HAL
open science

Méthodologie de définition des zones de remontée de nappe. Cartographie de l'aléa sur la plaine d'Alsace

Suzanne Schomburgk, Jean-Louis Pinault, Laurent Longuevergne

To cite this version:

Suzanne Schomburgk, Jean-Louis Pinault, Laurent Longuevergne. Méthodologie de définition des zones de remontée de nappe. Cartographie de l'aléa sur la plaine d'Alsace. 2006, pp.BRGM/RP-53579-FR. hal-00708066

HAL Id: hal-00708066

https://hal.science/hal-00708066v1

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.

Document public

Méthodologie de définition des zones de remontée de nappe.

Cartographie de l'aléa sur la plaine d'Alsace

Rapport final

BRGM/RP-53579-FR
Janvier 2005

DIRECTION RÉGIONALE DE L'ENVIRONNEMENT ALSACE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Méthodologie de définition des zones de remontée de nappe.

Cartographie de l'aléa sur la plaine d'Alsace

Rapport final

Janvier 2005

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2004 04EAUY08

S. Schomburgk, J.-L. Pinault, L. Longuevergne

DIRECTION RÉGIONALE DE L'ENVIRONNEMENT ALSACE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots clés : remontée de nappe, piézométrie, ACP, TEMPO, nappe d'Alsace

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
Schomburgk S., Pinault J.-L., Longuevergne L. - Méthodologie de définition des zones de remontée de nappe. Cartographie de l'aléa sur la plaine d'Alsace. Rapport BRGM/RP 53579-FR, 82 p.

© BRGM, 2005, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

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 cartographier les zones à fort battement de nappe proches de la surface de manière à apporter une information destinée à

- mieux définir les zones humides au sens de la Directive-Cadre sur l'Eau et

- évaluer le risque lié aux inondations phréatiques.

Une étude méthodologique réalisée en 2002-2003 avait montré l'intérêt technique de l'analyse du signal piézométrique avec le logiciel TEMPO. Dans le cadre de la présente étude, la méthodologie a été affinée pour mieux reconnaître les zones influencées par les rivières (Rhin ou rivières vosgiennes) ou par les pluies efficaces. Cette méthodologie permet également de calculer le temps de réaction entre la nappe et la rivière – alimentation ou drainage de la nappe par les rivières - et le temps de transit des eaux pluviales jusqu'à l'alimentation de la nappe.

Cette méthodologie a été comparée et complétée par une technique statistique plus classique : l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Cette méthode calcule également les différentes composantes du signal, mais avec la contrainte que tous les phénomènes sont considérés comme concomitants. Elle permet de compléter les données manquantes de certains points d'eau afin d'augmenter la densité du réseau et de cartographier des zones à faible profondeur de nappe.

Les représentations cartographiques obtenues par les 2 méthodes sont dans l'ensemble comparables. Il apparaît toutefois des désaccords lorsque les échanges entre le réseau hydrographique et la nappe sont très différés (l'ACP n'étant pas une méthode de transfert n'explique alors qu'une faible partie des variations piézométriques différées) ou lorsque les variations des signaux d'entrée (pluie, débit des cours d'eau) sont très corrélées. La critique des deux méthodes nous a conduit à produire une information fiable sur les variations piézométriques de l'ensemble de la nappe rhénane.

L'analyse des chroniques piézométriques permet ensuite de calculer le temps de retour des niveaux de la nappe pour l'aide à la définition de l'aléa "remontée de nappe" et permet de différencier au travers de la cartographie des zones plus ou moins vulnérables aux remontées de nappe. En raison de la densité des données utilisées cette cartographie ne permet pas de descendre en dessous d'une échelle de 1/50 000 même dans les secteurs bien informés.

Sommaire

1. Contexte hydrologique de la nappe d'Alsace 13

2. La décomposition des niveaux piézométriques 14

2.1. PRINCIPE DE LA METHODE TEMPO 14

2.2. EXEMPLES D'APPLICATION AVEC "TEMPO" 17

2.2.1. Le piézomètre 01698X0002 de Lauterbourg influencé par le Rhin 17

2.2.2. Le piézomètre 01995X0012 influencé par les rivières vosgiennes. 19

2.2.3. Le piézomètre 04137X0147 à Rixheim - comportement de nappe captive ou peu perméable 21

2.3. PRINCIPE DE LA METHODE ACP 24

2.3.1. Les données analysées 24

2.3.2. Niveau et battement de la nappe 28

2.3.3. Les composantes principales 29

2.4. EXEMPLES D'APPLICATION AVEC L'ACP 32

2.4.1. Piézomètre sur le piémont vosgien 32

2.4.2. Piézomètre à proximité de l'Ill 33

2.4.3. Piézomètre à proximité du Rhin 34

3. Analyse des données piézométriques sur la nappe d'Alsace 36

3.1. ANALYSE AVEC L'OUTIL "TEMPO" 36

3.1.1. La contribution du Rhin 36

3.1.2. La contribution des rivières vosgiennes 39

3.1.3. La contribution de la pluie efficace 42

3.2. L'ANALYSE AVEC LA MÉTHODE ACP 46

3.2.1. La contribution du Rhin 48

3.2.2. La contribution des rivières vosgiennes 50

3.2.3. La contribution de la pluie efficace 52

4. Comparaisons entre les deux méthodes 54

4.1. LES SIMILITUDES ENTRE LE MODÈLE DE TRANSFERT ET L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES 54

4.2. LES DÉSACCORDS ENTRE LES DEUX MÉTHODES 55

5. Calcul des profondeurs de la nappe et des temps de retour 57

5.1. L'ACP COMME OUTIL DE CARTOGRAPHIE DES PROFONDEURS DE LA NAPPE 57

5.2. RECONSTITUTION DE CHRONIQUES PIÉZOMÉTRIQUES 58

5.3. INDICE DE CONFIANCE 63

5.4. CARTOGRAPHIE DES ISO-PROFONDEURS DE LA NAPPE 65

5.5. POSITION DES SOURCES PHRÉATIQUES 65

5.6. CARTE DES PROFONDEURS MOYENNES ET MINIMALES ATTEINTES 66

5.7. EVALUATION DES RISQUES 71

5.7.1. Méthodes statistiques 71

5.7.2. Méthode des maxima annuels 71

5.7.3. Méthode de renouvellement 72

5.8. CARTE DES TEMPS DE REMONTÉE 73

5.8.1. Carte des temps de remontée à 3 mètres 74

5.8.2. Carte des temps de remontée à 2 mètres 75

5.8.3. Carte des temps de remontée à 1 mètre.....76

5.8.4. Calculs complémentaires avec prise en compte d'une période plus longue 76

6. Conclusion 80

7. Bibliographie.....83

Liste des illustrations

Figure 1 : Principe du modèle permettant la décomposition d'un niveau piézométrique en ses deux composantes : la recharge et les échanges avec le réseau de surface (le Rhin) caractérisé par son débit. 14

Figure 2 : Fonctions de transfert de la pluie et du réseau hydrographique vers la nappe (piézomètre 04137X0023). 15

Figure 3 : L'écart entre les variations de la hauteur d'eau de l'Ill à Colmar et le débit, l'une et l'autre de ces variables étant centrée et réduite, reste très faible sur un grand intervalle de variation. 16

Figure 4 : Le temps de régulation d'un niveau piézométrique est défini à partir du corrélogramme: c'est le décalage pour lequel le corrélogramme vaut 0.2. Cette valeur est choisie de telle sorte que le calcul du temps de régulation ne soit pas influencé par les rebonds observés sur certains corrélogrammes de part et d'autre de l'axe des abscisses lorsque le décalage augmente (piézomètre 01698X0002). 16

Figure 5 : Les 2 entrées, le débit du Rhin à Kembs et la pluie efficace sont comparées au niveau piézométrique (l'année 1990 est représentée). 17

Figure 6 : Corrélogramme croisé Pluie efficace – débit du Rhin à Kembs. La faible corrélation entre le débit du Rhin et la pluie efficace dans la plaine d'Alsace montre que le débit du Rhin est essentiellement influencé par l'amont en raison de la taille du bassin versant. 18

Figure 7 : Comparaison du modèle aux observations (Nash=0.93) et décomposition du niveau piézométrique (exprimé par rapport au niveau basses eaux) en ses 3 composantes, la recharge directe et les échanges avec le Rhin et les rivières vosgiennes. Le Rhin alimente ou draine la nappe selon les conditions hydrologiques. 18

Figure 8 : Calcul de la pluie efficace, hauteur de pluie située au-dessus du seuil Oméga représentant le déficit de la recharge utile des sols et fonctions de transfert. La contribution des 3 composantes aux variations du niveau piézométrique se déduit de l'aire de chacune des 3 fonctions de transfert (respectivement 2%, 17% et 81%). 19

Figure 9 : Principe du modèle de transfert. 19

Figure 10 : Deux des 3 entrées, le débit de la Sauer et la pluie efficace sont comparées au niveau piézométrique. 20

Figure 11 : Corrélogramme croisé Pluie efficace – débit de la Sauer à Beinheim. La corrélation entre les 2 entrées, bien qu'importante, autorise néanmoins un bonne caractérisation des diverses influences. La courbe de tarissement de la Sauer décroit pendant plus de 120 jours après un événement de pluie. 20

Figure 12 : Comparaison du modèle aux observations (Nash=0.86) et décomposition du niveau piézométrique (exprimé par rapport à sa valeur moyenne) en ses 3 composantes, la recharge directe, les échanges avec le réseau hydrographique vosgien et le Rhin. 21

Figure 13 : Fonctions de transfert (échelle des ordonnées arbitraire). La montée et la decroissance rapides de la réponse impulsionnelle associée au débit de la Sauer est révélatrice d'une bonne transmissivité de l'aquifère. Par contre, les échanges avec le Rhin sont très lents : le Rhin contribue surtout au soutien du niveau basses eaux (Fig. 12). 21

Figure 14 : Les 2 entrées, le débit de l'Ill et la pluie efficace sont comparées au niveau piézométrique. 22

Figure 15 : Corrélogramme croisé Pluie efficace – débit de l'Ill à Ensisheim. La corrélation observée pour les faibles décalages est comparable à ce qui a été observé avec la Sauer. La courbe de tarissement de l'Ill décroit pendant une centaine de jours après un événement de pluie. 22

Figure 16 : Comparaison du modèle aux observations (Nash=0.86) et décomposition du niveau piézométrique (exprimé par rapport à sa valeur moyenne) en ses 2 composantes, la recharge et les échanges avec le réseau hydrographique vosgien. 23

Figure 17 : Fonctions de transfert (échelle des ordonnées arbitraire). La décroissance très lente de la réponse impulsionnelle du niveau piézométrique au débit de l'Ill et à la pluie met en évidence un comportement de nappe captive ou de nappe libre dans un aquifère de très faible transmissivité. Les contributions de la recharge et des échanges nappe – rivière sont respectivement de 27% et 73%. 23

Figure 18 : Fond de carte utilisé. En vert, la limite des alluvions rhénanes, en rouge l'ensemble des piézomètres, en bleu le système hydrologique simplifié, en noir les principales villes 25

Figure 19 : Superposition des débits (normalisés) des rivières vosgiennes 26

Figure 20 : Superposition des débits (normalisés) de l'Ill (en rouge), des précipitations efficaces (en bleu) et d'une chronique piézométrique (carrés noirs). 27

Figure 21 : Carte krigée du niveau piézométrique moyen de la nappe (en mètres) permettant de définir les sens d'écoulements privilégiés. 28

Figure 22 : Carte krigée de l'écart type des variations piézométriques (mètres) 29

Figure 23 : Premier signal caractéristique : Apports annuels des rivières (barres bleues) et contribution basse fréquence du premier signal (rouge), les pics des fortes pluies donnent une contribution complémentaire en haute fréquence (amplitude normalisée) 30

Figure 24 : Signaux haute fréquence des pluies efficaces hebdomadaires (barres bleues). Des pluies efficaces pluriannuelle donnent une contribution complémentaire en basse fréquence 31

Figure 25 : Signaux haute fréquence du débit hebdomadaire du Rhin (barres bleues, un signal complémentaire donne une contribution en basse fréquence). 31

Figure 26 : Comparaison du modèle aux observations 32

Figure 27 : 3 contributions principales : Gauche : rivières vosgiennes; Milieu : pluies efficaces; Droite : Rhin 33

Figure 28 : Comparaison du modèle aux observations 33

Figure 29 : 3 contributions principales : Gauche : rivières vosgiennes; Milieu : pluies efficaces; Droite : Rhin (aucune contribution) 34

Figure 30 : Comparaison du modèle aux observations 34

Figure 31 : 3 contributions principales : Gauche : rivières vosgiennes; Milieu : pluies efficaces; Droite : Rhin 35

Figure 32 : Contribution du Rhin aux variations du niveau de la nappe rhénane. 37

Figure 33 : Temps de transit des échanges entre la nappe rhénane et le Rhin. 38

Figure 34 : Contribution des rivières vosgiennes aux variations du niveau de la nappe rhénane..... 40

Figure 35 : Temps de transit des échanges entre la nappe rhénane et les rivières vosgiennes..... 41

Figure 36 : Contribution de la pluie efficace aux variations du niveau de la nappe rhénane..... 43

Figure 37 : Temps de transit de la pluie efficace vers la nappe rhénane..... 44

Figure 38 : Profondeur du toit de la nappe par rapport au sol en moyennes eaux (d'après la modélisation régionale – source site http://www.aprona.net)..... 45

Figure 39 : Carte krigée des erreurs moyennes (en pourcent). En noir et en rouge, les piézomètres utilisés pour l'étude (en rouge points ajoutés dans une deuxième phase)..... 47

Figure 40 : Contribution du Rhin aux variations du niveau de la nappe rhénane 48

Figure 41 : Contribution des rivières vosgiennes aux variations du niveau de la nappe rhénane..... 50

Figure 42 : Contribution des pluies efficaces aux variations du niveau de la nappe rhénane..... 52

Figure 43 : Comparaison des résultats cartographiques des deux méthodes ACP et TEMPO 55

Figure 44 : Histogramme du nombre de données supplémentaires disponibles en fonction du nombre de mesures piézométriques. 58

Figure 45 : Superposition d'une mesure piézométrique (en rouge) du signal calculé (en noir) et du signal calculé (en bleu) dont la moyenne a été calée 59

Figure 46 : Superposition des mesures piézométriques (en rouge) et du signal recalculé et calé (en bleu) avec les bornes à 50 % de prédiction (vert). 60

Figure 47 : Superposition des mesures piézométriques (en rouge) et du signal recalculé et calé (en bleu) avec les bornes à 50 % de prédiction (vert). 60

Figure 48 : Difficulté de description des amplitudes de crues, les risques sont sous-évalués. Superposition des mesures piézométriques (en rouge) et du signal recalculé et calé (en bleu) avec les bornes à 50 % de prédiction (vert). 61

Figure 49 : Problème de caractéristique locale non représentable par une caractéristique régionale des piézomètres, cette chronique n'est pas utilisée dans l'étude. Superposition des mesures piézométriques (en rouge) et du signal recalculé et calé (en bleu) avec les bornes à 50 % de prédiction (vert). 62

Figure 50 : Influence du temps de transfert (1 semaine). Superposition des mesures piézométriques (en rouge) et du signal recalculé et calé (en bleu) avec les bornes à 50 % de prédiction (vert). Les amplitudes des crues sont déphasées mais indiquent un bon résultat par rapport à l'amplitude qui nous intéresse..... 62

Figure 51 : Répartition des données supplémentaires, la couleur définissant l'indice de confiance, par ordre croissant rouge, bleu et vert. En noir sont indiqués les piézomètres de référence gérés par l'APRONA 64

Figure 52 : Position des sources phréatiques. 65

Figure 53 : Carte des profondeurs moyennes (en mètres) sur la période étudiée (juillet 1986 – décembre 2003). Les zones de remontée de nappe à 2 m tracées à dire

d'expert par la DIREN/SEMA correspondent bien aux zones à faible profondeur de la nappe 67

Figure 53a : Carte des profondeurs moyennes (en mètres) sur la période étudiée (juillet 1986 – décembre 2003)- zone nord....68

Figure 53b : Carte des profondeurs moyennes (en mètres) sur la période étudiée (juillet 1986 – décembre 2003)- zone sud 69

Figure 54 : Carte des profondeurs minimales atteintes (en mètres) par la nappe sur la période étudiée – juillet 1986 – décembre 2003....70

Figure 55 : Carte des temps de remontée de la nappe à 3 mètres de profondeur....74

Figure 56 : Carte des temps de remontée de la nappe à 2 mètres de profondeur 75

Figure 57: Carte des temps de remontée de la nappe à 1 mètre de profondeur 76

Figure 58 : Courbe de répartition des temps de remontée de la nappe pour la série longue (1950-2003) et la série courte (1986-2003) 77

Figure 59 : Carte des temps de remontée de la nappe à 3 mètres de profondeur (série longue) 78

Figure 60 : Carte des temps de remontée de la nappe à 2 mètres de profondeur (série longue) 79

Figure 61 : Carte des temps de remontée de la nappe à 1 mètre de profondeur (série longue) 79

1. Contexte hydrologique 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 plaine du Rhin en Alsace.

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.

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

- Les rivières vosgiennes, de direction principale Est-Ouest avant de rejoindre la nappe au débouché du piémont, 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.

- Des rivières phréatiques naissent dans les zones humides où la nappe est sub-affleurante.

Divers canaux de navigation et d'irrigation et des cours d'eau se trouvent entre l'Ill et le Rhin. Certains d'entre eux jouent un rôle important de soutien du niveau de la nappe par leurs infiltrations.

2. La décomposition des niveaux piézométriques

2.1. PRINCIPE DE LA METHODE TEMPO

Le traitement numérique des piézomètres est réalisé à l'aide du modèle de transfert TEMPO qui, d'une manière générale, est destiné à :

- décomposer des hydrogrammes

- faire de la prévision de débits ou de niveaux piézométriques.

Dans le cadre de cette étude, les variations piézométriques de la nappe d'Alsace sont décomposées en fonction de la pluie efficace (recharge directe de la nappe par les eaux de pluie s'infiltrant au travers de la zone non saturée) ainsi que des échanges de la nappe avec le réseau hydrographique (relations nappe - rivières). Pour chacun des 169 piézomètres utilisés les contributions relatives de la pluie efficace et des rivières sont associées aux variations piézométriques. Le principe de la méthode est explicité sur la Figure 1.

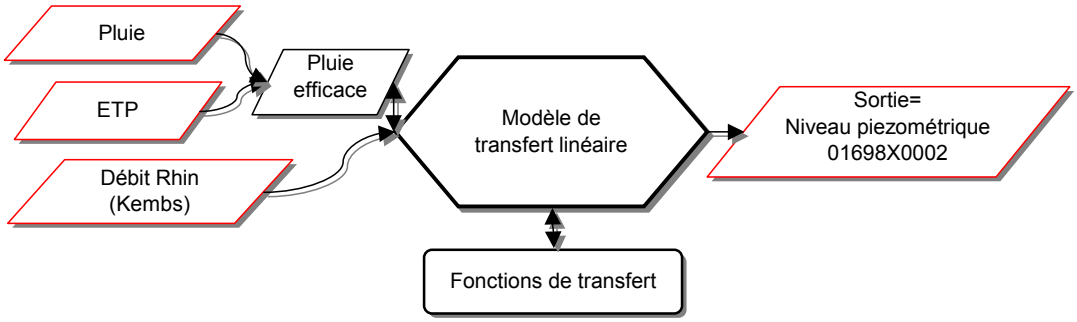


Figure 1 : Principe du modèle permettant la décomposition d'un niveau piézométrique en ses deux composantes : la recharge et les échanges avec le réseau de surface (le Rhin) caractérisé par son débit.

Un modèle de transfert linéaire à **3 entrées** :

- la pluie efficace calculée à partir d'une combinaison optimale des pluies mesurées à différentes stations et de l'ETP (évapotranspiration potentielle)

- le débit d'un cours d'eau vosgien représentatif des phénomènes observés

- le débit du Rhin

permet d'expliquer au mieux le niveau piézométrique observé exprimé par rapport à un niveau de référence (niveau basses eaux). Le modèle de transfert est défini à partir de

3 fonctions de transfert s'appliquant sur chacune des **3 entrées**. C'est un modèle paramétrique : les fonctions de transfert sont des fonctions analytiques obtenues par le produit de convolution d'une gaussienne (recharge de la nappe) par une exponentielle (tarissement).

C'est l'analyse des fonctions de transfert qui constitue l'objet de cette étude (Fig. 2). La contribution des 3 composantes (la recharge directe par la pluie efficace et les échanges avec les rivières vosgiennes et le Rhin) aux variations du niveau piézométrique est calculée à partir de l'aire de chacune des 3 fonctions de transfert. Concrètement, ces fonctions de transfert représentent les variations piézométriques suite à une sollicitation brève (1 incrément de temps, soit 15 jours) de l'une ou l'autre des entrées. C'est la raison pour laquelle elles sont également appelées réponses impulsionnelles. Le **temps de transit moyen**, qui est le décalage moyen calculé pour chacune des entrées, caractérise la durée moyenne des transferts depuis ou vers le réseau hydrographique (entrées 'débit') ou au travers de la zone non saturée (entrée 'pluie efficace'). Dans le cas précis du piézomètre 04137X0023 à Habsheim à l'est de Mulhouse dans une zone à faible réseau hydrographique, chacune des fonctions de transfert tend lentement vers 0 lorsque le décalage atteint quelques centaines de jours, ce qui signifie que **la recharge directe et les échanges avec le réseau hydrographique sont très lents**, quoique l'infiltration de la pluie au travers de la zone non saturée soit plus rapide que les échanges avec le réseau de surface. De telles fonctions de transfert sont caractéristiques du comportement d'une nappe captive ou bien d'une nappe libre dans un aquifère de très faible transmissivité.

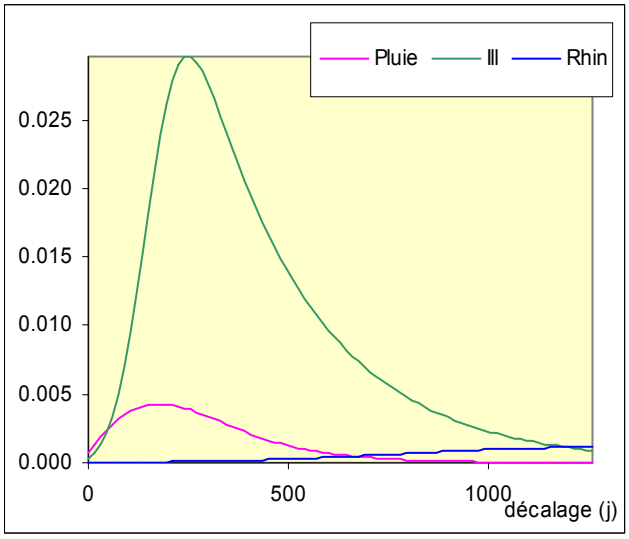


Figure 2 : Fonctions de transfert de la pluie et du réseau hydrographique vers la nappe (piézomètre 04137X0023).

Les entrées 'débit' représentent en fait le niveau d'eau de la rivière dont la différence de hauteur par rapport au niveau piézométrique (sortie du modèle) est responsable des échanges entre la nappe et le réseau hydrographique, la rivière alimentant ou au contraire drainant la nappe en fonction des conditions hydrologiques.

La figure 3 montre que, à un facteur d'échelle près, le débit et la hauteur d'eau recèlent la même information sur un large intervalle de variation. Notons que les variations piézométriques sont beaucoup plus lentes que les variations de débit du cours d'eau, ce qui permet de négliger l'état de la nappe au niveau des entrées du modèle : ces entrées ne font intervenir que la pluie efficace et le débit des rivières.

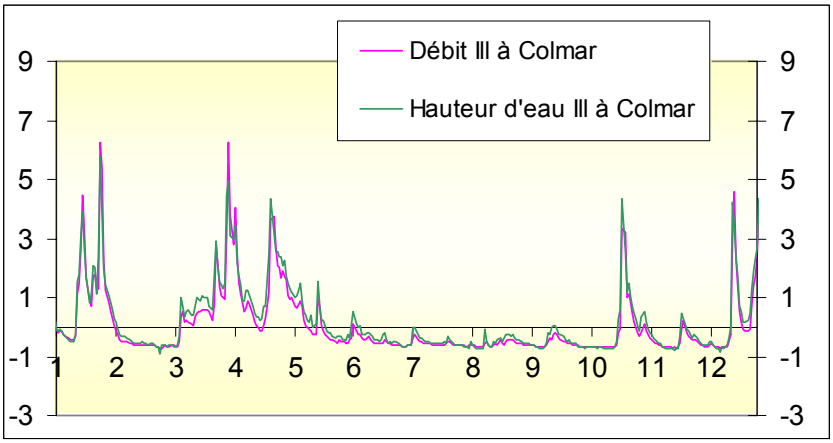


Figure 3 : L'écart entre les variations de la hauteur d'eau de l'Ill à Colmar et le débit, l'une et l'autre de ces variables étant centrée et réduite, reste très faible sur un grand intervalle de variation.

Le niveau piézométrique en sortie est exprimé par rapport au niveau basses eaux. Lorsque le temps de régulation du niveau piézométrique est inférieur à une année (Figure 4), le niveau basses eaux est pris égal à la moyenne du niveau piézométrique à laquelle est retranché 2.5 fois son écart - type ce qui correspond à une période de retour de 160 ans (approximation gaussienne).

