



HAL
open science

Analyse statistique de la dynamique de la nappe d'Alsace

Laurent Longuevergne

► **To cite this version:**

Laurent Longuevergne. Analyse statistique de la dynamique de la nappe d'Alsace. 2006. hal-00708077

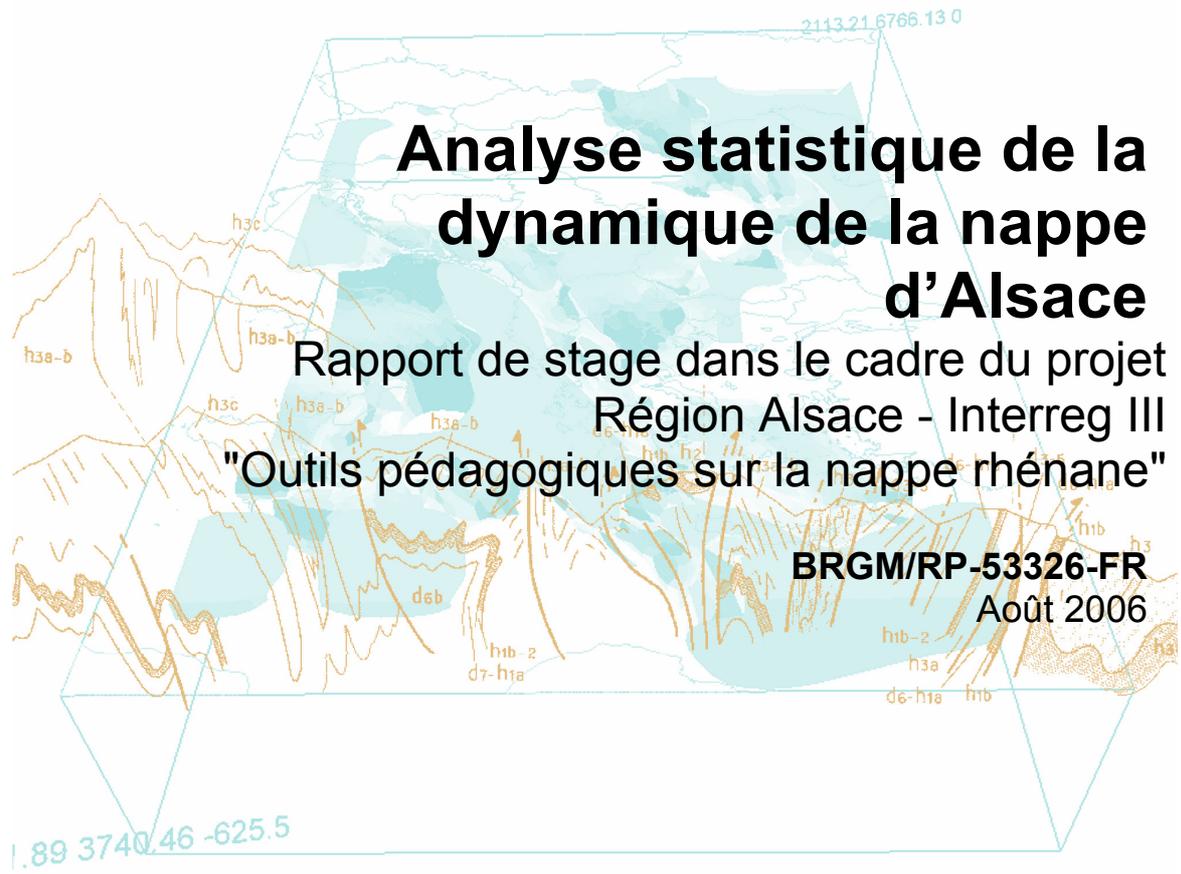
HAL Id: hal-00708077

<https://hal.science/hal-00708077v1>

Submitted on 14 Jun 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Analyse statistique de la dynamique de la nappe d'Alsace

Rapport de stage dans le cadre du projet
Région Alsace - Interreg III
"Outils pédagogiques sur la nappe rhénane"

BRGM/RP-53326-FR
Août 2006



Analyse statistique de la dynamique de la nappe d'Alsace

Rapport de stage dans le cadre du projet
Région Alsace - Interreg III
"Outils pédagogiques sur la nappe rhénane"

BRGM/RP-53326-FR

Août 2006

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM

L. Longuevergne



Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Mots clés : piézométrie, Alsace, Haut-Rhin, Bas-Rhin, Pays de Bade, analyse en composante principale, géostatistique

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Longuevergne L. (2006) - Analyse statistique de la dynamique de la nappe d'Alsace. Rapport de stage dans le cadre du projet Région Alsace - Interreg III "Outils pédagogiques sur la nappe rhénane". BRGM RP-53326-FR, 80 p.

Synthèse

Le niveau piézométrique de la nappe alluviale d'Alsace fait l'objet de variations importantes gouvernées par des phénomènes climatiques comme les précipitations et l'évapotranspiration ainsi que par le régime des rivières (le Rhin et les rivières vosgiennes).

L'objectif de la présente étude est de mettre au point une méthodologie permettant de connaître le comportement global de la nappe d'Alsace. Ce travail met en évidence les capacités de description de l'analyse en composantes principales sur 149 chroniques piézométriques réparties sur la nappe d'Alsace. Cette méthode d'analyse des données décrit le comportement global d'un système par le biais de signaux caractéristiques classés du plus important au plus local.

Ainsi, la principale contribution aux variations du niveau piézométrique de la nappe d'Alsace, représentant 44 % de la variance globale, a été interprétée comme l'apport des rivières vosgiennes. Ensuite, 20 % du comportement est expliqué par les pluies efficaces dans les zones de faible épaisseur de la zone non saturée. L'apport du Rhin représente enfin 9 % du comportement.

A ces 3 signaux principaux ont été adjoints deux signaux de correction qui mettent en évidence les variations plus locales représentatives de différents types d'aquifère, mais également une composante anthropique non négligeable au travers de différents aménagements. L'ensemble de ces 5 signaux permet de décrire plus de 80 % de la variance de la nappe d'Alsace.

Au point de vue spatial, l'ensemble des variogrammes des trois premiers vecteurs propres principaux (mais également le cinquième) met en évidence des phénomènes continus et des structures marquées avec des portées variant entre 10 et 20 km. On touche ainsi à des caractères moyens variant sur l'ensemble de la nappe et décrivant au mieux une réalité physique. Une cartographie permet d'afficher les zones de même comportement par rapport à chaque composante comme l'influence du Rhin, qui reste essentiellement limitée à ses abords immédiats jusqu'à une distance de 3 kilomètres.

Cette analyse géostatistique permet de tracer des surfaces piézométriques lissées stationnaires ou transitoires, mais également de mettre en évidence quelques caractéristiques descriptives intéressantes qui peuvent être utilisées comme des outils de gestion du territoire et qui viennent en complément d'analyses locales (de modèles conceptuels en particulier) ou de modélisations hydrodynamiques.

Dans une deuxième phase, l'analyse a été étendue au côté badois de la nappe afin de pouvoir réaliser des représentations transfrontalières de différentes situations de référence ainsi que des animations à but pédagogique de la surface piézométrique de l'ensemble de la nappe du Rhin supérieur.

Remerciements

Me voici arrivé au terme de ce projet de 2 mois avec le BRGM, l'APRONA et la Région Alsace, je me permets donc de retracer, à la louche par ces quelques lignes (1), quelques unes des étapes du parcours qui ont contribué à le faire aboutir.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mon estime à Philippe Elsass ... qu'il se rassure, je ne viens cette fois-ci m'appuyer sur le cadre de sa porte que pour rendre ce rapport, et non pour la sempiternelle séance de questionnement et de discussion entre autres géophysiques (mais, j'en suis sûr, ça viendra tout seul). Je laisserai les 3 petits points clore ce paragraphe ...

Bien sûr, je remercie également Nicolas Florsch qui m'a largement aiguillé lors de mon stage de fin d'étude : cette méthode de traitement des données a été testée avec lui sur une partie de l'aquifère rhénan et s'est révélée des plus prometteuses. J'espère pouvoir continuer sur cette voie avec lui, mais ceci est une autre histoire.

Les deux mois passés dans les locaux du BRGM Alsace ont été des plus agréables, et je n'ai pu qu'apprécier la simplicité et la bonne humeur de toute l'équipe et des fameux stagiaires. Je tiens à endosser l'entière responsabilité de la pollution sonore et sismique (1), dont l'épicentre se situait au fond du couloir, vers la bibliothèque, qui a été occasionné durant cette période sous la contrainte psychologique de mon camarade Thomas. Merci à tous.

Enfin, une part importante des techniques et informations utilisées dans cette "investigation" proviennent de sites Internet, référencés en bibliographie ou non. Je tiens à remercier toutes les personnes qui contribuent à "partager" de l'information gratuite, et qui partagent cette idéologie : celle que la connaissance n'appartient à personne.

(1) : merci d'adresser vos remarques, critiques, reproches, réprimandes, blâmes ou même injures à laurent.longuevergne@wanadoo.fr

Sommaire

1. Données d'expérimentation.....	13
1.1. DONNEES PIEZOMETRIQUES	13
1.2. DONNEES PLUVIOMETRIQUES – EVAPOTRANSPIRATION.....	13
1.3. DONNEES DE DEBIT DES RIVIERES (HORS RHIN).....	13
1.4. DONNEES DE DEBIT DU RHIN.....	14
1.5. ZONE D'ETUDE	15
2. Eléments d'hydrologie de la nappe d'Alsace.....	16
2.1. RESEAU HYDROGRAPHIQUE SIMPLIFIE	16
2.2. APPORTS DES RIVIERES VOSGIENNES.....	17
2.3 ECHANTILLONNAGE TEMPOREL.....	18
2.4. CARACTERISTIQUES STATIQUES	19
2.4.1 Niveau piézométrique moyen	19
2.4.2. Variance du signal piézométrique	20
3. Analyse des données piézométriques sur la nappe d'Alsace.....	21
3.1. PRINCIPE DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES.....	21
3.1.1. Point de vue analytique	21
3.1.2. Point de vue statistique	22
3.1.3. Remarques particulières.....	22
3.2. PROGRAMME IMPLEMENTE.....	23
3.3. ANALYSE VARIOGRAPHIQUE.....	23
3.4. CHOIX ET MISE EN FORME DES DONNEES	24
3.5. INTERPRETATION DES INFORMATIONS GLOBALES	25
3.5.1. Valeurs propres du système	26
3.5.2. Projections sur chaque vecteur propre.....	27
3.5.3. Premier signal caractéristique : Apport en eau des rivières (hors Rhin)...	29

3.5.4. Second signal caractéristique : Apport de la pluviométrie (réaction immédiate)	32
3.5.5. Troisième signal caractéristique : Apport du Rhin.....	35
3.5.6. Quatrième signal caractéristique.....	38
3.5.7. Cinquième signal caractéristique	40
3.5.8. Partie non décrite.....	42
3.5.9. Erreurs de description	44
3.6. CARACTERISTIQUES DU MODELE STATISTIQUE	47
3.6.1. Reconstitution des chroniques initiales	48
3.6.2. Interpolation de données manquantes.....	54
3.6.3. Echantillonnage spatial de la nappe d'Alsace.....	56
3.7. DETERMINATION DES ZONES D'INFLUENCE	58
3.7.1. Méthode utilisée	58
3.6.2. Contribution des rivières (hors Rhin).....	60
Contribution des précipitations (réaction immédiate)	61
Contribution du Rhin.....	62
Contribution non séparable de l'III et de la pluviométrie.....	64
Qualité de description des 3 apports déterminés	65
4. Tracé de surfaces piézométriques	67
4.1. ANALYSE DES DONNEES ALLEMANDES	67
4.2. ANIMATION	67
4.3. SITUATIONS DE REFERENCES	68
4.3.1. Carte des moyennes eaux d'octobre 1986	69
4.3.2. Carte des basses eaux de septembre 1991	70
4.3.3. Carte des hautes eaux d'avril 1988.....	71
4.3.4. Carte des moyennes eaux de juin 1996.....	72
4.3.5. Carte des basses Eaux d'août 2003	73
4.3.6. Carte des hautes eaux de décembre 2002.....	74
5. Conclusions.....	75
6. Bibliographie	77
PUBLICATIONS	77
SITES INTERNET	77

Liste des illustrations

Fig. 1 : Fond de carte utilisé. La limite l'aquifère principal en vert, en rouge l'ensemble des piézomètres, en bleu le système hydrologique simplifié, en noir les principales villes.....	15
Fig. 2 : Réseau hydrographique simplifié de la nappe d'Alsace. En noir, les principales villes, du nord au sud : Haguenau, Strasbourg, Sélestat, Colmar et Mulhouse	16
Fig. 4 : Superposition des débits (normalisés) de l'III (en rouge), des précipitations efficaces (en bleu) et d'une chronique piézométrique (carrés noirs).....	18
Fig. 5 : Carte krigée du niveau piézométrique moyen de la nappe (en mètres après correction d'une surface quadratique) permettant de définir les sens d'écoulements privilégiés.	19
Fig.6 : Carte krigée de l'écart type des variations piézométriques (mètres).....	20
Fig. 6 : Chronique du piézomètre 03078X0014 d'Ebersheim, retenu pour l'analyse, alors qu'elle contenait des lacunes non négligeables – et mal interpolées.....	25
Fig.7 : répartition des valeurs propres, de la variance qu'elles expliquent (ronds rouges) et du cumul de la variance expliquée (croix rouges).	26
Fig. 8 : Boîtes à moustaches des projections sur chaque vecteur propre	28
Fig. 9 : Premier signal caractéristique : apport des rivières.....	29
Fig. 10 : Etude basse fréquence du premier signal caractéristique : apports annuels des rivières (barres bleues) et contribution basse fréquence du premier signal (rouge).	30
Fig. 11 : Signaux hautes fréquences de l'apport hebdomadaire des rivières (barres bleues) et du premier vecteur propre.....	30
Fig. 12 : Variogramme des projections de chaque piézomètre sur le premier vecteur propre.....	31
Fig. 13: Carte krigée des projections de chaque piézomètre sur le premier vecteur propre.....	31
Fig. 14 : Second signal représentatif	32
Fig. 15 : Signaux hautes fréquences des pluies efficaces hebdomadaires (barres bleues) et du second vecteur propre	33
Fig. 16 : Etude basse fréquence du second signal caractéristique : cumul annuel des pluies efficaces (barres bleues) et contribution basse fréquence du second signal (rouge).....	33
Fig. 17 : Variogramme des projections de chaque piézomètre sur le second vecteur propre.....	34
Fig. 18 : Carte krigée des projections de chaque piézomètre sur le second vecteur propre.....	34

Fig. 19 : Troisième signal représentatif	35
Fig. 20 : Signaux hautes fréquences du débit hebdomadaire du Rhin (barres bleues) et du troisième vecteur propre	36
Fig. 21 : Etude basse fréquence du troisième signal caractéristique : débit annuel du Rhin (barres bleues) et contribution basse fréquence du second signal (rouge).	36
Fig. 22 : Variations piézométriques basses fréquences du piézomètre 04137X0018 à Habsheim.....	37
Fig. 23 : Variogramme des projections de chaque piézomètre sur le troisième vecteur propre	37
Fig. 24 : Carte krigée des projections de chaque piézomètre sur le troisième vecteur propre.	37
Fig.25 : Quatrième signal représentatif	38
Fig. 26 : Carte krigée des projections de chaque piézomètre sur le quatrième vecteur propre.	39
Fig. 29 : Cinquième signal représentatif.....	40
Fig. 30 : Carte krigée des projections de chaque piézomètre sur le cinquième vecteur propre.	41
Fig. 31 : Vingtième signal représentatif	42
Fig. 32 : Carte krigée des projections de chaque piézomètre sur le vingtième vecteur propre.	43
Fig.33 : Résidus de la modélisation effectuée en fonction du numéro du piézomètre et.....	44
Fig. 34 : Variogramme des erreurs moyennes	45
Fig. 35 : Carte krigée des erreurs moyennes (mètres).....	46
Fig. 36 : Différents signaux en superposition avec la chronique piézométrique originale : du haut en bas : signal reconstitué, apport principal (rivières),.....	48
Fig. 37 : Différents signaux en superposition avec la chronique piézométrique originale : de gauche à droite et du haut en bas : apport des précipitations, apports du Rhin, signaux de correction.	49
Fig. 38 : Différents signaux en superposition avec la chronique piézométrique originale : du haut en bas : signal reconstitué, apport principal (rivières).	50
Fig. 39 : Différents signaux en superposition avec la chronique piézométrique originale : de gauche à droite et du haut en bas : apport des précipitations, apports du Rhin, signaux de correction.	51

Fig. 40 : Différents signaux en superposition avec la chronique piézométrique originale : du haut en bas : signal reconstitué, apport principal (signal du Rhin estival).....	52
Fig. 41 : Différents signaux en superposition avec la chronique piézométrique originale : de gauche à droite et du haut en bas : apports du Rhin, apports des précipitations, signaux de correction.	53
Fig. 42 : Interpolation du signal du piézomètre 03078X0014 d'Ebersheim	54
Fig. 43 : Carte krigée des erreurs moyennes (en pourcent). En noir, les piézomètres utilisés pour l'étude, en rouge, ceux qui participent également à l'échantillonnage actuel.	57
Fig. 44 : Carte krigée de la contribution des rivières au signal piézométrique.	60
Fig. 45 : Carte krigée de la contribution des pluies efficaces au signal piézométrique.	61
Fig. 46 : Carte krigée de la contribution du Rhin au signal piézométrique.	62
Fig. 47 : Carte krigée de la décroissance de l'effet du Rhin avec la distance.	63
Fig. 48 : Carte krigée de la contribution non séparable des rivières et de la pluviométrie	64
Fig. 49 : Carte krigée de la qualité de description des 3 principaux apports déterminés.	65
Fig. 50 : ME octobre 1986 - Variations du niveau piézométrique par rapport à la moyenne (mètres).....	69
Fig. 51 : BE septembre 1991 - Variations du niveau piézométrique par rapport à la moyenne (mètres).....	70
Fig. 52 : HE avril 1988 - Variations du niveau piézométrique par rapport à la moyenne (mètres).....	71
Fig. 53 : ME juin 1996 - Variations du niveau piézométrique par rapport à la moyenne (mètres).....	72
Fig. 54 : BE août 2003 - Variations du niveau piézométrique par rapport à la moyenne (mètres).....	73
Fig. 55 : HE décembre 2002 - Variations du niveau piézométrique par rapport à la moyenne (mètres).....	74

Introduction

La présente étude a été réalisée dans le cadre du Projet Interreg 3 « Outils pédagogiques sur la nappe rhénane » sous maîtrise d'ouvrage de la Région Alsace. Elle s'est déroulée à l'APRONA (Association pour la Protection de la Nappe d'Alsace) en juin-juillet 2004 avec l'appui logistique et technique du Service géologique régional Alsace (BRGM).

Ce travail s'inscrit dans une volonté de terminer un projet initié pendant mon stage de fin d'études d'école d'ingénieur effectué dans le laboratoire de géophysique appliquée (UMR Sisyphe) de Paris VI, sous la tutelle de Nicolas Florsch, au cours duquel je me suis attaché à cerner l'impact de différents phénomènes hydrologiques sur le champ de gravité et qui avait donné des résultats intéressants pour comprendre le comportement de la nappe.

En effet, ce projet a permis de préciser l'interprétation des informations déterminées par l'analyse statistique sur la base d'un ensemble de données plus conséquent, avec l'appui de personnes connaissant bien la nappe d'Alsace et pouvant compléter l'analyse par l'apport de données géologiques et hydrologiques supplémentaires.

La nappe phréatique d'Alsace constitue un système d'étude tout à fait privilégié pour un tel projet, pour plusieurs raisons :

- I) L'aquifère forme un énorme réservoir – la plus importante réserve d'eau souterraine d'Europe – utilisé pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation agricole, les usages industriels. Les enjeux sont tels qu'il est nécessaire de mieux connaître la nappe pour mieux la protéger et maîtriser les aménagements.
- II) La nappe est bien connue, instrumentée et surveillée. Beaucoup d'études ont déjà été conduites, et représentent autant de données supplémentaires pour interpréter les résultats de la présente étude et les confronter aux informations complémentaires.
- III) L'aquifère de la nappe d'Alsace est accueilli par les alluvions apportées par le Rhin et ses affluents en provenance du Sundgau et des Vosges. La variabilité latérale de ces alluvions reste réduite dans le centre de la plaine d'Alsace, et devient plus importante vers les zones de bordure moins perméables (piémont vosgien, Sundgau...). Il sera ainsi possible de se rendre compte du comportement de la méthode mathématique dans des domaines hétérogènes.

- IV) Enfin, l'aquifère n'est pas lié à une seule rivière, mais amortit des apports en eau d'origines très différentes : les pluies du climat semi-continental de la région, les apports estivaux du Rhin et les crues printanières des rivières vosgiennes.

L'ensemble des caractéristiques de la nappe identifiées dans ce travail repose sur la capacité de l'analyse en composantes principales à rechercher des informations qui expliqueraient au mieux un ensemble de signaux, l'étude touche donc au comportement global de la nappe d'Alsace. En ce sens, on se place à des échelles qui vont du kilomètre à l'ensemble de la nappe d'Alsace, toute description locale étant impossible.

L'étude a été conduite en deux temps. Une première phase d'analyse a été conduite sur un ensemble de 149 piézomètres sélectionnés, situés en Alsace. Cette étude a servi de base pour l'interprétation des différents processus et signaux caractéristiques déterminés par la méthode mathématique.

Dans un second temps, une autre analyse a été menée sur un ensemble de 195 chroniques franco-allemandes situées dans la nappe des alluvions de la vallée du Rhin supérieur ou à proximité immédiate. Cette dernière analyse a permis de dresser les cartes de situations de référence et de créer l'animation des variations piézométriques de la nappe transfrontalière. Cette analyse plus globale a donné des résultats similaires à celle menée côté alsacien, mais l'interprétation des résultats n'a pu être menée jusqu'au bout faute d'interlocuteurs du côté allemand.

1. Données d'expérimentation

1.1. DONNEES PIEZOMETRIQUES

L'APRONA (Association pour la PROtection de la Nappe d'Alsace) gère un ensemble de 200 piézomètres répartis dans la partie française de la nappe de la vallée du Rhin supérieur. Dans cette étude, 149 ouvrages suivis par l'APRONA, répartis sur l'ensemble de la nappe d'Alsace, ont été utilisés, les 50 autres piézomètres ayant été installés après 1986, ou possédant des chroniques contenant trop de lacunes.

Les données du côté badois ont été fournies par la LfU (Landesanstalt für Umweltschutz¹). Cinquante chroniques piézométriques allemandes ont été intégrées à la deuxième partie de l'étude.

Toutes les données sont exprimées en cote absolue (mètres NGF).

1.2. DONNEES PLUVIOMETRIQUES – EVAPOTRANSPIRATION

L'interprétation des signaux temporels issus du traitement mathématique a nécessité des données de précipitation et d'évapotranspiration qui ont été obtenues auprès de Météo France.

Trois stations climatologiques ont fourni des données de précipitations journalières, Strasbourg, Sélestat et Colmar. Le signal de pluviométrie utilisé dans ce travail a été calculé comme la somme des 3 stations.

Une seule station a fourni les données d'évapotranspiration : celle de Colmar. Cette information temporelle n'a qu'une signification locale, mais a été utilisée car absolument nécessaire pour l'interprétation.

1.3. DONNEES DE DEBIT DES RIVIERES (HORS RHIN)

Les données de débit des rivières sont gérées par la Banque Hydro et disponibles sur Internet – <http://www.rnde.tm.fr>. Pour chaque rivière vosgienne, seules les stations de jaugeage se situant à proximité de l'entrée de la rivière dans la nappe

¹ LfU : depuis le 1^{er} janvier 2006 LUBW (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg)

des alluvions rhénanes ont été utilisées. Le signal temporel des rivières exploité dans ce travail est la somme des apports journaliers de chaque rivière.

Rivière	Situation de la station de jaugeage
Ill	Didenheim
Doller	Reiningue
Thur	Willer sur Thur
Lauch	Guebwiller
Fecht	Ostheim
Giessen	Sélestat
Andlau	Andlau
Ehn	Niedernai
Bruche	Wiches
Zorn	Waltenheim sur Zorn
Moder	Schweighouse sur Moder

1.4. DONNEES DE DEBIT DU RHIN

Les données de débit du Rhin sont issues du Service de la Navigation de Strasbourg. Les mesures ont été effectuées à Kembs et sont représentatives des apports en eau à l'entrée de la nappe.

1.5. ZONE D'ETUDE

L'analyse a ainsi été conduite sur un ensemble de piézomètres répartis dans la nappe d'Alsace. La carte ci contre montre la distribution de ces piézomètres sélectionnés dans la zone d'étude (croix rouges).

Le contour noir délimite l'extension maximale des alluvions dans le Fossé rhénan, le contour vert, quant à lui sera le masque utilisé dans la plupart des cartes représentées et indique la limite de l'aquifère principal des alluvions rhénanes.

Les principales villes de la plaine sont indiquées en noir, à savoir, du sud au nord : Mulhouse, Colmar, Sélestat, Strasbourg et Haguenau. Enfin, est représenté en bleu le réseau hydrographique principal auquel ont été adjoints quelques canaux (Canal du Rhône au Rhin, Canal de Huningue, Canal de la Hardt, Canal Vauban).

Toutes les cartes sont référencées en Lambert II Carto (unités en kilomètres).

