supérieur. La puissance de l'assise ainsi définie évolue de 30 mètres à 45 mètres sur le secteur (Leplat, 1985 ; Burgéape, 1999 ; AMODIAG, 2006 ; BRGM, 2009).

B.II. Turonien supérieur : Craie grise à *Micraster leskei* (= *M. breviporus*)

Le Turonien supérieur voit l'établissement définitif des faciès crayeux. Les craies de cette assise sont plutôt grises, d'où le nom de « GRIS » donné par les mineurs, et d'aspect sableux. Elles peuvent contenir en abondance des silex cornus, en général volumineux. Dans leur partie supérieure, elles se chargent de grains de glauconie et recèlent un ou plusieurs bancs durs auxquels on a donné le nom de Meule. La Meule désigne normalement une craie compacte, durcie par cristallisation de calcite dans ces pores (Leplat, 1985). Des niveaux congloméroïdes, à nodules de craie durcie dans une matrice de craie plus tendre lui sont souvent associés « faux banc de Meule » : on les observe habituellement au-dessus de la

Meule proprement dite. Cette craie a une épaisseur moyenne d'une dizaine de mètres. C'est une craie grise, glauconieuse, d'aspect grenu (Leplat, 1985 ; Burgéape, 1999 ; AMODIAG,2006 ; BRGM, 2009).

C. Sénonien

La craie sénonienne est une craie blanche à silex. Elle peut atteindre une cinquantaine de mètres d'épaisseur. Elle surmonte la craie du Turonien supérieur. La craie séno-turonienne est affleurante au droit du Bassin Minier (Burgéape, 1999). Elle est recouverte par une couverture des argiles de Louvil au nord du bassin minier. Le pendage général des couches a une direction N-NE, ce qui se traduit par un ennoyage de la craie sous les terrains tertiaires. L'ennoyage est accentué par l'existence de nombreuses failles et diaclases, de direction armoricaine NO-SE (en particulier les failles de Pernes et de Marqueuffles), relayées par des failles de direction varisque. Ce système tectonique a entraîné des effondrements en série avec la formation de gradins s'approfondissant du sud au nord. Cette structure faillée engendre une structure d'allure anticlinale à l'est de Béthune, qui entraîne l'affleurement de la craie sur plus de 1,5 km au droit du canal de Béthune à la Bassée (Leplat, 1985 ; Burgéape, 1999 ; AMODIAG,2006 ; BRGM, 2009).

II.4.3. Les terrains du Cénozoïque

A. Le Landénien marin

A.I. Tuffeau de base et argile de Louvil

Sur la surface crétacée, la transgression thanétienne débute très généralement par un léger cailloutis à base de silex. Il s'agit souvent de silex peu voire non usés, simplement verdis et corrodés, mais parfois aussi de petits galets bien roulés, noirs, typiquement marins (Leplat, 1985 ; Burgéape, 1999 ; AMODIAG,2006 ; BRGM, 2009). Ce cailloutis est surmonté par un sédiment sablonno-argileux, glauconieux, de teinte gris-noir, épais d'environ 6 mètres près de Béthune. Même s'il n'est jamais franchement induré sur la zone d'étude, ce niveau s'apparente aux tuffeaux qui débutent la série landénienne dans la région lilloise ou le Cambresis (tuffeau de Prémont). Au-dessus, on passe à une argile plastique, plus ou moins silteuse, de couleur gris-foncé à noirâtre, dont l'épaisseur atteint 6 mètres dans les sondages du secteur de Béthune. Cette argile est analogue à l'argile de Louvil de la région lilloise (Leplat, 1985 ; Burgéape, 1999 ; AMODIAG,2006 ; BRGM, 2009).

A.II. Tuffeau supérieur et sables d'Ostricourt

L'argile plastique est surmontée par des sables glauconieux très fins, plus ou moins argileux, de couleur vert-foncé à noirâtre, au sein desquels s'individualisent des bancs de grès-tuffeau. En montant dans la série, le sable devient progressivement moins fin et moins argileux, et l'on passe au faciès des Sables d'Ostricourt, verts à gris-verdâtre, bien connus grâce aux nombreuses carrières qui les ont exploités dans la région.

B. Le Landénien continental

Dans les sablières des environs de Béthune (Labeuvrière-Bois des Dames), aux sables glauconieux caractéristiques du milieu marin font suite des sables de même granularité mais sans glaucome, blancs (Leplat, 1985). Ravinant parfois les sables verts sous-jacents, les sables blancs sont depuis très longtemps rapportés à un Landénien continental. Lorsqu'ils sont bien individualisés, ils portent le nom de Sables du Quesnoy ; dans le cas contraire, on les réunit aux sables marins inférieurs sous l'appellation de Sables et Grès d'Ostricourt. A ces sables blancs, parfois marqués par une stratification entrecroisée et l'existence de niveau ligniteux, sont subordonnés des grès mamelonnés références. Entre ces sables blancs et l'Yprésien sus-jacent, ils ont pu mettre en évidence localement, sur une épaisseur de 1 à 1,5 mètre, une alternance de lits sableux blancs, noirâtres et violacés, contenant deux petits niveaux d'un grès ferrugineux friable (AMODIAG,2006).

Sur le secteur d'étude, la puissance totale de l'étage Landénien serait de l'ordre de 40 mètres, se répartissant en :

- 11 à 13 mètres pour le tuffeau de base et l'argile de Louvil,
- 25 à 28 mètres pour le tuffeau supérieur et les sables d'Ostricourt, y compris jusqu'à 5 à 6 mètres pour les faciès continentaux du sommet.

II.5. Contexte hydrogéologique et hydrologique

La zone étudiée fait partie du bassin hydrographique Artois-Picardie qui se divise en six bassins versants principaux. La zone d'étude s'inscrit dans le bassin de Lys-Deule (Figure II-6).

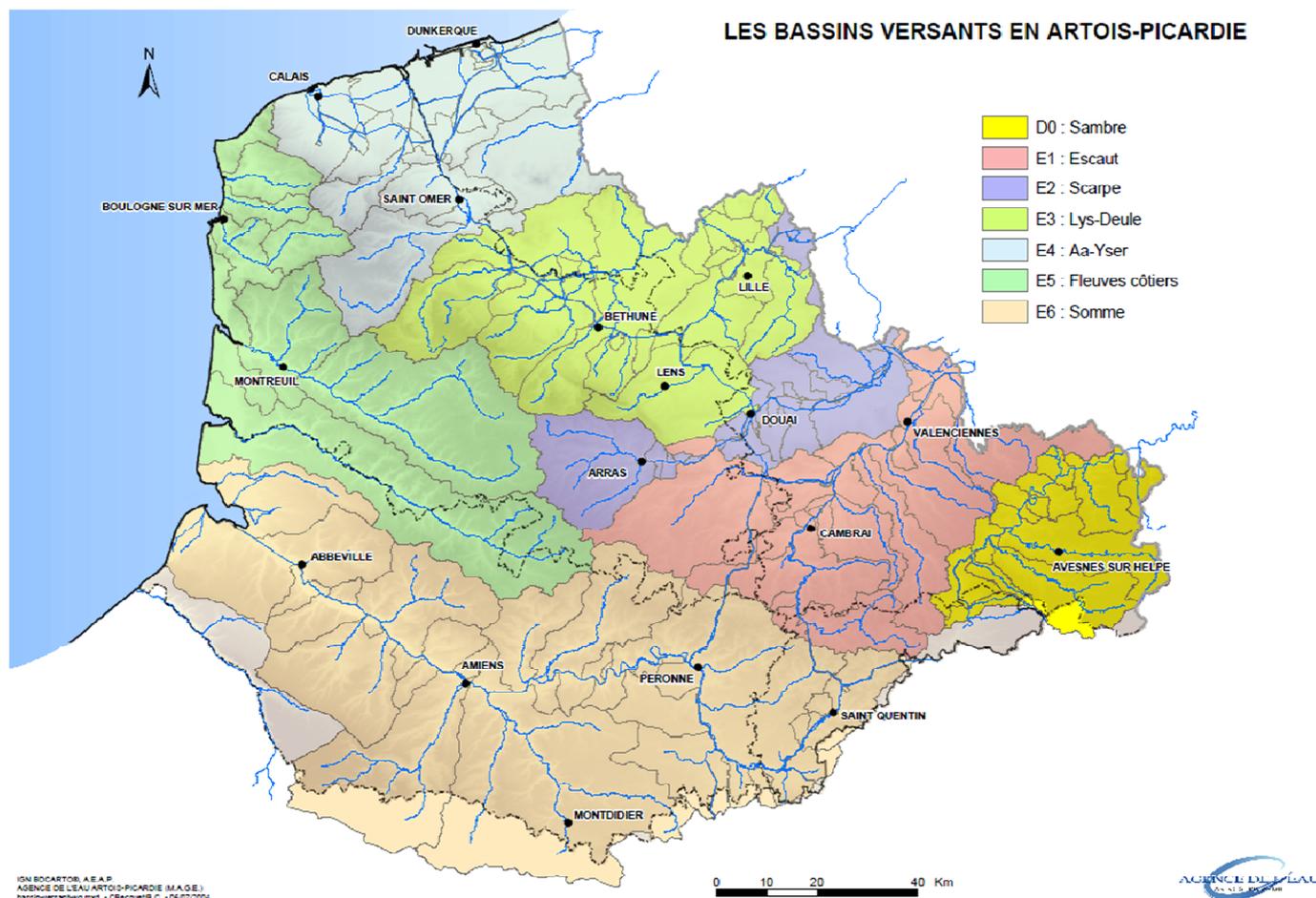


Figure II-6. Bassins versants en Artois-Picardie (source : Agence de l'eau d'Artois-Picardie, 2009)

II.5.1. Eaux souterraines

A. La nappe de la craie

D'un point de vue hydrogéologique, la nappe souterraine de la région qui permet une exploitation intensive pour l'alimentation en eau potable, agricole et industrielle est la nappe de craie (Sénonien et Turonien supérieur). Dans la partie nord du secteur, la craie est recouverte par une quinzaine de mètres de formations tertiaires imperméables qui mettent l'aquifère en captivité. La craie est encore suffisamment fracturée pour être productrice en eau. L'écoulement souterrain est dirigé, au niveau de la zone d'étude, vers le Nord-Est.

Les marnes du Turonien moyen et inférieur (« dièves » bleues et vertes) constituent le mur du réservoir.

B. La nappe des sables d'Ostricourt ou du Landénien

Les sables du Landénien (ou Sables d'Ostricourt) reposent sur une base de l'argile de Louvil. Du point de vue lithologique, c'est la formation des sables d'Ostricourt qui constitue la partie aquifère (Burgéap, 1999). Le mur du réservoir est constitué d'une couche imperméable, entre les sables d'Ostricourt et la craie, formée par l'argile de Louvil. L'argile de Louvil consiste en un écran semi-perméable d'une épaisseur de 13 m en moyenne entre les sables d'Ostricourt et la craie, avec l'existence d'une lacune dans les argiles de Louvil au nord de Chocques. A cet endroit, les sables d'Ostricourt reposent directement sur la craie. La perméabilité verticale des argiles de Louvil est le paramètre qui contrôle les échanges entre la nappe des sables d'Ostricourt et celle de la craie. La nappe des sables peut drainer la nappe de la craie lorsque celle-ci est en période de hautes eaux et que son niveau piézométrique s'établit au dessus de la nappe des sables landéniens. On peut également rencontrer des phénomènes de drainance de la nappe des sables par celle de la craie à travers l'argile de Louvil. Cette couche joue un rôle important en libérant ou en emmagasinant de l'eau en fonction de la charge hydraulique. Compte tenu de l'épaisseur réduite de l'aquifère, de sa transmissivité moyenne également très faible (Burgéap, 1999). il en résulte une productivité médiocre des points de captage dont les plus performants ne débitent guère plus de 10 m³/h (Burgéap, 1999). Son emploi est donc limité aux usages domestiques. La nappe des sables d'Ostricourt est en relation directe avec les réseaux hydrographique de surface quand ils sont à affleurement. Les cartes piézométriques de la nappe de sables dans le secteur d'étude ont montré que les écoulements ont lieu du sud vers le nord avec un gradient de l'ordre de 1‰. L'absence de recouvrement imperméable et la faible épaisseur non saturée rendent la nappe des sables très vulnérable vis à vis des pollutions de surface (Burgéap, 1999).

II.5.2. Les eaux superficielles

➤ Les rivières

Les rivières sont représentées par leur capacité d'échange avec l'aquifère. En fonction de la cote de l'eau dans la rivière et de la cote du toit de la nappe, la rivière est soit en position de drainer la nappe, soit en position de la réalimenter la nappe par perte. Les échanges sont contrôlés par la perméabilité verticale du fond et par la largeur de la rivière. La Clarence, la Law et la Nave sont les principales rivières dans le secteur d'étude, on trouve aussi le Surgeon et la Loignes (Figure II-7).

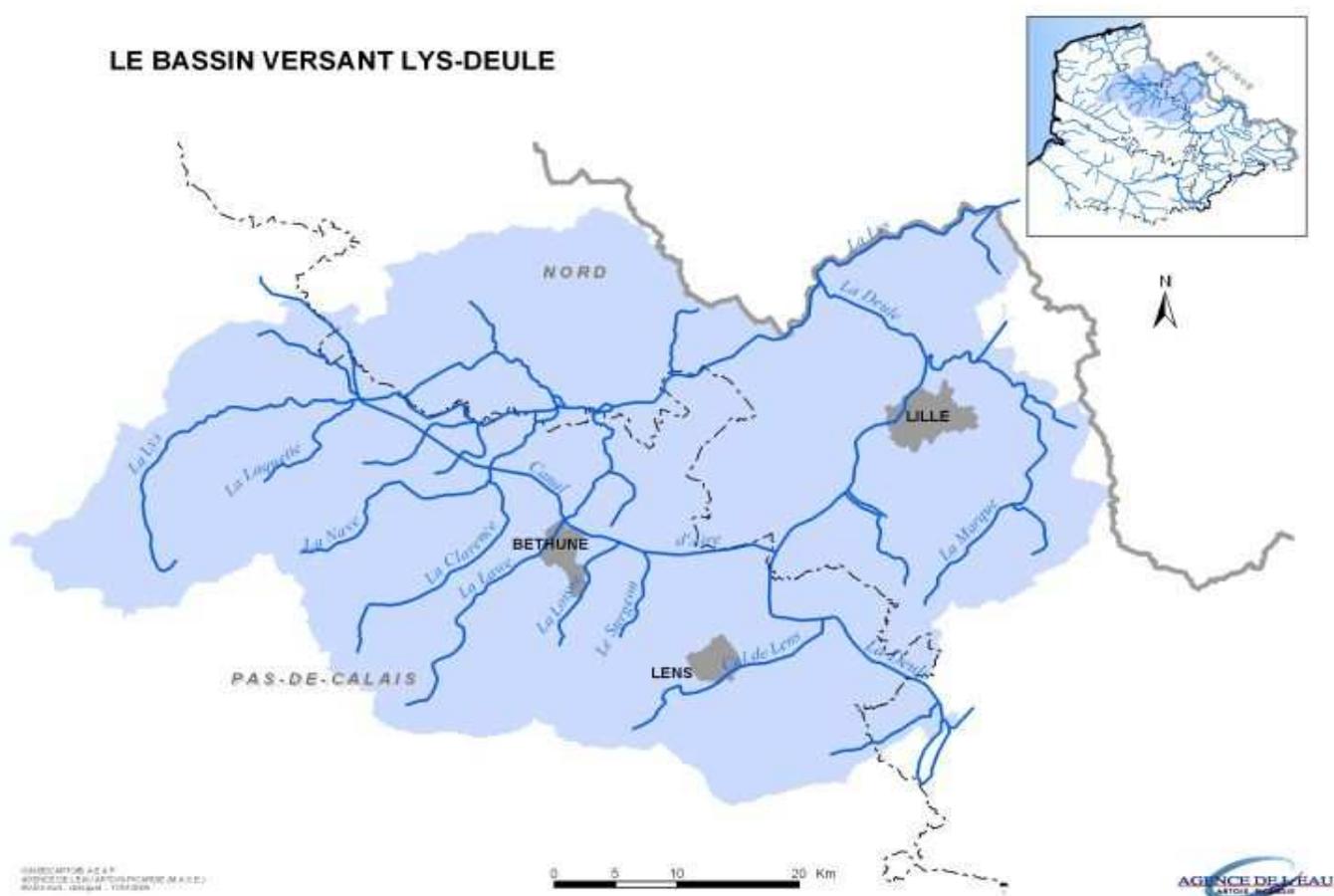


Figure II-7 Rivières dans le bassin Lys-DEULE

La Clarence, la Law et la Nave prennent leur source à des cotes élevées au sud de la faille de Marqueuffles, où la craie cénomaniennes affleure. Elles coulent au nord de la faille directement sur la craie séno-turonienne, puis passent sur la couverture d'argiles de Louvil et de sable d'Ostricourt (Burgéap, 1999). Ces rivières jouent un rôle très important dans le fonctionnement hydraulique du système (Burgéap, 1999) avec :

- Un drainage amont dans la zone où la nappe a une altitude élevée en avant où arrière de la faille de Marqueuffles.
- Une zone de perte dans la partie médiane du domaine d'étude.
- Une zone de drainage dans la partie aval du domaine, surtout dans la partie recouverte par le tertiaire.
 - Les Fosses

Il existe un important réseau de fossés qui assure le drainage de la nappe des sables d'Ostricourt. Les études précédentes ne permettent pas d'apporter de précision sur les fossés à cause de la complexité du réseau.

➤ Le canal

Le canal d'Aire à la Bassée traverse le secteur étudié. La majeure partie du canal repose sur les argiles de Flandres et les sables d'Ostricourt, une partie du canal repose directement sur la craie à l'est de Béthune où il y a des pertes du canal au sein de la craie. Le canal est en mauvais état général, à l'est de Béthune les berges sont très dégradées et ne garantissent pas leur étanchéité. La ligne d'eau du canal est contrôlée par l'écluse de Cuinchy. La cote de la ligne d'eau est de 21.48 NGF à l'amont de l'écluse et 19.52 à l'aval. Le tirant d'eau du canal est en moyenne de 3.50 m.

II.5.3. Précipitations

Il n'existe que deux stations proches du secteur étudié, celles de Saint-Pol-en-Ternoise et de Lillers. La zone d'intérêt se trouvant à mi chemin entre les deux stations et la pluviométrie dans la zone d'étude correspond à la moyenne des valeurs obtenues au niveau des deux stations. Les données disponibles couvrent la période 1972-1998, (Burgéap, 1999). Les autres données de pluie de l'année 1998 jusqu'à 2008 proviennent du site météo France pour la station Lille Lesquin. La pluie efficace par année hydrologique a été calculée à partir des données de pluie brute, en prenant en compte l'évaporation potentielle (ETP) et la réserve facilement utilisable du sol (RFU). La méthode de Thornthwaite a été utilisée pour calculer l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'excédent qui représente la charge de la nappe (De Marsily, 1981). La pluie efficace a été calculée de l'année 1972 jusqu'à 2008 (Figure II-8), la pluie efficace moyenne calculée sur 37 ans pour le secteur étudié est de 278 mm/an.

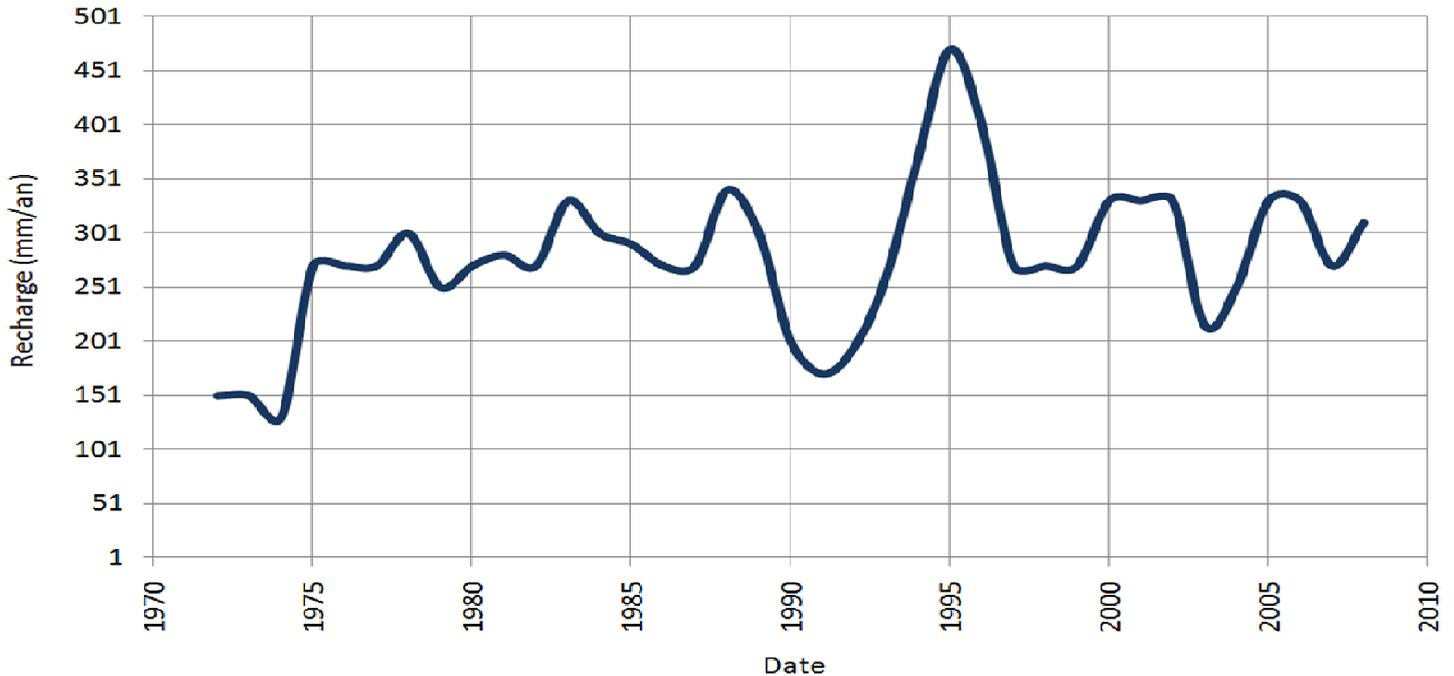
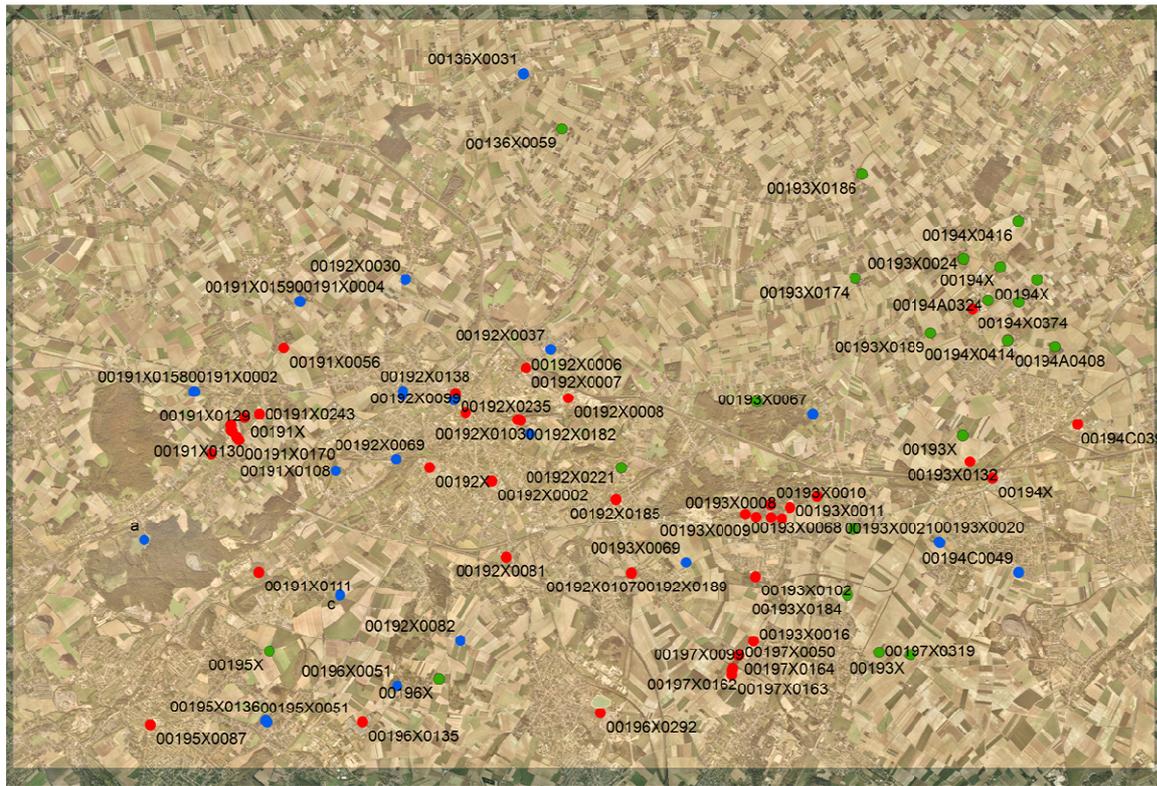


Figure II-8 Pluie efficace (recharge) calculée de 1972 jusqu'à 2008

II.5.4. Les prélèvements en eau souterraine

A. Histoire générale des prélèvements

Les prélèvements sont différenciés en trois catégories : l'alimentation en eau potable, les forages industriels et agricoles. Les quantités d'eau prélevées par les captages d'eau potable, les forages industriels et agricoles en 1972 sont déclarées et référencés dans la base de données de l'agence de l'eau Artois-Picardie. La localisation de ces forages de pompages est également indiquée sur la Figure II-9. Au vue des données disponibles de 1972 jusqu'à 1996, on observe une nette baisse des besoins industriels, alors que les prélèvements pour l'AEP augmentent légèrement (Figure II-10). Les prélèvements totaux ont baissés sensiblement entre 1972 et 1996, ils sont passés de 110000 m³/j en 1972 à 87000 m³/j en 1996 (Burgéap, 1999).



légende

- Prélèvements AEP
- Prélèvements agricoles
- Prélèvements industriels

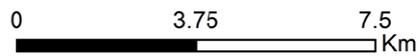


Figure II-9 Localisation des prélèvements d'eau souterraine.

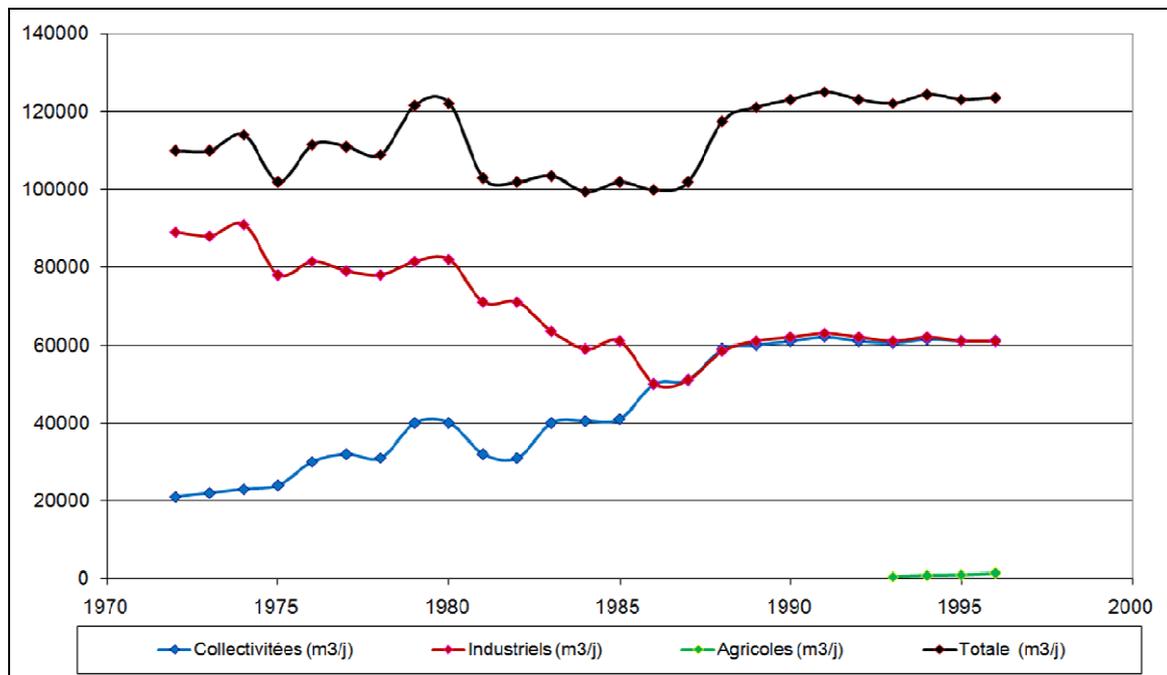


Figure II-10 Evolution des prélèvements (1972-1996)

II.6. Les nitrates et la dénitrification de l'aquifère du Béthunois

Des nombreux champs de recherche sont concernés par l'étude des nitrates et le processus de dénitrification. L'objectif ici n'est pas de fournir une revue exhaustive des travaux menés sur la problématique des nitrates et du processus de dénitrification. Cette partie pose simplement les bases et le contexte des travaux utiles à la problématique abordée.

La contamination par les nitrates des eaux souterraines est devenue un problème environnemental et de santé publique dans les pays développés et ceux en voie de développement. La pollution par les nitrates est causée par l'utilisation intensive d'engrais azotés, l'irrigation des cultures avec des eaux usées domestiques et l'utilisation de fumier (Della Rocca, Belgiorno, et Meriç, 2007). En réalité, le transport des nitrates de la source polluante jusqu'à l'aquifère dépend de nombreux facteurs, par exemple, la répartition des sources d'azote dans les sols et les eaux souterraines, les caractéristiques chimiques telles que la distribution et la disponibilité des substances réactives qui maintiennent les réactions de la dénitrification, des facteurs géologiques et hydrologiques comme par exemple l'hétérogénéité des aquifères, la distribution de la conductivité hydraulique, la porosité, et la densité du réseau de drainage (Wriedt et Rode, 2006).

II.6.1. La dénitrification de l'aquifère béthunois

Dans la zone nord de la région de Nord Pas-de-Calais (ex : Béthune), la nappe de la craie passe d'un état libre à captif, en raison de la présence d'une couverture protectrice tertiaire composée de niveaux argileux. Les espèces oxydantes sont progressivement réduites dans le sens de mise en captivité (Blum, *et al.*, 2002). La nappe de la craie de Béthune, par sa mise en captivité, bénéficie d'un processus naturel de dénitrification ce qui conduit à la dégradation très rapide des nitrates. Il en résulte ainsi une eau de bonne qualité, très exploitée dans de nombreux champs captants. En réalité, on peut voir la différence entre la concentration des nitrates dans la nappe de la craie où l'aquifère est captif avec une concentration de 0.5 mg/l, alors que la concentration avoisine 100 mg/l dans les forages où la nappe est libre (Figure II-11)

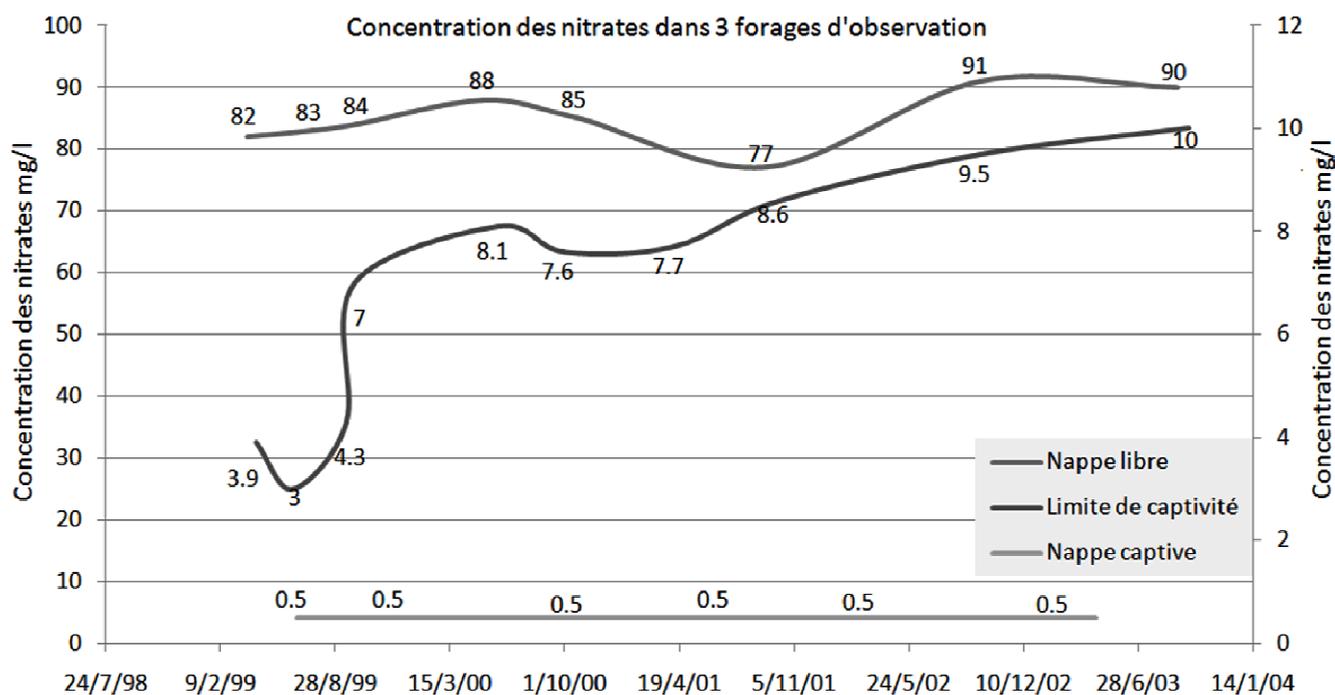
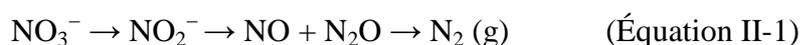


Figure II-11 Evolution de la concentration en nitrates dans les puits «00192X0030/F1» à Hinges, «00191X0158/F2» à Chocques, «00198X0004/F1» à Hulluch respectivement implantés dans l'aquifère de la craie en position captive, limite de captivité et libre

La dénitrification est un processus de dépollution naturelle des nitrates. Ce phénomène biologique s'opère sous l'action de bactéries spécifiques, satisfaisant leur besoin en oxygène par une désoxygénation des ions nitrates. Le mécanisme qui produit cette réhabilitation est la transformation des nitrates en azote diatomique dans des conditions anaérobies (Mariotti, 1986) à la suite d'une chaîne de réactions (équation II-1):



Ce processus, qui se produit dans les sols, les processus de traitement de l'eau et aussi dans les eaux souterraines, a été étudié par de nombreux auteurs (par exemple Edmunds, *et al.*, 1982, 1983 ; Trudell, Gillham et Cherry, 1986 ; Mariotti, 1986 ; Frind, *et al.*, 1990 ; Postma, *et al.*, 1991 ; Smith, Howes et Duff, 1991 ; Korom, 1992).

La réaction de dénitrification se substitue au processus de respiration de l'oxygène par les bactéries à partir d'un certain seuil d'oxygène dissous en solution ($0,01 < \text{O}_2(\text{d}) < 0,7 \text{ mg.L}^{-1}$, Matthes, 1982 dans Mariotti, 1986). Les conditions générales pour la dénitrification dans les aquifères sont en principe les mêmes que dans les sols: le manque d'oxygène, la présence de les bactéries dénitrifiantes et les donneurs d'électrons appropriés, selon divers auteurs (Della

Rocca, Belgiorno, et Meriç, 2007). Selon Sogreah ingénierie (1998), le phénomène de dénitrification dans les eaux souterraines est caractérisé en général, par:

1. les paramètres propres au phénomène : vitesse d'écoulement de la nappe, vitesse de diffusion des nitrates, vitesse de dénitrification,
2. des indicateurs : niveaux d'eau, teneurs des eaux souterraines en NO_3^- , SO_4^{2-} , Fe^{2+} , O_2 ,
3. des conditions hydrogéologiques : captivité de la nappe, milieu réducteur,
4. des conditions minéralogiques : présence d'un support riche en soufre (pyrite),
5. des conditions bactériologiques : présence de bactéries dénitrifiantes.

La réaction complète d'oxydo-réduction nécessite un donneur d'électrons. La nature du donneur d'électrons définit deux mécanismes de dénitrification associés à des métabolismes bactériens différents (Chatelier, 2010).

➤ La dénitrification hétérotrophe

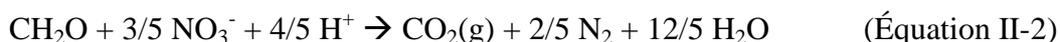
La dénitrification hétérotrophe est le fait de bactéries utilisant le carbone organique comme source d'énergie et de carbone cellulaire. Ces bactéries sont capables d'utiliser une large palette de source carbonée (alcool, sucres, acides organiques etc.).

➤ La dénitrification autotrophe

La dénitrification autotrophe est le fait de bactéries utilisant une source de carbone minéral (dioxyde de carbone, bicarbonates, carbonates) pour la synthèse bactérienne et tirant leur énergie de l'oxydation d'un substrat inorganique tel que le soufre, l'hydrogène ou encore le fer ferreux.

On distingue donc globalement deux types de réaction biotique selon le substrat d'échange électronique utilisé par les bactéries (Sigg, Behra, et Stumm, 2001 ; Mariotti, 1986) :

D'une part, le processus hétérotrophe, ayant pour substrat le carbone organique et suivant une réaction globale d'équation (II-2).



D'autre part, le processus autotrophe, ayant pour substrat la pyrite et suivant une réaction globale d'équation (II-3).



La réduction secondaire des ions nitrates est également possible par le fer ferreux mobilisé (Strebel, Böttcher, et Fritz, 1990), en milieu anoxique selon l'équation (II-4) :



La séquence de décomposition de la matière organique provoque dans le milieu naturel le zonage des réactions rédox. Ainsi, la dénitrification se place entre la disparition de l'oxygène dissous et l'apparition de teneurs importantes en cations métalliques en solution. Ce procédé présente un profil hydrogéochimique (Figure II-12) qui peut être observée sur le terrain pendant le passage de la nappe libre à l'aquifère captif.

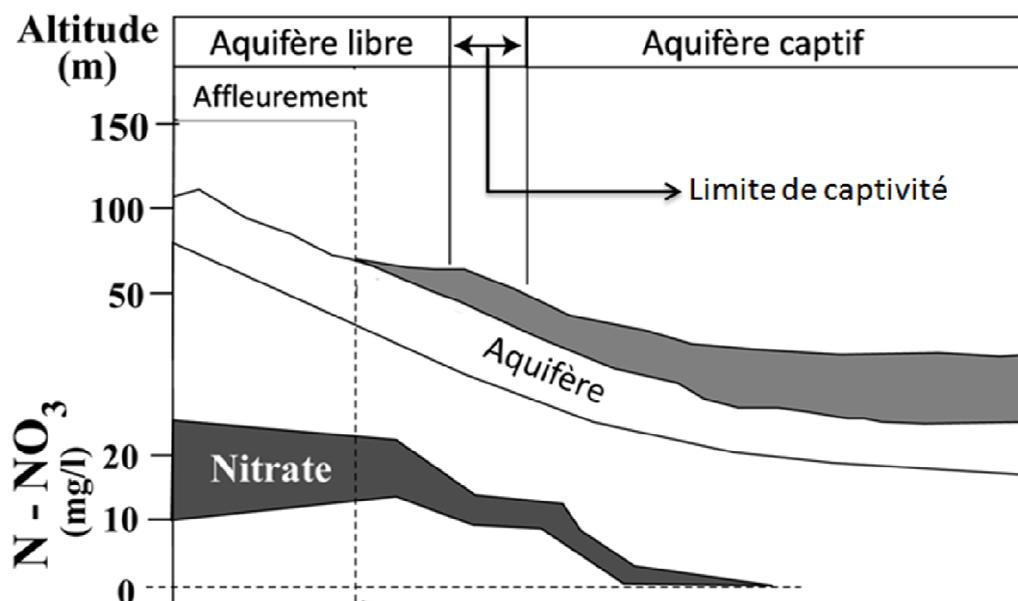


Figure II-12 Profil hydrogéochimique typique du phénomène de dénitrification lors du passage en captivité de la nappe. (Edmunds, *et al.*, 1982 dans Mariotti, 1986).

Ce profil montre trois zones différentes de concentration en nitrates, en fonction de la géométrie de l'aquifère: la nappe libre, la limite de captivité et l'aquifère captif. Les concentrations de nitrates mesurées dans trois puits d'observation situés dans ces trois zones (Figure II-11) confirment exactement ce profil.

Donc, la dénitrification se produit en général lorsque l'oxygène est épuisé, et les bactéries respirent l'oxygène du nitrate. En raison de la forte concentration d'oxygène dans notre atmosphère, la dénitrification n'a lieu que dans des environnements où la consommation d'oxygène est supérieure au taux de l'alimentation en oxygène, comme dans certains sols et aquifères captifs, tels que l'aquifère de la craie de Béthune (Mariotti, Landreau, et Simon, 1988).

Le phénomène de dénitrification présente ses spécificités en fonction de la géologie et l'hydrogéologie locale (Mariotti, 1986). Pour le préserver, il faut bien connaître ses paramètres de fonctionnement. Plusieurs études régionales (Mariotti, Landreau, et Simon, 1988 ; Sogreah ingénierie, 1998 ; Le Bideau, 2008) ont été effectuées afin de mieux comprendre le fonctionnement de ses mécanismes, mais aussi pour mettre en œuvre un protocole d'étude. Les conclusions de ces travaux convergent sur la fragilité du phénomène. En effet, dans le cas d'une intensification de l'exploitation de la nappe sénonienne non contrôlée, l'abaissement du niveau de la nappe et l'accélération des vitesses d'écoulement peuvent entraîner une forte altération du mécanisme dénitrifiant, voire son inhibition totale, provoquant l'arrivée de nitrates aux forages d'exploitation du Béthunois. La Figure II-13 ci-dessous montre bien que la distance de dénitrification est conditionnée par la vitesse de diffusion moléculaire et surtout par la vitesse moyenne d'écoulement de la nappe. Cette vitesse est conditionnée par le débit d'exploitation (Q_1). Si le débit d'exploitation est augmenté, la vitesse moyenne d'écoulement augmente également, les distances de diffusion s'allongent reculant ainsi la distance de sécurité en amont du captage. Si le débit d'exploitation est trop fort, le niveau moyen de la nappe s'abaisse fortement jusqu'à descendre en dessous des formations argileuses. Localement la captivité est disparaît induisant l'entrée d'oxygène dissous dans la nappe. La dénitrification est partiellement annulée provoquant l'arrivée de nitrates au captage (Sogreah ingénierie, 1998).

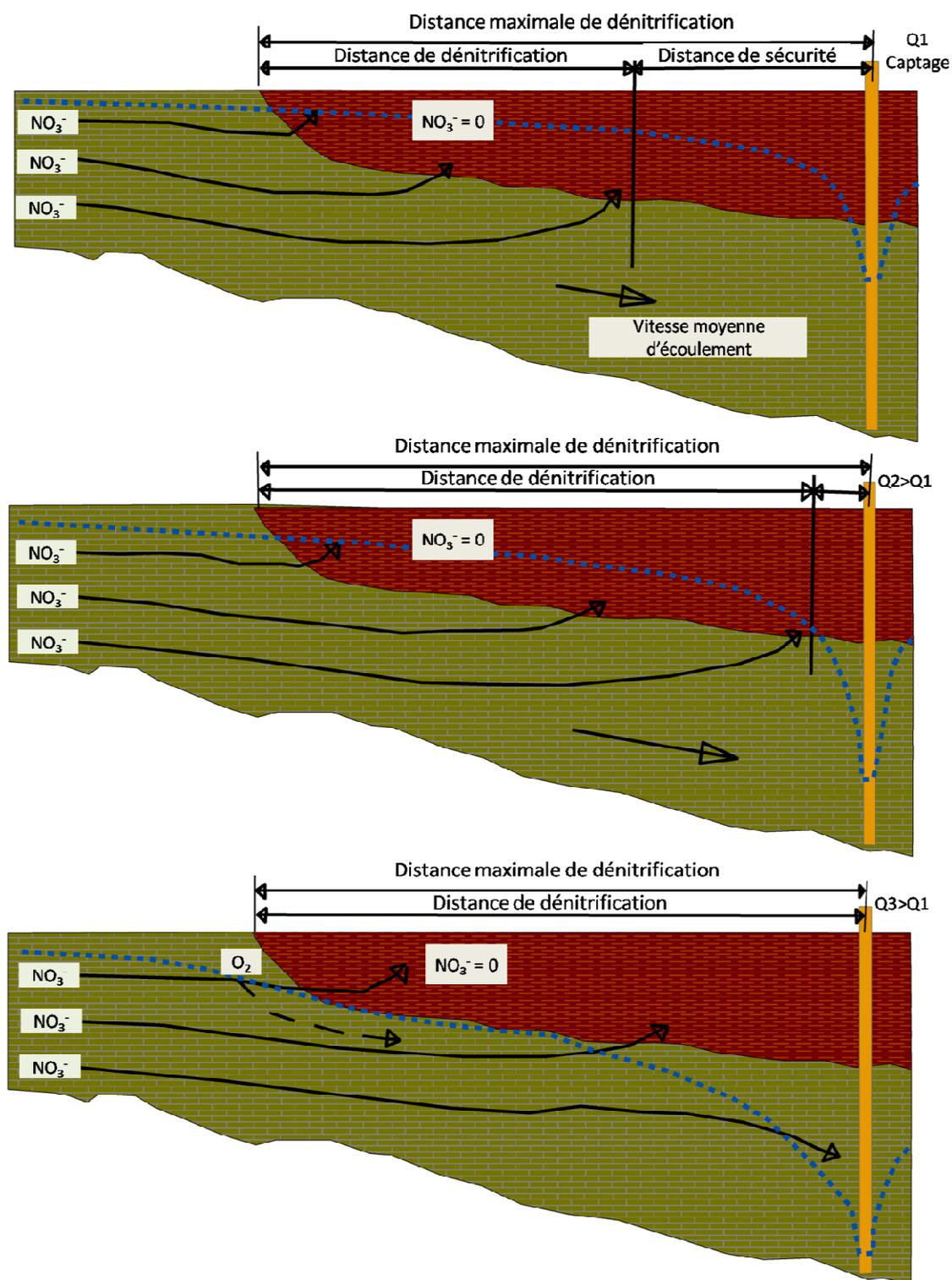


Figure II-13 Représentation du mécanisme de dénitrification naturel (Sogreah ingénierie, 1998)

Une surexploitation de la nappe de la craie entraînera donc la baisse du niveau piézométrique provoquant le changement du front de dénitrification. Il s'en suivra une entrée potentielle de l'oxygène dans la nappe, en conséquence, la dénitrification sera désactivée, et la concentration en nitrates de l'eau prélevée augmentera.