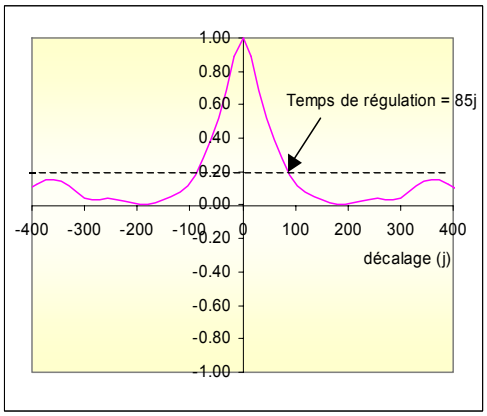


Figure 4 : Le temps de régulation d'un niveau piézométrique est défini à partir du corrélogramme: c'est le décalage pour lequel le corrélogramme vaut 0.2. Cette valeur est choisie de telle sorte que le calcul du temps de régulation ne soit pas influencé par les rebonds observés sur certains corrélogrammes de part et d'autre de l'axe des abscisses lorsque le décalage augmente (piézomètre 01698X0002).

2.2. EXEMPLES D'APPLICATION AVEC "TEMPO"

Le pas de temps utilisé dans les calculs est de 15 jours. En effet, bien que la pluie et l'ETP soient connues au pas journalier, de même que les débits des cours d'eau, il n'est pas utile de réduire l'incrément de temps en dessous de 15 jours car les niveaux piézométriques sont généralement échantillonnés au pas hebdomadaire, voire bimensuel. Ce pas d'échantillonnage permet néanmoins la séparation des 3 entrées dans de bonnes conditions. La période d'observation débute en 1986, et se termine en 1999.

2.2.1. Le piézomètre 01698X0002 de Lauterbourg influencé par le Rhin

La Figure 5 représente le niveau piézométrique comparé à deux des 3 entrées, la pluie efficace et le débit du Rhin à Kembs. Ces 2 entrées ne sont que faiblement corrélées entre elles car le Rhin à Kembs est fortement influencé par le débit en amont de la plaine d'Alsace en raison de l'étendue du bassin, ce qui rend possible la séparation du niveau piézométrique en ses 3 composantes (Figure 6).

La décomposition du niveau piézométrique en ses 3 composantes est représentée sur la Figure 7, de même que la comparaison entre le niveau piézométrique du modèle et le niveau effectivement observé. La figure 8 représente le seuil Omega (le seuil de pluie efficace = déficit de la réserve utile des sols calculé à partir de la pluie et de l'ETP) à partir duquel est réalisé le calcul de la pluie efficace, ainsi que les fonctions de transfert. La pluie efficace est calculée à partir de la formule :

Pluie efficace=0.31*Pluie Colmar+0.69*Pluie Sélestat - Oméga

Les fonctions de transfert sont très courtes et montrent la forte influence du Rhin sur le niveau piézométrique, la nappe étant soit alimentée soit drainée par le Rhin en fonction des conditions hydrologiques (la montée et la descente de la fonction de transfert qui correspond aux échanges avec le Rhin sont très rapides).

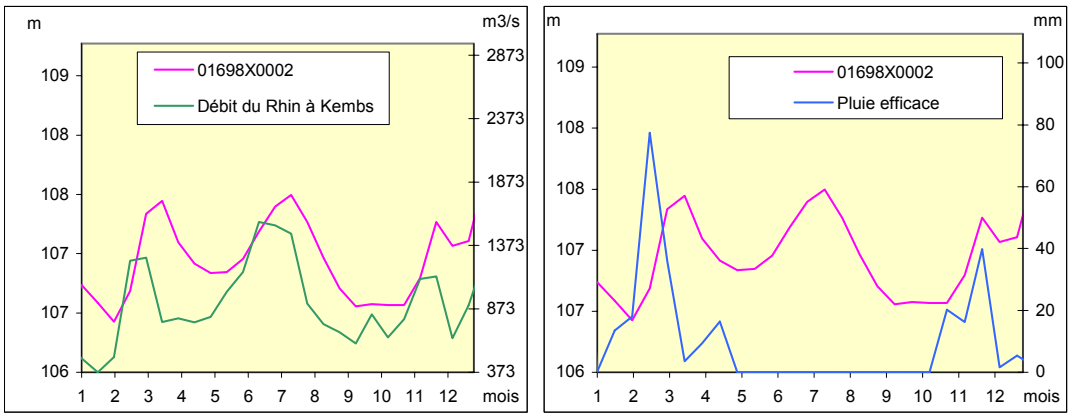


Figure 5 : Les 2 entrées, le débit du Rhin à Kembs et la pluie efficace sont comparées au niveau piézométrique (l'année 1990 est représentée).

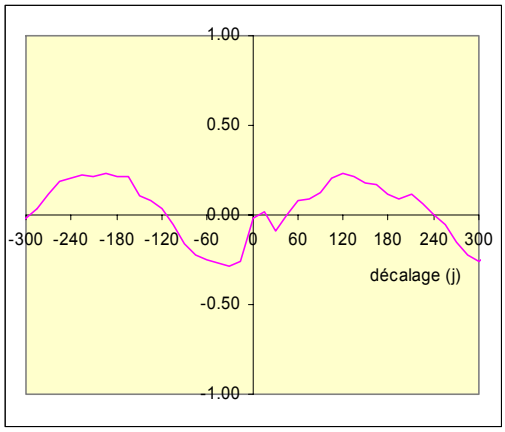


Figure 6 : Corrélogramme croisé Pluie efficace – débit du Rhin à Kembs. La faible corrélation entre le débit du Rhin et la pluie efficace dans la plaine d'Alsace montre que le débit du Rhin est essentiellement influencé par l'amont en raison de la taille du bassin versant.

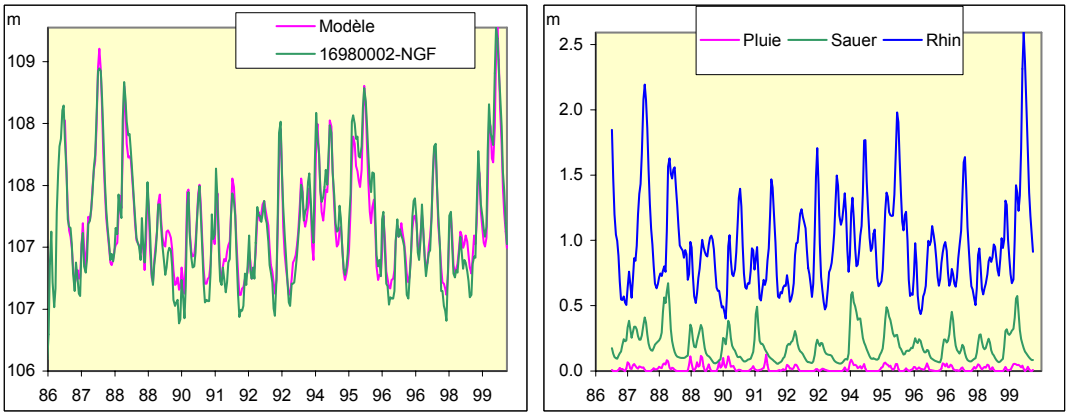


Figure 7 : Comparaison du modèle aux observations (Nash=0.93) et décomposition du niveau piézométrique (exprimé par rapport au niveau basses eaux) en ses 3 composantes, la recharge directe et les échanges avec le Rhin et les rivières vosgiennes. Le Rhin alimente ou draine la nappe selon les conditions hydrologiques.

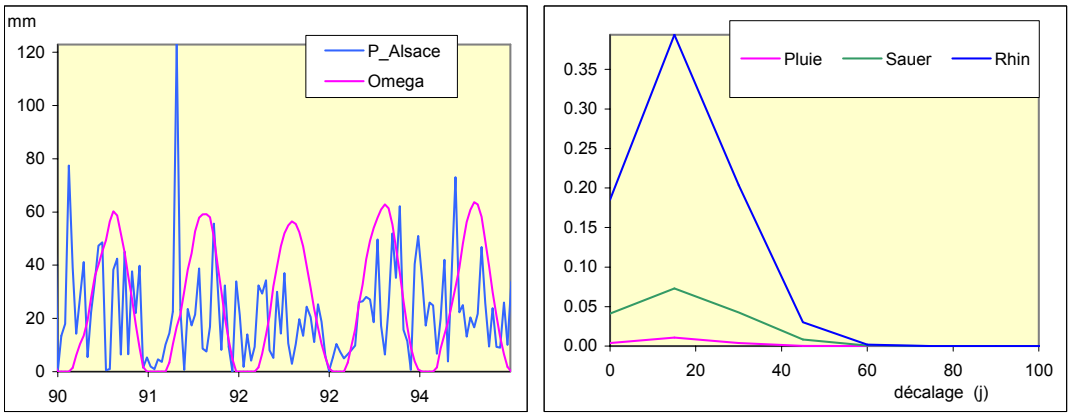


Figure 8 : Calcul de la pluie efficace, hauteur de pluie située au-dessus du seuil Oméga représentant le déficit de la recharge utile des sols et fonctions de transfert. La contribution des 3 composantes aux variations du niveau piézométrique se déduit de l'aire de chacune des 3 fonctions de transfert (respectivement 2%, 17% et 81%).

2.2.2. Le piézomètre 01995X0012 influencé par les rivières vosgiennes.

Les rivières vosgiennes sont nombreuses et reflètent la géologie des formations drainées, l'évolution du régime des précipitations ainsi que de l'enneigement du massif des Vosges. Aussi différentes rivières sont utilisées en fonction de la localisation du piézomètre, soit du nord au sud : le débit de la Sauer à Beinheim, de l'Andlau à Andlau, de la Weiss à Kaysersberg et de l'Ill à Ensisheim.

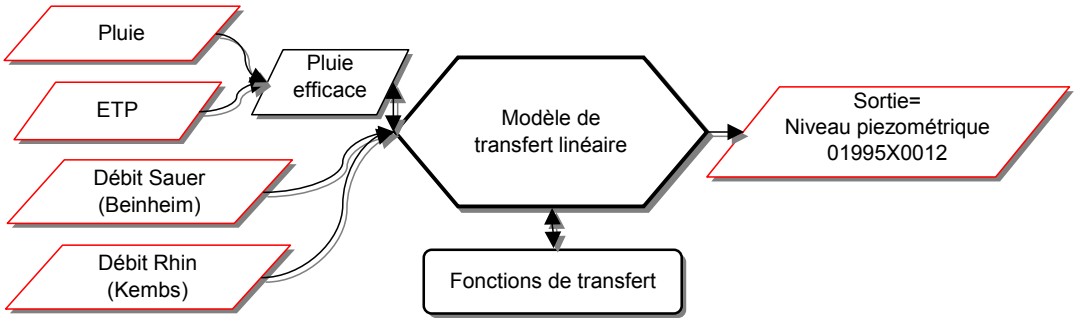


Figure 9 : Principe du modèle de transfert.

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.

Le principe du modèle est représenté sur la Figure 9. Le piézomètre 01995X0012 situé à l'extrémité nord de la nappe d'Alsace est très influencé par le réseau hydrographique. Sur la Figure 10, deux des 3 entrées, le débit de la Sauer et la pluie

efficace, sont comparées au niveau piézométrique. Le corrélogramme croisé Pluie efficace – débit de la Sauer atteint 0.5 pour un décalage nul. Cette corrélation n'est pas suffisante pour compromettre la séparation de ces 2 entrées, la recharge directe et les échanges nappe – rivière (Figure 11). C'est que les rivières vosgiennes sont fortement influencées par le régime pluviométrique de leur bassin amont dont la signature diffère notablement de celui de la plaine d'Alsace en raison de leur altitude ainsi que de la barrière climatique occasionnée par le massif des Vosges.

Comme dans le cas précédent, la recharge directe par la pluie est très faible et le niveau piézométrique est presque entièrement assujetti au réseau hydrographique qui tantôt alimente, tantôt draine la nappe. Les contributions relatives calculées à partir des réponses impulsionnelles (Figure 12) sont 84% (échanges nappe – rivière) et 16% (recharge directe). Les réponses impulsionnelles sont représentées sur la figure 13.

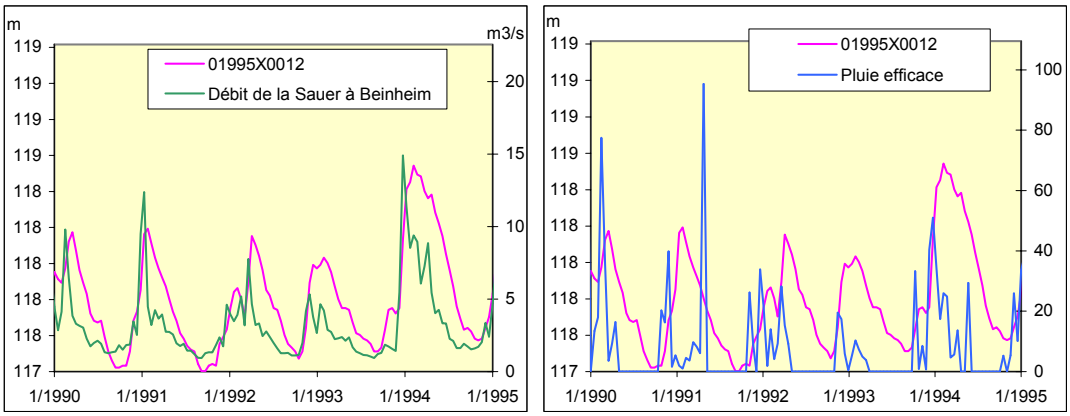


Figure 10 : Deux des 3 entrées, le débit de la Sauer et la pluie efficace sont comparées au niveau piézométrique

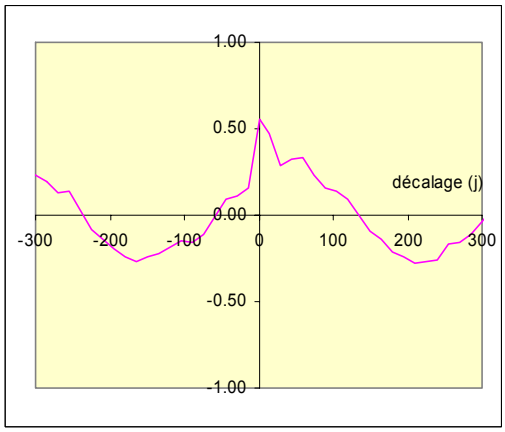


Figure 11 : Corrélogramme croisé Pluie efficace – débit de la Sauer à Beinheim. La corrélation entre les 2 entrées, bien qu'importante, autorise néanmoins un bonne caractérisation des diverses influences. La courbe de tarissement de la Sauer décroit pendant plus de 120 jours après un événement de pluie.

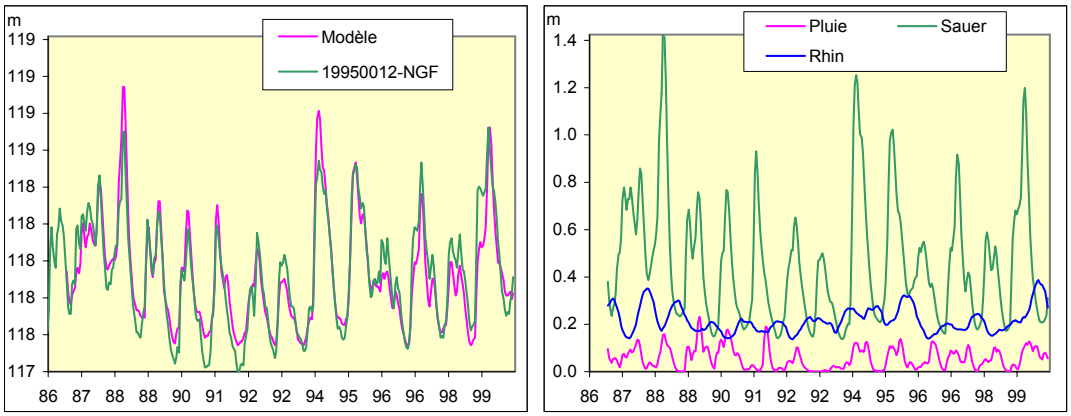


Figure 12 : Comparaison du modèle aux observations (Nash=0.86) et décomposition du niveau piézométrique (exprimé par rapport à sa valeur moyenne) en ses 3 composantes, la recharge directe, les échanges avec le réseau hydrographique vosgien et le Rhin.

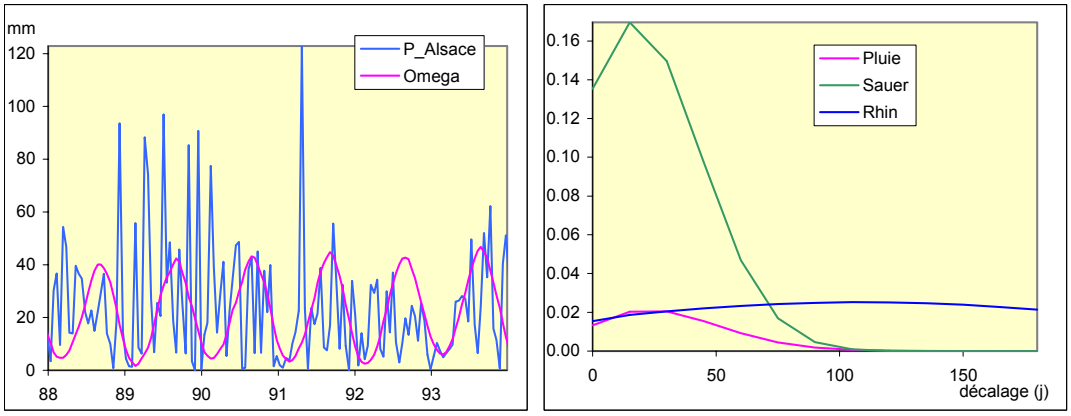


Figure 13 : Fonctions de transfert (échelle des ordonnées arbitraire). La montée et la decroissance rapides de la réponse impulsionnelle associée au débit de la Sauer est révélatrice d'une bonne transmissivité de l'aquifère. Par contre, les échanges avec le Rhin sont très lents : le Rhin contribue surtout au soutien du niveau basses eaux (Fig. 12).

2.2.3. Le piézomètre 04137X0147 à Rixheim - comportement de nappe captive ou peu perméable

Ce piézomètre à Rixheim à l'est de Mulhouse est situé à l'extrémité sud de la nappe d'Alsace et il met en évidence un comportement typique d'une nappe captive ou d'une nappe libre dans un aquifère de très faible transmissivité, dont le temps de régulation est très important, alimentée pro parte par la pluie et le réseau hydrographique vosgien, aucun échange avec le Rhin n'étant perceptible.

La corrélation entre deux des 3 entrées, la pluie efficace et le débit de l'Ill, présente beaucoup de similitude avec l'exemple précédent (Fig. 14, 15).

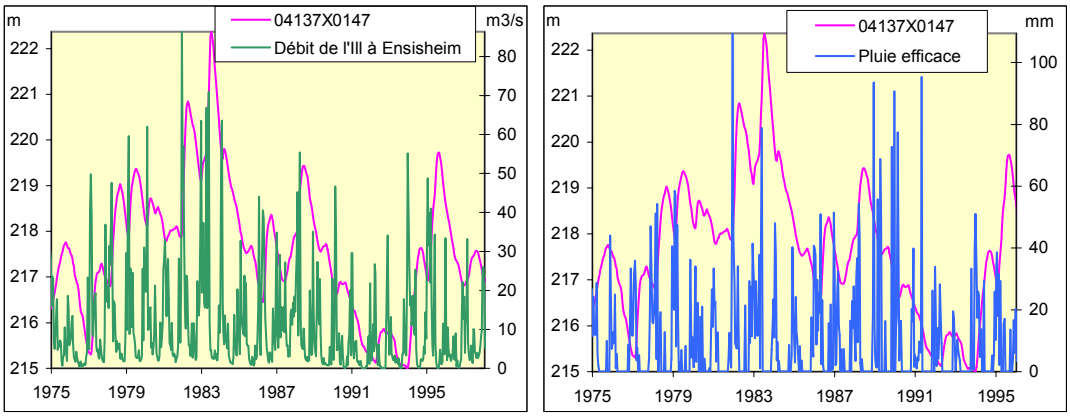


Figure 14 : Les 2 entrées, le débit de l'Ill et la pluie efficace sont comparées au niveau piézométrique.

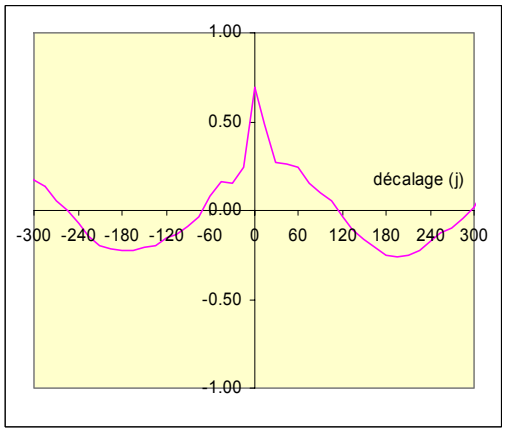


Figure 15 : Corrélogramme croisé Pluie efficace – débit de l'Ill à Ensisheim. La corrélation observée pour les faibles décalages est comparable à ce qui a été observé avec la Sauer. La courbe de tarissement de l'Ill décroit pendant une centaine de jours après un événement de pluie.

La décomposition du niveau piézométrique fait apparaître une contribution moyenne de 27% de la recharge directe. Pour les 2 entrées, la recharge et la vidange de la nappe sont très lentes (Fig. 16, 17), d'où la très faible transmissivité de la zone non saturée et de l'aquifère.

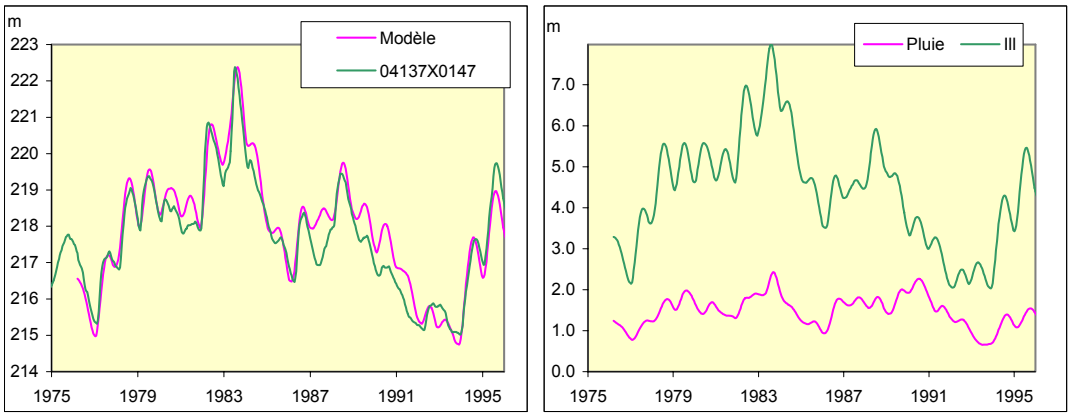


Figure 16 : Comparaison du modèle aux observations (Nash=0.86) et décomposition du niveau piézométrique (exprimé par rapport à sa valeur moyenne) en ses 2 composantes, la recharge et les échanges avec le réseau hydrographique vosgien.

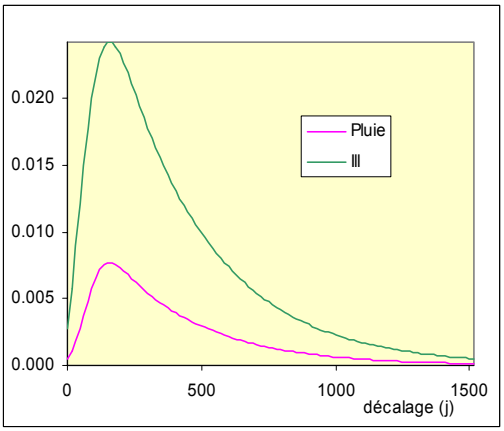


Figure 17 : Fonctions de transfert (échelle des ordonnées arbitraire). La décroissance très lente de la réponse impulsionnelle du niveau piézométrique au débit de l'Ill et à la pluie met en évidence un comportement de nappe captive ou de nappe libre dans un aquifère de très faible transmissivité. Les contributions de la recharge et des échanges nappe – rivière sont respectivement de 27% et 73%.

Ces 3 exemples sont représentatifs du comportement des différents piézomètres de la plaine d'Alsace.

2.3. PRINCIPE DE LA METHODE ACP

L'analyse en composantes principales recherche dans cette étude des informations qui expliqueraient au mieux un ensemble de signaux de la nappe à travers des points piézométriques et caractérise donc le **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'analyse recherche les caractères les plus représentatifs du système de la nappe en déterminant les signaux caractéristiques du comportement dynamique de la nappe à partir d'un ensemble de chroniques piézométriques. L'analyse s'effectue sur les variations piézométriques 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.

2.3.1. Les données analysées

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 sur la période 1986-2002. Cette étude a servi de base pour l'interprétation des différents processus et signaux caractéristiques déterminés par la méthode mathématique. Dans un second temps, l'analyse a été étendue à une période plus longue mais disponible pour un nombre plus réduit de points.

L'analyse a ainsi été conduite sur un ensemble de 149 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 vert indique la limite des alluvions rhénanes en rive gauche (coté français).

Les principales villes de la plaine sont indiquées en noir, à savoir, du sud au nord : Mulhouse, Colmar, Sélestat, Strasbourg et Haguenau. En bleu est représenté 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).