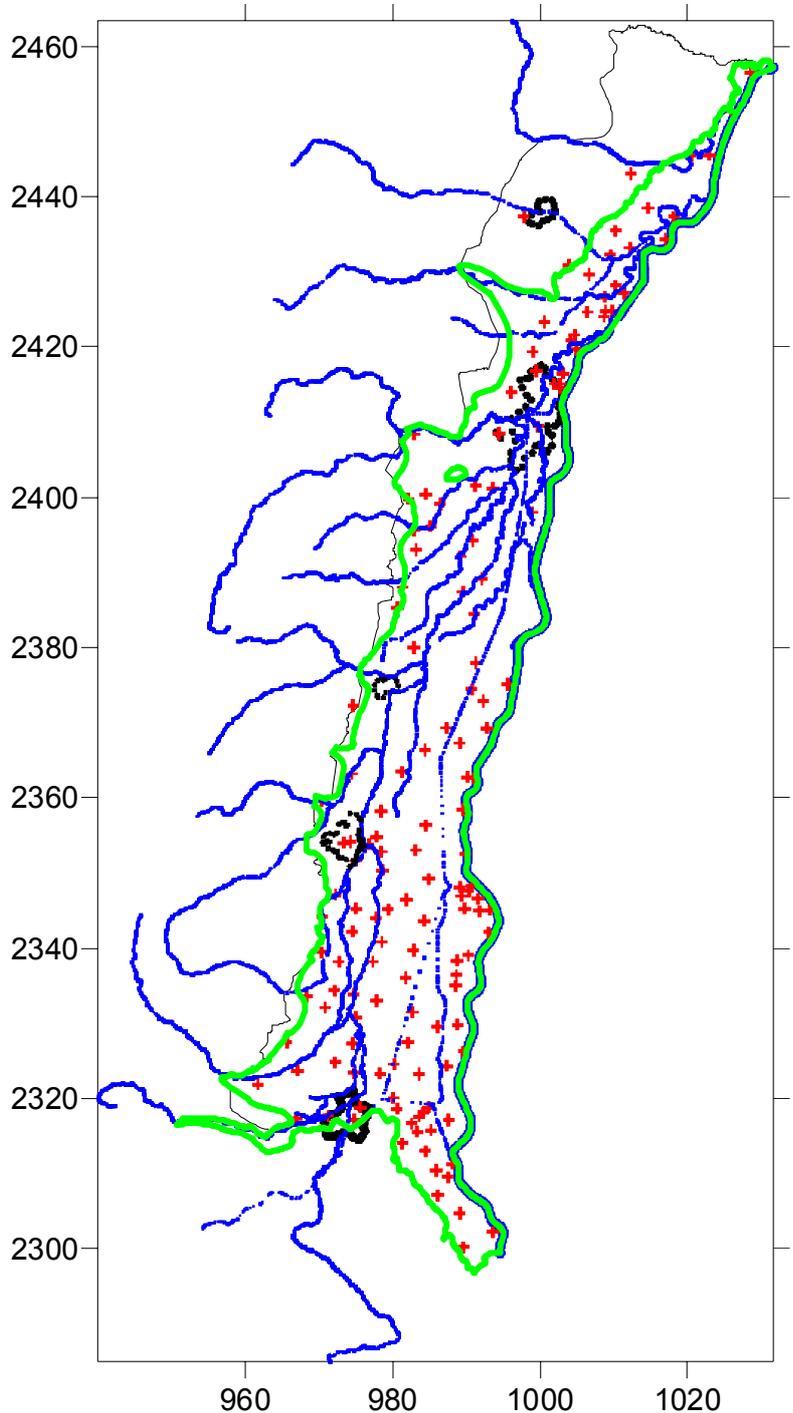


Fig. 1 : Fond de carte utilisé.
La limite l'aquifère principal en vert, en rouge l'ensemble des piézomètres, en bleu le système hydrologique simplifié, en noir les principales villes

2. Eléments d'hydrologie de la nappe d'Alsace

La nappe des alluvions de la plaine du Rhin supérieur est un aquifère puissant (jusqu'à 200 mètres d'épaisseur), résultant du comblement du Fossé rhénan depuis la fin du Tertiaire. On s'intéresse ici à la partie qui s'étend de Bâle à Karlsruhe de chaque côté de la frontière franco-allemande sur une largeur maximale de 40 km, limitée à l'ouest par les Vosges et à l'est par la Forêt Noire.

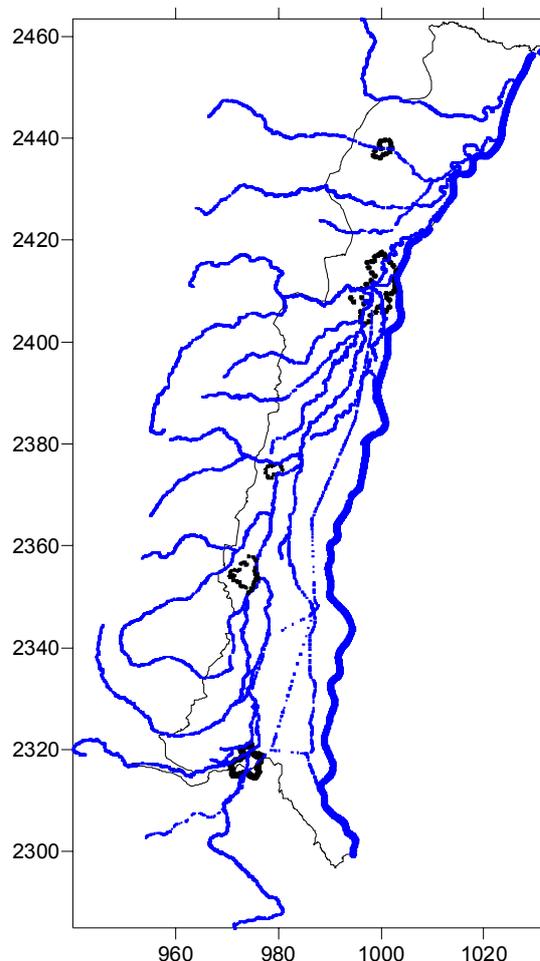
Les Vosges, orientées perpendiculairement aux flux atmosphériques dominants, recueillent une part importante des pluies hivernales qui sont drainées par les rivières vosgiennes. Elles créent aussi des contrastes importants dans la répartition des précipitations dans la plaine.

2.1. RESEAU HYDROGRAPHIQUE SIMPLIFIE

Le fonctionnement hydrologique des rivières et canaux parcourant la nappe d'Alsace peut être décrit comme suit :

- Les rivières vosgiennes, de direction principale Est-Ouest avant de rejoindre la nappe, sont captées par l'Ill au sud de Strasbourg, et par le Rhin au nord.
- L'Ill et le Rhin, dont les cours sont pratiquement parallèles au sud de Strasbourg, suivent la direction principale d'écoulement de la nappe, à savoir N à N20°E.
- Des rivières phréatiques naissent dans les zones humides où la nappe est sub-affleurante.
- Divers canaux de navigation, d'irrigation ou de soutien d'étiage ont été aménagés et se partagent la partie entre l'Ill et le Rhin.

Fig. 2 : Réseau hydrographique simplifié de la nappe d'Alsace. En noir, les principales villes, du nord au sud : Haguenau, Strasbourg, Sélestat, Colmar et Mulhouse



2.2. APPORTS DES RIVIERES VOSGIENNES

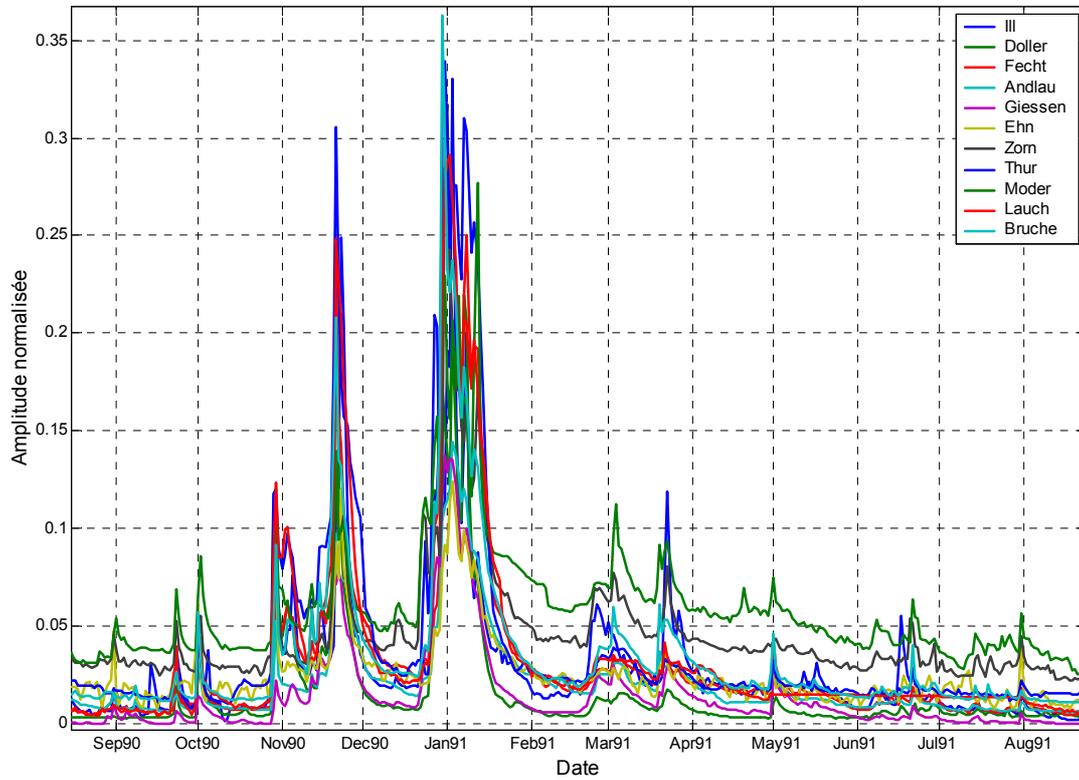


Fig. 3 : Superposition des débits (normalisés) des rivières vosgiennes

Une minorité d'épisodes de crues touchent uniquement une partie des rivières vosgiennes, les principaux épisodes sont généralement simultanés pour l'ensemble des rivières vosgiennes. Quelques différences apparaissent tout de même dans l'amplitude, mais cette caractéristique permet de considérer, sans trop d'erreur, un seul apport des rivières vosgiennes, calculé comme la somme des débits de chaque rivière, et utilisé dans ce projet.

2.3 ECHANTILLONNAGE TEMPOREL

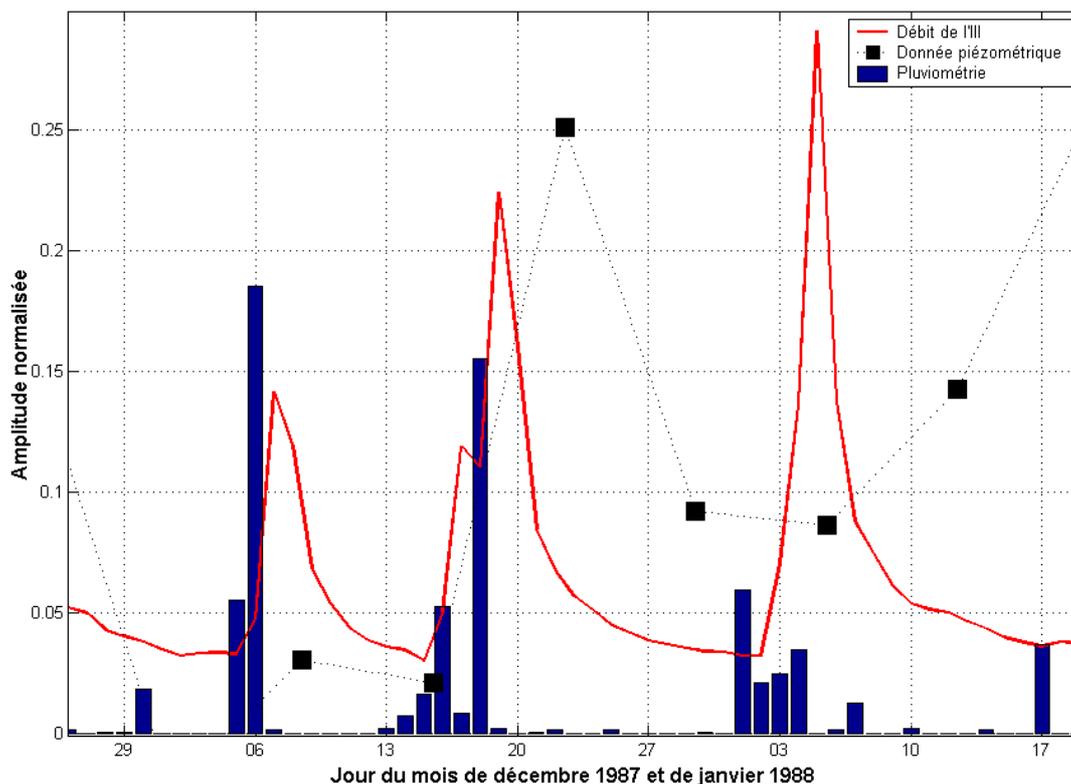


Fig. 4 : Superposition des débits (normalisés) de l'Ill (en rouge), des précipitations efficaces (en bleu) et d'une chronique piézométrique (carrés noirs).

Les précipitations importantes sont généralement suivies d'une crue de l'ensemble des rivières vosgiennes avec un temps de latence d'un ou deux jours. L'échantillonnage temporel des chroniques piézométriques, hebdomadaire pour la plupart, ne permet pas d'avoir d'informations sur des signaux ayant une période de moins de 2 semaines. Il est ainsi impossible de discriminer simplement les apports des rivières et des pluies.

2.4. CARACTERISTIQUES STATIQUES

Par la suite, chaque chronique piézométrique utilisée pour l'analyse mathématique sera définie par sa moyenne et son écart type. Cette partie ne vise qu'à montrer la régionalisation de ces paramètres.

2.4.1 Niveau piézométrique moyen

Les principales directions d'écoulement sont orientées vers l'est sur le piémont vosgien pour devenir préférentiellement N20 vers le centre de la nappe.

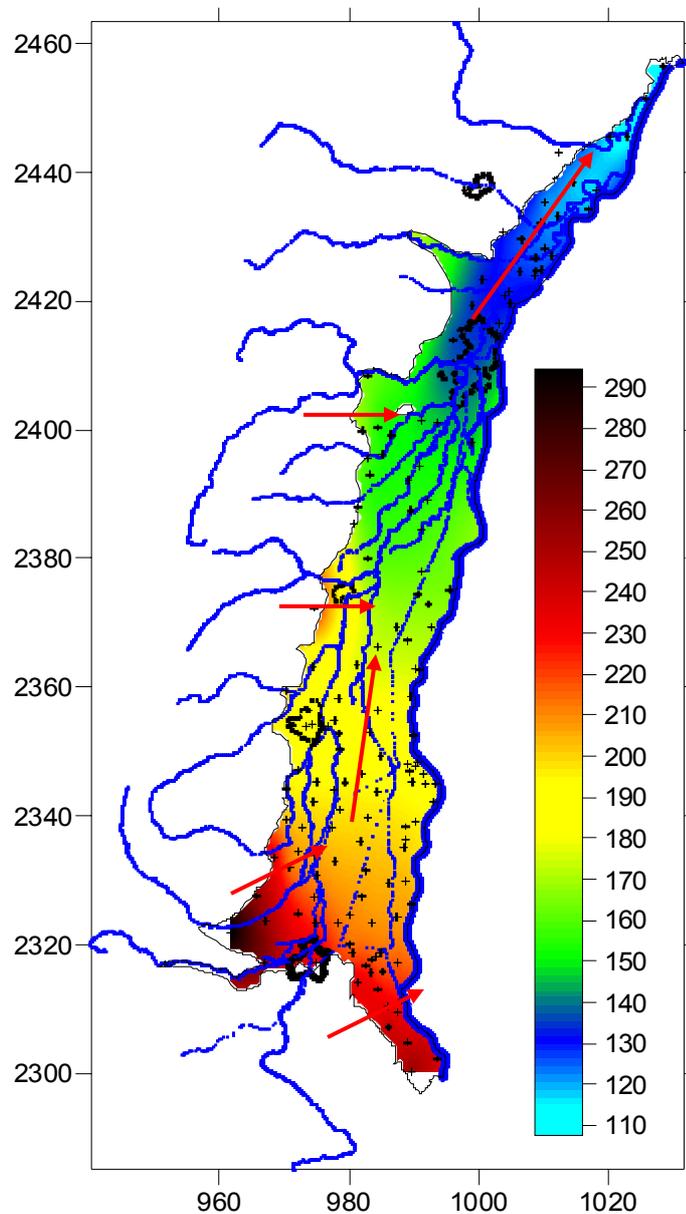


Fig. 5 : Carte krigée du niveau piézométrique moyen de la nappe (en mètres après correction d'une surface quadratique) permettant de définir les sens d'écoulements privilégiés.

2.4.2. Variance du signal piézométrique

Dans la plus grande partie de la nappe des alluvions rhénanes, l'écart type des chroniques piézométriques ne dépasse pas 30 cm. L'amplitude des variations est plus importante ensuite dans les zones de bordure. Une frontière hydrologique semble se dessiner au sud de Colmar et sépare une zone de faible amplitude de battement de nappes au Nord, d'une zone de battements dont l'amplitude peut atteindre plus de 2 mètres au Sud. Elle distingue ainsi la région Sud où la zone non saturée est épaisse et où les cours d'eau fonctionnent en infiltration et la région Nord où la nappe, sub-affleurante, est en position de drainage par les cours d'eau.

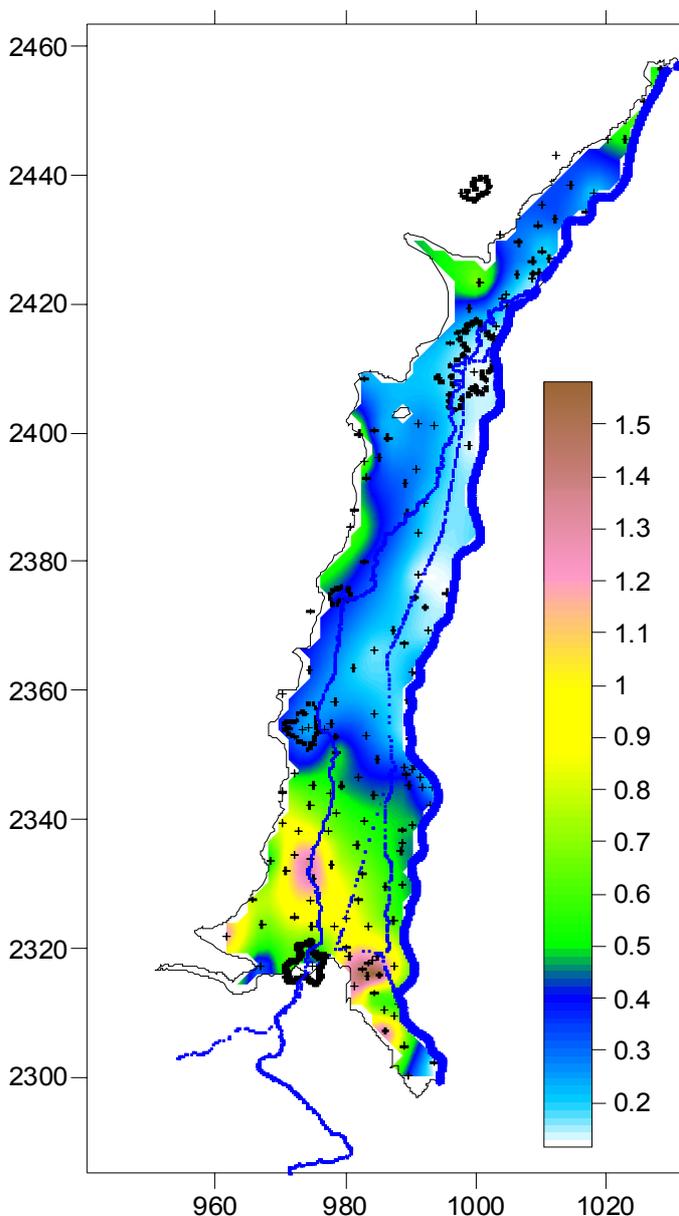


Fig.6 : Carte krigée de l'écart type des variations piézométriques (mètres)

3. Analyse des données piézométriques sur la nappe d'Alsace

3.1. PRINCIPE DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode descriptive d'analyse des données qui détermine, à partir d'un ensemble d'informations, les caractères les plus représentatifs d'un système en liant observations et variables. Dans cette étude, je me suis attaché à déterminer les signaux caractéristiques du comportement dynamique de la nappe - ou vecteurs propres - $Y_j(t)$ à partir d'un ensemble de n chroniques piézométriques $\{x_j(t), j=1..n\}$. Ainsi les variations du niveau piézométrique par rapport à sa moyenne, sont représentées par une matrice $A_{i,j}=x_j(t_i)$, les variables correspondent à l'ensemble des chroniques piézométriques $x_j(t)$, les observations étant ainsi les différents instants de mesure $t_i, i=1..p$.

3.1.1. Point de vue analytique

D'un point de vue analytique, cette méthode constitue la transformation de Karhunen – Loève. Elle permet de rechercher un ensemble réduit de variables caractéristiques non corrélées, $Y_j(t)$, combinaisons linéaires des variables initiales $x_j(t)$, classées selon l'énergie qu'elles amènent au système (représentant le plus fidèlement l'ensemble des données). C'est ainsi une transformation linéaire comparable à la transformée de Fourier, dont le noyau $K_{i,j} = x_i \cdot x_j$ est déterminé à partir des informations contenues dans l'espace de départ, et principalement utilisé pour le filtrage des signaux (sélection de l'information, suppression du bruit, compression).

3.1.2. Point de vue statistique

En prenant le point de vue statistique, il s'agit de calculer la valeur d'une variable régionalisée Z en un point X non mesuré, à partir d'observations faites en n points x_n en supposant qu'il existe un processus sous-jacent $Z(X,t) = \sum_j a_j(X)Y_j(t) + \varepsilon(X,t)$, avec $j=1\dots n$, $\varepsilon(X,t)$ résidus en un point x entre $Z(X,t)$ et les processus "expliqués" $\sum_j a_j(X)Y_j(t)$. Les $Y_j(t)$ représentent les signaux caractéristiques ou vecteurs propres associés aux projections $a_j(X)$. Ces projections et les signaux caractéristiques sont identifiés en exploitant les covariances $K_{i,j} = \text{cov}(x_i, x_j)$ existant entre les $Z(X_i, t)$.

3.1.3. Remarques particulières

L'analyse s'effectue sur les variations de la cote piézométrique par rapport à la moyenne (niveau piézométrique moyen) réduites (divisées par l'écart type) afin de constituer un ensemble de variables ne possédant plus d'unités, ce qui a pour avantage de ne pas favoriser les phénomènes ayant une amplitude de variation importante.

L'analyse recherche des signaux de moyenne temporelle nulle et orthogonaux au sens mathématique, c'est-à-dire non corrélés. Il est possible que les signaux caractéristiques déterminés présentent un "effet de construction", qui n'a aucun sens physique, afin de satisfaire à la propriété d'orthogonalité.

La méthode permet de totalement dissocier l'espace et le temps, c'est-à-dire de potentiellement discriminer le comportement local, lié au faciès de l'aquifère (modification de la granulométrie, intercalation d'argiles), d'un apport global à l'ensemble de la nappe (rivières vosgiennes, pluviométrie, ...). L'interprétation sera donc conduite à la fois sur les signaux temporels $Y_j(t)$, et sur la répartition spatiale des projections $a_j(X)$. Par contre, elle ne gère pas du tout les déphasages, tous les phénomènes sont considérés comme concomitants.

Notons enfin que l'ACP est une technique linéaire optimisant un critère quadratique, elle ne tient donc pas compte d'éventuelles liaisons non linéaires et présente une forte sensibilité aux valeurs extrêmes.

3.2. PROGRAMME IMPLEMENTE

La méthode d'analyse en composantes principales choisie a été déterminée pour s'adapter au mieux au problème demandé. La matrice de départ étant plus haute que large, la recherche des vecteurs et valeurs propres (des signaux temporels caractéristiques et du poids de chacun de ces signaux) est effectuée sur la matrice des corrélations. Ces vecteurs propres sont ainsi les facteurs principaux, et non les composantes principales.

Le programme d'analyse en composantes principales utilisé dans cette étude a été programmé à l'occasion de mon stage de fin d'études et réutilisé dans ce travail. La validation du code a été effectuée à partir de données synthétiques.

3.3. ANALYSE VARIOGRAPHIQUE

L'analyse variographique, qui précède la méthode d'interpolation par krigeage, est une méthode d'analyse des données qui permet de déterminer la structure d'un phénomène étudié en s'intéressant à ses variations avec la distance.

Soient Z une variable régionalisée, $Z(X)$ et $Z(X+h)$ les valeurs prises à deux endroits différents, la variance de la différence $Z(X) - Z(X+h)$ indique la manière dont la variable Z évolue dans l'espace (est ce que les valeurs se dispersent plus en moyenne lorsque la distance entre deux point augmente ?). Sous certaines hypothèses, cette variance se réduit uniquement à une fonction de la distance. On appelle alors variogramme la grandeur : $\gamma(h) = \frac{1}{2} Var(Z(X) - Z(X+h))$.

Le variogramme expérimental, calculé à partir de l'ensemble des distances entre deux points de mesures, permet ainsi de déterminer la manière dont le phénomène étudié varie (à quelle vitesse, et à quelles échelles spatiales), une éventuelle anisotropie, la présence de ruptures franches ...

L'interpolation par krigeage consiste ensuite à choisir un **modèle** de variabilité spatiale du phénomène à partir du variogramme expérimental, ce qui permet d'interpoler le phénomène en tout point en minimisant l'erreur d'interpolation.

3.4. CHOIX ET MISE EN FORME DES DONNEES

La méthode nécessite des données sans lacunes. Il est ainsi nécessaire de trouver un bon compromis entre un nombre important de piézomètres bien répartis, pour que la méthode statistique soit bien représentative de l'ensemble du système, et une série temporelle conséquente qui prenne en compte un maximum d'événements.

Il est de plus intéressant de confronter les résultats déterminés par la méthode avec des situations hydrologiques connues, qui sont également utilisées pour les modélisations hydrologiques de la nappe (période de basses eaux : avril 1991, période de hautes eaux : avril 1988, période de moyennes eaux : octobre 1986). Ainsi, la période retenue va du 29 juillet 1986 au 15 décembre 2003, soit *17,5 ans* au pas de temps hebdomadaire.

L'étape suivante consiste à vérifier la cohérence et l'exactitude des données (correction des valeurs aberrantes, des sauts dans les chroniques, suppression des chroniques "suspectes"), à interpoler les données manquantes. Quatre chroniques dans des zones mal représentées et comportant des lacunes allant jusqu'à 20 semaines (20 mesures) ont tout de même été utilisées.

Enfin, les chroniques sont centrées et réduites. Chaque signal piézométrique utilisé est à présent déterminé par sa moyenne et son écart type, calculés à partir des chroniques de départ.