II.7. Rappel des travaux antérieurs

Entre 1985 et 1997 des recherches d'une nouvelle ressource en eau ont été entreprises sur le secteur de Béthune-la Bassée. Le but était de connaître la possibilité d'utiliser les eaux du réservoir captif de la craie Seno-Turonien pour alimenter en eau potable le bassin minier du Nord Pas-de-Calais.

Les nombreuses études ont permis d'acquérir une très bonne connaissance du secteur, à la lumière des informations ponctuelles obtenues sur les multiples forages et piézomètres exécutés dans le cadre de ces recherches. Des forages d'essais productifs, voire très fortement productifs ont pu être réalisés et ont permis d'identifier deux zones très prometteuses pour le captage de la nappe de la craie dans les secteurs de Chocques et le Quesnoy-Gorre.

Une modélisation mathématique a été confiée au BRGM en 1991 et reprise par ANTEA en 1997. Le but de cette modélisation était d'évaluer la faisabilité de deux scénarios du prélèvement de (35 000 et 50 000 m³/j) dans les deux secteurs productifs identifiés. Cette étude concluait que le prélèvement de 50 000 m³/j était possible sans mettre en péril les réserves existantes.

Le modèle était réalisé en monocouche et en régime permanent, c'est pourquoi le district de Lens-Liévin a demandé en 1999 de réaliser une modélisation en tri couches et en régime transitoire (Burgéap, 1999), prenant en compte la modification du front de dénitrification. Cette étude a montré qu'un prélèvement nouveau de 50 000 m³/j est envisageable à partir de Chocques (37000 m³/j) et Gorre (13200 m³/j) sans déséquilibre du bilan de la nappe de la craie. En 2006, dans le cadre de la desserte en eau potable, la Communauté de Lens-Liévin a étudié la faisabilité de la mise en exploitation des deux captages d'eau potable nommés F4 et F5 situé sur la commune de Beuvry (AMODIAG, 2006), déjà testés en 1995, mais dont la durée de pompage avait été jugée insuffisante. Les débits recherchés dans cette étude étaient relativement importants entre 250 et 400 m³/h. L'objectif de cette étude était d'une part de savoir s'il existe un phénomène de drainance entre la nappe superficielle et la nappe de la craie, d'autre part d'étudier la modification de la qualité de l'eau de la nappe de la craie lors de l'exploitation des forages F4 et F5 et dans le cas d'une éventuelle drainance ainsi que la

modification du processus naturel de dénitrification liée à l'exploitation des forages F4 et F5. Les essais de pompages ont permis de mettre en évidence la zone potentielle de drainance. Cette zone est située au sud-est des deux forages F4 et F5. Il s'agit de la vallée de Loisme dans laquelle les formations tertiaires dont l'argile de Louvil ont été érodées. L'érosion de cette couche argileuse induit une communication entre la nappe alluviale et la nappe de la craie. Pendant toute la durée des pompages, la qualité de l'eau au niveau de F4 et F5 est restée constante avec une absence de nitrates. Par contre, la conjonction du pompage et de conditions météorologiques extrêmes pourrait toutefois aggraver le phénomène de sécheresse, ce qui va influencer la qualité des eaux souterraines. Cela mériterait d'être examiné de manière à adapter les débits pompés en cas de conditions extrêmes.

II.8. Histoire des forages F4 et F5

Les forages F4 et F5 ont été réalisés aux mois de février et mars 1994 sur la commune de Beuvry, à proximité du canal d'Aire (Figure II-14). Ils captent la nappe captive de la craie. La profondeur totale atteinte par les forages est de 56 m pour F4 et 60 m pour F5 (Figure II-15, Figure II-16). Ces forages ont été testés par des essais de pompage par paliers de débits les 4 et 18 mars 1994. Il a été conclu à l'époque que les deux ouvrages pourraient produire des débits proches de 250 m³/h chacun. En 1995, les deux forages ont fait l'objet de tests de longue durée (nov-déc 1995). Ces essais ont été réalisés en période d'étiage, avec un pompage en continu pendant 24 jours au débit total de 510 m³/h. Durant l'essai de pompage des désordres (abaissements) ont été constatés. Or, ces pompages ont lieu en période de déficit hydrique important, sans qu'une analyse précise ne permette de dégager les causes réelles. Le 24 novembre 2005, chaque forage a fait l'objet d'un pompage par paliers : 4 paliers enchaînés de débit croissant (Tableau II-1), d'une durée d'une heure chacun. Les paliers réalisés ont été les suivants :

	F4	F5
Q1 en m ³ /h	36	62
Q2 en m ³ /h	100	132
Q3 en m ³ /h	150	210
Q4 en m ³ /h	234	281

Tableau II-1 Essai de pompage par paliers des forages F4 et F5

Un autre essai de pompage de longue durée a été lancé le 25 novembre 2005. Les pompages ont démarré au débit de $100 \text{ m}^3/\text{h}$ par forage pendant 5 jours. Après cette période d'observation, le débit a été augmenté le 30 novembre à $150 \text{ m}^3/\text{h}$ par forage. Pour des raisons de sécurité d'alimentation en eau potable du SIVOM du Béthunois (situé au sud est du forage F5). Les pompages ont été arrêtés le 1^{er} décembre. Ils ont repris le 12 décembre. Le redémarrage a été fait au débit de $150 \text{ m}^3/\text{h}$ sur les deux forages et il a finalement été décidé le 14 décembre de diminuer le débit sur le forage F5 à $100 \text{ m}^3/\text{h}$, pour limiter l'influence sur les forages du SIVOM et augmenter le débit à $200 \text{ m}^3/\text{h}$ sur le forage F4, soit au total un débit de $300 \text{ m}^3/\text{h}$ pompé entre le 12 décembre 2005 et le 31 janvier 2006. Ils ont été arrêtés le 31 janvier 2006, soit 51 jours de pompage.

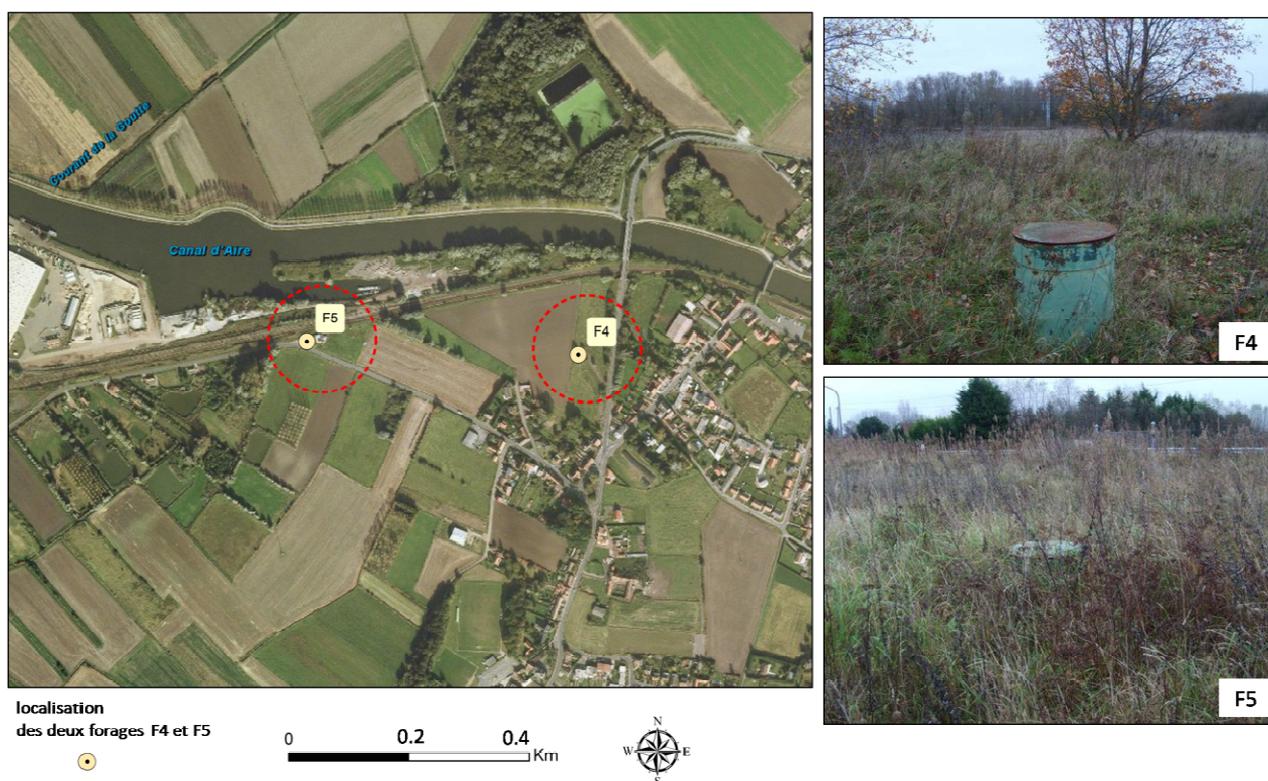


Figure II-14 Photos présentant les forages F4 et F5

La zone des forages F4 et F5 se situe juste au nord de la limite de mise en captivité de la nappe de la craie (Figure II-14), au droit de cette zone, la géologie est constituée de haut en bas par :

- 1- des remblais et des formations superficielles, principalement alluviales (3.6 m au droit de F4 et 4.7 m au droit de F5) ;
- 2- les sables landénien ;
- 3- l'argile de Louvil (15 m au droit de F4 et 10 m au droit de F5) ;

4- la craie (dans la vallée de la Loisme l'argile de Louvil est érodée, on peut voir les formations alluviales reposant directement sur la craie avec une continuité hydraulique entre les deux formations) (36 m au droit de F4 et 45 m au droit de F5).

D'un point de vue hydrologique, on observe deux nappes :

- 1- la nappe superficielle, dans les formations sablo-argileuses tertiaires ou quaternaires.
- 2- la nappe captive de la craie.

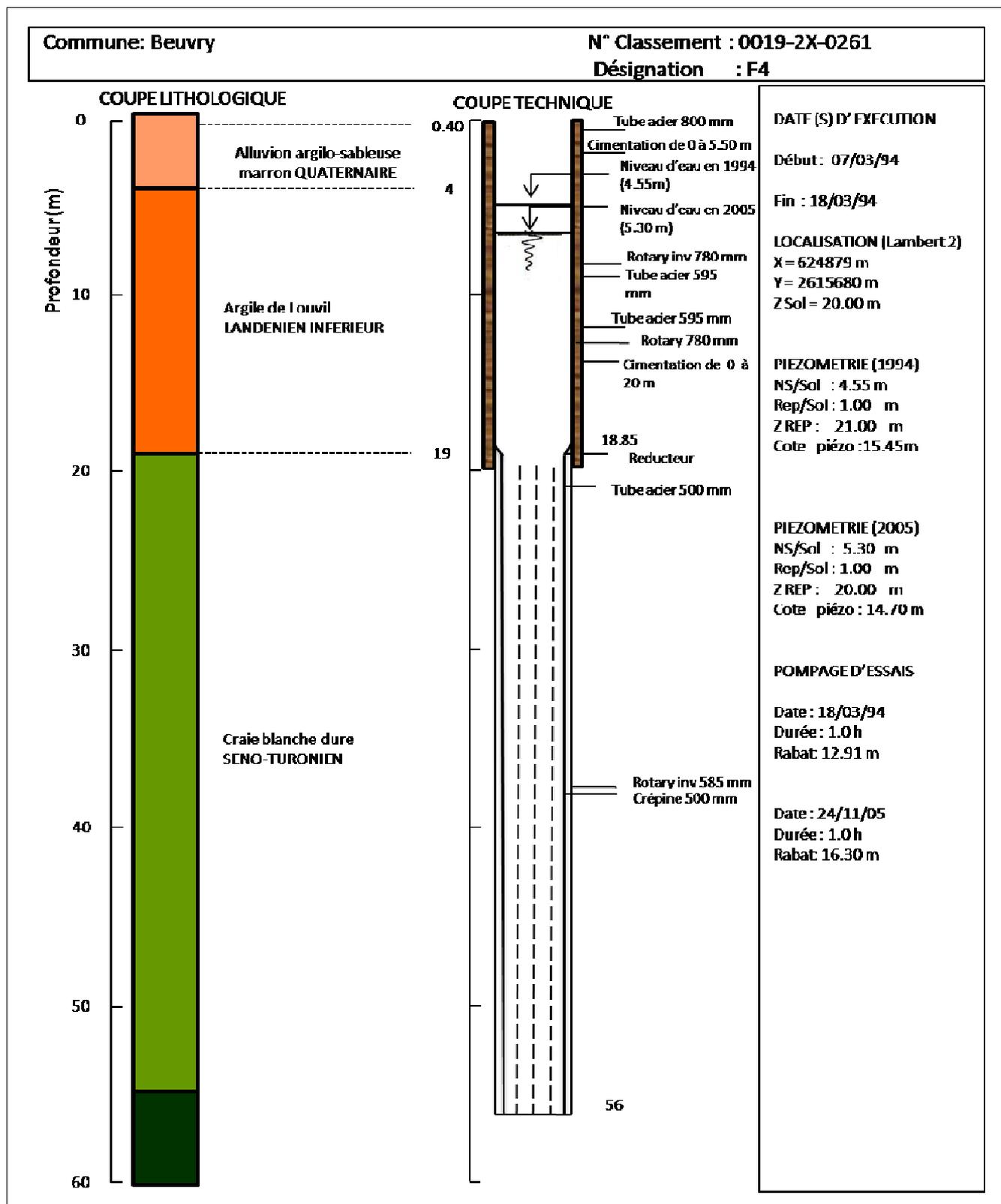


Figure II-15 Coupe lithologique et technique dans le forage F4 (Burgéap, 1999; AMODIAG, 2006)

Conclusion

Afin de pouvoir étudier et analyser par un SIG des problématiques différentes dans le secteur de Béthune, il est nécessaire de regrouper et étudier attentivement les données disponibles. Ce chapitre nous a présenté la situation géographique, géologique et hydrogéologique de la zone étudiée. Deux configurations géologiques principales ont été distinguées, la première comprend des alluvions reposant directement sur la craie Sénonienne, la seconde intercale, entre ces deux formations, le Landénien, celui-ci pouvant être représenté principalement soit par des formations sablo-argileuses, soit par l'argile de Louvil. Concernant l'hydrogéologie du secteur, deux nappes ont été mises en évidence, la nappe des sables d'Ostricourt ou du Landénien et la nappe de la craie. Une attention particulière a été donnée pour le phénomène de dénitrification qui a lieu dans la partie captive de la nappe de la craie.

Chapitre III : Couplage du SIG et de la modélisation hydrogéologique sous Modflow

Introduction

Dans ce chapitre, les résultats d'une simulation hydrogéologique appuyée sur une méthodologie développée pour soutenir la gestion des eaux souterraines sera présentée. Cette méthodologie est basée sur la combinaison des SIG, la modélisation hydrogéologique par Modflow et les RNA. Cette solution de modélisation est un modèle élaboré pour prédire le taux de prélèvements optimaux à partir de deux forages situés à Béthune en bordure Nord du bassin minier (17 km de Lens) et implantés au sein de l'aquifère crayeux. La craie est à ce lieu recouverte par des formations sableuses et argileuses du Cénozoïque, ce qui provoque la mise en captivité de la nappe. Le caractère captif de la nappe permet l'existence du processus naturel de dénitrification, ce qui conduit à la dégradation rapide des nitrates et à l'obtention d'une eau de bonne qualité. Dans le cas présent, les captages sont peu vulnérables aux pollutions accidentelles et bactériologiques. Afin de conserver une eau exempte de nitrates, il est indispensable de ne pas engendrer lors des pompages, une zone dénoyée entre le sommet de la nappe et la base de l'argile tertiaire. Une surexploitation de la nappe captive béthunoise pourrait potentiellement permettre à l'oxygène de pénétrer entre la couche d'argile et le toit de la nappe. L'entrée d'oxygène va désactiver le processus de dénitrification et en conséquence va engendrer un impact négatif sur la qualité des eaux souterraines. La problématique consiste donc à déterminer les débits optimaux de prélèvement permettant, à la fois, d'alimenter l'agglomération lensoise et d'autre part de garder le régime captif de l'eau souterraine du Béthunois.

Dans un premier temps, un modèle conceptuel de données a été créé selon la méthode HBDS afin de structurer les données et simplifier le problème. Le traitement des données lithologiques obtenues à partir des forages existants, des données topographiques, piézométriques et d'hydraulique superficielle sera réalisé par SIG (ArcGIS 9.3.1). Pour ce faire, un modèle physique de donnée a été réalisé dans ArcGIS et un modèle d'analyse des eaux de surface a été créé grâce à l'outil *Model Builder*. Toutes les données d'entrée de la modélisation hydrodynamique ont été préparées dans ArcGIS selon un modèle construit spécialement pour exécuter une chaîne des procédures consécutives et pour obtenir *in fine* des fichiers XYZ utilisables directement dans Modflow. Un modèle hydrodynamique a été implémenté dans le logiciel Visual Modflow, deux simulations ont été faites, avec tout d'abord une simulation en régime permanent pour caler le modèle, ensuite une simulation en régime transitoire de l'année 1972 jusqu'à 2008. Forés en 1994, mais non exploités, les F4 et F5 forages ont fait l'objet de plusieurs scénarii de prélèvements au cours de la période 1972-2008. Les résultats de ces simulations ont été exportés vers ArcGIS. Sur la base de ces

premiers résultats, nous allons discuter des impacts potentiels des prélèvements d'eau sur la qualité de l'eau et la capacité de dénitrification pour deux scénarios extrêmes, l'un dans des conditions sèches avec une recharge déficitaire et l'autre dans une année pluvieuse avec des conditions humides. Finalement, afin de déterminer les débits précis des prélèvements possibles dans les deux forages F4 et F5, une phase d'optimisation des résultats a été effectuée par l'utilisation d'un RNA. L'objectif de ce chapitre est de créer un outil d'aide à la décision en matière de gestion d'eau pour l'alimentation des populations dans une optique de développement durable.

III.1. La littérature du couplage SIG avec la modélisation hydrodynamique

La modélisation numérique des eaux souterraines est devenue une méthode importante de recherche dans le domaine de l'hydrogéologie et dans le soutien des processus de décision impliqués dans la gestion des ressources en eau. Une gestion optimale de l'eau potable exige la mise en œuvre d'une méthodologie appropriée pour gérer les risques de la contamination et de la pénurie d'eau. De nombreux logiciels de modélisation numérique des eaux souterraines, basée sur des méthodes spatialement distribuées, ont été développés et largement utilisés comme par exemple les logiciels populaires de *Groundwater Modeling System (GMS)* (SSG Software, 2002), *Visual Modflow* (Waterloo Hydrogeologic, Inc.), *Modflow pour Window (PMWIN)* (Wen-Hsing, 2005). Ces trois logiciels ont tous été développés selon le code *Modflow* (McDonald et Harbaugh, 1988), ce code a été utilisé comme programme de calcul général en raison de la structure modulaire simple du programme et ses paquets séparés pour résoudre des problèmes hydrogéologique spéciaux. Les logiciels des simulations spatialement distribués comme *Visual Modflow* impliquent souvent la manipulation à grande échelle des données d'entrée spatiales, la production de ces données par SIG offre une plate-forme intégrée de gestion, d'affichage de ces données et d'analyse spatiale complexe sur des cartes superposées. Ce logiciel est très utile dans de nombreuses étapes du processus de modélisation (Neves, *et al.*, 2008). En fait, le SIG est devenu un outil de visualisation important pour la compréhension, le traitement et la gestion des problèmes hydrogéologiques (Darwishe, *et al.*, 2009, 2010; Chaaban, *et al.*, 2010a, 2010b, 2011.). Elle aide à définir les décisions pour la gestion de l'eau à tous les niveaux, du niveau local au niveau mondial (Shamsi, 2005). En conséquence, l'application des SIG peut améliorer considérablement la capacité et l'efficacité des modèles hydrodynamiques.

La littérature montre les avantages du couplage des SIG avec la modélisation des eaux souterraines. Par exemple, Biesheuvel et Hemker (1993) ont lié à un modèle à base d'éléments finis d'écoulement appliqués aux eaux souterraines MICRO-FEM avec un SIG (ILWIS) (Integrated Land and Water Information System) en utilisant des fichiers d'échange (format DXF). Lieste, et al., (1993) ont couplé un modèle à éléments finis d'écoulement des eaux souterraines AQ-FEM avec le logiciel ArcInfo pour développer un modèle hydrodynamique à grand échelle aux Pays-Bas. Orzol (1997) a élaboré un processeur qui fonctionne avec Modflow et ArcInfo grâce à l'utilisation du langage de Fortran et de l'Arc Macro Language (AML). Brodie (1999) a également utilisé un SIG pour traiter toutes les données d'entrées nécessaires de la modélisation hydrodynamique, puis les exporter vers le code de Modflow, enfin d'importer les fichiers de sortie dans le SIG après la réalisation de la simulation. Un modèle simple du SIG lié à un modèle de transport de nitrates des eaux souterraines a été développé par Lasserre, Razack, et Banton (1999) dans l'environnement du logiciel SIG IDRISI. Ce modèle nécessite une petite quantité de données que les approches classiques. Tsou et Whittemore (2001) ont développé une interface sous le logiciel ArcView pour modéliser l'écoulement des eaux souterraines et le transport des polluants en utilisant les deux codes Modflow et MT3D. Carrera-Hernández et Gaskin (2006) ont développé un module en utilisant un logiciel du SIG GRASS et PMWIN qui sont à la fois des logiciels libres. Une interface « Con2grid » a été développée par Mane, *et al.*, (2007) sous ArcInfo pour la préparation de fichiers de données d'entrées requises pour le logiciel de la modélisation des eaux souterraines PMWIN. Cette extension comprend un prétraitement des données d'entrées réparties dans l'espace (point, ligne et polygone) et un post-traitement des données de sorties de la modélisation. Modflow a été intégré également avec un SIG pour la gestion des ressources en eau dans le nord de la Chine (Wang, *et al.*, 2008).

Watkins, McKinney, et Maidment (1996) ont distingué trois approches de l'utilisation de SIG avec la modélisation des eaux souterraines : Un modèle hydrodynamique est soit lié, intégré ou incorporé avec un SIG comme illustré dans Figure III-1. Un modèle est lié avec un SIG lorsque les deux sont utilisés de façon indépendante et que l'utilisateur transfère les fichiers de données d'entrée/sortie entre eux (Figure III-1,a). Un modèle est intégré avec un SIG lorsque l'utilisateur interagit uniquement avec le SIG ou le modèle de la simulation, en plus, les deux programmes partagent une base de données commune (Figure III-1,b). Enfin, un modèle est incorporé avec le SIG quand les équations et les fonctions des modèles des eaux souterraines sont intégrées dans le SIG (Figure III-1,c).

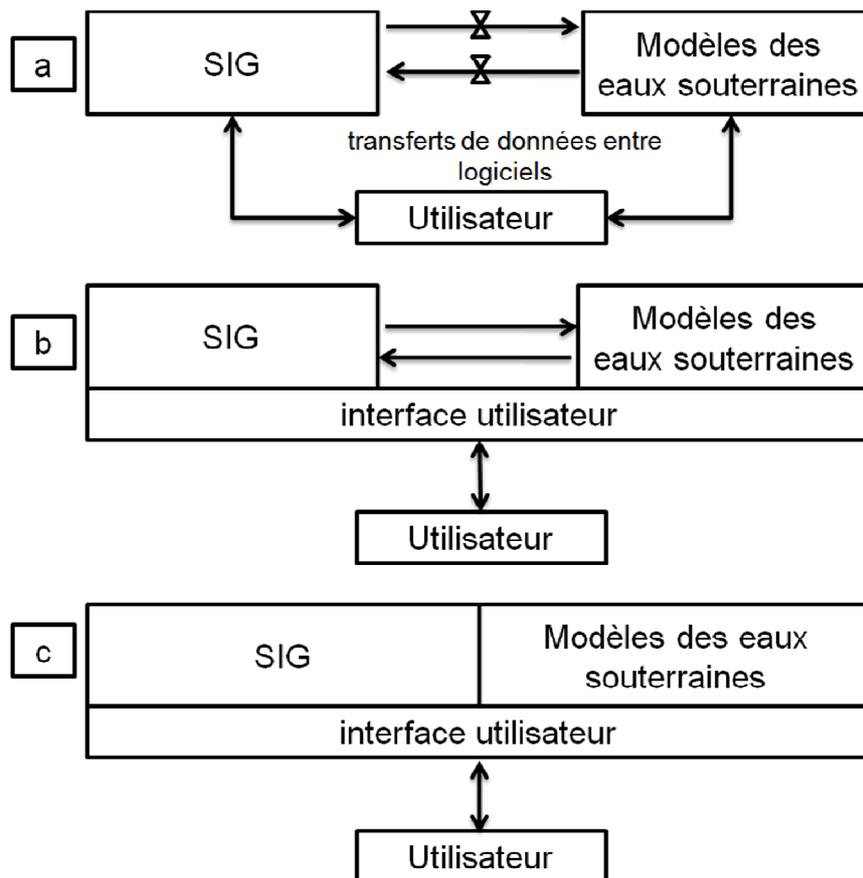


Figure III-1 Interaction des SIG avec les logiciels de modélisation des eaux souterraines, adaptée par (Watkins, McKinney, et Maidment, 1996) d'après (Carrera-Hernández et Gaskin, 2006)

III.2. La méthodologie suivie

La méthodologie (Figure III-2) se déroulera en deux parties principales, chaque partie se compose de plusieurs étapes. Tout d'abord, un SIG sera mis en place, puis la réalisation d'une modélisation hydrodynamique, par le code Modflow. Les démarches entreprises consistent à déterminer les débits optimaux de prélèvement des forages F4 et F5. Une partie d'optimisation des résultats obtenus sera effectuée à la fin pour déterminer les débits exacts des prélèvements possibles de deux forages F4 et F5.

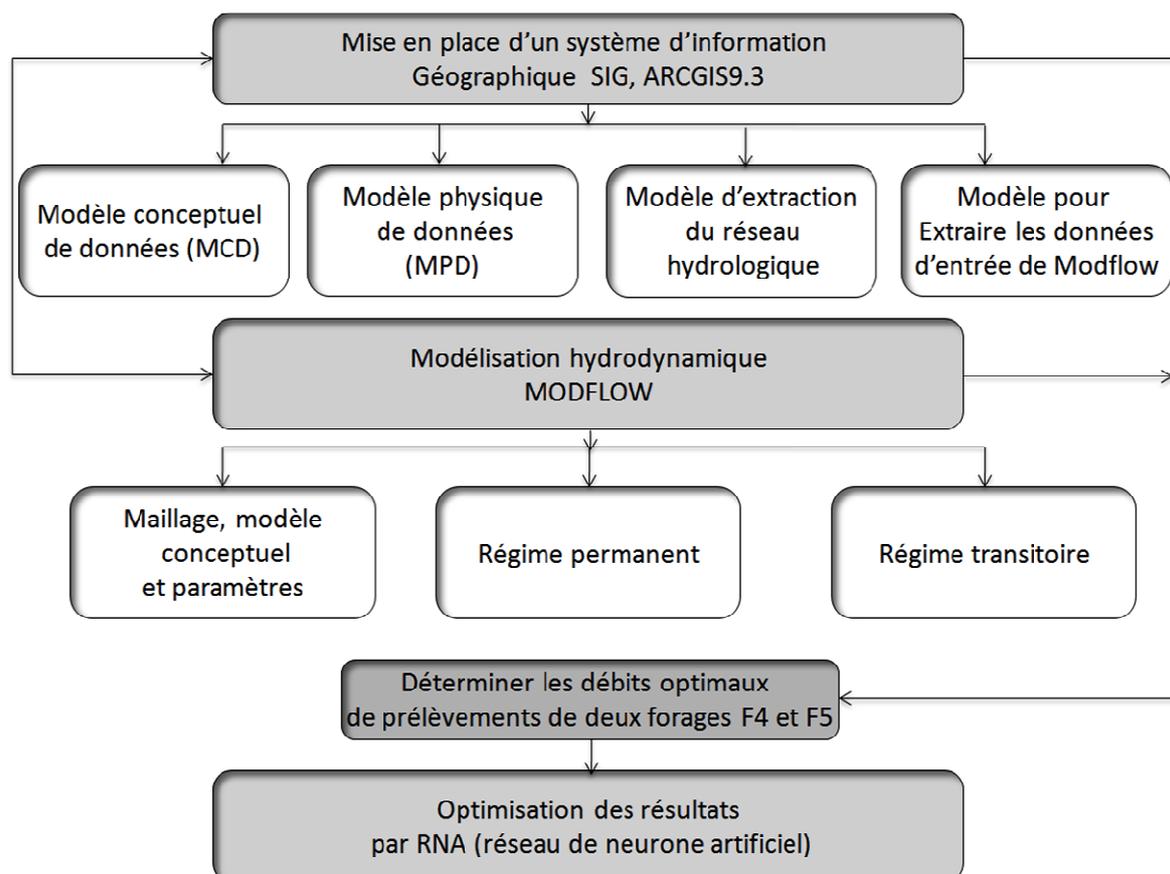


Figure III-2 Méthodologie suivie

III.2.1. Mise en place d'un système d'information géographique

Le SIG est un système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler, d'organiser, de gérer, d'analyser, de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace. (Société française de photogrammétrie et télédétection, 1989), voir (Chapitre I).

A. Construction d'un MCD et d'un MPD

La première étape de l'élaboration d'un SIG c'est la construction d'un modèle conceptuel de Données, notre MCD a été élaboré selon la méthode (HBDS) (voir I.5 La modélisation hypergraphique HBDS (Hypergraph Based Data Structure)). Le but de la modélisation HBDS est de structurer toutes les données disponibles afin de passer du général au générique et de la complexité à la simplicité, pour bien comprendre les différents phénomènes qui influencent le fonctionnement des eaux souterraines. Avant de commencer toute modélisation, il est important de rassembler toutes les données concernant le phénomène à modéliser. Cette étape est certainement la plus longue (Bopearachchi, 2002): Pour réaliser une structure HBDS il

faut tout d'abord, faire un inventaire complet de ce que l'on souhaite intégrer à notre Base de données. Ensuite suivre les règles d'exploration (Bopearachchi, 2002) :

- est-ce un ensemble (classe) ? A ce moment là, quelles sont les propriétés, les relations ?

Fait-il partie d'un autre ensemble, d'autres ensembles ? Quels en seront les objets ?

- est-ce une propriété (attribut) ? De quel ensemble fait-il partie ? Quel est son genre ?

Son type ? Est-elle commune à de nombreuses classes ? Existe-t-il une hyperclasse ?

- est-ce une relation (lien) ? Entre quoi et quoi ? La relation inverse existe t-elle ? Quels sont les limites de la cardinalité ? Est-ce entre deux hyperclasses ?

- est-ce un élément ? De quel ensemble ? En a t-il les propriétés ? Peut-il vérifier les relations de l'ensemble ?

Les réponses à ces question ont permis de construire le MCD (Figure III-3) qui est représenté par un projet conceptuel, formalisant graphiquement les hyperclasses, les classes, les attributs et les liens et qui expriment les phénomènes simples ou complexes du monde réel, le MCD se constitue de deux hypergraphes Surface et Sous-sols et dans chacun il y a des hyperclasses comprenant des classes, ces classes portent des évaluations. Les associations entre classes, les attributs, et le lien entre objets sont symbolisés sur le schéma suivant (Figure III-3).

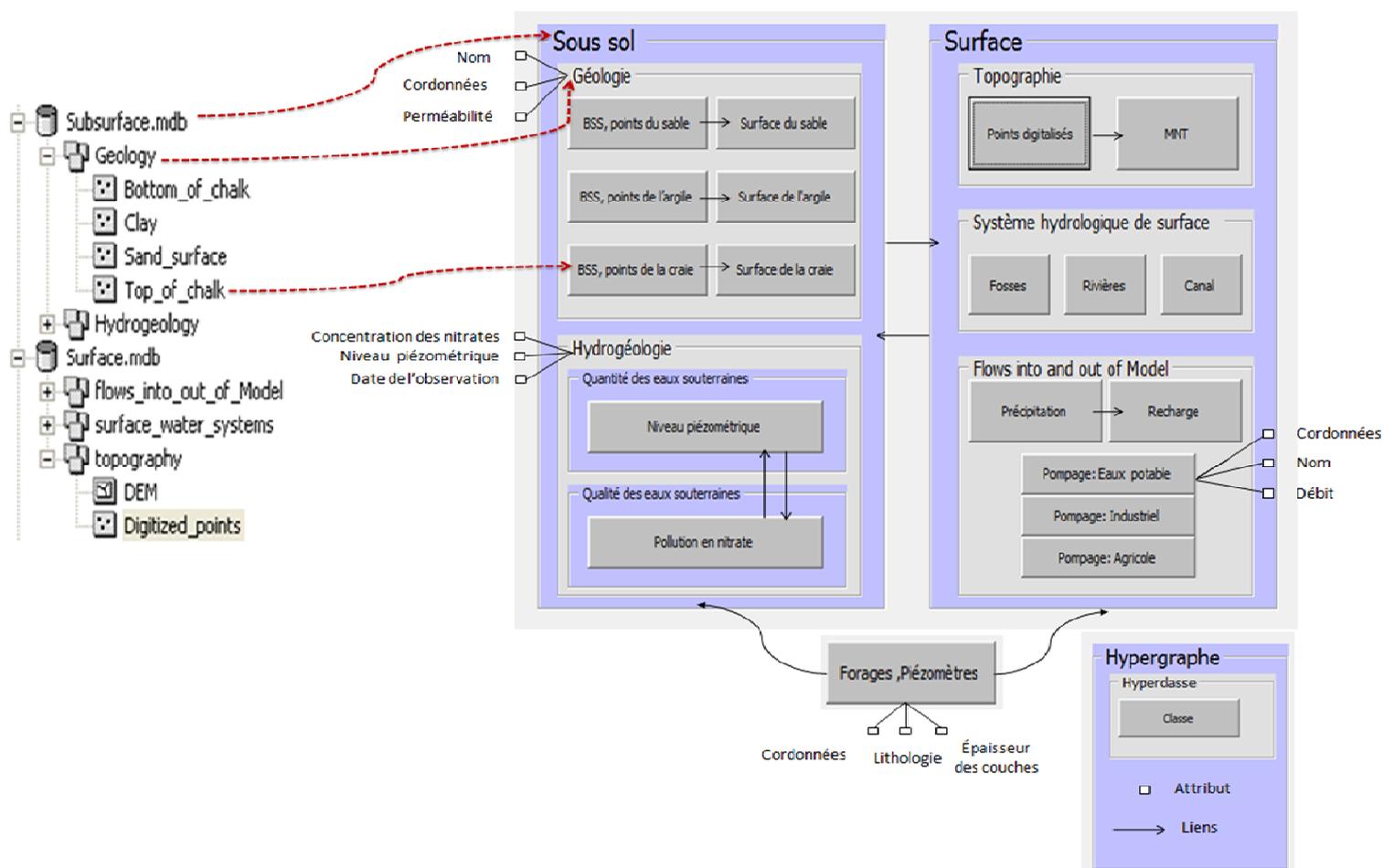


Figure III-3: Modèle conceptuel de données (MCD) selon la méthode HBDS présentant les hypergraphes, les hyperclasses, les classes, les attributs et les associations - Modèle physique de données (MPD)

ArcCatalog a été utilisé pour créer le modèle physique de données (MPD). Les Geodatabases (Figure III-3) représentent une image physique du modèle conceptuel de données dans ArcGIS. Chaque élément basique du modèle hypergraphique a sa propre représentation graphique dans ArcGIS (voir I.5.4 Construction d'un Modèle Physique de Données (MPD)).

B. Modèle d'extraction du réseau hydrologique

Une analyse du relief terrestre est indispensable pour l'étude des écoulements sur et au travers de cette surface. La modélisation de la surface hydrologique est donc très utile dans la modélisation hydrogéologique surtout pour introduire des données précises concernant la surface de la première couche du modèle.

Un modèle d'analyse hydrologique a été créé dans ArcGIS selon *Model Builder* en utilisant les fonctions d'analyse hydrologique de l'extension *Hydrology* à partir d'un modèle

numérique de terrain (MNT). Ce modèle qu'on a appelé *Hydrology tool* (Figure III-4) fournit une méthode pour décrire les caractéristiques physiques de la surface et pour délimiter le réseau de drainage.

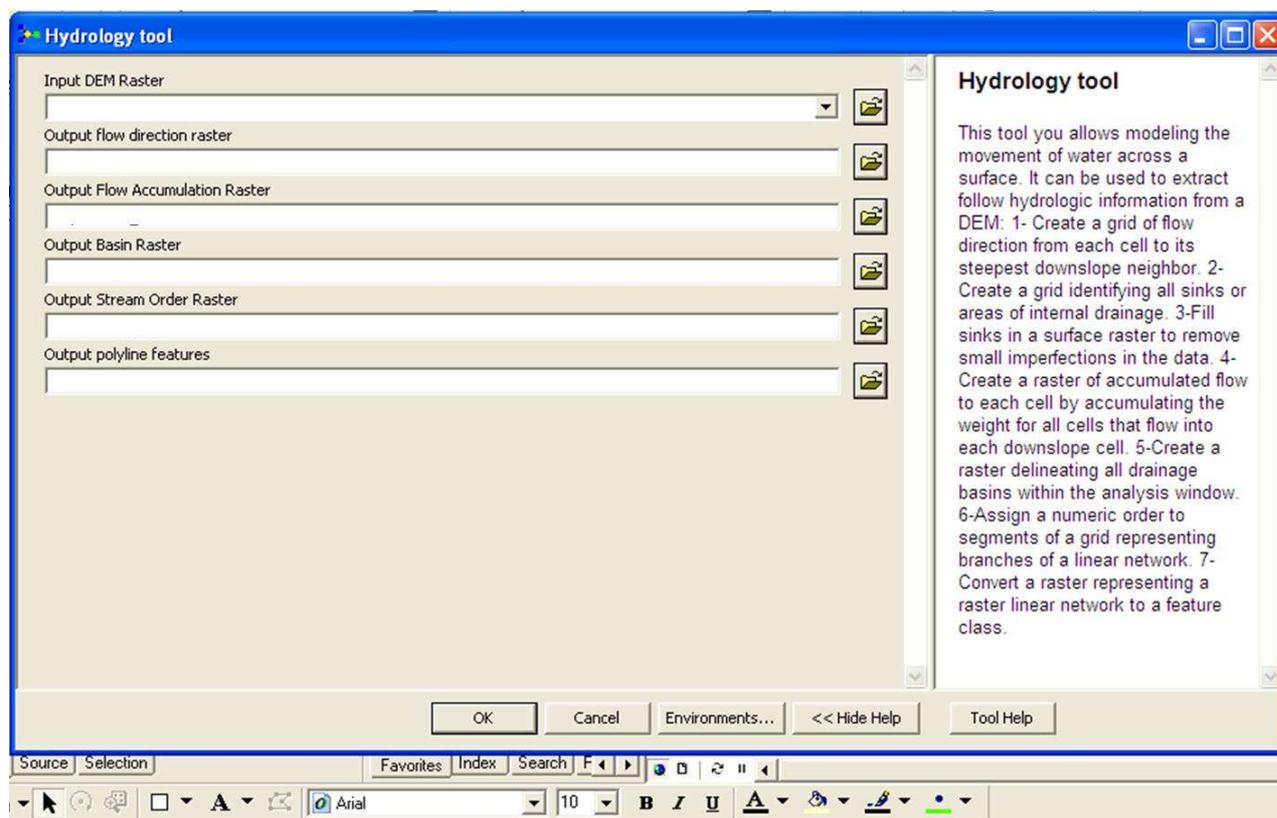


Figure III-4 Modèle « Hydrology tool » selon model builder

La zone sur laquelle l'eau tombe, et le réseau par lequel elle se déplace jusqu'à un exutoire sont considérés comme un système de drainage. L'écoulement de l'eau à travers le réseau de drainage est seulement un sous-ensemble de ce qui est communément appelé le cycle hydrologique, qui comprend également les précipitations, l'évapotranspiration, et le ruissellement. Le principe de cette méthode (Figure III-5) s'appuie sur le parcours naturel des eaux provoqué par la gravité et guidé par la topographie. Cette méthode est donc basée sur la détermination des directions d'écoulement de l'eau en chaque cellule du MNT à partir des valeurs altimétriques.

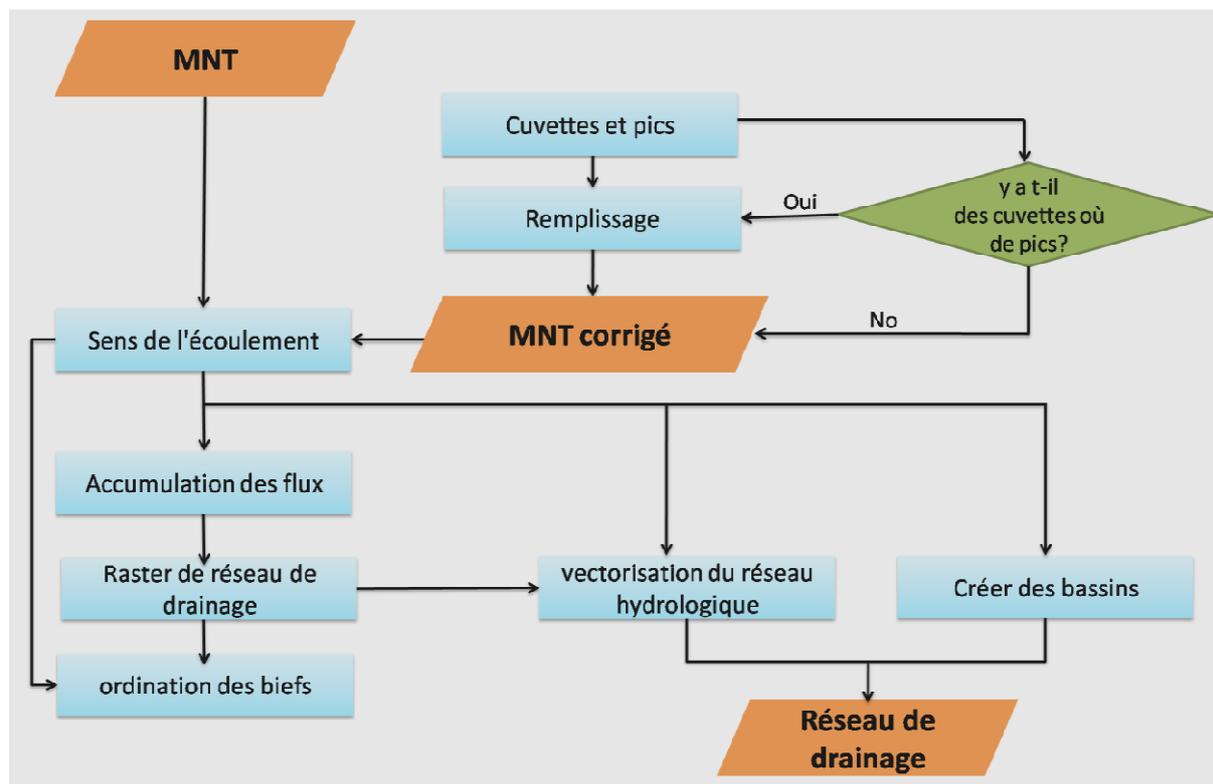


Figure III-5 Aperçu des étapes pour obtenir des caractéristiques hydrologiques de la surface à partir d'un MNT (*workflow* de l'outil *Hydrology* d'ArcGIS (Johnson,2009), modifié)

A partir de la direction des flux, le modèle peut calculer par exemple, la quantité d'eau qui va circuler dans chaque cellule. Extraire les cellules ayant le plus fort flux d'écoulement permettra de déterminer le réseau hydrographique (réseau des talwegs) ou simplement le réseau des rivières. Le modèle peut aussi leur affecter un ordre hiérarchique et les convertir en lignes. Il permet aussi de créer et délimiter tous les bassins de drainage.

Certaines surfaces topographiques peuvent avoir des irrégularités (cuvettes ou pics) qui doivent être corrigées avant de se lancer dans l'analyse hydrologique. Dans le cadre de cette étude, le réseau de drainage a été calculé à partir d'un MNT issue de l'imagerie radar SRTM3 (3 secondes d'arc) (NASA , 2003).

Le réseau de drainage obtenu (Figure III-6, Figure III-7) représente la hiérarchisation de la réponse d'un milieu imperméable soumis au ruissellement d'une lame d'eau. Les figures suivantes présentent la restitution cartographique du calcul du réseau de drainages.

