

*Modèle de la nappe d'Alsace
Projet de développement 312*

Rapport final

décembre 1998

R 40335



*Modèle de la nappe d'Alsace
Projet de développement 312*

Rapport final

*Rédigé sous la responsabilité de
M.L. Noyer, A. Menjoz, Ph. Elsass, D. Thiéry, J.C. Martin
avec la collaboration de
J.P. Sauty, J.P. Vançon*

décembre 1998

R 40335



Mots clés : Modèle numérique, Code MARTHE, Plaine d'Alsace, Couplage nappes-cours d'eau, Transport avec effet de densité.

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

Noyer M.L., Menjoz A., Elsass Ph., Thiéry D., Martin J.C. avec la collaboration de Sauty J.P., Vançon J.P. (1998) - Modèle de la nappe d'Alsace - Projet de développement 312 - Rap. final. Rap. BRGM R 40335, 207 p., 47 fig., 20 tabl., 6 ann.

© BRGM, 1998, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Ce rapport décrit la méthodologie employée et les résultats obtenus en 1997 et 1998 dans le cadre du projet de développement PRD 312 de la Direction de la Recherche du BRGM, appliqué à la modélisation du secteur français de la nappe d'Alsace compris entre Mulhouse et Colmar.

L'objectif de ce projet de développement était essentiellement la réalisation d'une action de démonstration des capacités du BRGM en matière de modélisation d'un système aquifère complexe et de l'adaptation des fonctionnalités de ses outils numériques. Dans ce but, il était nécessaire d'intégrer les diverses études antérieures dans le même domaine (données de suivi périodique, approches numériques) et ceci a nécessité de valider et maîtriser les toutes dernières options de l'outil de modélisation, le code MARTHE du BRGM.

La présentation des travaux comprend l'ensemble des étapes nécessaires à l'approche d'un problème 3D complexe qui se situe dans la catégorie des modélisations de phénomènes interdépendants (hydrodynamique et transferts), en régime transitoire et en présence de diverses interactions (échanges nappe-rivière) ou couplages (effets densitaires) entre phénomènes élémentaires.

A l'issue d'une première phase d'analyse des nombreuses données expérimentales, le calage du régime hydrodynamique réalisé au sein d'une géométrie 2D, puis multicouche plus réaliste, permet une restitution très cohérente de la piézométrie régionale "observée". L'analyse par simulation de l'évolution de la distribution spatiale de la salure, induite par une quinzaine de sources de contamination (infiltration sous les terrils du Bassin Potassique) reproduit les principales caractéristiques de la phénoménologie expérimentale au cours des vingt dernières années. L'étude met en évidence l'incidence de la discrétisation géométrique au voisinage des sources de saumure, la forte sensibilité à la variabilité de la vitesse (langues salées relativement étroites) et les contraintes de calage associées à la cohérence simultanée de l'hydrodynamique et des transferts.

Le modèle multicouche issu de cette étude pourrait servir de base à la mise au point d'un véritable modèle de gestion du Bassin Potassique et du réseau élargi, en collaboration avec les principales parties prenantes. La finalisation d'un tel modèle de gestion nécessiterait l'acquisition d'un certain nombre de données complémentaires dont le besoin s'est fait sentir au cours de l'exécution du projet présenté ici. L'étude du comportement détaillé de l'aquifère a nécessité l'approche d'un contexte complexe et largement documenté qui n'aurait pu être appréhendé sans l'appui efficace des diverses instances en charge des investigations expérimentales ou du suivi réglementaire (APRONA, AERM, DDA, DIREN/Sema, Mines Domaniales de Potasse d'Alsace, Service de la Navigation de Strasbourg) que nous remercions.

Sommaire

Introduction	13
1. Contexte de l'étude et données recueillies	17
1.1. Contexte hydrogéologique	17
1.2. Acquisition et traitement des données	19
1.2.1. Données préexistantes	19
1.2.2. Nouvelles données pour l'hydrodynamique	21
1.2.3. Données de salure	25
1.3. Analyse des données pour l'hydrodynamique	25
1.3.1. Données hydroclimatiques	25
1.3.2. Débits dans les rivières	26
1.3.3. Données de prélèvement dans la nappe	26
1.3.4. Cartes piézométriques	27
2. Options du calcul hydrodynamique	31
2.1. Prise en compte des drains	31
2.1.1. Données disponibles	31
2.1.2. Options de MARTHE	31
2.1.3. Application au cas traité	35
2.2. Estimation de la recharge	35
2.2.1. Données du modèle LIFE	35
2.2.2. Options de MARTHE	37
2.2.3. Préalages avec le code GARDENIA	40
2.2.4. Données de MARTHE	43
2.3. Relation hauteur/débit dans les cours d'eau	47
2.3.1. Options de MARTHE	47
2.3.2. Données de MARTHE	47

3. Calage de l'hydrodynamique en 2D	51
3.1. Calage en régime permanent	51
3.1.1. Objectifs	51
3.1.2. Données, hypothèses et méthode.....	51
3.1.3. Résultats	53
3.2. Calage en régime transitoire	56
3.2.1. Objectifs	56
3.2.2. Données, hypothèses et méthode.....	56
3.2.3. Résultats	58
3.3. Aptitude du modèle 2D à représenter les langues	66
3.3.1. Trajectoires.....	66
3.3.2. Vitesses.....	68
3.4. Conclusion sur les résultats du modèle 2D.....	68
4. Construction d'un modèle conceptuel multicouche	69
4.1. Etat des connaissances géologiques sur les alluvions rhénanes	69
4.2. Subdivisions adoptées	71
4.3. Méthode de travail	72
4.3.1. Codification	72
4.3.2. Coupes sériées	73
4.3.3. Calcul de perméabilités	73
4.3.4. Reports cartographiques	73
4.4. Résultats	74
4.4.1. Cartographie des alluvions supérieures.....	74
4.4.2. Cartographie des alluvions moyennes.....	75
4.4.3. Cartographie des alluvions inférieures.....	75
4.5. Maillage.....	79

5. Construction et calage du modèle numérique multicouche.....	81
5.1. Construction du modèle numérique.....	81
5.1.1. Nouvelles données.....	81
5.1.2. Construction d'un modèle robuste	85
5.2. Calage en régime permanent	86
5.2.1. Hypothèses et méthode.....	86
5.2.2. Résultats	86
5.3. Aptitude du modèle multicouche à représenter les langues	91
5.3.1. Trajectoires	91
5.3.2. Vitesses.....	91
5.4. Conclusion sur les résultats du modèle multicouche.....	91
6. Contexte et données de la salure	95
6.1. Contexte et sources de la contamination	95
6.1.1. Origine de la salure.....	95
6.1.2. Evolution des sources de salure.....	99
6.1.3. Historique des études réalisées.....	99
6.2. Données de la salure	101
6.2.1. Rapports de synthèse annuels.....	101
6.2.2. Piézomètres de contrôle de la salure	105
6.2.3. Puits de fixation et de dépollution.....	106
6.2.4. Terrils et infiltration de la salure	107
6.2.5. Cartes de distribution de la salure	108
7. Traitement des données pour la modélisation des transferts de la salure.....	117
7.1. Objectifs de la modélisation	117
7.2. Méthodes, hypothèses et contraintes	118
7.2.1. Discrétisation du domaine	118
7.2.2. Taille des mailles.....	118
7.2.3. Régime transitoire et pas de temps.....	119
7.2.4. Hypothèses principales retenues.....	119

7.3. Données pour la modélisation	120
7.3.1. Unités et conversions.....	120
7.3.2. Distribution de la salure initiale en 1975.....	120
7.3.3. Contraintes sur la salure des rivières	121
7.3.4. Conditions aux limites extérieures du domaine.....	123
7.3.5. Infiltrations dues aux terrils.....	124
7.3.6. Paramètres du milieu et du fluide.....	124
7.3.7. Choix du potentiel hydraulique	125
8. Résultats de la modélisation des transferts	127
8.1. Cartes de la salure.....	127
8.1.1. Cartes du réseau élargi.....	127
8.1.2. Cartes du Bassin Potassique	128
8.1.3. Principales incertitudes.....	133
8.2. Historiques aux piézomètres de contrôle.....	133
8.2.1. Puits Neuland Colmar	135
8.2.2. Piézomètre Nord-Dynamitière.....	135
8.2.3. Piézomètre triple Nonnenbruch.....	135
8.3. Puits de fixation.....	138
8.3.1. Puits de fixation Joseph Else-Ouest	138
8.3.2. Puits de fixation Rodolphe	139
8.3.3. Puits de fixation Amélie-Est.....	139
8.4. Trajectoires et temps de transfert.....	141
8.5. Incidence des phénomènes densitaires	143
8.5.1. Rappel de la phénoménologie générale.....	143
8.5.2. Application au domaine étudié.....	144
8.6. Incidence de la discrétisation.....	146
Conclusion	149
Bibliographie.....	153

Liste des figures

Fig. 1 -	Localisation de la zone d'étude	18
Fig. 2 -	Localisation des langues salées dans le Bassin Potassique d'Alsace.....	20
Fig. 3 -	Cours d'eau et stations de jaugeage	22
Fig. 4 -	Zones hydrologiques et stations météo.....	24
Fig. 5a -	Piézométrie en moyennes eaux observée et calculée (données APRONA).....	28
Fig. 5b -	Piézométrie en basses eaux observée et calculée (données APRONA).....	29
Fig. 6 -	Localisation des drains du modèle (données APRONA)	32
Fig. 7 -	Piézométries calculées APRONA et MARTHE en moyennes eaux (sans prise en compte des drains par MARTHE).....	33
Fig. 8 -	Piézométries calculées APRONA et MARTHE en moyennes eaux (avec prise en compte des drains par MARTHE)	36
Fig. 9a -	Carte de la recharge en moyennes eaux (données APRONA)	38
Fig. 9b -	Carte de la recharge en basses eaux (données APRONA)	39
Fig. 10 -	Schéma de fonctionnement du modèle GARDENIA	41
Fig. 11a -	Calage GARDENIA : essai 1	43
Fig. 11b -	Calage GARDENIA : essai 2	44
Fig. 11c -	Calage GARDENIA – essai 4.....	44
Fig. 12 -	Discrétisation du réseau hydrographique.....	46
Fig. 13 -	Prélèvements et conditions aux limites en 1986.....	52
Fig. 14 -	Perméabilités - 2D - Calage en régime permanent	54
Fig. 15 -	Piézométrie - 2D - Moyennes eaux du 20 octobre 1986	55
Fig. 16 -	Localisation des piézomètres.....	57
Fig. 17 -	Piézomètres est	59
Fig. 18 -	Piézomètres ouest	60
Fig. 19 -	Estimation des débits dans les canaux	63
Fig. 20a -	Débit de la Thur à Staffelfelden, observé simulé	64
Fig. 20b -	Débit de l'Ill à Ensisheim.....	64
Fig. 20c -	Débit de l'Ill à Oberhergheim	65
Fig. 20d -	Débit de l'Ill à Colmar	65
Fig. 21 -	Trajectoires à partir des terrils – 2D	67