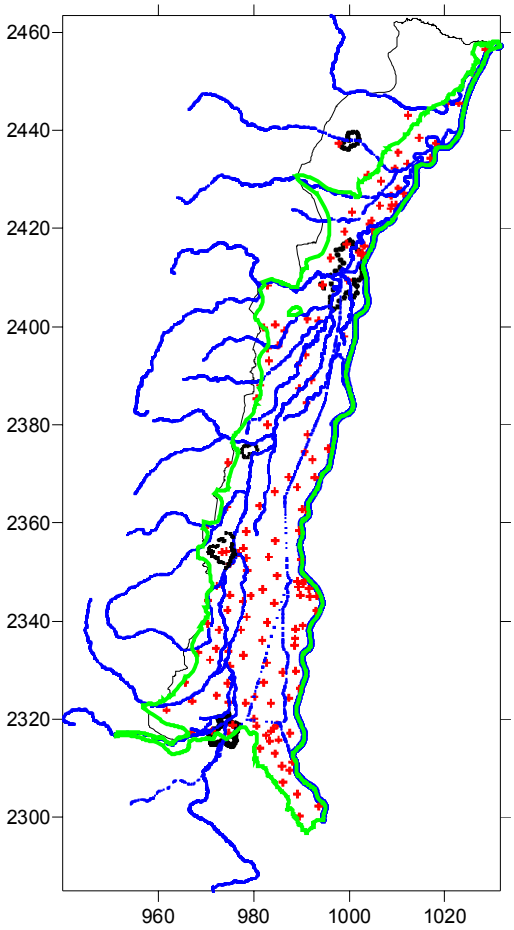


Figure 18 : Fond de carte utilisé. En vert, la limite des alluvions rhénanes, en rouge l'ensemble des piézomètres, en bleu le système hydrologique simplifié, en noir les principales villes

Les données de **débit des rivières** vosgiennes suivantes ont été analysées (source : Banque Hydro). 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	Wisches
Zorn	Waltenheim sur Zorn
Moder	Schweighouse sur Moder

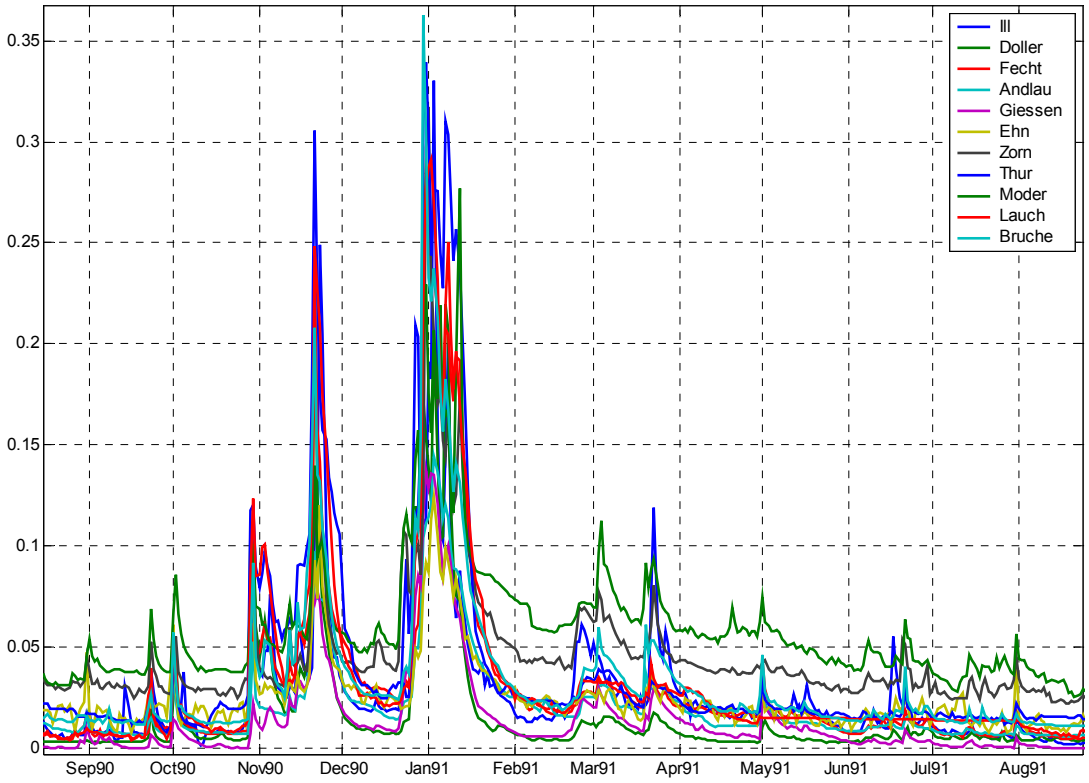


Figure 19 : Superposition des débits (normalisés) des rivières vosgiennes

La superposition des débits des rivières vosgiennes montre que les principaux épisodes – crues et étiages - sont généralement simultanés pour l'ensemble des rivières vosgiennes.

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.

L'interprétation des signaux temporels issus du traitement mathématique a nécessité des **données de précipitation journalière et d'évapotranspiration** qui ont été obtenues auprès des trois stations climatologiques Météo France Strasbourg, Sélestat et Colmar. Le signal de pluviométrie utilisé dans ce travail a été calculé comme la somme des 3 stations. La station de Colmar a également fourni les données d'évapotranspiration qui ont été étendues à toute la zone d'étude.

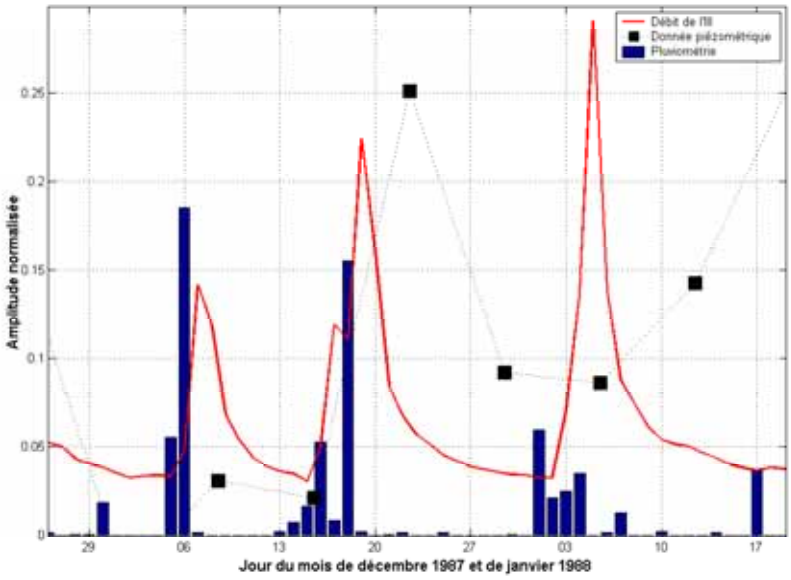
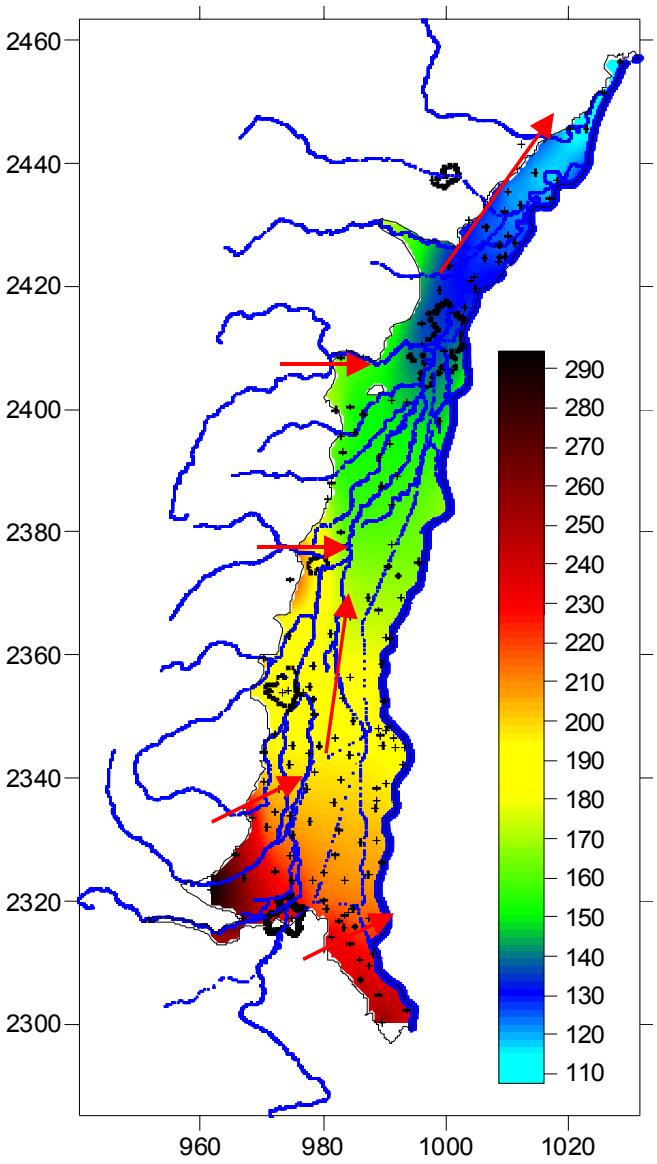


Figure 20 : Superposition des débits (normalisés) de l'Ill (en rouge), des précipitations efficaces (en bleu) et d'une chronique piézométrique (carrés noirs).

L'exemple de superposition des débits de l'Ill, des précipitations efficaces et d'une chronique piézométrique montre que 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.

2.3.2. Niveau et battement de la nappe



La carte des moyennes eaux montre des directions d'écoulement général orientées vers l'est sur le piémont vosgien pour devenir préférentiellement N20 vers le centre de la nappe.

Figure 21 : Carte krigée du niveau piézométrique moyen de la nappe (en mètres) permettant de définir les sens d'écoulements privilégiés.

Dans la plus grande partie de la nappe des alluvions rhénanes, l'écart-type des chroniques piézométriques, le battement de la nappe, ne dépasse pas 30 cm. L'amplitude des variations est plus importante dans les zones de bordure de la plaine ainsi qu'au sud de Colmar où les battements peuvent atteindre une amplitude de plus de 2 mètres. On peut distinguer ainsi la région sud où la zone non saturée est épaisse et où très peu de cours d'eau apportent une forte infiltration vers la nappe, et la région nord où la nappe, sub-affleurante, est en position de drainage.

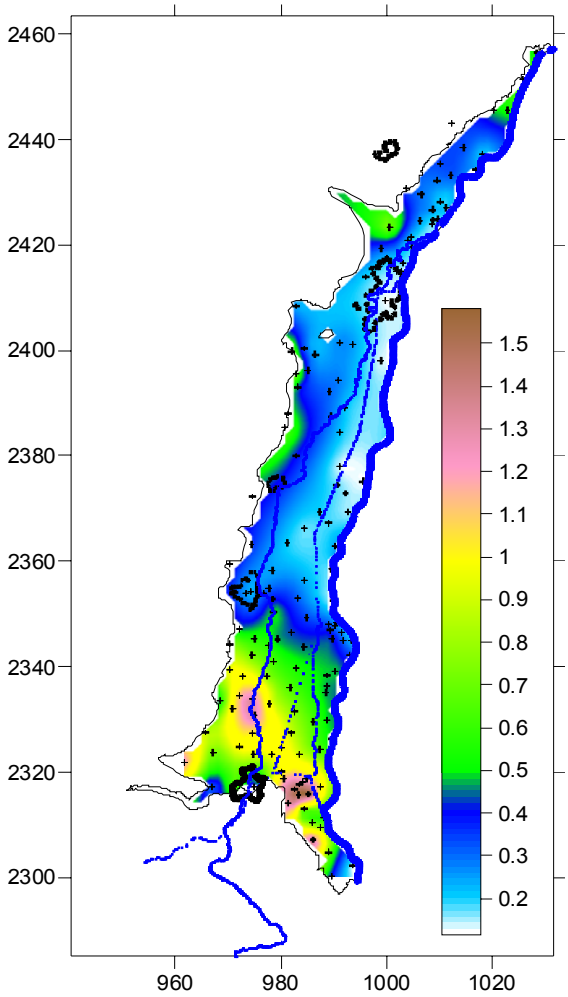


Figure 22 : Carte krigée de l'écart type des variations piézométriques (mètres)

2.3.3. Les composantes principales

L'analyse en composantes principales a déterminé 3 caractéristiques principales :

1) Le signal le plus important au point de vue énergétique est gouverné par l'apport des rivières vosgiennes représentant près de 45 % du comportement global. Ce signal est caractérisé par des signaux de hautes fréquences, avec des pics en hiver et au printemps, ainsi que par une composante de basse fréquence du comportement annuel marqué, maximal en hiver et minimal en été, et une inertie pluriannuelle de la nappe.

Les rivières vosgiennes réagissent aux précipitations tombées dans les Vosges et à l'alimentation par des nappes dans les Vosges. A noter l'important déficit en eau des rivières vosgiennes observé en 1991 qui a conduit, avec un déficit de pluie, à la situation de basses eaux de 1991 (*cf.* fig 23).

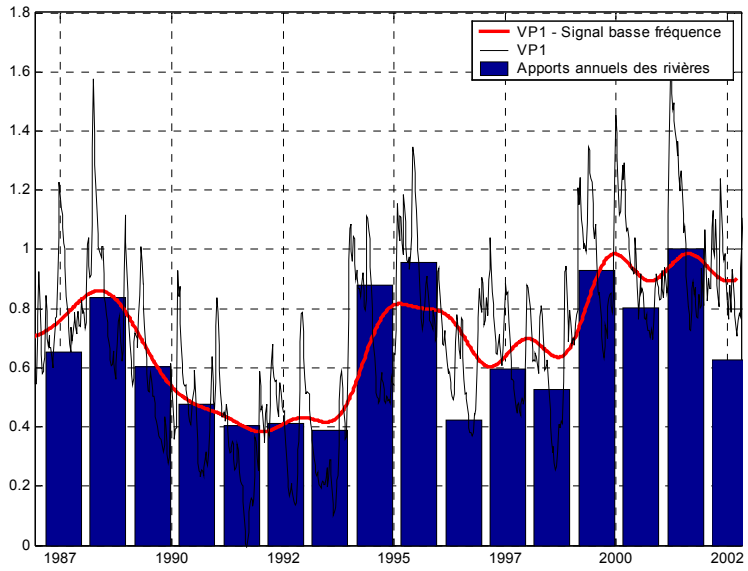


Figure 23 : Premier signal caractéristique : Apports annuels des rivières (barres bleues) et contribution basse fréquence du premier signal (rouge), les pics des fortes pluies donnent une contribution complémentaire en haute fréquence (amplitude normalisée)

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

Le second signal, l'apport de la pluviométrie, plus précisément l'apport des pluies efficaces, représente 20 % du comportement global. L'apport est maximal en hiver. 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, avec une évapotranspiration importante. A noter une période chaude déficitaire en eau dès le printemps de chaque année.

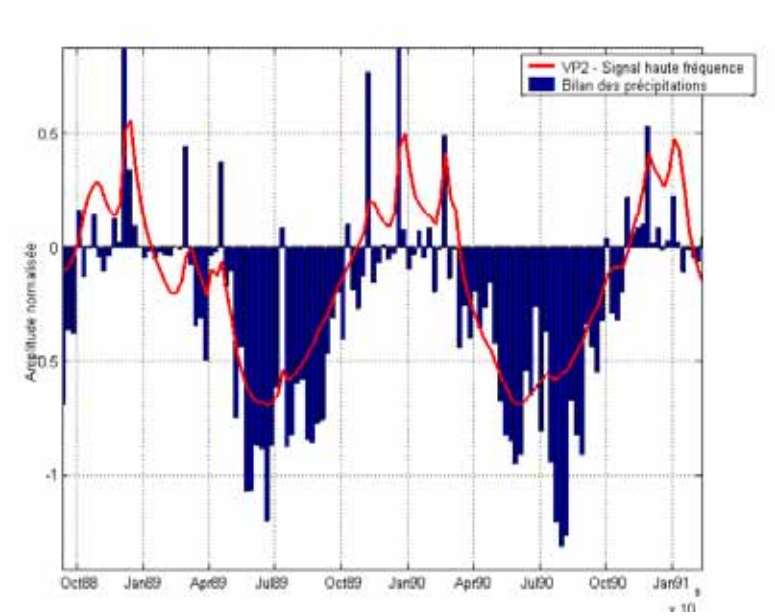


Figure 24 : Signaux haute fréquence des pluies efficaces hebdomadaires (barres bleues). Des pluies efficaces pluriannuelle donnent une contribution complémentaire en basse fréquence

3) Le troisième vecteur propre peut être associé aux apports du Rhin à la nappe représentant 10 % du comportement global. 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 (cf. RP-53326).

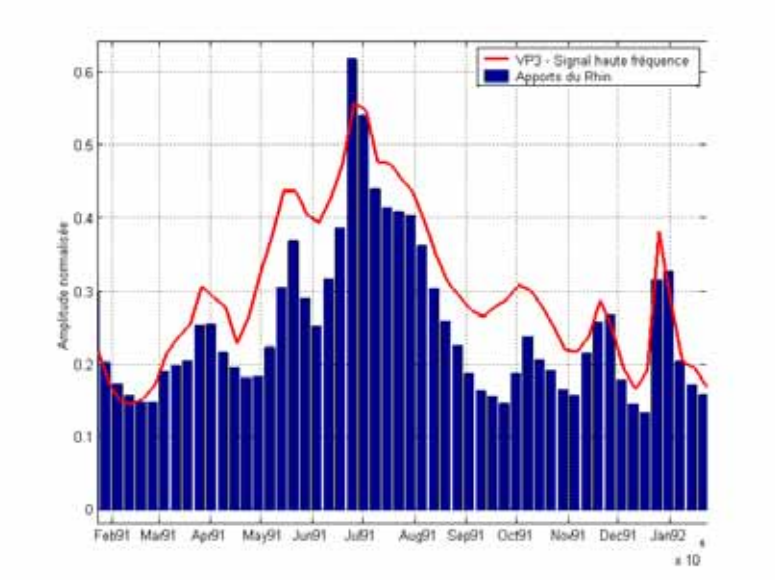


Figure 25 : Signaux haute fréquence du débit hebdomadaire du Rhin (barres bleues, un signal complémentaire donne une contribution en basse fréquence).

Deux signaux complémentaires, représentant 5 % et moins du comportement global décrivent un composant plus difficile à décrire physiquement (cf. RP-53326). Ces signaux sont difficiles à interpréter : le premier signal met probablement en évidence un effet de ‘’stockage – déstockage’’ d’eau dans le piémont vosgien au sud de Colmar. Il met également en lumière quelques zones particulières, telles que la zone où l’Ill infiltre entre Mulhouse et Colmar ou des zones influencées par l'activité humaine comme le canal de Huningue qui soutient le cours de l’Ill en été. La nappe, en aval du bassin potassique, est également rabattue à des fins de dépollution.

2.4. EXEMPLES D’APPLICATION AVEC L'ACP

Les exemples suivants montrent la qualité de description des 5 signaux caractéristiques déterminés et leur capacité à discriminer les différents apports à la nappe.

2.4.1. Piézomètre sur le piémont vosgien

Le piézomètre 02718X0040 situé à Bischoffsheim sur le piémont vosgien montre une contribution principale des rivières vosgiennes et de l’Ehn en particulier. Le modèle représente assez difficilement les crues et la vidange de cette partie.

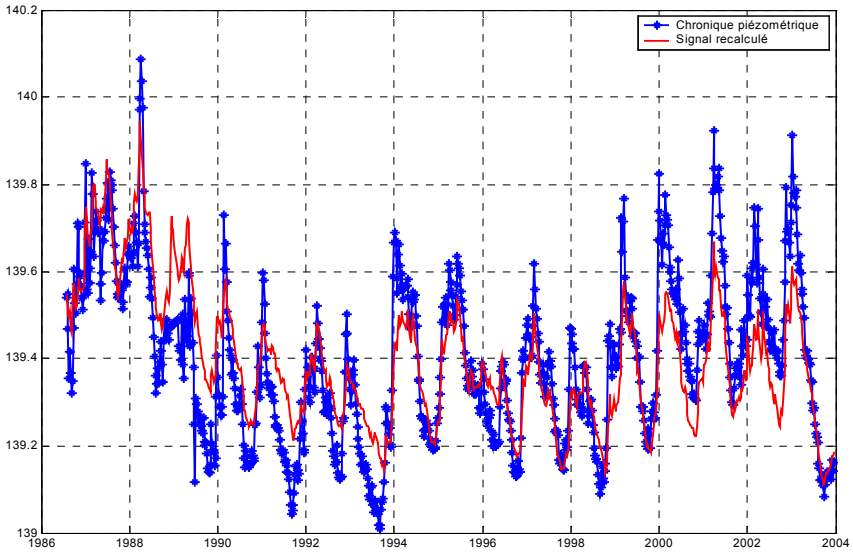


Figure 26 : Comparaison du modèle aux observations

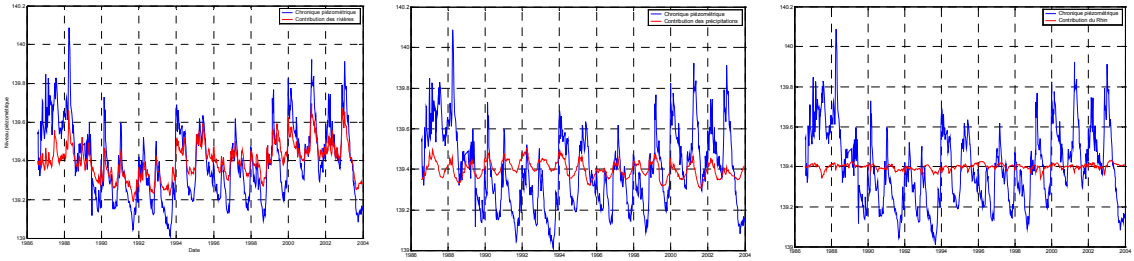


Figure 27 : 3 contributions principales : Gauche : rivières vosgiennes; Milieu : pluies efficaces; Droite : Rhin

2.4.2. Piézomètre à proximité de l'Ill

Le piézomètre 03078X0014 à Ebersheim se situe à proximité de l'Ill : 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. Le modèle représente assez bien les crues et la vidange. Les crues sont légèrement sous-évaluées, mais le comportement hydrologique se révèle être bien cerné par le modèle statistique.

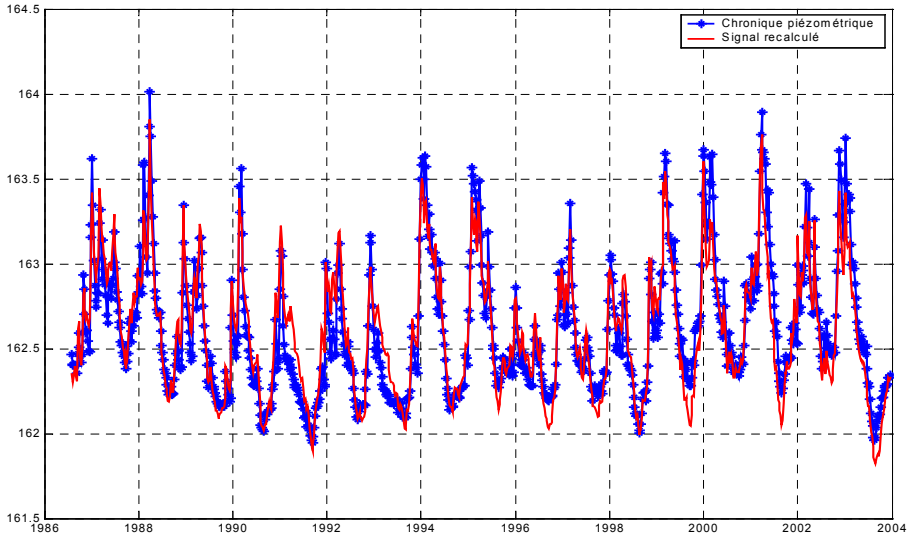


Figure 28 : Comparaison du modèle aux observations

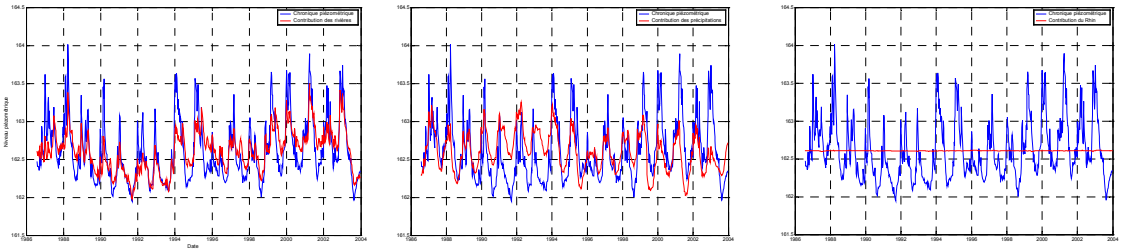


Figure 29 : 3 contributions principales : Gauche : rivières vosgiennes; Milieu : pluies efficaces; Droite : Rhin (aucune contribution)

2.4.3. Piézomètre à proximité du Rhin

Le piézomètre 04134X0095 situé à Rumersheim-le-Haut a été choisi pour montrer le comportement de la nappe aux abords du Rhin. 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 comporte donc, à cet endroit, comme un signal d'apport estival opposés, c'est à dire peu d'apport en hiver et beaucoup en été, via le canal de la Hardt, qui soutient le niveau de la nappe en été par ses infiltrations.