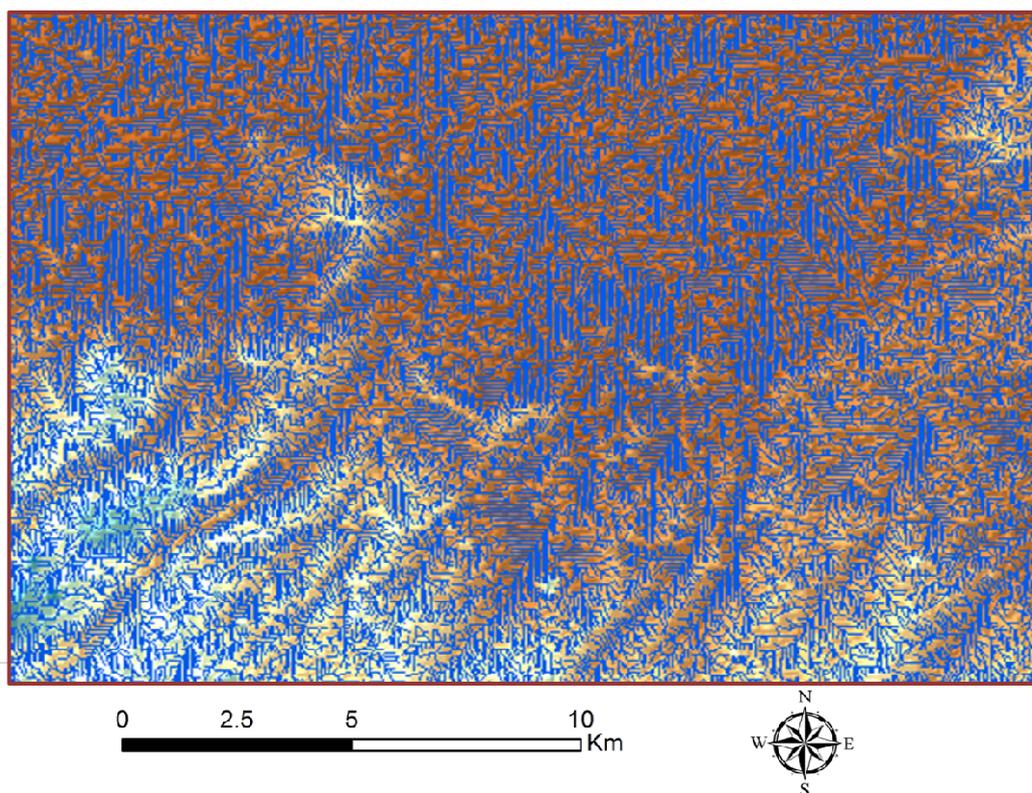


Figure III-6 Carte du réseau des talwegs

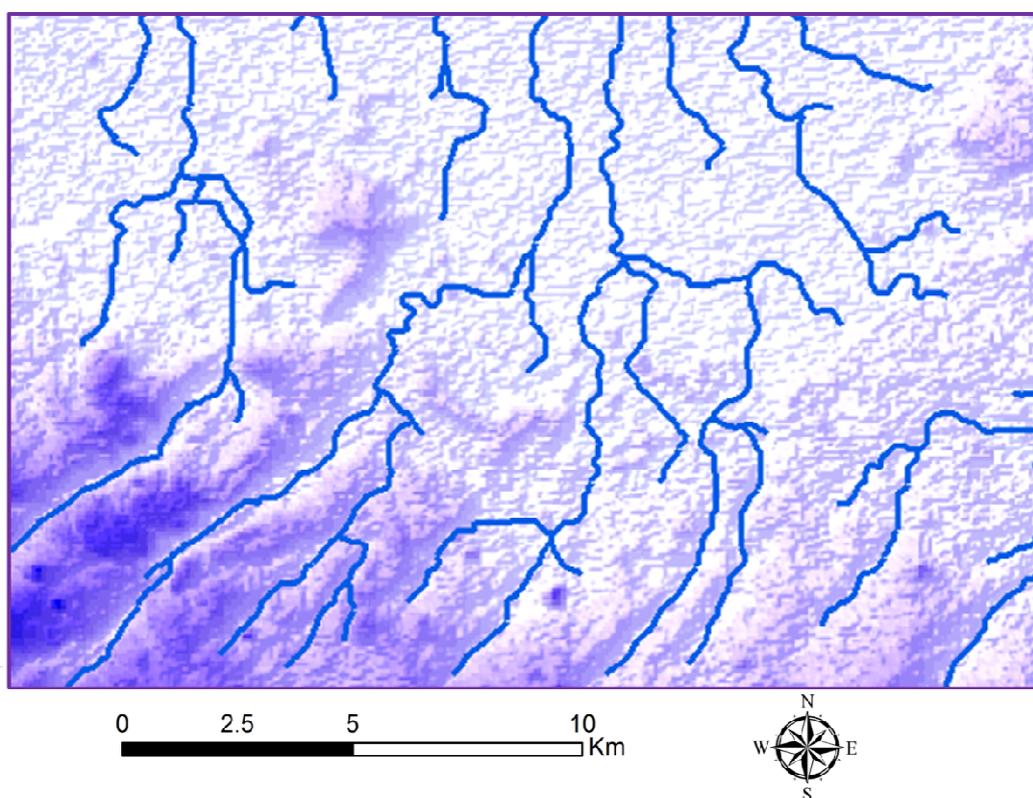


Figure III-7 Carte des rivières extraites du modèle

C. Préparation et extraction des données de modélisation hydrodynamique

Les données d'entrée de la modélisation hydrodynamique tels que le toit et le mur des couches représentant le modèle, la conductivité, la piézométrie initial, etc., doivent être en format XYZ*. La préparation des fichiers de ces paramètres est une tâche difficile qui prend beaucoup du temps. Avec l'utilisation des SIG la préparation des données a été faite simplement par un modèle construit spécialement pour exécuter une chaîne des procédures consécutives pour avoir à la fin des fichier XYZ utilisables directement dans Modflow (Figure III-8).

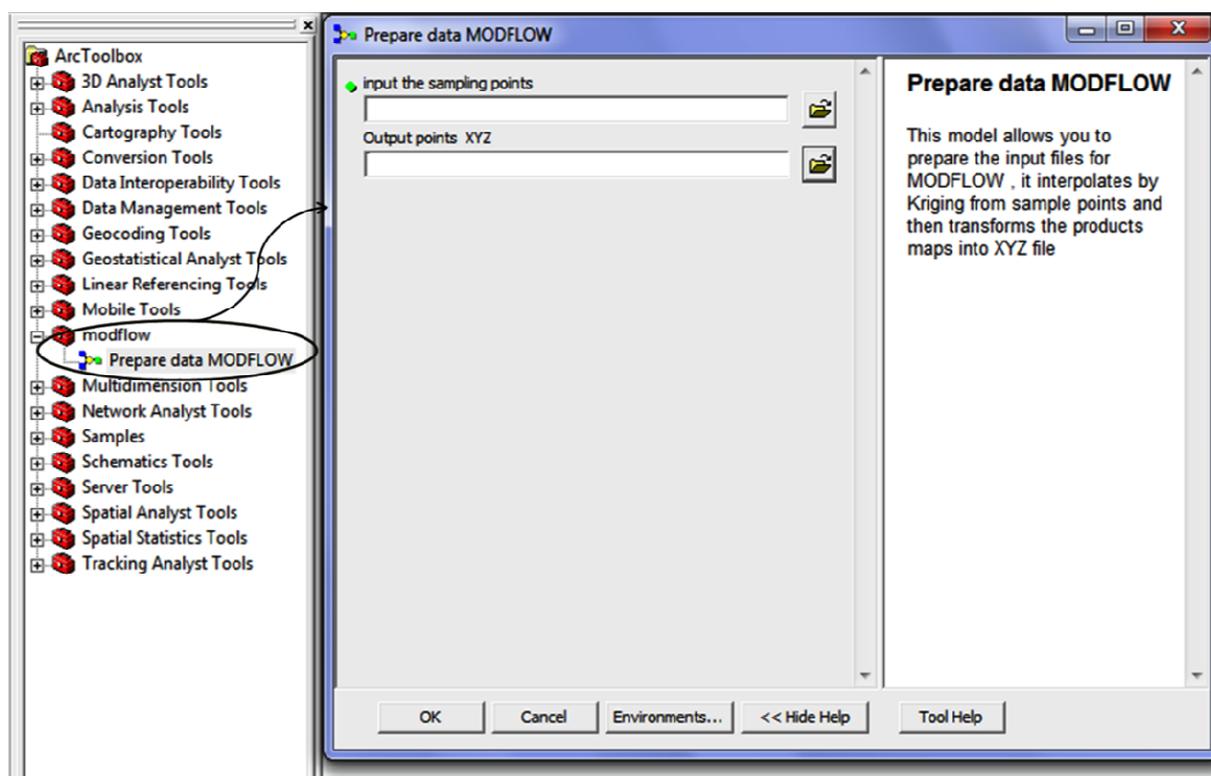


Figure III-8 Modèle construit pour la préparation des données de Modflow

La zone d'étude est centrée sur la ville de Béthune. Le modèle comprend trois couches. La topographie du modèle (la première couche contenant le sable d'Ostricourt,) a été importée à partir des données d'élévation des forages (Figure II-9) et à partir de plusieurs sources. Les sources de données utilisées à cette fin sont BRGM, IGN (Institut Géographique National) et PPIGE (Plateforme Publique l'Information Géographique) de la région Nord-Pas-de-Calais. Les élévations des toits et murs de la deuxième et de la troisième couche du modèle ont été choisies pour coïncider avec les altitudes supérieures et inférieures de la couche de l'argile de Louvil et de la couche de la craie. Ces élévations ont été calculées à partir d'un ensemble

d'échantillons (Figure III-9) fournis par la BSS du BRGM et à partir des données disponibles dans le rapport de Burgéap (1999). Dans cette étape, toutes les données d'entrée ont été préparées dans ArcGIS. Il s'agit des toits et murs des trois couches présentées dans le modèle, ainsi que tous les paramètres du modèle comme par exemple la conductivité hydraulique. Ce modèle permet de faire une interpolation (krigeage). Les cartes krigées doivent se transformer en points de coordonnées XYZ, pour faciliter le travail et ne pas répéter les démarches pour chacune des données, le modèle permet d'exécuter une chaîne des procédures consécutives pour avoir à la fin des fichiers XYZ utilisable directement dans Modflow.

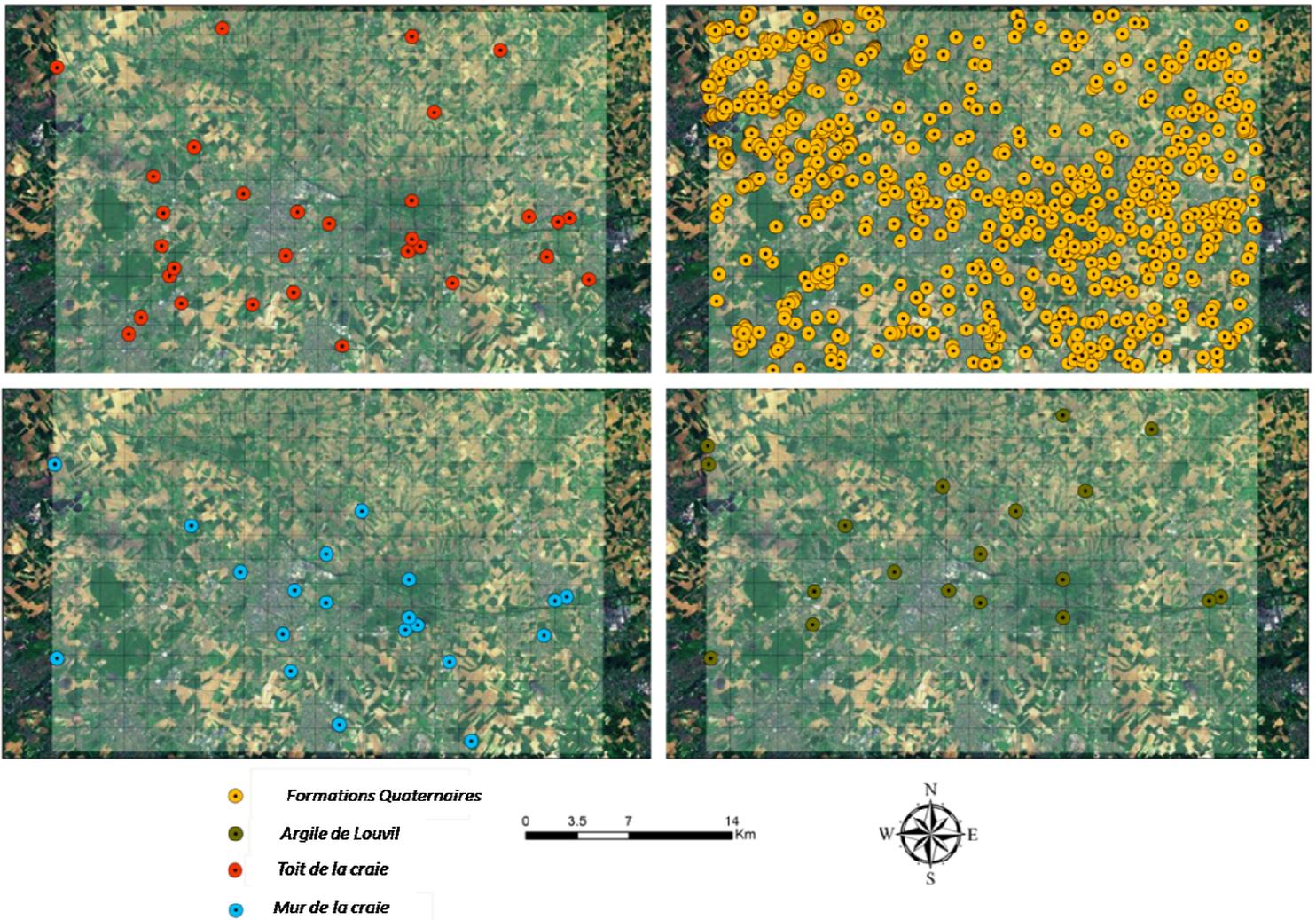


Figure III-9 Localisation des forages utilisés pour la modélisation hydrogéologique

III.2.2. Modélisation hydrodynamique

Un modèle est un outil qui représente une approximation de la réalité. Il existe des modèles physiques tels que les essais et les expériences faites au laboratoire et des modèles mathématiques qui simulent l'écoulement des eaux souterraines indirectement par la résolution des équations représentant les processus physiques qui se produisent dans le système, ainsi que les équations décrivant les conditions limites et les conditions initiales (Anderson et Woessner, 1992). Les modèles mathématiques peuvent être résolus de manière analytique ou numérique. Les solutions analytiques ont été établies pour des conditions contrôlées et pour des conditions initiales et des limites simples (Anderson et Woessner, 1992). Les conditions aux limites du modèle (flux imposé, charge imposée) et les conditions initiales sont rarement possibles étant donné la complexité des hydrosystèmes (De Marsily, 1981). C'est pourquoi, il est difficile d'utiliser une solution analytique. Une solution numérique est alors utilisée pour résoudre l'équation de diffusivité en utilisant l'approximation des différences finies. Les modèles numériques ont la capacité de représenter un modèle hydrogéologique complexe et multi-couches (Mandle, 2002).

Les modèles numériques sont largement utilisés en hydrogéologie (e.g. [(Louche, 1997 ; Chaaban, *et al.*, 2011)]). Ils représentent un outil qui simule le comportement des eaux souterraines, il permet de simuler à la fois les flux des eaux souterraines et le transport de soluté (De Marsily, 1981; Hamilton, 1982; Konikow et Reilly, 1998). La modélisation aide à la compréhension et à l'évaluation des systèmes hydrogéologiques (Anderson et Woessner, 1992). En outre, elle nous donne la capacité pour comprendre et gérer les ressources en eau.

Le schéma ci-dessous (Figure III-10) montre les étapes principales de la construction d'un modèle hydrodynamique numérique selon Anderson et Woessner (1992).

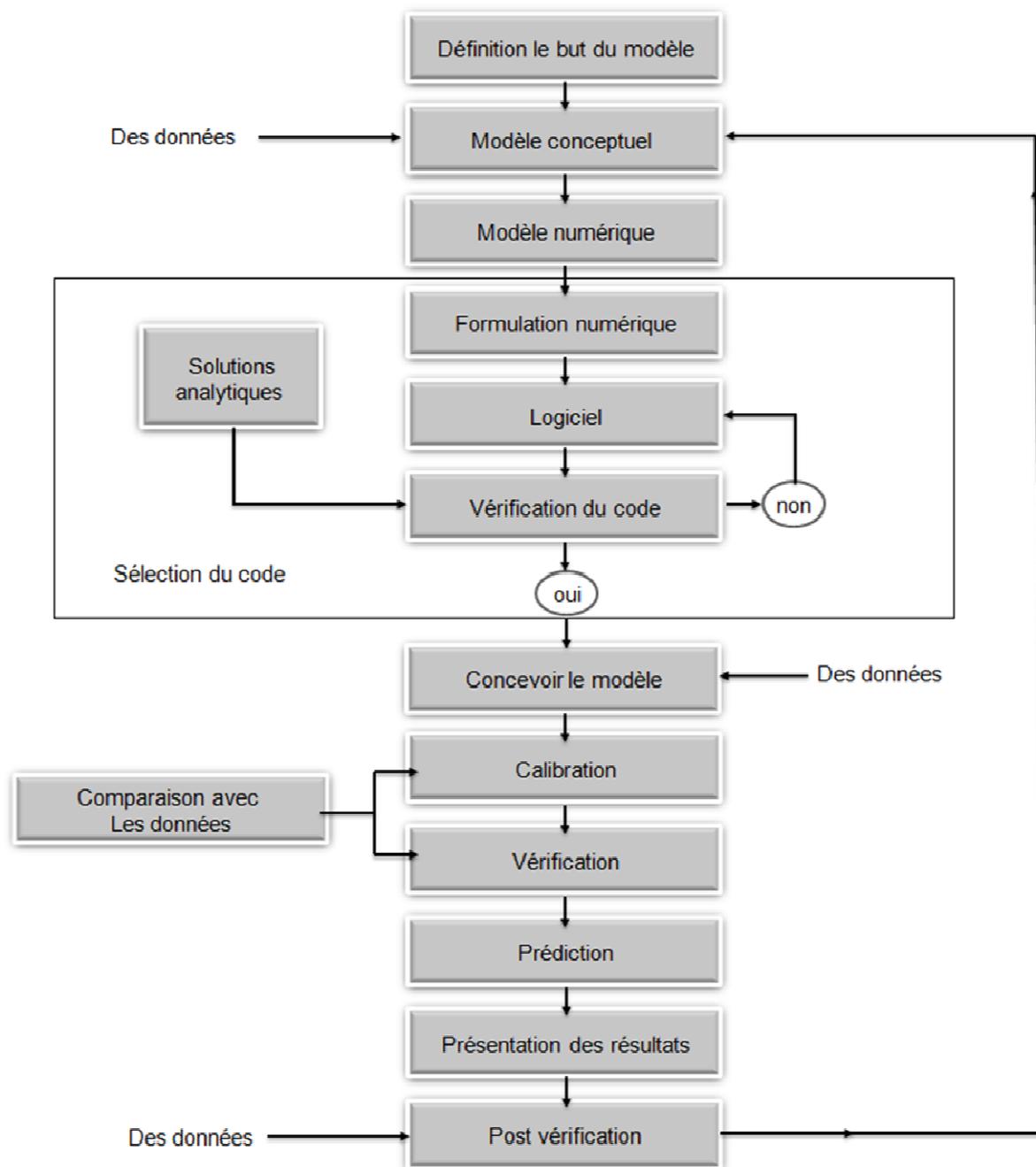


Figure III-10 Etapes de la construction d'un modèle hydrodynamique numérique (d'après Anderson et Woessner, 1992).

Dans le cadre de cette étude, l'écoulement de l'eau souterraine a été calculé en utilisant Modflow, un code développé en Fortran par l'U.S. « Geological Survey » (McDonald et Harbaugh, 1984). Il a été rendu public en 1984. Il a été modifié trois fois : Modflow-88 (McDonald et Harbaugh, 1988), Modflow-96 (Harbaugh et McDonald, 1996a; 1996b) et Modflow-2000 (Harbaugh, *et al.*, 2000). De nombreuses nouvelles options ont été ajoutées dans le code qui permettent de simuler plusieurs problèmes hydrogéologiques (Chiang, 2005).

La plus récente version est Modflow-2005. La version que nous utilisons fonctionne sur une interface en Visual Basic : Visual Modflow (Waterloo Hydrogeologic, Inc).

Modflow est devenu un standard dans la modélisation des écoulements souterrains (Anderson et Woessner, 1992). Il a été appliqué à de nombreux systèmes hydrogéologiques : des aquifères fissurés, karstiques, alluviaux, ou des aquifères complexes multicouches ; dans le cadre de problématiques variées : Évaluer le mouvement de l'eau, la direction du flux, la vitesse et les débits, évaluer les interactions entre les systèmes hydrogéologiques, identifier les lacunes dans les données lors de la caractérisation d'un site, aider au développement et à la gestion des systèmes d'approvisionnement en eau souterraine, simuler la piézométrie en période de sécheresse, déterminer les impacts potentiels de la contamination à proximité des puits ou des eaux de surface, estimer les zones de capture des forages et des sources d'eau potable (Strickland et Korleski, 2007).

Ce code est constitué d'un programme principal avec des modules indépendants (Well package, River package, etc.) qui permet de simuler des aspects hydrologiques spécifiques (Harbaugh, *et al.*, 2000). Cette structure modulaire facilite l'utilisation des fonctions hydrologiques indépendamment les unes des autres.

Le code Modflow est un bloc-centrée des différences finies à trois dimensions. Il est un des modèle dit « saturés », qui décrit le transfert hydrique dans un milieu poreux anisotrope et hétérogène saturé, en régime permanent ou transitoire, pour des aquifères libres, captifs ou mixtes selon l'équation de diffusivité (équation III-1) (McDonald et Harbaugh, 1988).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Équation III-1})$$

Où x , y et z sont les coordonnées cartésiennes alignées le long des axes principaux de la conductivité hydraulique K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} variables dans l'espace $K_{xx}=K_{xx}(x,y,z)$, $K_{yy}=K_{yy}(x,y,z)$, $K_{zz}=K_{zz}(x,y,z)$; h est la charge hydraulique et dépend des variables spatiales et temporelles $h = h(x,y,z,t)$; W est le flux (débit) par unité de volume prélevé (ou apporté) dans le milieu poreux, W dépend des variables spatiales et temporelles $W = W(x,y,z,t)$; S_s est le coefficient d'emmagasinement spécifique (*Specific Storage*), il dépend généralement des variables spatiales $S_s = S_s(x,y,z)$; t est le temps.

La solution de l'équation de diffusivité doit satisfaire les conditions aux limites et les conditions initiales du modèle.

A. Le maillage, le modèle conceptuel et les données d'entrée

La première étape de la modélisation par la méthode des différences finies est la discrétisation du modèle dans un système cartésien par un maillage rectangulaire de cellules, organisées en lignes (i), colonnes (j) et couches géologiques (k) (Figure III-11). Chaque couche représente un aquifère. L'équation de diffusivité est résolue aux nœuds des mailles par itérations successives en s'appuyant sur le principe de continuité des flux où les flux entrants et sortants de la cellule doivent être égaux à la variation de stockage de la cellule.

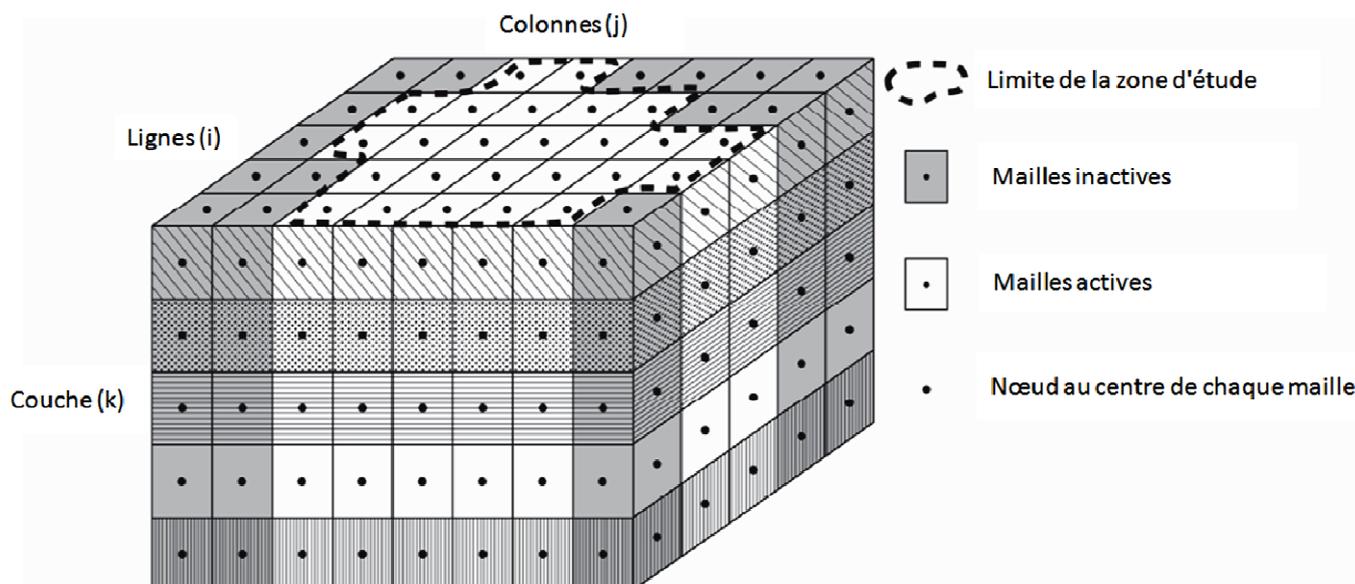
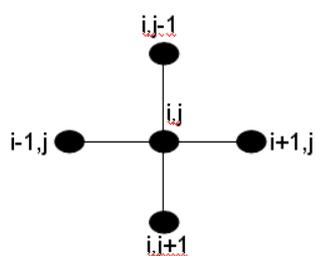


Figure III-11 Exemple de discrétisation d'un aquifère selon un maillage rectangulaire (McDonald et Harbaugh, 1988).

À l'intérieur de chaque maille et pour chaque pas de temps une charge est calculé



$$h_{i,j} = \frac{h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + h_{i,j+1} + h_{i,j-1}}{4}$$

Équation pour calculer le charge dans un nœud i,j , Le cas d'un modèle de la différence finis en deux dimensions et en régime permanent, le maillage régulier, Δx et Δz sont constant et égales), (Anderson et Woessner, 1992)

Le calcul continue jusqu'à ce que les changements de charge hydraulique convergent.

Dans notre zone d'étude, nous avons placé sur 377 km² (voir II.2. Contexte géographique), un maillage de 23 colonnes et de 15 lignes. L'ensemble du système aquifère est discrétisé en 345

mailles rectangulaires pour une résolution de la grille de (1.05 km x 1,04 km). La grille a été ensuite affinée autour des deux forages F4 et F5 (Figure III-12). Le modèle comprend trois couches d'épaisseur variable, avec à partir de la surface, les dépôts quaternaires en continuité avec les sables d'Ostricourt, l'argile de Louvil et l'aquifère crayeux qui représente la couche inférieure du modèle. Les élévations des toits et murs des trois couches du modèle ont été préalablement préparées dans ArcGIS (voir III.2.1.C. Préparation et extraction des données de modélisation hydrodynamique).

De manière générale, l'épaisseur des couches varie entre :

- _ 10 à 84 m NGF pour la première couche.
- _ -27 à 35 m NGF pour la couche d'argile.
- _ -42 à 56 m NGF pour la couche de la craie supérieure.

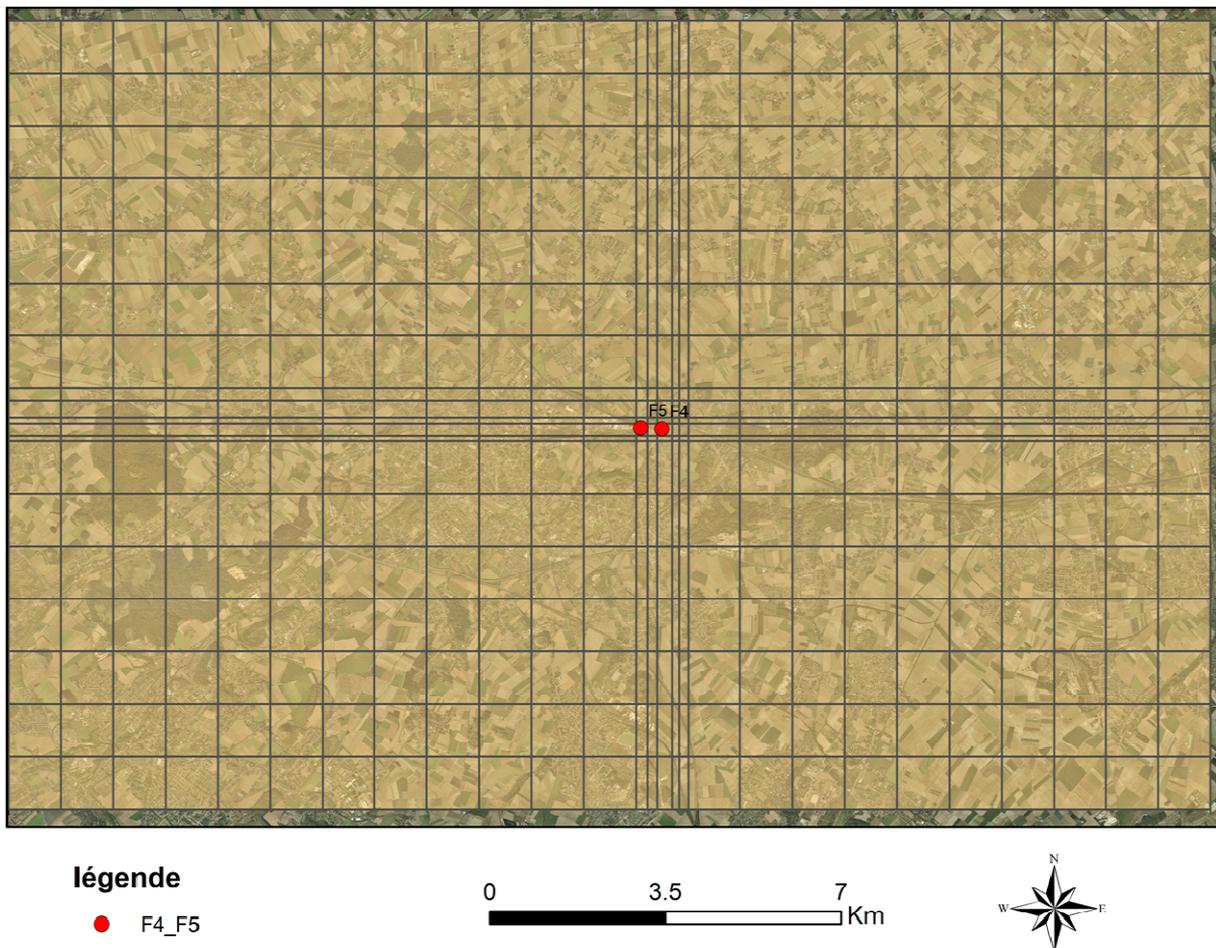


Figure III-12 Maillage de la zone à modéliser

Deux simulations ont été réalisées, tout d'abord une simulation en régime permanent a été réalisée pour caler le modèle. Ensuite, en se basant sur les résultats provenant de la

modélisation en régime permanent, un calage en régime transitoire a été effectué pour simuler les fluctuations des cotes piézométriques dans le temps.

B. Régime d'écoulement permanent

La simulation d'un régime hydrodynamique permanent est essentiellement faite dans le but de caler le modèle en ajustant tous les paramètres hydrodynamiques et surtout de valider le champ de conductivité hydraulique de la nappe. Le calage en régime permanent s'est appuyé sur les données disponibles, sur les débits entrants et sortants, c'est-à-dire les précipitations efficaces et les pompages, ainsi que sur les valeurs ponctuelles de conductivité.

Dans un premier temps, la conductivité a été considérée comme isotrope et homogène au sein de chacun des aquifères. On a affecté une conductivité hydraulique de 1.8×10^{-5} m/s à la couche supérieure du modèle qui contient du sable (Tableau III-1), une conductivité hydraulique de 3×10^{-8} m/s à la deuxième couche qui contient de l'argile. Ces valeurs de conductivité hydraulique sont conformes à la moyenne des mesures prises sur le site (Burgéap, 1999). Une carte de la répartition spatiale de la conductivité hydraulique de la craie a été créée dans ArcGIS et importée au modèle Modflow avec une moyenne de 2×10^{-5} m/s. L'année 1972, une année de recharge déficitaire, a été utilisée comme l'année de départ dans le modèle. Le modèle a été calibré selon les données disponibles dans cette année (Burgéap, 1999). Une valeur de 150 mm/an de pluie efficace a été spécifiée pour la première couche du modèle (Tableau III-1).

Paramètres	Valeur
taille du maillage	1.05 km x 1.04 km
K (conductivité hydraulique du sable)	1.8×10^{-5} m/s
K (conductivité hydraulique de l'argile)	3×10^{-8} m/s
K_{mean} (conductivité hydraulique de la craie)	2×10^{-5} m/s
Porosité efficace (ne)	0.25
Recharge (R)	150 mm/an

Tableau III-1 Paramètres hydrologiques utilisés dans la modélisation en régime permanent.

La simulation du comportement hydrodynamique de l'aquifère repose sur une définition rigoureuse des conditions aux limites. C'est pourquoi on a cherché à construire un modèle dont les limites soient les plus naturelles possibles. Il existe deux types de limites physiques ou hydrauliques (Anderson et Woessner, 1992). Les limites physiques correspondent à de grandes masses d'eau de surface comme une mer ou un lac. Elles peuvent être aussi des

structures imperméables comme une faille, un substratum imperméable affleurant ou un corps argileux. Les limites hydrauliques correspondent souvent à des lignes de partage des eaux ou des lignes de flux. Deux types de limites ont été proposés : Les limites nord et sud du modèle ont été choisies comme des limites à potentiel imposé. Une carte piézométrique pour l'année 1972 a été utilisée pour quantifier ce potentiel. Les rivières ont été modélisées en utilisant dans la couche supérieure du modèle, une condition aux limites variable dans l'espace. La définition de l'emplacement et la largeur des rivières était basée sur une photographie aérienne du site qui a été importé dans Visual Modflow (Figure III-16) et sur le modèle d'analyse de l'eau surfacique déjà créé dans ArcGIS (voir III.2.1.B Modèle d'extraction du réseau hydrologique). Plusieurs chroniques piézométriques nous sont fournies par les études précédentes et l'agence de l'eau d'Artois-Picardie, ce qui a permis de créer la carte piézométrique de référence numérisée pour l'année 1972 (période des basses eaux) (Figure III-13).

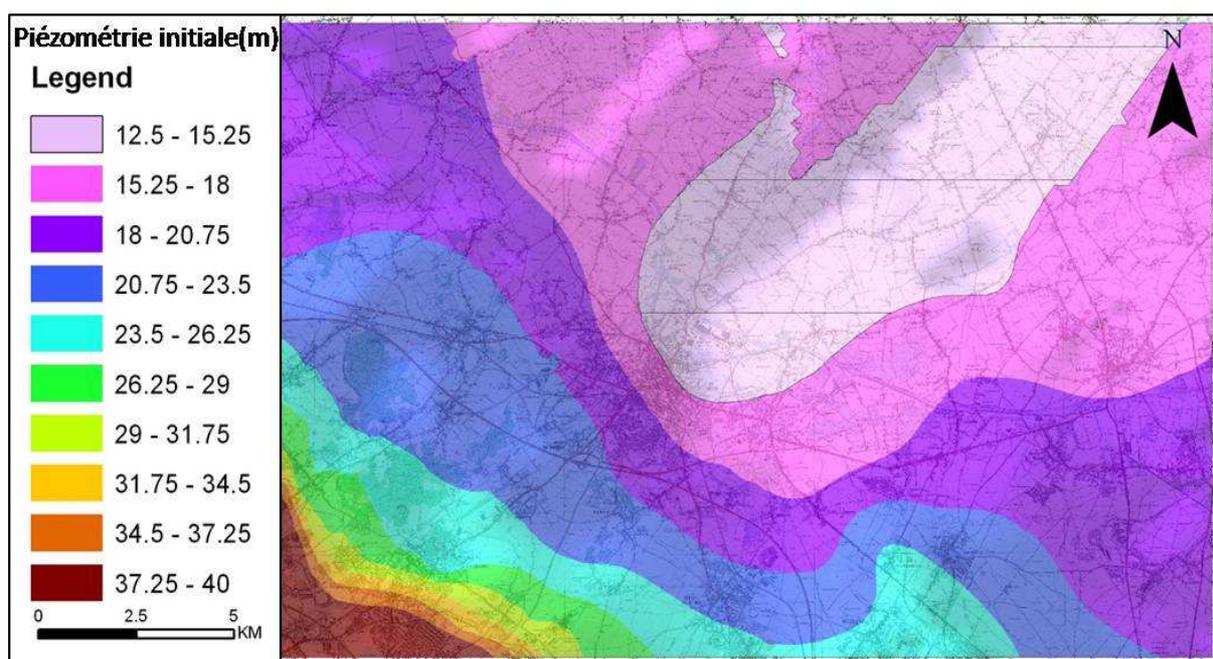


Figure III-13 Carte piézométrique initiale en 1972

On a cherché à restituer la piézométrie observée en 1972 en ajustant le champ de conductivité de la nappe de la craie. Dans un premier temps, le champ des conductivités a été ajusté manuellement en tenant compte des valeurs disponibles, afin de restituer au mieux la carte piézométrique observée. La Figure III-14 montre les différentes valeurs assignées après le calage manuel du modèle.

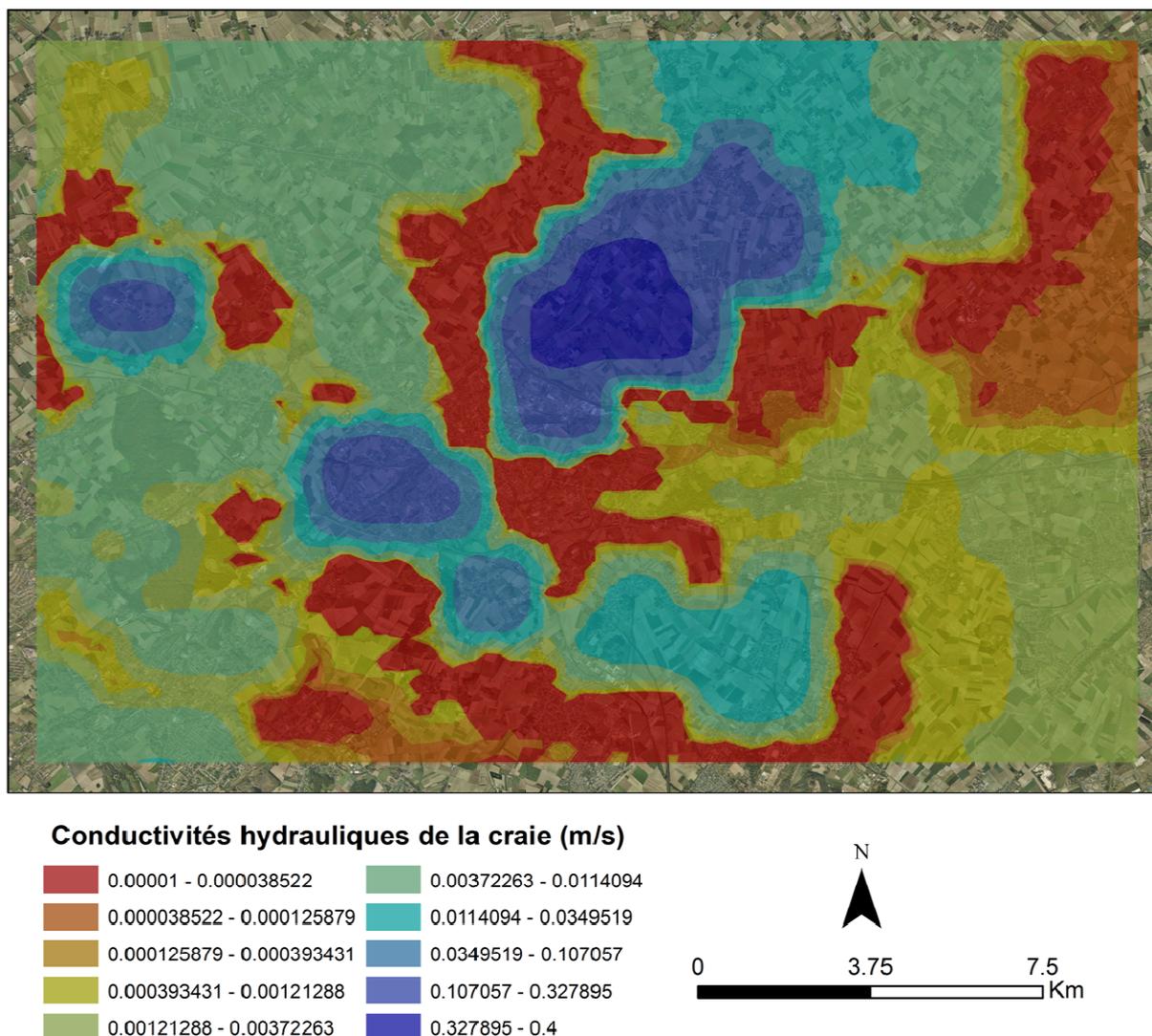


Figure III-14 Carte de répartition des conductivités hydrauliques obtenue lors du calage

Les résultats de la modélisation en régime permanent montre bien que la piézométrie calculée restitue bien l'allure générale des courbes isopièzes observées à cette époque (Burgéap, 1999) ainsi que la répartition des gradients hydrauliques conformes à la réalité (Figure III-15 ; Figure III-16). Le modèle a simulé avec précision la répartition de la charge hydraulique dans l'aquifère crayeux, en particulier dans la zone d'intérêt à proximité de deux forages F4 et F5. Pour les 12 forages d'observation, la résiduelle maximale est 0,848 m et la moyenne résiduelle absolue est 0,597 m. Les valeurs observées par rapport à celles prédites ont un coefficient de corrélation de 0,992. En particulier, l'ajustement peut être considéré comme très bon dans le domaine des forages F4 et F5, où les cotes piézométriques varient entre 12 et 17 m.

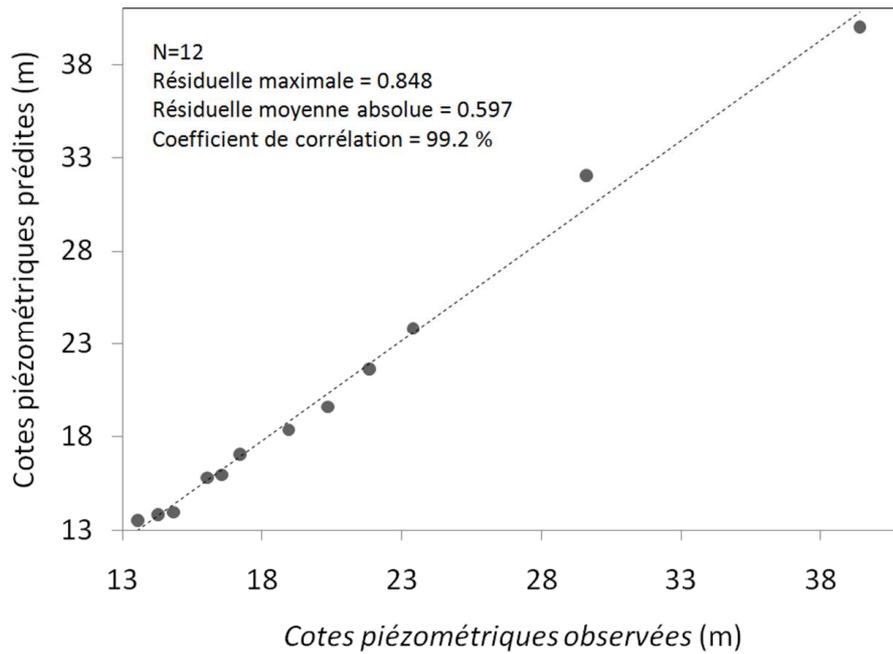


Figure III-15 Cotes piézométriques observées par rapport à celles prédites lors de la modélisation dans 12 forages de la nappe de la craie en 1972

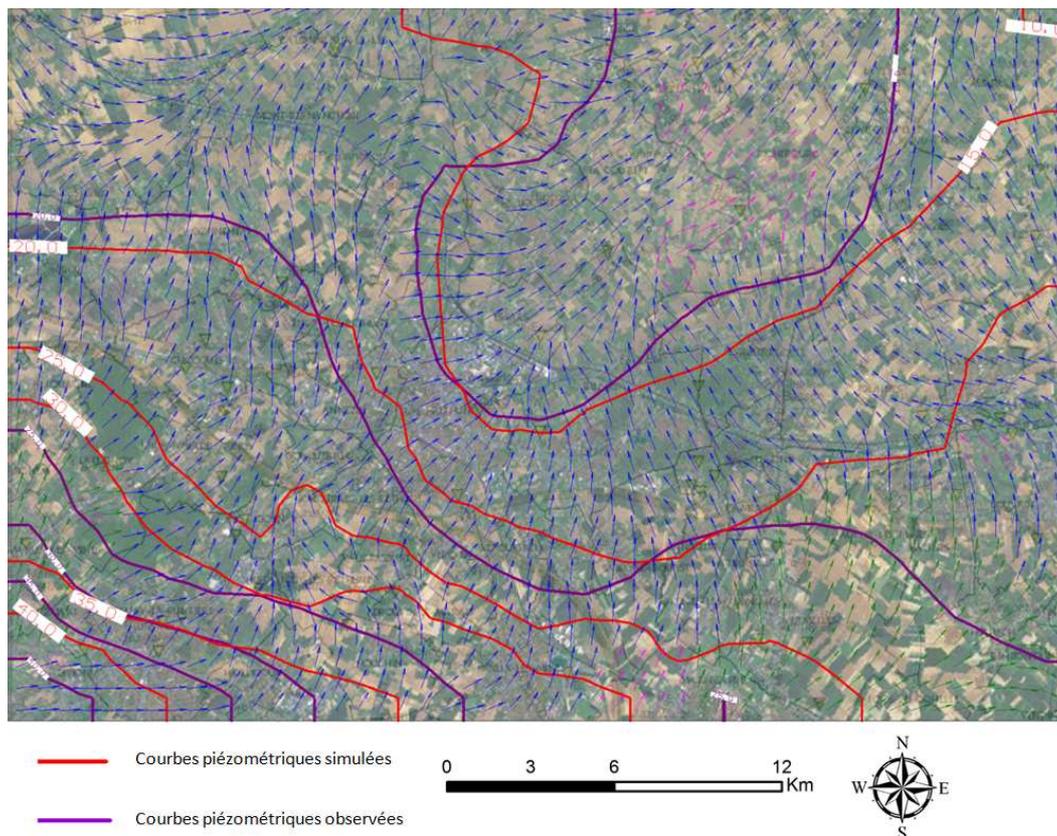


Figure III-16 Sens d'écoulement, courbes piézométriques simulées et observées dans l'aquifère crayeux.