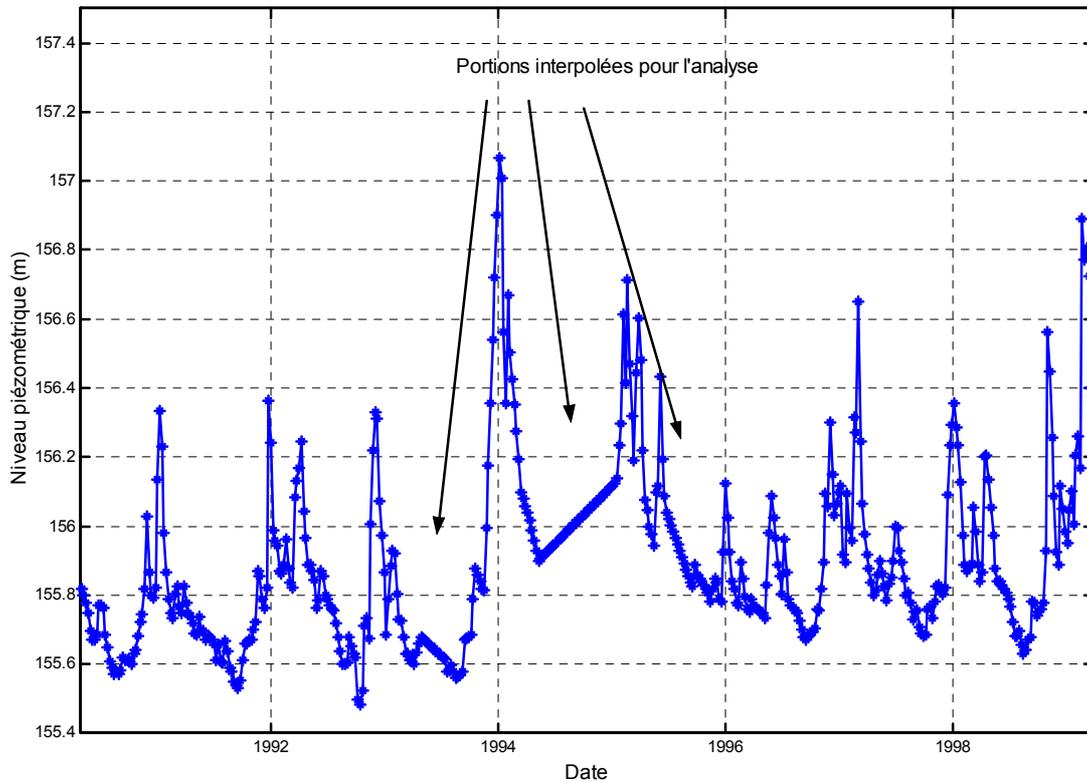


Fig. 6 : Chronique du piézomètre 03078X0014 d'Ebersheim, retenu pour l'analyse, alors qu'elle contenait des lacunes non négligeables – et mal interpolées.

3.5. INTERPRETATION DES INFORMATIONS GLOBALES

L'interprétation ne sera conduite que du côté français. En effet, j'ai pu disposer de beaucoup de données du côté français, et parler avec des personnes connaissant bien cette zone, ce qui n'a malheureusement pas pu être le cas dans la partie allemande.

3.5.1. Valeurs propres du système

La diagonalisation du noyau $K_{i,j} = \int x_i \cdot x_j$ met en évidence un ensemble de vecteurs propres (signaux temporels caractéristiques $Y_j(t)$) associés à leurs valeurs propres, qui représentent la capacité de chaque vecteur à expliquer le comportement global du système.

Dans cette étude, on se limitera à l'analyse des 5 premiers vecteurs propres qui expliquent à eux seuls plus de 80 % de la variance du système.

Numéro de la valeur propre	Pourcentage de variance expliquée	Cumul de la variance expliquée
1	44 %	44 %
2	20 %	64 %
3	9 %	75 %
4	5 %	80 %
5	4 %	84 %
6	1 %	85 %
7	1 %	86 %
8	1 %	87 %
... 149	0,000003 %	100 %

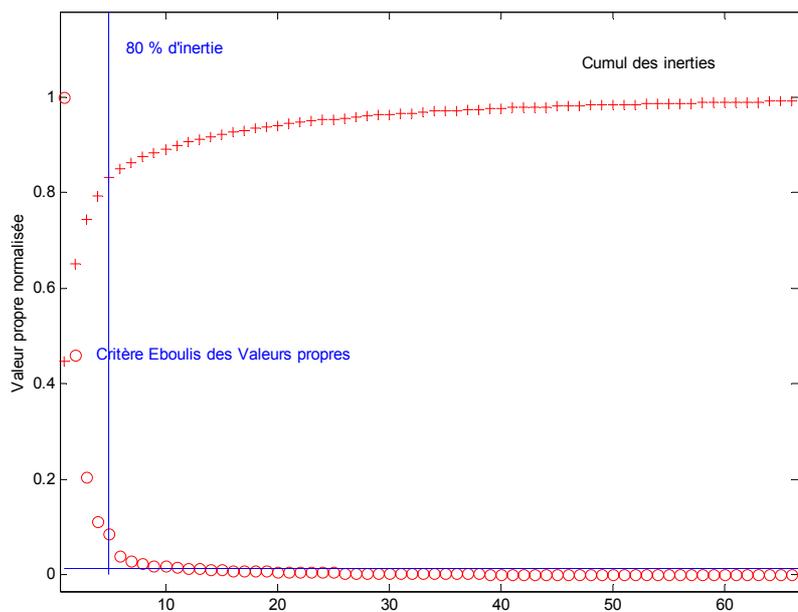


Fig.7 : répartition des valeurs propres, de la variance qu'elles expliquent (ronds rouges) et du cumul de la variance expliquée (croix rouges).

3.5.2. Projections sur chaque vecteur propre

Les projections $a_j(X)$ sont calculées pour chaque piézomètre et renferment l'information spatiale (elles indiquent la part de chaque vecteur propre dans le comportement du piézomètre considéré). La méthode utilisée (réduction des données) impose aux projections d'appartenir à l'intervalle $[-1;1]$.

Les boîtes à moustaches sont intéressantes puisqu'elles permettent de mettre en évidence quelques caractéristiques de chaque vecteur propre.

Ainsi, le premier vecteur propre est le seul signal ayant une moyenne spatiale non nulle (toutes les projections sont positives), et représente ainsi des apports simultanés et cohérents sur toute la nappe des alluvions rhénanes.

Les second et troisième vecteurs propres, associés à de grandes boîtes (extrêmes proches de 1), sont stables et décrivent correctement un comportement qui touche l'ensemble de la nappe.

Les vecteurs propres suivants sont associés à de petites boîtes, et mettent en évidence des points isolés à forte contribution et influents dans la détermination du vecteur propre, donc instables et décrivant des comportements plus locaux.

Ainsi, trois vecteurs propres auraient été suffisants pour décrire le comportement global de l'aquifère, il est tout de même intéressant d'interpréter des signaux ayant une signification plus locale, mais qui sont bien représentés, c'est-à-dire expliquant 5 % et 4 % du signal – les suivants expliquant moins de 1 % - et d'atteindre par ce biais des caractéristiques dynamiques locales liées à des variations latérales observées sur l'ensemble de la nappe.

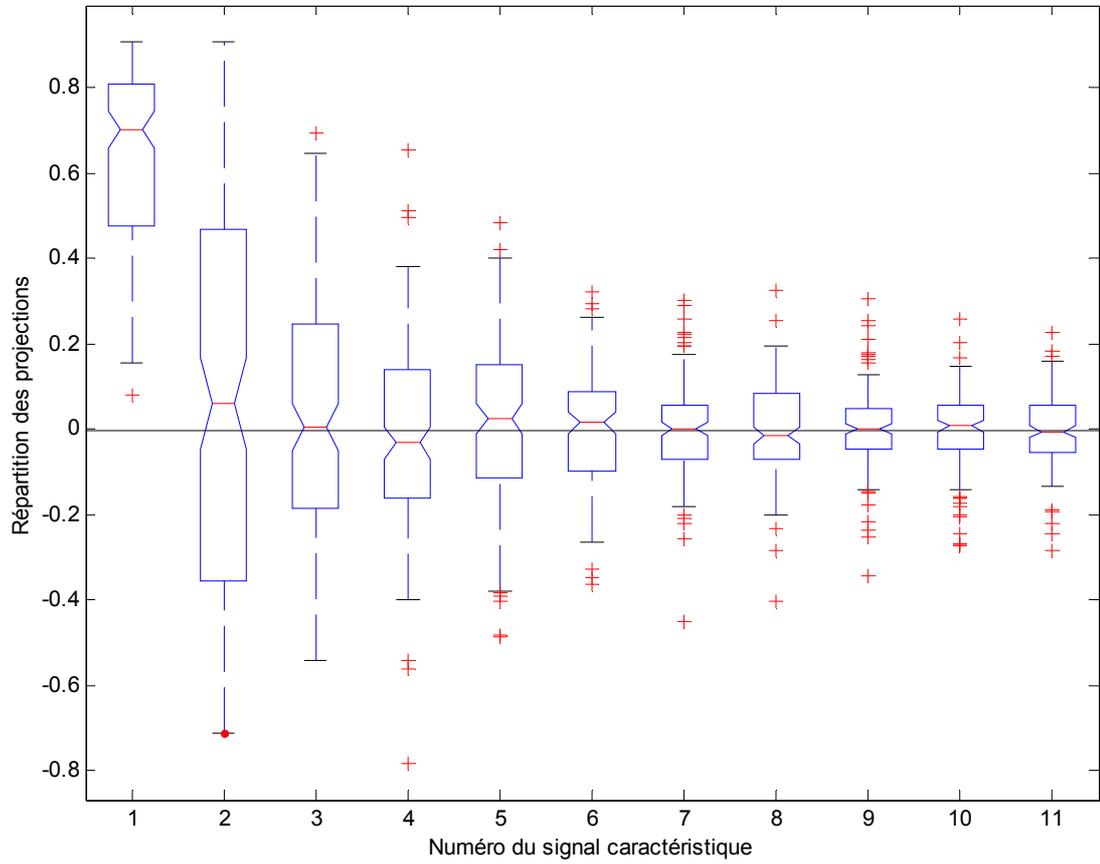


Fig. 8 : Boîtes à moustaches des projections sur chaque vecteur propre

3.5.3. Premier signal caractéristique : Apport en eau des rivières (hors Rhin)

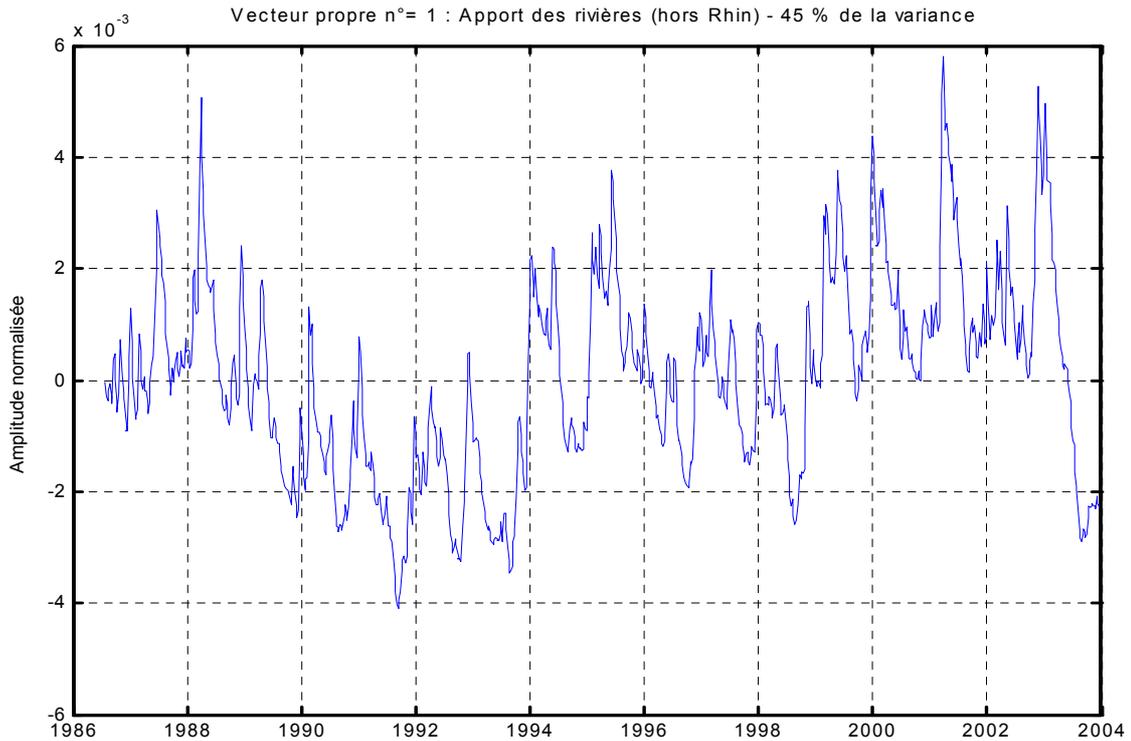


Fig. 9 : Premier signal caractéristique : apport des rivières

Le signal le plus important au point de vue énergétique est gouverné par l'apport des rivières (hors Rhin). Un ensemble de pics en hiver et au printemps est modulé par une composante annuelle marquée, maximale en hiver et minimale en été. En effet, la nappe d'eau recueille à cette période l'ensemble des précipitations tombées sur les Vosges par le biais de l'important chevelu hydrographique. A noter l'important déficit en eau des rivières vosgiennes observé en 2003 qui a conduit à la situation de basses eaux pendant l'été 2003.

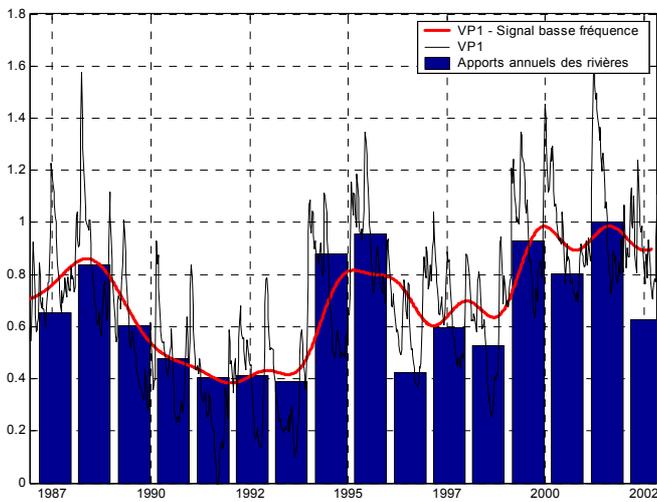


Fig. 10 : Etude basse fréquence du premier signal caractéristique : apports annuels des rivières (barres bleues) et contribution basse fréquence du premier signal (rouge).

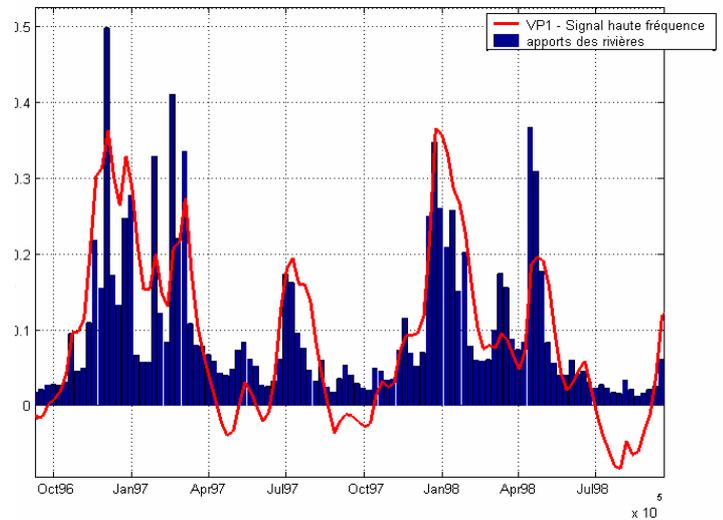


Fig. 11 : Signaux hautes fréquences de l'apport hebdomadaire des rivières (barres bleues) et du premier vecteur propre

Dans le cas de l'apport des rivières, le variogramme de la répartition des projections montre une structure bien définie avec une portée de l'ordre de 15 km et une continuité héritée des capacités d'amortissement des crues des rivières dans la nappe (milieu diffusif). Notons également que le variogramme met en évidence une anisotropie dans la direction N20° (soit 70 ° dans le système trigonométrique), en rapport direct avec la direction générale des écoulements dans la nappe.

La répartition du comportement de la nappe vis-à-vis des rivières vosgiennes semble cohérente, la partie la plus sensible se situant vers le piémont vosgien et autour de l'III. En allant vers le Rhin, la nappe est de moins en moins sensible à l'apport des rivières. Il faut noter en particulier l'impact anthropique non négligeable au travers du rôle des différents canaux. En effet, le Canal de la Hardt est mis en eau en été afin de soutenir le niveau de la nappe pour l'irrigation. Au sud de Strasbourg, la retenue d'eau de Plobsheim permet d'équilibrer le niveau de la nappe et le niveau du Rhin.

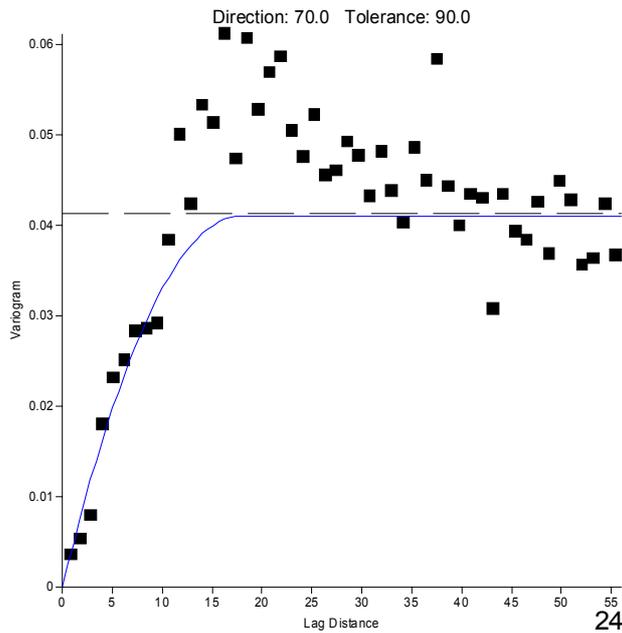


Fig. 12 : Variogramme des projections de chaque piézomètre sur le premier vecteur propre

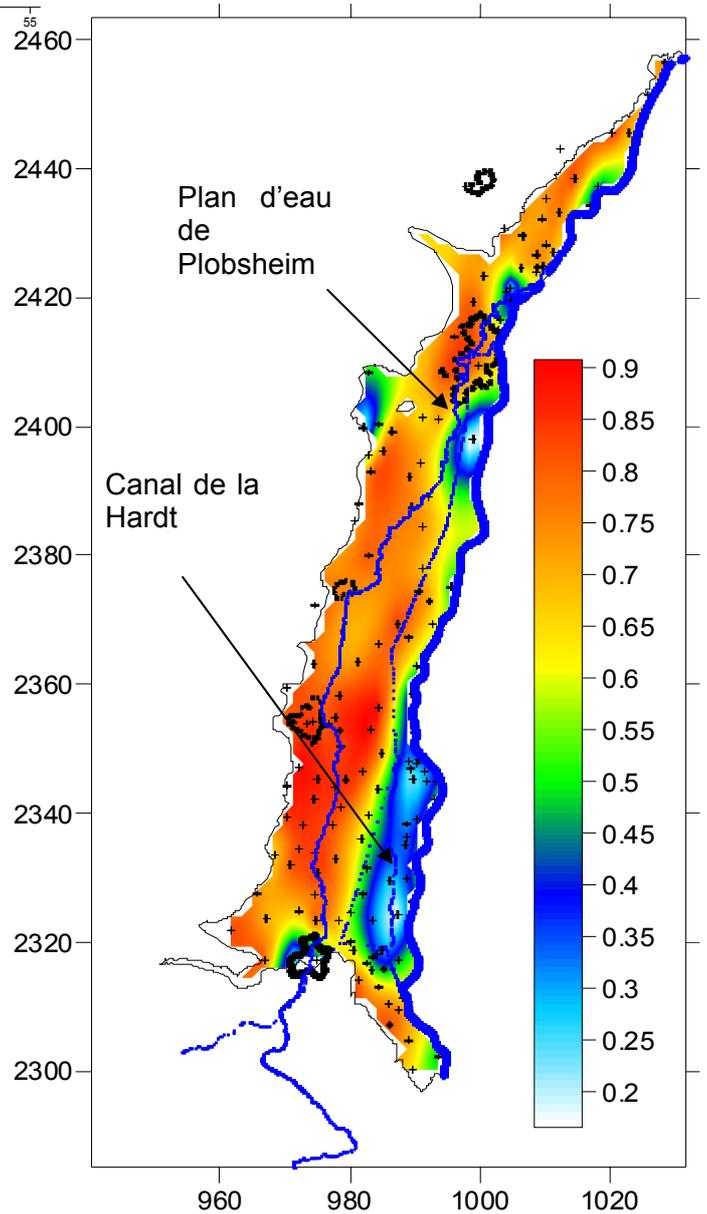


Fig. 13: Carte krigée des projections de chaque piézomètre sur le premier vecteur propre.

3.5.4. Second signal caractéristique : Apport de la pluviométrie (réaction immédiate)

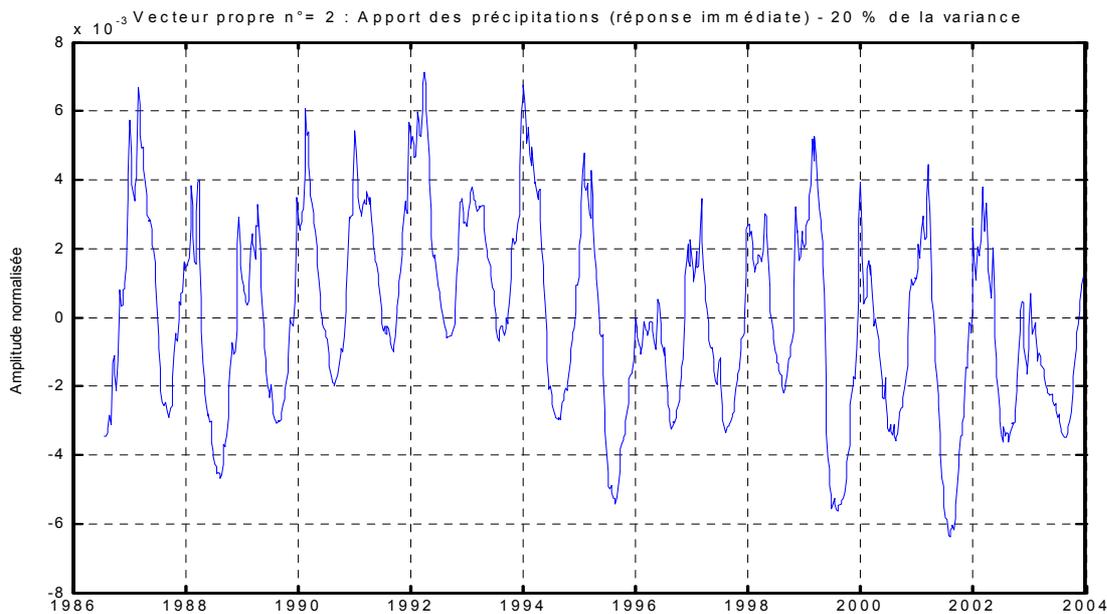


Fig. 14 : Second signal représentatif

Ce second signal, beaucoup plus lisse, et représentant 20 % du comportement global, est interprétable comme l'apport des pluies efficaces, maximal en hiver – période pendant laquelle on peut séparer les grosses pluies. Etant donné que la méthode ne gère pas les déphasages, ce signal d'infiltration est lié à de faibles temps de transit (inférieurs à 2 semaines) et à une très grande sensibilité aux épisodes pluvieux. En effet, ce signal met en évidence les déficits en eau estivaux, comme s'il y avait un échange entre la nappe et les sols. A noter le déficit en pluie en 2003, mais surtout, une période chaude déficitaire en eau dès le printemps.

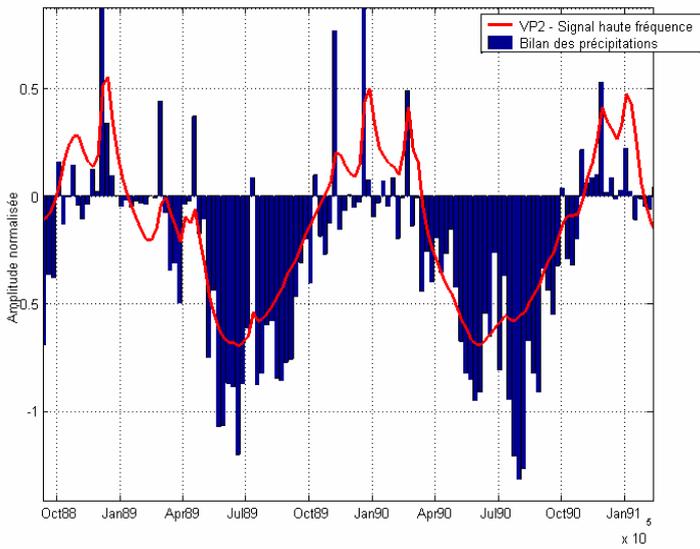


Fig. 15 : Signaux hautes fréquences des pluies efficaces hebdomadaires (barres bleues) et du second vecteur propre

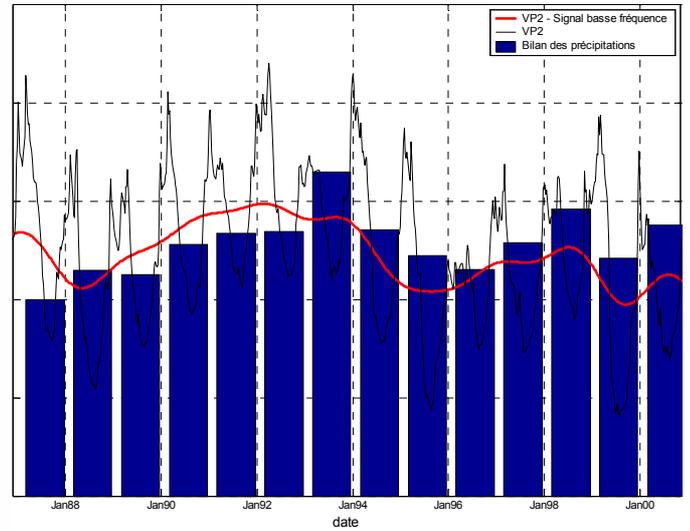


Fig. 16 : Etude basse fréquence du second signal caractéristique : cumul annuel des pluies efficaces (barres bleues) et contribution basse fréquence du second signal (rouge).