Fig. 22 -	Schéma de principe des subdivisions adoptées	72
Fig. 23a -	Alluvions supérieures - Carte des perméabilités estimées.....	76
Fig. 23b -	Alluvions moyennes - Carte des perméabilités estimées.....	77
Fig. 23c -	Alluvions inférieures - Carte des perméabilités estimées.....	78
Fig. 24a -	Epaisseurs des alluvions supérieures	82
Fig. 24b -	Epaisseurs des alluvions moyennes plus intercalaires argileux.....	83
Fig. 24c -	Epaisseurs des alluvions inférieures	84
Fig. 25a -	Modèle multicouche - Perméabilités de la couche 1 (après calage).....	87
Fig. 25b -	Modèle multicouche - Perméabilités de la couche 2 (après calage).....	88
Fig. 25c -	Modèle multicouche - Perméabilités de la couche 3 (après calage).....	89
Fig. 26 -	Modèle multicouche - ME (oct. 86) - Piézométries observée (rouge) et calculée (vert) dans la couche 1	90
Fig. 27 -	Modèle multicouche - Trajectoires à partir des terrils.....	92
Fig. 28 -	Secteur du Bassin Potassique - Localisation des terrils, origine des langues salées et salure moyenne de la nappe phréatique en 1975.....	97
Fig. 29 -	Localisation des points de contrôle sélectionnés pour le suivi de la salure (17 piézomètres et 4 forages de la ville de Colmar)	104
Fig. 30 -	Carte de la salure moyenne observée en 1975 (mg Cl/l).....	111
Fig. 31 -	Carte de la salure moyenne observée en 1980 (mg Cl/l).....	112
Fig. 32 -	Carte de la salure moyenne observée en 1985 (mg Cl/l).....	113
Fig. 33 -	Carte de la salure moyenne observée en 1990 (mg Cl/l).....	114
Fig. 34 -	Carte de la salure moyenne observée en 1995 (mg Cl/l).....	115
Fig. 35 -	Situation initiale pour la modélisation en 1975 : couche supérieure et inférieure (fichier-semis)	122
Fig. 36 -	Carte de la salure simulée en 1980 : couche supérieure et inférieure.....	129
Fig. 37 -	Carte de la salure simulée en 1985 : couche supérieure et inférieure.....	130
Fig. 38 -	Carte de la salure simulée en 1990 : couche supérieure et inférieure.....	131
Fig. 39 -	Carte de la salure simulée en 1995 : couche supérieure et inférieure.....	132
Fig. 40 -	Comparaison des historiques mesurés et simulés aux puits de Neuland Colmar	134
Fig. 41 -	Comparaison des historiques mesurés et simulés au piézomètre 266	136
Fig. 42 -	Comparaison des historiques mesurés et simulés au piézomètre 294	137
Fig. 43 -	Comparaison des concentrations mesurées et simulées au puits de fixation Joseph Else-Ouest	138
Fig. 44 -	Concentrations mesurées et simulées au puits de fixation Rodolphe	139

Fig. 45 -	Concentrations mesurées et simulées au puits de fixation Amélie-Est	140
Fig. 46 -	Distribution des trajectoires de particules issues des mailles-tertils dans la couche inférieure (simulation avec prise en compte des effets de densité).....	142
Fig. 47 -	Incidence de la discrétisation – Historique de la concentration simulée et mesurée dans trois forages de la même maille du modèle (27,61)	147

Liste des tableaux

Tabl. 1 -	Zones hydrologiques.....	23
Tabl. 2 -	Précipitations	25
Tabl. 3 -	Débits aux stations de jaugeage.....	26
Tabl. 4 -	Essais GARDENIA effectués.....	42
Tabl. 5 -	Résultats des calages GARDENIA.....	42
Tabl. 6 -	Estimation de la pluie par zones en régime permanent	45
Tabl. 7 -	Pluie mensuelle observée de juillet à octobre 1986.....	48
Tabl. 8 -	Débits journaliers mesurés autour du 20 octobre 1986	48
Tabl. 9 -	Débits moyens mensuels de juillet à octobre 1986.....	49
Tabl. 10 -	Estimation des rugosités	50
Tabl. 11 -	Bilan en eau en régime permanent - ME du 20 octobre 1986	53
Tabl. 12 -	Estimation des débits mensuels délivrés par le réseau de canaux	
Tabl. 13 -	Caractéristiques d'édification et tonnage restant sur les différents tertils au 01/01/1997 (d'après rapport BRGM R 39746)	98
Tabl. 14 -	Evolution du nombre de points mesurés pour la caractérisation de la salure de la nappe phréatique (d'après rapports de synthèse annuels, SGR Alsace)	103
Tabl. 15 -	Liste et références des points de contrôle sélectionnés	105
Tabl. 16 -	Volume annuel produit par les puits de fixation ou de dépollution réalisés à partir de 1975 (en milliers de m ³)	106
Tabl. 17 -	Teneur annuelle en chlorure mesurée dans les puits de fixation ou de dépollution réalisés à partir de 1975 (en g/l de Cl ⁻).....	107
Tabl. 18 -	Flux massique d'infiltration sous les tertils (t de Cl ⁻ /an).....	110
Tabl. 19 -	Estimation de l'évolution de la salure des rivières (mg Cl ⁻ /l) et valeurs constantes retenues pour la simulation.....	123
Tabl. 20 -	Incidence des effets densitaires sur l'azimut et l'amplitude de la vitesse (application aux mailles-tertils).....	145

Liste des annexes

Ann. 1 - Précipitations et évapotranspirations aux stations météo.....	157
Ann. 2 - Débits mensuels aux stations de jaugeage.....	161
Ann. 3 - Couplage nappe-rivière dans le modèle MARTHE et couplage nappe-drains. Bilan pluie-ETP-ruissellement (version décembre 1998) D. Thiéry.....	167
Ann. 4 - Profils en long des cours d'eau	177
Ann. 5 - Variations piézométriques	185
Ann. 6 - Historique des concentrations mesurées dans les piézomètres et les puits.	195

Introduction

La nappe d'Alsace a été sélectionnée pour ce projet de développement parmi d'autres systèmes aquifères importants tels que la Beauce, la Craie du Nord ou la Crau. Elle présente en effet un certain nombre de particularités intéressantes, notamment :

- la diversité des phénomènes à prendre en compte dans la modélisation (échanges nappe/réseau de surface, mise en place au cours des années de puits de dépollution, conséquences sur l'évolution des panaches de pollution par les saumures issues des terrils du Bassin Potassique) ;
- la disponibilité de données nombreuses et publiques, notamment les données sur la nappe collectées en 1993-1996 pour le projet européen LIFE de modélisation de l'aquifère rhénan, et les historiques de piézométrie et de salure suivis depuis plus de 20 ans par le Service Géologique Régional ;
- l'intérêt de l'Administration dans la perspective de la fermeture des exploitations de potasse en 2004 ;
- le contexte international (possibilité de raccorder ultérieurement au modèle la partie allemande de l'aquifère).

Trois atouts de MARTHE (cf. Thiéry, 1998a et b), indispensables à la réalisation de cette étude, ont été mis en valeur dans le cadre du projet :

- le bilan hydroclimatique intégré permettant une évaluation réaliste de la recharge de la nappe et du ruissellement vers les cours d'eau à condition de disposer des données nécessaires sur les bassins versants concernés (pluie, ensoleillement, température) ;
- le traitement des interactions nappe/réseau de surface prenant en compte une relation hauteur d'eau/débit dans les rivières (donc plus représentatif de la réalité que ce qui avait été fait avec MODFLOW dans le cadre du contrat LIFE où les cotes des rivières étaient imposées et leurs débits non simulés ni contrôlés) ;
- le transport densitaire pour tenir des concentrations très élevées dans la nappe au voisinage des terrils (jusqu'à 50 g/l de NaCl dans l'eau extraite des puits de fixation).

Ce rapport de fin de projet fait suite au rapport d'avancement n° 1 (Martin, Elsass, Noyer, 1997) qui rendait compte des premières phases de réalisation du projet c'est-à-dire :

- récupération des données du modèle LIFE gérées par l'APRONA ;
- comparaison des résultats fournis par MARTHE à partir de ces données, à ceux obtenus avec MODFLOW dans le cadre du projet LIFE ;
- définition du modèle conceptuel multicouche à partir de la géologie, et des informations issues des pompages d'essai.

Les phases du projet sont décrites dans le présent rapport en huit chapitres, et résumées brièvement ci-après.

Le chapitre 1 rappelle le contexte hydrogéologique, rend compte des tâches de recueil, analyse, critique des données complémentaires nécessaires à l'étude.

Le chapitre 2 décrit l'utilisation de ces données pour prendre en compte les drains, évaluer plus précisément la recharge à la nappe, estimer les paramètres permettant de définir une relation hauteur/débit dans les cours d'eau.

Le chapitre 3 décrit les résultats du calage de l'hydrodynamique dans le cas du premier modèle monocouche 2D (issu de l'étude LIFE) soit :

- un recalage du modèle 2D en régime permanent sur la situation de moyennes eaux d'octobre 1986, en prenant en compte le réseau de drains, la nouvelle recharge ainsi que une relation hauteur-débit de type Manning-Strickler dans les rivières ;
- un calage en régime transitoire, au pas de temps mensuel, sur 5 ans (1986-1991) incluant les trois situations observées de Moyennes Eaux, Hautes Eaux et Basses Eaux ; on montre que le calage du modèle monocouche permet de bien restituer globalement les écoulements dans la nappe et dans le réseau hydrographique, les écarts éventuels entre valeurs observées et simulées pouvant être clairement expliqués par la non prise en compte dans le modèle de certaines données manquantes ; cependant, le champ de vitesses modélisé ne permet pas de rendre compte de façon adéquate de la direction et de l'évolution des langues salées ; pour la modélisation du transport de salure, il a donc été nécessaire de prendre en compte la stratification des alluvions quaternaires en trois couches aquifères de perméabilités et d'épaisseurs différentes.

Le chapitre 4 décrit la construction du modèle multicouche à trois couches aquifères à partir des coupes sériées de forages et des résultats des pompages d'essai.

Le chapitre 5 rend compte de la méthode utilisée pour le calage hydrodynamique du modèle multicouche et des résultats obtenus en particulier une meilleure représentation du champ de vitesses, en direction et en ordre de grandeur.