Le modèle Modflow calcule, pour chaque maille, le potentiel hydraulique à partir des données hydrodynamiques caractéristiques du domaine. La détermination du niveau piézométrique se fait, pour chaque maille, selon la loi de conservation de la masse en eau ou du volume s'il n'y a pas de variation de masse volumique de l'eau : Volume entrant - volume sortant = volume stocké. En régime permanent, en admettant une stabilité du niveau piézométrique et des débits échangés avec l'extérieur, la variation du volume d'eau stocké dans le milieu poreux est nulle. Lorsque la piézométrie calculée semble correcte, il est nécessaire de vérifier cette loi de conservation de masse. Le code numérique permet d'accéder au bilan en eau de chacun des termes d'écoulement et au bilan total (Tableau III-2). La lecture de celui-ci permet l'acceptation du calage puisque le volume stocké est bien nul.

	entré m3/s	sortie m3/s
emmagasinement	0	0
limite à potentiel imposé	0.7062	3.7258
forages	0	0.877
rivières	2.8875	0.7334
recharge	1.7482	0
total	5.34	5.34

Tableau III-2 Bilan des flux lors de la période de 1972

C. Régime d'écoulement transitoire

Une modélisation hydrodynamique en régime transitoire a été menée afin d'une part de confirmer le champ de conductivités hydrauliques obtenu en régime permanent et d'autre part de faire des analyses sur la prédiction en cas de prélèvement supplémentaire des forages F4 et F5 pour les années déficitaires ou excédentaires. La carte de répartition des conductivités hydrauliques obtenue lors du calage en régime permanent, a été conservée pour effectuer les simulations en régime transitoire. Une simulation a été effectuée de l'année 1972 jusqu'à 2008. Les données de recharge et de prélèvement sont les données réelles, avec décalage d'une année complète. Dans la zone d'étude, il n'existe que quatre piézomètres référencés (Figure III-17) et suivis par l'agence de l'eau.

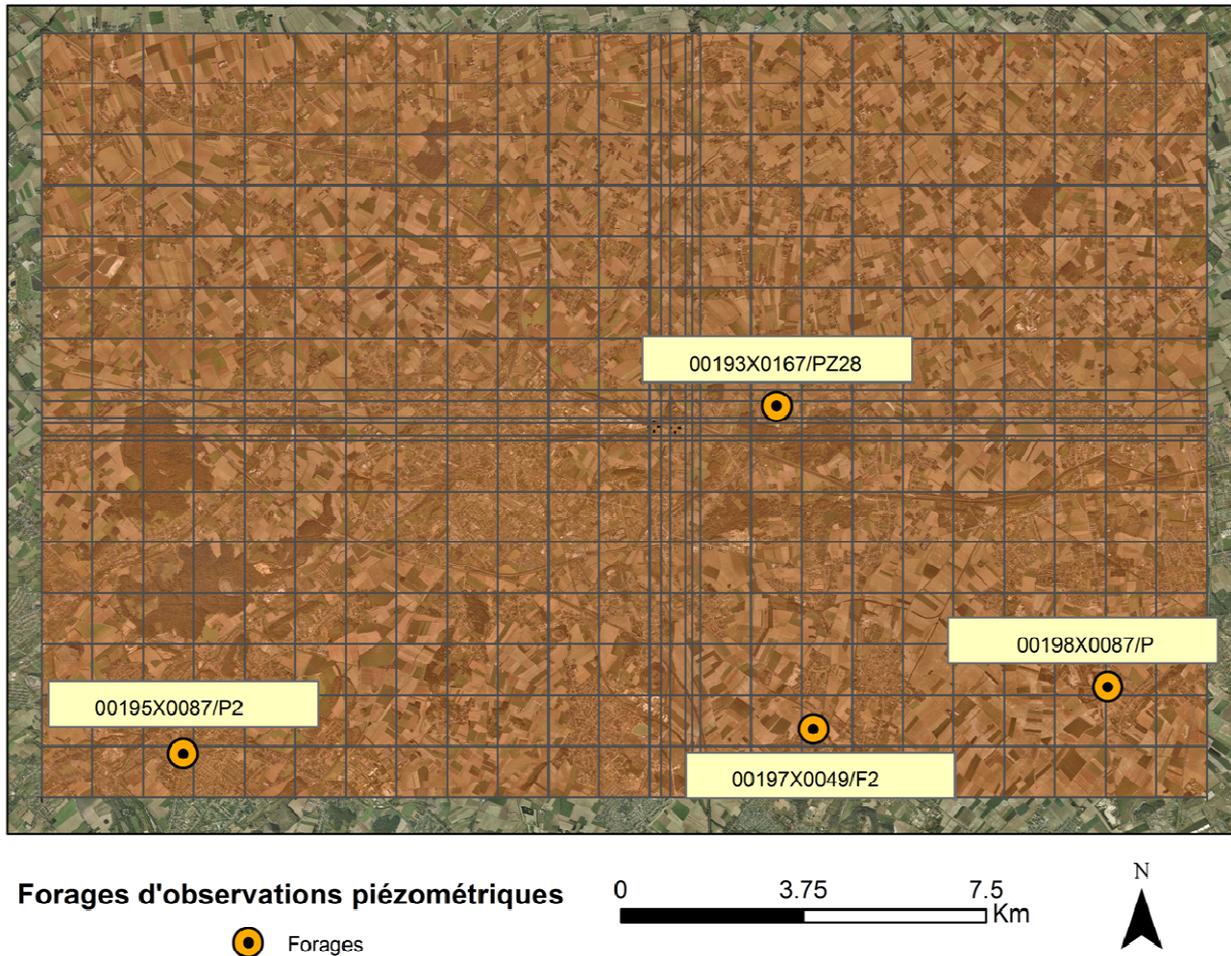


Figure III-17 Localisation des piézomètres.

- Piézomètre de lieu dit « Marais L'Avoué », commune de Beuvry

(Code BRGM / Agence : 00193X0167/PZ28)

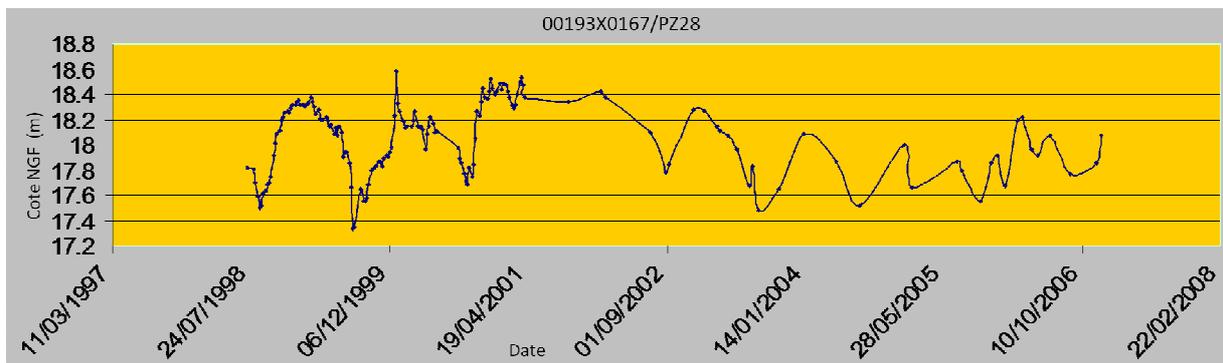


Figure III-18 Evolution du piézomètre de Beuvry, 00193X0167/PZ28

- Piézomètre de lieu dit « Siège 4, Halte Des Alouettes », commune de Bruay-la-Buissière (code BRGM / Agence : 00195X0087/P2)

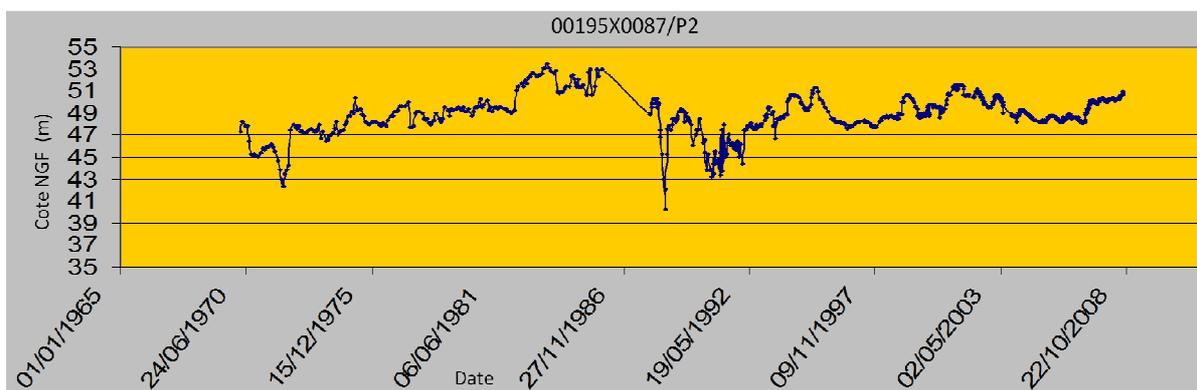


Figure III-19 Evolution du piézomètre de Bruay-la-Buissière, 00195X0087/P2

- Piézomètre de lieu dit « 2, Rue Voltaire », commune de Mazingarbe (code BRGM / Agence : 00197X0049/F2)

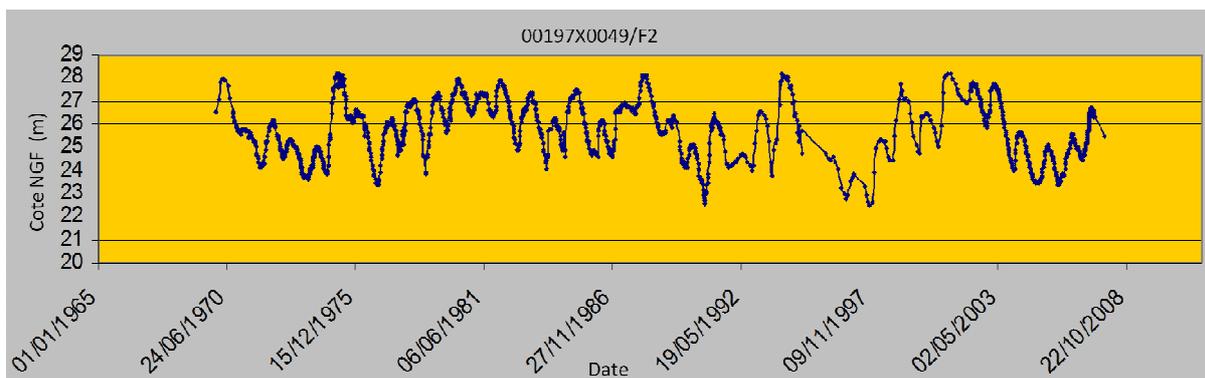


Figure III-20 Evolution du piézomètre de Mazingarbe 00197X0049/F2

- Piézomètre de lieu dit « Château D'Eau Communal », commune de Hulluch (code BRGM / Agence : 00198X0087/P)

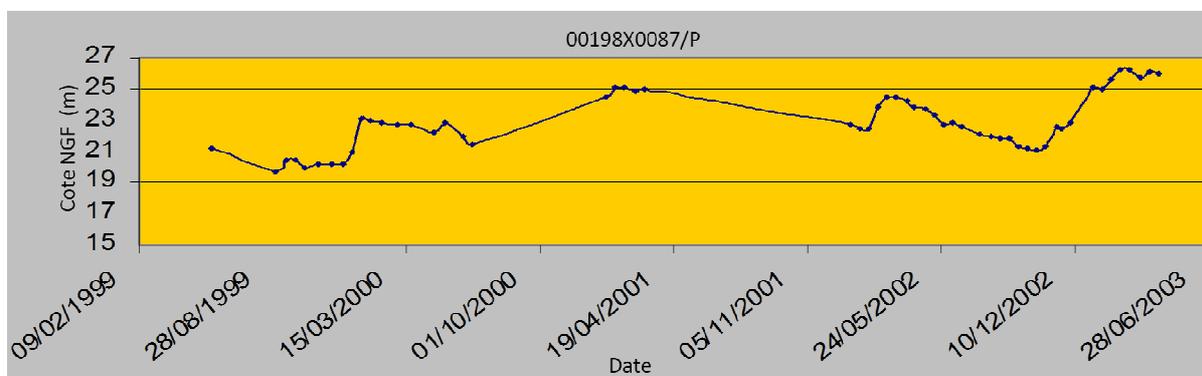


Figure III-21 Evolution du piézomètre de Hulluch, 00198X0087/P

Les chroniques de ces quartes piézomètres, à long terme, permettront de montrer avec précision les réponses hydrologiques de la nappe, On remarque que les variations du niveau d'eau dans la partie libre de l'aquifère crayeux sont importantes (proche de 13 m de profondeur dans 00195X0087/P2, et à plus de 6 m dans 00198X0087/P et 5 m dans 00197X0049/F2). Alors que, dans la partie captive, l'évolution du niveau de la nappe est très faible (environ 1.25 m de profondeur dans 0193X0167/PZ28). Donc la nappe libre réagit très rapidement aux infiltrations, c'est pourquoi elle se recharge assez rapidement à chaque épisode pluvieux. La réalimentation des nappes intervient juste après la saturation des sols en eau, par infiltration directe des eaux de pluies au niveau des zones d'affleurement.

Le calibrage du modèle transitoire couvre une période de 36 ans. Pendant cette période, les observations piézométriques ont été faites par l'agence de l'eau d'Artois-Picardie. La représentation des fluctuations piézométriques de la nappe nous a permis de mieux ajuster les coefficients d'emménagement utilisé par le modèle. Les valeurs initiales des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère ont été présentées et ensuite ajustées lors du calage. La valeur de 5×10^{-2} pour le coefficient d'emménagement, initialement introduite pour la première couche, a été retenue. Deux valeurs ont été considérées pour la nappe de la craie. La valeur du coefficient d'emménagement pour la partie libre de l'aquifère est d'environ 8×10^{-3} . Dans la partie captive de l'aquifère, la valeur correspondante a été 10^{-3} . Basé sur les valeurs comparées des cotes piézométriques calculées et observées pour les 4 piézomètres de référence, l'ajustement peut être considéré comme acceptable. En utilisant le modèle sur la période 1972-2008, la différence piézométrique entre les cotes calculées et mesurées est de 0,7 m. En particulier, la moyenne absolue résiduelle dans la zone proche de pompage des puits F4 et F5 a été de 0,3 m. Toutefois, à la limite sud-ouest du domaine discrétisé, la reconstruction des courbes est moins satisfaisante. Ce résultat peut probablement être expliqué en termes de quantité de données disponibles pour cette zone.

La pluie efficace a été calculée de l'année 1972 jusqu' à 2008 avec une moyenne sur 37 ans calculée pour le secteur étudié de 278 mm/an. Des histogrammes (Figure III-22) nous permettent de représenter d'une part la répartition de la recharge pendant la période étudiée, et d'autre part ils montrent une corrélation très forte entre la recharge et les cotes piézométriques calculées dans F4 et F5 par le modèle Modflow.

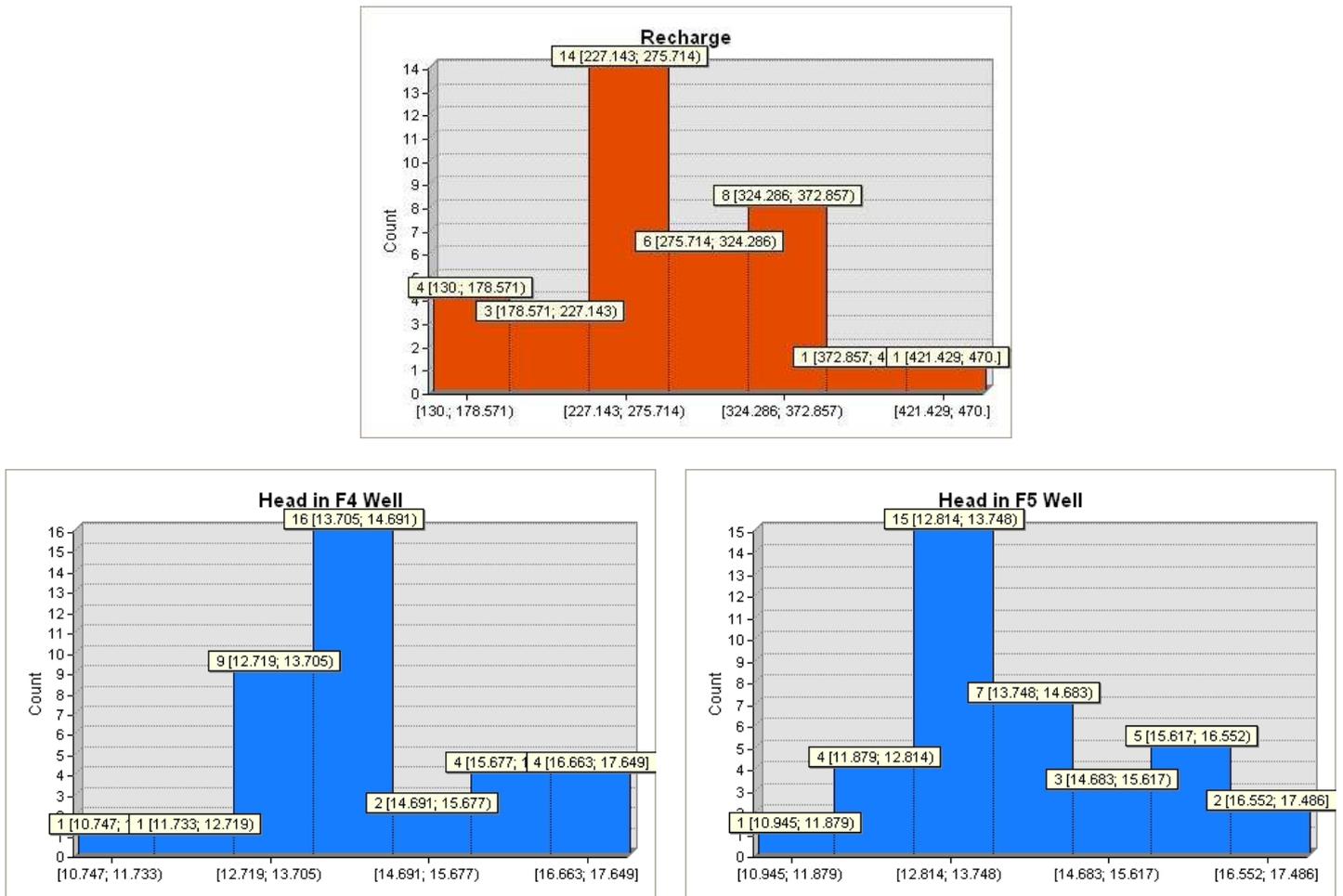


Figure III-22 Comparaison entre l’histogramme de la recharge avec celui des cotes piézométriques dans les forages F4 et F5 (de l’année 1972 à 2008)

La dépendance entre la recharge et la piézométrie est bien confirmée (Figure III-23). Les résultats du modèle transitoire montre qu’un écart type de la recharge de 68.5 mm/an induit un écart type 1.3 m de la cote piézométrique dans les deux forages F4 et F5.

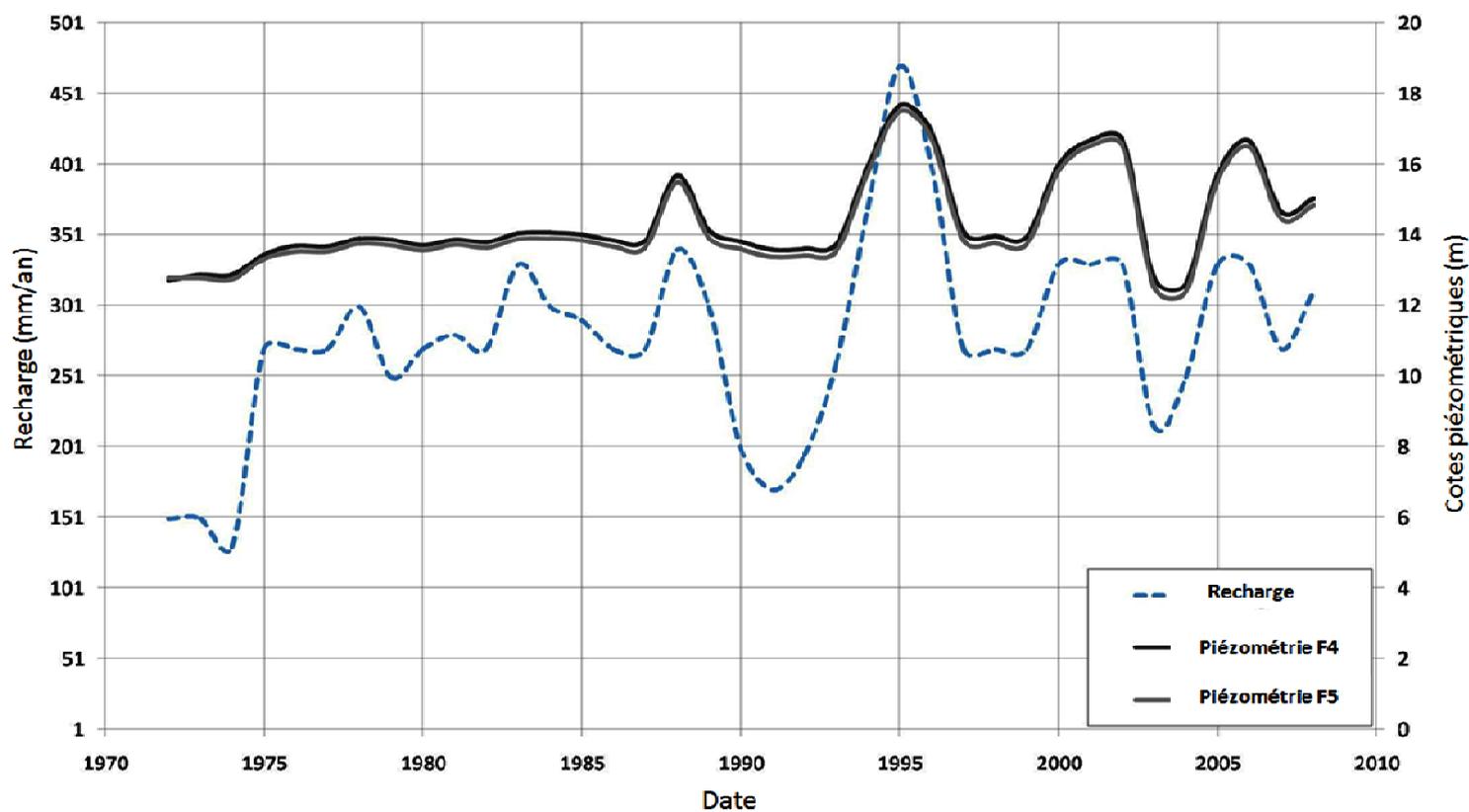


Figure III-23 Recharge et variations de charge hydraulique dans les puits F4 et F5 de 1972 à 2008

III.3. Résultats et discussion

Les données de sortie du modèle transitoire ont été exportées vers le SIG. Toutes les cartes piézométriques ont été créées dans ArcGIS 9.3.1 à l'aide de l'outil *Geostatistical Analyst*® et de sa fonction d'interpolation spatiale par krigage. La Figure III-24 montre deux exemples relatifs à deux périodes de recharge différentes.

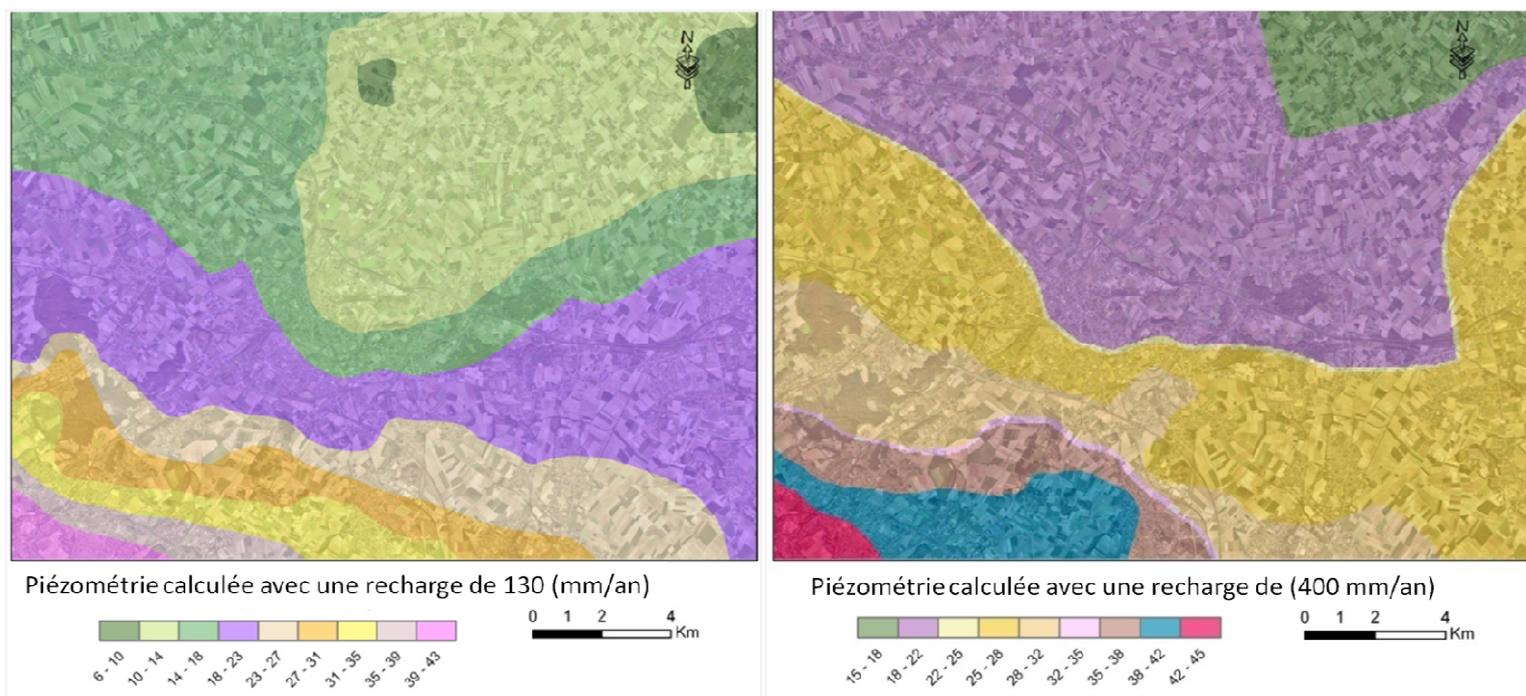


Figure III-24. Piézométrie calculée pour deux scénarii de recharge : année sèche et année humide

Pour déterminer les débits optimums des prélèvements de deux forages F4 et F5, plusieurs scénarii ont été effectués pendant des périodes déficitaires comme l'année 1972 (avec recharge de 150 mm/an) et pendant des années excédentaires (recharge de 400 mm/an). Le premier scénario de prélèvement consiste, par exemple, à prélever 100 m³/h du F4 et de 200 m³/h de F5. Le choix des débits de pompage est basé sur des essais de pompage effectués par (AMODIAG, 2006) dans les deux forages F4 et F5. Selon les données de rabattements stabilisés et les débits mesurés, AMODIAG (2006) a établi les courbes caractéristiques de F4 et F5. Les équations des courbes et les différentes valeurs de pertes de charge ont été calculées. L'équation générale du rabattement dans un forage est définie par la relation (équation III-2):

$$S = bQ + cQ^2 \quad (\text{Équation III-2})$$

Où S est le rabattement total observé au puits de pompage, Q est le débit de pompage (m³/h), le bQ est un paramètre proportionnel au débit et fonction des caractéristiques de l'aquifère (transmissivité) et des pertes de charges linéaire (colmatage, pénétration partielle,...); le paramètre cQ² représente les pertes de charges quadratiques dues à un écoulement turbulent mise en vitesse anormale dans les crépines ou les fissures.

Les équations des courbes caractéristiques de F4 et F5 sont donnés en (équation III-3) et (équation III-4):

$$\text{Pour F4 } S = 3.01 \times 10^{-2} Q + 1.91 \times 10^{-4} Q^2 \quad (\text{Équation III-3})$$

$$\text{Pour F5 } S = 1.14 \times 10^{-2} Q + 4.69 \times 10^{-5} Q^2 \quad (\text{Équation III-4})$$

En conformité avec les équations (III-3) et (III-4), nous pouvons noter que les pertes des charges quadratiques représentent 56% du rabattement total dans F4, et elles correspondent à 29% dans F5.

Le rabattement total induit par les prélèvements a été calculé (Tableau III-3, Tableau III-4) en prenant en compte la perte de charge linéaire et quadratique qui ont été calculées selon les équations (III-3) et (III-4), car la version Visual Modflow avec laquelle on travaille ne prend pas en compte les pertes de charges.

	Q (m ³ /h)	Perte de charge linéaire	Perte de charge quadratique	Rabattement Modflow (m)	Rabattement total (m)
F4	100	3.01	1.91	0.2983	5.2183
	150	4.515	4.2975	0.4393	9.2518
	170	5.117	5.5199	0.5042	11.1411
	180	5.418	6.1884	0.5429	12.1493
	190	5.719	6.8951	0.589	13.2031
	200	6.02	7.64	0.6131	14.2731
	250	7.525	11.9375	0.7202	20.1827

Tableau III-3 Scénarii des prélèvements du F4

	Q (m ³ /h)	Perte de charge linéaire	Perte de charge quadratique	Rabattement Modflow (m)	Rabattement total (m)
F5	200	2.28	1.876	0.2524	4.4084
	300	3.42	4.221	0.3708	8.0118
	350	3.99	5.74525	0.4326	10.16785
	400	4.56	7.504	0.4827	12.5467
	450	5.13	9.49725	0.5428	15.17005
	460	5.244	9.92404	0.5561	15.72414
	470	5.358	10.36021	0.5898	16.30801

Tableau III-4 Scénarii des prélèvements du F5

Afin de pouvoir évaluer l'impact du rabattement sur le phénomène de dénitrification, la colonne d'eau (charge) au-dessus de la couche de la craie a été calculée à partir du niveau piézométrique de l'année 1972 et l'altitude du mur de l'argile de Louvil. Cette valeur a été calculée pour une année déficitaire (recharge = 150 mm/an) (Figure III-25), puis pour une année pluvieuse (recharge = 400 mm/an) (Figure III-26). Cette analyse a permis d'identifier le rabattement maximum qui peut être atteint sans que la nappe de la craie ne passe d'un état captif à libre.

D'après la Figure III-25, pendant une année sèche (recharge = 150 mm/an), la charge hydraulique de la nappe à côté des forages F4 et F5 est de l'ordre de 14 à 20 m. Avec un rabattement inférieur à 14 m, on est sûr que la nappe reste captive. La lecture des Tableau III-3 et Tableau III-4 permet de choisir les prélèvements avec des débits de 180 m³/h au droit du forage F4 et de 400 m³/h pour F5. Les cônes de rabattement calculés au centre du chacun des forages sont inférieurs à 14 m. De la même manière, la Figure III-26 montre que la charge hydraulique à proximité des puits F4 et F5 est comprise entre 18 et 24 m, donc avec un rabattement de moins de 18 m possible au cours d'une année pluvieuse (recharge = 400 mm/an). Les valeurs dans les Tableau III-3 et Tableau III-4 donnent une approximation des débits possibles des prélèvements de 200 m³/h de F4 et de 460 m³/h de F5.

En somme, ces prélèvements n'entraînent pas une désaturation caractérisée de la nappe de la craie à côté des puits de pompage. Dans l'ensemble la nappe reste captive et conserve les conditions d'écoulement en régime saturé permettant la dénitrification.

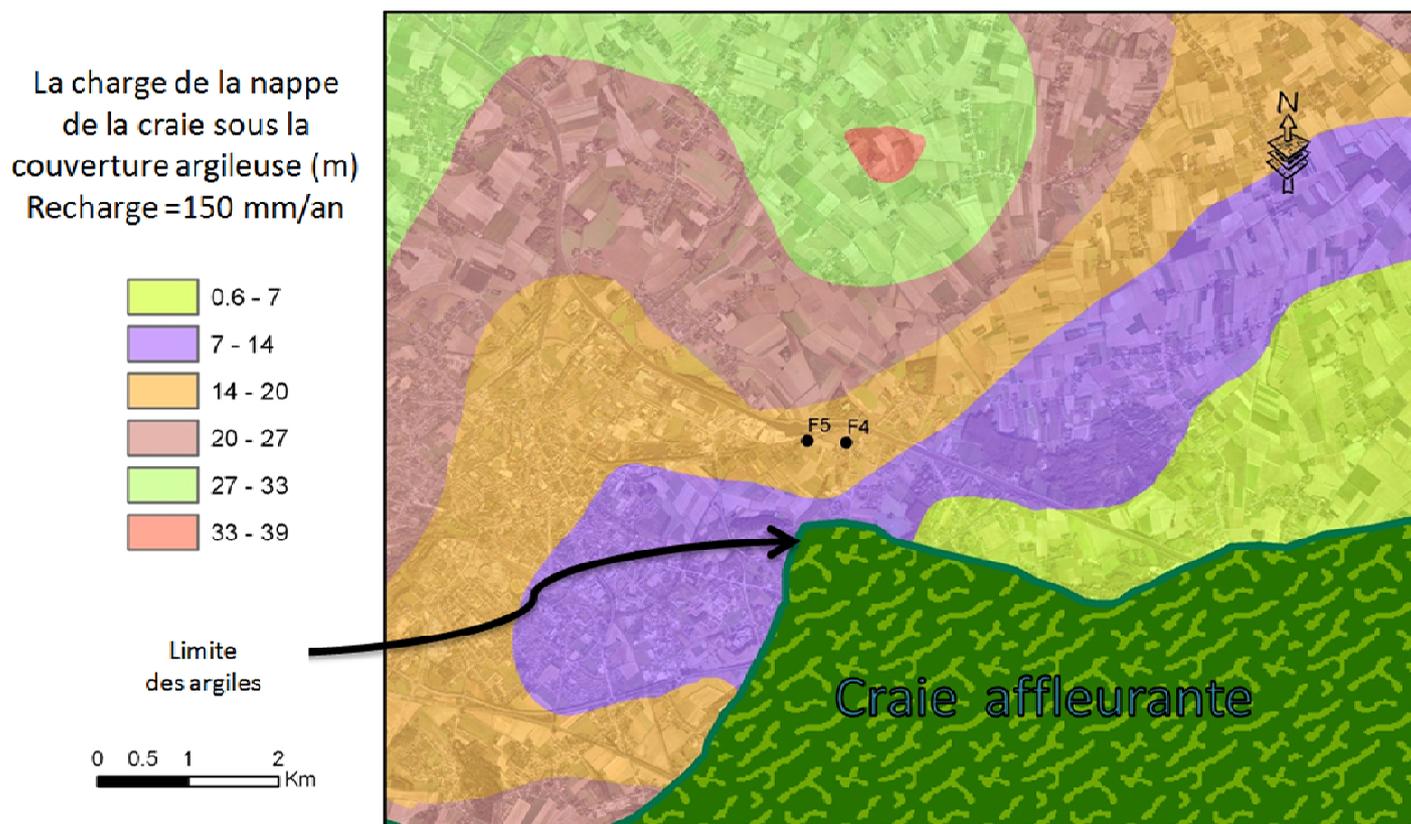


Figure III-25 Charge de la nappe de la craie sous la couverture argileuse pour une année déficitaire (150 mm/an)

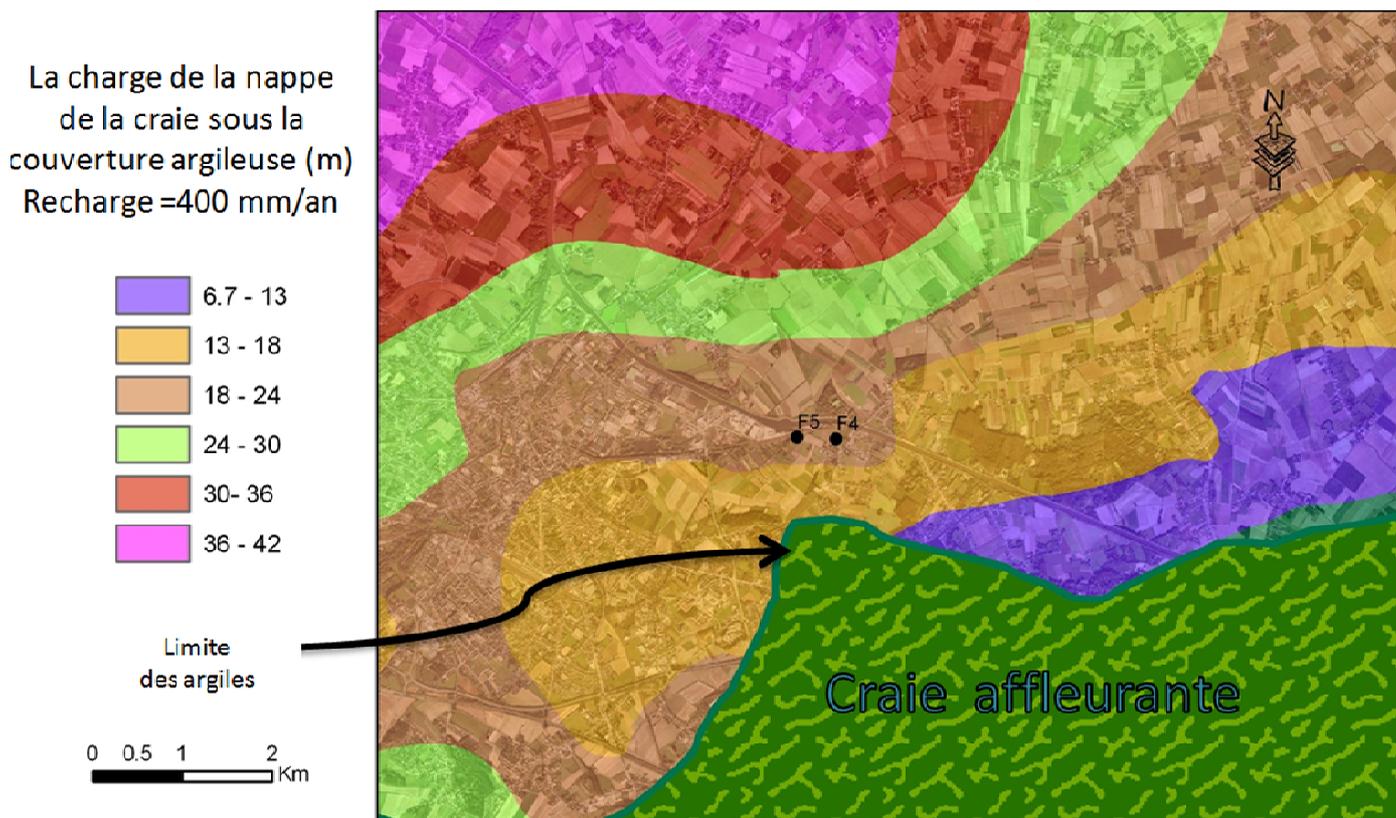


Figure III-26 Charge de la nappe de la craie sous la couverture argileuse pour une année pluvieuse (400 mm/an)

III.4. Optimisation des résultats par les réseaux de neurones artificiels

Le choix des valeurs les plus précises des débits des prélèvements nécessite l'optimisation des résultats, c'est pourquoi des nouvelles simulations de prélèvements de deux forages F4 et F5 ont été effectuées dans Modflow avec un pas de débits de prélèvements de ($5 \text{ m}^3/\text{h}$) (Tableau III-5). Ces simulations ont été faites en vue de les exploiter dans un modèle de RNA. Les réseaux de neurones artificiels constituent une méthode récente d'approximation et de prévision, elle est une alternative robuste des méthodes statistiques classiques (Coulibaly, *et al.*, 1999). Un type des modèles RNA appelée perceptrons multicouches (PMC) a été favorisée, ces dernières années, surtout pour la prévision de phénomènes hydrologiques (voir IV.2.1 Le modèle RNA).

	Q m ³ /h	perte de charge linéaire	perte de charge quadratique	rabattement Modflow	rabattement total (m)		Q m ³ /h	perte de charge linéaire	perte de charge quadratique	rabattement Modflow	rabattement total (m)
F4	180	5.418	6.188	0.543	12.149	F5	400	4.56	7.504	0.483	12.547
	185	5.569	6.537	0.553	12.658		405	4.617	7.693	0.490	12.8
	190	5.719	6.895	0.572	13.186		410	4.674	7.884	0.502	13.06
	195	5.87	7.263	0.581	13.713		415	4.731	8.077	0.506	13.314
	200	6.02	7.64	0.591	14.251		420	4.788	8.270	0.512	13.57
	205	6.171	8.027	0.607	14.804		425	4.845	8.470	0.523	13.838
	210	6.321	8.423	0.615	15.359		430	4.902	8.670	0.526	14.098
	215	6.472	8.829	0.631	15.931		435	4.959	8.870	0.536	14.365
	220	6.622	9.244	0.644	16.510		440	5.016	9.080	0.545	14.641
	225	6.773	9.67	0.659	17.100		445	5.073	9.287	0.55	14.91
	230	6.923	10.1	0.664	17.690		450	5.13	9.497	0.554	15.181
	235	7.074	10.55	0.687	18.309		455	5.187	9.710	0.570	15.467
	240	7.224	11.002	0.703	18.929		500	5.7	11.725	0.606	18.031
	245	7.375	11.465	0.714	19.553		500	5.7	11.725	0.610	18.035
	250	7.525	11.938	0.731	20.194		500	5.7	11.725	0.620	18.045
	0	0	0	0.181	0.181		400	4.56	7.504	0.404	12.468
	0	0	0	0.179	0.179		405	4.617	7.693	0.405	12.715
	0	0	0	0.176	0.176		410	4.674	7.884	0.41	12.968
	0	0	0	0.188	0.188		415	4.731	8.077	0.418	13.226
	0	0	0	0.189	0.189		420	4.788	8.270	0.421	13.479
0	0	0	0.190	0.190	425	4.845	8.470	0.426	13.741		
0	0	0	0.191	0.191	430	4.902	8.670	0.431	14.003		
0	0	0	0.202	0.202	435	4.959	8.870	0.443	14.272		
0	0	0	0.195	0.195	440	5.016	9.080	0.444	14.54		
0	0	0	0.199	0.199	445	5.073	9.287	0.446	14.806		
0	0	0	0.200	0.200	450	5.13	9.497	0.451	15.078		
180	5.418	6.188	0.359	11.966	0	0	0	0.077	0.077		
185	5.569	6.537	0.378	12.483	0	0	0	0.087	0.087		
190	5.719	6.895	0.386	13.000	0	0	0	0.088	0.088		
195	5.87	7.263	0.387	13.52	0	0	0	0.089	0.089		
200	6.02	7.64	0.409	14.069	0	0	0	0.096	0.096		
205	6.171	8.027	0.413	14.610	0	0	0	0.091	0.091		
210	6.321	8.423	0.441	15.185	0	0	0	0.111	0.111		
215	6.472	8.829	0.442	15.743	0	0	0	0.098	0.098		
220	6.622	9.244	0.449	16.315	0	0	0	0.104	0.104		
225	6.773	9.67	0.453	16.895	0	0	0	0.100	0.1		
230	6.923	10.1	0.469	17.496	0	0	0	0.108	0.108		

Tableau III-5 Nouveaux scénarii des prélèvements des forages F4 et F5

Les résultats de toutes ces simulations ont été intégrés dans un modèle de réseau de neurones artificiel créé pour prédire les débits optimums de prélèvement dans les forages F4 et F5.

Le Tableau III-6 ci-dessous résume les données d'entrée utilisées dans le modèle RNA.

Paramètres d'entrée (X)	
X1	Rabattement total dans F4 (m)
X2	Rabattement total dans F5 (m)
Paramètres de sortie (Y)	
Y1	Débit de prélèvement de F4 (m ³ /h)
Y2	Débit de prélèvement de F5 (m ³ /h)

Tableau III-6 Données d'entrée du modèle RNA

Plus de 1079 réseaux ont été testés. Le meilleur réseau RNA trouvé est un model MLP de 3 couches (Figure III-27), couche d'entrée, couche cachée avec 8 nœuds. Le modèle a une bonne performance avec un ratio de régression de 0.048760, le coefficient de corrélation est supérieur à 99.88% pour l'entraînement, à 99.9% pour la vérification et à 99.8% pour le test, ce qui montre un excellent accord entre les concentrations en nitrates réelles observées et celles prédites (Figure III-28).