Le variogramme montre, comme pour le premier vecteur propre, une continuité marquée et une structure de l'ordre de 20 km. On retrouve également la direction privilégiée N20.

Le toit de la nappe n'est d'une manière générale pas très profond dans la nappe des alluvions rhénanes. L'échantillonnage ne permet pas de bien localiser des zones de faible profondeur de la nappe, mais l'ensemble du grand Ried (entre Sélestat et Strasbourg) est malgré tout bien marqué. Les projections sont pratiquement nulles sur le piémont vosgien, au sud ouest et au nord ouest de Strasbourg, zones où la couverture loessique varie entre 5 et 10 mètres. Dans la forêt de la Hardt (en bordure du Rhin, entre Colmar et Mulhouse), et à Plobsheim, les projections sont négatives, le signal caractéristique est donc opposé. On reconnaît donc l'impact des apports

estivaux via le canal de la Hardt et le Rhin. Cette propriété est à comparer à la carte des profondeurs de la nappe disponible sur le site Internet de l'APRONA.

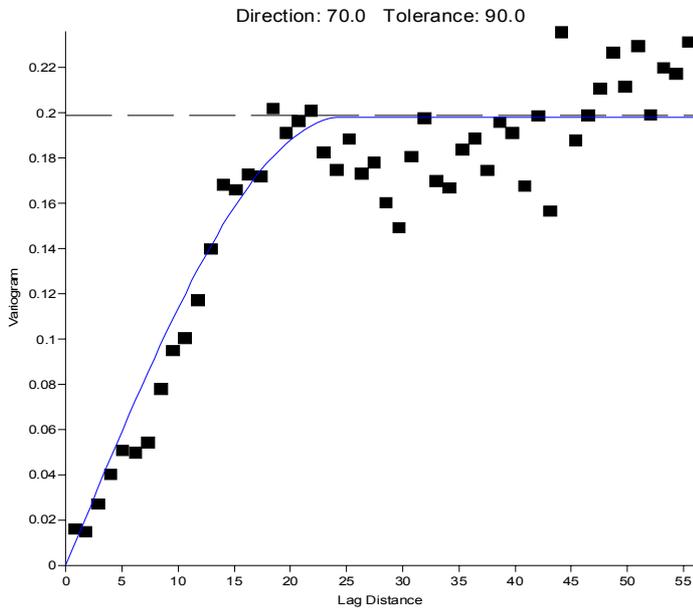
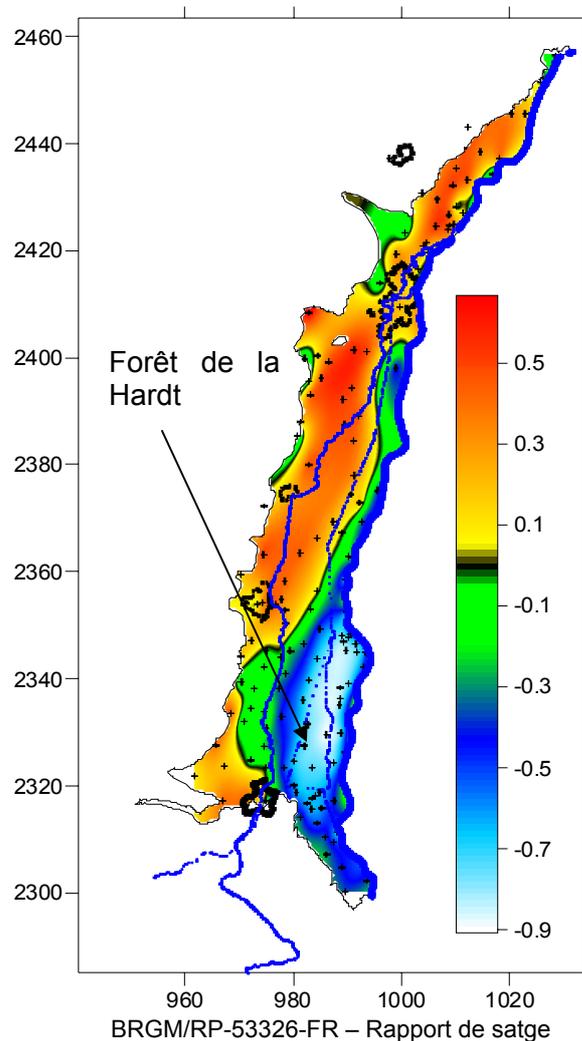


Fig. 17 : Variogramme des projections de chaque piézomètre sur le second vecteur propre

Fig. 18 : Carte krigée des projections de chaque piézomètre sur le second vecteur propre.



3.5.5. Troisième signal caractéristique : Apport du Rhin

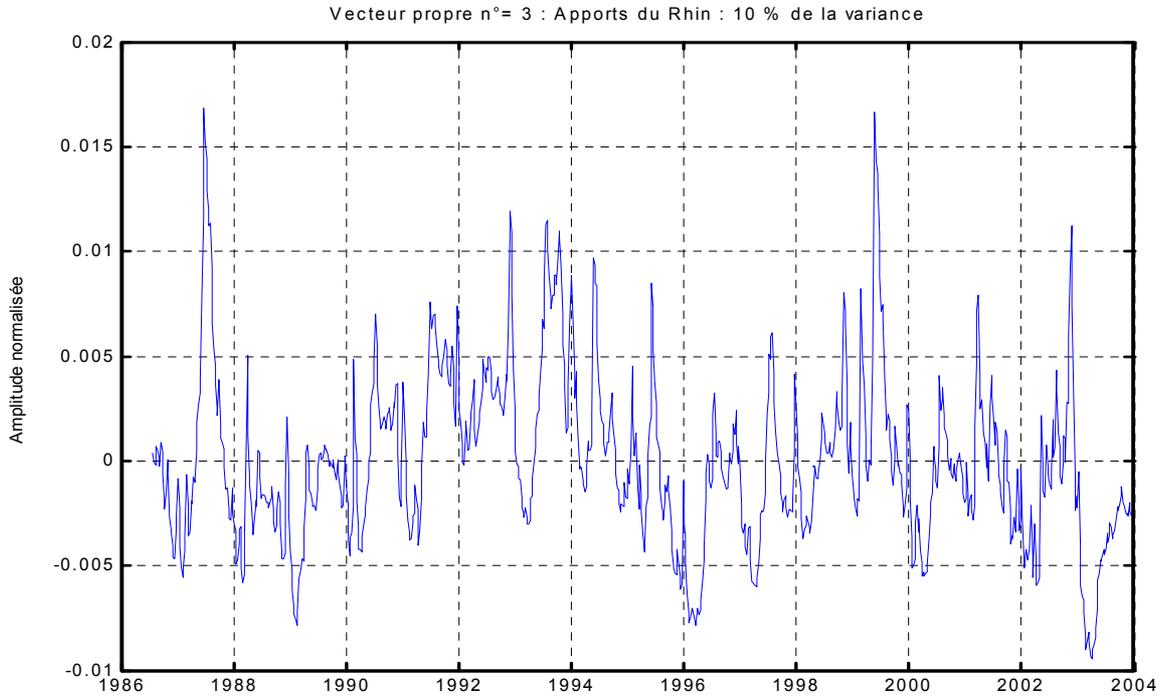


Fig. 19 : Troisième signal représentatif

Ce troisième vecteur propre peut être associé aux apports du Rhin à la nappe. Le partie haute fréquence s'accorde en effet très bien avec les débits observés. Par contre, la composante basse fréquence du signal caractéristique n'est pas très représentative des apports annuels du Rhin. La répartition des projections (page suivante) permet quelque peu d'explicitier ce problème : ce signal décrivant en haute fréquence les débits du Rhin, est modulé par des apports basse fréquence du Sundgau. Voici un exemple "d'effet de construction".

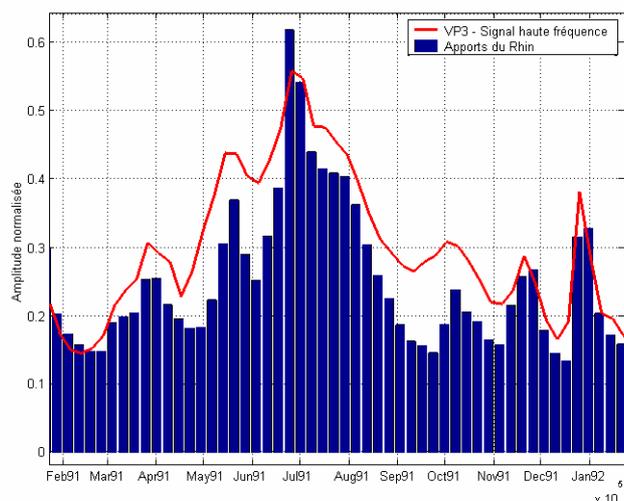


Fig. 20 : Signaux hautes fréquences du débit hebdomadaire du Rhin (barres bleues) et du troisième vecteur propre.

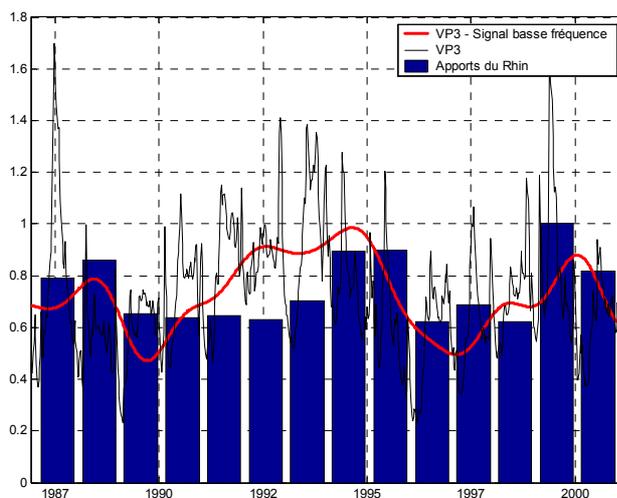


Fig. 21 : Etude basse fréquence du troisième signal caractéristique : débit annuel du Rhin (barres bleues) et contribution basse fréquence du second signal (rouge).

La répartition des projections positives se concentre au bord du Rhin et met en évidence les principales zones d'échange entre le Rhin et la nappe, telles que la région de Plobsheim et du port de Strasbourg où les darses participent également à équilibrer les niveaux du Rhin et de la nappe, mais également la bande entre le canal de la Hardt et le Rhin. Ces projections sont pratiquement nulles sur le piémont vosgien.

Au pied du Sundgau, à l'est de Mulhouse, les projections sont négatives. Dans cette zone, les variations du niveau de la nappe ont une composante basse fréquence modulant les apports du Rhin. Cette composante met également en évidence le déficit estival de recharge dans ce secteur.

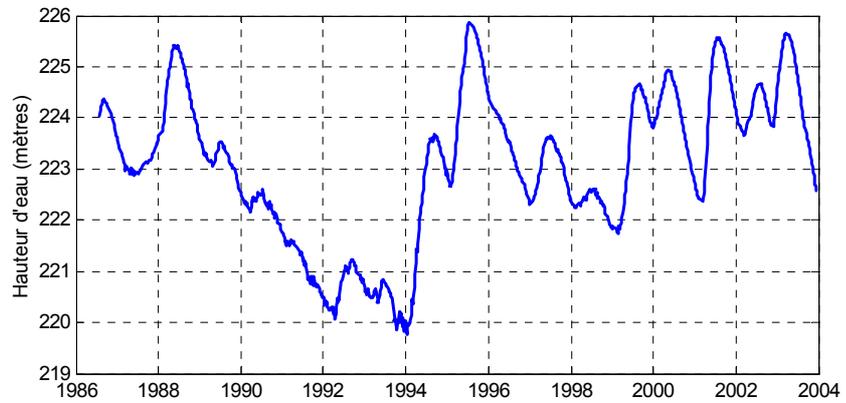


Fig. 22 : Variations piézométriques basses fréquences du piézomètre 04137X0018 à Habsheim

Fig. 23 : Variogramme des projections de chaque piézomètre sur le troisième vecteur propre

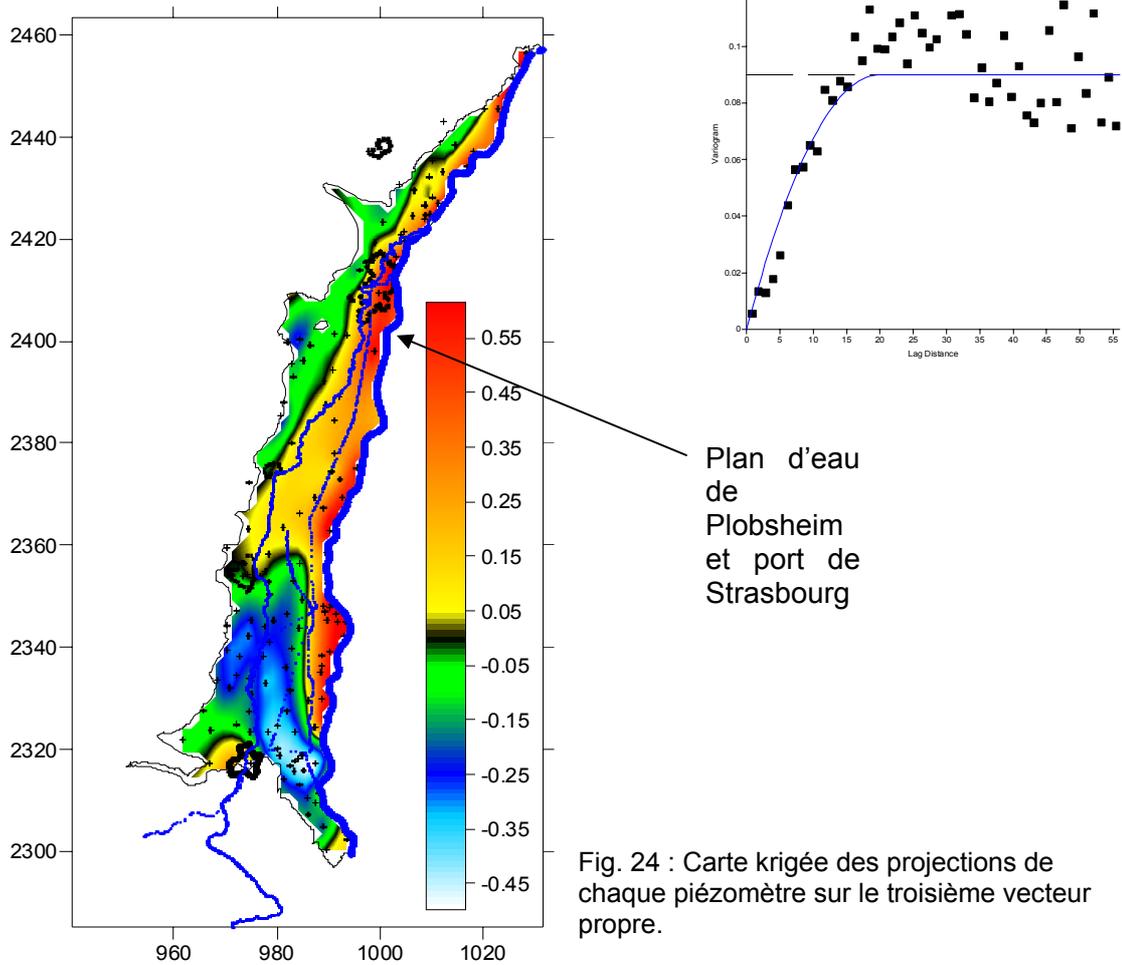


Fig. 24 : Carte krigée des projections de chaque piézomètre sur le troisième vecteur propre.

3.5.6. Quatrième signal caractéristique

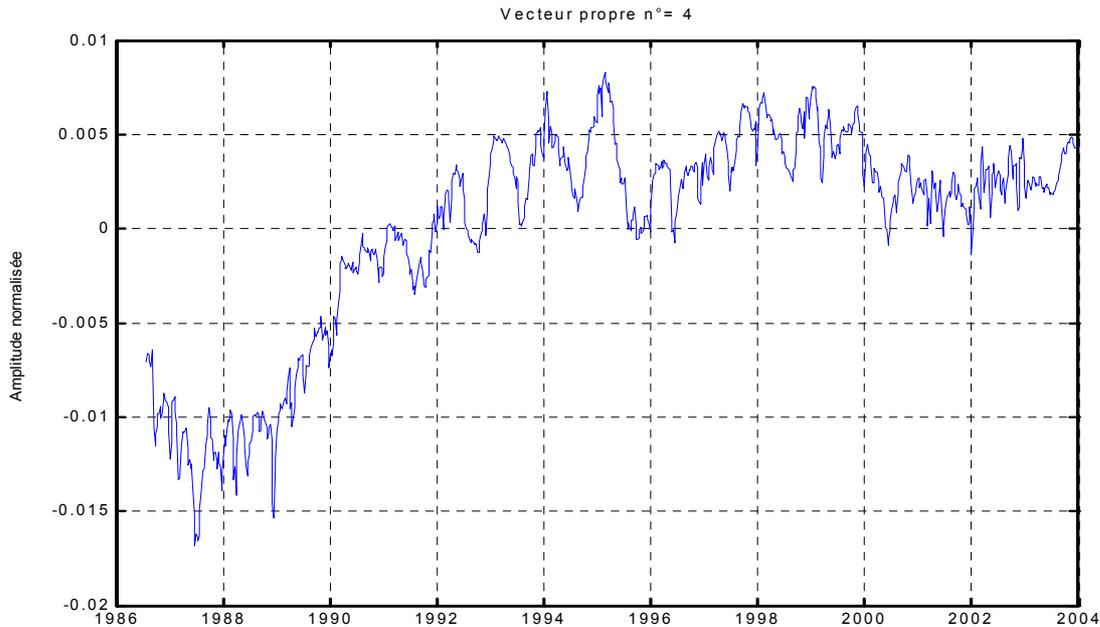


Fig.25 : Quatrième signal représentatif

Ce signal caractéristique, qui représente 5 % de la variance globale est le premier signal de correction. Au point de vue temporel, il met en évidence un effet de "stockage – déstockage" d'eau d'extension réduite (piémont vosgien, sud de Colmar) suivant le signe des projections entre 1988 et 1993, qui module un apport estival peu marqué d'une manière générale.

Ce vecteur propre est le seul dont le variogramme montre un comportement linéaire avec un effet de pépite aux 2/3 de la variance et ne met ainsi pas de structure en évidence. Les projections sont, d'une manière générale, nulles, mais mettent en lumière quelques zones particulières, telles que :

- La zone où l'III infiltre entre Mulhouse et Colmar. D'une part, le canal de Huningue soutient le cours de l'III en été, d'autre part la nappe, au niveau du bassin potassique, est rabattue à des fins de dépollution.
- Les zones du piémont vosgien, où les projections sont négatives.

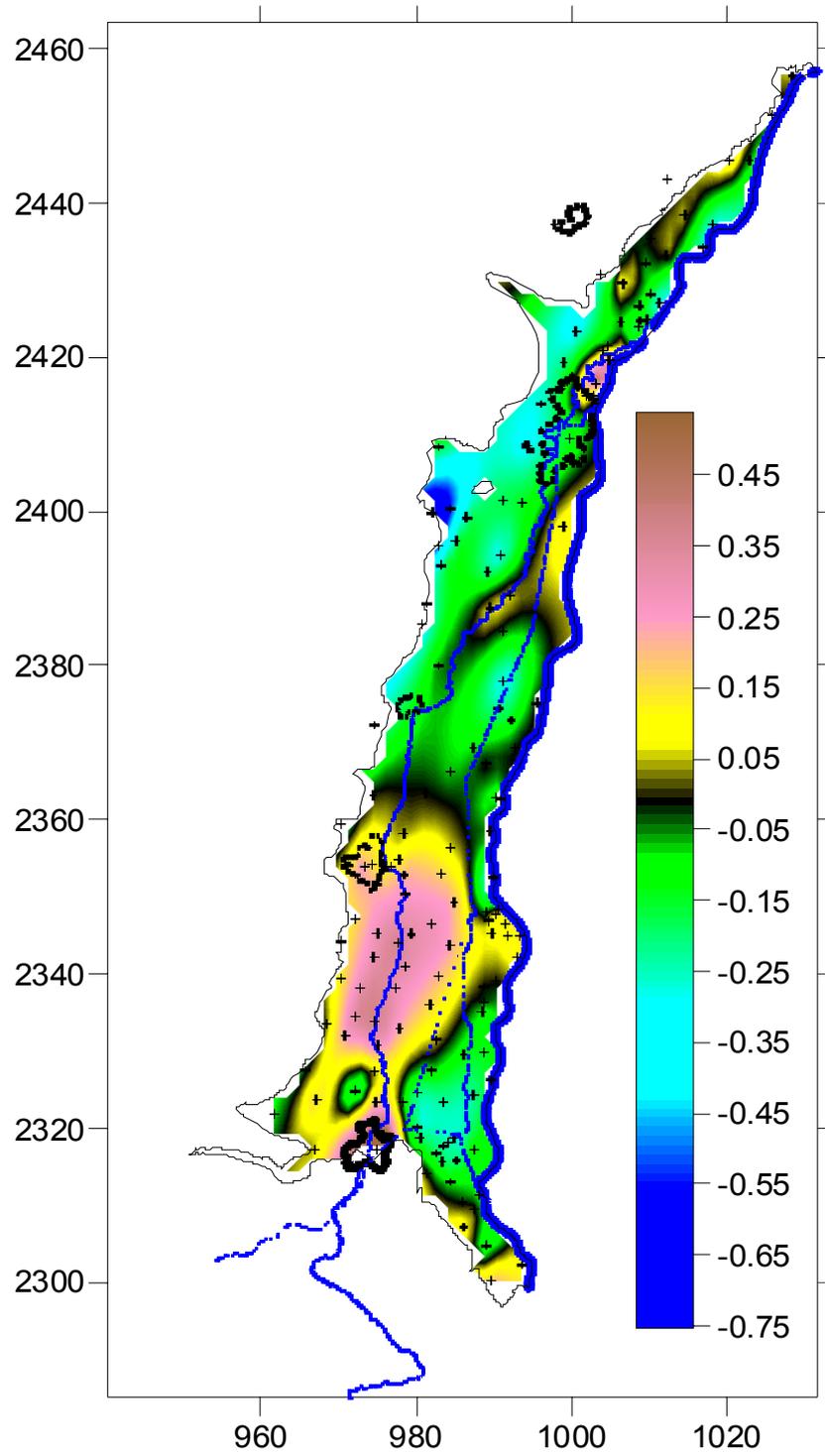


Fig. 26 : Carte krigée des projections de chaque piézomètre sur le quatrième vecteur propre.

Ce vecteur propre est ainsi relativement difficile à interpréter, et plusieurs hypothèses complémentaires sont à retenir :

- Il peut être un effet de "construction" afin de corriger des variations basses fréquences non décrites par les 3 précédents signaux.
- Dans les zones où l'épaisseur des sols est importante et où, donc, le second vecteur propre n'a pas décrit l'impact des précipitations, ce vecteur peut mettre en évidence un signal de pluviométrie uniquement basse fréquence filtré par l'épaisseur des sols.
- La nappe a subi des aménagements locaux entre 1986 et 2003, ce vecteur peut donc être une correction de la non-stationnarité du signal piézométrique, et ainsi représenter l'impact de ces différents aménagements. Il n'est pas possible de déterminer la ou les causes parmi la fixation des chlorures des mines de potasses, l'étanchéification du canal de Huningue (bien que l'augmentation du débit de soutien soit visible en 2003), ou d'éventuels pompages industriels.

3.5.7. Cinquième signal caractéristique

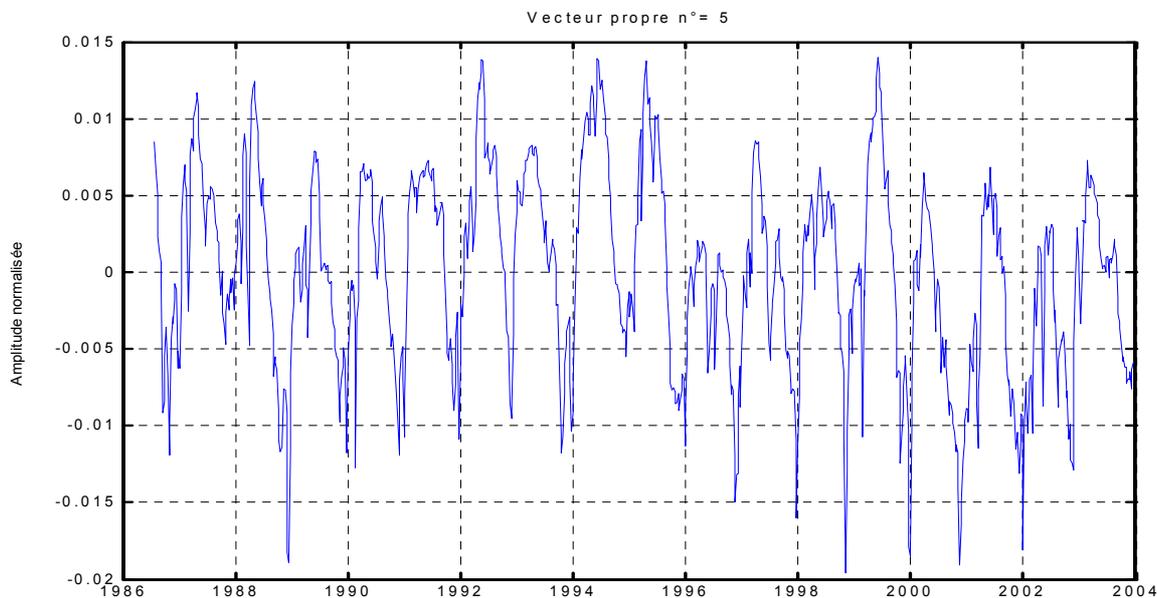


Fig. 29 : Cinquième signal représentatif

Ce dernier vecteur propre utilisé est avant tout un signal de correction des deux premiers vecteurs propres. Au point de vue temporel, on reconnaît un signal très annuel, maximum en été et minimum en hiver, avec des pics négatifs qui correspondent aux grands épisodes de pluie et donc aux crues des rivières.

Le variogramme montre un phénomène continu, qui a une structure de l'ordre de 10 km. On touche ainsi aux variations lentes de faciès de l'aquifère en particulier.