Le chapitre 6 présente tout d'abord schématiquement le contexte de la salure en rappelant la nature des sources, les diverses actions mises en oeuvre pour en limiter les effets, ainsi que les processus ayant contribué à la migration du sel au sein de l'aquifère. La seconde partie présente les données disponibles décrivant les phénomènes observés et exploitables pour la préparation de la modélisation des transferts.

Le chapitre 7 s'inscrit en complément du précédent, décrivant les données disponibles relatives à la salure. Sur la base des contraintes caractérisant ce contexte, il présente les objectifs de l'approche numérique, les hypothèses envisagées et le traitement des données retenues pour la modélisation.

Le chapitre 8 présente les principaux résultats issus de la simulation des transferts. La présentation est focalisée sur les différents centres d'intérêt : cartes des concentrations en chlorures, historiques des piézomètres de contrôle de la salure, puits de fixation, temps de transfert et trajectoires des particules du fluide. Les calculs de simulation ont été réalisés selon deux hypothèses (densitaire et isodensitaire) afin de quantifier les effets spécifiques éventuels ou d'évaluer l'erreur associée à leur simplification. L'examen de l'incidence de la discrétisation géométrique permet enfin de relier les contraintes associées, aux principaux écarts entre les résultats de simulation et les données expérimentales.

1. Contexte de l'étude et données recueillies

1.1. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

La zone modélisée couvre le secteur de la nappe d'Alsace allant de Mulhouse en amont, à Colmar en aval et des coteaux vosgiens à l'ouest au Rhin, pris en compte dans la modélisation, à l'est (fig. 1). Ce secteur correspond à la zone 4 du modèle transfrontalier LIFE, dont le maillage (mailles carrées de 500 m de côté) a été conservé pour la discrétisation dans le plan horizontal. Les trois situations hydrologiques sur lesquelles avait été calé le modèle LIFE ont également été reprises : moyennes eaux (ME) du 20 octobre 1986, hautes eaux (HE) du 11 avril 1988, et basses eaux (BE) du 9 septembre 1991.

L'ensemble du secteur fait partie du domaine géologique de la plaine du Rhin où affleurent les alluvions quaternaires qui reposent sur un substratum marneux d'âge oligocène. Les alluvions sont constituées d'un mélange de sables, galets et graviers pouvant être entrecoupés de niveaux argileux d'extension et d'épaisseur variables.

Le secteur se subdivise en deux parties d'importance hydrogéologique inégale :

- à l'est de l'Ill, l'épaisseur de l'aquifère augmente régulièrement du sud vers le nord et passe d'une vingtaine de mètres au nord de Mulhouse à plus de 200 m à hauteur de Neuf-Brisach, avec une remontée du substratum le long de l'Ill, au nord d'Ensisheim, liée à des phénomènes de diapirisme, marqués par la crête de Meyenheim et le dôme de Hettenschlag ;
- à l'ouest de l'Ill, la puissance des sédiments aquifères, de 80 m environ en bordure de l'Ill, diminue régulièrement en direction des Vosges ; elle est comprise entre 20 et 30 m dans le secteur du Bassin Potassique (BP) au nord-ouest de Mulhouse, qui se caractérise par un relief tourmenté du substratum tertiaire entaillé par une succession de dépressions bordées de crêtes.

Globalement, la perméabilité des alluvions diminue d'est en ouest, ses valeurs se situant entre 2.10^{-3} m/s en bordure du Rhin et 10^{-4} m/s à proximité des Vosges.

Le réseau hydrographique, complexe, comprend le Rhin, doublé par le grand canal d'Alsace, pratiquement déconnecté de la nappe, la Fecht, l'Ill et ses affluents la Lauch, la Thur, la Vieille-Thur et la Doller, les canaux (Vauban, Windensolen, Hardt, Rhône au Rhin, Huningue) ainsi qu'un réseau de drains très superficiels.

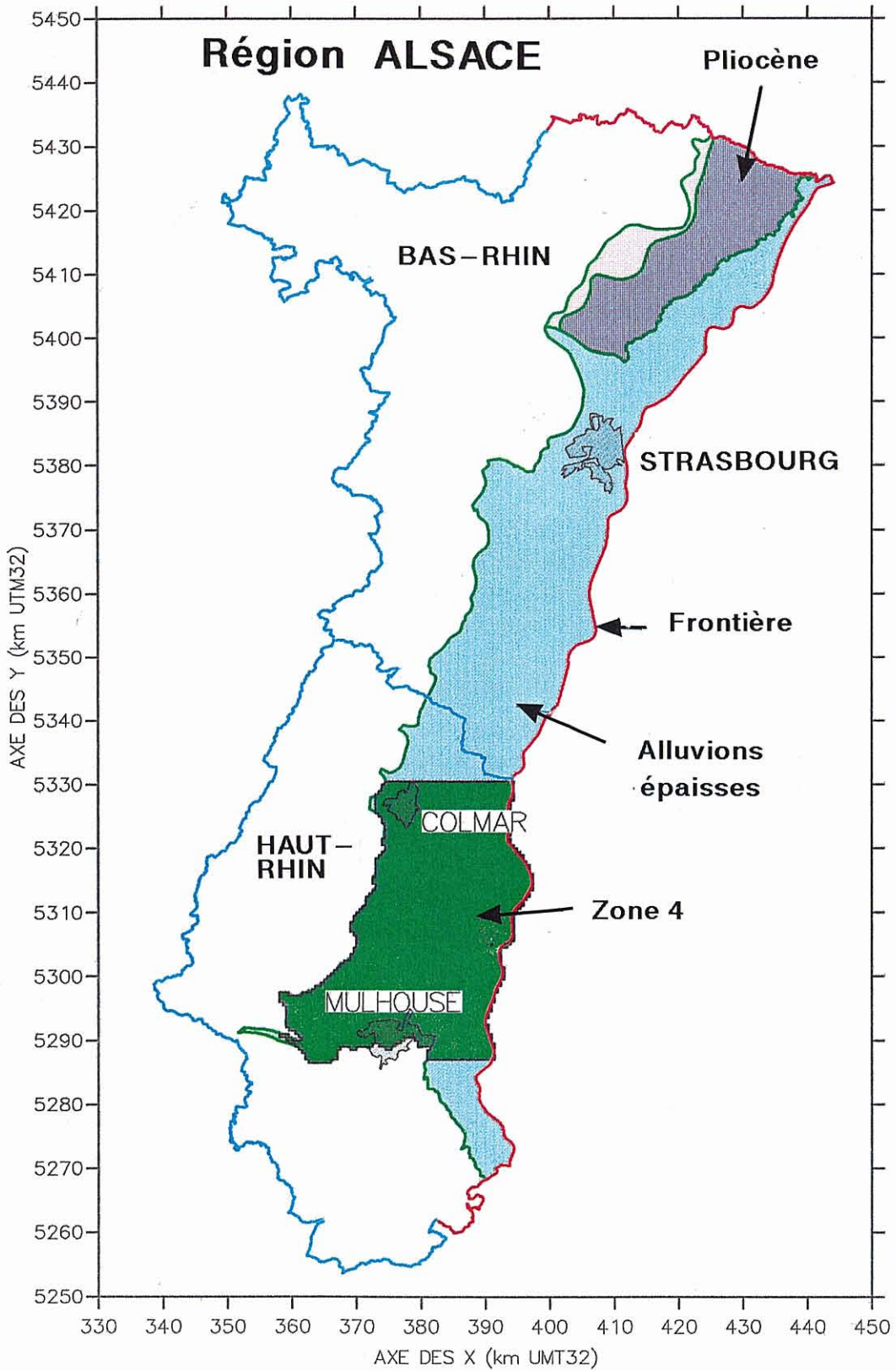


Fig. 1 – Localisation de la zone d'étude.

La potasse est exploitée depuis le début du siècle dans le Bassin Potassique (BP) situé dans la partie sud-ouest de la zone d'étude (fig. 2) ; les sous-produits d'exploitation sont constitués par des stériles et du chlorure de sodium, déposés en terrils sur les alluvions perméables ou rejetés en rivières (Thur et Vieille-Thur) jusqu'en 1975 ; à partir de cette date, un saumoduc a été mis en place pour évacuer le sel vers le Rhin à hauteur de Fessenheim (ligne rouge sur la figure 2).

La pollution provoquée par la dissolution du sel des terrils par la pluie se traduit par deux langues salées distinctes dont la configuration est la suivante depuis le début des années 1990 : la langue Est (issue principalement des terrils Joseph Else, Amélie, Anna, Fernand) est d'abord orientée ouest-est puis présente une variation d'azimut rapide vers le nord - nord-est, parallèle à la langue Ouest issue des terrils Marie-Louise, Alex et Rodolphe (fig. 2).

Les apports à la nappe sont constitués par la recharge, des infiltrations à partir du réseau hydrographique et des flux venant des coteaux situés aux limites sud et ouest du modèle. Les exhaures correspondent aux pompages AEP, AEI et pour la zone du BP aux prélèvements des puits de fixation/dépollution implantés au voisinage des terrils. On en connaît les variations annuelles.

1.2. ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNÉES

Cette phase a été plus longue et plus lourde que prévue. Elle a consisté d'une part en la récupération des données et résultats préexistants (données de l'étude LIFE), d'autre part en l'acquisition des nouvelles données par l'intermédiaire de SGR/ALS, ANTEA/ALS, ANTEA/DPD et de la DIREN/SEMA d'Alsace.

1.2.1. Données préexistantes

Pour l'étude du projet transfrontalier LIFE, l'ensemble de la plaine du Rhin a été découpé en cinq zones comprenant chacune un secteur allemand et un secteur français, face à face. La modélisation a été menée en 2D, secteur par secteur, selon les trois étapes suivantes :

- calage du champ de perméabilité de l'aquifère, en régime permanent, sur la situation de basses eaux (BE) de septembre 1991 ;
- calage des coefficients d'échange des cours d'eau en régime permanent à partir des trois situations suivantes : basses eaux (BE) de septembre 1991, moyennes eaux (ME) d'octobre 1986, hautes eaux (HE) d'avril 1988 ;
- couplage des modèles français et allemands.