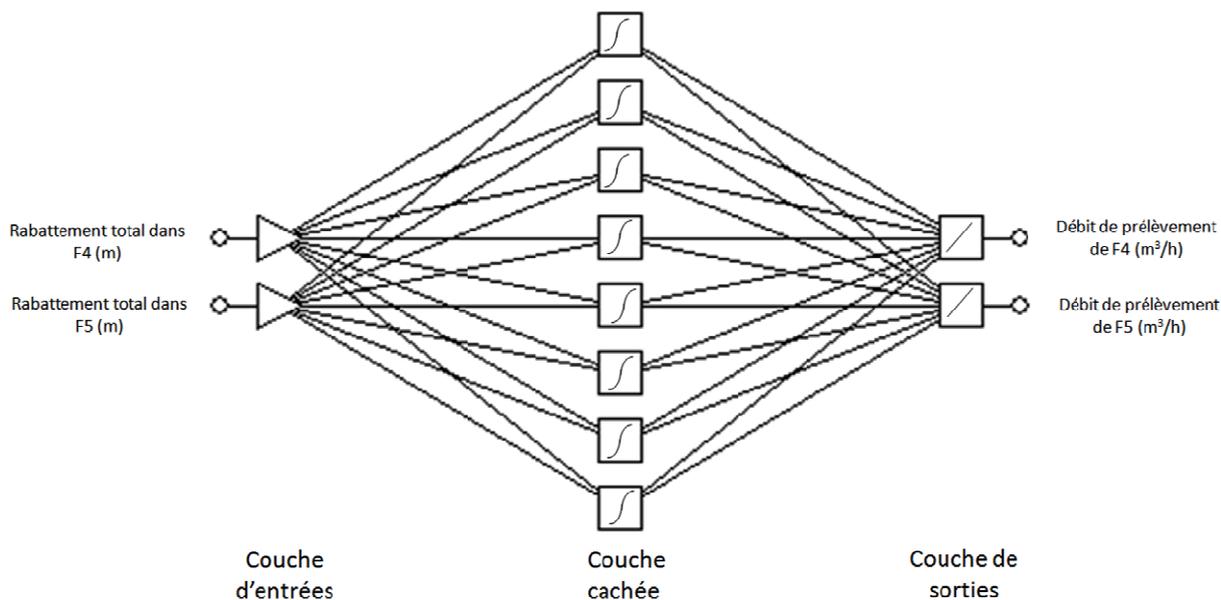


Figure III-27 Représentation d'un perceptron à une couche cachée pour la prédiction des débits optimums de prélèvements de F4 et F5, Propagation avant (feedforward)

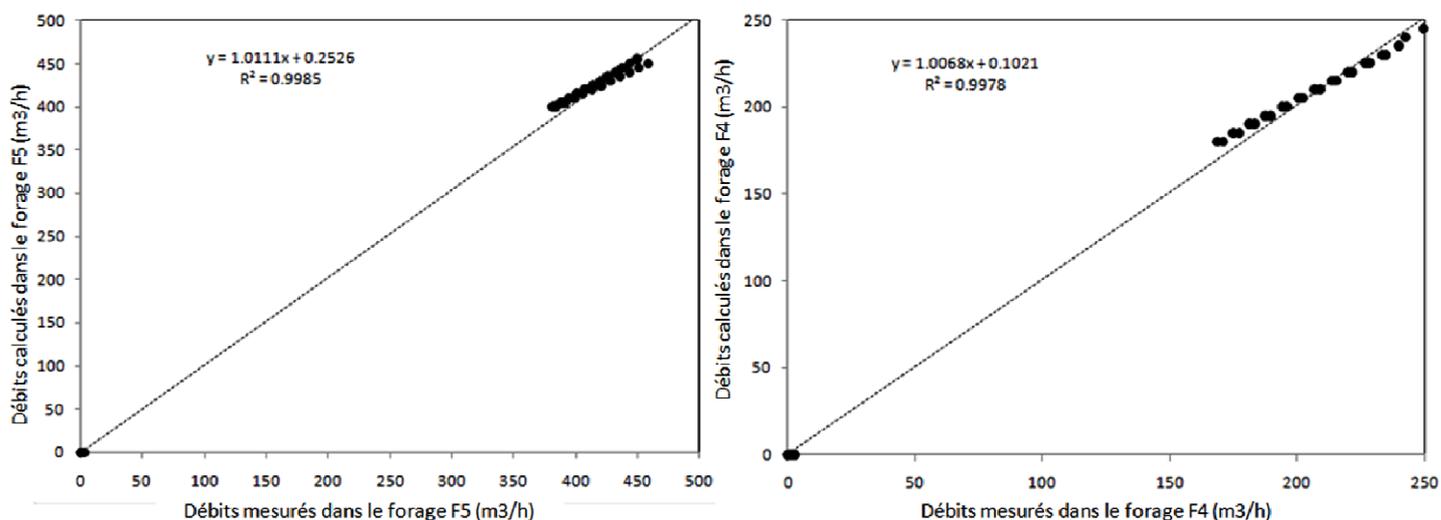


Figure III-28 Régression linéaire entre les débits mesurés et calculés par le modèle RNA

Le calcul du taux exact des prélèvements nécessite la connaissance des rabattements précis possibles dans les deux puits F4 et F5. Le logiciel ArcGIS a été utilisé pour identifier les valeurs précises des charges hydrauliques qui présentent les rabattements possibles et par conséquent les débits de pompage associés. La charge hydraulique au cours d'une année déficitaire (Figure III-29) est de 16,89 m dans F4 et de 17,51 m dans F5. De même, au cours d'une année pluvieuse (Figure III-30), elle est de 18,92 m dans F4 et de 19,00 m dans F5.

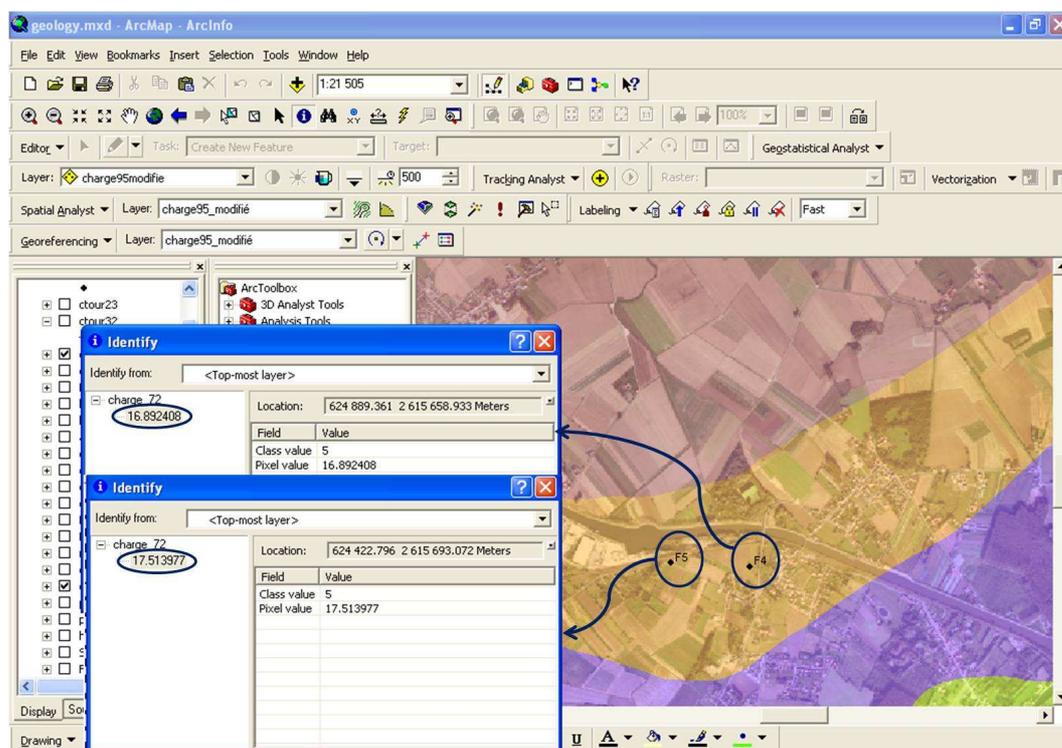


Figure III-29 Charge de la nappe de la craie sous la couverture argileuse pour une année pluvieuse (150 mm/an)

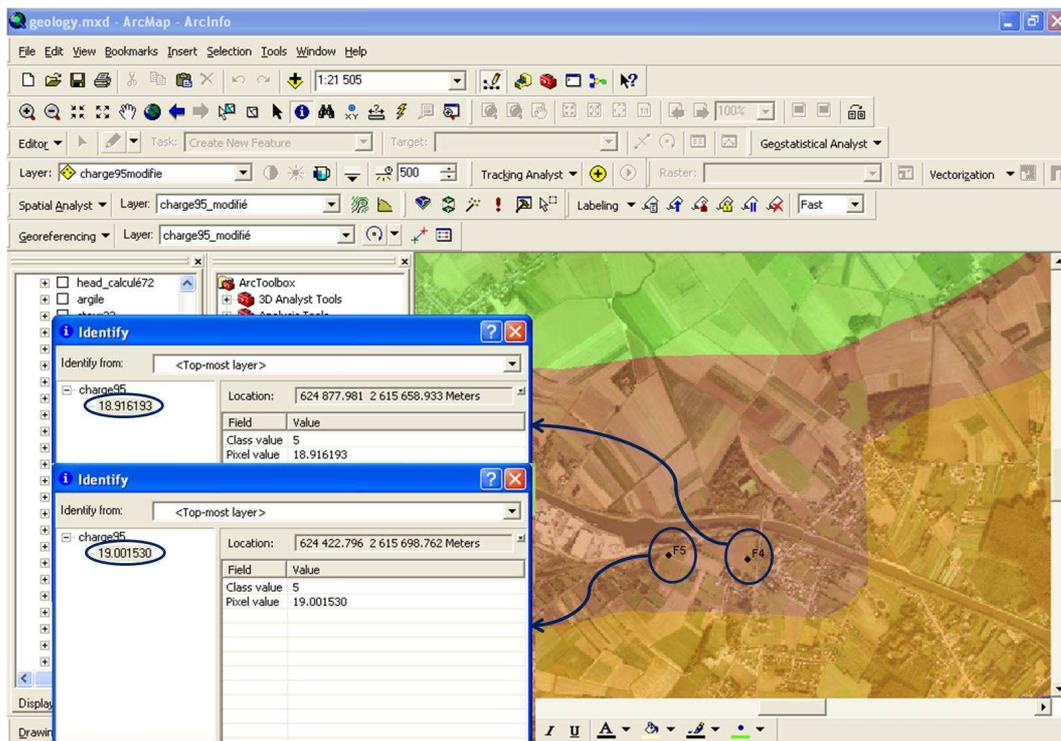


Figure III-30 Charge de la nappe de la craie sous la couverture argileuse pour une année pluvieuse (400 mm/an)

Les valeurs des rabattements ont été introduites dans le modèle RNA afin de calculer le taux de pompage correspondant à ces rabattements. Le Tableau III-7 montre plusieurs scénarii et les débits de pompage maximum calculés.

Recharge (mm/an)	Rabattement (m)	Rabattement (m)	Débit (m ³ /h)	Débit (m ³ /h)
150	16.89	17.51	219.94	504.49
400	18.92	19.00	240.24	534.06
150	16.89	0.00	228.16	0
150	0.00	17.51	0.00	525.87
400	18.92	0.00	250.30	0
400	0.00	19.00	0	565.35

Tableau III-7 Scénarios des débits de pompages calculés par le modèle RNA

Par conséquent, au cours d'une année sèche, des rabattements inférieurs à 16,89 m en F4 et à 17,51 m en F5 permettent de préserver la nappe captive. Le Tableau III-7 démontre que le débit maximum d'exploitation est de 219,94 m³/h à partir de F4 et de 504,49 m³/h dans F5. Par contre, au cours d'une année humide, compte tenu des rabattements de 18,92 m dans le forage F4 et de 19,00 m dans le F5, les débits correspondants sont respectivement de

240,24 m³/h et de 534.06 m³/h en F4 et F5. Parallèlement, dans le cas d'un pompage dans un forage unique, le prélèvement pourrait atteindre un débit de 228,16 m³/h dans le F4 ou de 525,87 m³/h dans le F5 au cours d'une année sèche. De la même manière, au cours d'une année humide, le débit de pompage serait en F4 ou en F5 respectivement de 250,30 m³/h ou 565,35 m³/h.

Conclusion

La concentration élevée en nitrate du secteur Lens Liévin a nécessité la recherche d'une nouvelle ressource en eau. La nappe de la craie de Béthune présente des caractéristiques très favorables à l'implantation de nouveaux captages. La présence de formations argileuses et sableuses recouvrant l'aquifère de la craie, provoque la mise en captivité de la nappe de la craie et par conséquent l'existence du phénomène de dépollution naturelle des nitrates, la dénitrification. Une meilleure gestion de l'eau dans l'aquifère crayeux du secteur de Béthune nécessite des outils d'aide à la décision. C'est dans cet objectif qu'une méthodologie de gestion des eaux souterraines basées sur le couplage entre les SIG (ArcGIS 9.3.1), la modélisation hydrogéologique introduit dans le code Modflow et le RNA a été présentée. Ce modèle a permis de profiter à la fois de la grande capacité des SIG pour manipuler des données spatiales et non spatiales, de la méthode simple et puissante du code Modflow et de l'aptitude élevée des réseaux de neurones artificiels dans la prévision.

Le SIG a fourni une aide importante dans la création et la gestion de bases de données spatiales pour préparer les données d'entrées pour plusieurs paramètres du modèle des eaux souterraines Modflow et pour afficher les données de sortie du modèle (ex, cartes piézométriques). En outre, des cartes du SIG ont été intégrées dans le logiciel Visual Modflow, ce qui a permis la mise en place d'un modèle hydrodynamique d'une manière plus facile et plus efficace.

Les simulations hydrogéologiques ont été utilisées pour analyser les variations des niveaux d'eau afin de déterminer les débits d'exploitation possibles de deux puits de pompage situés dans la nappe captive de Béthune (F4 et F5). Le (RNA) est utilisé comme un outil d'optimisation pour prédire les débits d'exploitation optimaux qui permettent d'alimenter le bassin minier tout en préservant l'hydrosystème et sa capacité de dénitrification.

Les contributions de cette analyse hydrogéologique peuvent facilement être utilisées dans le Nord de la France ou dans n'importe quel aquifère aux propriétés similaires. L'intégration du SIG, la modélisation des eaux souterraines et du RNA dans un système d'aide à la décision est

donc une contribution pour aider les décideurs dans la gestion durable des eaux souterraines et pour l'approvisionnement en eau potable de bonne qualité des populations.

Chapitre IV : Couplage du SIG, des Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) et du modèle numérique (MT3D) pour la prédiction spatiale de la concentration en nitrates dans les eaux souterraines

Introduction

Les modèles numériques dispersifs s'appuient sur des équations mathématiques complexes. Leur utilisation nécessite l'acquisition de nombreuses données d'entrée. Le couplage des résultats obtenus grâce à l'utilisation conjointe du RNA et des SIG a permis de créer des cartes de la distribution spatiale en nitrates à différentes échelles temporelles et de prédire la répartition spatiale de la pollution en nitrates dans les eaux souterraines. Le nombre de données disponibles a permis la création d'un modèle numérique hydrodynamique et hydrodispersif selon le code MT3D. La comparaison des résultats obtenus par ces deux approches permet de valider les résultats obtenus par les réseaux de neurones artificiels. Les résultats de cette recherche pourraient être utiles à des fins de gestion de la pollution par les nitrates dans les eaux souterraines.

IV.1. Littérature RNA et SIG

Pour prévenir ou réduire les pollutions, il est nécessaire d'élaborer des méthodes appropriées pour investiguer avec succès les différents risques de contamination dont l'identification permettra de bâtir une stratégie de protection des ressources en eau.

Les modèles numériques 3D sont des outils de plus en plus utilisés ; ils représentent une approximation de la réalité et simulent l'écoulement des eaux souterraines et les transports de solutés dans le temps (De Marsily, 1981 ; Hamilton, 1982 ; Anderson et Woessner, 1992; Konikow et Reilly, 1998). Leur élaboration est souvent ardue car elle nécessite un grand nombre de données dont certaines sont difficiles à obtenir et d'autres dont les valeurs sont soumises à des variations notables entre l'échelle du laboratoire et celle du terrain. Les modèles à réseau de neurones peuvent être une alternative intéressante quand les données indispensables aux modèles numériques sont parcimonieuses et quand les phénomènes à modéliser sont non linéaires.

L'essor important durant ces 30 dernières années des réseaux de neurones artificiels montre les avantages de ces modèles en tant qu'un approximateur universel. Ils ont la capacité de représenter tout type de dépendance fonctionnelle. De plus ces modèles de type "boîte noire" sont simples à utiliser. Le RNA a été largement utilisé pour la simulation et la prédiction de la qualité des eaux (Aguilera, *et al.*, 2001; Kralisch, Fink, et Flügel, 2003; Daliakopoulos, *et al.*, 2005).

Des études ont été menées sur la prédiction des nitrates dans les eaux souterraines par le biais de RNA (Almasri et Kaluarachchi, 2005a ; Almasri et Kaluarachchi, 2005b ; Wang, *et al.*, 2006 ; Yesilnacar, *et al.*, 2007).

D' autre part, le SIG constitue un outil performant en matière de modélisation et de gestion des données spatiales de phénomènes naturels observés. La création des cartes par le SIG peut être utilisée comme un élément d'aide à la décision en matière de gestion de l'eau (Voir Chapitre I). En fait, les SIG sont devenus un moyen de plus en plus important (Burrough et Mcdonnell, 1998) pour la compréhension et le traitement des problèmes concernant le domaine de l'eau et sa gestion (Darwishe, *et al.*, 2009, 2010 ; Chaaban, *et al.*, 2010, 2011).

IV.2. Méthodologie

La méthodologie suivie (Figure IV-1) consiste à l'utilisation conjointe du RNA et du SIG, comparé et validée par un modèle de transport en nitrate (MT3D), pour la prédiction spatiale de la pollution en nitrates des eaux souterraines de la nappe de la craie à Béthune.

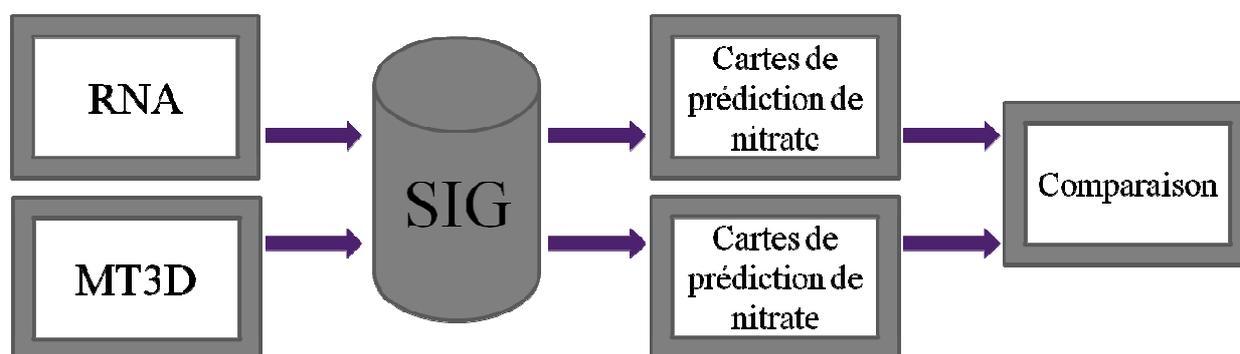


Figure IV-1 Méthodologie suivie

Tout d'abord, un modèle de réseau de neurones artificiels a été implémenté. Selon la localisation géographique, trois types de zone ont été définis : une zone où la nappe est captive, une deuxième zone où elle est libre (concentration supérieure à la concentration maximale admissible de 50 mg/L) et une troisième zone caractérisée par la limite de captivité. Les échantillons provenant de 14 piézomètres (Figure IV-2) ont été analysés pendant 5 ans, de l'année 1999 jusqu'à 2003. Les paramètres, d'obtention aisée comme la localisation géographique (X, Y), le type d'aquifère, la date de l'observation, la recharge et la classe de la concentration en nitrates ont été utilisés comme des paramètres d'entrée du modèle.

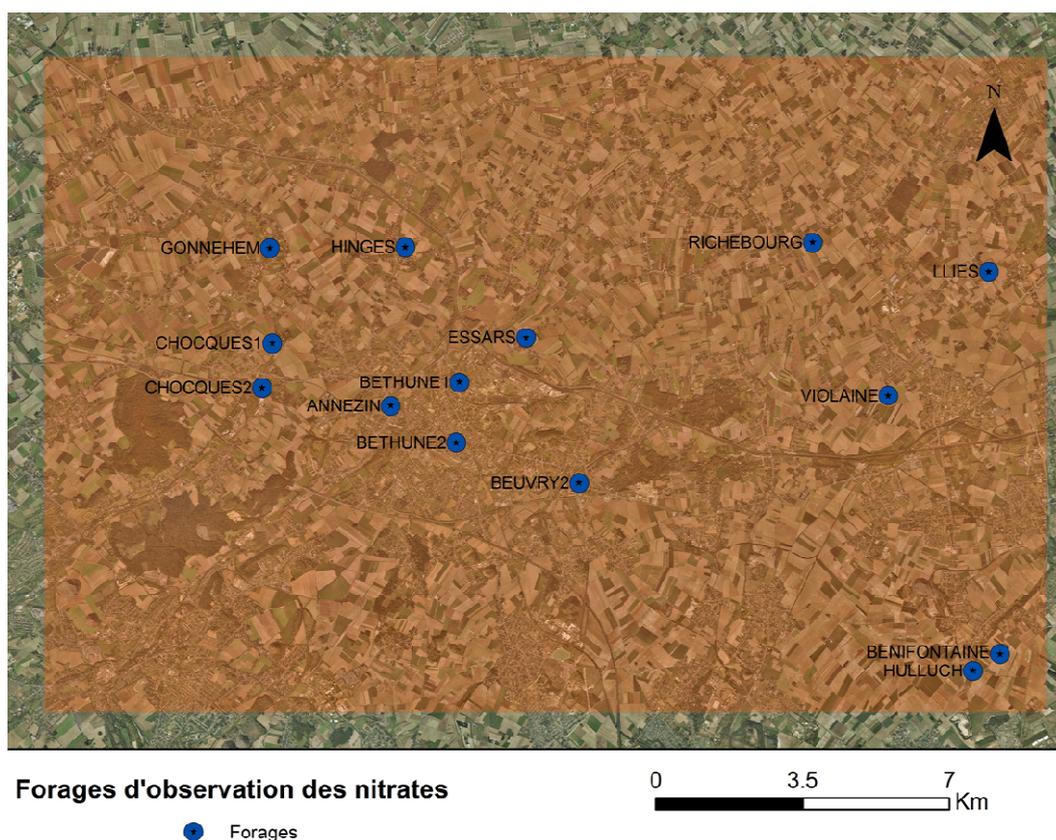


Figure IV-2 Forages d’observation des concentrations en nitrate dans la zone d’étude

Plus de 1000 réseaux ont été testés pour chacun de ces modèles, plusieurs types de réseaux MLP (Multilayer Perceptron) (3 et 4 couches), RBF (Radial Basis Function), GRNN (General Regression Neural Network), et linéaire ont été examinées et comparées en termes de prédiction du modèle d'efficacité et de précision. Les vecteurs de sorties de RNA ont été exportées vers le logiciel de ArcGIS 9.3.1. Les cartes de concentrations en nitrates ont été créées tout d’abord pour des années passées comme l’année 2003 et 2004 afin de comparer les concentrations prédites et mesurées. Ensuite le SIG a été utilisé dans la préparation et le traitement des données de sorties du RNA et dans la construction des cartes spatiales de prévision en concentration de nitrate, pour les années à venir, en l’occurrence l’année 2025. Ensuite, un modèle numérique hydrodispersif a été réalisé avec le code MT3D, en s’appuyant sur les données de concentrations provenant des mêmes 14 piézomètres (Figure IV-2). Les sorties du modèle ont été exportées vers ArcGIS et les cartes des concentrations en nitrate ont été créés et comparées avec les résultats du modèle RNA afin de valider ce dernier.

IV.2.1. Le modèle RNA

Les réseaux de neurones artificiels, en tant que modèles mathématiques, ont pour objectif de simuler la capacité du cerveau humain à prédire selon un processus d'apprentissage. (Najjar, Basheer, et Hajmeer, 1997 ; Al-Barqawi et Zayed 2006). Le RNA se compose d'un nombre de neurones artificiels appelés «nœuds» ou «neurones». Le traitement des éléments de réseaux neuronaux artificiels sont généralement organisés en couches: une couche d'entrée, une couche de sortie et une ou plusieurs couches intermédiaires appelées « couches cachées » (Lippmann 1987; Hagan, Demuth, et Beale, 1996). Chaque couche se compose de neurones individuels tels que celui représenté à la (Figure IV-3).

Selon (McCulloch et Pitts, 1943) qui ont proposé le premier modèle formel de neurone. Chaque cellule reçoit des entrées sous forme vectorielle (X), effectue une somme pondérée (S), et génère à l'aide d'une fonction de transfert (f) linéaire ou non, un résultat réel (Y) de la forme : $Y = f(WX + b)$, où $W = (w_{i,1}, w_{i,2}, \dots, w_{i,N})$ sont les poids du neurone i (ou matrice des poids) ; $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ sont les entrées du neurone i (ou vecteur d'entrée) ; b est le biais du neurone ;

$S = (WX + b)$ est la somme pondérée des entrées appelées entrées nettes ou potentiel du neurone i ; f est la fonction de transfert (ou fonction d'activation) du neurone i. Cette fonction peut être une fonction à seuil, linéaire, gaussienne, ou sigmoïde.

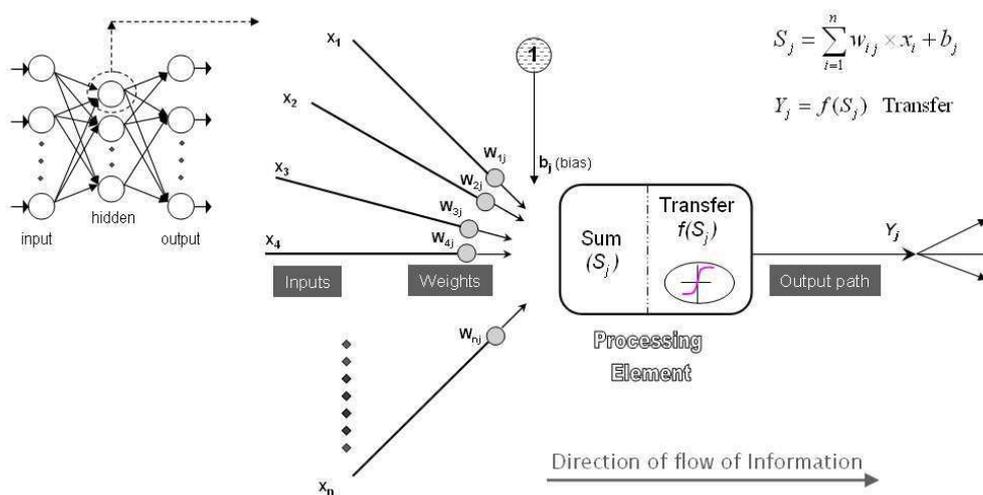


Figure IV-3 Eléments basiques de réseaux de neurones artificiels

Il existe différentes catégories de réseaux de neurones selon l'architecture et l'apprentissage avec deux formes principales de structure : la forme récurrente avec « Feedback » (totalement ou partiellement bouclé) (Kasabov, 1996) et la forme dite « feedforward » (ou le non bouclé).

Ce réseau ne présente aucun « feedback » entre les neurones, il peut être un cas particulier de réseau bouclé où les poids récurrents sont nuls (Giles, Kuhn et Williams 1994).

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. Il consiste en la détermination des poids permettant d'obtenir une sortie proche d'une sortie Y_0 voulue à partir d'une entrée X . Pendant l'apprentissage, une modification itérative des poids est effectuée en général à partir d'un ensemble de données d'entraînement (une mise à jour des poids du réseau). Il existe au moins 23 types de règles d'apprentissage (Hassoum, 1995) qui peuvent être regroupées en trois catégories : les règles d'apprentissage supervisé, non supervisé, et renforcé (Coulibaly, *et al.*, 1999). Les règles d'apprentissage supervisé sont les plus courantes : on veut qu'à une entrée corresponde une sortie préalablement définie, on donne donc des exemples au réseau qui va ajuster, par un algorithme d'apprentissage, ses poids pour minimiser une erreur ; quand l'erreur cible est atteinte le réseau est calé. L'apprentissage non supervisé est moins intuitif ; il correspond au cas où il n'est pas possible d'avoir une base d'apprentissage. On veut construire un réseau dont on ne connaît pas, à priori, la sortie correspondant à des entrées données ; on présente les entrées au réseau et on le laisse évoluer librement jusqu'à ce qu'il se stabilise.

Dans le cas de notre étude, plusieurs types de réseaux (MLP (3 et 4 couches), RBF, GRNN, et linéaire) ont été examinés. Le modèle qui a donné les meilleurs résultats, est un modèle MLP (multi layer perceptron), Perceptron Multicouche, avec une couche cachée.

Le modèle MLP (Figure IV-4) est un réseau feedforward (non bouclé), la méthode d'apprentissage supervisé utilisée est la rétro-propagation du gradient ou propagation arrière.

En général, le type le plus utilisé pour la prévision est le « Perceptron Multicouche à Rétro-propagation de l'Erreur » (Rumelhart, Hinton, et Williams, 1986).

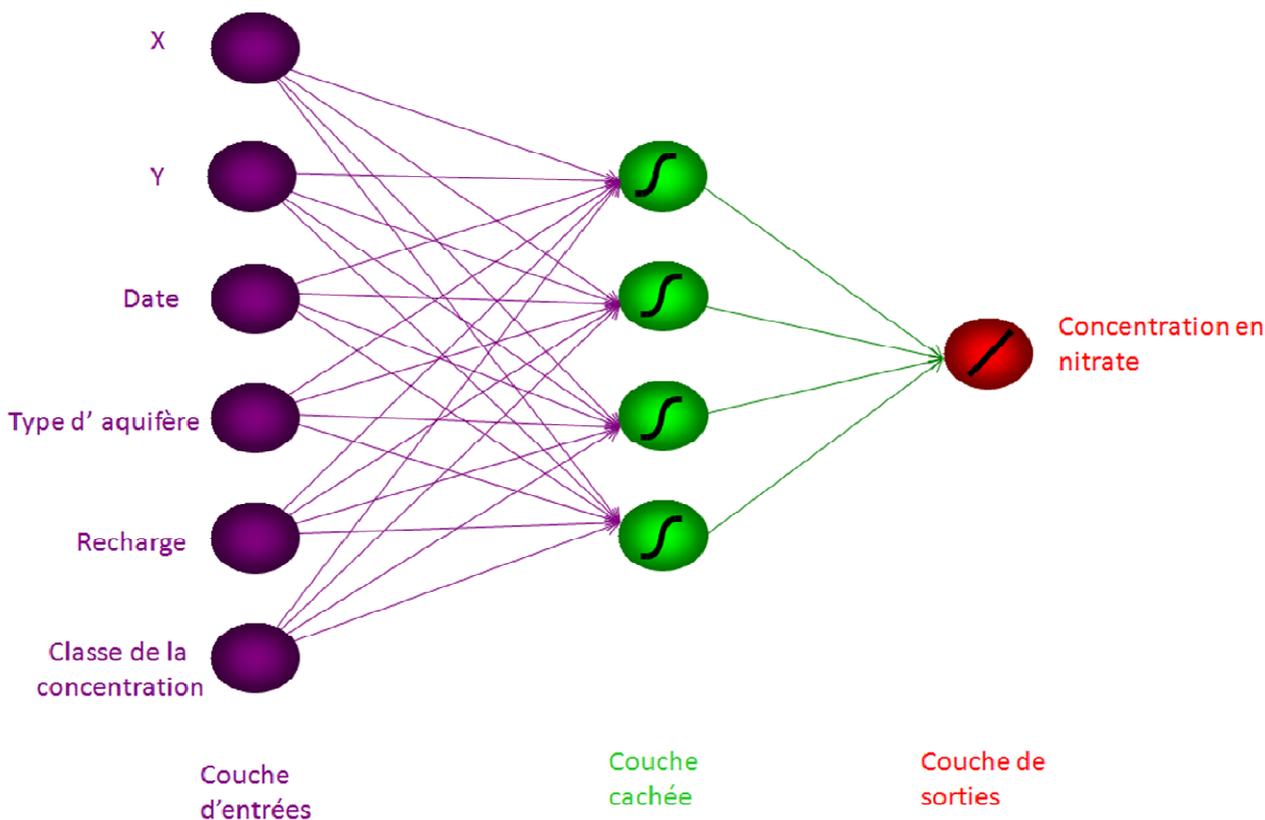


Figure IV-4 Représentation d'un perceptron à une couche cachée pour la prédiction de la concentration en nitrates dans la nappe de Béthune, Propagation avant (feedforward)

Les fonctions d'activation utilisées dans le modèle MLP sont la fonction sigmoïde pour la couche cachée définie par (équation IV-1):

$$f(s) = \frac{1}{1 + e^{-s}} \quad (\text{Équation IV-1})$$

Et une fonction de transfert linéaire pour la couche de sortie.

La fonction sigmoïde possède une propriété simple qui permet d'accélérer le calcul de sa dérivée, ce qui réduit le temps de calcul nécessaire à l'apprentissage d'un réseau de neurones. Certains auteurs (Irie et Miyake, 1988; Hornik, Stinchcombe, et White, 1989; Cybenko, 1989) ont démontré qu'un réseau de neurones ayant une couche cachée et une fonction sigmoïde est un «Approximateur universel», c'est-à-dire qu'il est utilisable pour traiter plusieurs cas de figures.

Le (Tableau IV-1) ci-dessous récapitule l'ensemble de données utilisées dans le modèle RNA:

Paramètres d'entrée (X)	
X1	X (m)
X2	Y (m)
X3	Date de l'observation
X4	Type de l'aquifère (captive, libre ou limite de captivité)
X5	Recharge (mm/an)
X6	Classe selon la concentration de nitrate : Classe 1= (la concentration = 0- 15 mg/l) Classe 2= (la concentration = 16- 50mg/l) Classe 3= (la concentration = 51- 100 mg/l)

Tableau IV-1 Paramètres d'entrée du modèle de réseaux de neurones artificiels.

Les différents paramètres sont :

- la localisation géographique (X, Y)
- la date d'observation
- le type de la nappe. Trois types de zone ont été définis ; une zone où la nappe est captive, une seconde où elle est libre et une troisième caractérisée par la limite de captivité (voir, Figure II-12).
- l'infiltration de la pluie efficace (recharge) (mm/an)
- la classe de concentration en nitrate. Trois classes ont été créées; la classe 1 où la concentration en nitrate varie entre 0 et 15 mg/l, la classe 2 où la concentration est comprise entre 16 jusqu'à 50 mg/l et la classe 3 avec une concentration comprise entre 51 et 100 mg/l.

Le choix de ces paramètres est lié à la facilité de leur obtention. L'infiltration des nitrates et l'épaisseur de la zone non saturée n'ont pas été prise en compte étant donné la difficulté d'obtenir les données associées à ces deux paramètres. De plus, plusieurs programmes ont été lancés en vue de réduire les risques de pollution diffuse des eaux par les nitrates d'origine agricole, comme par exemple le programme «Ferti-Mieux» qui a été lancée en 1991 et qui vise à déterminer la quantité des engrais de sorte que les cultures les consomment totalement (Sebillotte, 1995). Selon ce programme, on a supposé qu'à partir de 1991 il n'y a plus d'infiltration, vers la nappe, de l'excédent en nitrates non consommé par la végétation.

Les deux paramètres, à savoir, l'épaisseur de la zone non saturée et la recharge en nitrates, sont pris en compte implicitement en intégrant le paramètre « Date », de l'année 1999 jusqu'à 2003. Les données disponibles ont été divisées en trois lots distincts. Le premier lot sert à entraîner le réseau de neurone (l'apprentissage). Dans cette phase, les paramètres de connexion du réseau sont déterminés à l'aide d'une technique d'optimisation. Le deuxième lot sert à la phase de test qui consiste à comparer ses valeurs avec celles issues du réseau déterminé lors de la phase d'apprentissage. La phase de validation est effectuée sur le dernier lot de données. Les données sont divisées en trois parties. Environ 52 % de données sont employées pour l'apprentissage, 24 % pour la phase test et 24 % pour la validation.

Plus de 1000 réseaux ont été testés. Le meilleur réseau RNA trouvé est un modèle MLP tricouche (Figure IV-4) : couche d'entrée, couche cachée avec 4 nœuds et une couche de sortie. Le modèle a une bonne performance avec un ratio de régression de 0.1067769. Le coefficient de corrélation est supérieur à 99% pour l'entraînement, 99% pour la vérification et 99% pour le test, ce qui montre un bon accord entre les concentrations en nitrate réelles observées et celles prédites (Figure IV-5).

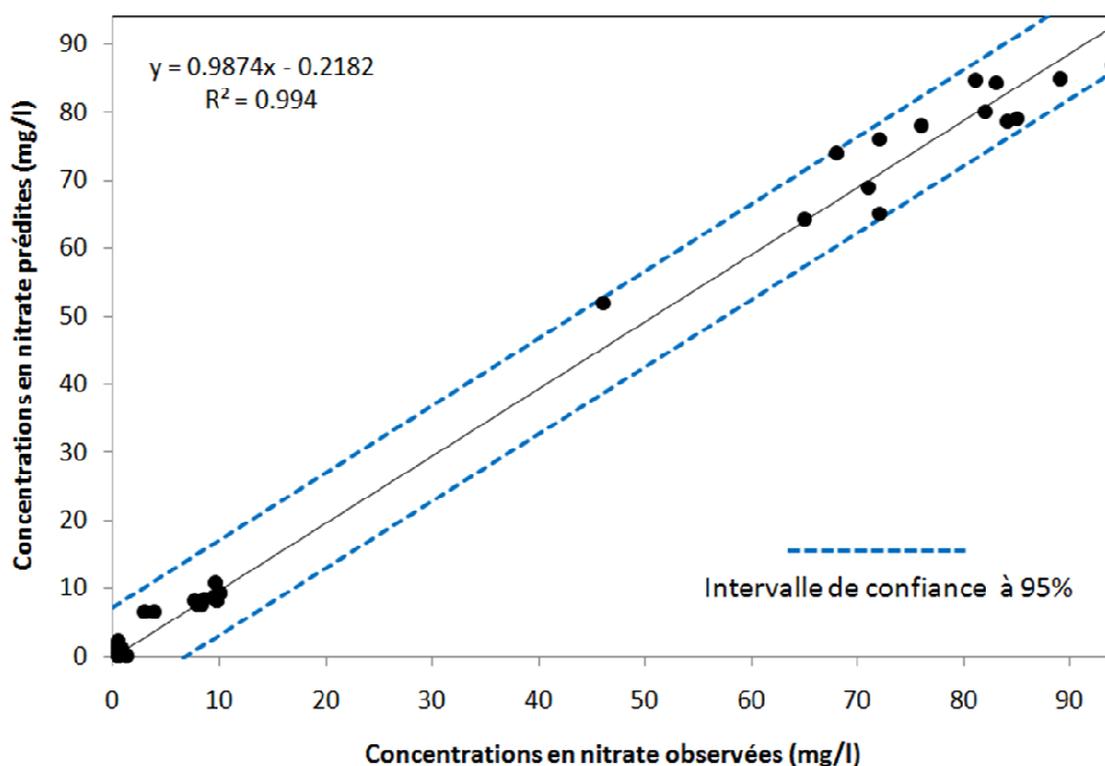


Figure IV-5 Régression linéaire entre la concentration mesurée et celle calculée par le modèle RNA

IV.2.2. Modèle numérique de transport

Pour valider les résultats du modèle de RNA, un modèle numérique hydrodispersif a été réalisé par le code MT3D en s'appuyant sur les résultats du modèle hydrodynamique «Modflow» (Voir Chapitre III). Le code MT3D est un module de transport développé par Zheng (Zheng, 1990).

Ce code fonctionne selon une approche découplée. Ainsi, les données de sortie issues du module d'écoulement Modflow (profil des iso pièzes et calcul des vitesses) sont utilisées comme données d'entrée par les modules de transport MT3D. Le déplacement des nitrates dans la nappe est simulé par résolution en différences finies de l'équation de transport. L'équation de convection-dispersion est utilisée pour décrire le transport des nitrates. Le modèle MT3D utilise une approche mixte Eulérienne-Lagrangienne pour résoudre l'équation du transport (Zheng, 1990).

L'approche Lagrangienne est utilisée pour résoudre le terme convectif de l'équation du transport, alors que l'approche Eulérienne est utilisée pour résoudre les termes de la dispersion. La partie convective est ainsi traitée à l'aide de la méthode du suivi de particules (MOC), Méthode of Characteristics, alors que la partie dispersive est résolue par différences finies. Quelque soit la méthode de transport utilisée dans le modèle MT3D, le résultat des simulations sera directement fonction de la qualité du champ de vitesse issue de Modflow. (Zheng, 1990).

Le modèle hydrodispersif de transport en nitrates a été élaboré en s'appuyant sur les concentrations en nitrates relevées dans 14 forages d'observations (Figure IV-2) pendant 5 ans et sont relatives à la période allant 1999 à 2003. Les concentrations de nitrates dans l'eau qui s'infiltré à travers de la zone non saturée ont été introduites dans MT3D comme une concentration de recharge, avec des valeurs variant entre (18-60) mg/l. tandis que les concentrations initiales de nitrates utilisées au début de la modélisation étaient les données mesurées en 2003. Le modèle de transport de nitrate a été calibré lors de la simulation en régime permanent. La dispersivité longitudinal varie entre 40 et 70 m. La (Figure IV-6) montre un accord entre les concentrations en nitrate réelles observées et celles prédites par le modèle MT3D.

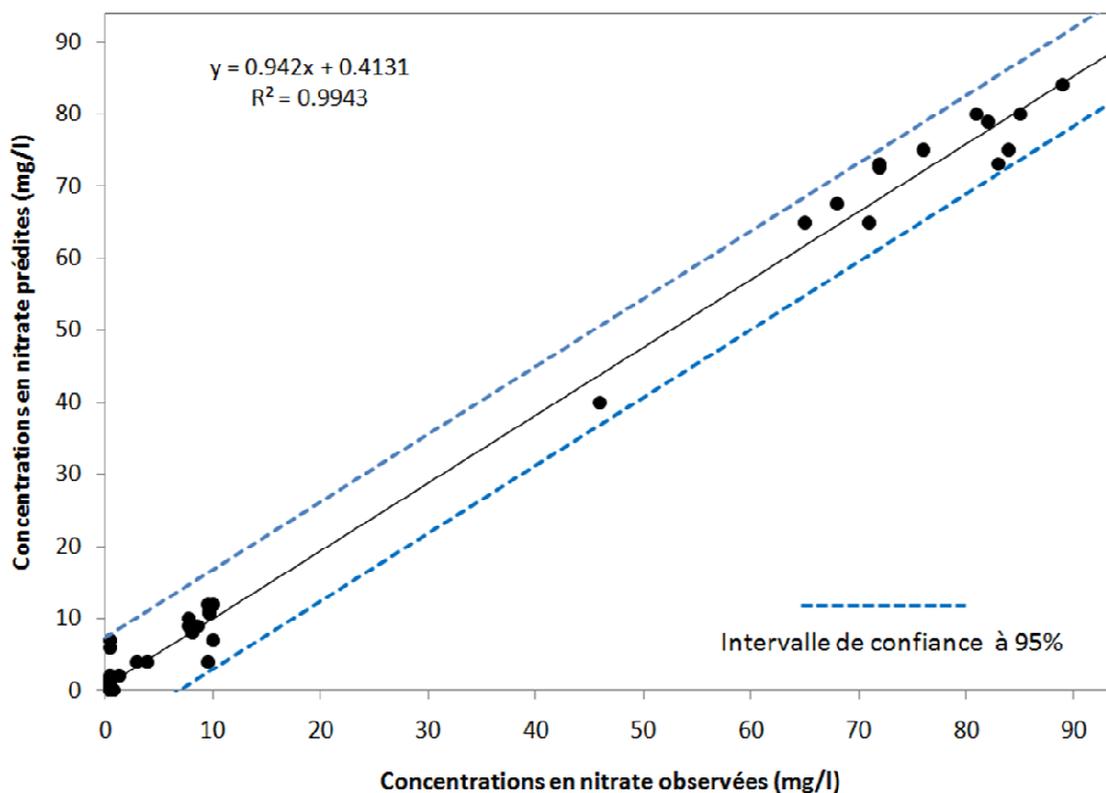


Figure IV-6 Régression linéaire entre la concentration mesurée et celle calculée par le modèle MT3D

IV.3. Résultats et discussion

Les vecteurs de sortie du RNA et les résultats du modèle hydrodispersif sont exportés vers le logiciel d'ArcGIS 9.3.1. Le krigeage a été utilisé comme méthode d'interpolation. La géostatistique est une branche de la statistique appliquée qui met l'accent sur le contexte et les relations spatiales entre les données. Il fournit des outils pour la quantification et l'exploitation d'autocorrélation spatiale, et des algorithmes pour l'interpolation des données et la quantification des incertitudes (Isaaks et Srivastava, 1989) (voir I.4 Méthode optimale d'interpolation).

Les cartes de concentrations en nitrates mesurées ont été élaborées selon la méthode du krigeage ordinaire (Cressie, 1986, 1990), tout d'abord pour des années antérieures comme l'année 2003 et 2004, puis comparées avec les concentrations prédites selon le modèle RNA et le modèle hydrodispersif (Figure IV-7) à titre de validation.

La lecture de la (Figure IV-7) nous montre visuellement la ressemblance entre les cartes de concentration mesurées et calculées par RNA et MT3D pour les années 2003 et 2004. La fourchette des valeurs des concentrations réelles mesurées dans les forages d'observations a

augmenté de 0-83 mg/l en 2003 à 0-91.7 mg/l en 2004. La concentration en nitrate calculée en 2003 par RNA couvre une fourchette de valeurs surestimées entre 0 et 86 mg/l, alors que le modèle MT3D a donné des valeurs sous-estimées entre 0 et 80 mg/l. Par contre, les concentrations en nitrate calculées en 2004 par le modèle RNA et par le modèle MT3D sont sous-estimées.

Dans le but de décrire ces cartes précisément, on doit montrer bien les ressemblances et les différences en créant des cartes de différences entre les concentrations observées et celles calculées par les deux modèles. Pour ce faire, on a utilisé la fonction «raster calculator», un outil intégré dans le logiciel ArcGIS qui permet de créer et d'exécuter des expressions d'algèbre de carte. La (Figure IV-8) nous montre que le modèle du RNA a donné des concentrations avec une différence entre (-3.67-1.24) pour l'année 2003 et entre (-10.8-6.51) pour l'année 2004, par contre le modèle MT3D donne des valeurs plus importants de différence, par exemple en 2003 la différence des concentrations mesurées et calculées varient entre (-11.5-17.9) et entre (-9.91-16.9) pour l'année 2004.