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

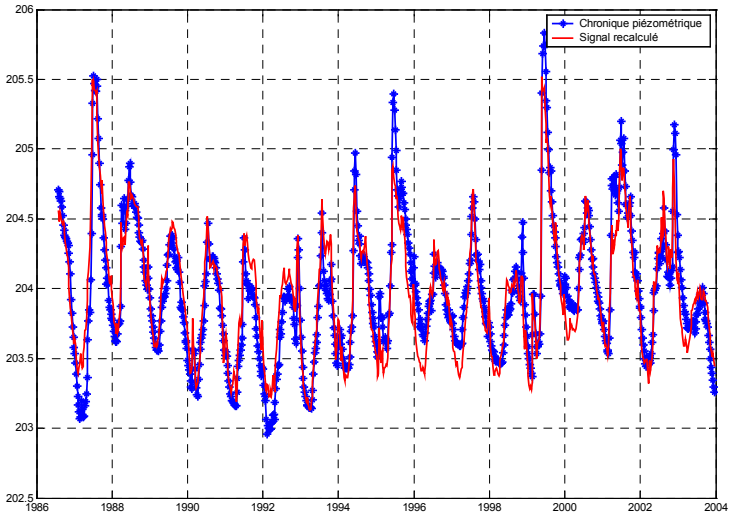


Figure 30 : Comparaison du modèle aux observations

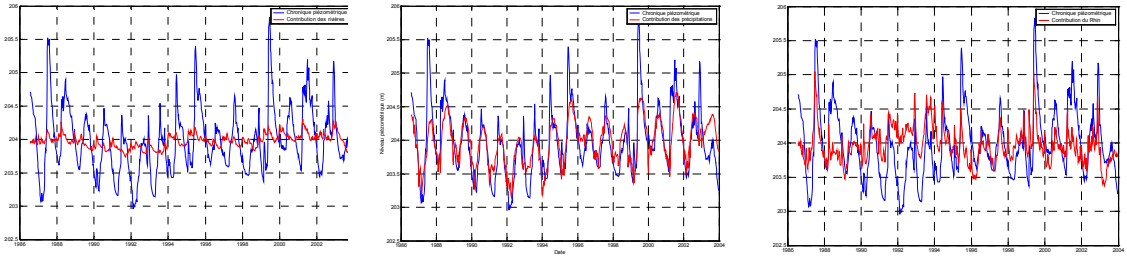


Figure 31 : 3 contributions principales : Gauche : rivières vosgiennes; Milieu : pluies efficaces; Droite : Rhin

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

3.1. ANALYSE AVEC L'OUTIL "TEMPO"

Les contributions du réseau hydrographique et de la pluie efficace aux variations du niveau de la nappe rhénane sont représentées sur les figures 18, 20 et 22. Les temps de transit moyens caractérisant les échanges sont représentés sur les figures 19, 21 et 23.

3.1.1. La contribution du Rhin

Les fortes contributions du Rhin associées à un temps de transit court (< 50 j) se concentrent au bord du Rhin et mettent en évidence les principales zones d'échange entre le Rhin et la nappe. Les variations piézométriques de la nappe sont concomitantes aux variations de débit du Rhin (à l'échelle du pas d'échantillonnage soit 15 j) à l'extrémité nord de la nappe dans les environs du port de Strasbourg, et au sud de Colmar.

Les fortes contributions du Rhin associées à un temps de transit long (> 50 j) mettent en évidence les zones où le Rhin soutient le niveau d'étiage de la nappe. Ce sont la région de Plobsheim, mais également la bande entre le canal de la Hardt et le Rhin. La zone où l'Ill s'infiltre au sud et au nord de Colmar contribue pour une large part au soutien des basses eaux de la nappe. La confusion entre la contribution de l'Ill et celle du Rhin est probablement la conséquence d'actions anthropiques. En effet, le canal de Huningue soutient le cours de l'Ill en été. La nappe, dans le bassin potassique, est également rabattue à des fins de dépollution alors que le débit de l'Ill utilisé dans le modèle de transfert est mesuré à Ensisheim, en aval du bassin potassique.

Les échanges du Rhin et de la nappe sont très faibles à l'extrémité sud de la nappe dont le toit se situe au-delà de 20 mètres en dessous du niveau du sol.

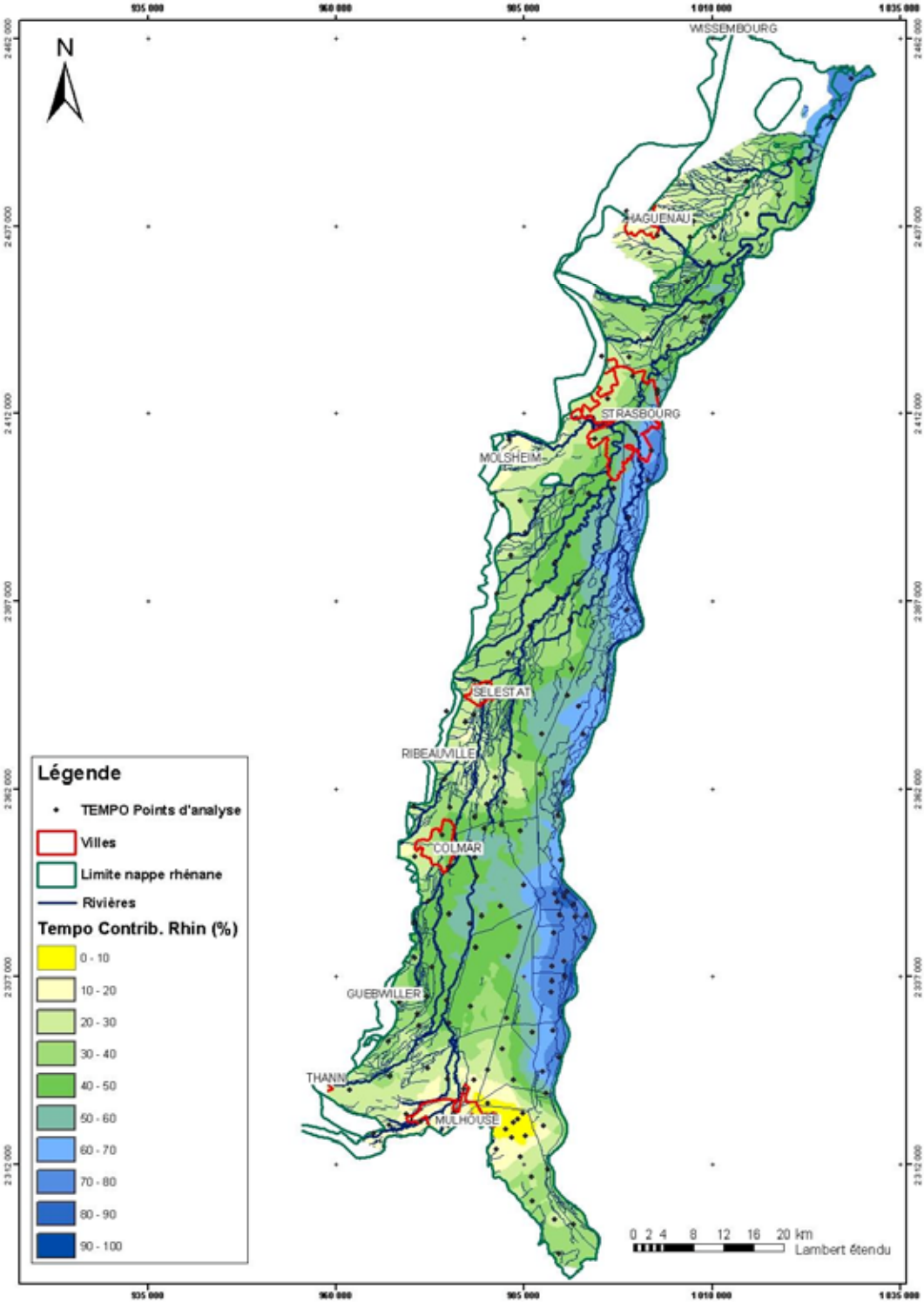


Figure 32 : Contribution du Rhin aux variations du niveau de la nappe rhénane.

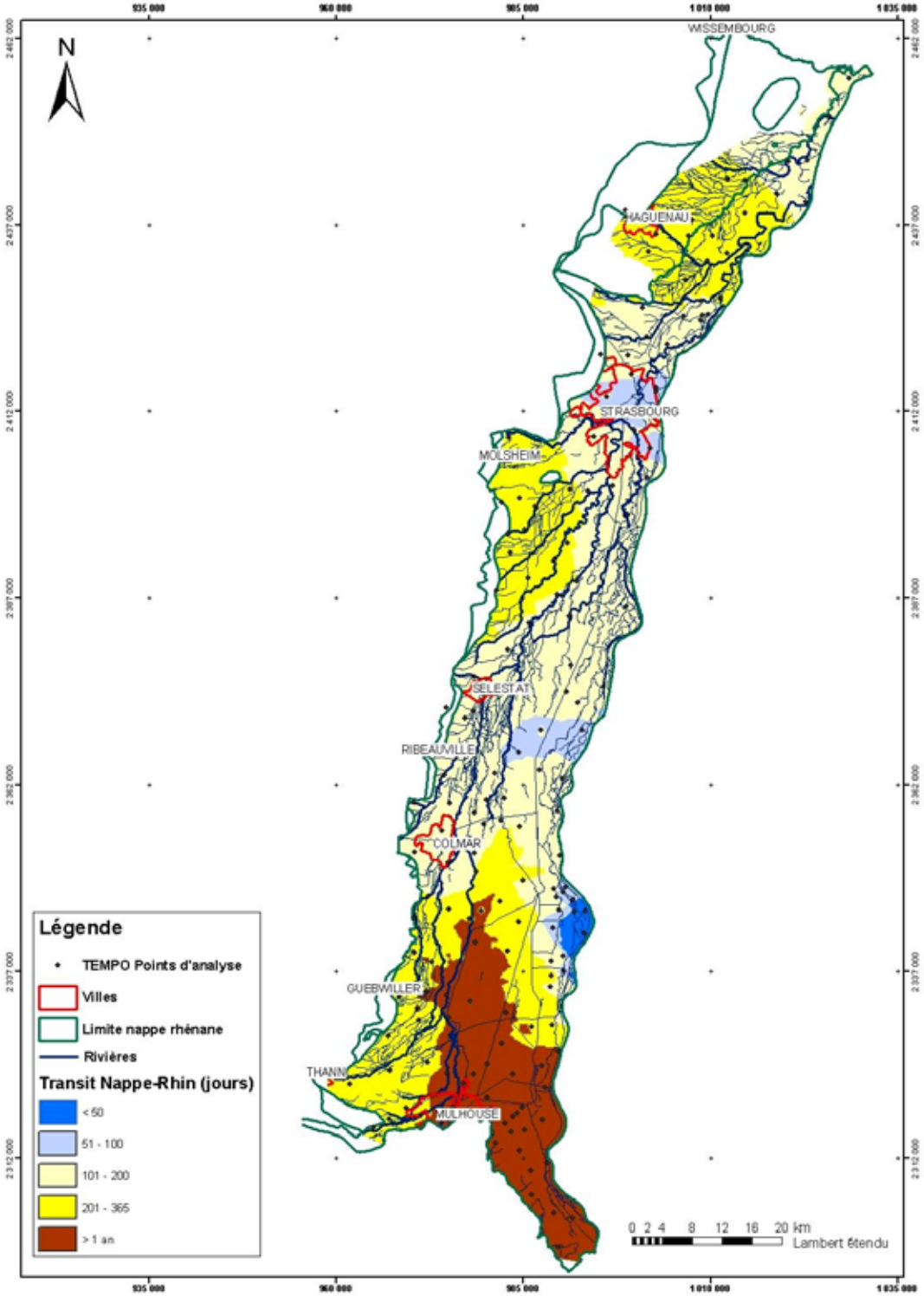


Figure 33 : Temps de transit des échanges entre la nappe rhénane et le Rhin.

3.1.2. La contribution des rivières vosgiennes

La répartition du comportement de la nappe vis-à-vis des rivières vosgiennes (Fig. 20) montre que les zones les plus sensibles se situent vers le piémont vosgien et le long de l'Ill. En allant vers le Rhin, la nappe est de moins en moins sensible à l'apport des rivières. Il faut toutefois noter l'impact anthropique au travers du rôle des différents canaux. En particulier, 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.

Deux zones sont particulièrement influencées par les rivières vosgiennes, ce sont les extrémités nord et sud de la nappe. Au nord, plus de la moitié de l'amplitude des variations piézométriques est imputable aux échanges entre la nappe et les rivières vosgiennes, là où le chevelu hydrographique est très dense. Les temps de transit sont très courts, ce qui démontre que les échanges nappe - rivières sont directs. Par contre, à l'extrémité sud de la nappe, les temps de transit entre le réseau hydrographique et la nappe sont très importants, parfois supérieurs à une année, là où l'épaisseur de la zone non saturée dépasse 20 mètres. Ce comportement met en évidence une très faible transmissivité de la zone non saturée et de l'aquifère. En raison des temps de transfert très importants et de la contribution des canaux à l'alimentation de la nappe, le modèle de transfert introduit probablement une confusion entre la contribution des rivières vosgiennes et le Rhin. Cette zone est également influencée par les apports du Sundgau : un ensemble de petits bassins versants apportent de l'eau à la nappe d'Alsace, il s'agit là de processus hydrologiques difficiles à modéliser.

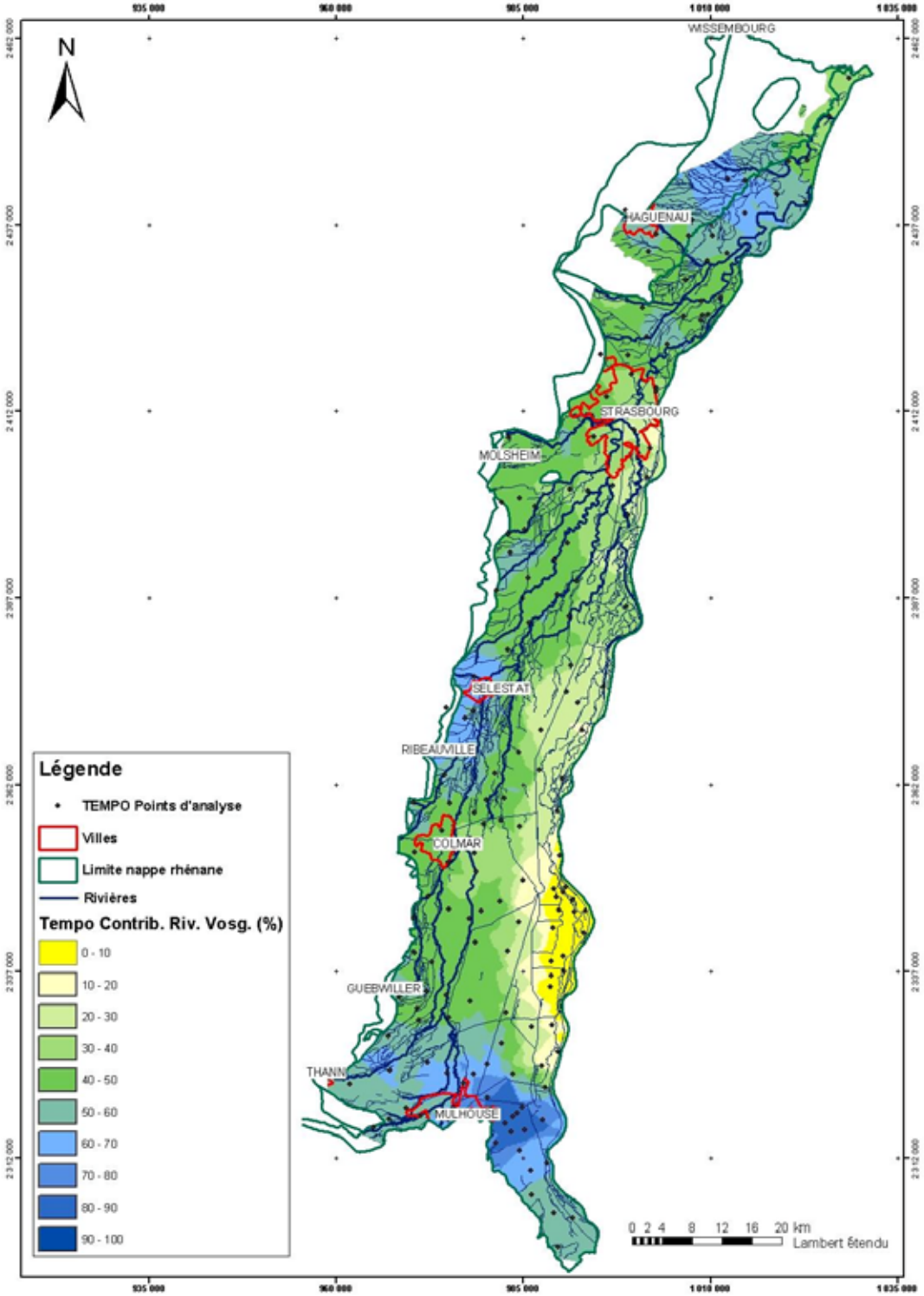


Figure 34 : Contribution des rivières vosgiennes aux variations du niveau de la nappe rhénane

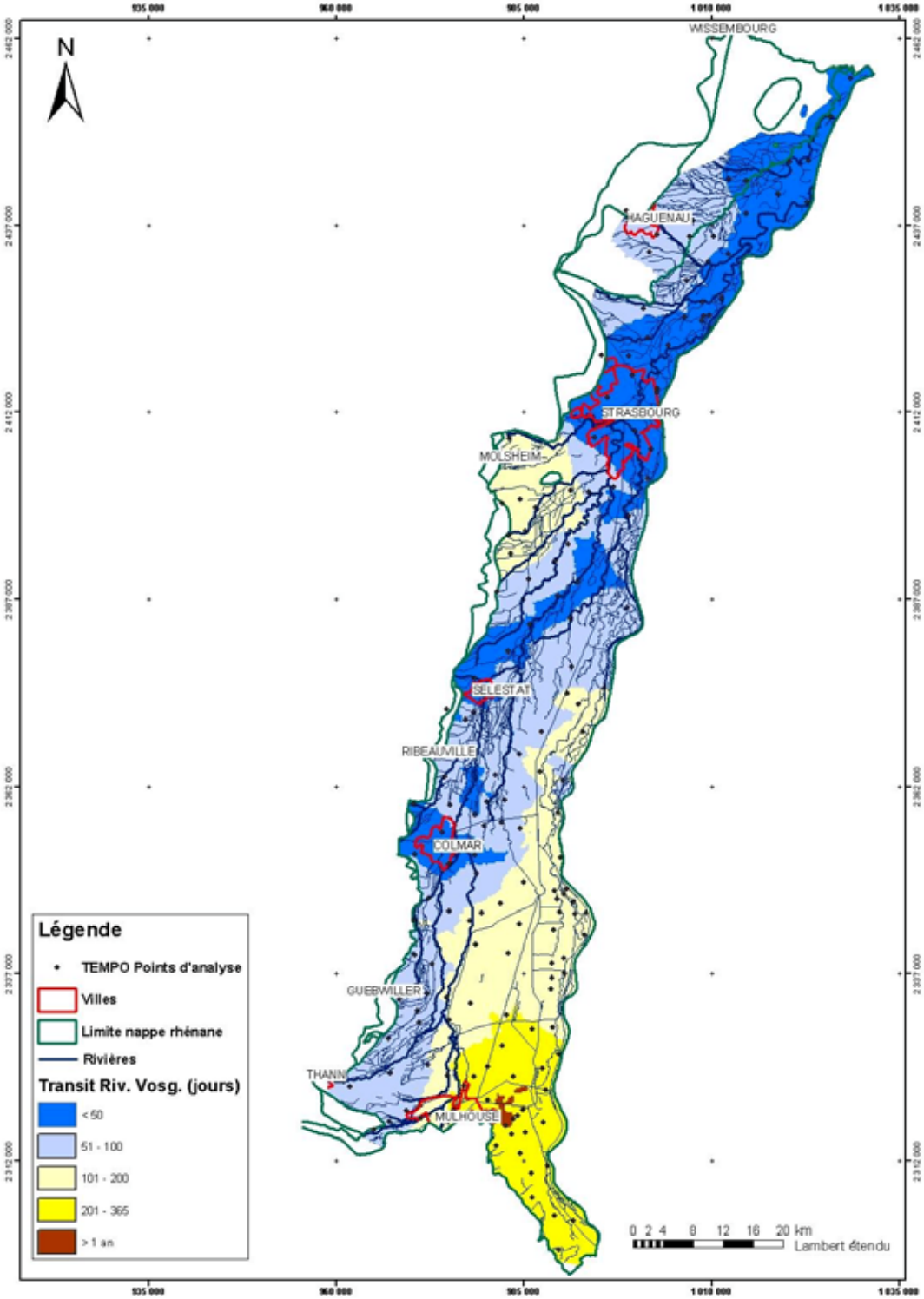


Figure 35 : Temps de transit des échanges entre la nappe rhénane et les rivières vosgiennes.

3.1.3. La contribution de la pluie efficace

La pluie efficace contribue faiblement aux variations piézométriques de la nappe (Fig. 22). Cette contribution ne dépasse 30 % que là où le réseau hydrographique est très peu dense, sur la partie septentrionale de la zone de piémont. La contribution de la pluie efficace est faible partout où le réseau hydrographique est dense, car l'infiltration est faible dans ces zones en raison de sols peu perméables, propices à la constitution de zones humides.

La contribution de la pluie efficace dépend également de l'épaisseur de la zone non saturée : elle dépasse 20% à l'est de la ligne Colmar – Sélestat, où l'épaisseur de la zone non saturée est inférieure à 3 mètres. L'infiltration est très faible au sud de Colmar, alors que l'épaisseur de la zone non saturée dépasse 10 mètres.

Les temps de transit (Fig. 36) reflètent assez fidèlement l'épaisseur de la zone non saturée sur l'ensemble de la nappe rhénane (Fig. 37).

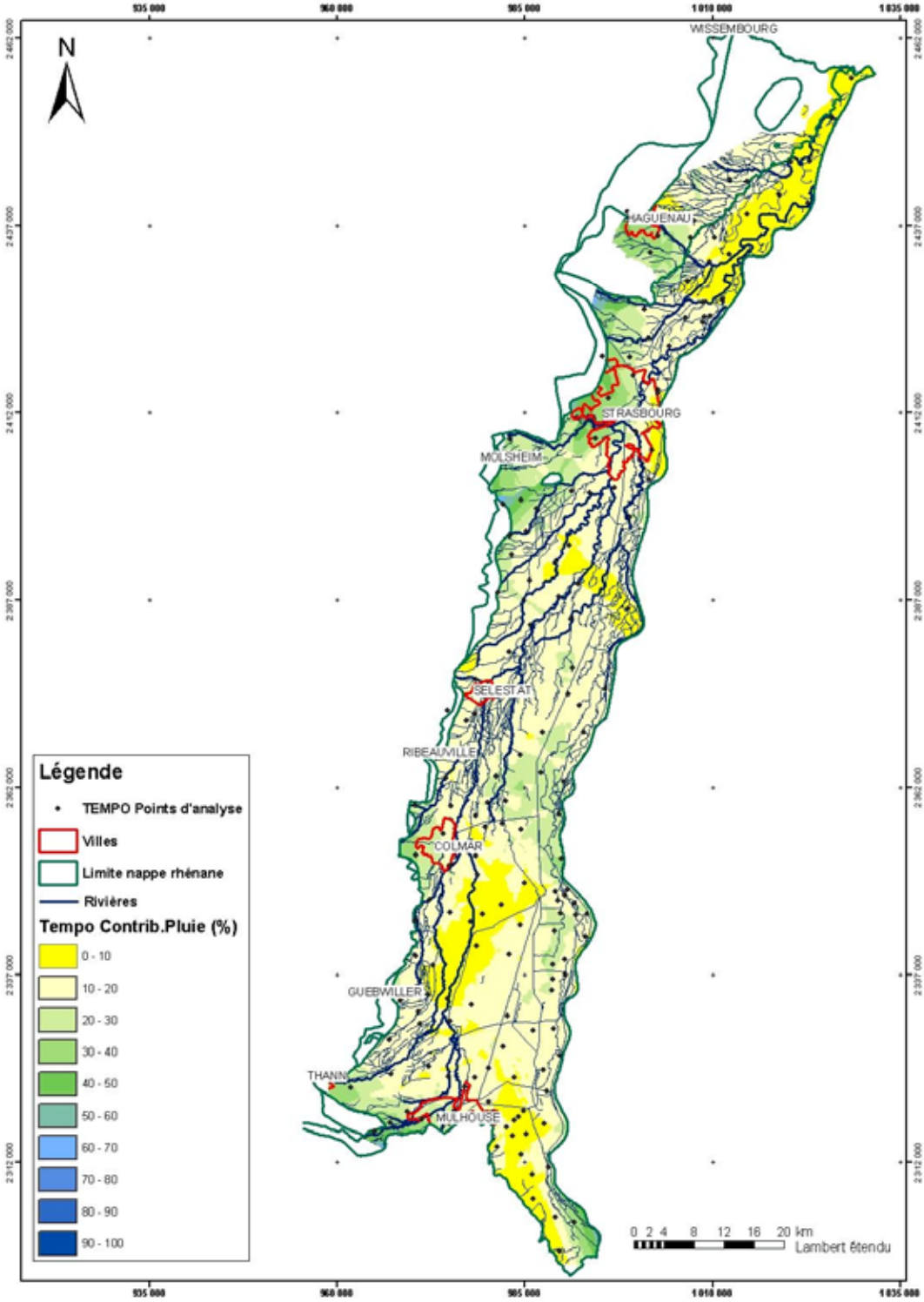


Figure 36 : Contribution de la pluie efficace aux variations du niveau de la nappe rhénane

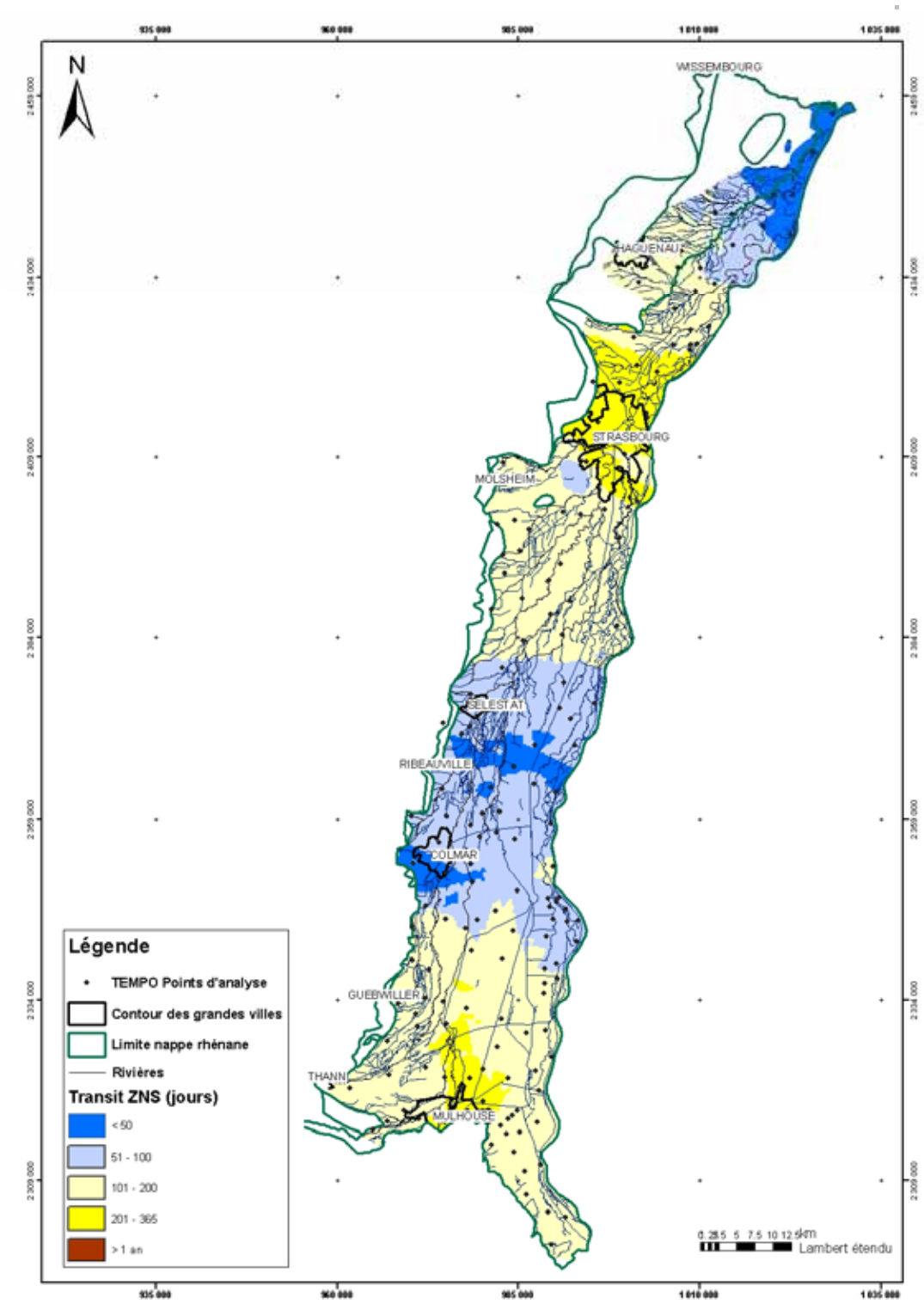


Figure 37 : Temps de transit de la pluie efficace vers la nappe rhénane.