L'échantillonnage ne permet pas de déterminer avec précision des structures, mais permet de mettre en évidence de grands ensembles (voir dans la partie nord de l'aquifère).

On reconnaît en effet le piémont vosgien avec la présence des alluvions vosgiennes moins perméables, qui modifient le comportement (cône de la Zorn, terrasse de Bischoffsheim-Niedernai, Ochsenfeld).

Au centre de la nappe, on reconnaît des zones où les projections sont négatives, et qui réagissent plus aux apports en eau hivernaux que la moyenne des piézomètres. On reconnaît la partie de l'Ill au sud de Colmar et la partie sud du canal du Rhône au Rhin qui infiltrent dans la nappe, peut-être également d'anciens chenaux.

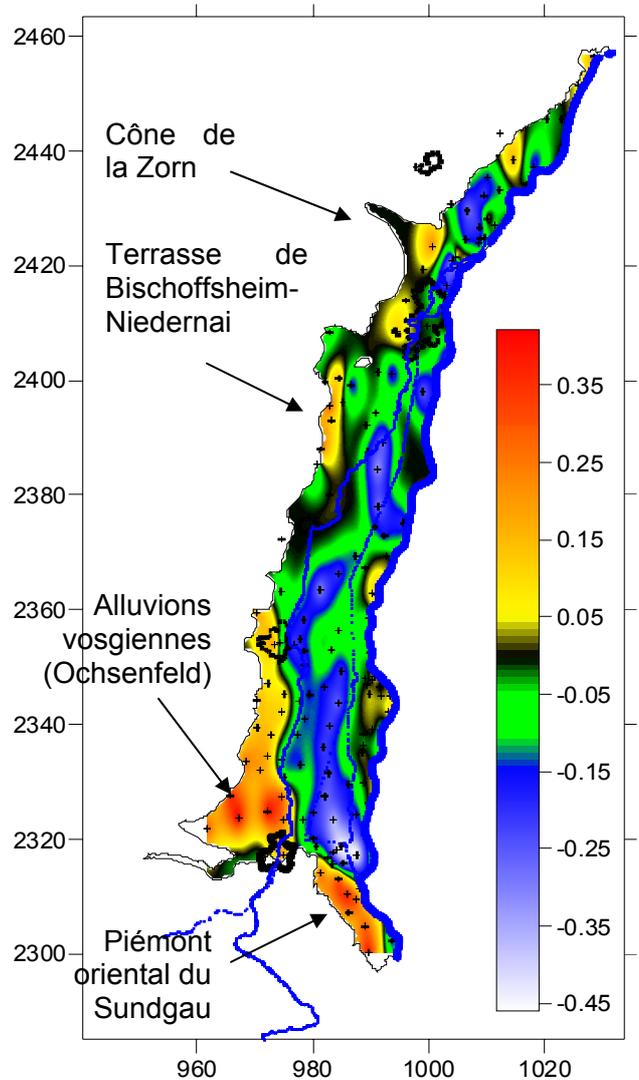


Fig. 30 : Carte krigée des projections de chaque piézomètre sur le cinquième vecteur propre.

3.5.8. Partie non décrite

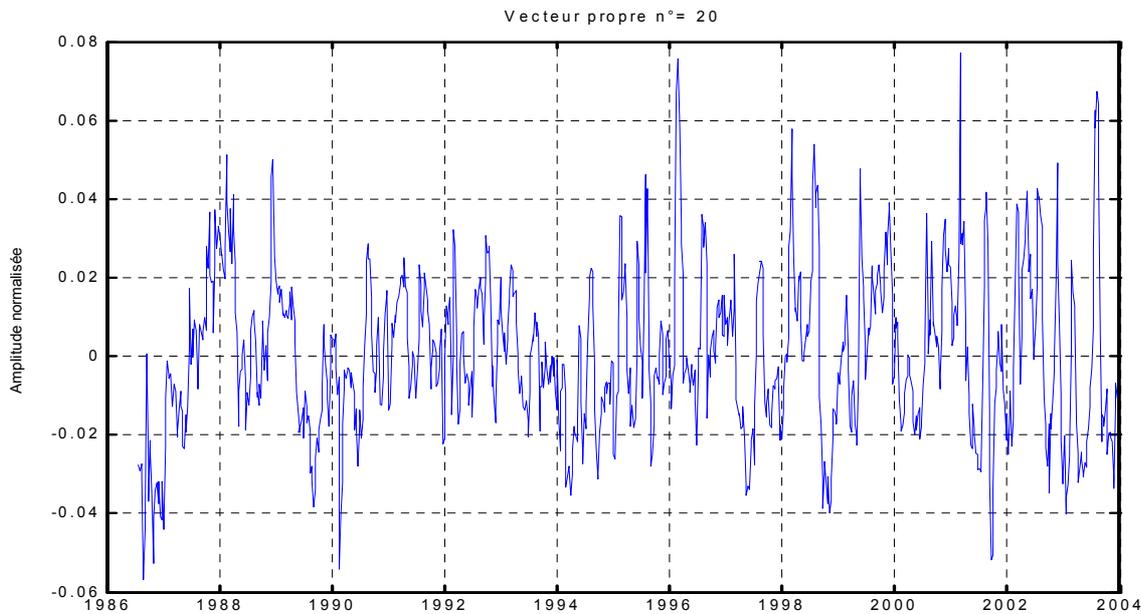


Fig. 31 : Vingtième signal représentatif

Les 5 premiers vecteurs propres permettent de décrire 84% de l'énergie du signal piézométrique. Il est intéressant de caractériser plus précisément la répartition spatiale et la composante temporelle de ce qui est considéré comme du bruit par l'analyse statistique.

Le vingtième vecteur propre, par exemple, n'est plus qu'un signal haute fréquence dont les projections ont une répartition aléatoire, pratiquement nulles sur l'ensemble de la nappe, et non nulles au bord du Rhin au sud de Strasbourg.

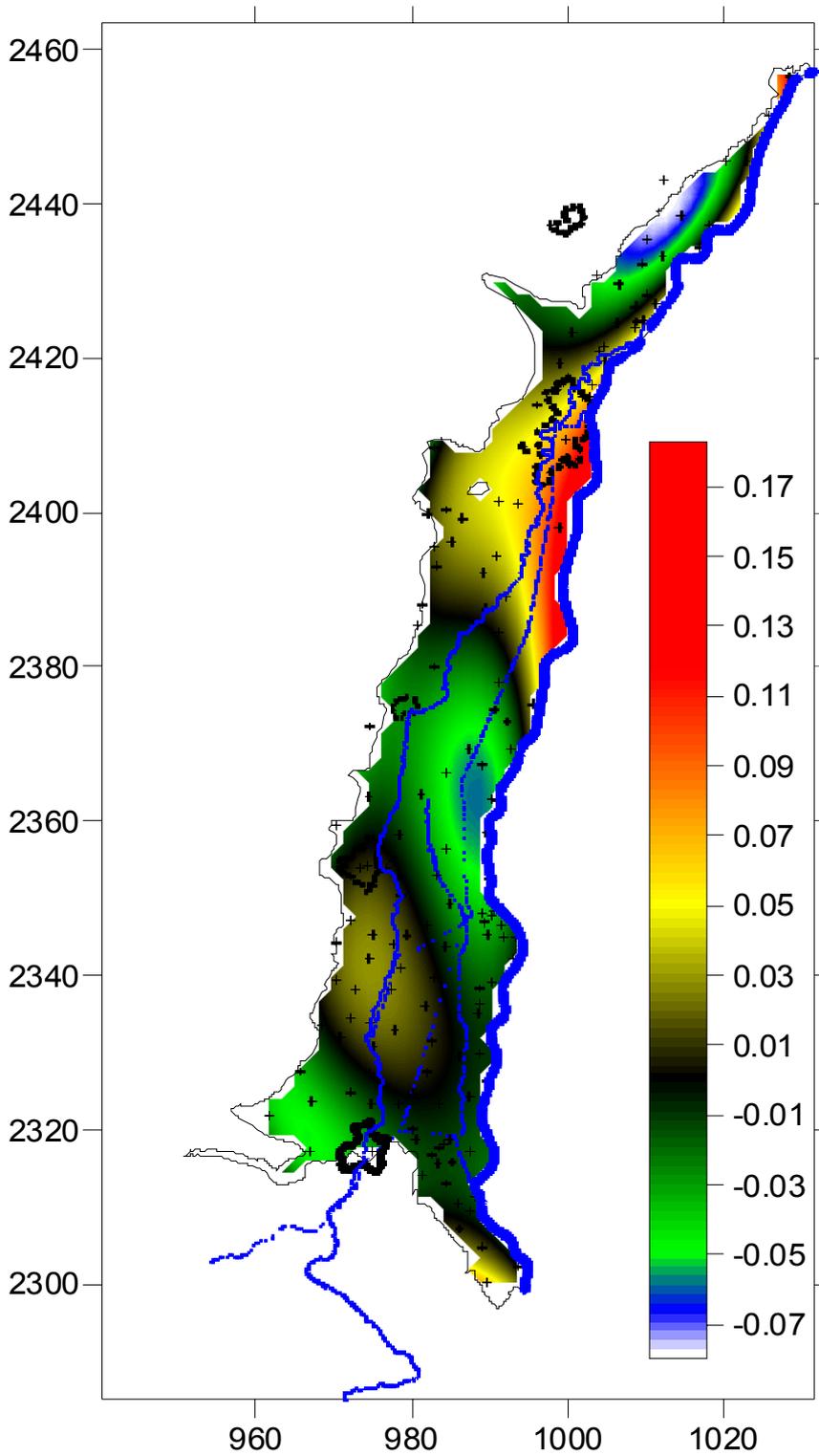


Fig. 32 : Carte krigée des projections de chaque piézomètre sur le vingtième vecteur propre.

3.5.9. Erreurs de description

Le modèle, effectué à partir des 5 premiers vecteurs propres, permet de reconstituer le comportement de la nappe avec des erreurs inférieures à 20 cm d'une manière générale. Les erreurs les plus importantes sont associées à certains piézomètres en particulier (et peuvent atteindre 1 mètre assez systématiquement dans le sud de la région où les battements de nappe sont importants) mais également à certains événements limités dans le temps.

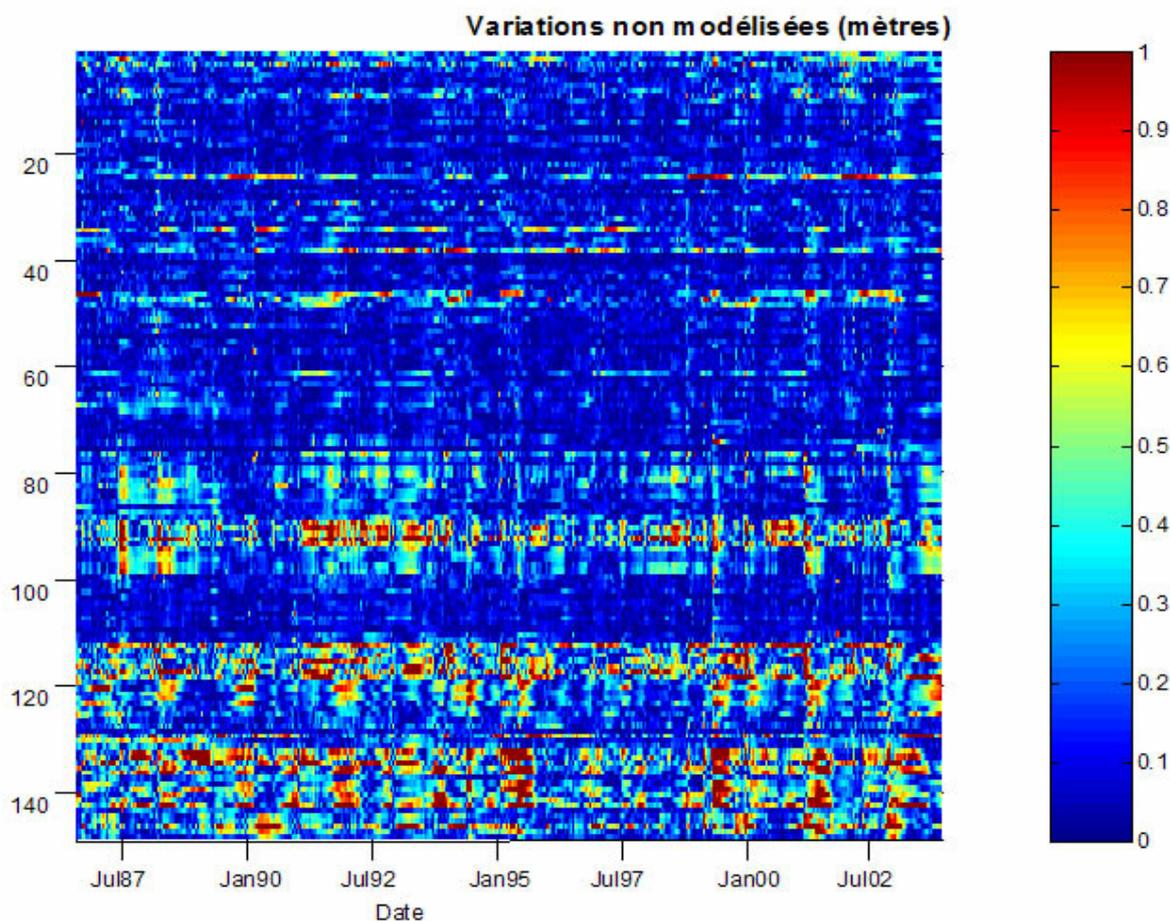


Fig.33 : Résidus de la modélisation effectuée en fonction du numéro du piézomètre et du temps.

Le variogramme des erreurs moyennes présente un saut pour des distances inférieures à 3 km, mais reste continu, avec une structure dont la portée atteint 30 km. Ainsi, des piézomètres suffisamment proches permettent de bien décrire le comportement moyen, considéré comme local, d'un secteur dont le rayon est inférieur à 3 km, au delà, la répartition des erreurs montre un "effet pépite" à $\frac{1}{4}$ de la variance. La variance du signal est atteinte à 30 km, la méthode mathématique décrit donc un comportement global représenté par différentes entités de taille conséquente.

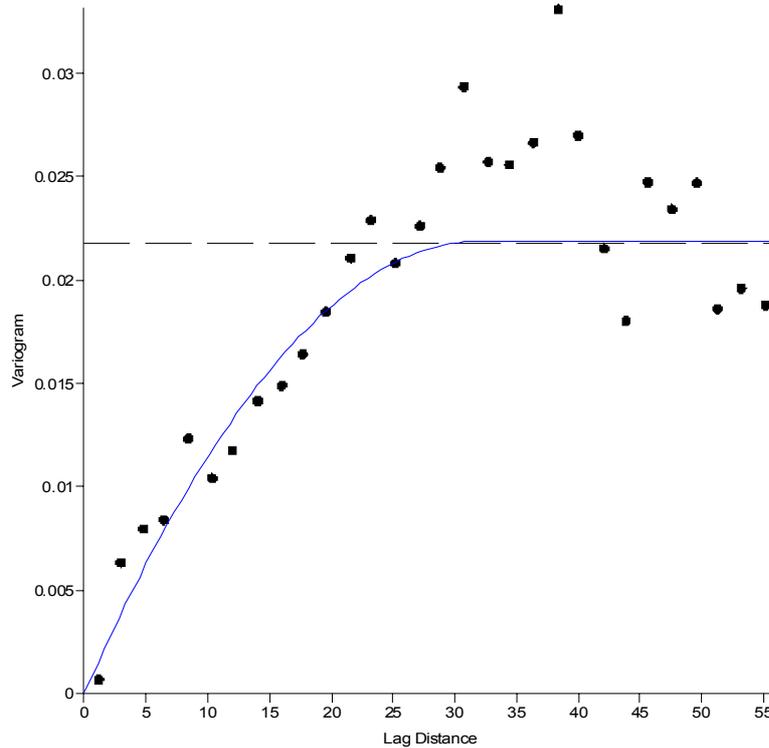


Fig. 34 : Variogramme des erreurs moyennes

Les principaux problèmes de description, mis en évidence dans le chapitre suivant, sont surtout localisés dans les zones de bordure (piémont vosgien, Sundgau), et liés à des caractéristiques hydrologiques locales :

- aux amplitudes de crues (lorsque les piézomètres sont à proximité immédiate des fleuves en particulier),
- aux processus déphasés,

et ainsi représentatifs des variations latérales de l'aquifère, mais également à des processus non modélisés dans le bassin potassique, et principalement autour de l'III.

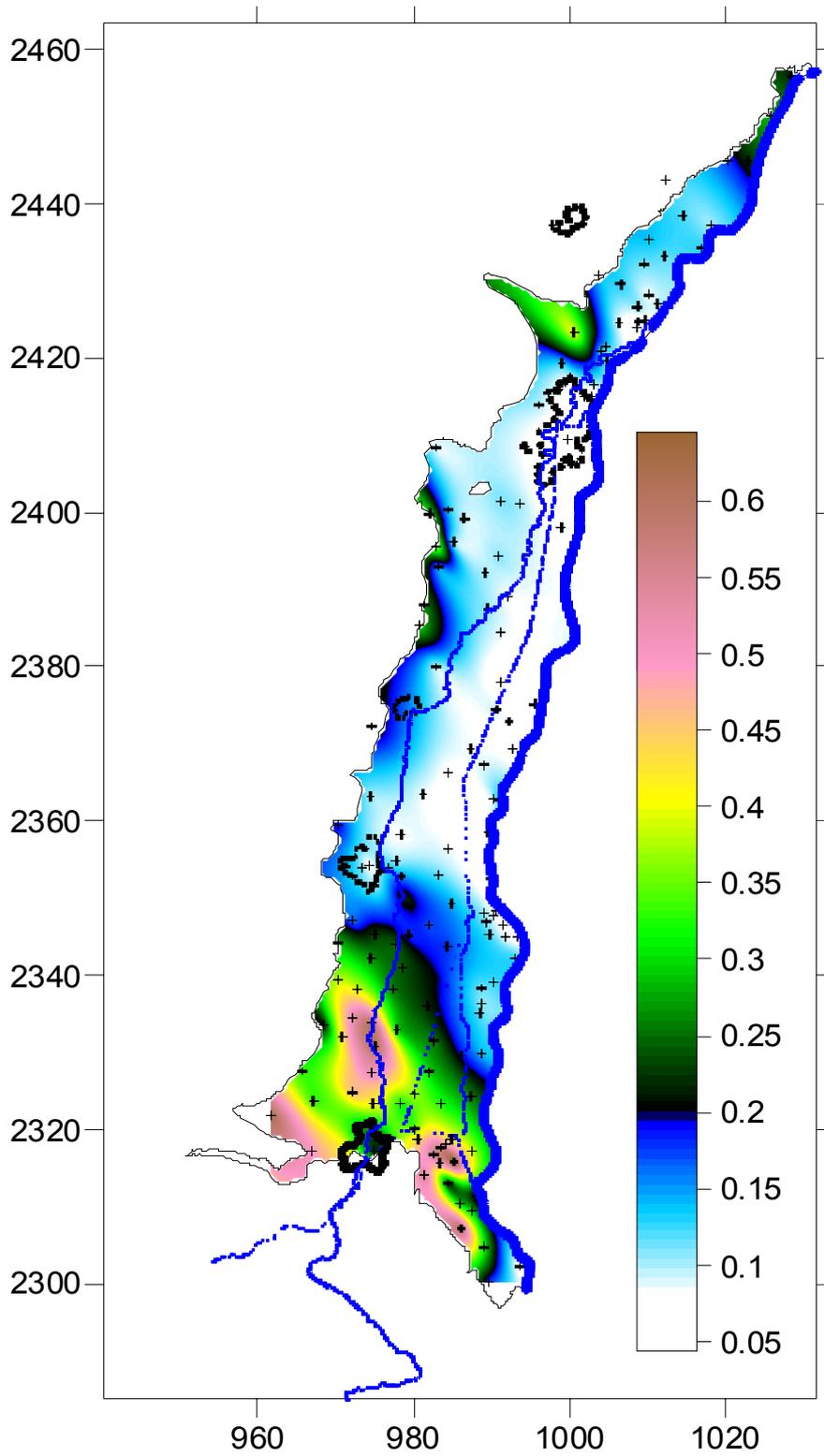


Fig. 35 : Carte krigée des erreurs moyennes (mètres).

3.6. CARACTERISTIQUES DU MODELE STATISTIQUE

Cette partie vise à mettre en évidence les capacités de l'analyse en composantes principales à définir un modèle d'interpolation et de reconstitution de la dynamique de la nappe d'Alsace.

Les trois sous-chapitres suivants vont donc s'atteler à déterminer la qualité de description des 5 signaux caractéristiques déterminés, leur capacité à discriminer les différents apports à la nappe, les difficultés de description de l'analyse, et enfin la possibilité de reconstituer des informations manquantes au travers de chroniques piézométriques de référence.

3.6.1. Reconstitution des chroniques initiales

Piézomètre sur le piémont vosgien

Le piézomètre numéroté 02718X0040 et situé à Bischoffsheim sur le piémont vosgien montre une contribution principale des rivières et de l'Ehn en particulier.

Le modèle représente assez difficilement les crues et la vidange de ce secteur complexe d'alluvions vosgiennes et rhénanes. Les signaux de correction restent d'amplitude non négligeable.

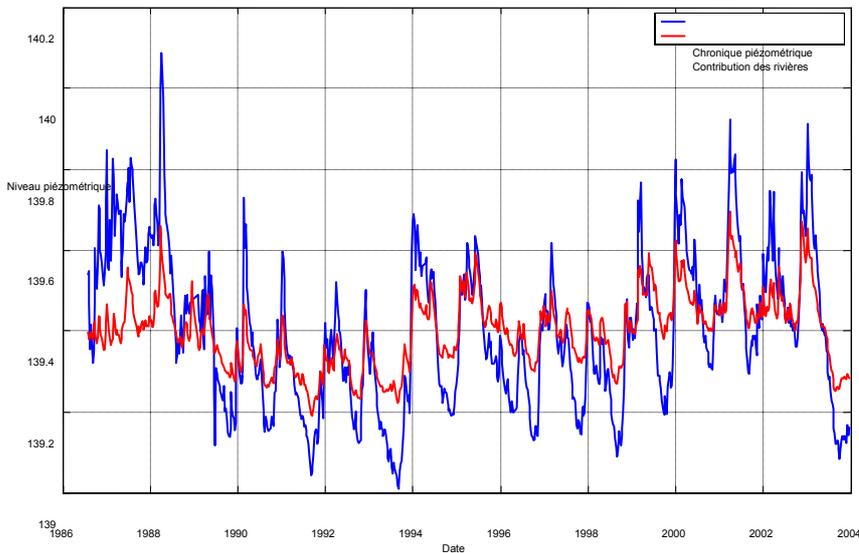
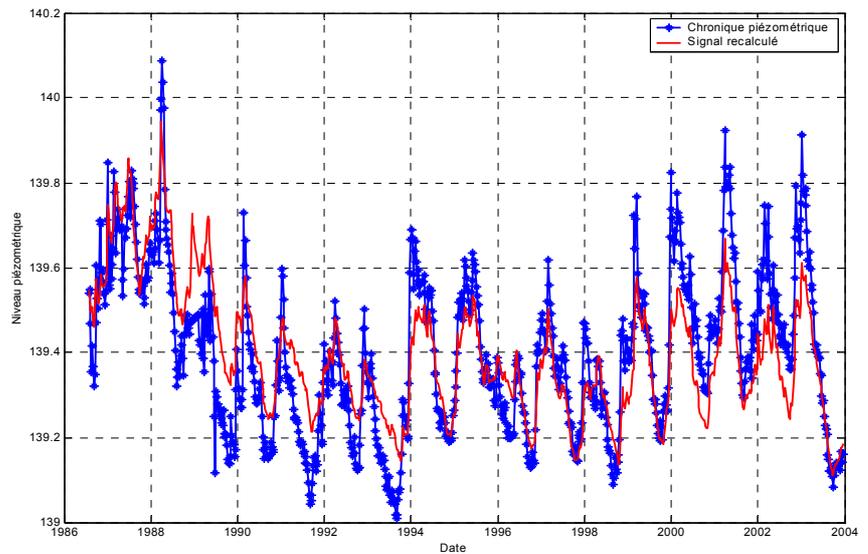


Fig. 36 : Différents signaux en superposition avec la chronique piézométrique originale : du haut en bas : signal reconstitué, apport principal (rivières),.

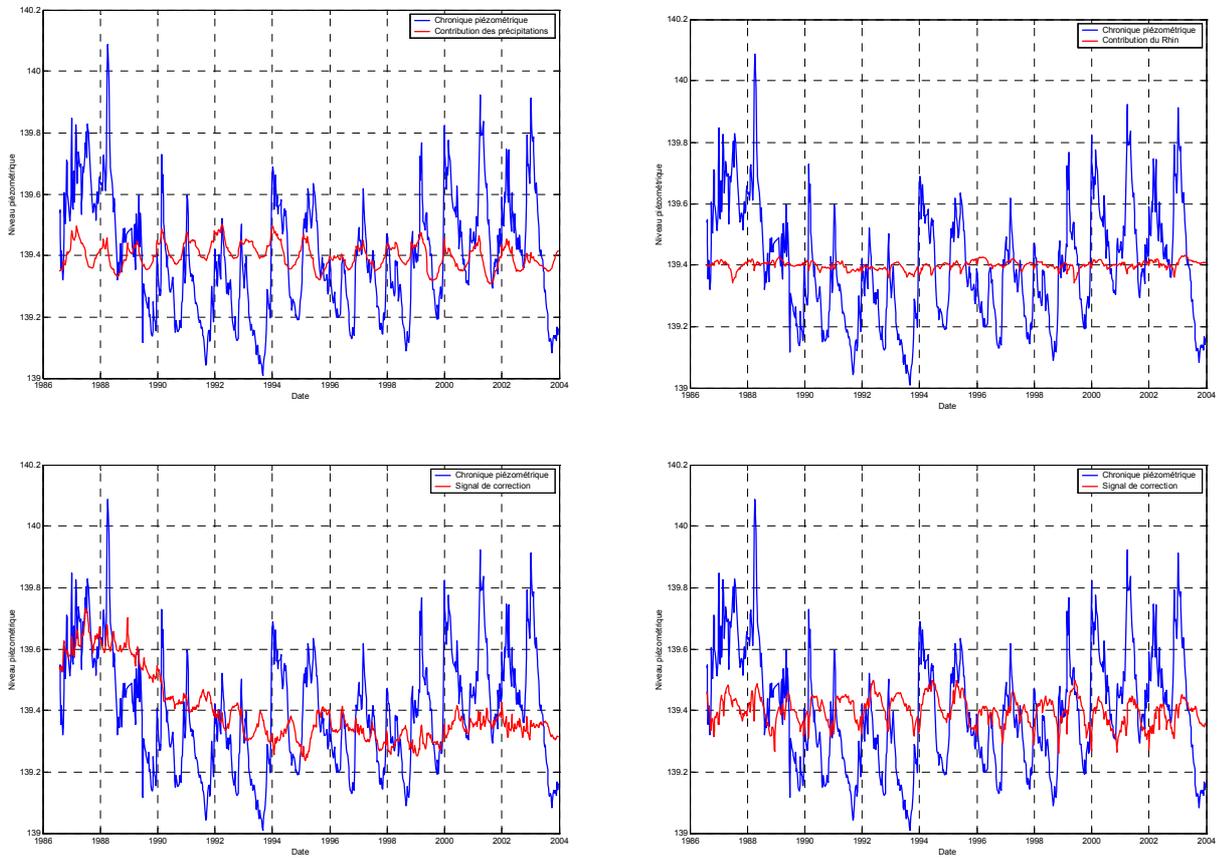


Fig. 37 : Différents signaux en superposition avec la chronique piézométrique originale : de gauche à droite et du haut en bas : apport des précipitations, apports du Rhin, signaux de correction.