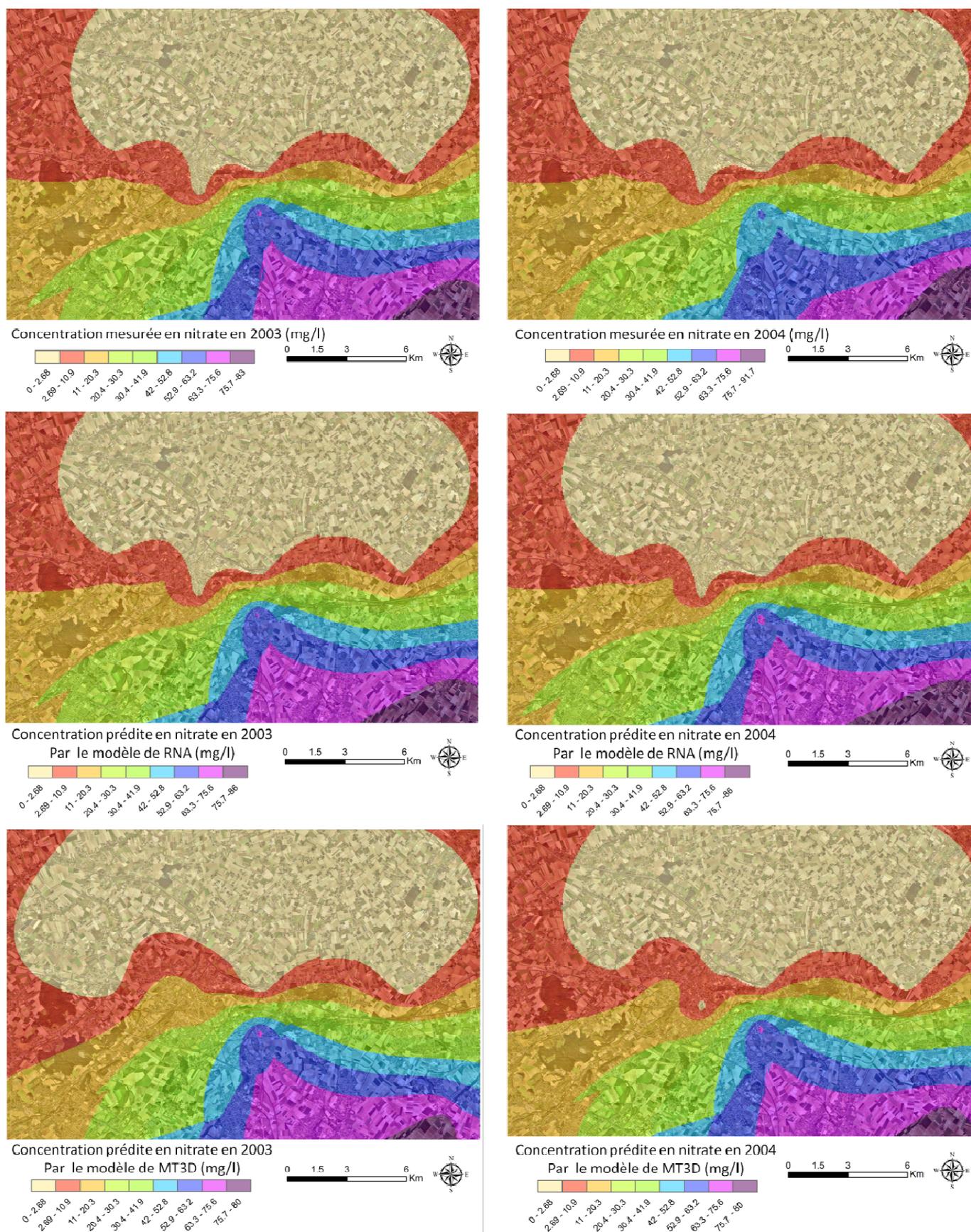


Figure IV-7 Comparaison de la concentration en nitrates (mg/l) mesurée et prédite selon le modèle (RNA et MT3D) pour les années 2003 et 2004

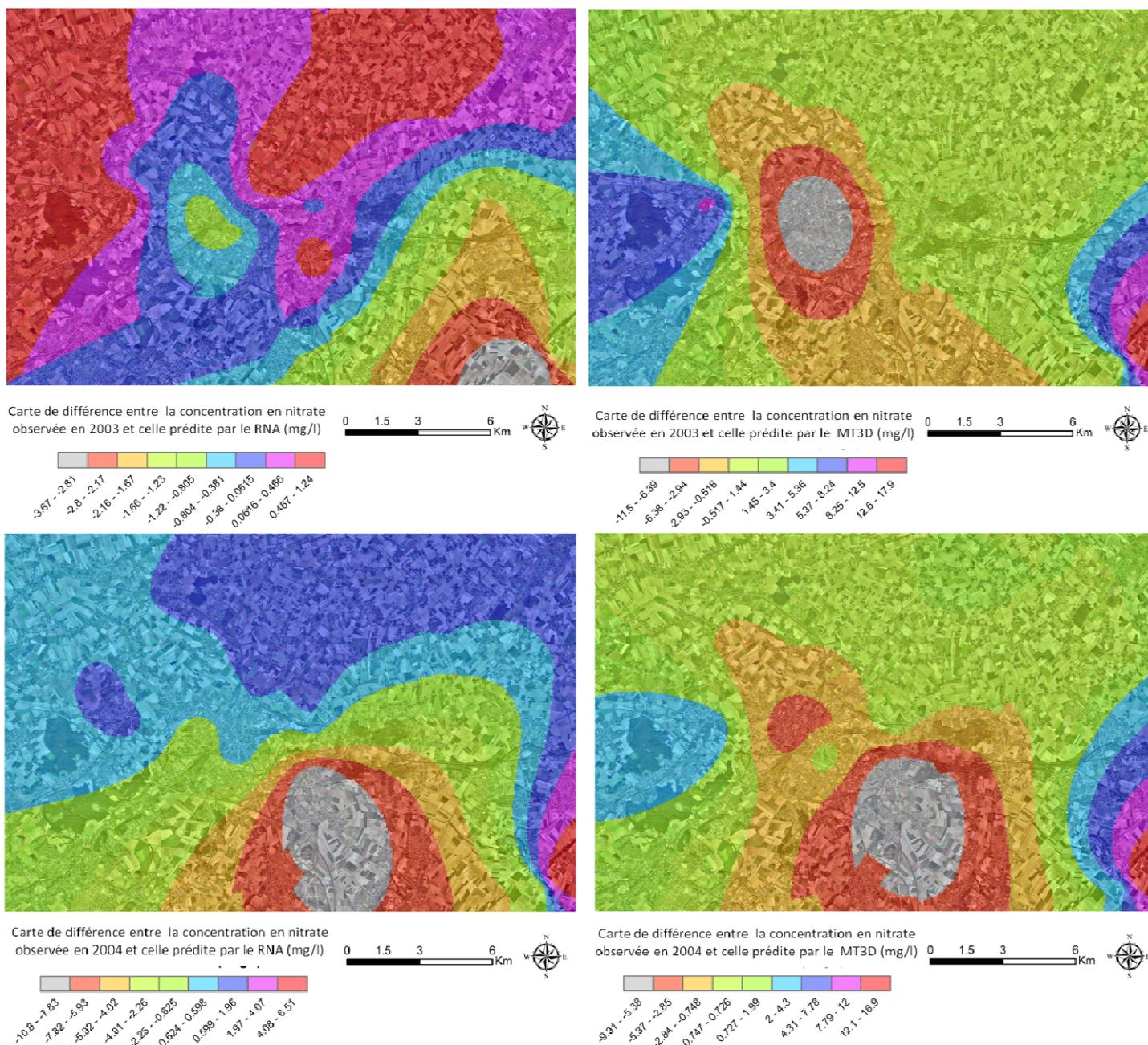


Figure IV-8 Cartes de différence de la concentration en nitrates (mg/l) mesurée et prédite selon le modèle (RNA et MT3D) pour les années 2003 et 2004

Les cartes de répartition de la concentration en nitrates obtenues par le modèle de RNA sont plus proches des cartes des concentrations mesurées. La différence maximum entre les concentrations mesurées et calculées par RNA est de 3.67 mg/l en 2003 et de 10.8 mg/l en 2004. Cette erreur maximum se trouve surtout dans les zones où l'on ne dispose pas d'échantillons. Il est raisonnablement permis de valider et, donc, d'accepter la démarche adoptée. Dans l'étape suivante, des cartes de prévisions, comme par exemple pour l'année 2025, ont été élaborées. Plusieurs scénarios ont été effectués pour prédire la concentration en

nitrates pour l'année 2025. On a supposé dans le premier scénario que l'année 2025 est une année déficitaire avec une recharge de 150 mm/an. Le second scénario envisage que l'année 2025 est une année pluvieuse, avec une recharge de 500 mm/an. Les cartes de concentration en nitrates ont été créées dans ArcGIS pour les deux scénarios (Figure IV-9).

La comparaison entre les deux cartes nous indique que les concentrations en nitrate sont inversement proportionnelles avec la recharge, les concentrations en nitrates changent entre 0 et 84 mg/l avec une recharge de 150 mm/an alors qu'elles varient entre 0 et 80 pour une recharge de 500 mm/an.

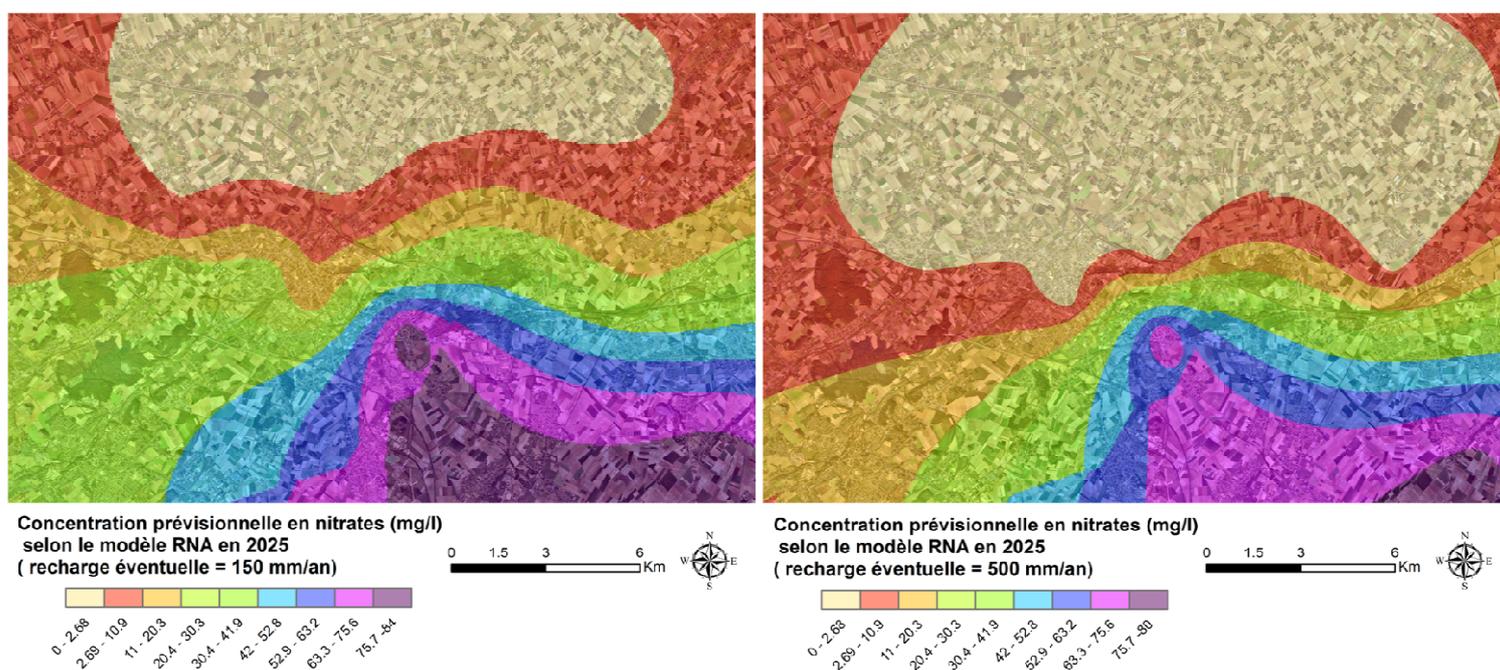


Figure IV-9 Concentration prévisionnelle en nitrates (mg/l) selon le modèle RNA pour l'année 2025 avec une recharge éventuelle de 150 et 500 mm/an

Afin de pouvoir évaluer l'impact de la variation de la recharge sur la distribution spatiale de la concentration en nitrates, trois zones ont été créées dans ArcGIS 9.3.1, à partir des cartes prévisionnelles (Figure IV-9) obtenues avec le modèle de RNA, et ceci pour les deux scénarios. La première zone correspond à une concentration en nitrates comprise entre 0 et 15 mg/l, la deuxième de 16 jusqu'à 50 mg/l et la dernière à plus de 50 mg/l (Figure VI-10).

La lecture de ces cartes montre que la recharge joue un rôle majeur dans la distribution spatiale de la concentration en nitrates. En effet, la limite autorisée pour l'eau potable (norme: 50 mg/l ; Décret n°2001-1220 du 20 décembre 2001) va progresser vers le nord en cas de faible précipitation (Figure VI-11). Cela s'explique par l'abaissement du niveau de l'eau souterraine et en conséquence, une partie de l'aquifère passe d'un état captif à libre.

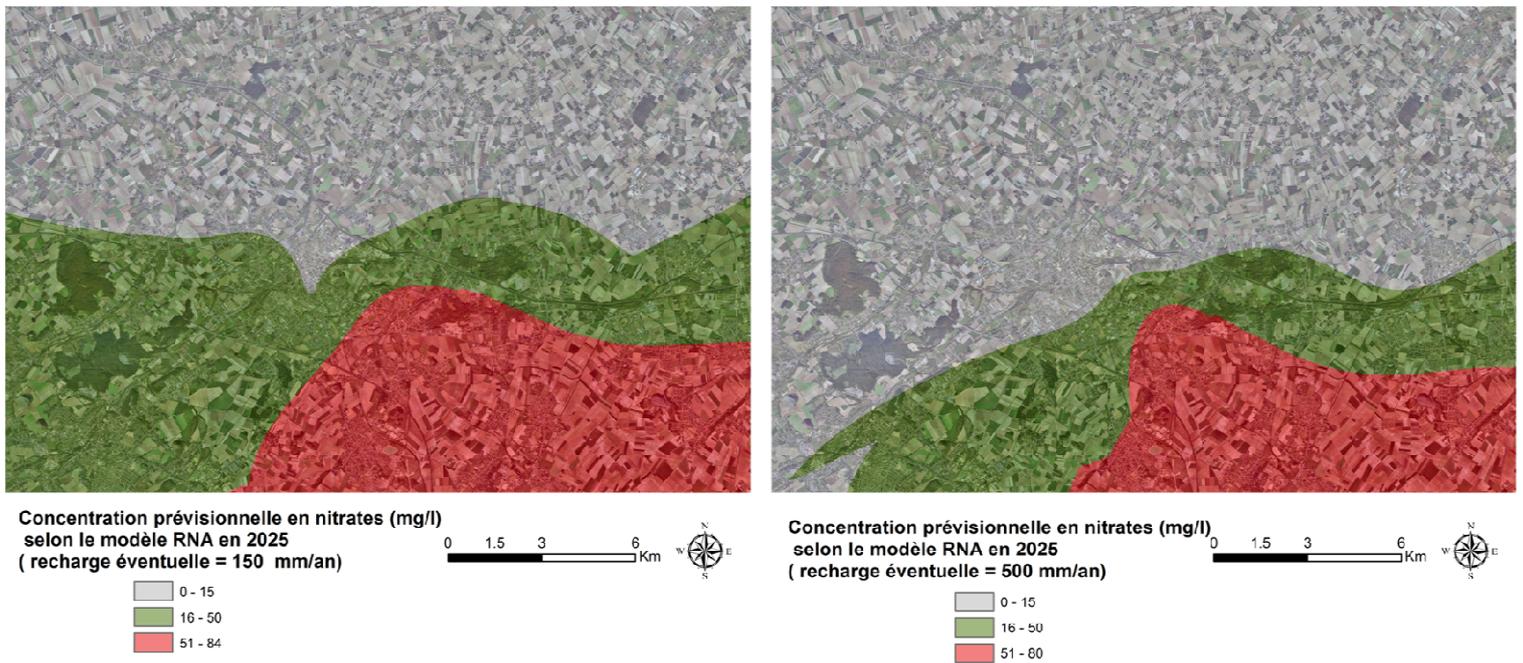


Figure IV-10 Comparaison de la distribution spatiale de la concentration prévisionnelle en nitrates (mg/l) selon le modèle RNA pour l'année 2025 en fonction de la pluviométrie.

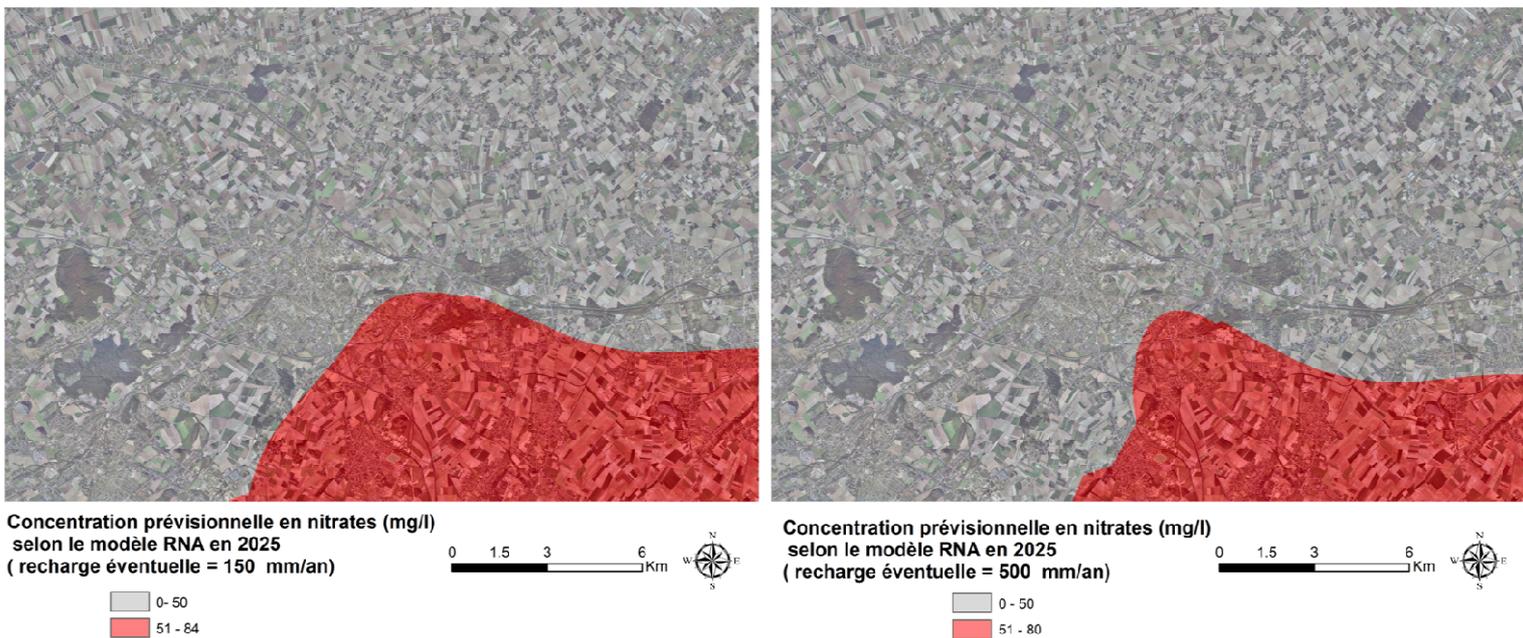


Figure IV-11 Comparaison de la distribution spatiale de la concentration prévisionnelle en nitrates (mg/l) selon le modèle RNA pour l'année 2025 en fonction de la pluviométrie.

Une comparaison de la distribution en nitrates en fonction des deux scénarios pluviométriques (Figure IV-12) montre qu'il existe une zone qui peut être exploitée si l'année 2025 est pluvieuse alors que cette zone n'est pas exploitable si la recharge est faible, à cause du dépassement du seuil de potabilité de la concentration en nitrates (50 mg/l). La nappe de la craie va, dans cette zone, passer d'un état captif à un état libre empêchant le processus de dénitrification naturelle.



Légende

- La limite de 50 mg/l pendant une année déficitaire
- La limite de 50 mg/l pendant une année pluvieuse

0 1.5 3 6 Km



Figure IV-12 Variation géographique de la limite de 50 mg/l de nitrates entre une année déficitaire et une année pluvieuse

Néanmoins, il convient d'attirer l'attention sur un phénomène provoquant une augmentation temporaire de la concentration en nitrate, phénomène lié à un effet de «chasse». En nappe libre, en augmentant la recharge, le modèle considère une plus grande dilution engendrant une diminution de la concentration. Mais, il existe un autre phénomène que ne prend pas en compte le modèle, à savoir l'effet piston. Une augmentation de la recharge par les pluies génère, dans la zone non saturée, un effet de « chasse » des nitrates en train de migrer vers la nappe. Ceci engendre une augmentation de la concentration des nitrates en zone saturée. En nappe captive, l'augmentation de la recharge qui affecte la partie libre de la nappe au Sud, va provoquer une avancée de la limite de captivité vers le Sud, tant qu'il y aura une couverture imperméable existante. La zone de dénitrification va donc s'étendre.

Conclusion

Pour prédire la distribution spatiale de la concentration en nitrates du secteur de Béthune (Pas-de-Calais, France), où l'aquifère est en partie captif et en partie libre, un modèle de réseau de neurone artificiel a été développé. La localisation géographique, la date de l'observation, le type d'aquifère, la recharge et la classe de concentration en nitrates ont été choisis comme vecteurs d'entrée du modèle. Le meilleur réseau RNA approprié est un modèle MLP de 3 couches (perceptron multicouches à rétro-propagation de l'erreur). La performance optimale est obtenue avec un coefficient de régression de 0.1067769 et une architecture 6-4-1. L'intérêt des modèles de réseaux de neurones artificiels réside dans leur capacité d'apprendre des relations complexes à partir de données numériques. Le RNA est considéré comme un des outils très puissants de modélisation prédictive et permet la simulation de phénomènes non linéaires. Le RNA est utilisé ici comme un outil de prédiction pour l'exploration et la modélisation des concentrations en nitrates en fonction du temps. Les SIG constituent un moyen de visualisation des données très performant, ce qui améliore la compréhension et en conséquence la prise de bonnes décisions en matière de gestion de l'eau souterraine. Une simple combinaison du RNA-SIG validée par un modèle numérique hydrodispersif peut être considérée comme un outil rentable pour la prédiction et la gestion de la pollution par les nitrates des eaux souterraines. Ce modèle a permis de présenter des cartes prédictives de concentrations en nitrates, en cohérence avec le fonctionnement de l'aquifère. Les cartes obtenues peuvent être considérées comme des outils d'aide à la décision en matière de gestion durable de la ressource en eau souterraine.

Chapitre V : Création d'un outil utilisateur en VBA sous ArcGIS
en vue de consulter les données d'entrées et de sorties de la
modélisation : Modflow, MT3D et RNA

Introduction

Dans ce chapitre, le travail de développement s'est articulé essentiellement autour de la création d'un outil utilisateur dans le logiciel ArcGIS 9.3.1 en VBA (*Visual Basic for Applications*). Cet outil nommé *Ground Water Modelling Viewer* (GWMV) a été développé dans le cadre de la gestion hydrogéologique sous SIG de l'aquifère de Béthune. L'objectif était de créer un applicatif métier permettant la visualisation et la gestion des informations spatialisées utilisées dans le cadre d'une étude hydrogéologique basée sur l'articulation de 3 modèles de traitement numérique : Modflow (modèle hydrodynamique), MT3D (modèle hydrodispersif) et RNA (modèle prédictif à base de Réseau de Neurones Artificiels). Cet outil directement accessible sous ArcMap permet à l'utilisateur final ne disposant pas de compétences géomatiques poussées d'accéder d'une part aux résultats et étapes intermédiaires de la modélisation hydrogéologique et, d'autre part, à un catalogue de données historiques sur l'évolution du comportement hydrogéologique d'un aquifère.

V.1. Interfaces et développement sous ArcGIS

Les interfaces dans ArcGIS peuvent être développées par un kit de développement *ArcObjects* qui est une plate-forme de la famille des applications ArcGIS. Elle est construite à l'aide du modèle objet «COM» (*Component Object Model*) qui est une technique de composants logiciel créée par Microsoft. Cette technique «COM» est utilisée en général en programmation pour permettre le dialogue entre programmes.

L'application *ArcObject* permet en effet plusieurs types de développements (ENSG, 2011) parmi lesquels :

- la personnalisation de l'environnement de travail dans ArcMap ou ArcCatalog avec VBA, en développant des macros associées à un document ArcMap (*.mxd) ou un modèle ArcMap (*.mxt).
- la création d'applications, des contrôles développés en VB, C++, Delphi..., des DLL, des contrôles ActiveX ou des exécutables.
- Etendre le modèle ArcInfo grâce à Visio-UML et les outils CASE, avec les langages C++, Delphi.

La programmation *ArcObjects* peut effectivement réduire la quantité de travail répétitif, rationaliser le flux de travail, et même produire des fonctionnalités qui ne sont pas facilement disponibles dans ArcGIS (Chang, 2004).

La littérature est riche par l'utilisation d'ArcObjects dans le développement des applications et des interfaces. *ArcObjects* et VBA ont été utilisés par plusieurs auteurs et dans différents projets scientifiques tels que Cheng, Wang, et Zhang (2009) sur la prédiction de la distribution spatiale des métaux lourds dans les sols. L'approche intégrée est relativement facile, rapide et rentable. Elle apporte une grande amélioration par rapport à la méthode du krigeage ordinaire d'ArcGIS ; Zhao, Li, et Ma, (2010) sur la qualité et la quantité d'eau dans le canal principal du projet (ER-SWTP) de la province du Shandong en Chine (couplage *ArcObjects* et base de données Oracle) ; Chivoiu, *et al.*, (2006) pour la création d'un programme intégré appelé ArcFVS qui fait le lien entre un simulateur de végétation forestière (SVF) et le SIG (requêtes spatiales pour la sélection des fichiers d'entrée et la visualisation graphique des fichiers de sortie de modèle) ; Rowshon, *et al.*, (2009) pour la gestion de la demande en eau d'irrigation pour la culture du riz en Malaisie (RIMIS) ; Yu, *et al.*, (2008) ont également utilisés des algorithmes orientés objets en C++ pour développer une interface utilisateur sous *ArcObjects* et VB.Net pour décrire et quantifier le développement urbain.

Ces exemples démontrent la très large palette d'applications thématiques dans l'environnement et le potentiel d'adaptation de la plateforme ArcGIS pour des applications métiers.

Les logiciels basés sur la technique COM comme « *ArcObjects* » sont l'un des principaux outils de production des plates-formes SIG. Cette technique peut mettre en œuvre la construction rapide d'application et il fournit des interfaces visuelles standard, ce qui rend le développement des interfaces SIG beaucoup plus pratique et améliore l'efficacité de l'utilisation du SIG selon le problème traité.

V.2. L'éditeur de Visual basic intégré dans ArcGIS

Les interfaces dans notre étude ont été développées grâce au langage de programmation VBA. VBA est à la fois un langage et un environnement de développement conforme avec la technique COM qui est supporté par ArcObjects d'ESRI et incorporé dans ArcGIS (ENSG, 2011). VBA est une version simplifiée de Visual Basic, c'est l'un des nombreux langages de la programmation orientée objet. La principale différence entre VBA et d'autres langages de programmation orientés objet, c'est que VBA a été conçu pour être intégré dans les applications comme ArcMap et ArcCatalog (Burke, 2003). VBA comporte une interface qui lui est propre, avec ses menus, ses préférences et ses barres d'outils de développement.

On va présenter un bref rappel de l'environnement VBA et de la syntaxe du langage. La fenêtre de l'éditeur VBA (Figure V-1) liste tous les modules du projet courant. Chaque module contient un certain nombre de "macros" (ou procédures), elles-mêmes constituées d'un certain nombre de lignes de code (instructions). Il existe trois types de modules : les modules standards, les feuilles (ou "Userform") et les modules de classe (ENSG, 2011). Les modules de feuilles contiennent tous le code associé à une feuille particulière, les modules standards et les modules de classe contiennent également le code mais ne sont pas associés à une feuille. Dans le cas de notre étude, on a utilisé les feuilles dans la création de nos interfaces. Une feuille est une boîte de dialogue créée par le développeur, contenant un certain nombre de "Contrôles", par exemple : des boutons d'option et de commande, de listbox, de frame, de MapControl etc. Ces contrôles sont associés à des événements associés à des procédures événementielles. Les procédures sont les unités de base dans la programmation VBA. Une procédure est un bloc de code qui peut exécuter une tâche spécifique. Un module est un ensemble de procédures, et un projet est une collection de modules (Chang, 2007).

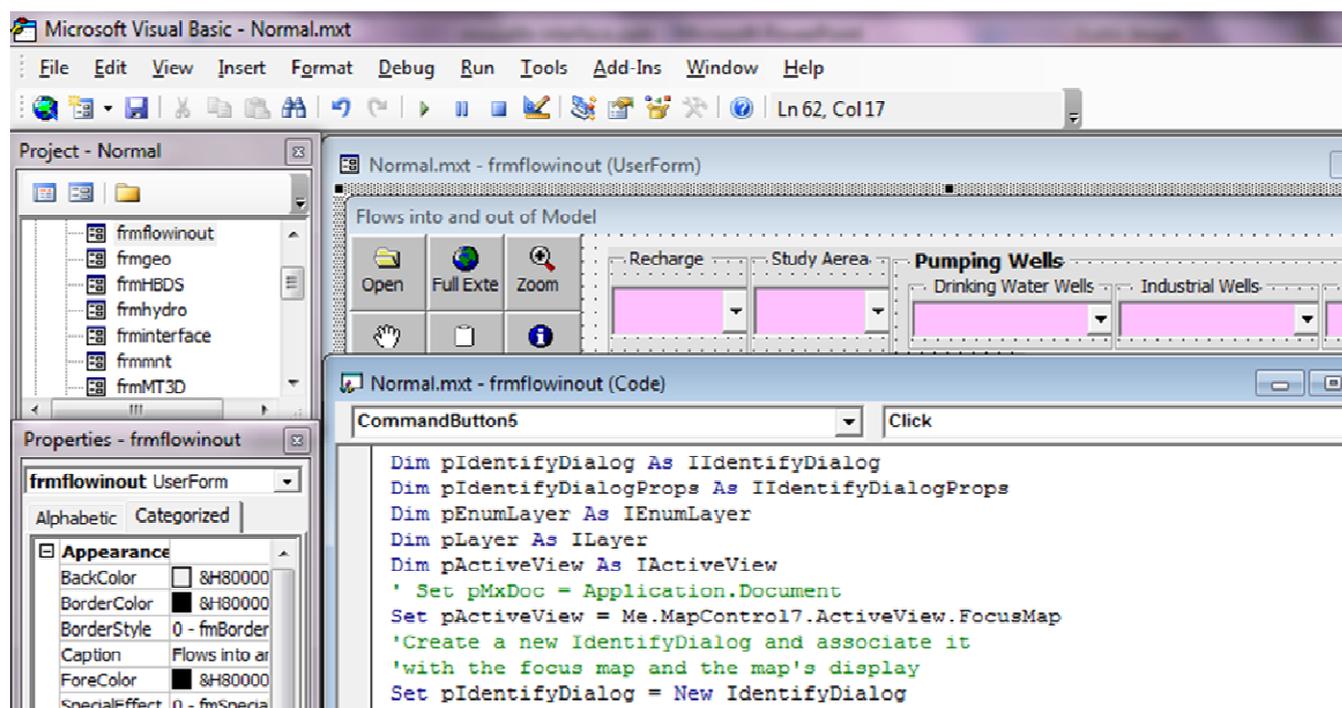


Figure V-1 Fenêtre de l'éditeur de Visual basic intégrée dans ArcGIS

V.3. Le développement de l'outil GWMV

Le nouvel outil ArcMap de visualisation de l'information hydrogéologique a été réalisé à partir de l'application ArcObject. Il consiste en une série d'interfaces permettant à l'utilisateur d'accéder à un archivage thématique des données hydrogéologiques tout au long du processus de traitement numérique, depuis la préparation des données en entrée de modèle (Modflow, MT3D, RNA) jusqu'à la visualisation des résultats obtenus. Cet outil de type applicatif métier a été nommé Ground Water Modelling Viewer (GWMV) (Figure V-2). La barre d'outils de (GWMV) contient un menu *Groundwater flow modeling* pour la modélisation des écoulements des eaux souterraines. Ce menu permet d'accéder, soit à *HBDS data viewer*, la modélisation HBDS (*Hypergraph based data structure*) représentée par un modèle conceptuel de données (MCD) et un modèle physique de données (MPD), soit à *Modelling workflow*, un modèle hydrodynamique créé par le code Modflow. La barre d'outils inclut aussi deux boutons, *Pollutant transport model*, un modèle de transport de nitrate créé par le code MT3D et *Spatial prediction viewer*, un modèle de réseau de neurones artificiels pour la prédiction spatiale des nitrates dans les eaux souterraines.

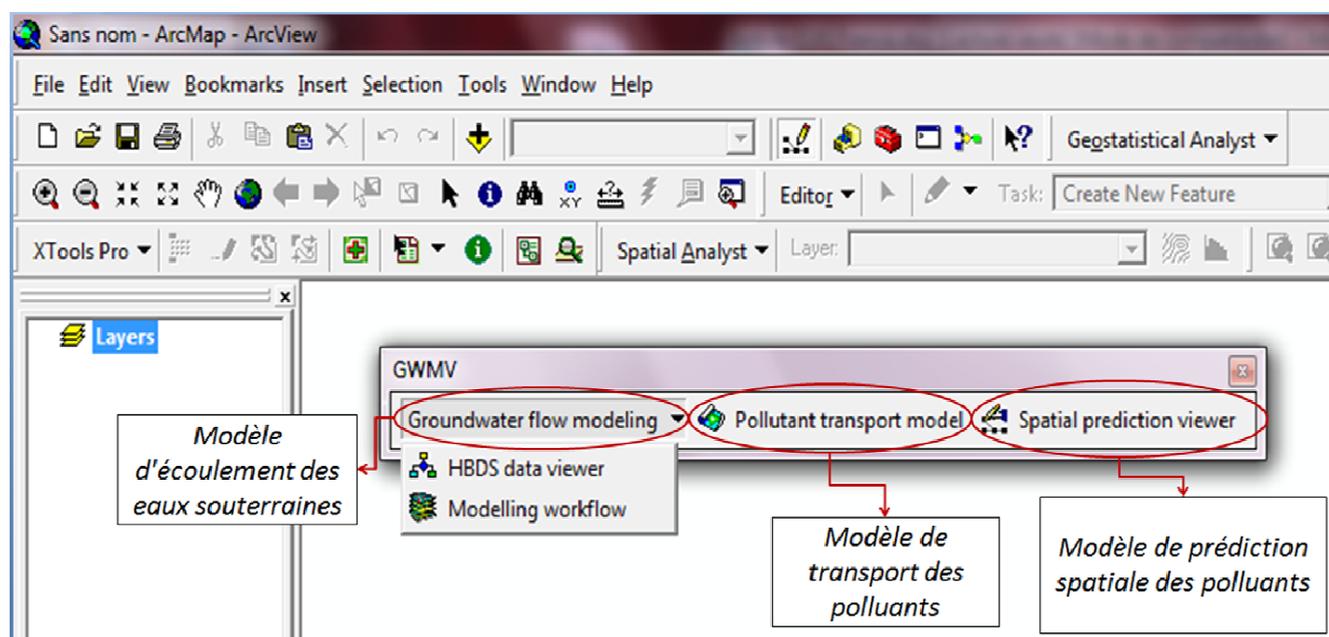


Figure V-2 Barre d'outils « GWMV » pour gérer les données d'entrée et de sortie de la modélisation hydrogéologique

V.4. Résultats : Fonctions et usages de GWMV

L'outil GWMV est construit autour de trois menus qui correspondent au *workflow* classique d'une modélisation hydrogéologique hydrodynamique et hydrodispersive. Son utilisation est prévue pour des gestionnaires en charge de la surveillance d'un aquifère n'ayant pas de compétences SIG.

V.4.1. Groundwater flow modelling

Le menu *Groundwater flow modelling* est composé de deux modules. Un module *HBDS data viewer* et un module *Modelling workflow*.

Le module *HBDS data viewer* est un module créé pour associer le modèle conceptuel de données selon la méthode HBDS et le modèle physique de données dans ArcGIS (Figure V-3).

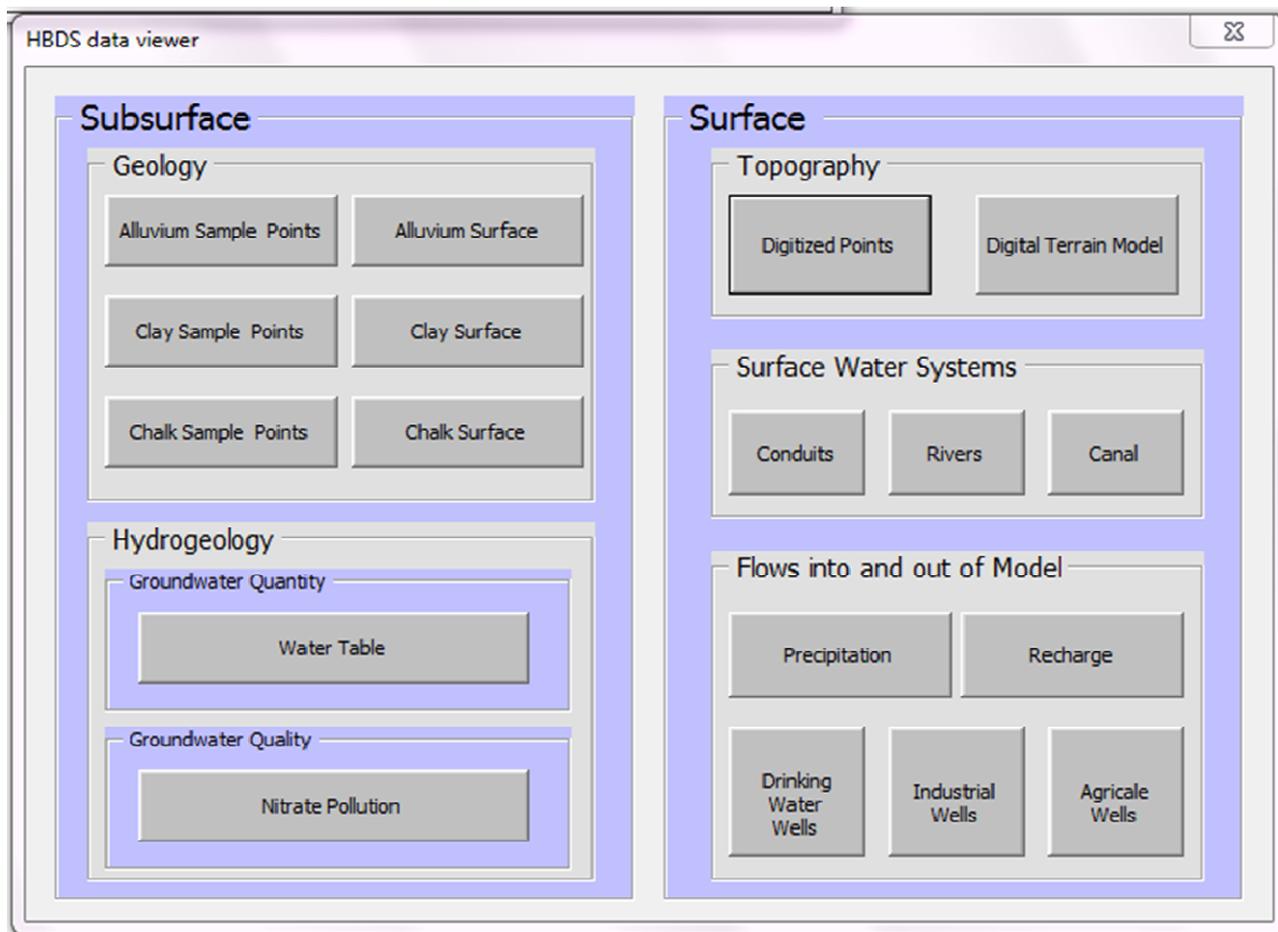


Figure V-3 Interface du modèle conceptuel de données (MCD) créé selon HBDS et le modèle physique de données (MPD)

Cette interface nous renseigne à la fois sur le sous-sol et la surface du système géologique étudié. Elle nous permet d'accéder aux cinq autres fenêtres suivantes : *Geology*, *Hydrogeology*, *Topography*, *Surface Water Systems* et *Flows into and out of Model*. Les données géologiques et hydrogéologiques du sous-sol sont représentées dans les deux interfaces *Geology* (Figure V-4) et *Hydrogeology*, (Figure V-6). En général, toutes les interfaces qui contiennent le contrôle *MapControl* permettant d'afficher des cartes, possèdent des boutons d'outils standards et ceux de navigation sur les données graphiques comme par exemple : Ouvrir, Zoom général, Zoom avant/arrière, Déplacer la vue, Imprimer et Identifier des entités.

Pour la thématique *Geology* (Figure V-4), il est ainsi possible de visualiser la position géographique et les données attributaires des forages hydrogéologiques, la spatialisation des couches géologiques interpolées à partir de données de forage de type BSS du BRGM, le Scan25® de l'IGN ou la photographie aérienne de type BD Ortho® ou autre image orthorectifiée (données satellites ou aéroportées).

La distribution spatiale des toits et des murs des trois couches est disponible avec deux formats raster (Figure V-4) ou vecteur (Figure V-5).

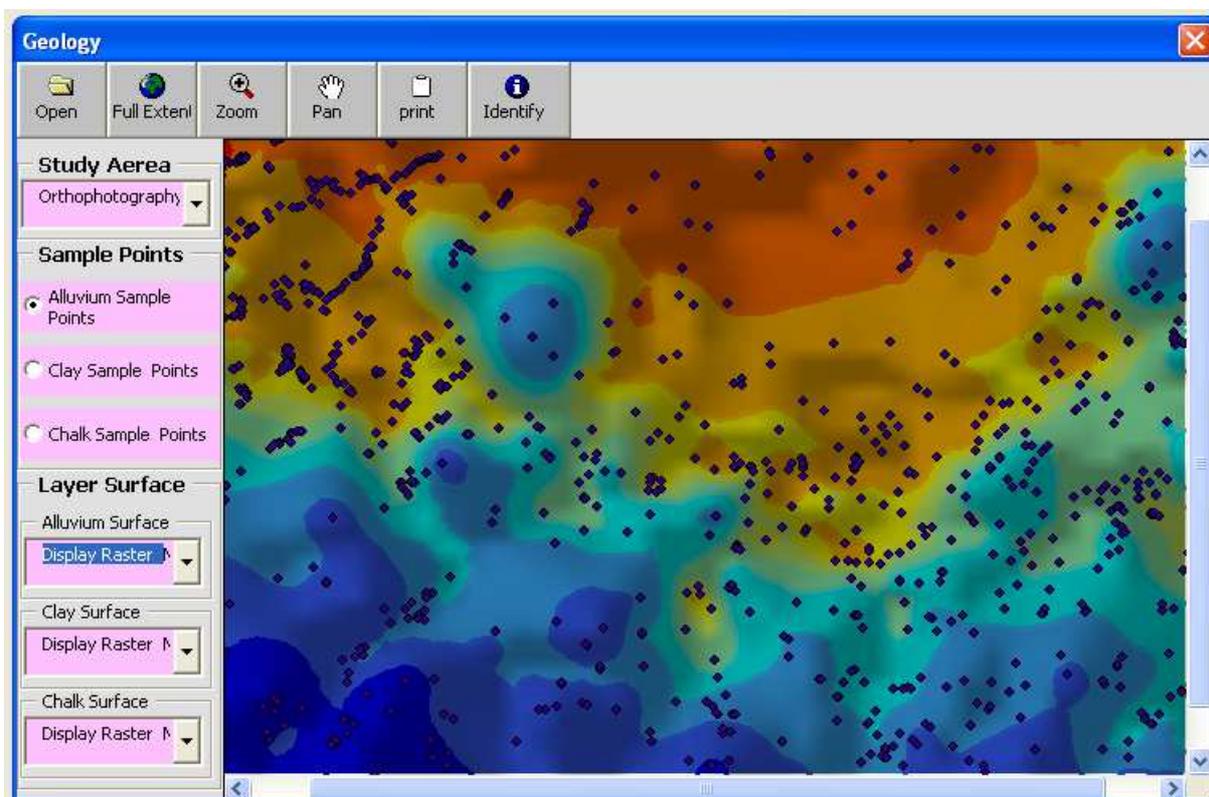


Figure V-4 Interface de la consultation des données géologiques (les points d'échantillonnages de la surface avec une distribution spatial raster de la surface)

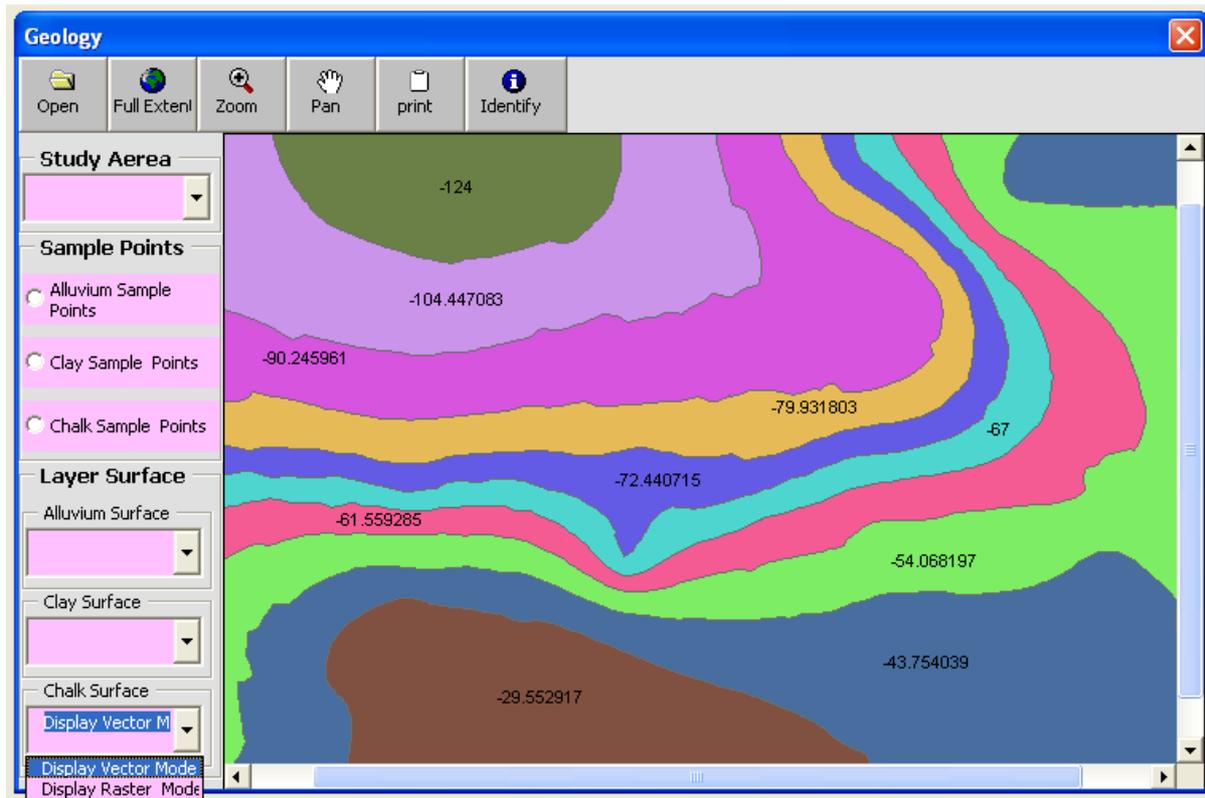


Figure V-5 Interface de la consultation des données géologiques (une distribution spatiale en mode vecteur du toit de la couche de la craie)

Des forages d'observation de la cote piézométrique, des cartes de la piézométrie et de la concentration des nitrates observés sont disponibles dans l'interface de l'hydrogéologie (Figure V-6).