La région du Bassin Potassique, qui fait l'objet du présent projet, correspond au secteur français de la zone 4 du projet LIFE. Sur ce secteur, le calage BE, pour l'étude LIFE, a

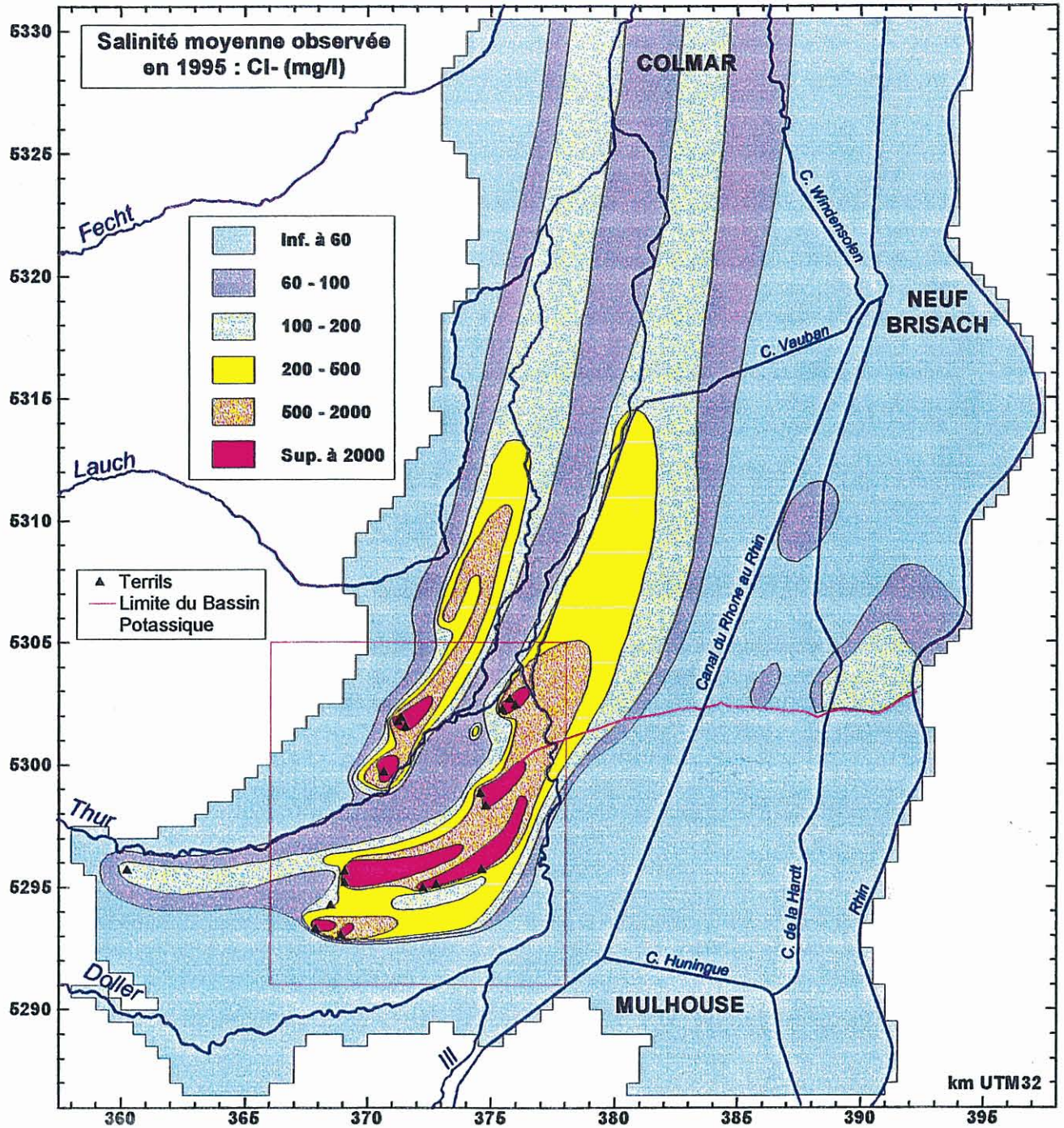


Fig. 2 - Localisation des langues salées dans le Bassin Potassique d'Alsace.

été effectué par ANTEA et le BRGM, les fichiers ont été récupérés par le gestionnaire du modèle LIFE, l'Association pour la Protection de la Nappe d'Alsace (APRONA) et transmis au BURGEAP avec complément de données en particulier sur le réseau hydrographique, pour calage en ME et HE. L'APRONA a ensuite récupéré l'ensemble des données et résultats des calages.

Dans le cadre du projet actuel, une convention passée avec l'APRONA a permis d'avoir accès aux nouveaux fichiers à partir desquels il était intéressant de commencer notre étude.

Dans le cadre de cette convention, l'APRONA nous a fourni les données suivantes :

- les cotes topographiques,
- les cotes du substratum,
- les conditions aux limites du modèle,
- les cotes piézométriques observées en BE, ME, HE sur 89 points de mesure,
- les dimensions des tronçons de cours d'eau par maille de 500 m de côté,
- les altitudes du lit et, pour chacune des trois situations hydrologiques, de la ligne d'eau des cours d'eau,
- un fichier des drains (présents dans 744 mailles du modèle sur 4298), caractérisés par la cote du fond et le coefficient d'échange calculé,
- la recharge estimée pour chacune des trois situations,
- les débits des prélèvements dans le modèle et des alimentations sur ses limites ouest et sud,
- les résultats des calages effectués soit piézométries BE, ME, HE simulées, perméabilités et coefficients d'échange calés.

L'APRONA a aussi fourni la carte à 1/50 000 de la piézométrie observée en situation de ME et un fichier MAPINFO de la piézométrie observée en BE.

L'analyse des données reçues de l'APRONA a été faite dans le rapport d'avancement d'octobre 1997 et ne sera pas reprise ici. En résumé, ces données ont été mises au format SEMIS utilisé par MARTHE, analysées et critiquées puis des simulations ont été effectuées en BE et ME, sans recalage, pour comparer les résultats fournis par MARTHE à ceux des modélisations LIFE, effectuées avec MODFLOW.

1.2.2. Nouvelles données pour l'hydrodynamique

Au cours de la phase de comparaison entre les résultats de MARTHE et ceux de MODFLOW dans les mêmes conditions de simulation (cf. § 3 du rapport d'avancement), on a constaté que les hypothèses retenues pour l'étude LIFE n'étaient pas optimales :

- recharge peu réaliste (surtout en BE) ;

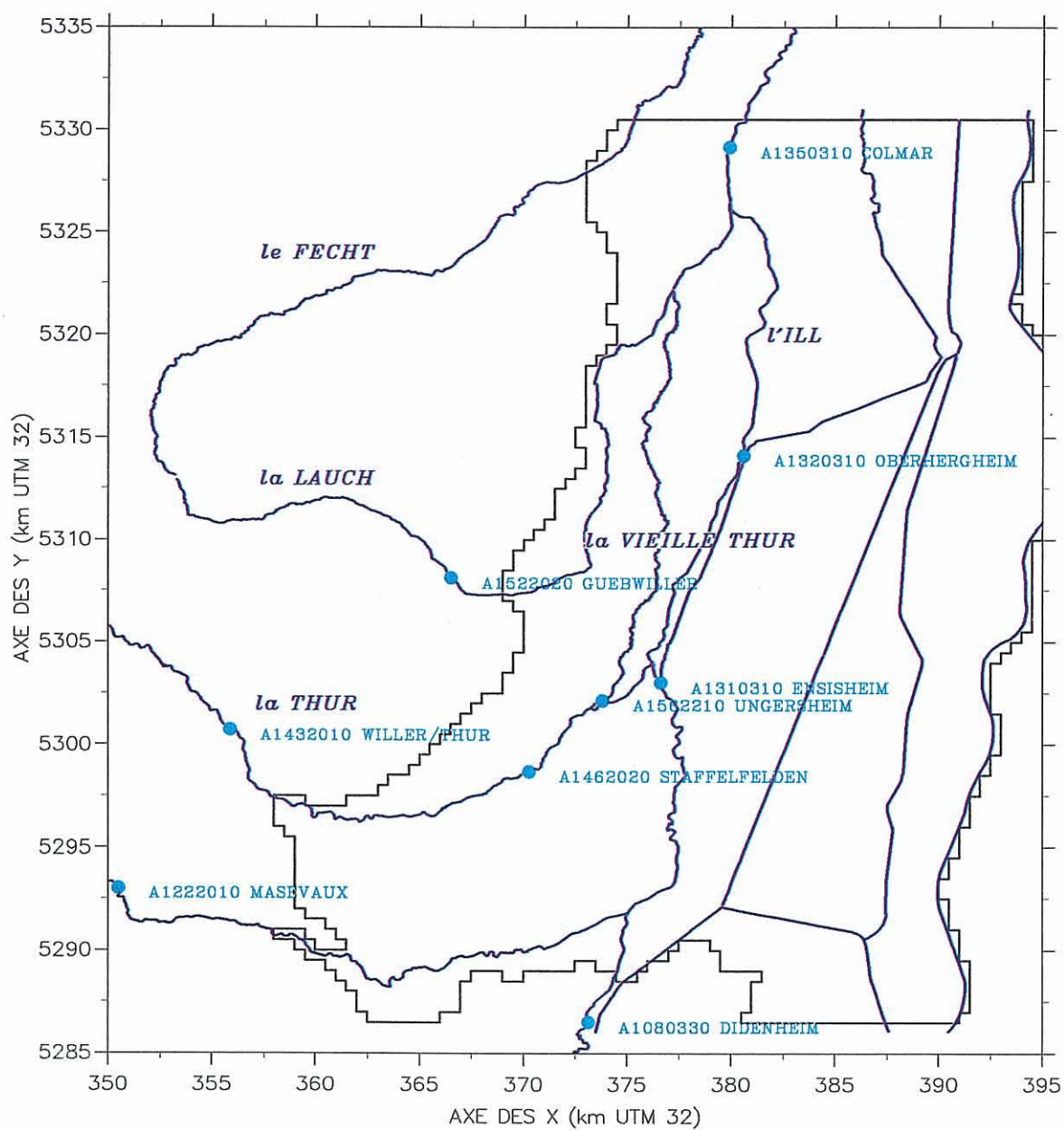


Fig. 3 - Cours d'eau et stations de jaugeage.

- interactions nappe/réseau de surface modélisées avec des cotes de rivières imposées, sans simulation ni contrôle des débits.

On a donc décidé de tenter de faire mieux en utilisant complètement les nouvelles options de MARTHE (cf. Introduction).

Pour ce faire, il a été nécessaire d'acquérir des données complémentaires ; celles que nous avons réussi à obtenir sont les suivantes :

- des données hydro-climatiques : température, durée d'insolation, précipitations en quatre stations météo de 1960 à 1990 environ, au pas de temps mensuel (disponibles au SGR Alsace) ;
- des historiques de débits dans les rivières sur les 20 dernières années, au pas de temps journalier, sur neuf stations de jaugeage (banque HYDRO) ;
- les débits moyens mensuels du Rhin de janvier 1975 à mars 1998 à la station de Kembs et des informations sur les canaux, fournis par le Service de la Navigation de Strasbourg et la DDA ;
- les historiques de charge sur une vingtaine de piézomètres, obtenus par extraction de la Banque de Données du Sous-sol (BSS) ou auprès de l'APRONA ;
- le fichier des prélèvements annuels depuis 1975 comportant les AEP, AEI et les débits aux puits de fixation du BP, fournis par les MDPA (suite à la découverte que les données de l'étude LIFE étaient incomplètes, voire erronées dans la zone du Bassin Potassique).