Piézomètre à proximité de l'III

Le piézomètre 03078X0014 d'Ebersheim se situe à proximité de l'III : on retrouve en effet des chroniques ayant une composante haute fréquence non négligeable en hiver et au printemps. Les apports du Rhin et les signaux de correction sont pratiquement nuls.

Les crues sont légèrement sous évaluées, mais le comportement hydrologique se révèle être bien cerné par le modèle statistique.

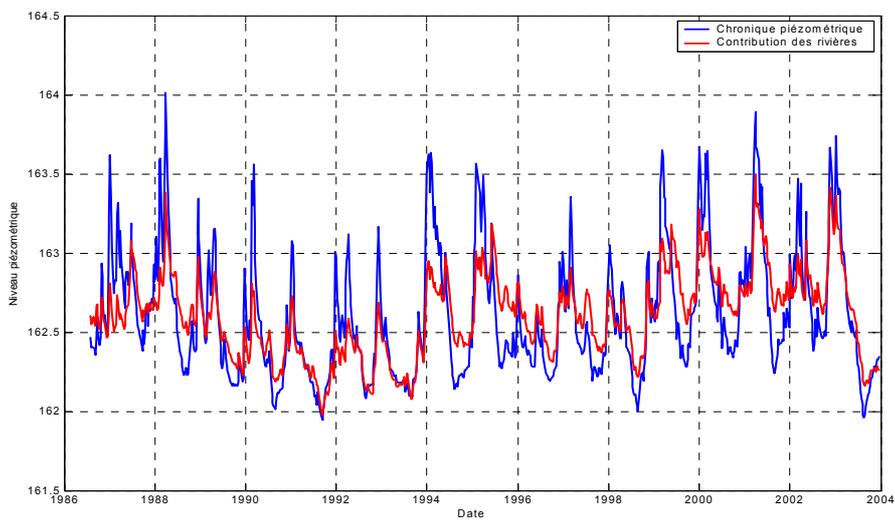
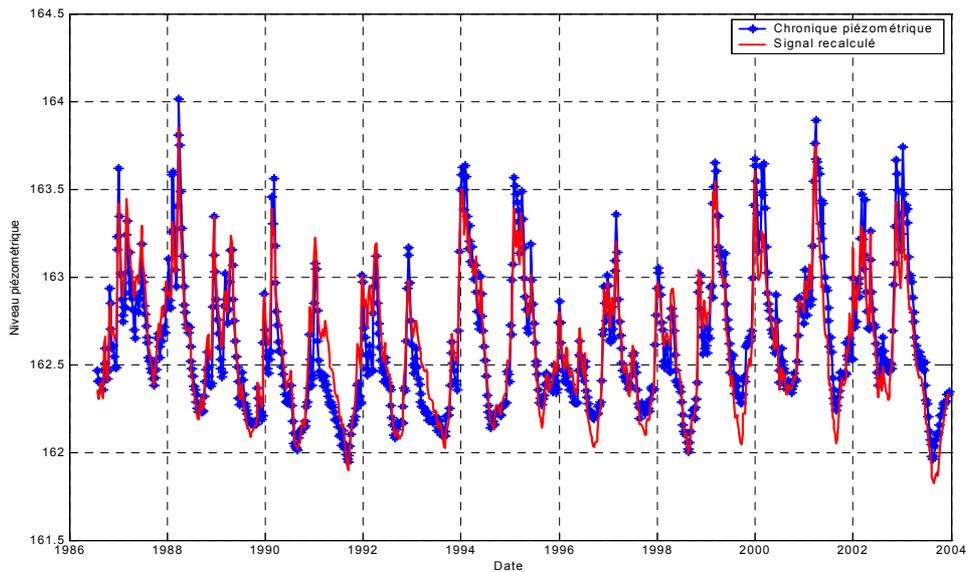


Fig. 38 : Différents signaux en superposition avec la chronique piézométrique originale : du haut en bas : signal reconstitué, apport principal (rivières).

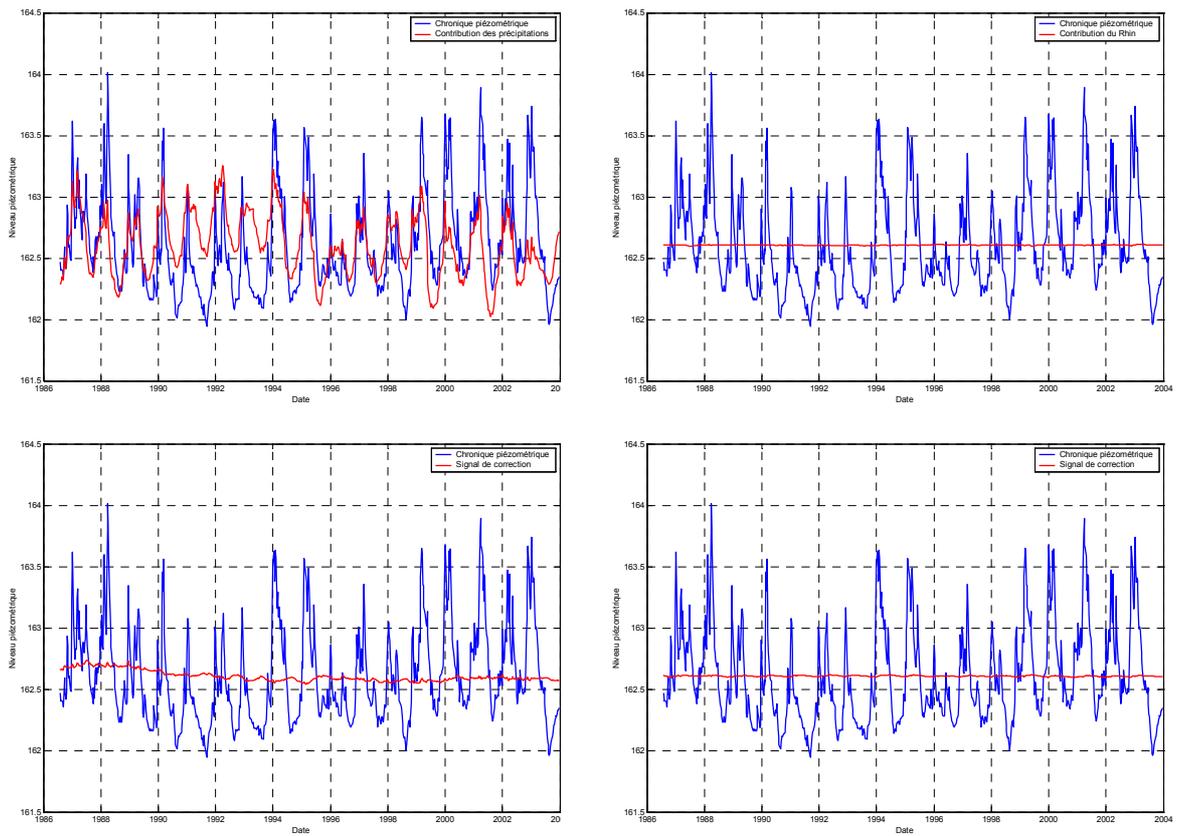


Fig. 39 : Différents signaux en superposition avec la chronique piézométrique originale : de gauche à droite et du haut en bas : apport des précipitations, apports du Rhin, signaux de correction.

Piézomètre à proximité du Rhin

Le piézomètre choisi pour montrer le comportement de la nappe aux alentours du Rhin se situe à Rumersheim-le-Haut (04134X0095). Ce piézomètre se situe à proximité de la forêt de la Hardt dans laquelle les épisodes de pluie efficace atteignent difficilement la nappe. Le signal de pluviométrie se transforme donc, à cet endroit, comme un signal d'apport estival une fois opposé, via le canal de la Hardt.

Les situations de basses eaux ne sont pas toujours bien décrites, et les crues sont quelques fois sous évaluées, le comportement hydrologique semble par contre bien cerné.

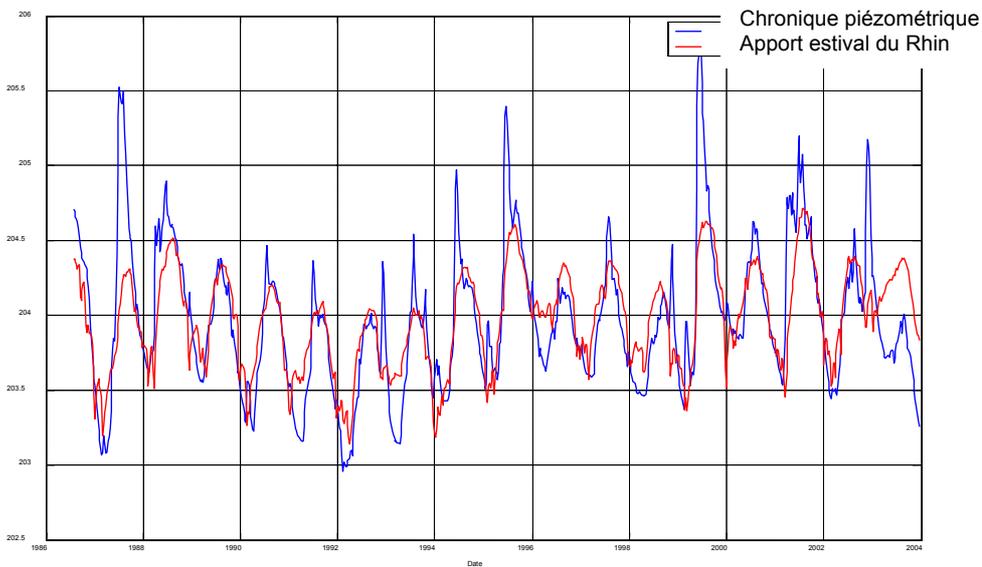
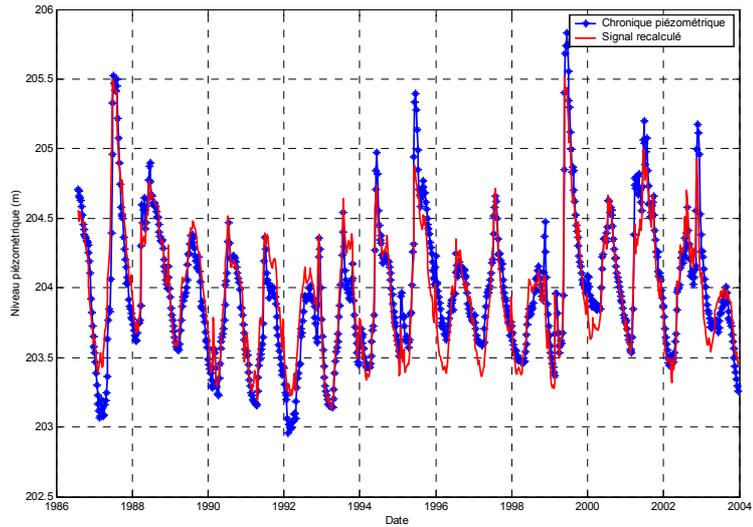


Fig. 40 : Différents signaux en superposition avec la chronique piézométrique originale : du haut en bas : signal reconstitué, apport principal (signal du Rhin estival).

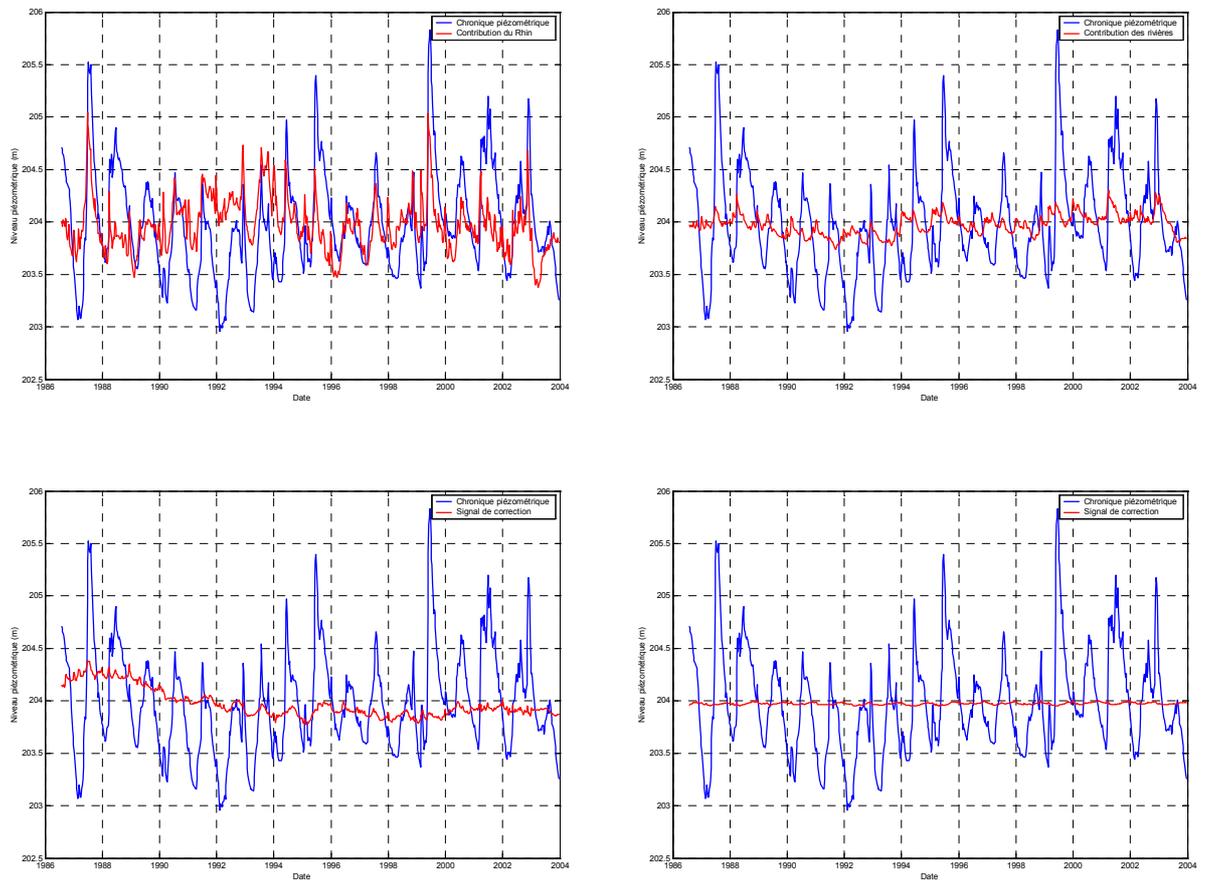


Fig. 41 : Différents signaux en superposition avec la chronique piézométrique originale : de gauche à droite et du haut en bas : apports du Rhin, apports des précipitations, signaux de correction.

3.6.2. Interpolation de données manquantes

Le comportement de l'ensemble de la nappe est régi dans notre modèle par 5 signaux caractéristiques ; il permet soit de reconstituer les données manquantes d'une observation, soit de déterminer les variations du niveau piézométrique d'un point qui n'existe pas.

Dans notre cas, la reconstitution du signal des quatre piézomètres avec lacunes intégrées à l'étude permet une bien meilleure estimation des lacunes conséquentes que l'interpolation linéaire utilisée, puisqu'elle prend en compte les processus sous-jacents déterminés par les 5 premiers vecteurs propres.

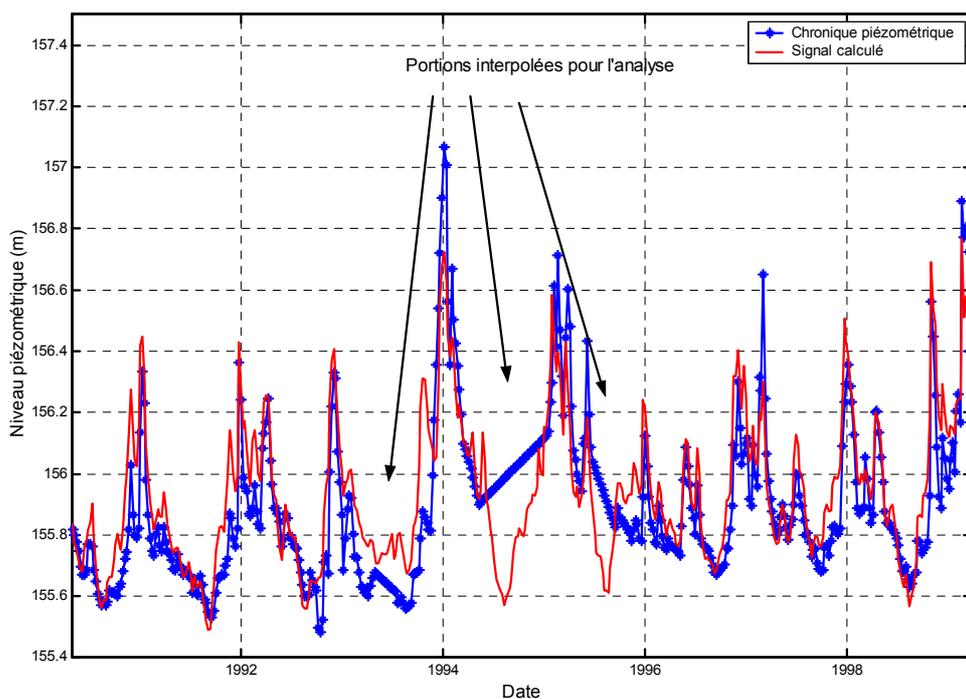


Fig. 42 : Interpolation du signal du piézomètre 03078X0014 d'Ebersheim

Il est également possible de compléter des séries temporelles qui n'ont pas été utilisées dans l'analyse initiale, en les utilisant comme données supplémentaires, dont les parties sans lacunes sont projetées sur les vecteurs propres considérés. Cette méthode permet ensuite, dans des analyses ultérieures, d'intégrer ces chroniques pour une étude plus complète. Cette méthode d'interpolation est beaucoup plus performante qu'une interpolation linéaire classique telle qu'utilisée dans ce travail, mais également beaucoup plus longue (méthode d'interpolation par ACP itérative - Zhang et al. 1993).

3.6.3. Echantillonnage spatial de la nappe d'Alsace

Il est impossible de mesurer le niveau piézométrique à chaque endroit : se pose alors la question de choisir les emplacements de mesure de telle sorte qu'à partir de cette information, il soit possible d'estimer les valeurs de la variable hydrologique en tout point du champ spatial, et ainsi de reconstituer au mieux la réalisation d'un processus, compte tenu des structures du processus qui ont été mises en évidence.

La carte suivante montre les erreurs de description des 5 vecteurs propres utilisés rapportées à un demi-battement de la nappe (demi-différence entre le maximum piézométrique et la situation de basses eaux). Les erreurs sur le piémont ont volontairement été "étirées" vers l'intérieur de la nappe pour des questions de visibilité. D'une manière globale, la nappe est relativement bien décrite, avec des erreurs inférieures à 15 %.

La dynamique des Rieds (entre Sélestat et Strasbourg, au sud ouest de Colmar, au nord de Strasbourg) est très bien décrite, même remarque pour la zone au bord du Rhin, à l'est de Colmar.

Des problèmes apparaissent sur le piémont vosgien, les isopièzes y sont en effet très rapprochées, les alluvions vosgiennes accueillent également en leur sein un ensemble de petites nappes perchées. L'ensemble du bassin potassique est également moins bien décrit, tout comme la zone au nord ouest de Strasbourg, en bordure des terrains pliocènes de Haguenau (cône de la Zorn).

A noter tout de même que d'autres piézomètres sont venus compléter plus tard, après 1986, les mesures du niveau piézométrique, et ne sont donc pas intégrés à cette étude.

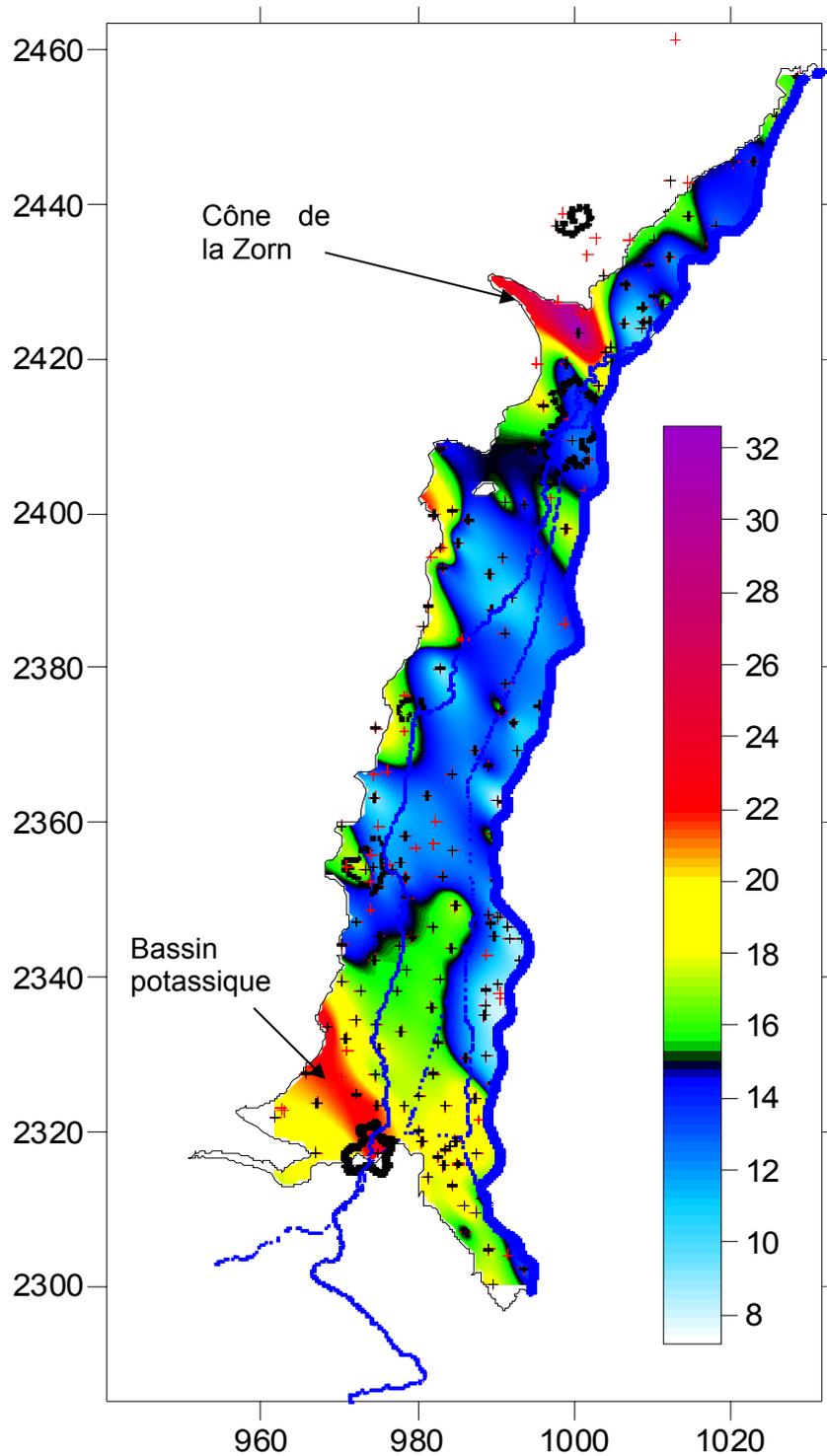


Fig. 43 : Carte krigée des erreurs moyennes (en pourcent). En noir, les piézomètres utilisés pour l'étude, en rouge, ceux qui participent également à l'échantillonnage actuel.

3.7. DETERMINATION DES ZONES D'INFLUENCE

3.7.1. Méthode utilisée

Cette partie repose principalement sur l'interprétation des 5 vecteurs propres. Les projections $a_j(X)$, qui définissent la part d'un signal dans le comportement de chaque piézomètre sont multipliées avec la norme du vecteur propre considéré $\|Y_j(t)\|$ afin d'atteindre des contributions en amplitude. L'ensemble est divisé par un facteur qui définit une amplitude déterminée à partir de l'ensemble des 5 signaux caractéristiques.

$$\sum_{j=1}^5 |a_j(X)| \cdot \|Y_j(t)\|$$

Lorsque les projections sont négatives, quelques modifications ont été effectuées pour décrire un apport avec plus de précision. Le tableau suivant indique les projections utilisées pour le calcul des contributions.

Le 5^{ème} vecteur propre, en particulier, définit une plus grande sensibilité du milieu aux apports hivernaux lorsque les projections sont négatives, il est cependant impossible de séparer les apports de la pluie et des rivières. La zone concernée se situe entre l'III et le canal du Rhône au Rhin et met en évidence des variations latérales de faciès qui permettent un tel comportement.

Contribution	Projections sur le 1 ^{er} signal	Projections sur le 2 nd signal	Projections sur le 3 ^{ème} signal	Projections sur le 4 ^{ème} signal	Projections sur le 5 ^{ème} signal
Apport des rivières	Toutes	-	-	-	Négatives
Apport des pluies efficaces	-	Positives	-	-	
Apport du Rhin	-	Négatives	Positives	-	-
Projections utilisées	Toutes	Toutes	Positives	Aucune	Négatives

L'ensemble des contributions (rivières, pluies efficaces, Rhin) sont quantifiées sur les cartes qui vont suivre, il y a également 2 cartes supplémentaires, l'une où les rivières et la pluviométrie sont inséparables, l'autre qui détermine la qualité de description des 3 apports considérés.