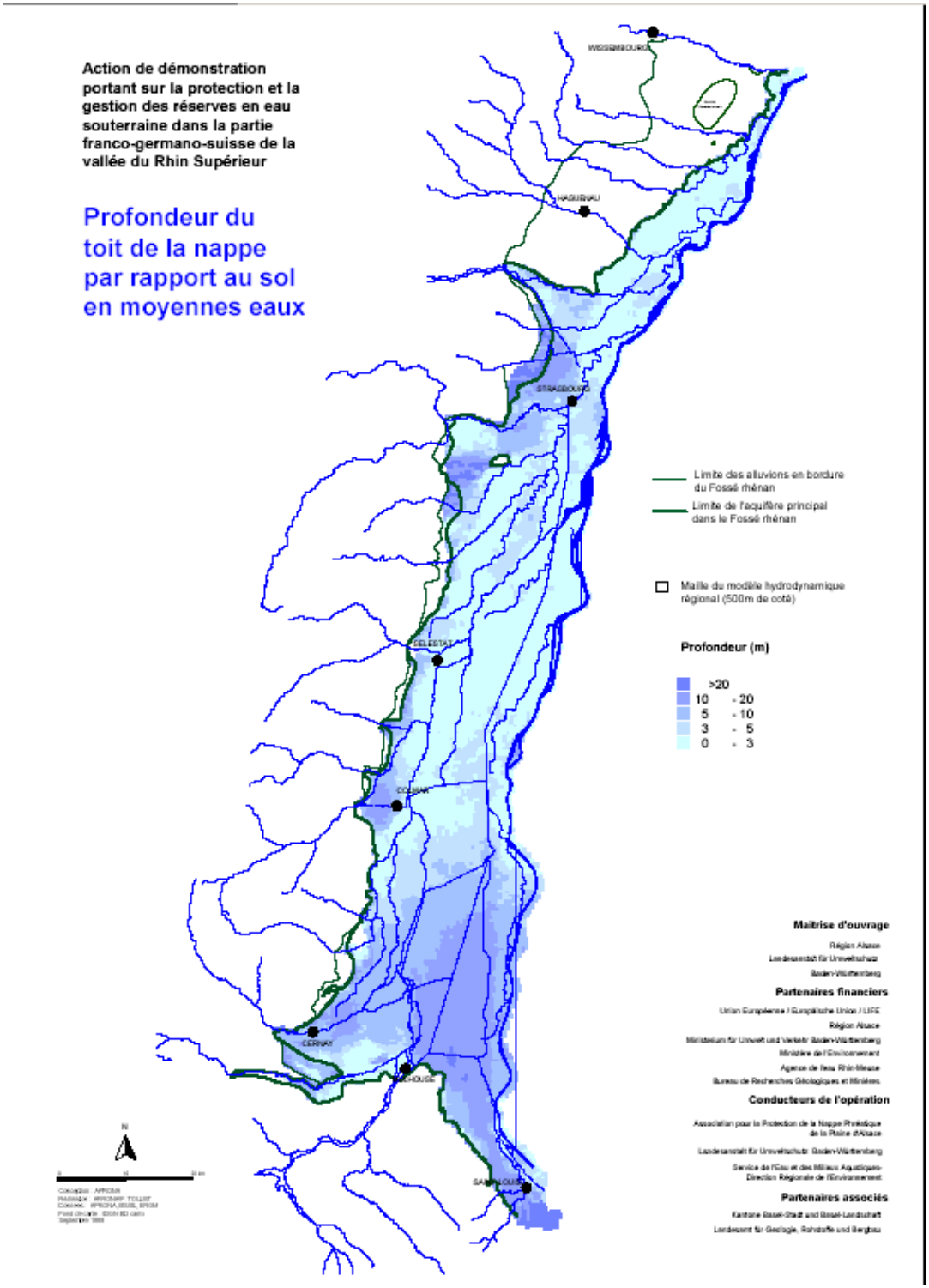


Figure 38 : Profondeur du toit de la nappe par rapport au sol en moyennes eaux (d'après la modélisation régionale – source site http://www.aprona.net).

3.2. L'ANALYSE AVEC LA MÉTHODE ACP

Le comportement de l'ensemble de la nappe est régi dans le 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 (cf. RP-53326).

Le tableau suivant montre les résultats obtenus pour les 7 piézomètres de référence de la nappe d'Alsace.

Numéro du piézomètre	Commune	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 %

La première colonne représente le taux d'influence des rivières vosgiennes sur le comportement du piézomètre, qui se situe entre 26 et 38 % pour les 7 points de mesure. Cette composante est influencée par les variations saisonnières ainsi que par des pics correspondant à des hauts débits de courte durée.

L'apport de la pluviométrie dans la colonne suivante est gouverné par les réactions rapides des piézomètres suites aux précipitations et varie fortement entre les points de mesure, de 0 à 29 %.

La composante de la colonne de l'apport du Rhin caractérise l'apport global du bassin versant avec une influence des points très liée à leur distance au Rhin, le pourcentage varie entre 0% pour les points éloignés et 16 % pour les points au voisinage du Rhin.

La colonne "partie non séparable" résume les deux composantes dont l'influence est plus difficile à décrire physiquement, qui mettent en évidence quelques zones particulières ; cette composante varie de 0 à 27 %.

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, ainsi pour la zone au bord du Rhin, à l'est de Colmar. Des problèmes apparaissent sur le piémont vosgien, les isopièzes y ont une forte pente et les alluvions vosgiennes accueillent également en leur sein un ensemble de petites nappes perchées. L'ensemble du bassin potassique est également moins bien décrit en raison de fortes influences d'exploitation humaine, tout comme la zone au nord-ouest de Strasbourg, basse vallée de la Zorn, ou peu de données existent.

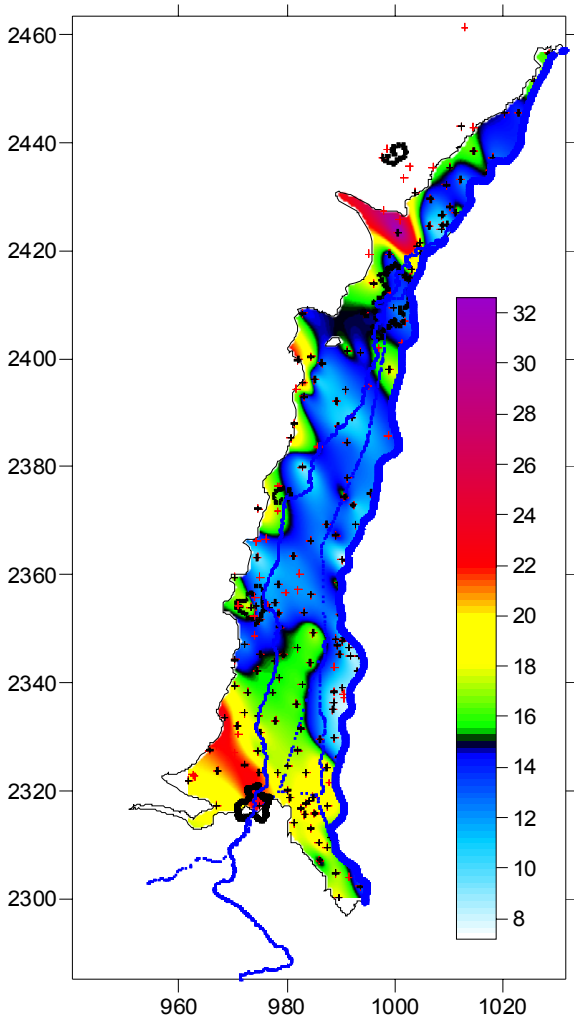


Figure 39 : Carte krigée des erreurs moyennes (en pourcent). En noir et en rouge, les piézomètres utilisés pour l'étude (en rouge points ajoutés dans une deuxième phase).

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 en raison de l'échantillonnage temporel). Les pluies efficaces sont alors confondues avec des réactions rapides des rivières vosgiennes.

3.2.1. La contribution du Rhin

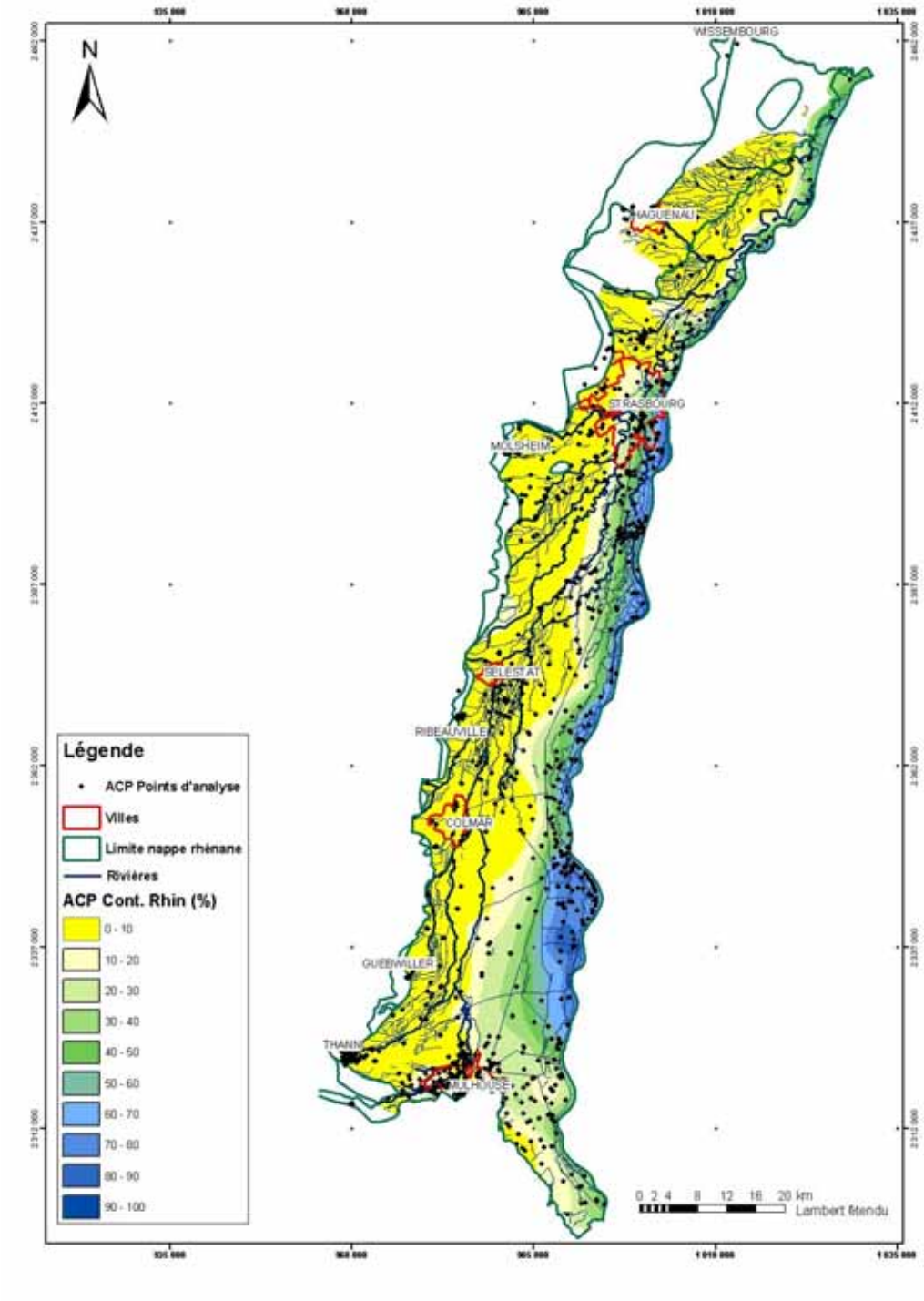


Figure 40 : Contribution du Rhin aux variations du niveau de la nappe rhénane

La répartition du comportement de la nappe par rapport au Rhin 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. L'influence du Rhin reste limitée à ses abords immédiats jusqu'à une distance de 3 kilomètres maximum. Au sud-est de Colmar, le canal de la Hardt, qui prend son eau dans le Rhin pour soutenir le niveau de la nappe en été, délimite une zone des plus sensibles à l'influence du Rhin.

Sur le piémont vosgien, le calcul met en évidence que la nappe n'est pas influencée par le Rhin, ce qui est cohérent.

3.2.2. La contribution des rivières vosgiennes

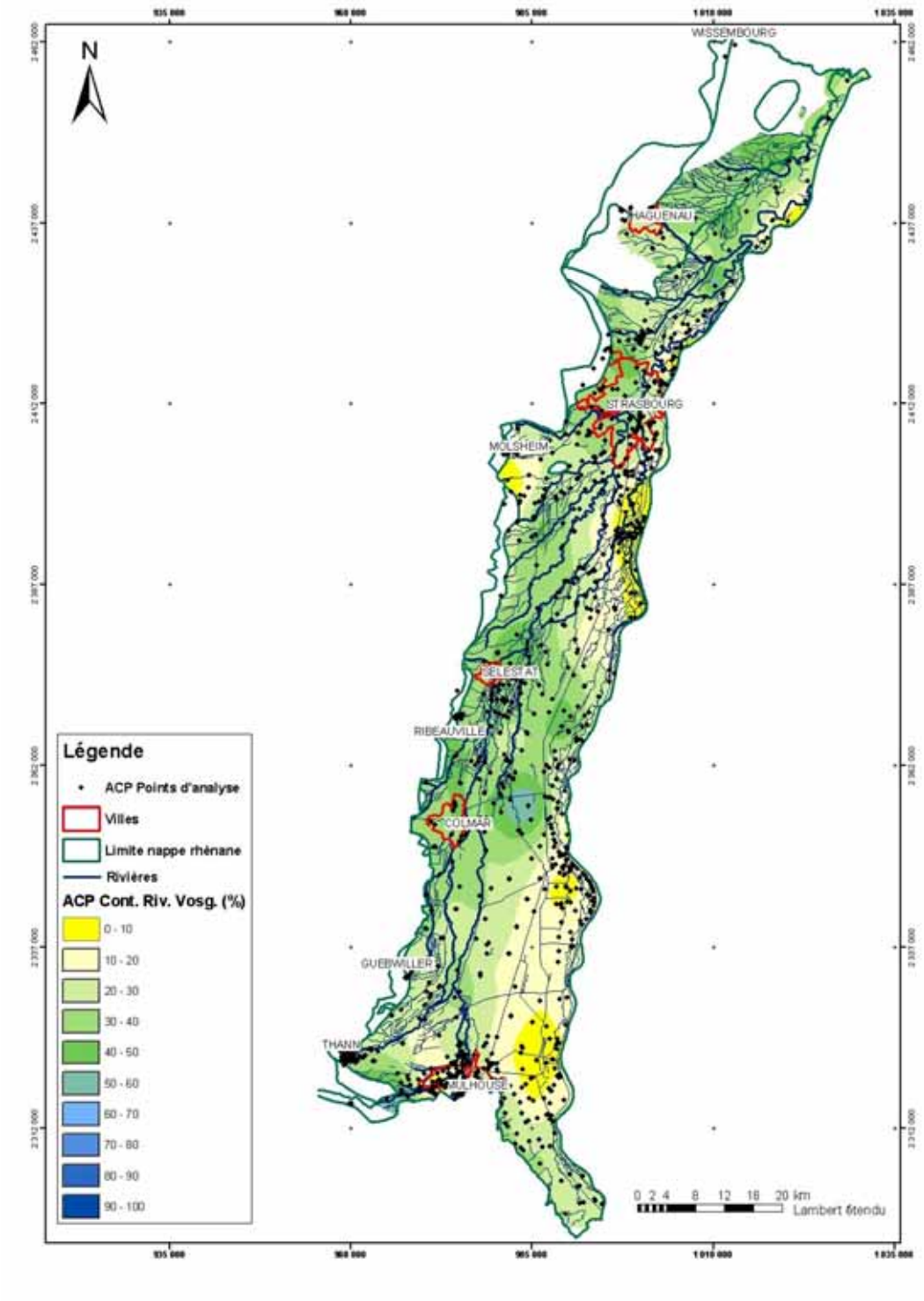


Figure 41 : Contribution des rivières vosgiennes aux variations du niveau de la nappe rhénane

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'Ill. 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.

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.

3.2.3. La contribution de la pluie efficace

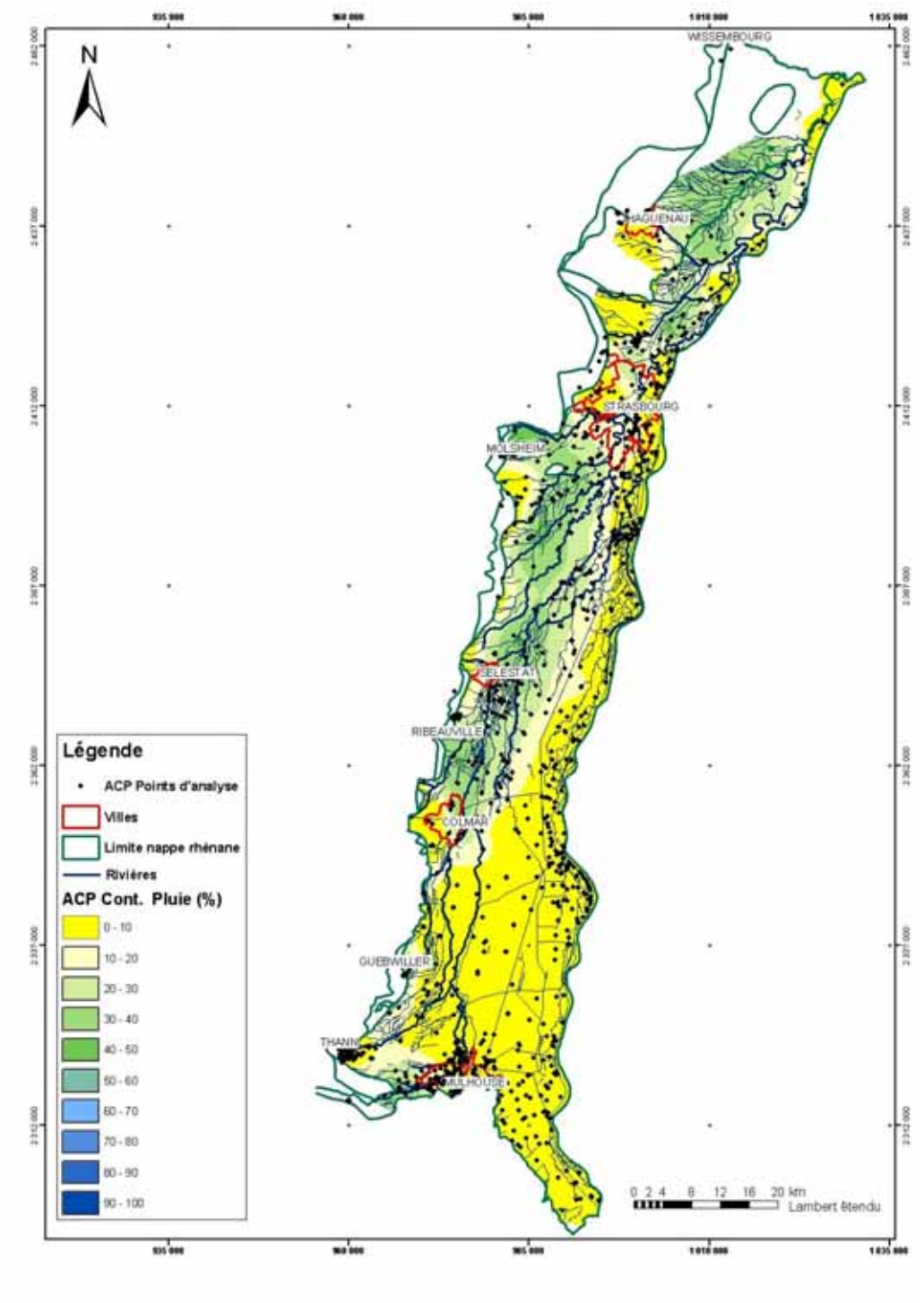


Figure 42 : Contribution des pluies efficaces aux variations du niveau de la nappe rhénane

Les zones humides - ou zones de Ried (le Grand Ried, situé entre Sélestat et Strasbourg, le Bruch de l'Andlau, les zones humides 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 (voir méthode TEMPO).

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 localiser avec précision les zones de faible profondeur de la nappe, mais l'ensemble du grand Ried (entre Sélestat et Strasbourg) est malgré tout bien marqué. L'influence des pluies efficaces est pratiquement nulle sur le piémont vosgien, au sud-ouest et au nord-ouest de Strasbourg, zones où l'épaisseur des sols varie entre 5 et 10 mètres (terrasses de lœss).

Dans la forêt de la Hardt (en bordure du Rhin, entre Colmar et Mulhouse), et à Plobsheim, la nappe réagit en sens contraire aux pluies efficaces, le signal caractéristique est donc opposé. On reconnaît 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 du modèle régional (cf. fig 38).

4. Comparaisons entre les deux méthodes

Les contributions du Rhin, des rivières vosgiennes et de la pluie efficace aux variations piézométriques de la nappe rhénane calculées par l'analyse en composantes principales et par TEMPO sont représentées pour comparaison sur les figures suivantes (simplifiées, figures complètes dans les chapitres précédents). L'application d'un modèle de transfert à la décomposition des variations piézométriques d'une nappe étant très récente, la comparaison des 2 techniques est du plus grand intérêt, l'ACP étant une méthode d'analyse statistique bien éprouvée.

Les résultats des deux méthodes présentent des similitudes mais aussi des désaccords qu'il est utile d'examiner.

4.1. LES SIMILITUDES ENTRE LE MODÈLE DE TRANSFERT ET L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

L'accord entre les deux méthodes est remarquable pour ce qui est de la contribution du Rhin aux variations de la nappe aux abords immédiats du Rhin (Fig. page suivante). Pour ce qui est de la contribution des rivières vosgiennes, les deux méthodes sont en parfait accord à l'extrémité nord de la nappe, là où la contribution dépasse 50%, ainsi que dans les zones situées immédiatement au nord et au sud-ouest de Strasbourg. L'une et l'autre méthode montrent une contribution importante des échanges nappe - rivière entre Colmar et Sélestat (les échanges avec le Rhin sont en réalité imputables aux rivières vosgiennes pour ce qui concerne le modèle de transfert). Pour ce qui concerne la contribution de la pluie efficace, les deux méthodes mettent en évidence une très faible infiltration au sud de Colmar, là où la zone non saturée s'épaissit.