Un substratum "révisé" dans la zone du Bassin Potassique et le long de la frontière (en concertation avec les allemands du GLA, Service géologique du Bade-Wurtemberg) a aussi été fourni ; globalement, il diffère peu du substratum APRONA.

La figure 3 présente la localisation des stations de jaugeage sur lesquelles on a obtenu les données.

Par ailleurs, on a obtenu une carte des hauteurs de précipitations annuelles du bassin Rhin-Meuse (AERM, 1995). Pour le calcul de la recharge (cf. § 2.2.), on a défini six zones hydroclimatiques à l'aide de cette carte et des données météorologiques sur les stations. Ces zones sont représentées sur la figure 4 et les valeurs correspondantes sont indiquées au tableau 1.

Numéro de zone	Pluviométrie moyenne annuelle (mm)
1	< 500
2	500 à 600
3	600 à 700
4	700 à 800
5	800 à 900
6	900 à 1000

Tabl. 1 - Zones hydrologiques.

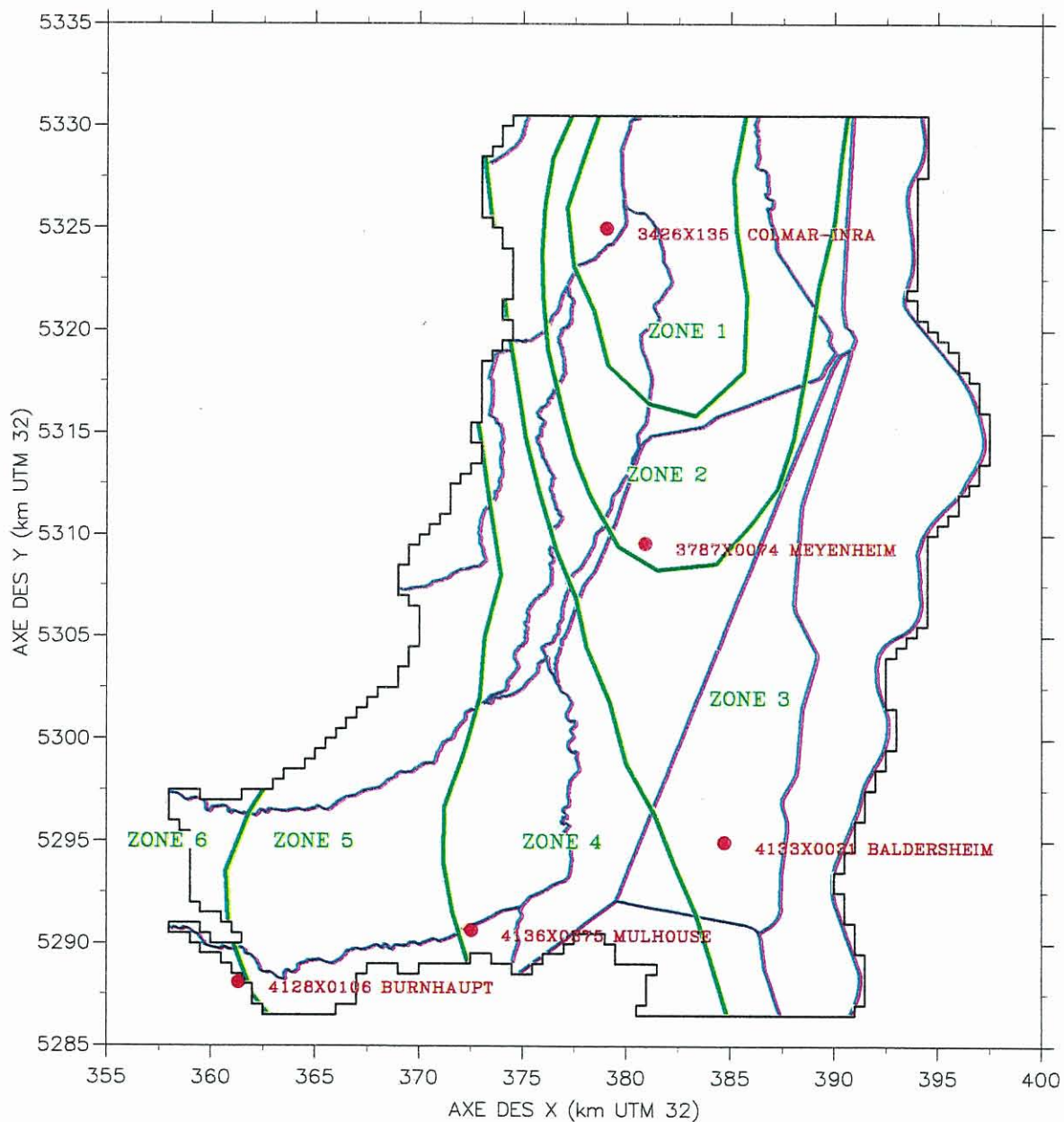


Fig. 4 - Zones hydrologiques et stations météo.

1.2.3. Données de salure

On a obtenu :

- des historiques de concentration en chlorure sur une quinzaine d'ouvrages (BSS) ;
- diverses informations sur les flux massiques annuels de chlorure infiltrés dans la nappe à partir de chaque terril, les tonnages mis en place depuis l'origine, les débits et teneurs aux puits industriels en 1986 ainsi que les débits moyens en 1996, des données de concentration aux puits de fixation en 1995 (source MDPa via ANTEA) ;
- les rapports de suivi de la salure établis depuis 20 ans par le BRGM et contenant en particulier des cartes de teneur observée, dessinées manuellement, que l'on a dû digitaliser.

Ces données seront analysées au chapitre 6 en lien avec la simulation du transport de salure.

1.3. ANALYSE DES DONNEES POUR L'HYDRODYNAMIQUE

On examine ici les données utilisées pour le recalage en régime permanent et en 2D sur la situation de ME du 20 octobre 1986. Les données complémentaires nécessaires aux simulations en régime transitoire, en particulier les historiques de piézométrie seront analysés au § 2.3.

1.3.1. Données hydroclimatiques

On a obtenu de longues séries de précipitations, de température et de durée d'insolation sur les stations de Burnhaupt, Mulhouse, Baldersheim et Meyenheim et seulement des informations listing sur celle de Colmar-Inra (fig. 4).

a) Précipitations

On trouvera en annexe 1 les données brutes sur chaque poste. Une première analyse de ces données donne les résultats présentés au tableau 2 qui, à part pour la station de Colmar-Inra, sont en accord avec le tableau 1.

Poste	No de zone	Série complète	Durée (années)	Année moyenne (mm)	Ecart-type (mm)
Burnhaupt	5/6	1978 à 1991	14	1045	168
Mulhouse	4/5	1964 à 1992	29	759	133
Baldersheim	3	1960 à 1991	32	703	119
Meyenheim	2/3	1962 à 1993	32	573	95
Colmar-Inra	1	1972 à 1991	20	590	-

Tabl. 2 – Précipitations.

b) Evapotranspirations

On calcule les évapotranspirations potentielles (ETP) à l'aide de la formule de Turc au pas de temps mensuel (logiciel ETPTURC du BRGM), à partir de la latitude de la station et de séries complètes de durée d'insolation et de température de l'air. Les résultats pour les postes de Mulhouse et Meyenheim sont présentés en annexe 1.

Les valeurs d'ETP à Burnhaupt et Baldersheim sont très proches de celles calculées respectivement à Mulhouse et à Meyenheim et assez proches entre elles : les valeurs d'ETP varient peu sur la zone d'étude.

1.3.2. Débits dans les rivières

On a obtenu, par interrogation de la banque HYDRO, les débits journaliers de 1975 à 1996 aux stations de jaugeage représentées sur la figure 3. Parmi ces stations, quatre sont situées à l'extérieur du domaine étudié ; elles serviront d'indicateur du débit "source" sur chacune des quatre rivières qui traversent la partie ouest de la zone d'étude soit l'Ill, la Doller, la Thur et la Lauch (cf. § 2.3.).

Les données ont été transformées au pas de temps mensuel ; les résultats sont présentés en annexe 2. L'analyse de ces données transformées donne les résultats présentés au tableau 3.

Station	Rivière	B.V. contrôlé (km ²)	Nombre années complètes	Année moyenne (m ³ /s)	Ecart-type (m ³ /s)
Didenheim	Ill	656	14	6.18	1.84
Ensisheim	Ill	1000	17	10.71	4.24
Oberhergheim	Ill	1290	15	14.32	4.89
Colmar	Ill	1760	20	18.73	5.89
Willer/Thur	Thur	159	20	5.44	1.44
Staffelfelden	Thur	259	18	6.41	1.83
Ungersheim	Vieille-Thur	pas de B.V.*	14	0.81	0.26
Guebwiller	Lauch	81.4	15	1.81	0.47
Masevaux	Doller	88.2	21	3.18	0.89

* Pas de Bassin Versant : prise d'eau sur la Thur

Tabl. 3 - Débits aux stations de jaugeage.

1.3.3. Données de prélèvement dans la nappe

Les nouvelles valeurs sont recensées dans deux fichiers EXCEL comportant, en particulier, les coordonnées UTM 32 des ouvrages et les débits moyens annuels prélevés de 1975 à 1997. Le logiciel INGRID du BRGM permet de cumuler les contributions de chaque ouvrage par maille du modèle 2D. Ces débits varient beaucoup d'une année à l'autre en particulier dans la zone du Bassin Potassique du fait de la mise en place progressive de puits de fixation/dépollution.

1.3.4. Cartes piézométriques

Comme indiqué dans le rapport d'avancement, on a digitalisé la carte à 1/50 000 de la piézométrie observée fournie par l'APRONA qui sera considérée comme la piézométrie de référence en moyennes eaux. Cette carte observée diffère assez sensiblement de la piézométrie simulée fournie par l'APRONA (fig. 5a). En basses eaux, on ne dispose pas d'une véritable carte (fichier par maille du modèle) de la piézométrie observée, seulement d'un fichier "habillage" des isovaleurs obtenu par importation des données MAPINFO fournies par l'APRONA. Les isovaleurs observées diffèrent aussi sensiblement de celles calculées par l'APRONA (fig. 5b).