A noter tout de même qu'il est impossible de séparer les apports des différentes rivières – en particulier entre l'Ill et une rivière vosgienne – puisque la méthode se veut globale, il est tout de même possible de délimiter l'influence des apports strictement vosgiens en utilisant la carte de qualité de description.

La méthode, enfin, ne gère pas les déphasages, et met en évidence les réactions quasi-immédiates aux sources considérées (jusqu'à 2 semaines de latence du à l'échantillonnage temporel).

Le tableau suivant montre les résultats obtenus pour les 7 piézomètres de référence utilisés pour le suivi piézométrique patrimonial au niveau du bassin Rhin-Meuse.

Numéro du piézomètre	Situation	Apport des rivières	Apport de la pluviométrie (immédiate)	Partie non séparable	Apport du Rhin	Qualité de description
01995X0012	Sessenheim	38 %	23 %	0 %	0 %	62 %
02347X0022	Reichstett	38 %	24 %	0 %	3 %	65 %
02726X0029	Lipsheim	29 %	29 %	24 %	2 %	84 %
03081X0025	Rossfeld	26 %	22 %	34 %	14 %	96 %
03427X0027	Holtzwihr	38 %	28 %	27 %	4 %	97 %
02783X0046	Hettenschlag	27 %	0 %	17 %	14 %	57 %
04137X0018	Habsheim	30 %	0 %	0 %	16 %	46 %

3.6.2. Contribution des rivières (hors Rhin)

La méthode met en évidence les zones que l'on aurait attribuées intuitivement aux rivières : les bords de l'Ill, et l'ensemble du piémont vosgien qui recueille les eaux des rivières vosgiennes. Au sud de Colmar, où la méthode a quelques problèmes de description, l'influence de l'Ill est sans doute sous-estimée.

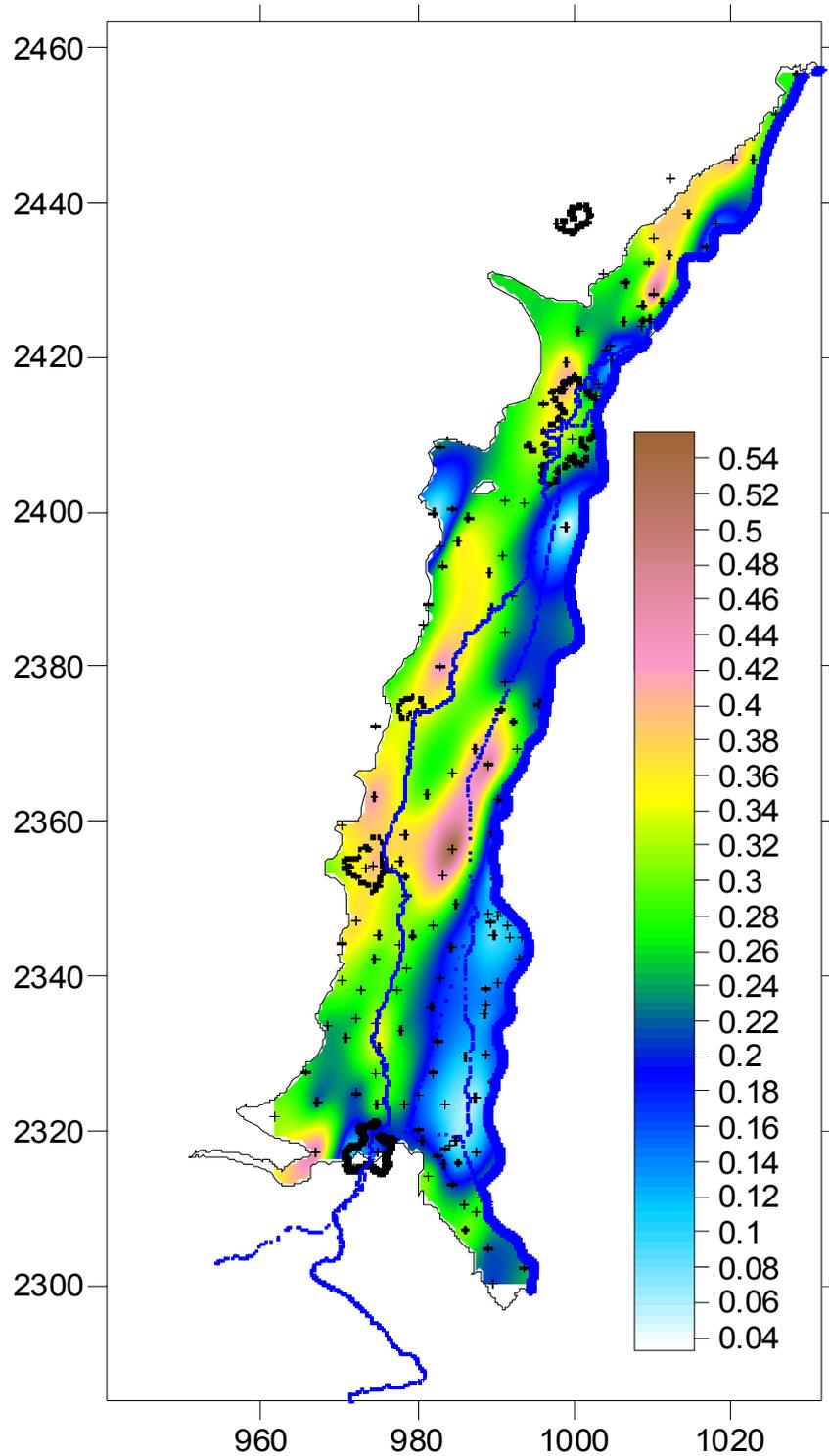


Fig. 44 : Carte krigée de la contribution des rivières au signal piézométrique.

Contribution des précipitations (réaction immédiate)

Les zones humides - ou zones de Ried (le Grand Ried, situé entre Sélestat et Strasbourg, le Ried de la Bruche, celui de la Zorn et de la Moder) – réagissent très rapidement aux précipitations (dans les 2 semaines après l'épisode pluvieux) à cause de la faible épaisseur de la zone non saturée. D'autres espaces sont sensibles aux précipitations, mais les temps de transit entre le sol et la nappe sous-jacente, non gérés par la méthode, impliquent qu'ils ne figurent pas sur la carte.

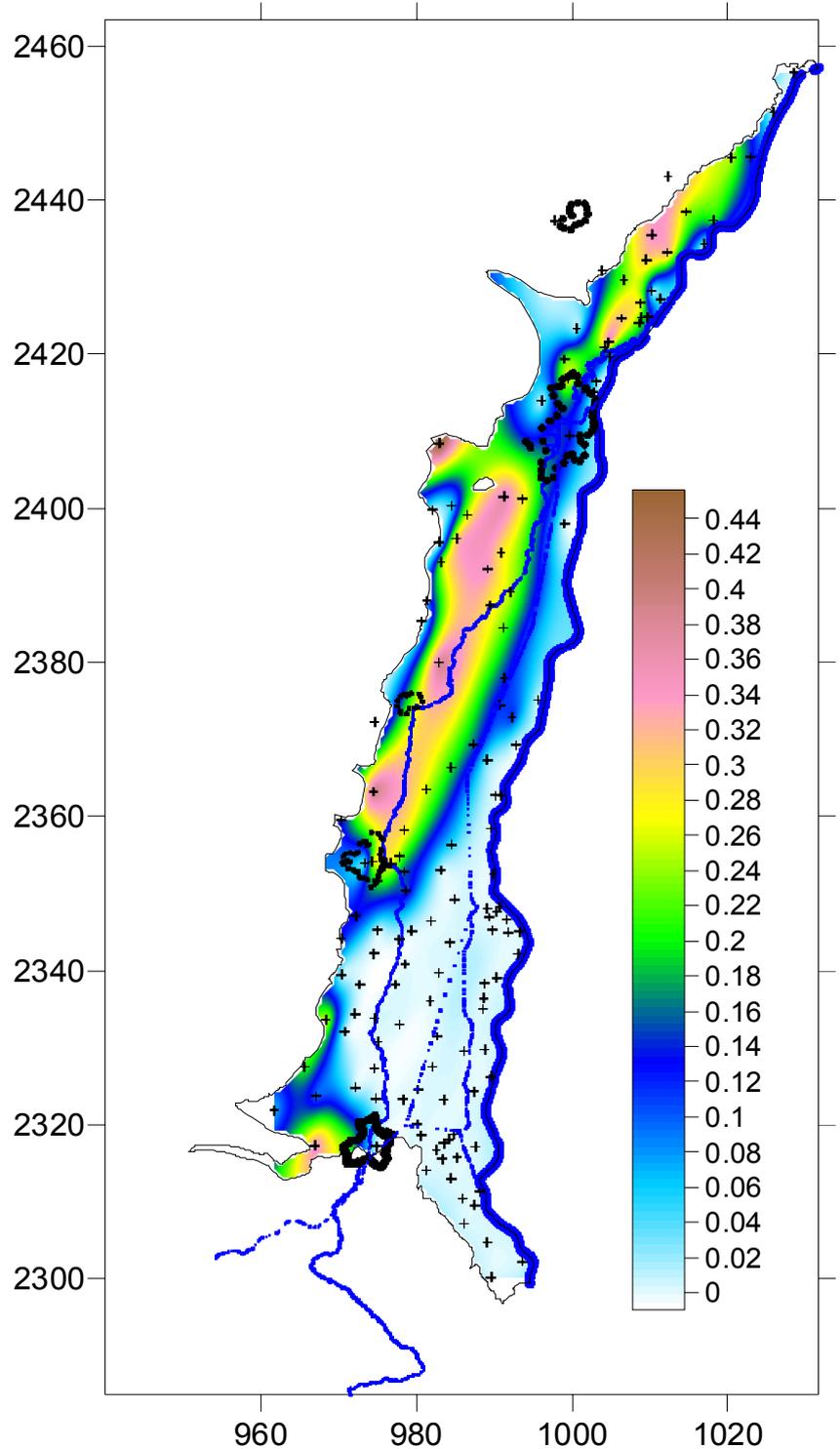


Fig. 45 : Carte krigée de la contribution des pluies efficaces au signal piézométrique.

Contribution du Rhin

L'influence du Rhin reste limitée à ses abords immédiats jusqu'à une distance de 3 kilomètres maximum. Au sud de Colmar, le canal de la Hardt, qui prend son eau dans le Rhin pour soutenir le niveau de la nappe en été, permet de délimiter une zone des plus sensibles au signal du Rhin.

On retrouve ainsi les résultats obtenus dans l'étude du secteur Fessenheim-Breisach (Regierungspräsidium Freiburg, 2002).

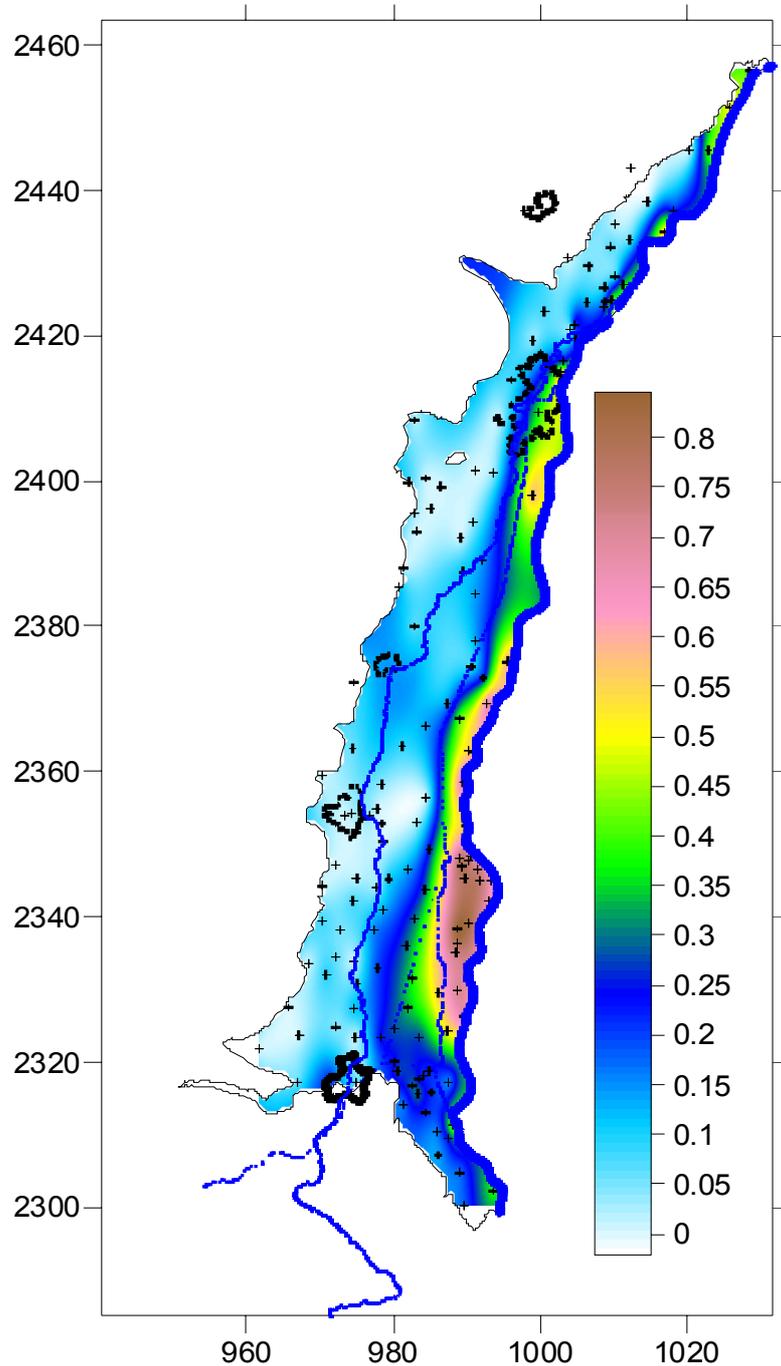


Fig. 46 : Carte krigée de la contribution du Rhin au signal piézométrique.

Cette carte montre la décroissance de l'influence du Rhin avec la distance, en prenant pour référence l'effet maximal (valeur 1) observé sur une même latitude. Bien que l'échantillonnage ne donne pas à cette carte de valeur autre que qualitative, elle permet d'avoir une idée des variations de la transmissivité de la nappe, importante au sud de Strasbourg, et plus faible au nord.

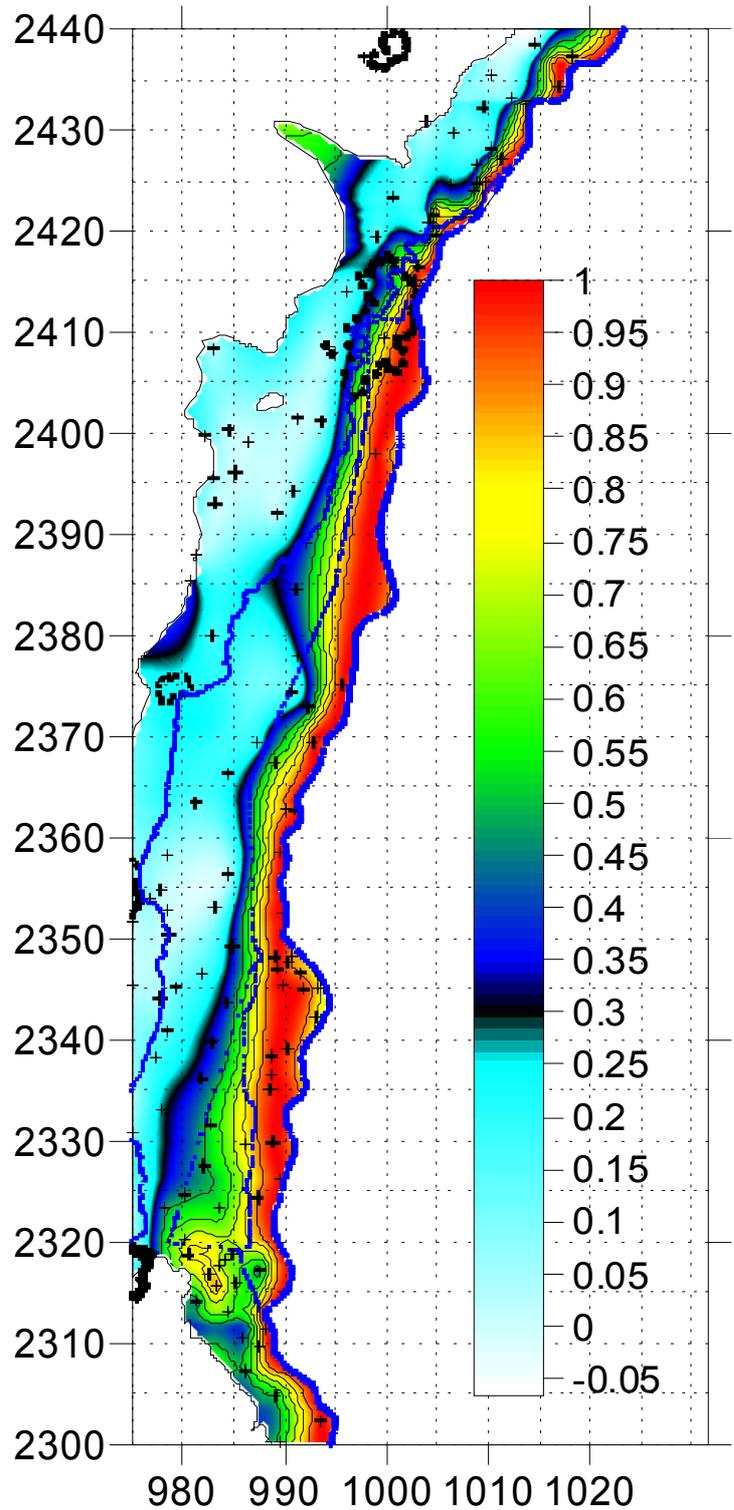


Fig. 47 : Carte krigée de la décroissance de l'effet du Rhin avec la distance.

Contribution non séparable de l'III et de la pluviométrie

Cette carte, tirée des valeurs négatives des projections sur le cinquième vecteur propre, met en évidence des zones plus sensibles aux apports hivernaux, où il est impossible de faire la distinction entre un apport des rivières et une réaction immédiate aux précipitations.

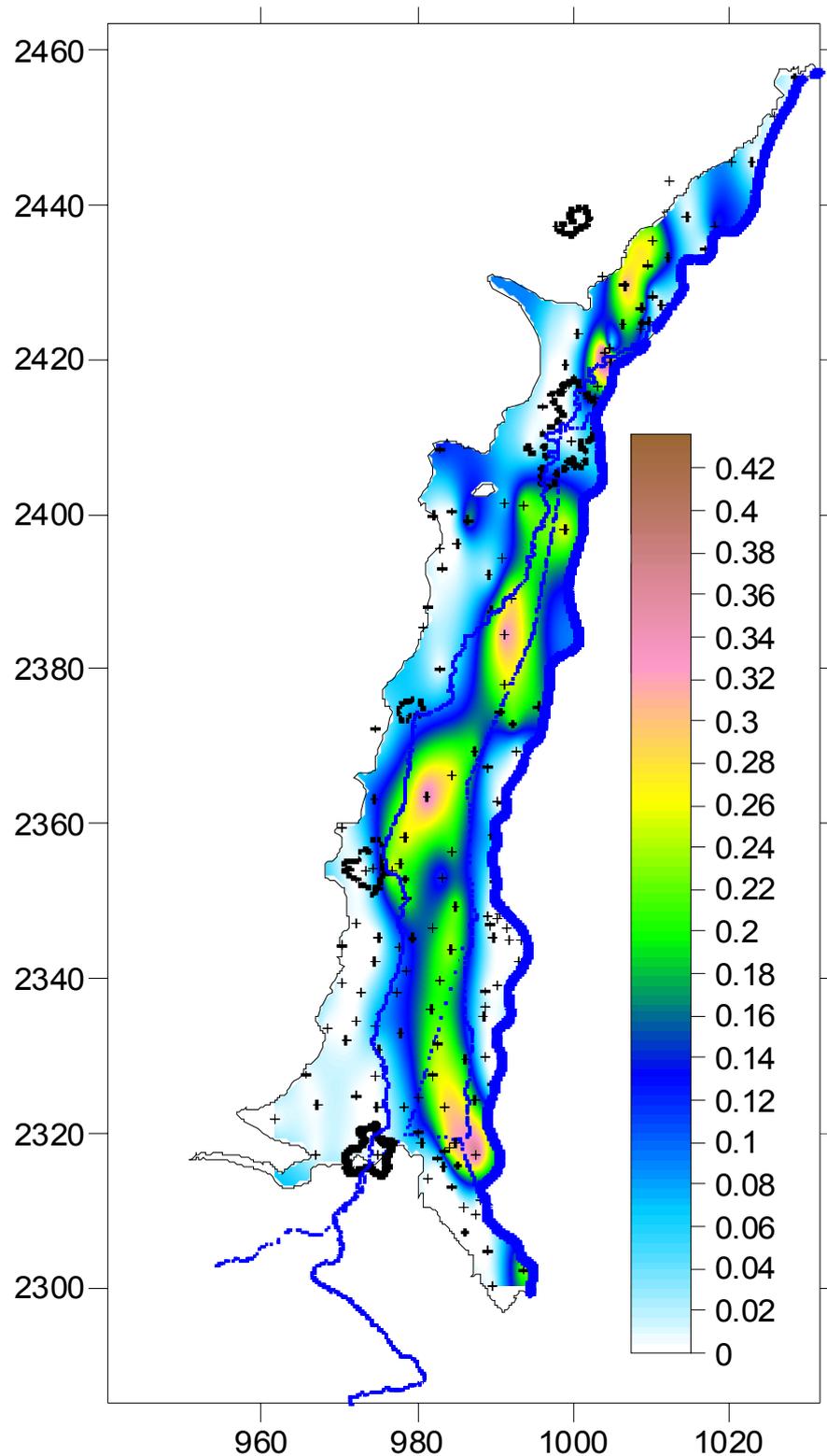


Fig. 48 : Carte krigée de la contribution non séparable des rivières et de la pluviométrie

Qualité de description des 3 apports déterminés

Les trois apports ayant une contribution dans les 2 semaines au signal piézométrique ne permettent pas de déterminer entièrement le comportement de la nappe. Ainsi, sur les zones de bordure, au pied du Sundgau, sur le piémont vosgien, dans le bassin potassique et au nord-ouest de Strasbourg, d'autres comportements sont à prendre en compte, tels que l'apport des pluies filtrées par les sols (et possédant ainsi un temps de latence), la présence d'alluvions vosgiennes ou de sols plus épais qui augmentent le temps de transit, la présence de petites nappes perchées qui se déversent avec un temps de latence dans la nappe des alluvions rhénanes.

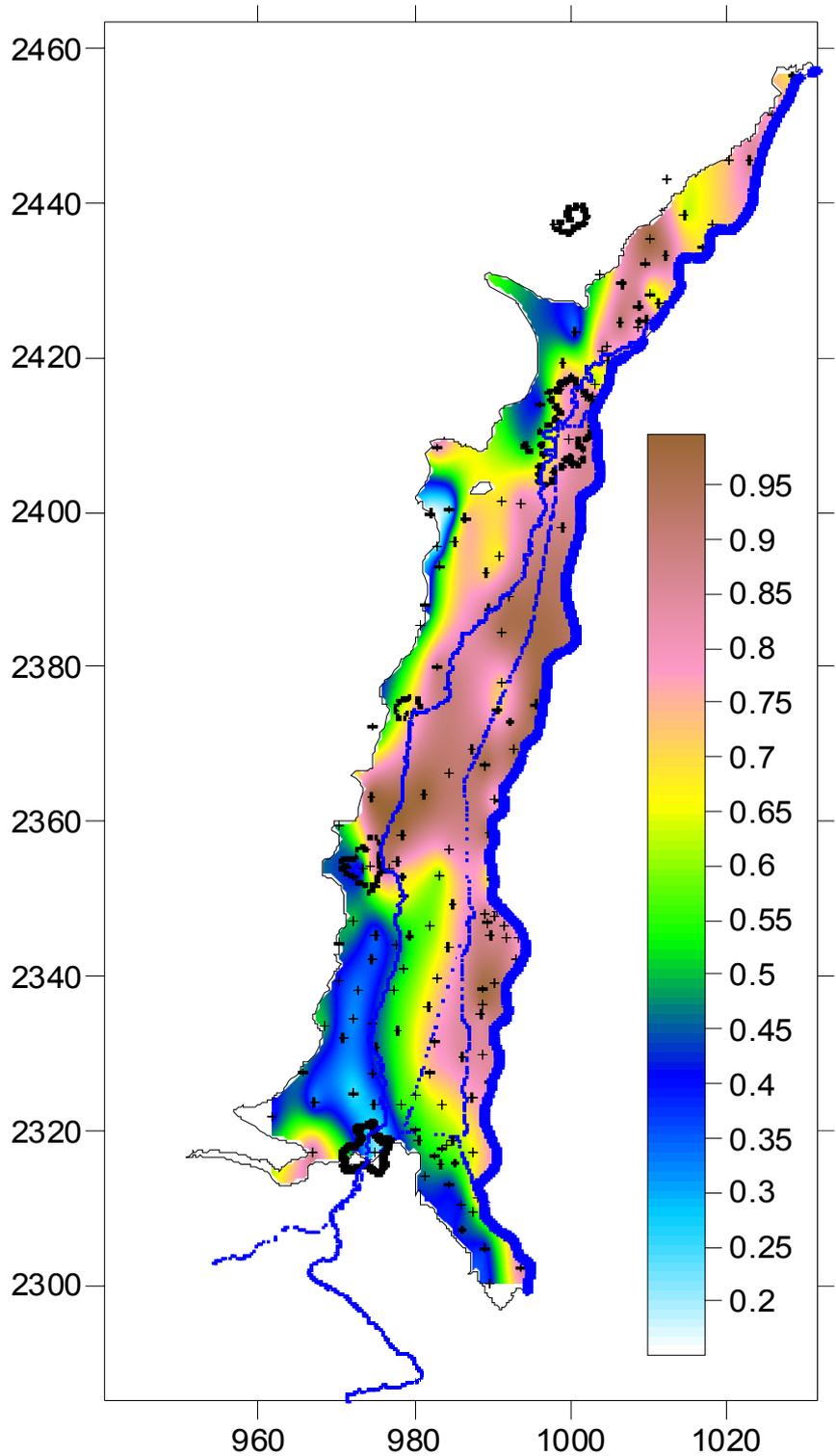


Fig. 49 : Carte krigée de la qualité de description des 3 principaux apports déterminés.