	Pluies	Rivières Vosgiennes	Rhin
ACP			
TEMPO			

Figure 43 : Comparaison des résultats cartographiques des deux méthodes ACP et TEMPO

4.2. LES DÉSACCORDS ENTRE LES DEUX MÉTHODES

Les désaccords portent essentiellement sur les points suivants :

- par sa méthode, l'ACP définit 5 composantes dont les 3 composantes principales ne représentent en moyenne que 58 %. C'est pour cela que les résultats sont plus lissés et moins contrastés que par la méthode TEMPO qui force le calcul à mettre la répartition à 100 % sur les trois composantes.

- la contribution du réseau hydrographique aux variations piézométriques de la nappe au sud de Colmar en raison des temps de transit très importants. L'ACP n'analysant que les évènements concomitants est mise en défaut dans ce contexte et n'explique qu'une très faible partie des variations piézométriques.

- la contribution de la pluie sur les zones de piémont, l'ACP donnant systématiquement des valeurs supérieures au modèle de transfert. Ceci pourrait être dû au caractère non séparable du débit des rivières vosgiennes et de la pluviométrie pour l'ACP, en raison de la réaction immédiate du débit aux précipitations. Cette hypothèse semble bien s'appliquer aux zones où le chevelu hydrographique est très dense, ce qui révèle une très faible infiltration.

5. Calcul des profondeurs de la nappe et des temps de retour

5.1. L'ACP COMME OUTIL DE CARTOGRAPHIE DES PROFONDEURS DE LA NAPPE

L'analyse en composantes principales conduite sur un ensemble de 149 piézomètres (source : APRONA) met en évidence les capacités de description de l'analyse en composantes principales. Cette méthode d'analyse des données décrit le comportement global d'un système par le biais de signaux caractéristiques classés du plus énergétique avec une influence régionale 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 10 % du comportement. A ces 3 signaux principaux ont été adjoints deux signaux de correction qui mettent en évidence des variations plus locales représentatives de différents faciès de l'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 et de décrire un ensemble de processus qui entrent en jeu dans les variations du niveau de la nappe. **Cette capacité de reconstitution de la surface piézométrique de l'aquifère a été utilisée pour recalculer des chroniques piézométriques**, sur les 17 années hydrologiques, de piézomètres apparaissant dans la banque de données du sous-sol et ayant au moins quelques mesures communes sur cette période afin de les caler.

Bien que ces données soient spatialement et temporellement très hétérogènes, elles sont malgré tout utilisables pour compléter l'échantillonnage de la nappe sur la période juillet 1986 – décembre 2003.

La figure 44 illustre la répercussion du nombre de données disponibles en fonction du nombre de mesures piézométriques en 17 ans d'observation :

- un nombre important de points possèdent moins de 15 mesures ;
- un nombre encore important de points possèdent entre 50 et 200 mesures ;
- moins de 100 points possèdent plus de 200 mesures.

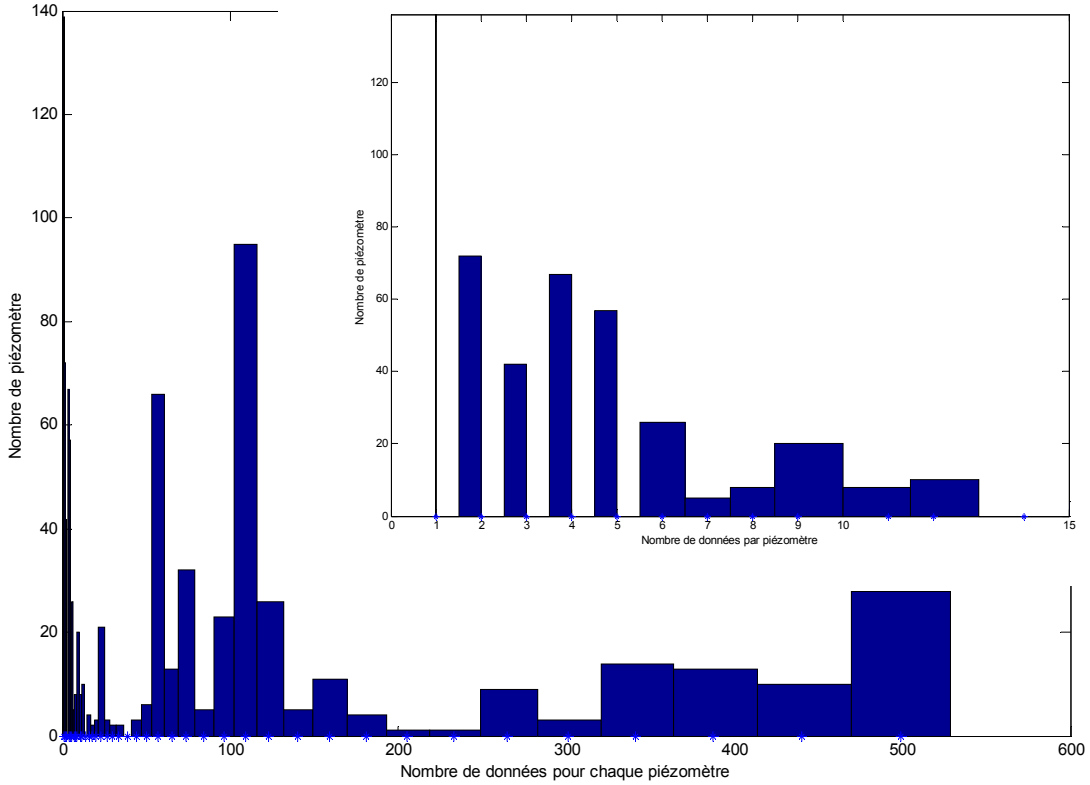


Figure 44 : Histogramme du nombre de données supplémentaires disponibles en fonction du nombre de mesures piézométriques.

Les mesures piézométriques ont été créditées d'une confiance totale, les chapitres suivants expliquent donc les différentes étapes de la reconstitution des chroniques piézométriques des 17 années hydrologiques du modèle en fonction du nombre de mesures communes, et de l'erreur relative des chroniques calculées.

5.2. RECONSTITUTION DE CHRONIQUES PIÉZOMÉTRIQUES

La régionalisation des projections sur les 5 vecteurs propres retenus permet donc de reconstituer les processus hydrologiques représentatifs de l'ensemble de la nappe. Dans la décomposition, chaque piézomètre était défini par sa profondeur moyenne et sa variance, correspondant au battement de la nappe, pour caler les variations piézométriques calculées.

La profondeur moyenne de chaque piézomètre est importante pour caler les données piézométriques (Figure 45) :

Soient $p(t_i)$ les différentes mesures piézométriques effectuées, $s(t_i)$ les données calculées aux différents instants, deux cas se présentent :

- Dans le cas où il y **a moins de 20 données en commun**, la profondeur moyenne est calée en utilisant la moyenne des différences. La qualité du signal calculé est ensuite évaluée par l'écart type $\sigma = E[(p(t_i) - s(t_i)) - m]$.

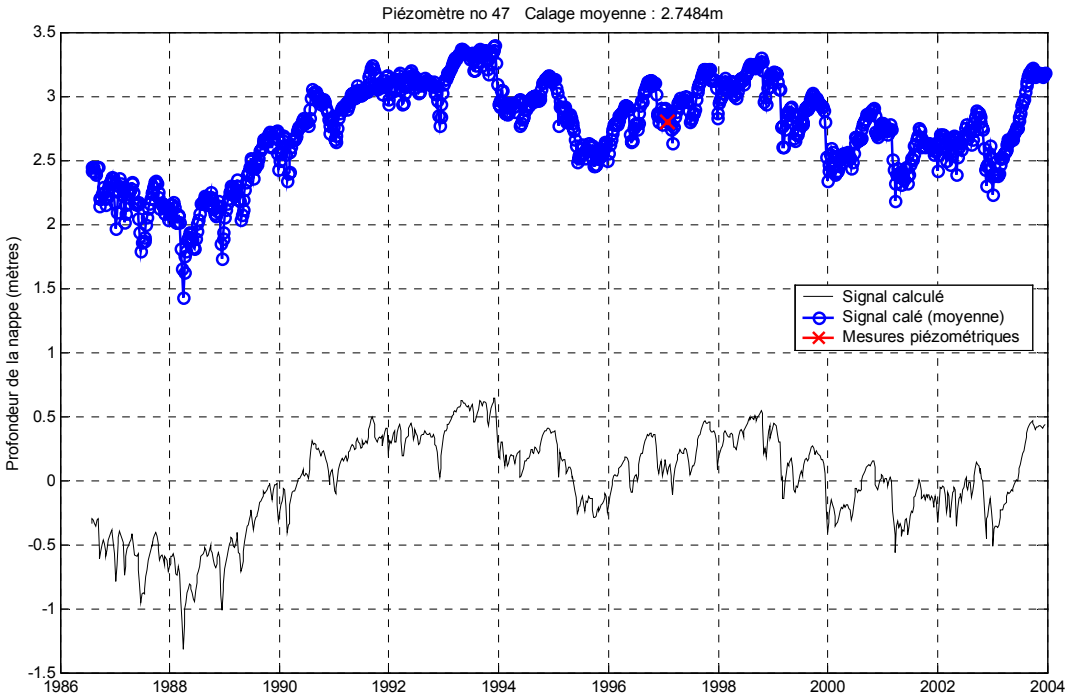


Figure 45 : Superposition d'une mesure piézométrique (en rouge) du signal calculé (en noir) et du signal calculé (en bleu) dont la moyenne a été calée

- Dans le cas où il y a **plus de 20 données en commun**, la moyenne et l'amplitude du signal calculé sont ré-évaluées en calant un polynôme de degré 1 par la méthode des moindres carrés $p(t_i) = A.s(t_i) + B$. L'estimation des erreurs sur la prédiction est définie par l'intervalle à 50 % de confiance Δ (Figure 46).

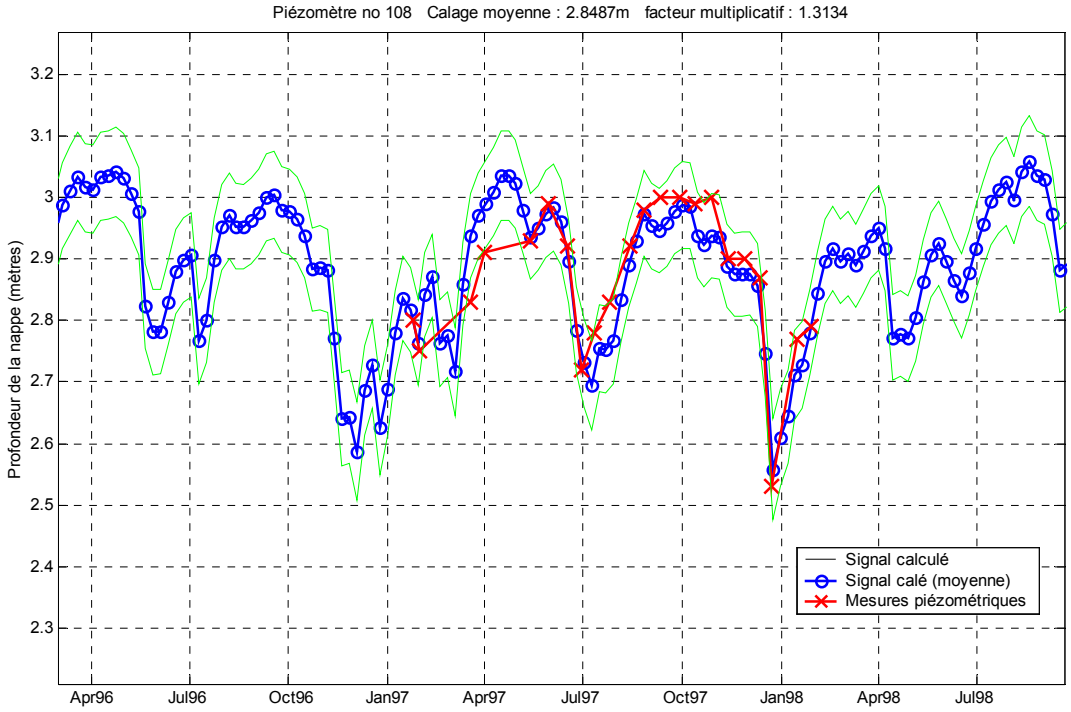


Figure 46 : Superposition des mesures piézométriques (en rouge) et du signal recalculé et calé (en bleu) avec les bornes à 50 % de prédiction (vert).

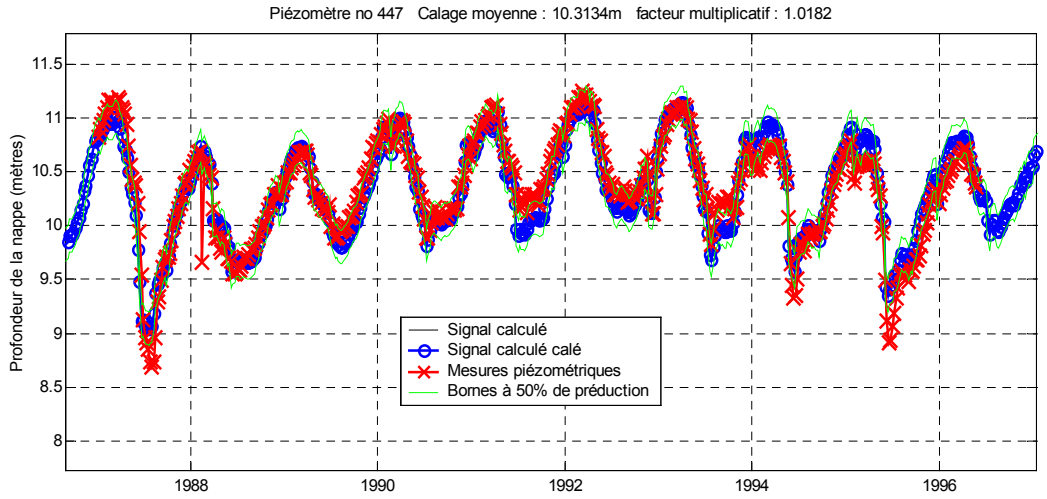


Figure 47 : Superposition des mesures piézométriques (en rouge) et du signal recalculé et calé (en bleu) avec les bornes à 50 % de prédiction (vert).

Les résultats sont, d'une manière générale, plutôt très bons (Figure 47). Quelques limitations, liées à la méthode de modélisation sont tout de même à rappeler, car elles augmentent les erreurs sur les estimations (Figures 48-50) :

- Les amplitudes de crues sont quelquefois sous-évaluées,
- Les déphasages induits par des variations locales de perméabilités ne sont pas pris en charge par le modèle,
- Les processus sont quelquefois difficilement régionalisables lorsqu'on s'approche des zones de bordure. Sur l'ensemble des signaux calculés et calés en amplitude, le facteur A vaut en moyenne 1, mais peut osciller. S'il oscille entre 0,5 et 4, les données sont validées, sinon les processus sont considérés comme mal décrits.

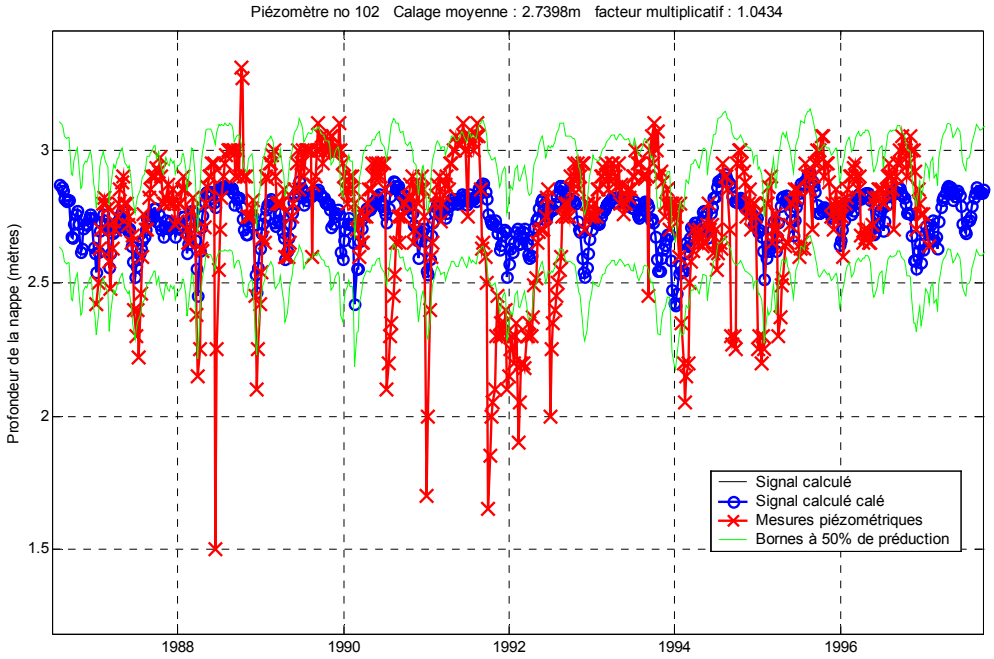


Figure 48 : Difficulté de description des amplitudes de crues, les risques sont sous-évalués. Superposition des mesures piézométriques (en rouge) et du signal recalculé et calé (en bleu) avec les bornes à 50 % de prédiction (vert).

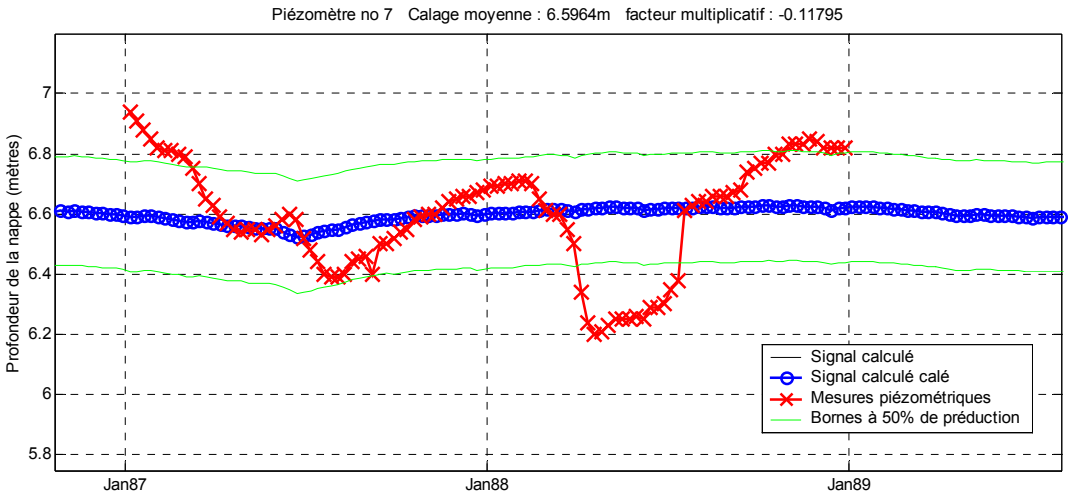


Figure 49 : Problème de caractéristique locale non représentable par une caractéristique régionale des piézomètres, cette chronique n'est pas utilisée dans l'étude. Superposition des mesures piézométriques (en rouge) et du signal recalculé et calé (en bleu) avec les bornes à 50 % de prédiction (vert).

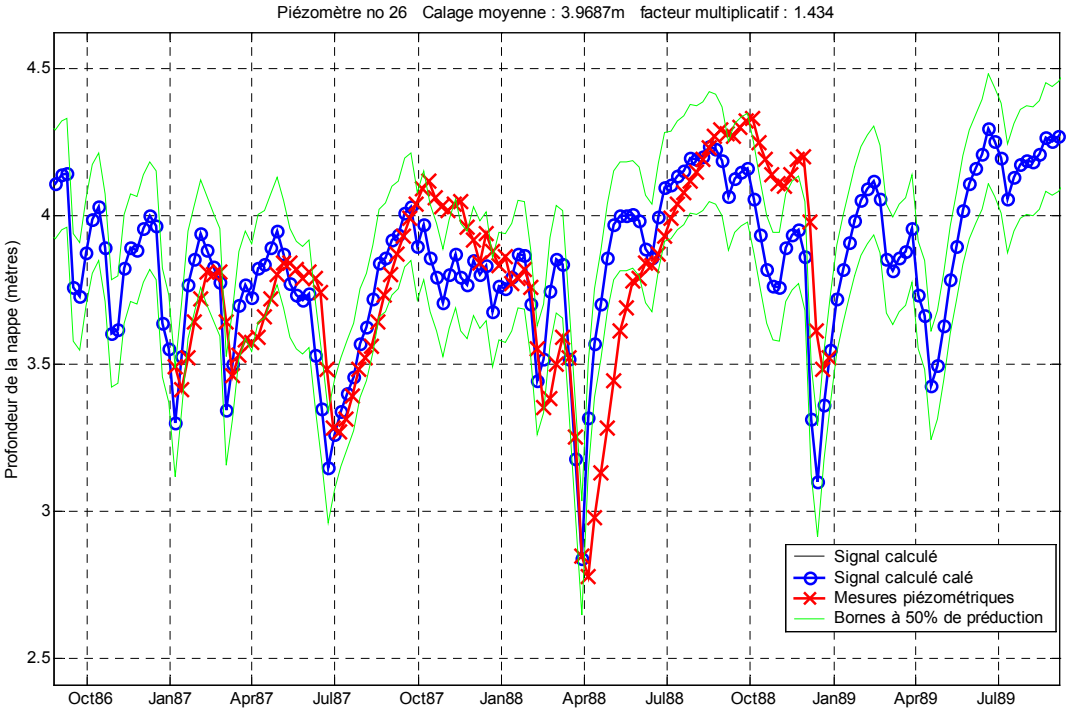


Figure 50 : Influence du temps de transfert (1 semaine). Superposition des mesures piézométriques (en rouge) et du signal recalculé et calé (en bleu) avec les bornes à 50 % de prédiction (vert). Les amplitudes des crues sont déphasées mais indiquent un bon résultat par rapport à l'amplitude qui nous intéresse.

5.3. INDICE DE CONFIANCE

L'erreur relative entre les chroniques calculées et les mesures permet de déterminer un critère de qualité du calage des chroniques piézométriques calculées. Le tableau suivant indique les critères utilisés :

Type de données	Critère de ré-évaluation de l'amplitude	Critère de calcul du minimum	Critère de calage de la profondeur moyenne
Moins de 20 mesures piézométriques en commun	Jamais	$\sigma < 0.4\,m$	Toujours
Plus de 20 mesures piézométriques en commun	$\Delta < 0{,}2\,m$	$\Delta < 0{,}4\,m$	Toujours

Ces critères permettent de définir un indice de confiance des chroniques piézométriques calculées et calées (Figure 51) :

- Indice 0 (rouge) : les données supplémentaires interviennent seulement dans la moyenne, et seule la moyenne est calculée.
- Indice 1 (bleu) : les données supplémentaires permettent de caler les signaux calculés sur la moyenne des différences. La profondeur minimale est également calculée.
- Indice 2 (vert) : les signaux calculés sont calés en amplitude et en moyenne par un polynôme de degré 1. Ces données entrent dans la statistique.