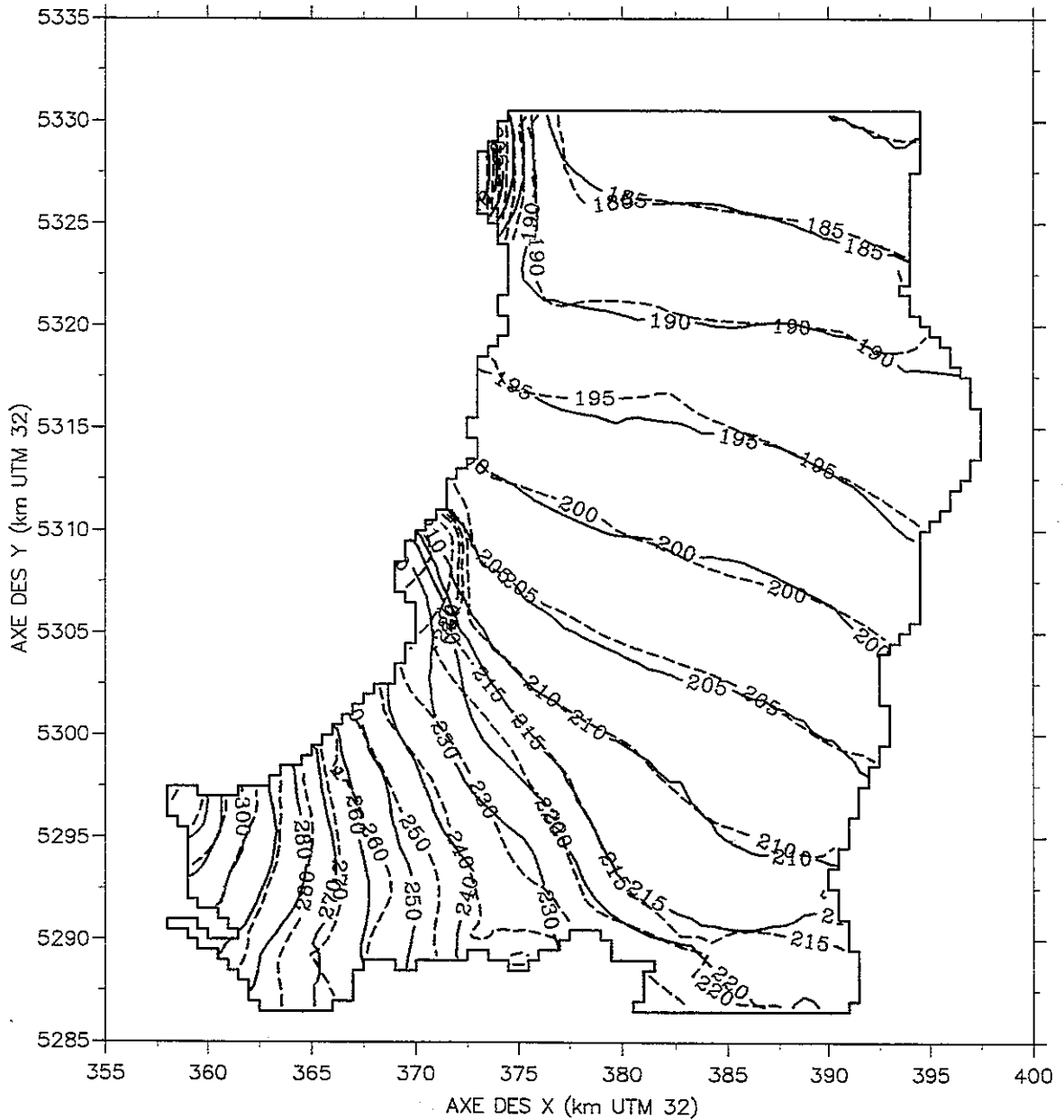
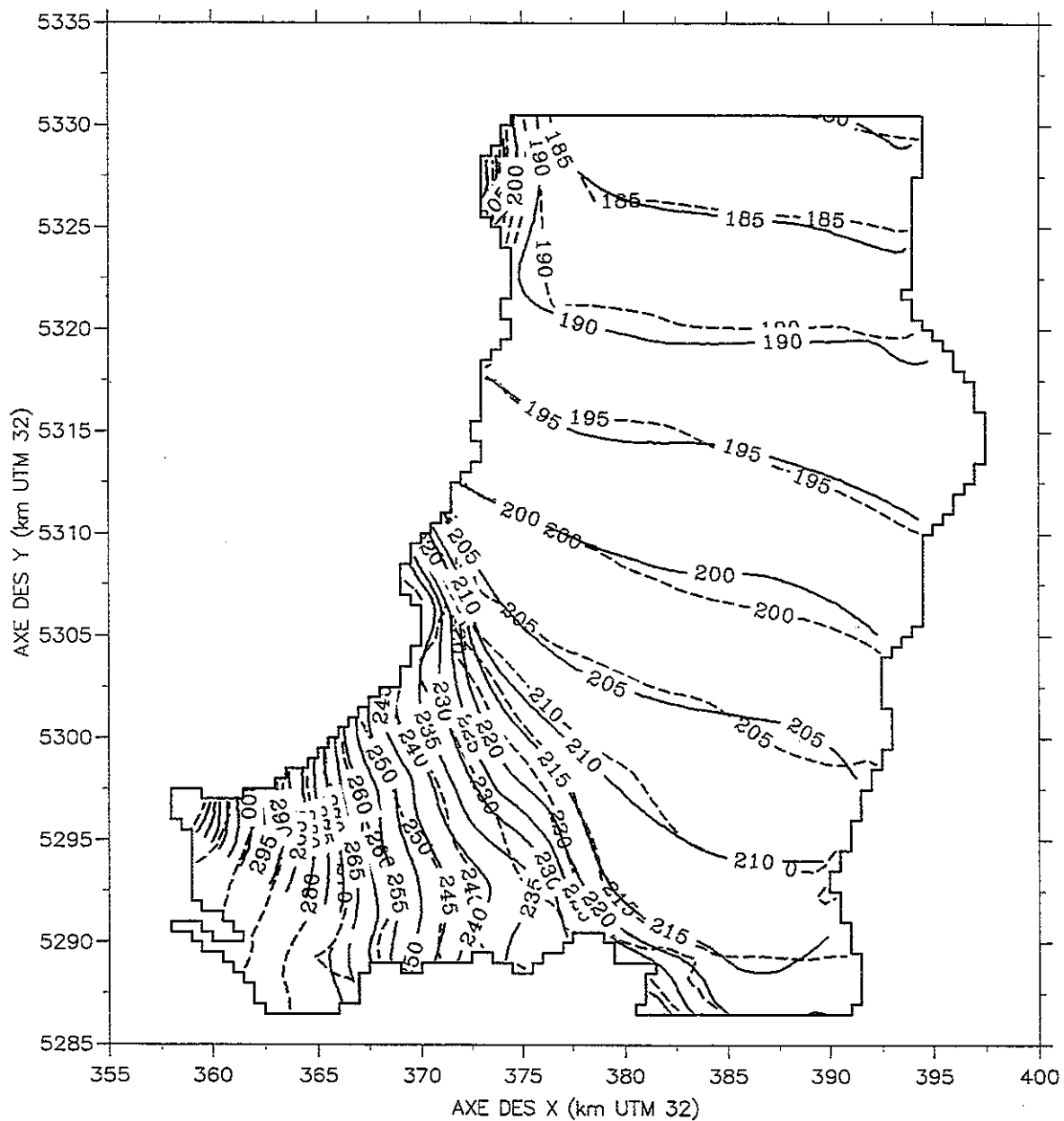


Fig. 5a - Piézométrie en moyennes eaux observée (—) et calculée (- - -) (données APRONA).



**Fig. 5b - Piézométrie en basses eaux observée (—) et calculée (- - -)
(données APRONA).**

2. Options du calcul hydrodynamique

Dans le rapport d'avancement (Martin, Elsass et Noyer, 1997), on a rendu compte des opérations de "validation" consistant à refaire avec le code MARTHE, les simulations du projet LIFE, réalisées avec MODFLOW en ME et en BE, dans les mêmes conditions et avec les mêmes données.

Les premières simulations, décrites dans le rapport d'avancement, ont montré :

- un très bon accord entre les résultats de MARTHE et de MODFLOW en BE, situation où les drains n'interviennent pas ;
- un moins bon accord en ME, explicable par le fait que les drains n'étaient pas encore pris en compte par MARTHE.

Dans ce chapitre, on présente d'abord les résultats obtenus sur les données LIFE après introduction dans MARTHE de la possibilité de prendre en compte un réseau de drains, ensuite la méthode suivie pour le calcul de la recharge puis pour la prise en compte d'une relation hauteur/débit dans les rivières.

2.1. PRISE EN COMPTE DES DRAINS

2.1.1. Données disponibles

Le fichier des drains, fourni par l'APRONA, comporte les seules informations suivantes : présence ou absence de drain dans chaque maille du modèle (fig. 6), cote du fond du drain et coefficient d'échange calé dans le cadre de l'étude LIFE. A la différence de ce qui avait été communiqué concernant le réseau de rivières et canaux, aucune information n'a été fournie sur les dimensions de chaque tronçon de drain (par maille) ni sur leurs éventuelles interconnexions.

2.1.2. Options de MARTHE

La figure 7, extraite du rapport d'avancement, présente les résultats des simulations en ME avec MODFLOW, fournis par l'APRONA (trait continu) et avec MARTHE (trait discontinu), avant introduction dans MARTHE du réseau des drains. On observe un écart assez important et, dans le cas du calcul avec MARTHE, 39 mailles débordent avec un débit représentant 27 % de l'infiltration.