4. Tracé de surfaces piézométriques

Le chapitre 3 a permis de mettre en évidence les capacités de l'analyse à décrire le comportement de la nappe en confrontant les chroniques mesurées et calculées. En allant plus loin, la méthode permet également de reconstituer des chroniques piézométriques dans des zones non mesurées mais dont les processus hydrologiques sont équivalents à ceux déterminés, avec des erreurs que l'on peut considérer comme équivalentes aux erreurs de description de la zone considérée.

L'interpolation par krigeage des différentes caractéristiques de la nappe déterminées par la méthode (répartition des projections, de la variance du signal) permet, en effet, de reconstituer l'amplitude des variations piézométriques sur l'ensemble de la nappe des alluvions rhénanes.

4.1. ANALYSE DES DONNEES ALLEMANDES

Les chroniques de soixante piézomètres de référence du côté badois de la nappe du fossé rhénan supérieur ont été fournies par le LfU. L'intégration de ces données aux chroniques du côté français n'a modifié que légèrement les résultats obtenus par l'analyse en composantes principales. Ces résultats sont intuitivement logiques, les processus associés au fonctionnement de la nappe sont identiques de chaque côté de la frontière.

4.2. ANIMATION

Une animation de la nappe a été calculée à partir de la superposition de toutes les situations hydrologiques hebdomadaires. Au point de vue scientifique, elle permet de mieux se rendre compte du fonctionnement dynamique de la nappe d'Alsace, de la propagation et de l'amortissement des crues, des différentes zones de comportement mais, sans négliger l'aspect ludique, elle permet également de représenter visuellement une réalité souterraine.

4.3. SITUATIONS DE REFERENCES

Le modèle hydrodynamique de la nappe d'Alsace, géré par l'APRONA, nécessite des situations hydrologiques de référence pour caler les caractéristiques physiques. Les cartes suivantes, calculées à partir du modèle statistique, représentent d'une part, les images des situations hydrologiques de référence, et d'autre part trois situations équivalentes intéressantes :

- la situation de moyennes eaux de référence (octobre 1986)
- la situation de moyennes eaux de juin 1996
- la situation de basses eaux de référence (septembre 1991)
- la situation de basses eaux d'août 2003
- la situation de hautes eaux de référence (avril 1988)
- la situation de hautes eaux de décembre 2002

4.3.1. Carte des moyennes eaux d'octobre 1986

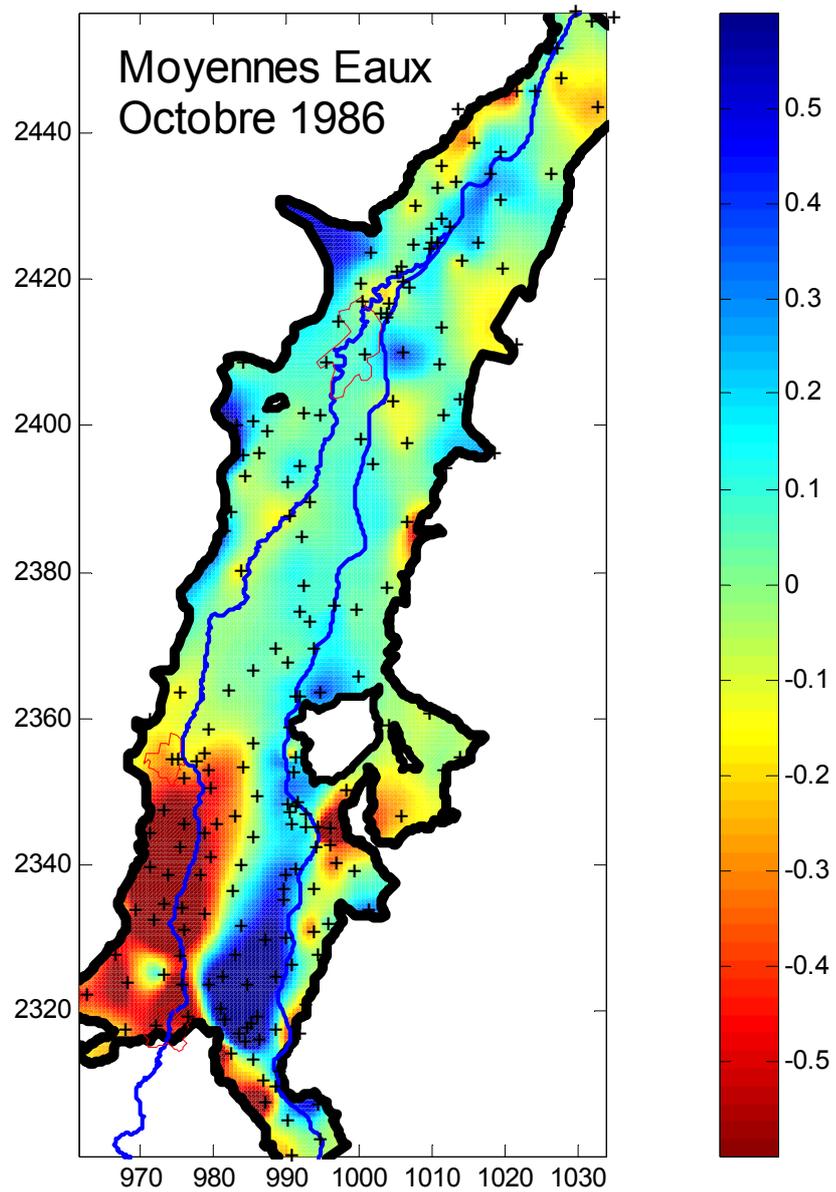


Fig. 50 : ME octobre 1986 - Variations du niveau piézométrique par rapport à la moyenne (mètres).

4.3.2. Carte des basses eaux de septembre 1991

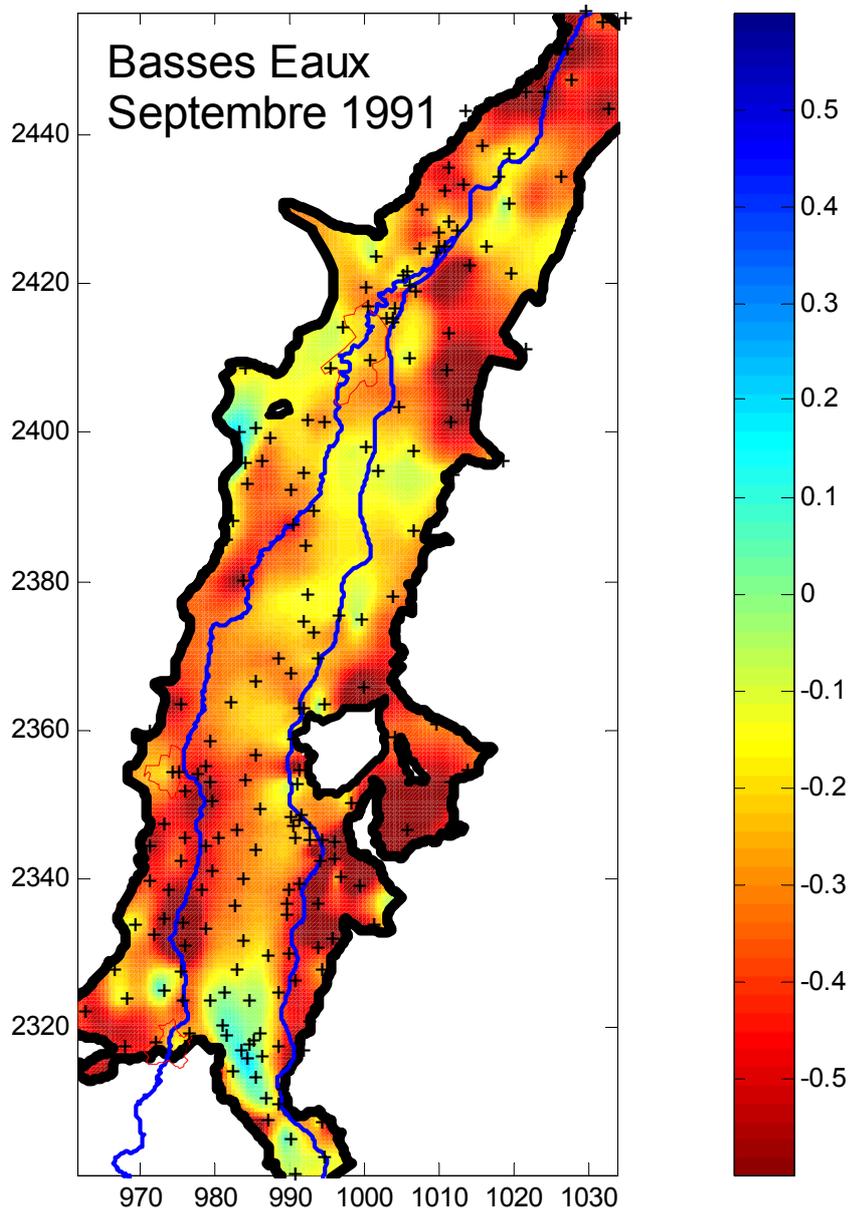


Fig. 51 : BE septembre 1991 - Variations du niveau piézométrique par rapport à la moyenne (mètres).

4.3.3. Carte des hautes eaux d'avril 1988

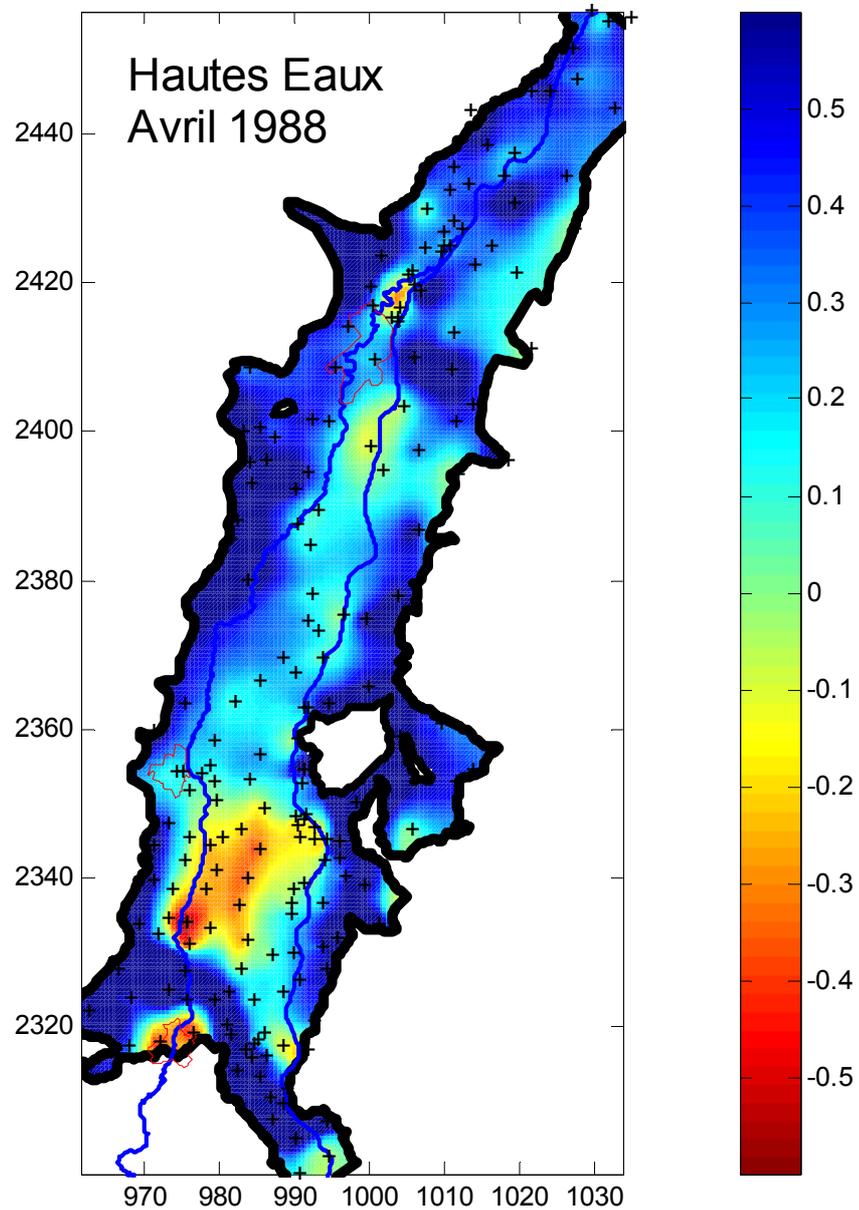


Fig. 52 : HE avril 1988 - Variations du niveau piézométrique par rapport à la moyenne (mètres).

4.3.4. Carte des moyennes eaux de juin 1996

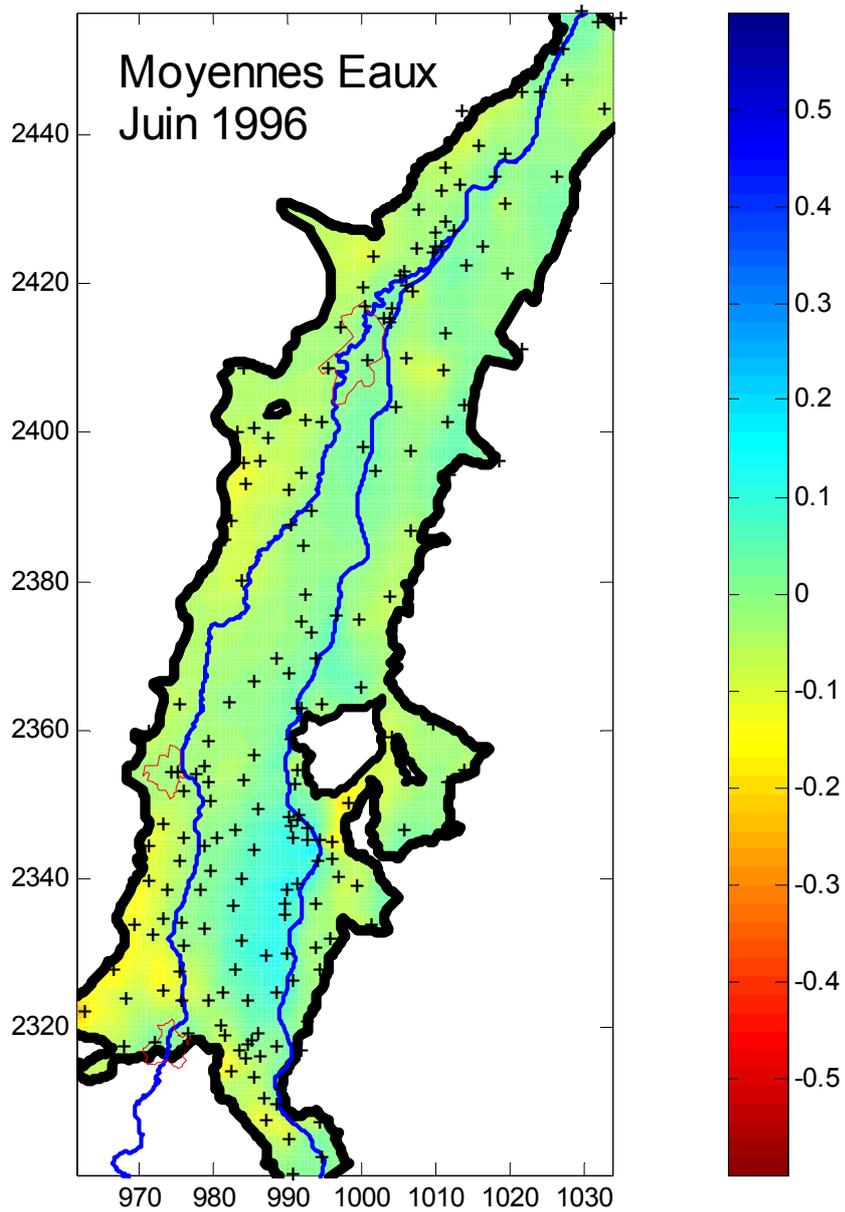


Fig. 53 : ME juin 1996 - Variations du niveau piézométrique par rapport à la moyenne (mètres).

4.3.5. Carte des basses Eaux d'août 2003

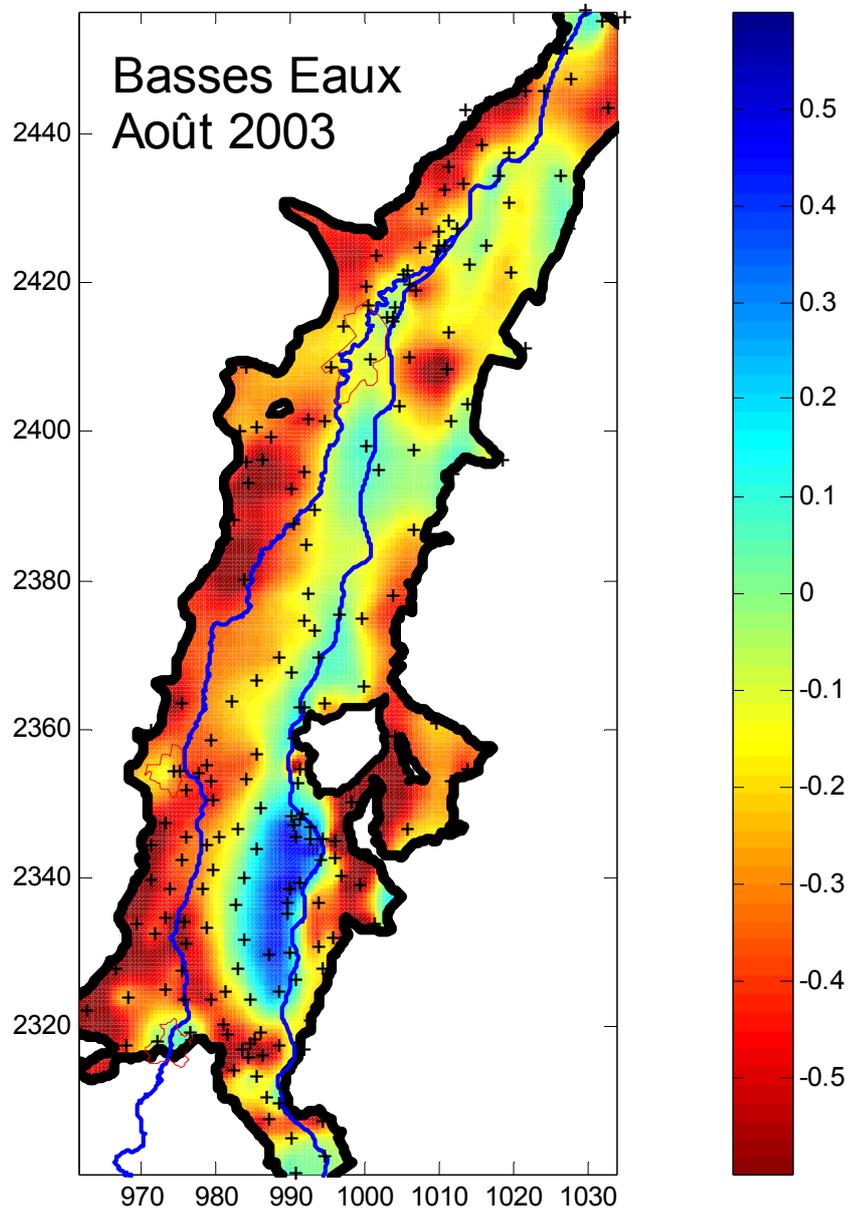


Fig. 54 : BE août 2003 - Variations du niveau piézométrique par rapport à la moyenne (mètres).

4.3.6. Carte des hautes eaux de décembre 2002

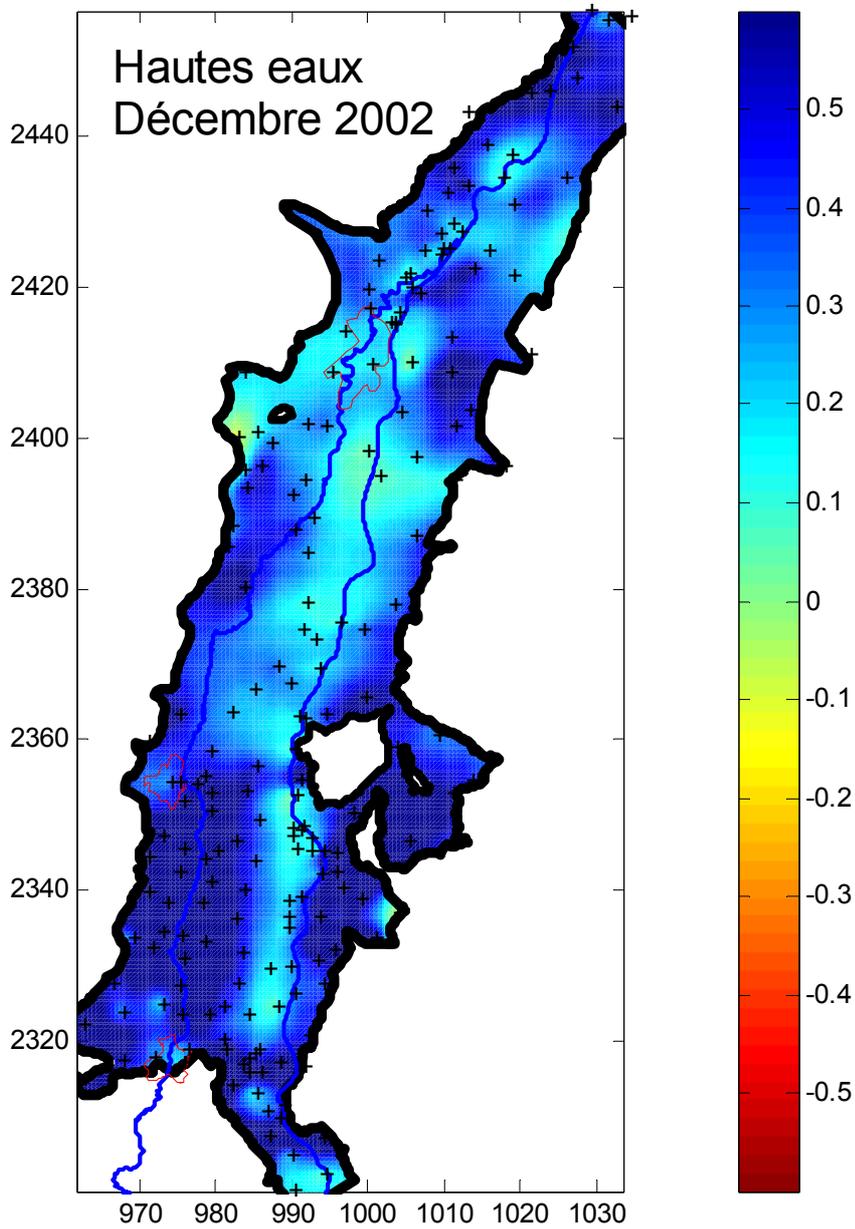


Fig. 55 : HE décembre 2002 - Variations du niveau piézométrique par rapport à la moyenne (mètres).

5. Conclusions

Ce rapport retrace donc les différentes étapes et résultats de l'analyse en composante principale, effectuée sur un ensemble de 149 piézomètres répartis dans la nappe des alluvions rhénanes. Cette analyse statistique a nécessité quelques étapes de mise en forme des données, et pose quelques problèmes :

- Les chroniques ne doivent pas contenir de lacunes.
- Les données doivent être corrigées d'éventuels sauts et valeurs aberrantes.
- Tous les phénomènes sont considérés comme concomitants (selon l'échantillonnage temporel), les temps de transit ne sont ainsi pas gérés.
- Il est possible que les vecteurs propres aient une composante purement mathématique due à la méthode de construction.

Au point de vue temporel, l'analyse en composantes principales permet de discriminer les différents apports à la nappe d'Alsace (rivières vosgiennes, précipitations, Rhin). Des signaux de correction viennent ensuite préciser les comportements plus locaux et reflètent les variations de faciès de l'aquifère.

Au point de vue spatial, l'ensemble des variogrammes des trois premiers vecteurs propres principaux (mais également le cinquième) met en évidence des phénomènes continus et des structures marquées avec des portées variant entre 10 et 20 km. On touche ainsi à des caractères moyens variant sur l'ensemble de la nappe et décrivant au mieux une réalité physique. Au fur et à mesure que le numéro du vecteur propre augmente, le comportement décrit est de plus en plus local.

Ainsi, la méthode mathématique permet de déterminer une structure au comportement dynamique de la nappe. Autant au niveau spatial que temporel, les chroniques piézométriques sont ensuite filtrées en fonction de la structure choisie pour permettre de reconstituer les variations du niveau de la nappe en amplitude.

L'analyse en composantes principales est ainsi une méthode puissante d'analyse des données donnant des résultats intéressants sur des données piézométriques. L'interprétation des résultats, non conduit sur la partie badoise dans ce rapport, reste une étape nécessaire qui conduit à des informations constitutives sur le comportement global de la nappe d'Alsace.

6. Bibliographie

PUBLICATIONS

Angot, A. (1982) - Compléments de mathématiques, Masson

Baccini, A. & Besse, Ph. - Statistique descriptive multidimensionnelle : techniques factorielles de base, accessible sur Internet,

De Marsily, G. (1981) - Hydrogéologie quantitative. Paris, Masson.

Jaillard, L. (2003) - Eléments d'hydrologie et d'hydrogéologie entre Mulhouse et Colmar en vue d'une modélisation de la nappe d'Alsace. Rapport Luc Jaillard Consultant.

Regierungspräsidium Freiburg (2002) – Reconnaissance transfrontalière de l'aquifère profond dans la bande rhénane entre Fessenheim et Breisach. Rapport final projet Interreg II.

SITES INTERNET

APRONA <http://www.aprona.net>

Réseau national des données sur l'eau <http://www.rnde.tm.fr>

Infoterre du BRGM <http://infoterre.brgm.fr>



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Alsace
15 rue du Tanin
BP 177 - LINGOLSHEIM
67834 – TANNERIES CEDEX - France
Tél. : 03.88.77.48.90