Type de données	Nombre de données	Remarque
Piézomètres de référence	149	Utilisées pour l'ACP
Ré-évaluation de l'amplitude	397	Données utilisées pour le calcul des temps de retour
Calcul du minimum	981	
Calage de la profondeur moyenne	1003	

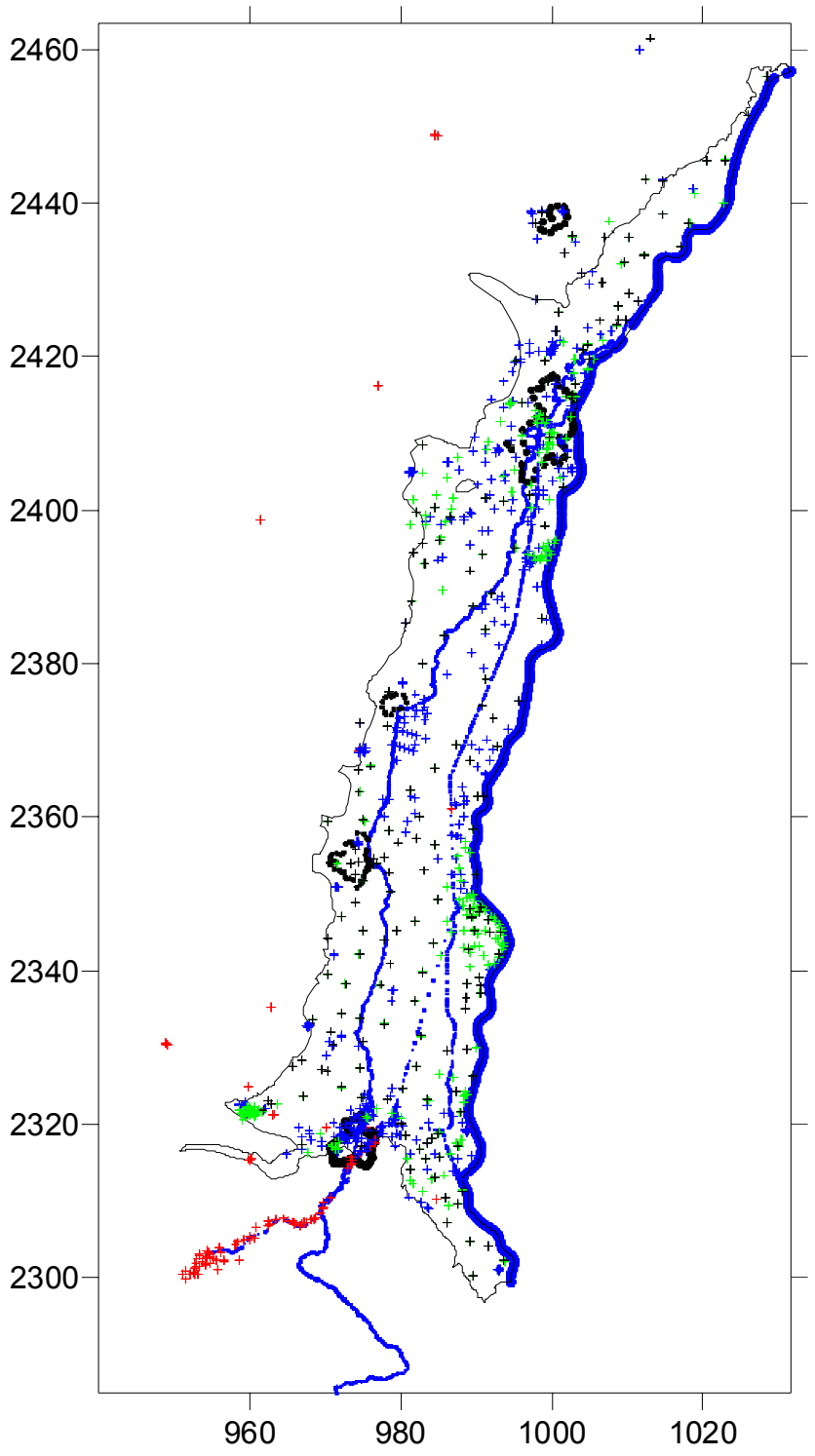


Figure 51 : Répartition des données supplémentaires, la couleur définissant l'indice de confiance, par ordre croissant rouge, bleu et vert. En noir sont indiqués les piézomètres de référence gérés par l'APRONA

5.4. CARTOGRAPHIE DES ISO-PROFONDEURS DE LA NAPPE

Le calcul des cartes des profondeurs minima et moyennes de la nappe a été réalisé dans une première phase avec les informations suivantes :

- Les piézomètres de référence (source : APRONA)
- Les points de la BSS avec plus de 20 mesures
- Les points de la BSS avec moins de 20 mesures mais une erreur Δ< 0.4 m
- Les sources phréatiques

5.5. POSITION DES SOURCES PHRÉATIQUES

Les sources phréatiques ont été inclues dans le calcul des cartes de profondeur de la nappe comme points de profondeur = 0 m pour la carte des hautes eaux et de 0.5 m pour les moyennes eaux (ces sources sont considérées comme pérennes).

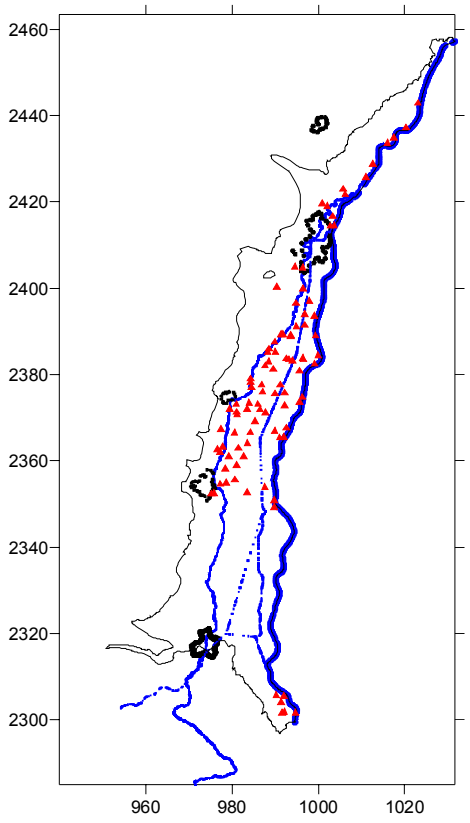


Figure 52 : Position des sources phréatiques.

5.6. CARTE DES PROFONDEURS MOYENNES ET MINIMALES ATTEINTES

Ces cartes mettent en évidence les zones étant susceptibles d'avoir un caractère de zone humide. Les zones bleues et orange montrent les eaux souterraines à moins de 2 mètres de profondeur. Elles se trouvent (fig. 53 et 54) :

- dans le Bruch de l'Andlau
- au nord ainsi qu'au sud de la Moder le long de la bordure ouest de la nappe rhénane
- sur une zone très étendue dans la vallée de l'Ill et le long de la vallée de la Zembs.

La faible densité de points par contre ne permet pas de délimiter à petite échelle les zones humides.

La carte des profondeurs minimales montre globalement la même distribution que les zones peu profondes, mais d'une manière plus prononcée. Les zones à l'extrémité nord de la zone d'étude et au sud de Colmar entre les rivières de la Thur et la Lauch deviennent des zones à très faible profondeur en nappe haute. On s'aperçoit qu'une très grande surface de l'Alsace peut présenter une profondeur de nappe inférieure à 2 m. Les zones humides sont en général comprises dans ces zones.

La surface de nappe inférieure à 1 m de profondeur (en bleu) est beaucoup moins importante et met en évidence les zones humides du Grand Ried.

La méthode de reconstitution de chroniques de l'ACP et la prise en compte des sources phréatiques ont permis d'augmenter les points de données de 149 à 1100. La densité des piézomètres permet d'affiner la carte des iso-profondeurs mais ne permet pas de délimiter à petite échelle les surfaces des zones humides.

La comparaison avec les zones de remontées de nappe à moins de 2 m tracées à dire d’expert par la DIREN/SEMA est relativement satisfaisante (fig. 53a et 53b).

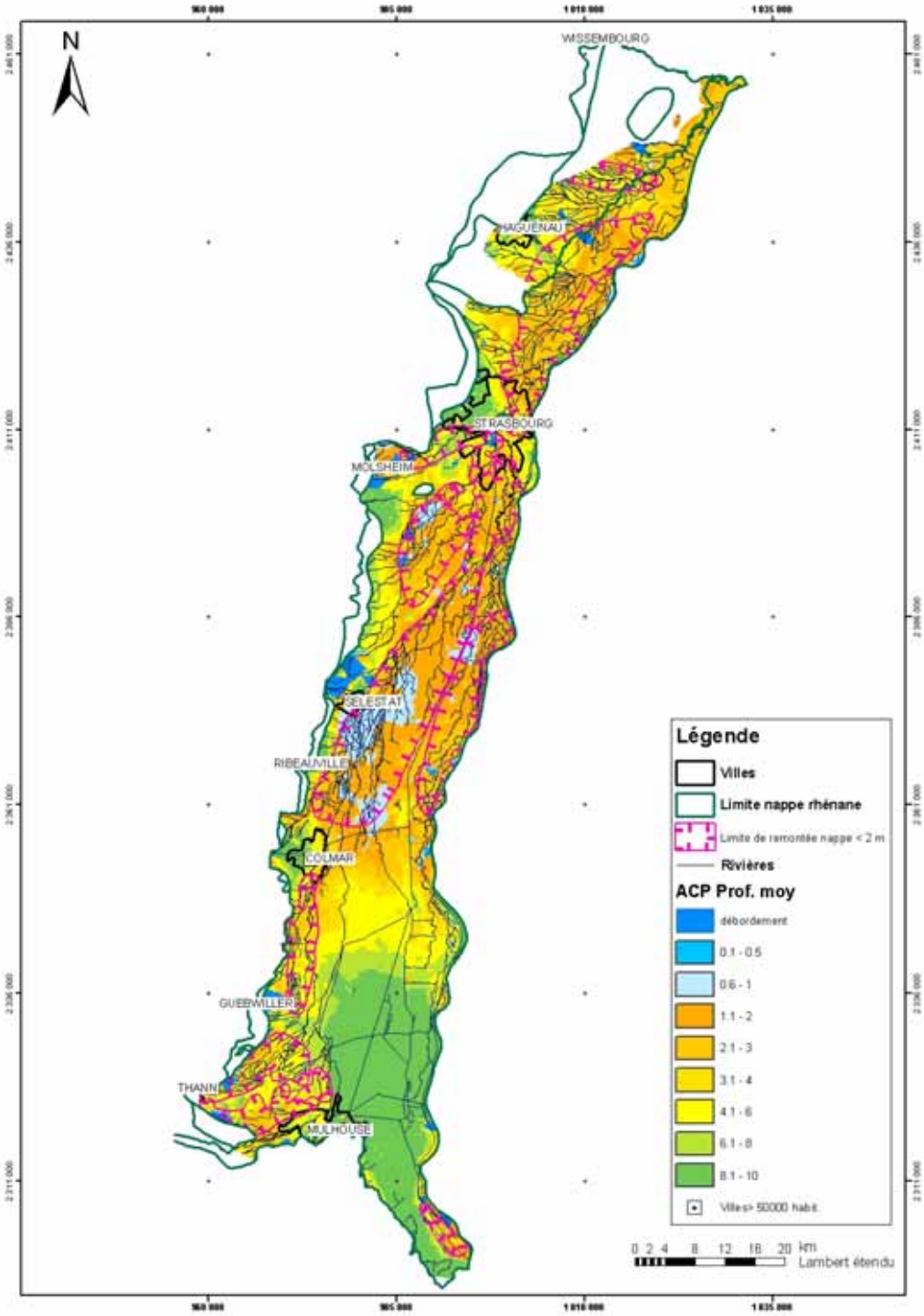


Figure 53 : Carte des profondeurs moyennes (en mètres) sur la période étudiée (juillet 1986 – décembre 2003). Les zones de remontée de nappe à 2 m tracées à dire d'expert par la DIREN/SEMA correspondent bien aux zones à faible profondeur de la nappe

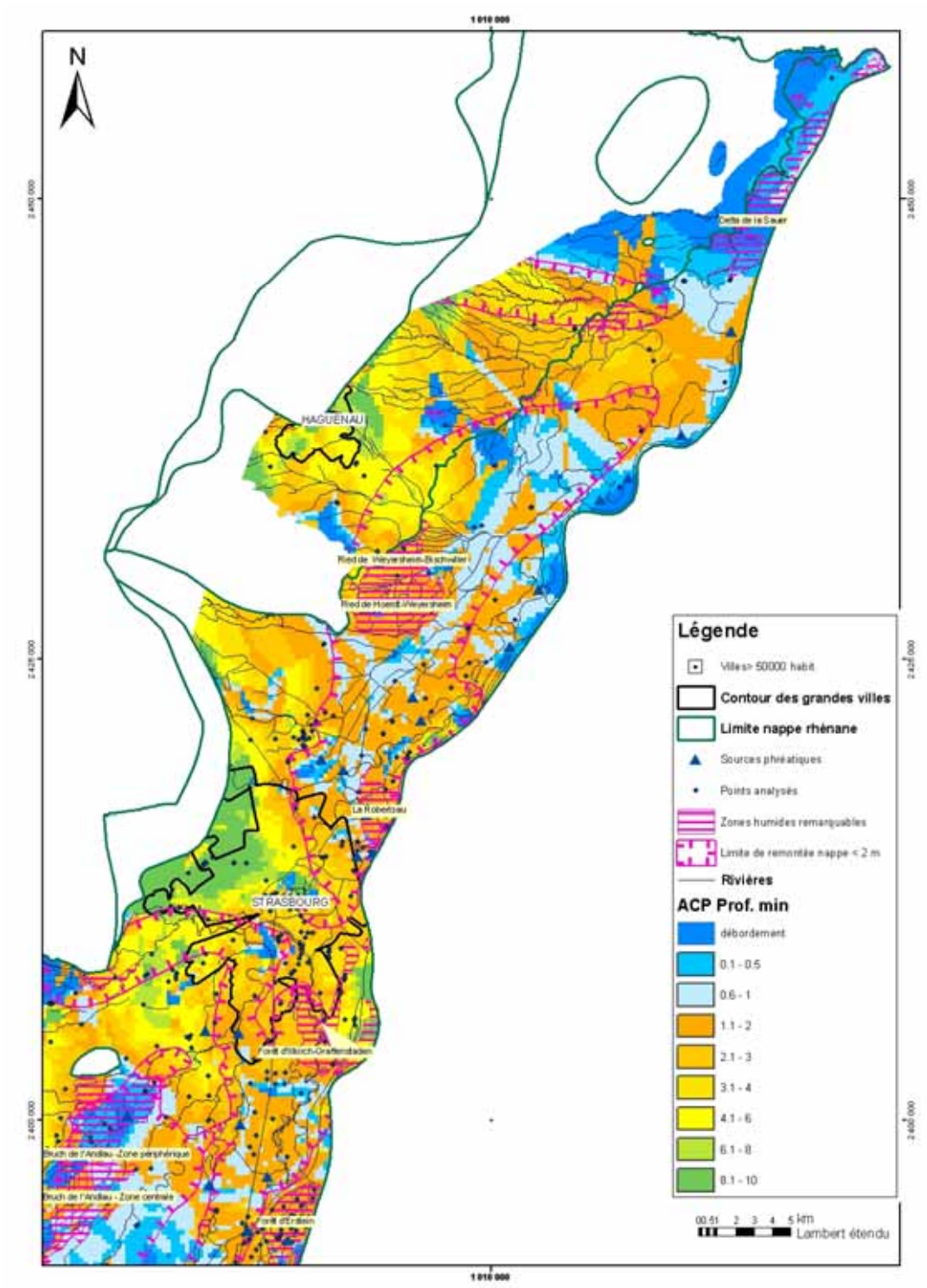


Figure 53a : Carte des profondeurs moyennes (en mètres) sur la période étudiée (juillet 1986 – décembre 2003)- zone nord

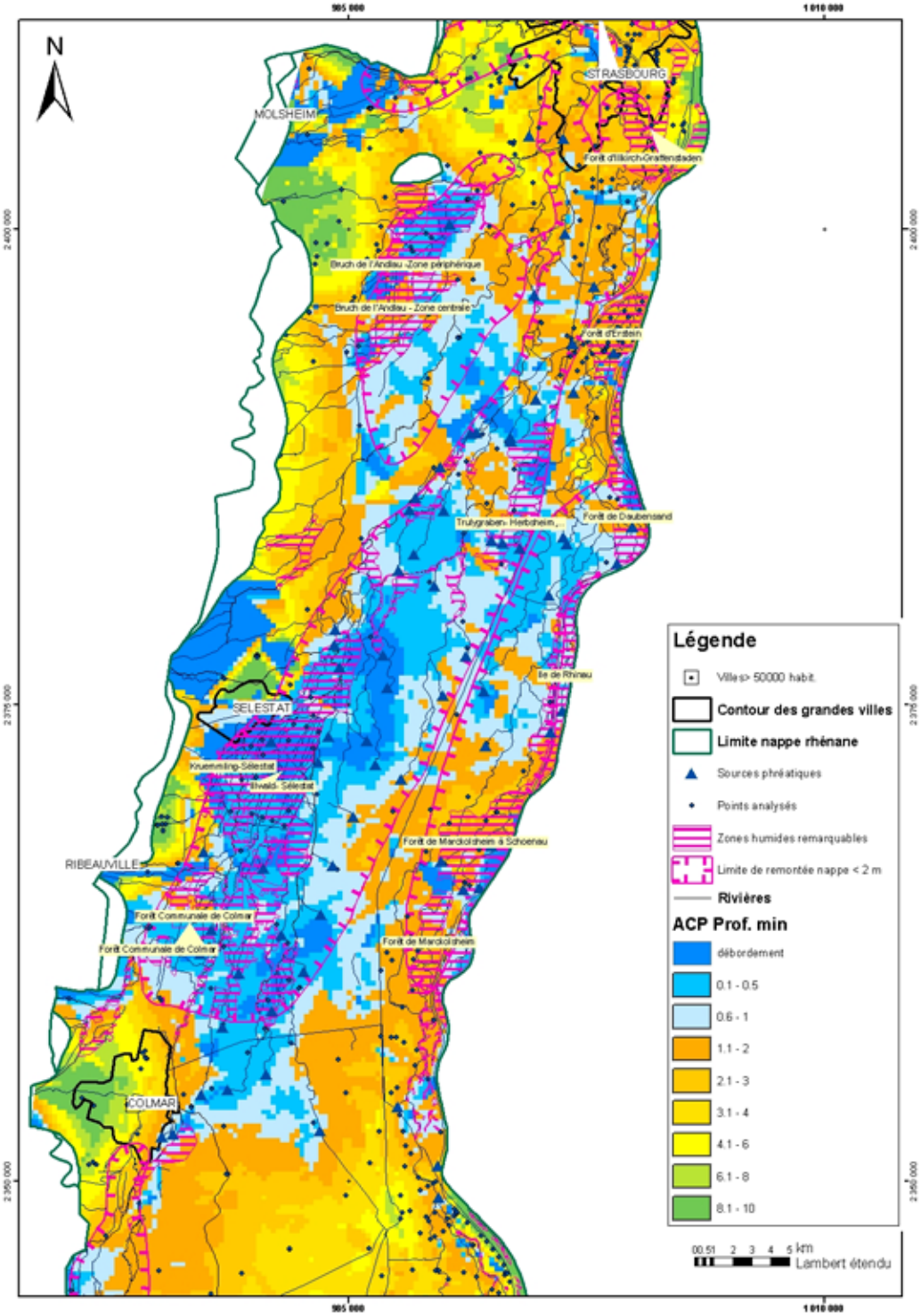


Figure 53b : Carte des profondeurs moyennes (en mètres) sur la période étudiée (juillet 1986 – décembre 2003)- zone sud

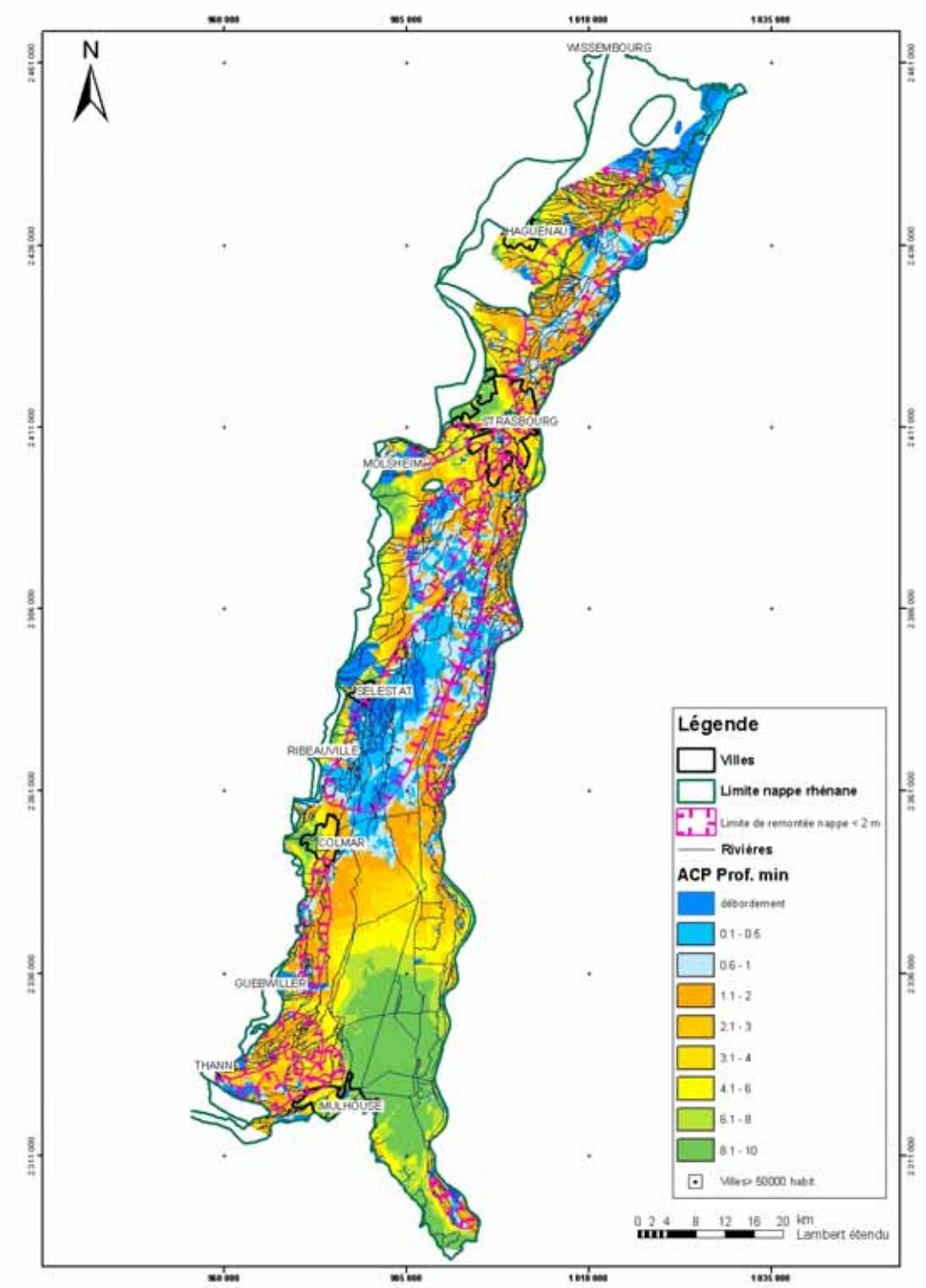


Figure 54 : Carte des profondeurs minimales atteintes (en mètres) par la nappe sur la période étudiée – juillet 1986 – décembre 2003

5.7. EVALUATION DES RISQUES

5.7.1. Méthodes statistiques

Les modèles de prédétermination permettent d'évaluer la probabilité d'occurrence d'un événement. Le but est ici de déterminer la probabilité que la hauteur d'eau h ne dépasse pas H à partir d'une chronique de hauteurs d'eau. Cette fonction de répartition permet de définir une période de retour $T(H)$.

Soit la variable H dont on connaît la fonction de répartition $F(H) = prob(h < H \text{ au cours de la période } \Delta t)$, la période de retour est définie par la grandeur $T(H) = \frac{\Delta t}{1 - F(H)}$.

L'objectif est de trouver une loi théorique dont on puisse montrer qu'elle représente bien la fonction de distribution du processus étudié. Dans la suite, deux approches différentes, la méthode des maxima annuels et la méthode de renouvellement seront utilisées pour déterminer les temps de retour.

La principale difficulté reste la taille de la série temporelle réduite à 17 années hydrologiques (de début novembre à fin octobre) qui détériore la précision des temps de retour déterminés. Cette période de calcul statistique a été choisie pour des raisons d'homogénéité et inclut les minima et maxima à moyen terme. Mais elle exclut les années extrêmes de 1983 (très hautes eaux) et de 1976 (très basses eaux), mesurées sur une partie des points.

5.7.2. Méthode des maxima annuels

La méthode des maxima annuels consiste à extraire la hauteur d'eau la plus importante de chaque année et de déterminer une loi classique qui s'ajuste au mieux aux hauteurs d'eaux maximales annuelles observées.

Dans cette étude, deux lois ont été utilisées pour étudier les hautes eaux : les lois Log-normales $F(H) = \frac{1}{\beta\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\log(Q - Q_0)} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\alpha}{\beta}\right)^2\right) dt$ de paramètres α, β et Q_0, et la loi des valeurs extrêmes (Gumbel) $F(H) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{H-\alpha}{\beta}\right)\right)$ de paramètres α et β. Les paramètres pour ces 2 lois sont déterminés par la méthode des moments, et vérifiés graphiquement.

Cette méthode simple pose tout de même quelques problème. L'aspect processus de la série des hauteurs d'eau d'une chronique est totalement ignoré, on se ramène à un problème de tirage dans une urne. Elle néglige également beaucoup d'informations : toutes les hautes eaux qui n'ont pas eu la chance d'être le maximum de l'année où elles se sont produites. Cette information oubliée fait cruellement défaut lorsque l'échantillon est court.

Certaines années, les hautes eaux annuelles n'ont pas été fortes : ce type de hautes eaux n'a pas grand chose à voir avec les crues importantes dont on veut connaître la probabilité. L'hypothèse d'homogénéité de l'échantillon est mal vérifiée.

5.7.3. Méthode de renouvellement

La méthode de renouvellement consiste à fixer un **seuil** S dont on ne conserve que les débits supérieurs. On obtient ainsi une série de chapeau de chroniques piézométriques dépassant le seuil S dont on ne retient que les maxima.

On dispose ainsi de deux séries, les hauteurs maximales des crues supérieures à S $\{h_i\}$ $i=1...nc$ nc = nombre de crues, et les dates d'occurrence des maxima qu'on remplace par la série des nombres de maxima observés chaque année $\{n_k\}$ $k=1...na$ na = nombre d'années.

L'indépendance des évènements est assurée par un temps de latence de 4 mois avant qu'un nouveau maximum soit recalculé, ainsi un seul maxima est retenu quand une même crue a plusieurs maxima.

Soit h la hauteur la plus forte de l'année, on veut déterminer $F(H)=prob(h<H)$. Le modèle est construit en décomposant cette probabilité en deux : la probabilité de **dépasser le seuil** S k **fois dans l'année**, et la probabilité de ne pas dépasser le **niveau** H bien qu'ayant dépassé S. La loi de probabilité peut donc s'écrire comme :

$F(H)=prob(h<H)=$ Prob au cours de l'année, 0 crue $>S$

+ Prob au cours de l'année 1 crue $>S$ et $<H$

+ Prob au cours de l'année 2 crue $>S$ et $<H$

+ … ∞

Soit $F(H)=\sum_k P(k).G(H)^k$.