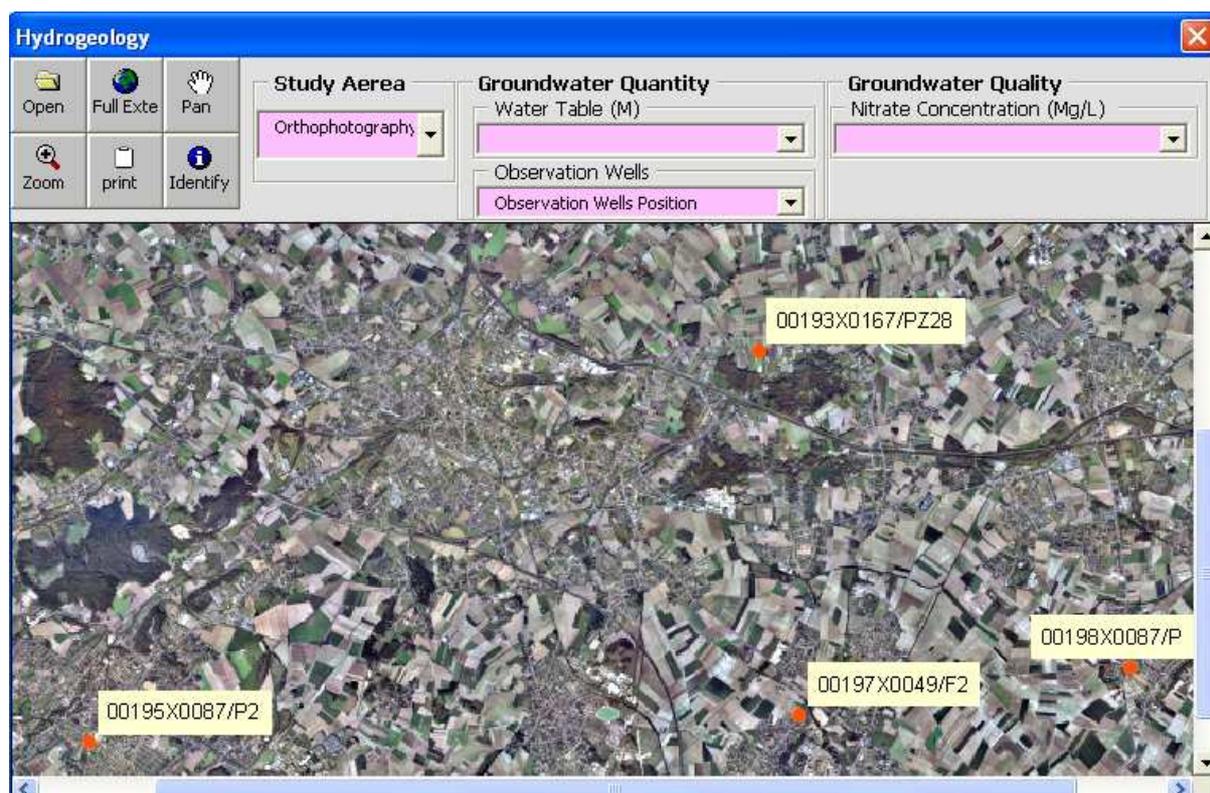


Figure V-6 Interface de la consultation des données hydrogéologiques (photographie aérienne, forages d'observations de la cote piézométrique)

Les données de surface, comme par exemple la topographie, le système d'écoulement de l'eau de surface et les débits entrant et sortant du modèle sont consultables dans les interfaces *Topography* (Figure V-7), *Surface Water Systems* (Figure V-8), *Flows into and out of Model* (Figure V-9). Ces interfaces nous fournissent toutes les informations liées à la surface de la zone étudiée : un MNT (modèle numérique de terrain) avec plusieurs types de représentation, comme par exemple (SRTM fait par l'interférométrie radar, MNT issu de la digitalisation des points d'échantillonnage d'altitude, TIN (un réseau triangulé irrégulier), MNT en format raster et vecteur, des courbes de niveau). Les résultats du modèle d'analyse de l'écoulement de surface qui est déjà créé (le réseau de drainage, l'accumulation de flux, le sens de l'écoulement, les rivières et les bassins versants) sont accessible dans l'interface *Surface Water Systems* (Figure V-8).

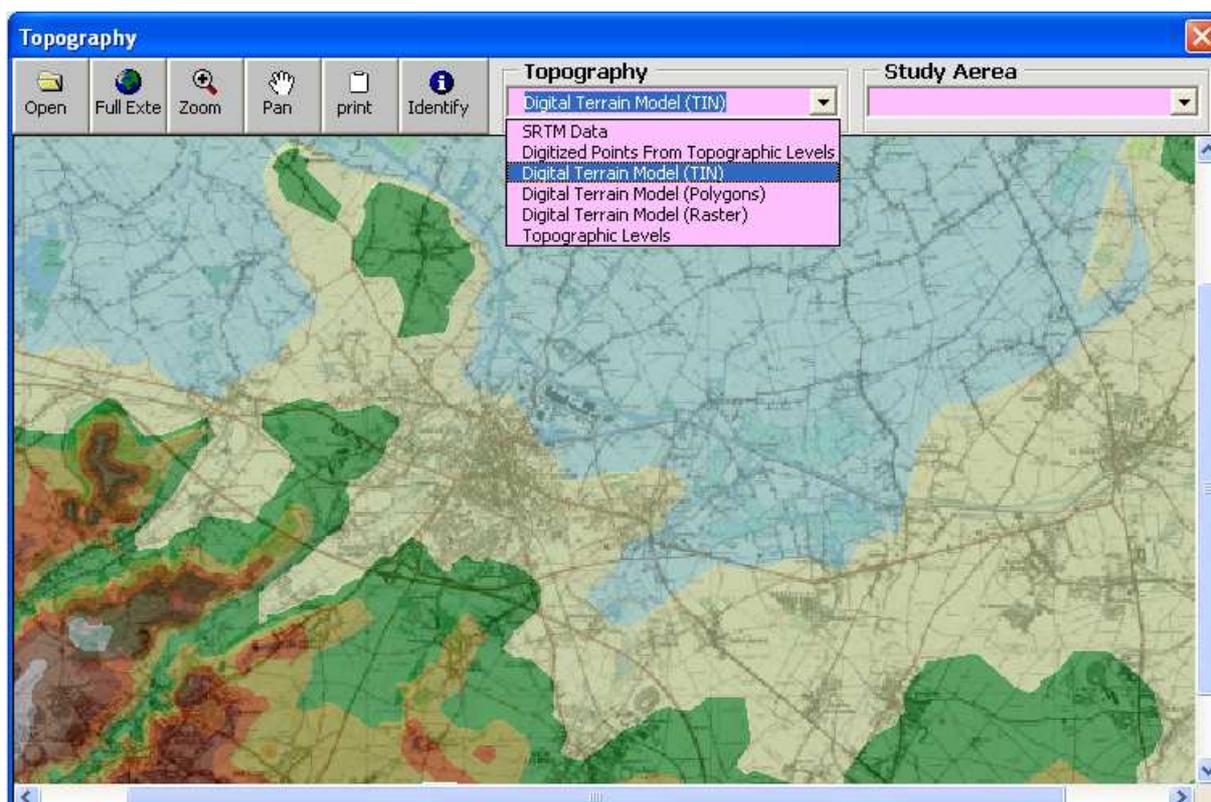


Figure V-7 Interface de la topographie (Modèle numérique de terrain (TIN))

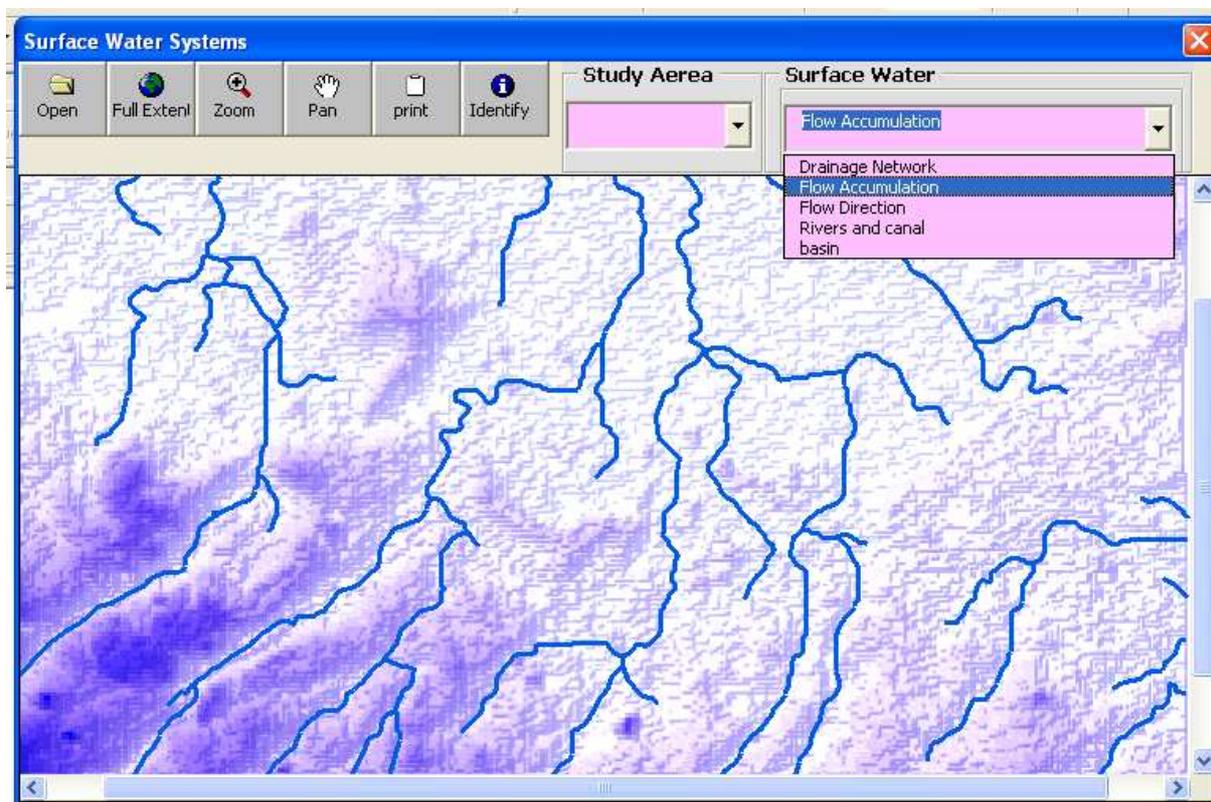


Figure V-8 Interface du système de l'eau surfacique (Accumulation de flux)

Les débits entrants et sortants du modèle sont interrogeables dans l'interface *Flows into and out of Model* (Figure V-9). Les débits sortants correspondent aux pompages des forages d'alimentation en eau potable, industriels et agricoles, et les débits entrants à la pluie efficace (la recharge).

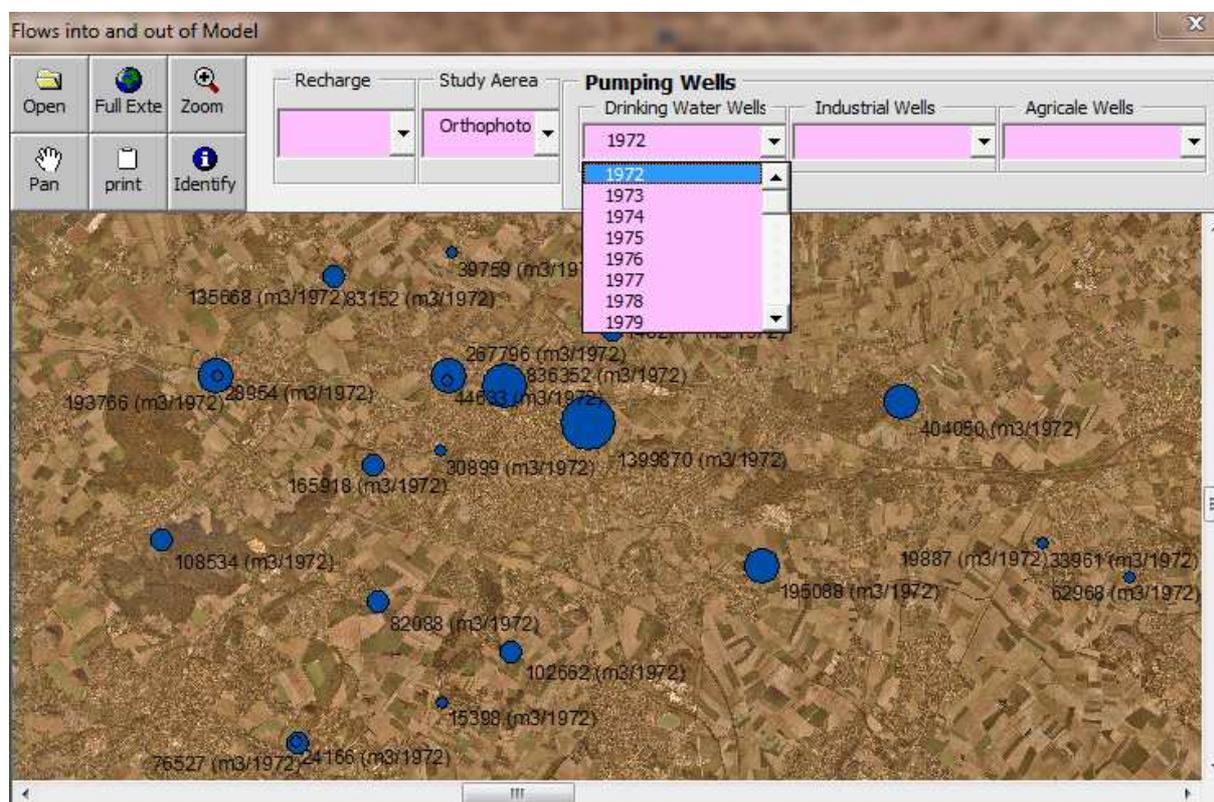


Figure V-9 Interface des débits entrants et sortants du modèle (débits de pompages des forages de l'eau potable pour l'année 1972)

Le deuxième module du menu *Groundwater flow modeling* s'intitule *Modelling workflow* (Figure V-10). Il permet d'accéder à une visualisation sur toutes les étapes d'intégration de l'information hydrogéologique spatialisée nécessaire à la modélisation hydrodynamique (rubrique *Modelling steps (according to Modflow)*). Il est ainsi possible d'accéder (rubrique *input data*) à une visualisation sur les données d'entrée de la modélisation hydrodynamique (maillage (Figure V-11), couches conceptuelles, conductivité, cotes piézométriques initiales, forages). Une rubrique *Boundaries* permet de visualiser la spatialisation des trois conditions limites. Dans la (Figure V-10), ces conditions limites sont celles utilisées dans le cas de l'étude menée sur l'aquifère de Béthune. Deux autres rubriques *steady-state simulation* et *transient simulation* permettent de suivre les étapes intermédiaires de la procédure Modflow. Le calage du modèle est fait par l'ajustement de la conductivité hydraulique de la couche de la craie, le bouton *Model calibration* permet d'afficher la différence entre les cotes

piézométriques calculées et observées, alors que le bouton *Verification* permet la visualisation d'une carte correspondant à la différence piézométrique entre la carte observée et celle calculée en régime permanent. De la même manière, dans le cadre du modèle transitoire, il existe la possibilité de consulter la variation des cotes piézométriques en fonction du temps.

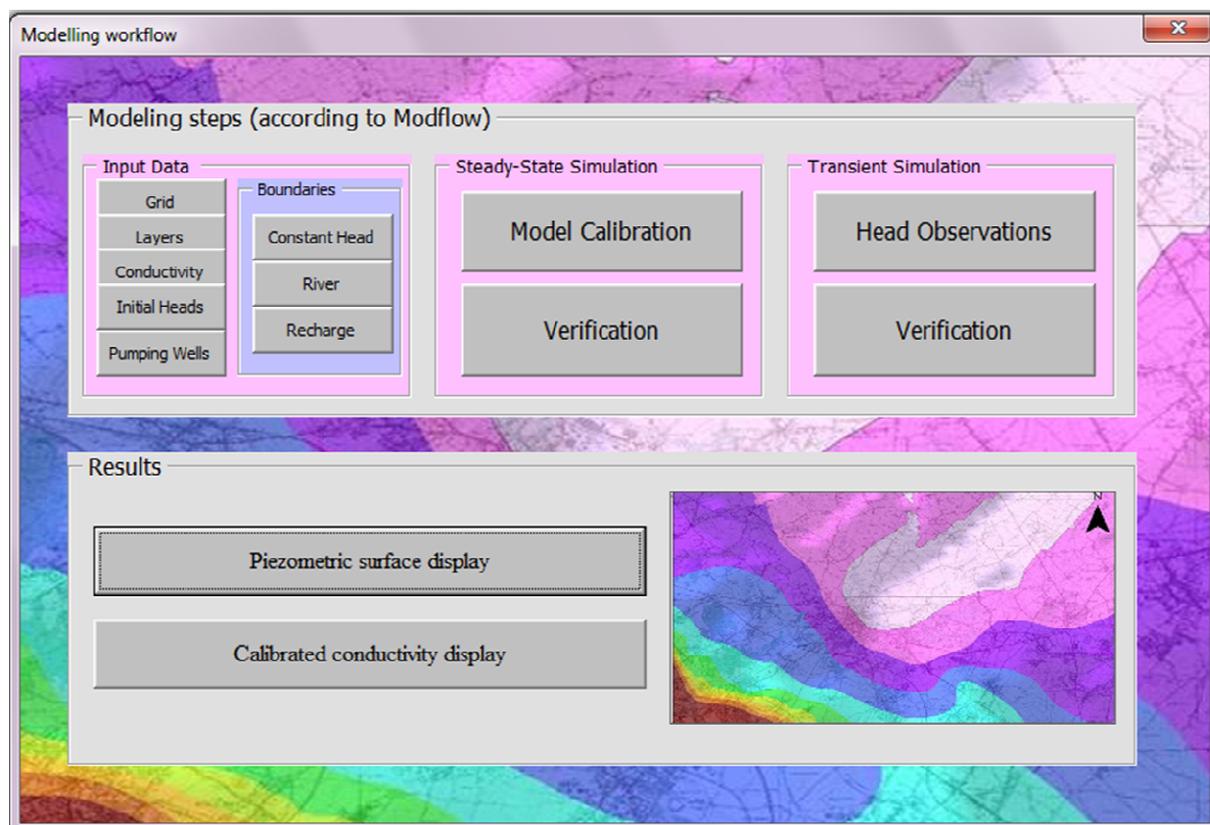


Figure V-10 Interface du modèle hydrodynamique Modflow

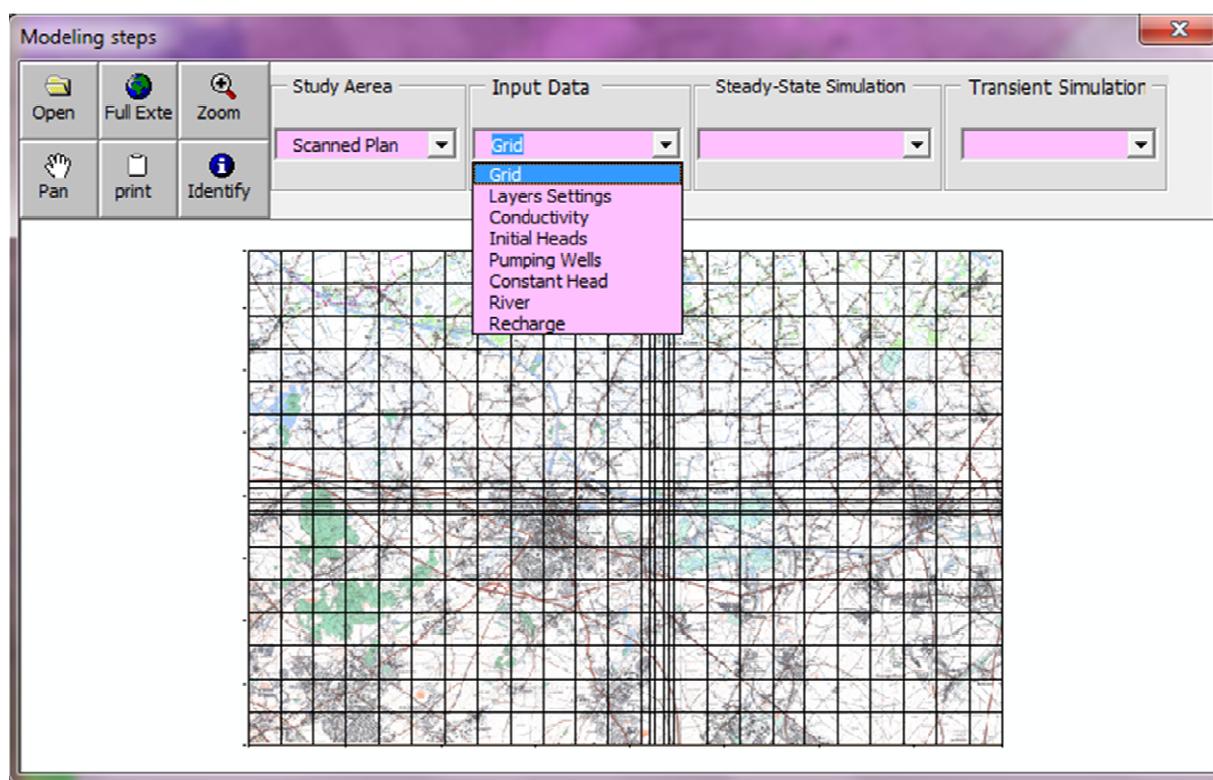


Figure V-11 Interface des principales étapes de la modélisation hydrodynamique Modflow (Maillage, Scan25)

L'intérêt de la création de ce module vient surtout de la capacité d'affichage des résultats d'une manière efficace et facile, permettant à l'utilisateur à passer par les données d'entrée puis celles de sorties. Une dernière rubrique *Results* permet de visualiser les résultats de la modélisation hydrodynamique (piézométrie et conductivité).

Le bouton : *Piezometric surface display* pour présenter les cartes piézométriques résultantes de la modélisation de l'année 1972 jusqu'à 2008 et le bouton *Conductivity calibration display* pour exposer la conductivité de la craie après le calage.

Dans le cas de la visualisation des résultats concernant la surface piézométrique (Figure V-12), l'utilisateur peut naviguer dans les données à différents pas de temps. L'incrémention des différents états piézométriques résultant du pas de temps défini lors de la mise en œuvre de la modélisation hydrodynamique.

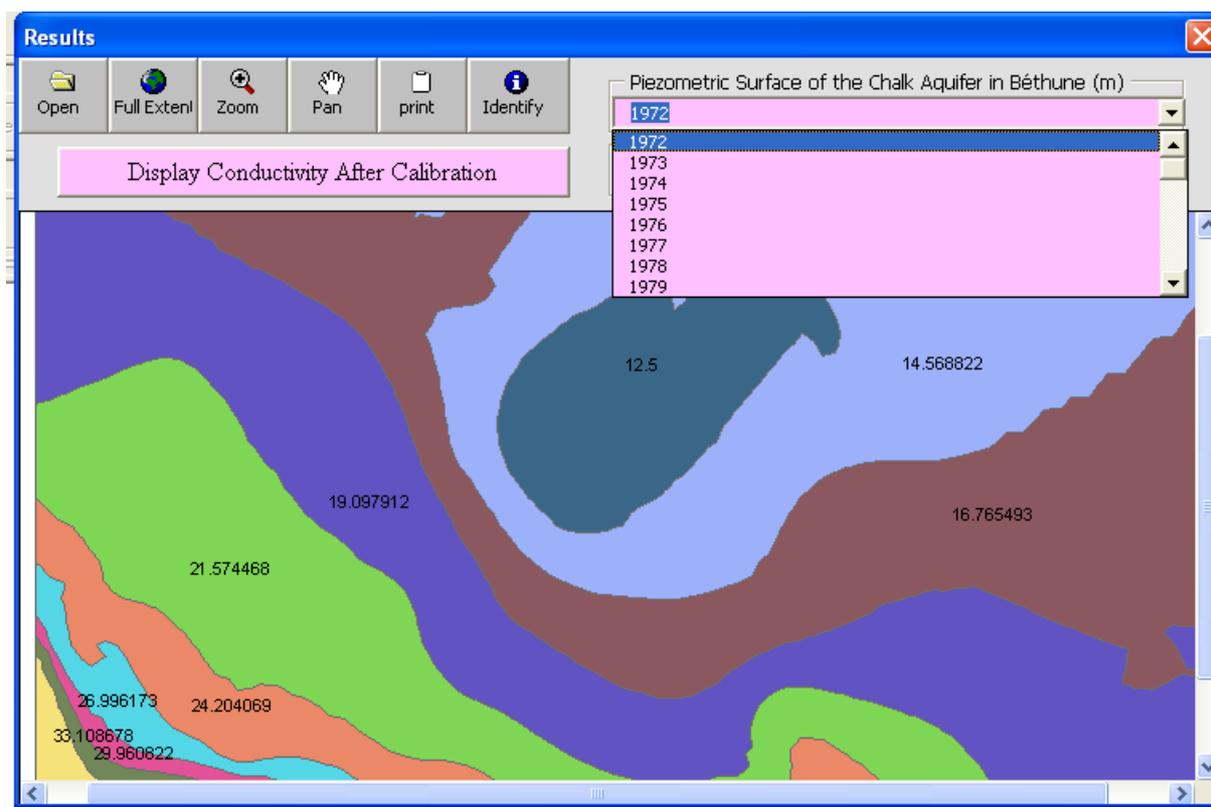


Figure V-12 Interface des résultats de la modélisation hydrodynamique Modflow (carte piézométrique résultante pour l'année 1972)

V.4.2. L'interface du modèle MT3D

Les différentes étapes et les résultats de la modélisation hydrodispersive sont exploitables dans l'interface *Pollutant transport model* (Figure V-13). L'interface *Modeling steps (according to MT3D)* (Figure V-14) permet de visualiser les paramètres d'entrée : les forages d'observations des teneurs en nitrates, les concentrations initiales, la concentration de l'eau de recharge et la dispersion, la calibration du modèle et la validation. Les cartes de la distribution spatiale des concentrations calculées en nitrates par le modèle MT3D et la carte de la dispersivité de la couche de la craie après le calage se trouvent dans la fenêtre *Results* (Figure V-15).

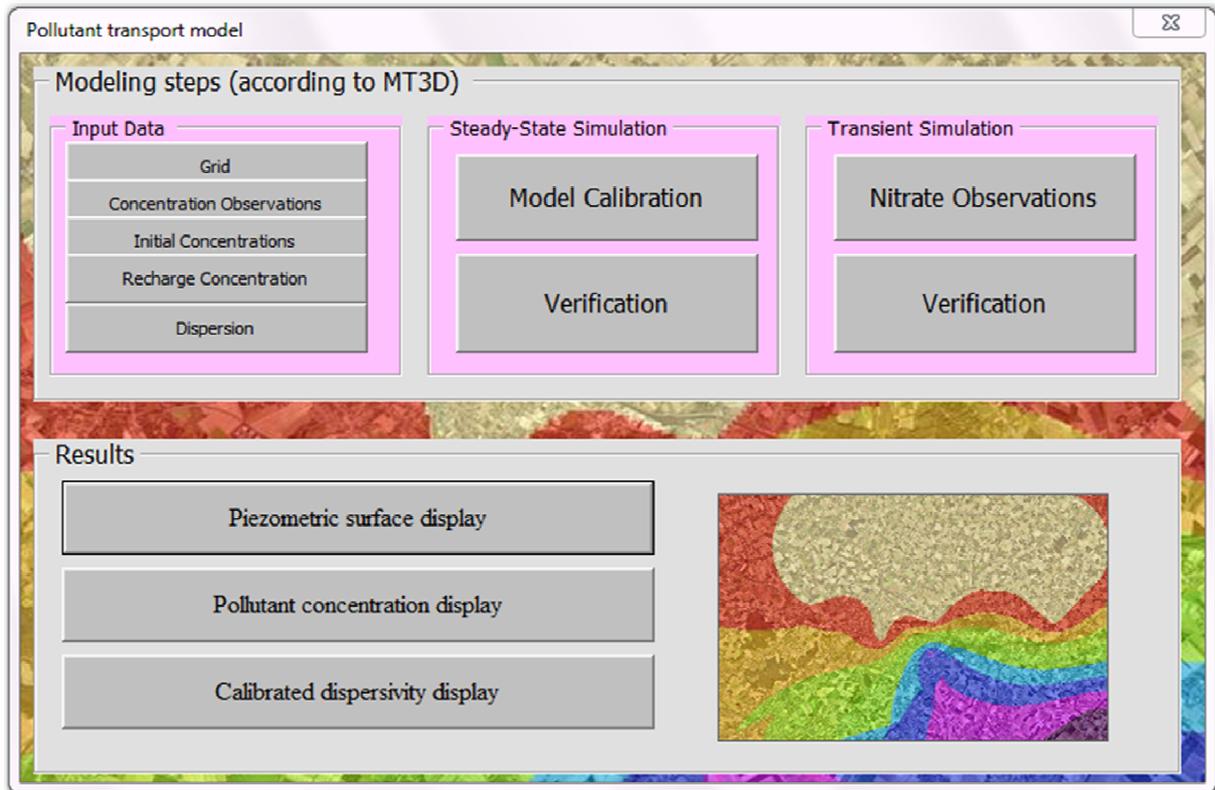


Figure V-13 Interface du modèle hydodispersif de transport des nitrates par MT3D

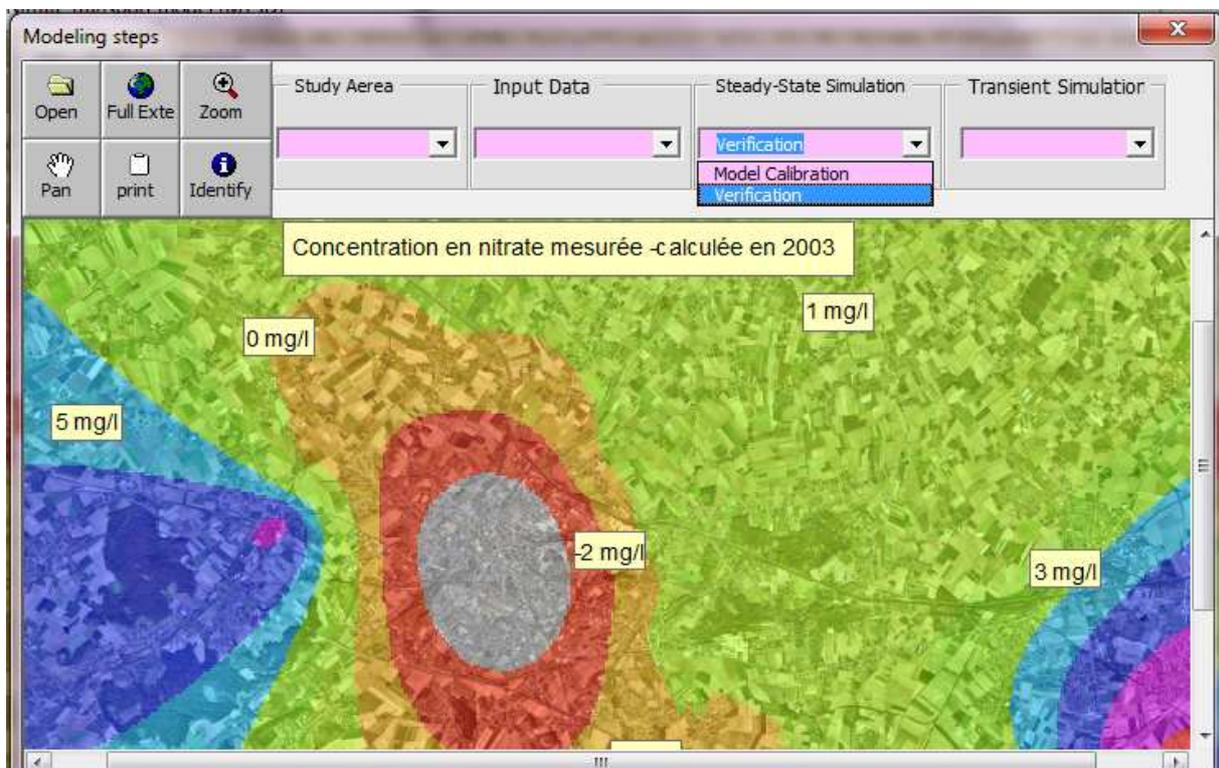


Figure V-14 Interface des étapes principales de la modélisation dispersive MT3D (Carte de la différence entre la concentration en nitrates mesurée et calculée en 2003)

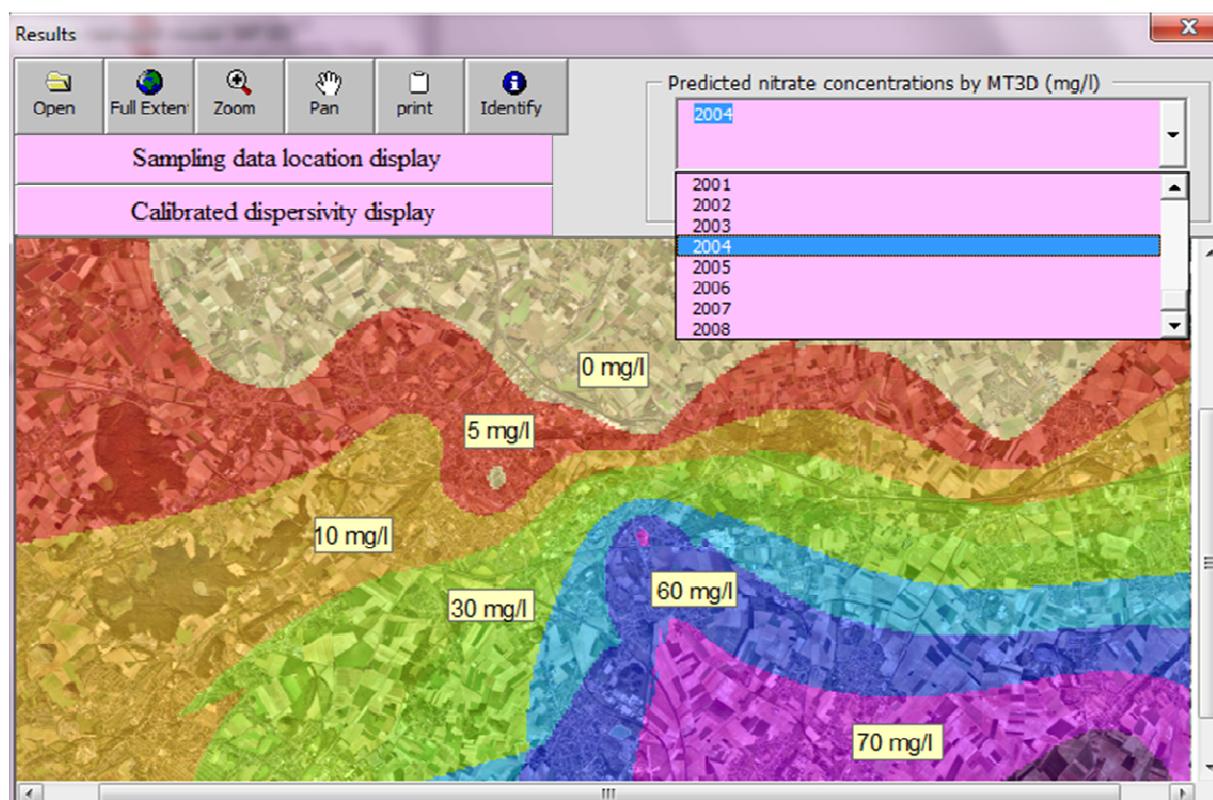


Figure V-15 Interface des résultats de la modélisation hydrodispersive MT3D (Carte de la distribution spatiale prédite pour l'année 2004)

V.4.3. L'interface du modèle RNA

Le dernier bouton de la barre d'outils s'intitule *Spatial prediction viewer* (Figure V-16), c'est un module de consultation des données d'entrée et de gestion des données de sortie de la modélisation par un RNA. La localisation géographique des forages d'observations des nitrates sont accessibles depuis l'interface *Spatial prediction viewer* (Figure V-16). Toutes les données d'entrée du modèle : La coordonnées géographique (X, Y), la date, le type de nappe, la recharge (en mm/an) et la classe de concentration en nitrate existent dans le contrôle de type menu déroulant *Input Data*. L'affichage de ces données est lié aux forages, comme par exemple dans la (Figure V-17), où l'on voit la cordonnée X (m) de chaque forage. Le contrôle de type menu déroulant *Spatial distribution of predicted nitrate concentrations (mg/l)* regroupent les cartes de la distribution spatiale des nitrates prédites. Des cartes de prévision ont été créées jusqu'à l'année 2025, trois scénarii de recharge ont été adaptés : 120, 250, 500 mm/an. Par exemple, la (Figure V-18) montre les concentrations en nitrates prédites pour l'année 2025 avec une recharge de 500 mm/an. L'interface nous permet également de consulter les cartes interpolées des concentrations en nitrates observées dans les qualimètres par le contrôle *Spatial distribution of observed nitrate concentrations (mg/l)*.

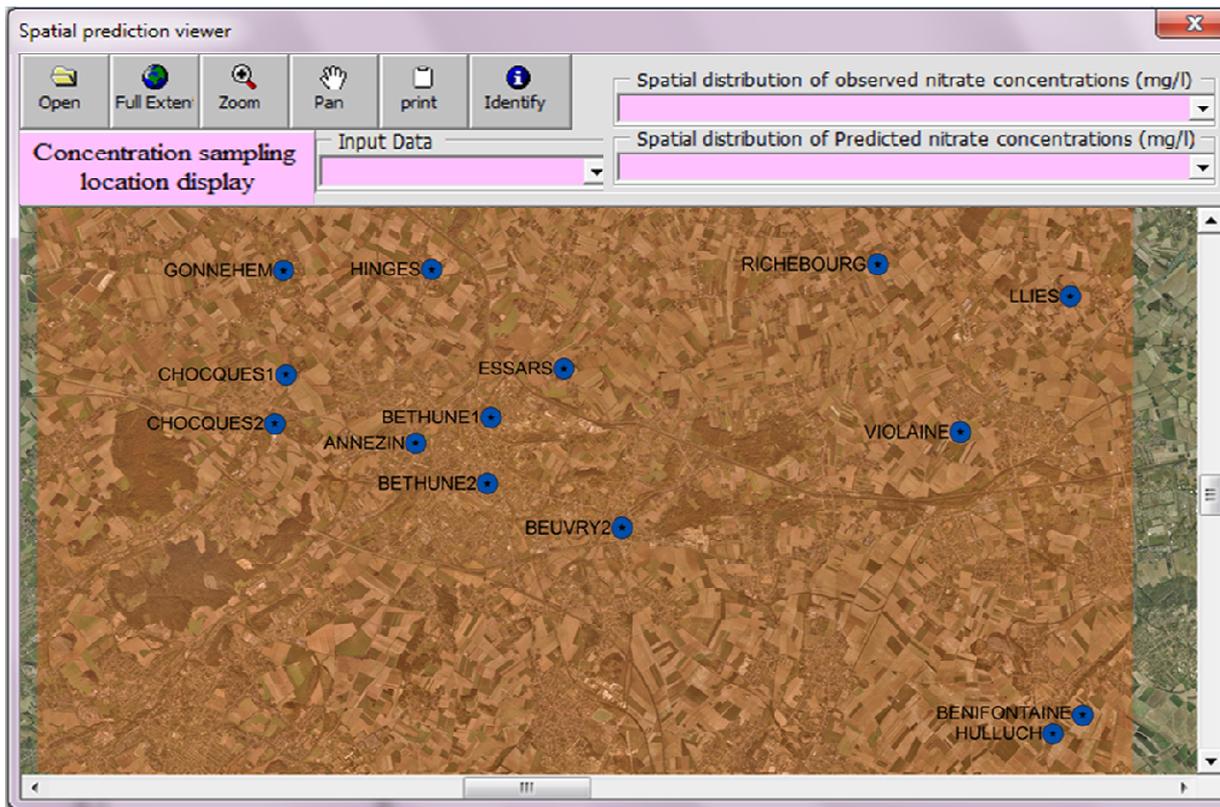


Figure V-16 Interface du modèle du réseau de neurones artificiels RNA (Localisation des forages d'observation)

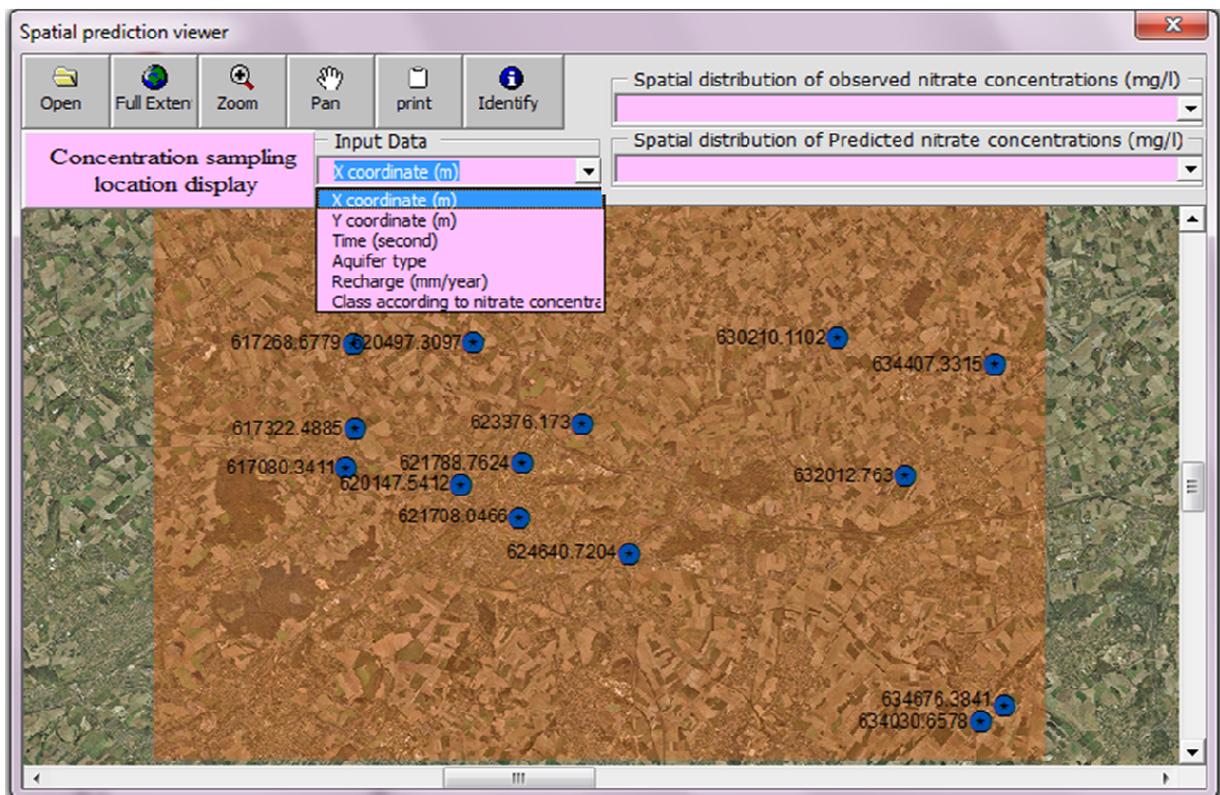


Figure V-17 Interface du modèle du réseau de neurones artificiels RNA (Les données d'entrée : la coordonné X (m))

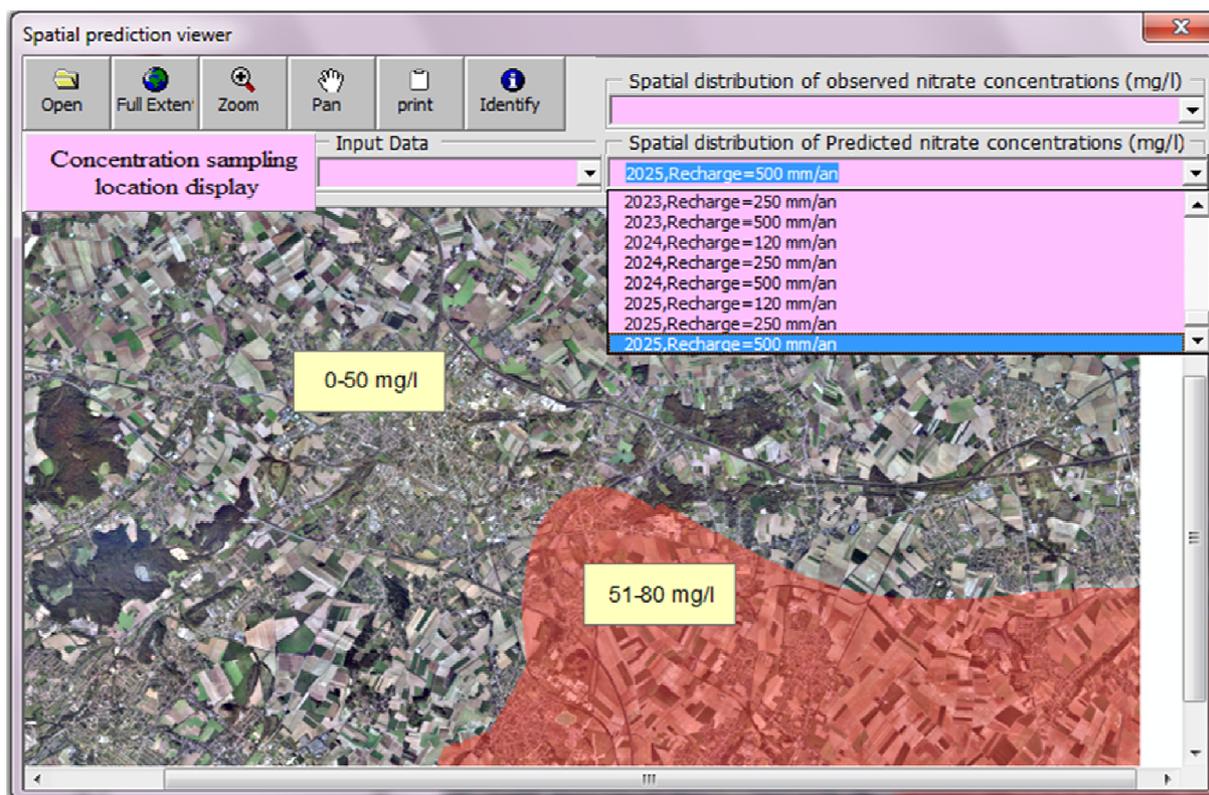


Figure V-18 Interface du modèle du réseau de neurones artificiels RNA
(Prédiction de la distribution spatiale des nitrates en 2025 pour une année pluvieuse recharge = 500 mm/an)

Conclusion

Afin de faciliter l'exploitation des résultats d'un modèle des écoulements et de transport des polluants et d'un modèle de réseaux de neurones artificiels, des interfaces utilisateurs ont été développées à l'aide des outils VBA intégré à ArcGIS. Ces interfaces permettent la communication entre l'utilisateur et la géodatabase par une barre d'outils (GWMV) contenant des menus et des boutons permettant l'affichage d'un ensemble de fenêtres. Dans ces dernières toutes les données sont visualisables et interprétables à partir des données spatialisées ou attributaires. Les interfaces développées ont été effectuées par l'intégration de plusieurs bases de données au sein d'une géodatabase dédiée à la gestion de l'aquifère de Béthune. Cette géodatabase compile les données de base avant modélisation et les données en sortie à chaque étape intermédiaire du *workflow* de la modélisation (Modflow, MT3D et RNA). Cet exemple d'application métier développé à l'aide des outils VBA d'ArcGIS démontre la capacité d'adaptation de l'outil SIG à gestion et l'archivage de données environnementales en matière de suivi de la qualité et de la quantité de la ressource en eau d'un aquifère. Dans le cas de l'aquifère de Béthune, la situation stratégique par rapport à la communauté urbaine de

Lens-Liévin (forte de mande en eau potable de bonne qualité) et la capacité de dénitrification implique une gestion experte de la ressource en eau afin de dimensionner le potentiel de prélèvement permettant de sécuriser la qualité et la disponibilité de l'eau potable. GWMV est de ce fait un outil particulièrement adapté à l'aide à la décision pour un gestionnaire n'étant pas spécialisé dans l'usage d'un SIG et d'ArcGIS en particulier.