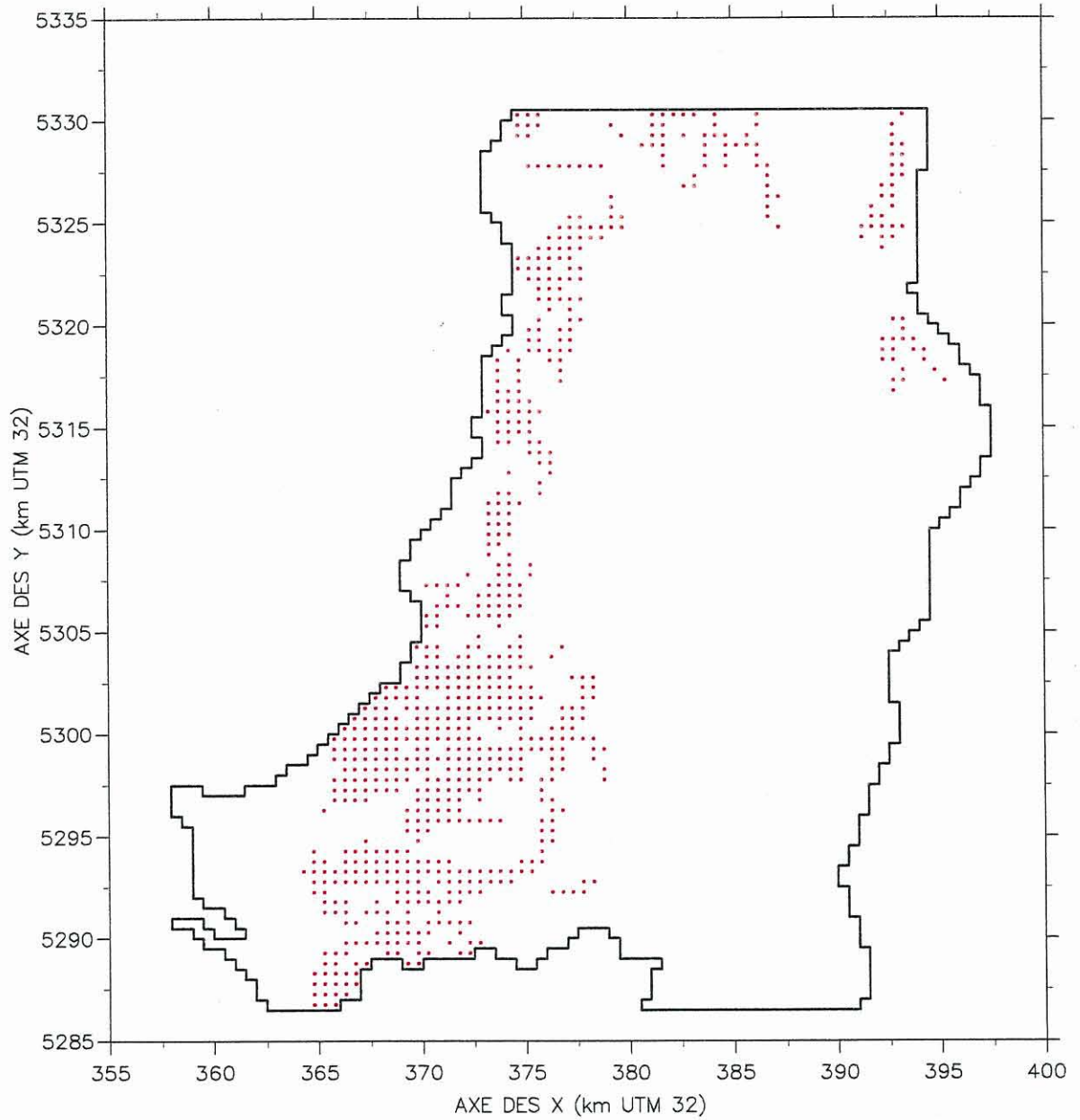


Fig. 6 - Localisation des drains du modèle (données APRONA).

Le logiciel MARTHE permet dorénavant de prendre en compte à la fois un réseau palmé de cours d'eau interconnectés qui interagissent avec la nappe dans les deux sens (infiltration et drainage) et un réseau de drains qui ne peuvent, comme leur nom l'indique, que drainer la nappe. Ces deux réseaux sont indépendants, une maille du modèle peut donc contenir un tronçon de cours d'eau et un tronçon de drains.

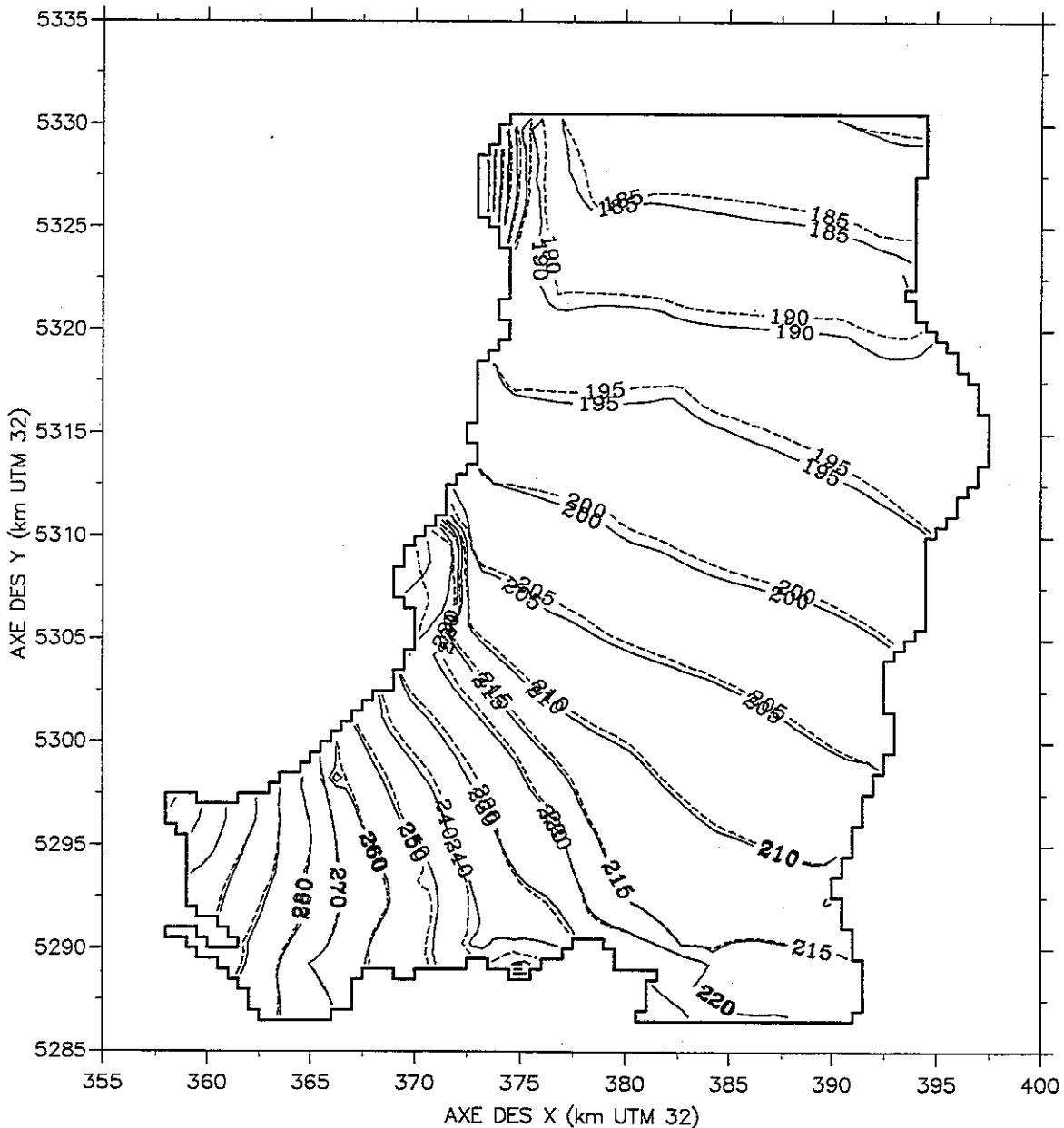


Fig. 7 - Piézométries calculées APRONA (—) et MARTHE (- - -) en moyennes eaux (sans prise en compte des drains par MARTHE).

Les drains peuvent être hiérarchisés en réseau palmé comme les rivières, ou constituer des tronçons indépendants sans relation amont-aval.

Avec MARTHE, plusieurs schémas sont disponibles pour le calcul des échanges nappe-rivière mais il n'existe qu'un seul schéma pour les échanges nappe-drain.

a) Echange nappe-rivière

Deux cas sont possibles :

- si le niveau de la nappe est situé *au-dessus* de la base de la zone colmatée

$$Q_R = K_{vR} \times (H_v - H_N) \times STOT/e$$

et

$$H_v < H_N \text{ ou } H_v > H_N$$

De plus, si $H_N > H_v$ et $H_N > \text{Cote topo}$, alors il y a débordement complémentaire de la nappe dans la rivière selon le schéma suivant :

$$Q_{R2} = K_{vR} \times (H_N - \text{Topo}) \times (S - STOT) \times \text{Fact}$$

où Fact = facteur de transition douce croissant de 0 à 1 ;

- si le niveau de la nappe est situé *au-dessous* de la base de la zone colmatée, l'échange se fait par drainage unitaire

$$Q_R = K_{vR} \times STOT/e$$

avec :

- Q_R : débit d'échange nappe-rivière (m³/s)
- K_{vR} : perméabilité verticale du lit de la rivière (m/s)
- H_v : cote de la ligne d'eau de la rivière (m NN)
- H_N : cote de la nappe au droit de la rivière (m NN)
- S : surface d'échange dans la maille de calcul (m²)
- STOT : surface mouillée totale (fond + parois)
- e : épaisseur du colmatage du fond de la rivière (m)

Ce schéma asymétrique est physique et prend en compte le fait que les échanges par débordement, quand la charge piézométrique de la nappe est supérieure à la cote topographique, se font par toute la surface de la maille, et non pas uniquement par les parois du cours d'eau, et sont donc plus importants. Ce schéma permet de bien rendre compte des observations et présente l'avantage d'être physique.

b) Echange nappe-drain

$$Q_D = K_{vD} \times (H_N - Z_F) \times L$$

avec :

- Q_D : débit de drainage (m^3/s)
- K_{vD} : perméabilité verticale du lit du drain (m/s)
- H_N : cote de la nappe au droit du drain (m NN)
- Z_F : cote du drain (m NN)
- L : longueur du tronçon de drain (m)

2.1.3. Application au cas traité

En l'absence d'information sur les éventuelles connections entre drains, on a retenu l'hypothèse de tronçons indépendants. Quelques corrections ont dû être apportées au fichier des cotes du fond des drains (mailles où la cote du fond du drain était inférieure au substratum de la nappe).

Par ailleurs, la longueur des tronçons étant inconnue, on a dû procéder à un recalage du produit $K_{vD} \times L$: on a considéré comme réaliste l'hypothèse d'une longueur de drains uniforme, égale à la moyenne des longueurs de tronçons de rivière, soit 70 m ; plusieurs essais sont alors effectués :

- a) avec les valeurs de K_{vD} initiales, le calcul converge mal et les charges calculées sont beaucoup trop basses ;
- b) dans le cas des rivières, comme l'épaisseur colmatée réelle n'était pas connue, on l'a fixée uniformément à la valeur arbitraire de 1 cm et on a utilisé dans le modèle MARTHE des valeurs de K_{vR} telles que le rapport (K_{vR}/e) soit identique au rapport K_{vR}/e utilisé par MODFLOW. Par analogie, on a divisé les K_{vD} par 100 ; on obtient alors des résultats très proches de la piézométrie simulée dans le cadre de l'étude LIFE avec MODFLOW (fig. 8) la moyenne des écarts en valeur absolue étant de 35 cm ; 15 mailles débordent encore mais avec un débit représentant seulement 7 % de l'infiltration ;
- c) les autres essais ont donné des résultats moins bons.