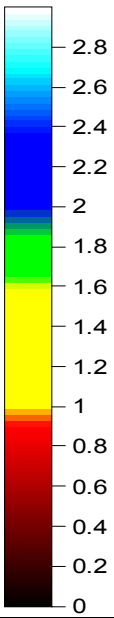
$P(k)$ est la probabilité d'observer exactement k crues supérieures à S en un an. La loi de Poisson s'ajuste bien aux observations $P(k)=e^{-\mu}.\frac{\mu^k}{k!}$ et $G(H)$ est généralement estimée par une loi du type exponentielle de Weibull $G(H)=1-e^{-\rho(Q-S)^p}$.

Les paramètres μ, ρ, p de ces lois sont déterminés à partir des séries $(\{n_k\}, k=1...na, \{h_i\}, i=1...nc)$ en utilisant la méthode de maximum de vraisemblance, puis vérifiés graphiquement.

Une première estimation de la loi de probabilité de crue pour des hautes eaux rares pour $T>>1$, peut ensuite être écrite de la manière suivante : $F(H)=1-\hat{\mu}.e^{-\hat{\rho}(H-S)^p}$, soit $H_T=S+\left(\frac{\log(\hat{\mu}T)}{\hat{\rho}}\right)^{1/\hat{p}}$.

5.8. CARTE DES TEMPS DE REMONTÉE

La précision de l'étude des temps de retour permet uniquement de mettre en évidence des classes de temps de fréquence de hautes eaux. Les cartes suivantes seront donc accompagnées de l'échelle de couleur suivante, les chiffres représentent le logarithme du temps de retour.



Présence de la nappe à la profondeur considérée	Couleur attribuée	Temps de retour
Exceptionnelle	Blanc	Plus de 1000 ans
Très rare	Bleu clair	Entre 500 et 1000 ans
Rare	Bleu	Entre 100 et 500 ans
Possible	Vert	Entre 50 et 100 ans
Fréquente	Jaune	Entre 10 et 50 ans
Très fréquente	Rouge	Entre 5 et 10 ans
Régulière	Noir	Moins de 5 ans

5.8.1. Carte des temps de remontée à 3 mètres

Cette carte met en évidence que la nappe est dans pratiquement toute l'Alsace régulièrement présente à 3 m de profondeur. Seul le Sud avec le piémont vosgien représente une zone à plus grande profondeur de la nappe en toute période.

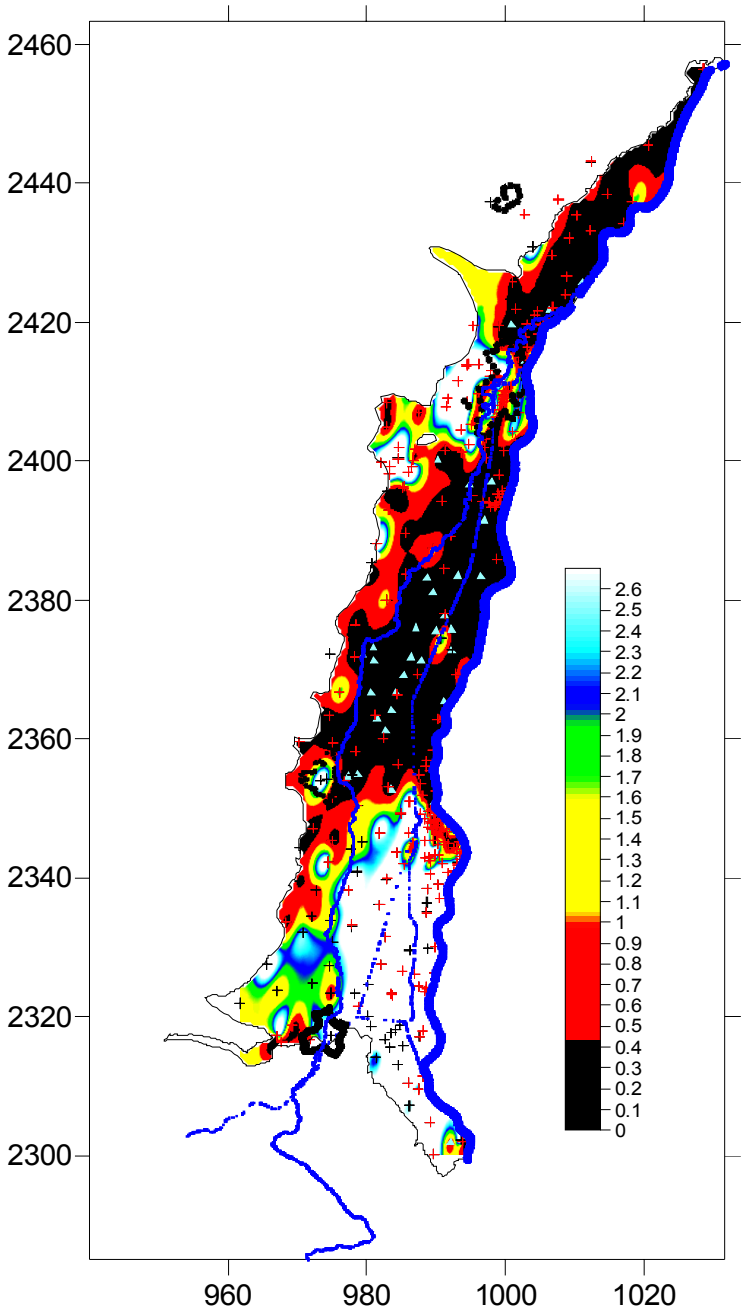


Figure 55 : Carte des temps de remontée de la nappe à 3 mètres de profondeur

5.8.2. Carte des temps de remontée à 2 mètres

La carte de remontée à 2 mètres avec son temps de retour marque de grandes surfaces autour des zones humides connues : le grand Ried à l'est de Sélestat, le Bruch de l'Andlau au sud de Strasbourg et les zones humides au Nord.

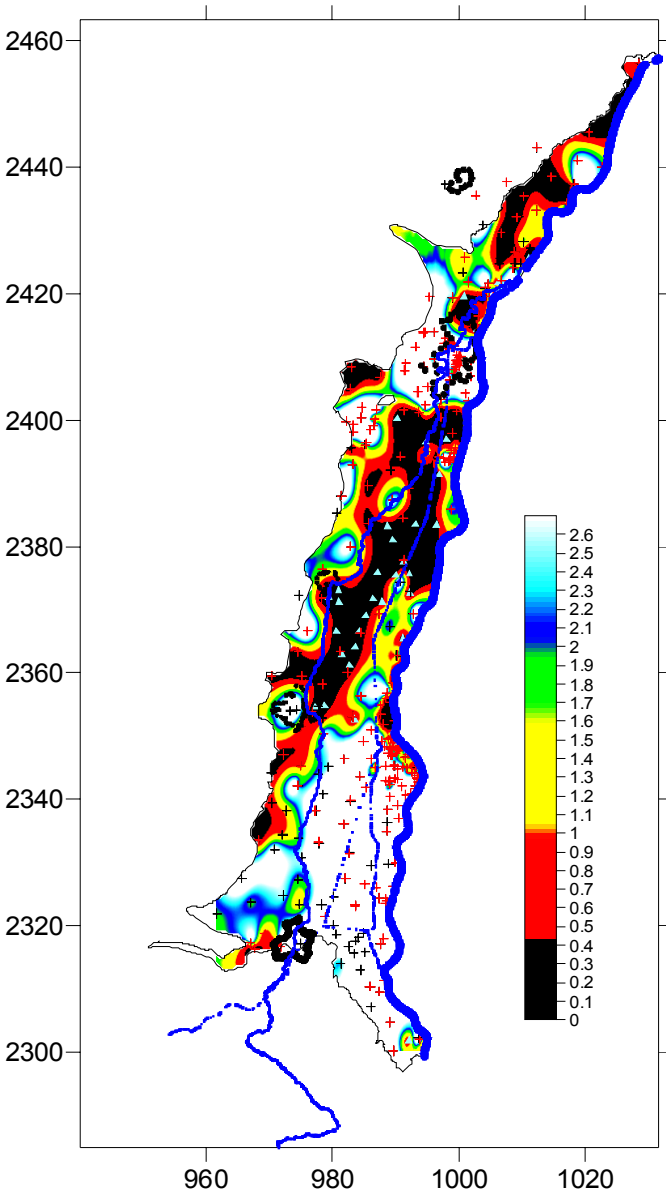


Figure 56 : Carte des temps de remontée de la nappe à 2 mètres de profondeur

5.8.3. Carte des temps de remontée à 1 mètre

Quatre zones humides connues sont régulièrement atteintes par des eaux souterraines sub-affleurantes de 1 m de profondeur :

Les zones humides du Nord près des côteaux de la terrasse pliocène, la zone humide du Bruch de l'Andlau, les zones humides du Grand Ried entre Sélestat et Colmar et la zone au sud de Colmar en bordure du piémont des Vosges.

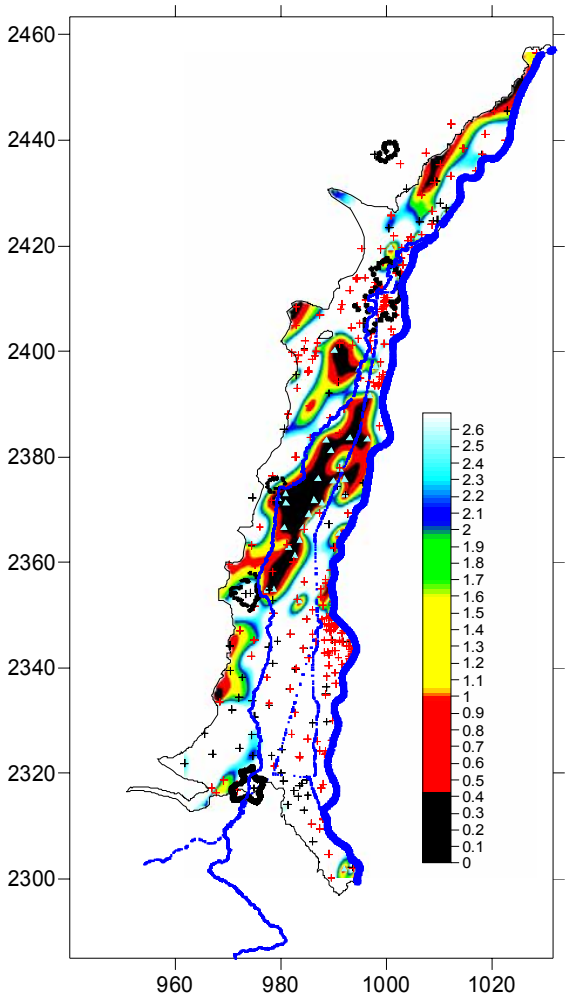


Figure 57: Carte des temps de remontée de la nappe à 1 mètre de profondeur

5.8.4. Calculs complémentaires avec prise en compte d'une période plus longue

Pour le calcul des temps de retour, un deuxième calcul a été lancé afin d'intégrer de plus longues chroniques avec des dates de début s'étalant entre 1950 et 1977. Le calage des paramètres de la loi de Gumbel a été effectué par moindres carrés. D'une manière générale, les paramètres sont mieux calés que ceux des calculs avec la série temporelle qui débute en 1986, même si la période n'est pas homogène et que le nombre de points de mesure est inférieur.

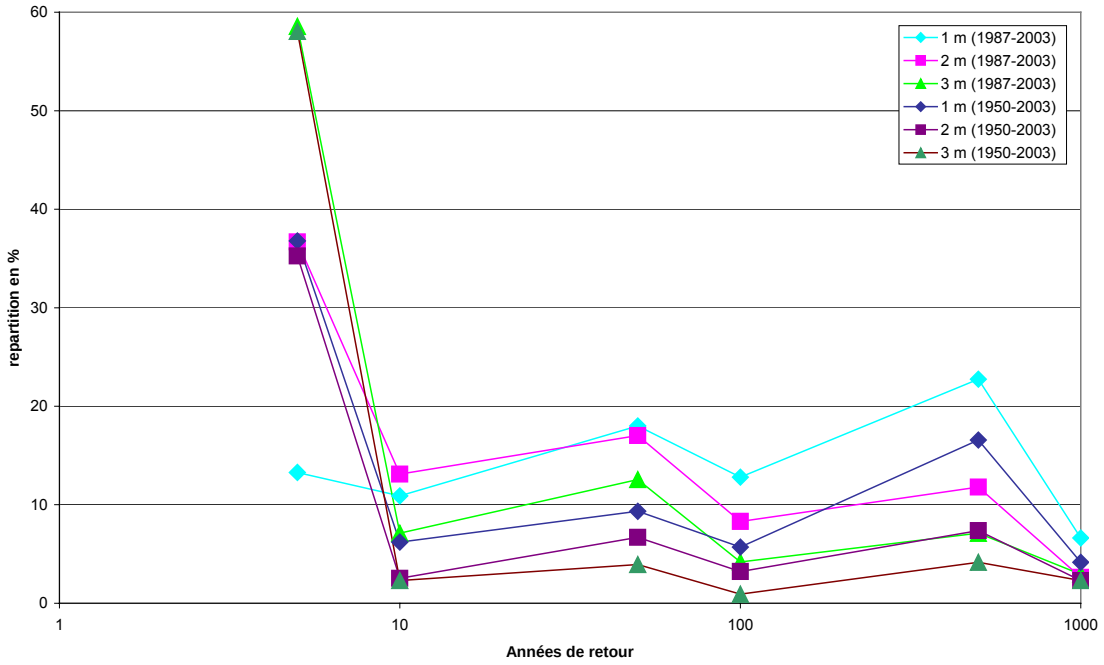


Figure 58 : Courbe de répartition des temps de remontée de la nappe pour la série longue (1950-2003) et la série courte (1986-2003)

Le graphique de la figure 58 montre que la distribution du temps de retour diffère sensiblement :

Pour une profondeur de nappe d'un mètre, le temps de retour inférieur à 5 ans est beaucoup plus important pour la série longue (37 contre 14 %), en revanche il est moins important pour les temps de retour supérieurs, surtout pour 50 et 100 ans. Il y a également un plus grand nombre de points avec un temps de retour de plus de 500 ans. Dans certains cas, les maxima simulés (dont celui de 1983) sont trop importants par rapport aux mesures, les temps de retour supérieurs à 500 ans sont probablement surestimés.

Pour une remontée de nappe à une profondeur de 2 et 3 mètres, le temps de retour inférieur à 5 ans est le même pour les deux séries, en revanche les temps de retour supérieurs sont beaucoup plus bas, correspondant à une plus forte distribution pour des temps de retour de plus de 1000 ans. Ceci montre également une distinction plus nette entre les zones de remontée régulière de la nappe et les zones à faible risque.

Les variogrammes des temps de retour aux profondeurs de 1, 2, 3 mètres sont assez différents. En particulier, on observe une continuité pour des distances faibles, alors qu'on observait un effet de pépite précédemment. Les temps de retour sont beaucoup plus lisses ce qui pourrait être lié à l'échantillonnage moins dense ou également parce que la loi statistique est mieux calée et les résultats plus solides. Toutes les chroniques ont en commun les références de 1983, 1988, 2002 pour les hautes eaux, 1976, 1991 et 2003 pour les basses eaux.

Les cartes des trois profondeurs de remontée de nappe montrent toutes des surfaces plus importantes pour les remontées régulières à fréquentes (noir à vert). Ceci est dû à une densité de points plus faible qui entraîne un lissage augmentant ces surfaces.

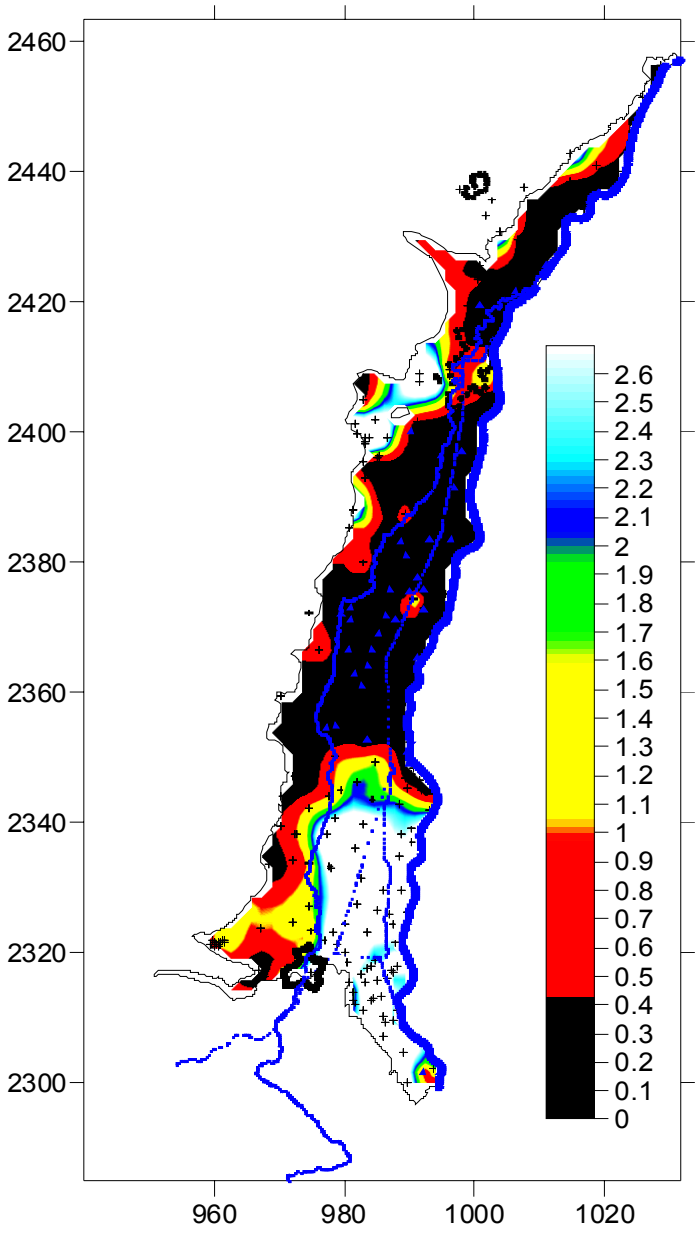


Figure 59 : Carte des temps de remontée de la nappe à 3 mètres de profondeur (série longue)

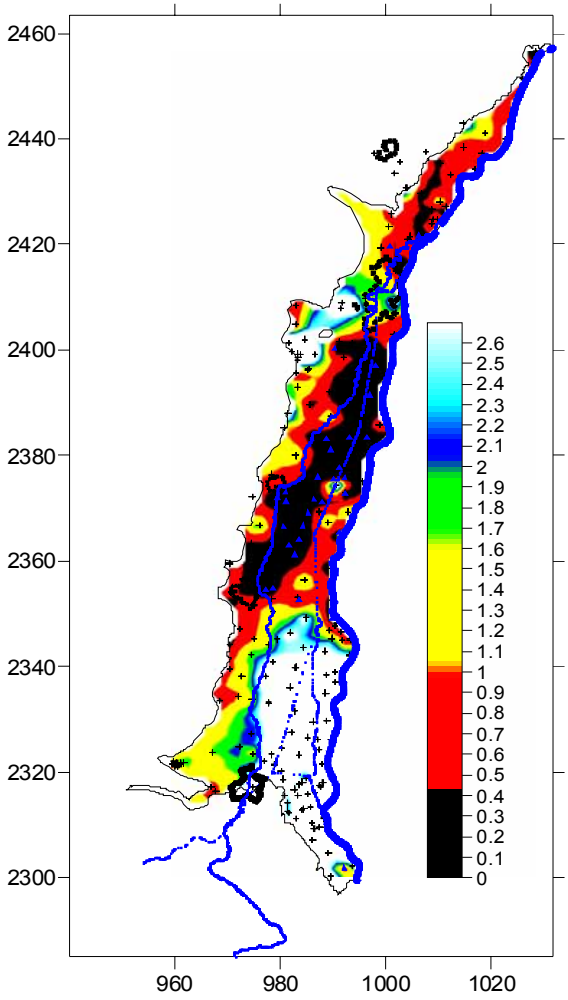


Figure 60 : Carte des temps de remontée de la nappe à 2 mètres de profondeur (série longue)

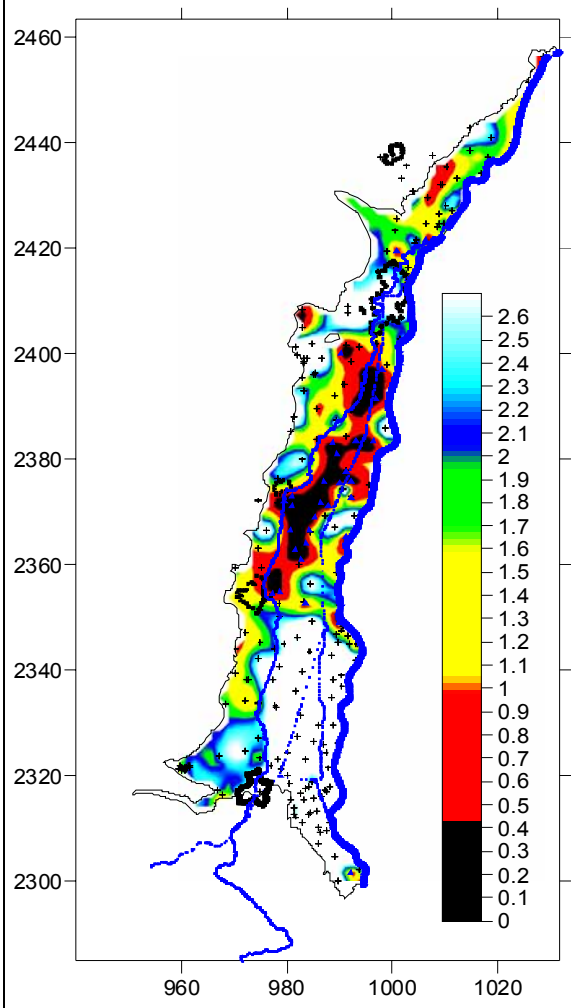


Figure 61 : Carte des temps de remontée de la nappe à 1 mètre de profondeur (série longue)

6. Conclusion

Les deux méthodes, TEMPO (modèle de transfert) et l'ACP, montrent les influences de trois composants principaux bien distincts sur la nappe souterraine : les rivières vosgiennes, les pluies efficaces et le Rhin.

La partie ouest et centre de l'Alsace est fortement influencée par les rivières vosgiennes. Plusieurs secteurs de nappe sont en connexion directe avec les rivières et ont un temps de transit très rapide.

L'influence du Rhin reste d'après les calculs de l'ACP limitée à ses abords immédiats jusqu'à une distance de 3 kilomètres maximum, mais le Rhin ou les rivières vosgiennes de comportement comparable soutiennent les basses eaux sur pratiquement toute la plaine rhénane d'après le modèle de transfert.

Les pluies efficaces influencent la nappe souterraine dans toutes les zones de faible profondeur et n'influencent pratiquement pas la nappe profonde au sud de Colmar ni l'extrémité nord de la plaine.

Les deux méthodes présentent des différences mais se complètent : la méthode de TEMPO a l'avantage de pouvoir prendre en compte des réactions des composantes à temps de transit long ou court, ce qui permet de bien distinguer les 3 composantes même avec une faible différence, comme certaines rivières vosgiennes par rapport aux pluies efficaces, et de mieux expliquer les réactions piézométriques à forte inertie. La méthode ACP permet quant à elle de mettre en évidence des composantes principales supplémentaires représentant d'autres influences plus complexes comme certains aménagements ou, les infiltrations de l'Ill.

Les calculs des profondeurs de nappe et des temps de retour des hautes eaux basés sur les études par ACP permettent de compléter les points d'observation par des chroniques reconstituées pour le calcul des cartes

- de 149 à 1003 points pour les moyennes eaux ;
- de 149 à 981 points pour le niveau minimal ;
- de 149 à 397 points pour le battement de la nappe.

Les cartes sont ainsi plus précises, sans toutefois que la densité de points permette d'aller au-delà de l'échelle du 1/50 000 même dans les zones bien informées. Elles montrent qu'en situation de hautes eaux, la nappe peut se situer à moins de 2 m de profondeur sur environ la moitié de la plaine d'Alsace. En moyennes eau, les zones de remontées de nappe se limitent aux zones humides connues de Sélestat / Ribeauvillé jusqu'au Rhin et aux zones humides du Nord.

Les temps de retour montrent une remontée à 3 mètres très régulière (temps de retour à moins de 5 ans) sur toute la plaine d'Alsace sauf dans la zone de nappe profonde au sud-est de Colmar et à l'ouest de Strasbourg.

Sur la plus grande partie de la plaine, la nappe remonte rarement à moins de 1 m (temps de retour de 100 à 500 ans). Le temps de retour est régulier (temps de retour à moins de 5 ans) seulement sur les zones humides du Bruch de l'Andlau, du Grand Ried, du Sud de Colmar et du Nord de l'Alsace en bordure de la terrasse pliocène.

7. Bibliographie

LONGUEVERGNE L. (2004) – Analyse statistique de la dynamique de la nappe d'Alsace, Rap. BRGM/RP-53266-FR.

PINAULT J.L., DOERFLIGER N., LADOUCHE B., BAKALOWICZ M. (2004) Characterizing a coastal karst aquifer using an inverse modeling approach: The saline springs of Thau, southern France, Water Resources Research, 40 W08501.

PINAULT J.L., PAUWELS H., CANN C. (2001) Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems - application to nitrate transport and denitrification, Water Resources Research, Vol. 37, n° 8, pp. 2179-2190.

PINAULT J.L., PLAGNES V., AQUILINA L., BAKALOWICZ M. (2001) Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems - Characterization of karst system functioning. Water Resources Research, Vol. 37, n° 8, p. 2191-2204.

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Alsace
15, rue du Tanin - Lingolsheim
BP 177
67834 Tanneries Cedex France
Tél. : 03 88 77 48 90