Perspectives de recherche : L'interférométrie différentielle du radar à synthèse d'ouverture (DInSAR) pour quantifier la subsidence des sols causée par des pompages

Dans notre future recherche, on va profiter du grand potentiel du radar interférométrique à synthèse d'ouverture (DInSAR) pour détecter et quantifier la subsidence des sols causée par le tassement du système aquifère résultant des surexploitation des forages de pompage. La zone concernée par la future étude se situe un peu au nord de la limite de mise en captivité de la nappe de la craie (à proximité des forages F4 et F5). D'un point de vue hydrogéologique, on observe deux nappes : la nappe de la craie, captive et en charge par rapport à l'interface argile/craie et une nappe superficielle, dans les formations sablo-argileuses tertiaires ou quaternaires (avec des passées organo-tourbeuses). Localement, l'argile de Louvil a pu être érodée par la rivière Loïse et on peut observer des formations alluviales reposant directement sur la craie avec une continuité hydraulique entre les deux formations. Les pompages qui seraient effectués dans la nappe de la craie, à partir de F4 et F5, pourraient, s'il y avait un effet de drainance avérée entre les deux formations, provoquer un abaissement de la nappe des formations superficielles, soit une augmentation de contrainte verticale effective, avec des conséquences éventuelles sur le comportement des formations les plus sensibles à cette modification de contrainte, notamment en termes de tassement.

DInSAR sera utilisé pour déterminer s'il existe des déformations dans la zone d'étude suite à des pompages de longue durée des deux forages nommés F4 et F5 (effectué en 2006). Les résultats seront ensuite comparés avec le mouvement modélisé par le modèle hydrodynamique (Modflow). L'analyse de la relation entre les variations piézométriques et les déformations de la surface permettra de déterminer les débits optimaux de prélèvements.

L'interférométrie différentielle de données radar à synthèse d'ouverture (DInSAR) est une technique de télédétection permettant la mesure précise de la subsidence avec une bonne résolution spatiale et surtout verticale. Cette technique est basée sur la mesure de la variation de phase entre deux images SAR/RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) acquises avec un décalage dans le temps et (ou) une parallaxe transversale afin d'extraire l'information sur l'altitude ou le mouvement de la surface terrestre.

Les principales limites générales de cette technique sont la perte de la clarté de frange en raison d'une pauvre préservation de la surface (la perte de cohérence) et les biais induits par des artefacts atmosphériques (Fruneau et Sarti, 2000, Massonnet et Feigl, 1998).

Afin de maintenir la cohérence, il ne devrait y avoir aucun changement dans la rétrodiffusion. La végétation crée des problèmes; les conditions sèches sont préférables.

Des exemples classiques d'application de la présente technique au calcul la subsidence de terrain, peut être trouvée dans la littérature. Sarti, *et al.*, (2003) ont recouru à la technique de l'interférométrie différentielle radar en utilisant les données archivées d'ERS sur une région

de la Mer Morte. Le but était de détecter les mouvements de terrain, l'emplacement exact de ces derniers, les failles, et de suggérer une corrélation possible avec les déformations pré-sismiques et post-sismique de la faille. Fruneau *al.*, (2005) ont suivi des mouvements verticaux liés à des pompages dans la ville de Paris par interférométrie différentielle. Tomás, *et al.*, (2005) ont appliqué la technique de la cohérence des pixels pour étudier les phénomènes de subsidence dus aux pompages excessifs des eaux souterraines. La subsidence du sol provoquée par la surexploitation excessive des aquifères est un problème commun qui touchent notre société. On estime qu'il ya plus de 150 villes dans le monde confrontées à de graves problèmes de tassements en raison de l'exploitation excessive des eaux souterraines (Hu, *et al.*, 2004). Des exemples de la subsidence sont bien connus, comme par exemple l'affaissement qui s'est produit dans la zone métropolitaine de la ville de Murcie (Espagne) à la suite d'un pompage excessif des eaux souterraines au cours d'une période de sécheresse (1992-1995). Un abaissement du niveau piézométrique de 8 m environ cause une subsidence du sol maximale estimée à 8 cm (Tomás, *et al.*, 2005).

L'interférométrie différentielle RSO est devenue un important outil de télédétection pour l'estimation temporelle et spatiale des mouvements de terre liés aux phénomènes de subsidence (Berardino, *et al.*, 2002, Galloway, *et al.*, 1998, (Mora, Mallorqui, et Broquetas, 2003). DInSAR a plusieurs avantages importants par rapport aux autres méthodes classiques utilisées pour mesurer la déformation liée à la subsidence. L'un des principaux avantages de DInSAR est sa couverture spatiale élevée dans les zones urbaines. Si l'on compare la technique de DInSAR avec d'autres communes, comme le système de positionnement global différentiel (DGPS) et les méthodes instrumentales, ces derniers ne peuvent pas mesurer les déformations du sol à chaque point désiré ou seulement sur un espace très restreint en raison du nombre de point à acquérir. Dans le cas des méthodes de nivellement, ils peuvent couvrir tout un territoire, mais la distance moyenne entre les repères est beaucoup plus élevée que la résolution d'une image SAR. En outre, le nivellement ne peut pas être répété fréquemment parce que le coût d'exécution des mesures d'un réseau de nivellement est très élevé. Toutefois, DInSAR pourraient être utilisé pour mettre en place une base mensuelle ou annuelle pour la surveillance à un coût modéré.

Conclusion générale

Les eaux souterraines constituent une ressource précieuse pour l'humanité. Dans plusieurs pays, elles sont pratiquement la seule source de l'eau potable. Toutefois, l'exploitation incontrôlée de cette ressource va produire des effets négatifs sur la qualité et la quantité de l'eau. Pour cette raison, les outils efficaces de gestion, à la fois, de la qualité et de la quantité des eaux souterraines sont devenus des sujets majeurs de préoccupation. Les concentrations élevées en nitrates de la nappe de la craie à Lens (Nord de la France) ont entraîné la recherche d'une nouvelle ressource en eau. La nappe de la craie à Béthune présente des caractéristiques très favorables, grâce à la présence de formations de sable et d'argile qui permettent un processus de dénitrification naturelle. Cependant, une gestion efficace de cette ressource en eau souterraine nécessite la mise en place d'un système d'aide à la décision (à savoir DSS : Decision Support System). Ce travail a permis la présentation d'une nouvelle méthodologie de gestion des eaux souterraines, basée sur le couplage de plusieurs modèles numériques avec un (SIG). Un modèle d'écoulement des eaux souterraines a été implémenté dans le code Modflow avec une base de données géographique mise en œuvre dans ArcGIS 9.3.1. Le SIG a fourni une aide importante dans la création et la gestion de bases de données spatiales et dans la préparation des données d'entrée de divers paramètres du modèle hydrodynamique et des données de sortie du modèle (cartes piézométriques et cartes de qualité des eaux souterraines). Cela a permis la création d'un modèle hydrodynamique plus efficace. Ensuite, des simulations hydrogéologiques ont été utilisées pour analyser les variations des niveaux d'eau afin de fixer les débits optimums de pompage à partir de deux puits de pompage. Un modèle de RNA (Réseaux de neurones artificiels) est utilisé ici comme un outil d'optimisation pour prédire le débit de pompage. Dans l'étape suivante, un modèle de réseau de neurones artificiel a été développé pour prédire la distribution spatiale des concentrations en nitrates. L'emplacement géographique, la date d'observation, le type d'aquifère, la recharge et la classe de la concentration en nitrates ont été choisis comme des paramètres d'entrée du modèle RNA. Le meilleur réseau trouvé a été un modèle 3-couches MLP (Perceptron multicouches avec rétropropagation de l'erreur), une architecture 6-4-1. Le RNA constitue dans ce cas un outil prédictif pour la modélisation des concentrations en nitrates dans le temps. Une simple combinaison RNA-SIG validée par un modèle de transport numérique (MT3D) peut être considérée comme un outil viable pour la prédiction et la gestion de la pollution par les nitrates des eaux souterraines. Ce modèle a été utilisé pour faire des cartes de prévision des concentrations en nitrates compatibles avec le fonctionnement de l'aquifère. Les cartes qui en

résultent peuvent être considérées comme des outils d'aide à la décision dans la gestion durable des ressources en eaux souterraines. L'intérêt du modèle RNA réside dans sa capacité à reconnaître des relations complexes à partir des données numériques. Le RNA est considéré comme un outil très puissant pour la modélisation prédictive. Le SIG constitue un moyen très élégant de visualisation et de modélisation de données, ce qui améliore la compréhension et, par conséquent, la prise de décision. A la fin de cette étude, des interfaces utilisateur ont été développées dans ArcSIG en VBA pour gérer les données spatiales d'entrées et de sorties de trois modèles (Modflow, MT3D, RNA), pour l'aquifère de Béthune. Ce qui a aidé à créer un outil simple de gestion des résultats.

Les contributions méthodologiques de l'analyse hydrogéologique présentées dans ce travail de thèse peuvent être facilement appliquées à tout aquifère aux propriétés similaires. L'intégration des modèles numériques et le SIG dans un système d'aide à la décision a donc contribué à proposer un outil destiné à aider les décideurs dans la gestion durable des eaux souterraines pour l'approvisionnement en eau potable, autant en quantité qu'en qualité.

Bibliographie

- Abdallah, C. (2010). Spatial distribution of block falls using volumetric GIS–decision-tree models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 12 , 393–403.
- Aguilera, P. A., Garrido Frenich, A., Torres, J. A., Castro, H., Martinez Vidal, J. L., et Canton, M. (2001). Application of the kohonen neural network in coastal water management: methodological development for the assessment and prediction of water quality. *Water Research* 35 , 4053-4062.
- Al-Barqawi, H., et Zayed, T. (2006). Condition Rating Model for Underground Infrastructure Sustainable Water Mains. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 20 , 126-135.
- Almasri, M. N., et Kaluarachchi, J. J. (2005 a). Multi-criteria decision analysis for the optimal management of nitrate contamination of aquifers. *Journal of Environmental Management* 74 , 365-381.
- Almasri, M. N., et Kaluarachchi, J. J. (2005). Modular neural networks to predict the nitrate distribution in ground water using the on-ground nitrogen loading and recharge data. *Environmental Modelling et Software* 20 , 851-871.
- AMODIAG. (2006). Etude hydrogéologique des forages F4 et F5 sur la nappe superficielle (Zones tourbeuses) et la nappe de la craie (Système de dénitrification). Rapport Final. communaupole Lens-Liévin,Northern France.
- Anderson, M. P., et Woessner, W. W. (1992). *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*. New York: Academic Press, 381p.
- Antenucci, J. C., Brown, K., Crosswell, P. L., et Kevany, M. J. (1991). *Geographic Information Systems, a guide to the technology*. New York: Van Nostrand Reynold, 301p.
- Arab, R., Minelli, F., et Pirot, F. (2005). De la modélisation à l'implémentation : proposition d'une méthodologie pour le recensement des mares dans le Nord-Pas-de-Calais. Conférence Francophone ESRI,5-6 Octobre . Issy-les-Moulineaux, France.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., et Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40 , 2375 - 2383 .

- Berge, C. (1970). Graphes et des Hypergraphes. Ed. Bordas 1973, Paris: DUNOD Université, 300p.
- Bertazzon, S., Micheletti, C., Critto, A., et Marcomini, A. (2006). Spatial analysis in ecological risk assessment: Pollutant bioaccumulation in clams *Tapes philipinarum* in the Venetian lagoon (Italy) . Computers, Environment and Urban Systems 30 , 880–904.
- Biesheuvel, A., et Hemker, C. J. (1993). Groundwater modeling and GIS: integrating MICRO-FEM and ILWIS. HydroGIS 93: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources. Proceedings of the Vienna Conference: IAHS Publication 211, 289_296.
- Blum, A., Chery, L., Barbier, J., Baudry, D., et Petelet-Giraud, E. (2002). Contribution à la caractérisation des états de références géochimiques des eaux souterraines. Outils et méthodologie. Rapport final, Rapport inédit BRGM RP-51549-FR, 5 Volumes.
- Bopearachchi, A. (2002, août). Structuration des connaissances par la méthode HBDS "HyperGraph Based Data Structure" Notions de base. Récupéré sur http://membres.multimania.fr/coursderecreation/HBDS_BASE/PDF/hbds_base.pdf
- Bou Kheir, R., Greve, M., Abdallah, C., et Tommy, D. (2010). Spatial soil zinc content distribution from terrain parameters: A GIS-based decision-tree model in Lebanon. Environmental Pollution 158 , 520–528.
- Bouillé, F. (1977). Un modèle universel de banque de données simultanément partageable et répartie. France: thèse de l'University of Paris VI.
- BRGM. (2009). Consulté le 15-12, 2009, notice explicative de la carte géologique de Béthune sur <http://ficheinfoterre.brgm.fr/Notices/0019N.pdf>
- Brodie, R. S. (1999). Integrating GIS and RDBMS technologies during construction of a regional groundwater model. Environmental Modelling and Software 14 , 119–128.
- Burgéap. (1999). Etude des vallées de la Clarence et de la Lawe et des impacts sur les forages artésiens, Rapport Final . district de Lens-Liévin, Northern France.
- Burke, R. (2003). Getting to know ArcObjects: programming ArcGIS with VBA, Volume 1. ESRI Press, 422p.
- Burrough, P. A. (1986). Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Oxford, England: Clarendon Press, 220p.
- Burrough, P. A., et McDonnell, R. A. (1998). Principles of Geographical Information Systems. New York: Oxford University Press, 356p.

- Carrera-Hernández, J. J., et Gaskin, S. J. (2006). The groundwater modeling tool for GRASS (GMTG): open source groundwater flow modeling. *Computers et Geosciences* 32 , 339–351.
- Carter, J. R. (1989). On defining the geographic information system. *Fundamentals of Geographic Information Systems: A Compendium*. Falls Church, Virginia: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing/American Congress on Surveying and Mapping, 3-9.
- Chaaban, F., Louche, B., Masson, E., El kattabi, J., Darwishe, H., Battiau-Queney, Y., et Carlier, E (2010,a). Application of GIS and GMS for coastal management (north of France). American Water Resources Association (AWRA) 2010, Spring Specialty Conference « Geographic Information Systems (GIS) and Water Resources VI. Orlando, Florida.
- Chaaban, F., Masson, E., Darwishe, H., Louche, B., El Khattabi, J., Battiau-Queney, Y., et Carlier, E (2010,b). SIG et modélisation hydrogéologique littorale : Application à la plage d'Hardelot (Pas-de-Calais, France). *Géomatique expert* 76 , 58-67.
- Chaaban, F., Darwishe, H., Louche, B., Battiau-Queney, Y., Masson, E., El Khattabi, J., et Carlier, E (2011). Geographical information system approach for environmental management in coastal area (Hardelot-Plage, France). *Environmental Earth Sciences*, 01-11.
- Chainey, S., et Ratcliffe, J. (2005). GIS and Crime Mapping. *Mastering GIS: Technology, Applications and Management series*. John Wiley et Sons, Ltd, 442p.
- Chang, K.-T. (2004). *Programming Arcobjects With VBA: A Task-Oriented Approach*. CRC Press Inc, 360p.
- Chang, K.-T. (2007). *Programming ArcObjects with VBA: A Task-Oriented Approach, Second Edition*. CRC Press, 360p.
- Chatelier, M. (2010). Faisabilité d'un pilote de dénitrification in situ dans un aquifère karstifié, Thèse de l'Université de Poitiers.
- Chen, D., Shams, S., Carmona-Moreno, C., et Leone, A. (2010). Assessment of open source GIS software for water resources management in developing countries. *Journal of Hydro-environment Research* 4 , 253-264.
- Cheng, W., Wang, K., et Zhang, X. (2009). Implementation of a COM-based decision-tree model with VBA in ArcGIS. *Expert Systems with Applications* 37 , 12-17.
- Chiang, W. H. (2005). *3D-Groundwater Modeling with PMWIN, A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Transport Processes. Second Edition*, Springer, 398p.

- Chivoiu, B., Shao, G., Moser, J., et Mills, W. L. (2006). ArcFVS: An integration of a Geographic Information System and Forest Vegetation Simulator. *Science in China: Series E Technological Sciences* 49 , 35-44.
- Clarke, K. C. (1995). *Analytical and computer cartography*. 2nd ed. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, N.J, 352p.
- Clarke, K. C. (1998). *Getting Started with Geographic Information Systems* (2nd Edition). Prentice Hall Companion Website, 338p.
- Clarke, K. C., McLafferty, S. L., et Tempalsk, B. J. (1996). On epidemiology and geographic information systems: a review and discussion of future directions. *Emerging Infectious Diseases* 2 , 85–92.
- Coulibaly, P., Anctil, F., et Bobée, B. (1999). Prédiction hydrologique par réseaux de neurones artificiels : état de l'art. *Canadian Journal of Civil Engineering* 26 , 293-304.
- Cressie, N. (1986). Kriging nonstationary data. *Journal of the American Statistical Association*, vol. 81, no. 395 , 625-634.
- Cressie, N. (1990). The origins of kriging. *Mathematical Geology*, vol. 22, no. 3 , 239-252.
- Cybenko, G. (1989). Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Mathematical Control Signals Systems* 2 , 303–314.
- Daliakopoulos, I. N., Coulibaly, P., et Tsanis, I. k. (2005). Groundwater level forecasting using artificial neural networks. *Journal of Hydrology* 309 , 229-240.
- Dangermond, J. (1988). Introduction and overview of GIS. *Geographic Information Systems Seminar, Data Sharing_Myth or Reality*. Ontario, Canada: Ministry of Natural Resources, 2-19.
- Darwishe, H., Louche, B., Masson, E., El khattabi, J., Chaaban, F., et Carlier, E. (2009). Système d'information géographique pour une meilleure compréhension et gestion des données de modélisation hydrogéologique. *Conférences Francophones - ESRI France*. Paris, France.
- Darwishe, H., Masson, E., Louche, B., El khattabi, J., Chaaban, F., et Carlier, E. (2010). Coupling GIS with Hydrogeological Modeling, case study: Chalk aquifer of Northern France. *American Water Resources Association (AWRA) 2010, Spring Specialty Conference « Geographic Information Systems (GIS) and Water Resources VI*. Orlando, Florida.
- Davis, F. W., Stine, P. A., et Stoms, D. M. (1994). Distribution and conservation status of coastal sage scrub in southwestern California. *Journal of Vegetable Science* 5 , 743-756.

- De Marsily, G. (1981). Quantitative hydrogeology. Groundwater hydrology for engineers. Paris: Masson Eds., Academic press, 214 p.
- Della Rocca, C., Belgiorno, V., et Meriç, S. (2007). Overview of in-situ applicable nitrate removal processes. *Desalination* 204 , 46–62.
- Didier, M. (1990). Utilité et valeur de l'information géographique. Paris: Ed Economica, 225p.
- Dobos, E., Montanarella, L., Nègre, T., et Micheli, E. (2001). A regional scale soil mapping approach using integrated AVHRR and DEM data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 3 , 30-42.
- Dupont, S., & Berthod, M. (1994). Interferometrie radar et deroulement de phase. inria-00074333, version 1.
- Edmunds, W. M., Bath, A. H., et Miles, D. L. (1982). Hydrochemical evolution of the East Midlands Triassic sandstone aquifer, England. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 46, no.11 , 2069–2081.
- Edmunds, W. M., et Walton, N. G. (1983). The Lincolnshire Limestone — Hydrogeochemical evolution over a ten-year period. *Journal of Hydrology* 61 , 201-211.
- ENSG. (2011). Introduction à la programmation en VBA sur ArcGIS. Récupéré sur http://www.forestis.org/Fichiers/geomatique/Cours_vba.pdf
- ESRI. (1986). San Diego Regional Urban Information System Conceptual Design Study: System concept and implementation program, vol. 1. Redlands, California: ESRI Press.
- ESRI France. (s.d.). Consulté le 15-09, (2009,a), sur <http://www.esrifrance.fr/sig1.asp>
- ESRI France. (s.d.). Consulté le 15-09, (2009,b), sur <http://www.esrifrance.fr/sig2.asp>
- ESRI. (2010). ArcGIS Resource Center. Consulté le 07-09, 2010, sur Types d'opérations dans Spatial Analyst:
<http://help.arcgis.com/fr/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//005900000017000000.htm>
- FICCDC. (1988). Federal Interagency Coordinating Committee on Digital Cartography, Consulté le 09-10, 2010, sur
<http://www.atu37.org/blog/2011/01/donnees-sig/>.
- Frind, E. O., Duynisveld, W. M., Strebel, O., et Boettcher, J. (1990). Modeling of multicomponent transport with microbial transformation in groundwater: the Fuhrberg case. *Water Resources Research* 26 , 1707–1719.

- Fruneau, B., et Sarti, F. (2000). Detection of ground subsidence in the city of Paris using radar interferometry: Isolation of deformation from atmospheric artifacts using correlation. *Geophysical Research Letters* 27 , 3981-3984.
- Fruneau, B., Deffontaines, B., Rudant, J.-P., et Le Parmentier, A.-M. (2005). Monitoring vertical deformation due to water pumping in the city of Paris (France) with differential interferometry, Suivi de mouvements verticaux liés à des pompages dans la ville de Paris par interférométrie différentielle. *Comptes Rendus Geosciences* 337 , 1173-1183 .
- Galati, S. R. (2006). *Geographic Information Systems Demystified*. Artech House Publishers, 302p.
- Galloway, D. L., Hudnut, K. W., ngebritsen, S. E., Phillips, S. P., Peltzer, G., Peltzer, G., *et al.*, (1998). Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. *Water Resources Research* 34 , 2573-2585.
- *Geographical Information Systems*. (2010). Consulté le 15-03, 2010, sur <http://www.coastlearn.org/gis/generalconcepts.html>
- Gil, M. V., Blanco, D., Teresa Carballo, M., et Calvo, L. F. (2011). Carbon stock estimates for forests in the Castilla y Leon region, Spain. A GIS based method for evaluating spatial distribution of residual biomass for bio-energy. *Biomass et Bioenergy* 35 , 243_252.
- Giles, L., Kuhn, G. M., et Williams, R. J. (1994). Dynamic recurrent neural networks: theory and applications. *IEEE Transactions on Neural Networks* 5 , 153–155.
- Gratton, Y. (2002, July). Le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale. Consulté le 13-02, 2010, sur Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique, IAG: http://www.iag.asso.fr/articles/krigeage_juillet2002.htm
- Gregory, I. N., et Ell, P. S. (2008). *Historical GIS: Technologies, Methodologies, and Scholarship*. (C. U. Press, Éd.) Cambridge Studies in Historical Geography, 240p.
- Hagan, M. T., Demuth, H. B., et Beale, M. (1996). *Neural network design*. Boston, Massachusetts: PWS Publishing Company.
- Haining, R. (1997). *Spatial data analysis in the social and environmental sciences*. Cambridge: Cambridge University Press, 406P.
- Hamel, P. (1996). *SIG du Grand Caen : conception et mise en œuvre*. Université de Caen, Thèse de doctorat.
- Hamilton, D. A. (1982). *Groundwater modeling: selection, testing and use*. Lansing, Michigan: Michigan Department of Natural Resources, 199p.

- Harbaugh, A. W., et McDonald, M. G. (1996a). User's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model. USGS Open-File Report 96-485.
- Harbaugh, A. W., et McDonald, M. G. (1996b). Programmer's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model. USGS Open-File Report 96-486.
- Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C., et McDonald, M. G. (2000). MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process. U.S. Geological Survey Open-File Report, 121p.
- Haslett, J. R. (1990). Geographic information systems: a new approach to habitat definition and the study of distributions. *Trends in Ecology and Evolution* 5 , 214-218.
- Hassoum, M. H. (1995). *Fundamentals of artificial neural networks*. Cambridge: MIT Press, 511p.
- Hornik, K., Stinchcombe, M., et White, H. (1989). Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks* 2 , 359-366.
- Hu, R. L., Yue, Z. Q., Wang, L. C., et Wang, S. J. (2004). Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. *Engineering Geology* 76 , 65-77.
- Icon Group Ltd. (2002). The 2000-2005 World Outlook for Geographic Information Systems/mapping. Consulté le 15-04, 2010, sur www.icongroupedition.com
- Irie, B., et Miyake, S. (1988). Capabilities of three-layered perceptrons. *Proceedings of the IEEE Second International Conference on Neural Networks*. San Diego, 641-647.
- Isaaks, E. H., et Srivastava, R. M. (1989). *An introduction to applied geostatistics*. Oxford: University Press, 592p.
- Jenkins, D. (2002). Making the leap to ArcView 8.1. *Geospatial Solutions* , 46-48.
- Johnson, L. E. (2009). *Geographic Information Systems in Water Resources Engineering* . CRC Press, Taylor et Francis Group, 316p.
- Journel, A. G., et Huijbregts, C. J. (1981). *Mining Geostatistics*. Academic Press, 600p.
- Kasabov, N. K. (1996). *Foundations of neural networks, fuzzy systems, and knowledge engineering*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 581p.
- Kindleberger, c. (1992). Tomorrow's GIS. *American City et County*. , 38-48.

- Klein, J.-L., et Laurin, S. (1999). L'éducation géographique: formation du citoyen et conscience territoriale. Presses de l'Université du Québec, 270p.
- Klinkenberg, B. (2009). (s.d.). Consulté le 12-04, 2009, sur <http://www.geog.ubc.ca/courses>
- Kodjo, G. T. (2008). Conception et réalisation d'une application de webmapping d'analyse territoriale sur des SIG et bases de données open source : cas du territoire camerounais. Consulté le 07-07, 2010, sur
http://www.memoireonline.com/02/10/3158/m_Conception-et-realisation-dune-application-de-webmapping-danalyse-territoriale-sur-des-SIG-et-bas5.html
- Konikow, I. F., et Reilly, T. E. (1998). Groundwater Modeling (Chapter 20). In: The hand Book of groundwater Engineering. Boca Raton: J. W. Delleur, ed., CRC press.
- Korom, S. F. (1992). Natural denitrification in the saturated zone: a review. Water Resources Research 28 , 1657–1668.
- Koutnik, M. A., et Padilla, D. K. (1994). Predicting the spatial distribution of Dreissena polymorpha (zebra mussel) among inland lakes of Wisconsin: modeling with a GIS. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 51 , 1189-1196.
- Kralisch, S., Fink, M., et Flügel, W. A. (2003). A neural network approach for the optimization of watershed management. Environmental Modeling et Software 18 , 815–823.
- Krige, D. G. (1951). A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa 52 , 119-139.
- Lacherez-Bastin. (2005). Contribution à l'étude des vitesses de migration des nitrates dans le sol et la zone non saturée de la nappe de la craie Modélisation en intégrée des nitrates dans le bassin versant de l'Escrebieux. Thèse de l' Université de Lille 1.
- Lam, N. S. (2009). Spatial Interpolation . International Encyclopedia of Human Geography , 369-376.
- Lasserre, F., Razack, M., et Banton, O. (1999). A GIS-linked model for the assessment of nitrate contamination in groundwater. Journal of Hydrology 224 , 81–90.
- Laurini, R., et Thompson, D. (1992). Fundamentals of Spatial Information Systems. Academic Press, 680p.
- Le Bideau, L. (2008). Exemple de phénomènes de dénitrification naturelle dans les aquifères sédimentaires. Revue de géologues numéro 159 , 4–8.

- Le Coz, M., Delclaux, F., Genthon, P., et Favreau, G. (2009). Assessment of Digital Elevation Model (DEM) aggregation methods for hydrological modeling: Lake Chad basin, Africa. *Computers et Geosciences* 35 , 1661-1670 .
- Lehmann, A., Jaquet, J. M., et Lachavanne, J. B. (1997). A GIS approach of aquatic plant spatial heterogeneity in relation to sediment and depth gradients, Lake Geneva, Switzerland. *Aquatic Botany* 58 , 347-361.
- Leplat, J. (1985). Notice explicative de la feuille Hazebrouck a 1/50 000. Orléans - France: Éditions du B.R.G.M. .
- Lieste, R., Kovar, K., Verlouw, J. W., et Gan, J. (1993). Development of the GIS-based RIVM national groundwater model for the Netherlands. *HydroGIS 93: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources. Proceedings of the Vienna Conference: IAHS Publication* 211, 641–652.
- Lippmann, R. P. (1987). An introduction to computing with neural nets. *IEEE Acoustics, Speech and Signal Processing Magazine* 3 , 4–22.
- Liu, W., Zhang, B., Wang, Z., Song, K., Liu, D., Ren, C., *et al.*, (2010). Development of a GIS-based decision support system for eco-environment and natural resources of Northeast Asia. *Procedia Environmental Sciences* 2 , 906–913.
- Louche, B. (1997). Limites littorales de la nappe de la craie dans la région Nord Pas-de-Calais - Relations eaux souterraines-eaux superficielles-mer. Publication N 24. I.S.S.N. 0291 - 3062. Thèse de l'Université de Lille1.
- Maguire, D. J. (1991). An overview and definition of GIS. *Geographical information systems principles and applications*, ed. D. J. Maguire, M. F. Goodchild, and D. W. Rhind (pp. 9–20). New York: Longman Scientific and Technical: John Wiley and Sons.
- Maison, P. (2000). Un modèle hydrologique de suivi de la pollution diffuse en bassin versant (Approche mécaniste simplifiée de la zone non saturée). Thèse de l'Institut National de Polytechnique de Toulouse, France.
- Mandle, J. (2002). *Groundwater Modelling Guidance* . Groundwater Modelling Program., Michigan Department of Environmental Quality, 55p.
- Mane, M. S., Singh, D. K., Singh, A. K., et Bhattacharya, A. K. (2007). Development of GIS interface Con2grid for groundwater model. *Current Science* 92, 1297-1302 .
- Mariotti, A. (1986). La dénitrification dans les eaux souterraines, principes et méthodes de son identification. *Journal of Hydrology* 88 , 1-23.
- Mariotti, A., Landreau, A., et Simon, B. (1988). ¹⁵N isotope biogeochemistry and natural denitrification process in groundwater: Application to the chalk aquifer of northern France. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52 , 1869–1878.

- Massonnet, D., et Feigl, K. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Review of Geophysics* 36 , 441-500 .
- Matheron, G. (1963). Principles of Geostatistics. *Economic Geology* 58 , 1246-1268.
- Matthes, G. (1982). Properties of groundwater . New York, N.Y: John Wiley et Sons, 397p.
- McCulloch, W. S., et Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas imminent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics* 5 , 115–133.
- McDonald, M. G., et Harbaugh, A. W. (1984). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. US Geological Survey Open-File report 83-528.
- McDonald, M. G., et Harbaugh, A. W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. US Geological survey techniques of water-resources investigations. Reston, Virginia: US Geological Survey, 586p.
- McKinney, D. C., et Cai, X. (2002). Linking GIS and water resources management models: an object-oriented method. *Environmental Modelling et Software* 17 , 413-425.
- Meijerink, A. M., Brouwer, H. A., Mannaerts, C. M., et Valenzuela, C. R. (1994). Introduction to the use of geographic information systems for practical hydrology. Venice: UNESCO International Hydrological Programme : Publication No. 23.
- Michel, J.-F., Drayb, S., de La Rocquea, S., Desquesnesa, M., Solanoc, P., De Wispelaered, G., *et al.*, (2002). Modelling bovine trypanosomosis spatial distribution by GIS in an agro-pastoral zone of Burkina Faso. *Preventive Veterinary Medicine* 56 , 5-18 .
- Mihai, S., Lundberg, J., McFarlane, D. A., et Chandler, B. (2010). Pengelly's legacy reconsidered: a GIS approach to spatial analysis of palaeontological and archaeological collections from Kents Cavern, England. *Proceedings of the Geologists' Association* 121 , 319–325.
- Mora, O., Mallorqui, J. J., et Broquetas, A. (2003). Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41 , 2243– 2253.
- Najjar, Y. M., Basheer, I. A., et Hajmeer, M. N. (1997). Computational neural networks for predictive microbiology: I. Methodology. *International Journal of food microbiology* 34 , 27-49.
- Narumalani, S., Jensen, J. R., Althausen, J. D., Burkhalter, S. G., et Mackey, H. (1997). Aquatic macrophyte modeling using GIS and logistic multiple regression. *Photogrammetric Engineering et Remote Sensing* 63 , 41-49.

- NASA . (2003). SRTM. Récupéré sur <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/>
- NASA. (2009). Shuttle Radar Topography Mission. Consulté le 12-06, 2010, sur <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm>
- Neves, R., Ertürk, A., Chubarenko, I., Azzellino, A., Srdjevic, B., Chubarenko, B., *et al.*, (2008). Decision Support Systems and Tools. I. E. Gönenc, A. Vadineanu, J-P. Wolflin and R-C. Russo eds, Proceedings of the NATO SPS (NFA) 5th Workshop on Sustainable Use and Development of Watersheds for Human Security and Peace, Kumburgaz. Istanbul, Turkey, 455-482 .
- O'Brien, J., et Marion, G. (1997). Les Systemes D'information De Gestion. De Boeck Université, 800p.
- Orzol, L. L. (1997). User's guide for MODTOOLS: Computer programs for translating data of Modflow and MODPATH into geographic information system files. U.S. Geological Survey Open File Report.
- Paegelow, M. (2004). Géomatique et géographie de l'environnement De l'analyse spatiale à la modélisation prospective. Habilitation à Diriger des Recherches, l'Université de Toulouse, 211 p.
- Pelle, S. (2002). La théorie des Graphes. Cours conçu au sein de l'Équipe Formats d'Échange du Service de la documentation géographique, IGN, paris.
- Pereira, J. M., et Itami, R. M. (1991). GIS-based habitat modeling using logistic multiple regression: a study of the Mt Graham red squirrel. *Photogrammetric Engineering et Remote Sensing* 57 , 1475-1486.
- Pirot, F., et Saint-Gérand, T. (2004). Du concept HBDS à la geodatabase topologique: 25 ans les séparent. Conférences Francophones - ESRI France. Paris, France.
- Pirot, F., Saint Gerand, T., Gauthier, E., et Banza-Nsungu, A. (2005). L'analyse spatiale versus algèbre de cartes sous ArcGIS, Des exemples en sciences de l'homme et de la société. Conférence Francophone ESRI, SIG 2005. paris.
- Postma, D., Boesen, C., Kristiansen, H., et Larsen, F. (1991). Nitrate reduction in an unconfined sandy aquifer: water chemistry, reduction processes, and geochemical modeling. *Water Resources Research* 27 , 2027–2045.
- Préaux, C. (1986). Constat de l'état actuel de la distribution publique et prospective d'aménagement . Rapport inédit BRGM, 86 SGN 435 NPC.
- Qi, X., Tong, S., et Hu, W. (2010). Spatial distribution of suicide in Queensland,Australia. Récupéré sur <http://www.biomedcentral.com/1471-244X/10/106>

- Rowshon, M. K., Amin, M. S., Lee, T. S., et Shariff, A. R. (2009). GIS-Integrated Rice Irrigation Management Information System for a River-Fed Scheme. *Water Resour Manage* 23 , 2841–2866.
- Rumelhart, D., Hinton, G., et Williams, R. (1986). Learning internal representations by error Propagation. (J. L. Foundations. David E. Rumelhart, Éd.) *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition* 1 , 318-362.
- Saint-Gérand, T. (2002). S.I.G. : Structures conceptuelles pour l'analyse spatiale, Habilitation. Rouen, France: Université de Rouen, 187 p.
- Sarti, F., Arkin, Y., Chorowicz, J., Karnieli, A., et Cunha, T. (2003). Assessing pre- and post-deformation in the southern Arava Valley segment of the Dead Sea Transform, Israel by differential interferometry. *Remote sensing of environment* 86 , 141-149 .
- Sebillotte, M. (1995). L'opération FERTI-MIEUX : Oléagineux et environnement = Operation FERTI-MIEUX. OCL. Oléagineux, corps gras, lipides 2 , 459-461.
- Serhal, H. (2006). Influence des pressions anthropiques sur l'évolution des concentrations en nitrates dans la nappe de la craie du Nord de la France. (Applications au Cambrésis et nord Audomarois). Thèse de l'Université de Lille 1, France.
- Serhal, H., Bernard, D., El Khattabi, J., Bastin-Lacherez, et Shahrour, I. (2009). Impact of fertilizer application and urban wastes on the quality of groundwater in the Cambrai Chalk aquifer, Northern France. *Environmental Geology* 57 , 1579–1592.
- Shamsi, U. M. (2005). GIS applications for water, wastewater, and stormwater systems. Boca Raton: Taylor et Francis, 413p.
- Siart, C., Bubenzer, O., et Eitel, B. (2009). Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete. *Geomorphology* 112 , 106-121 .
- Sigg, L., Behra, P., et Stumm, W. (2001). Chimie des milieux aquatiques. Chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement. 3rd. Dunod, 567p.
- Smith, R. L., Howes, B. L., et Duff, J. H. (1991). Denitrification in nitrate-contaminated groundwater: occurrence in steep vertical geochemical gradients. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 55 , 1815-1825.
- Sogreah ingénierie. (1998). Etude du phénomène de dénitrification naturelle dans la craie sénonienne à l'ouest de Béthune(62).étude réalisé pour le syndicat mixte pour le schéma directeur de l'arrondissement de Béthune, Rapport Final. France.

- Société française de photogrammétrie et télédétection. (1989). Consulté le 07-07, 2010, sur <http://www.cartographie.ird.fr/publi/documents/sig1.pdf>
- SSG Software. (2002). The Scientific Software Group, Washington . Récupéré sur <http://www.scisoftware.com>
- Star, et Estes. (1990). Geographic information systems: An introduction. Prentice Hall: Englewood Cliffs, N.J., USA. 303 p.
- Strebel, O., Böttcher, J., et Fritz, P. (1990). Use of isotope fractionation of sulfate sulfure and sulphate-oxygen to asses bacterial desulfurisation in a sandy aquifer. *Journal of Hydrology* 121 , 155-172.
- Strickland, T., et Korleski, C. (2007). Ground Water Flow and Fate and Transport Modeling. State of Ohio Environmental Protection Agency.Division of Drinking and Ground Waters. Chapter 14 , 32p.
- Techno-Science.net. (2009). Consulté le 15-11, 2009, sur Modèle numérique de terrain: <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=4877>
- Tomás, R., Márquez, Y., Lopez-Sanchez, J. M., Delgado, J., Blanco, P., Mallorquí, J. J., *et al.*, (2005). Mapping ground subsidence induced by aquifer overexploitation using advanced Differential SAR Interferometry: Vega Media of the Segura River (SE Spain) case study. *Remote Sensing of Environment* 98 , 269-283.
- Tomlin, D. C. (1990). Geographic Information Systems and Cartographic Modeling. Prentice Hall College Div, 572p .
- Trudell, M. R., Gillham, R. W., et Cherry, J. A. (1986). An in-situ study of the occurrence and rate of denitrification in a shallow unconfined sand aquifer. *Journal of Hydrology* 83 , 251–268.
- Tsou, M.-S., et Whittemore, D. O. (2001). User interface for groundwater modeling: Arc View Extension. *Journal of Hydrologic Engineering* 6 , 251–258.
- Types of Data Used in a GIS. (2007, 10 25). Consulté le 11-02, 2009, sur <http://www.cookbook.hlurb.gov.ph/book/export/html/203>
- Walsh, S. J., et Davis, F. W. (1994). Applications of remote sensing and geographic information systems in vegetation science [introduction]. *Journal of Vegetable Science* 5 , 610-613.
- Wang, M. X., Liu, G. D., Wu, W. L., Bao, Y. H., et Liu, W. N. (2006). Prediction of agriculture derived groundwater nitrate distribution in North China Plain with GIS-based BPNN. *Environmental Geology* 50 , 637-644.

- Wang, S., Shao, J., Song, X., Zhang, Y., Huo, Z., et Zhou, X. (2008). Application of Modflow and geographic information system to groundwater flow simulation in North China Plain. *Environmental Geology* 55 , 1449-1462.
- Waterloo Hydrogeologic, Inc. (WHI, Waterloo, Ontario,Canada). (s.d.). Récupéré sur <http://www.waterloohydrogeologic.com>
- Watkins, D. W., McKinney, D. C., et Maidment, D. R. (1996). Use of geographic information systems in groundwater flow modeling. *Journal of Water Resources Planning and Management* 122 , 88–96.
- Welch, R., et Remillard, M. M. (1988). Remote sensing and geographic information system techniques for aquatic resource evaluation. *Photogrammetric Engineering et Remote Sensing* 54 , 177-185.
- Welch, R., et Remillard, M. M. (1992). Integration of GPS, remote sensing, GIS techniques for coastal resource management. *Photogrammetric Engineering et Remote Sensing* 58 , 1571-1578.
- Wen-Hsing, C. (2005). *3D-Groundwater Modeling with PMWIN: A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Transport Processes*. Springer, 414p.
- Wheeler., D. J. (1993). Commentary: linking environmental models with geographic information systems for global change research. *Photogrammetric Engineering et Remote Sensing* 59 , 1497-1501.
- Woo, K. S., Jo, J. H., Basu, P. K., et Ahn, J. S. (2009). Stress intensity factor by p-adaptive refinement based on ordinary Kriging interpolation. *Finite Elements in Analysis and Design* 45 , 227-234.
- Wriedt, G., et Rode, M. (2006). Modelling nitrate transport and turnover in a lowland catchment system. *Journal of Hydrology* 328 , 157– 176.
- Yang, F.-G., Cao, S.-Y., Liu, X.-N., et Yang, K.-J. (2008). Design of groundwater level monitoring network with ordinary kriging. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B* , 339-346.
- Yesilnacar, M. I., Sahinkaya, E., Naz, M., et Ozkaya, B. (2007). Neural network prediction of nitrate in groundwater of Harran Plain, Turkey. *Environmental Geology* 56 , 19-25.
- Yu, B., Liu, H., Gao, Y., et Wu, J. (2008). Object-based algorithms and methods for quantifying urban growth pattern using sequential satellite images. *Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability, Proc. of SPIE Vol. 7083, 708305*, (2008) .

- Zhang, G. Z., Zhao, W. N., et Liu, H. (2010). A Gis-Based Decision Support System for Water Trade Management of River Basin Cities. *Procedia Environmental Sciences* 2 , 650-655.
- Zhao, W., Li, Y., et Ma, L. (2010). Dynamic visualization of water quality and quantity in main canal of South-to-north Water Transfer East Route Project in Shandong Province. *International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, MACE2010*. 1838-1841.
- Zheng, C. C. (1990). MT3D, A modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems. Inc for the U.S. Environmental Protection Agency, Ada, Okla., 171 p.
- Zhou, F., Guo, H., et Hao, Z. (2007). Spatial distribution of heavy metals in Hong Kong's marine sediments and their human impacts: A GIS-based chemometric approach. *Marine Pollution Bulletin* 54 , 1372–1384.
- Zhou, Q., Lees, B., et Tang, G.-a. (2008). *Advances in Digital Terrain Analysis*. Springer, 462p.