Etant donné le manque d'informations sur les paramètres géométriques, on n'a pas tenté de meilleur calage et on a retenu l'hypothèse b) pour la suite des calculs, quitte à améliorer localement par la suite les fichiers L et K_{vD} .

2.2. ESTIMATION DE LA RECHARGE

2.2.1. Données du modèle LIFE

Les figures 9 a et b, extraites du rapport d'avancement, présentent les cartes de recharge pour les situations de ME et BE communiquées par l'APRONA. Ces cartes nous ont

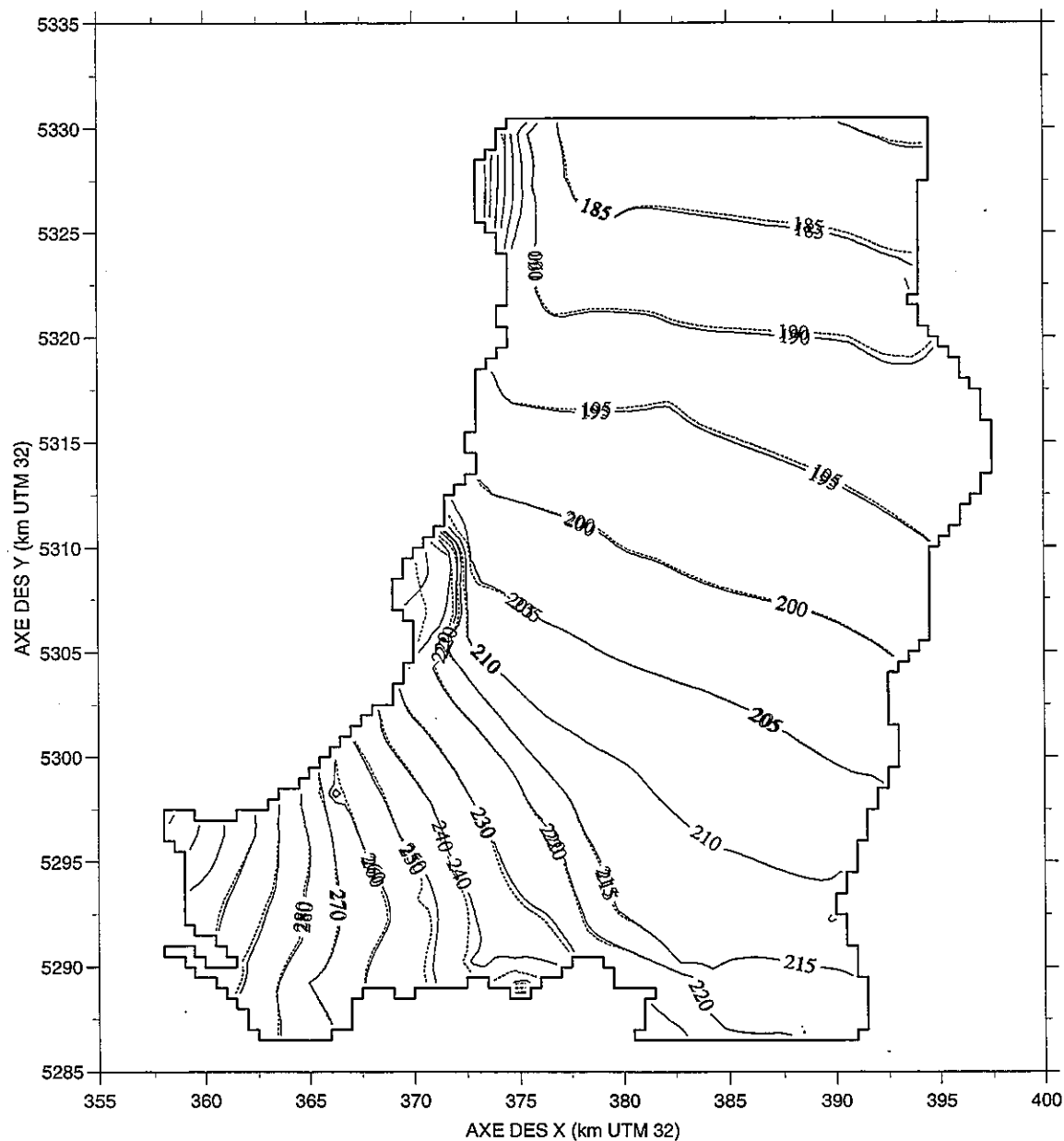


Fig. 8 - Piézométries calculées APRONA (—) et MARTHE (- - -) en moyennes eaux (avec prise en compte des drains par MARTHE).

paru peu réalistes en particulier en BE et les valeurs ont été obtenues en faisant beaucoup d'hypothèses sur l'évapotranspiration réelle (ETR) et en négligeant le ruissellement de surface (BURGEAP-IMF, 1996). Il a donc été décidé de faire de nouvelles estimations à l'aide des données complémentaires (données hydroclimatiques et débits dans les rivières) décrites au chapitre 1.

2.2.2. Options de MARTHE

Le code MARTHE offre la possibilité de réaliser un "bilan hydro-climatique intégré" dans des zones prédéfinies à partir des données météorologiques.

Ce bilan est effectué en deux étapes :

- un bilan pluie-ETP permettant de calculer un excédent de pluie à partir du déficit maximal du sol (Réserve Utile des agronomes) ;
- décomposition (optionnelle) de l'excédent de pluie entre une infiltration à la nappe (dans les mailles de la zone hydroclimatique) et un ruissellement qui est introduit dans le pas de temps (sans propagation à la surface du sol) dans la maille rivière la plus proche du réseau hydrographique (pas dans le réseau de drains).

Pour réaliser ces calculs, un certain nombre de paramètres, à caler, et de variables doivent être introduits en entrée du code ; lorsqu'on dispose des données nécessaires (cf. § 2.2.3.), on peut effectuer une estimation des paramètres à l'aide du modèle hydrologique global GARDENIA du BRGM (Boisson et Thiery, 1991) ce qui facilite le calage.

Les paramètres à caler dans chaque zone sont (cf. § 2.2.3.) :

- RUMAX : le déficit maximal du sol (en mm par défaut) ;
- CFETP : le coefficient correcteur global d'ETP (en %) ;
- TPERC : la durée de demi-percolation du réservoir H (en unités de temps, par ex. en mois) ;
- NEQUIP : le niveau du réservoir H correspondant à 50 % d'infiltration et 50 % de ruissellement, ou d'équipercolation (en mm par défaut).

Les variables à définir dans chaque zone sont :

- RUSOL : le déficit initial du sol (en mm par défaut) ;
- HISOL : l'état initial du réservoir H (en mm par défaut) ;
- FLPLU : le flux de pluie (par ex. en mm/mois) ;
- FLETP : le flux d'ETP (par ex. en mm/mois).

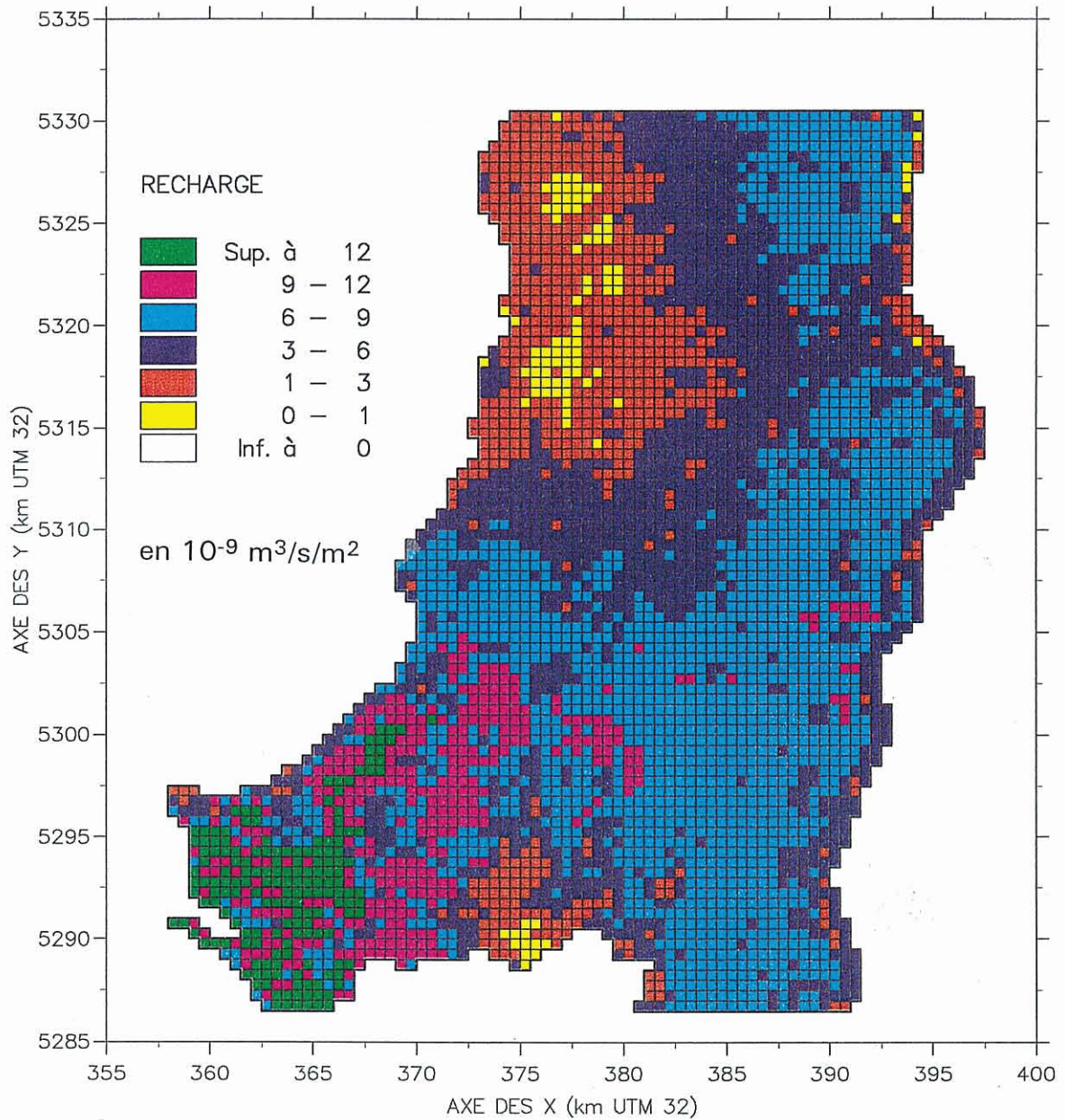


Fig. 9a - Carte de la recharge en moyennes eaux (données APRONA).

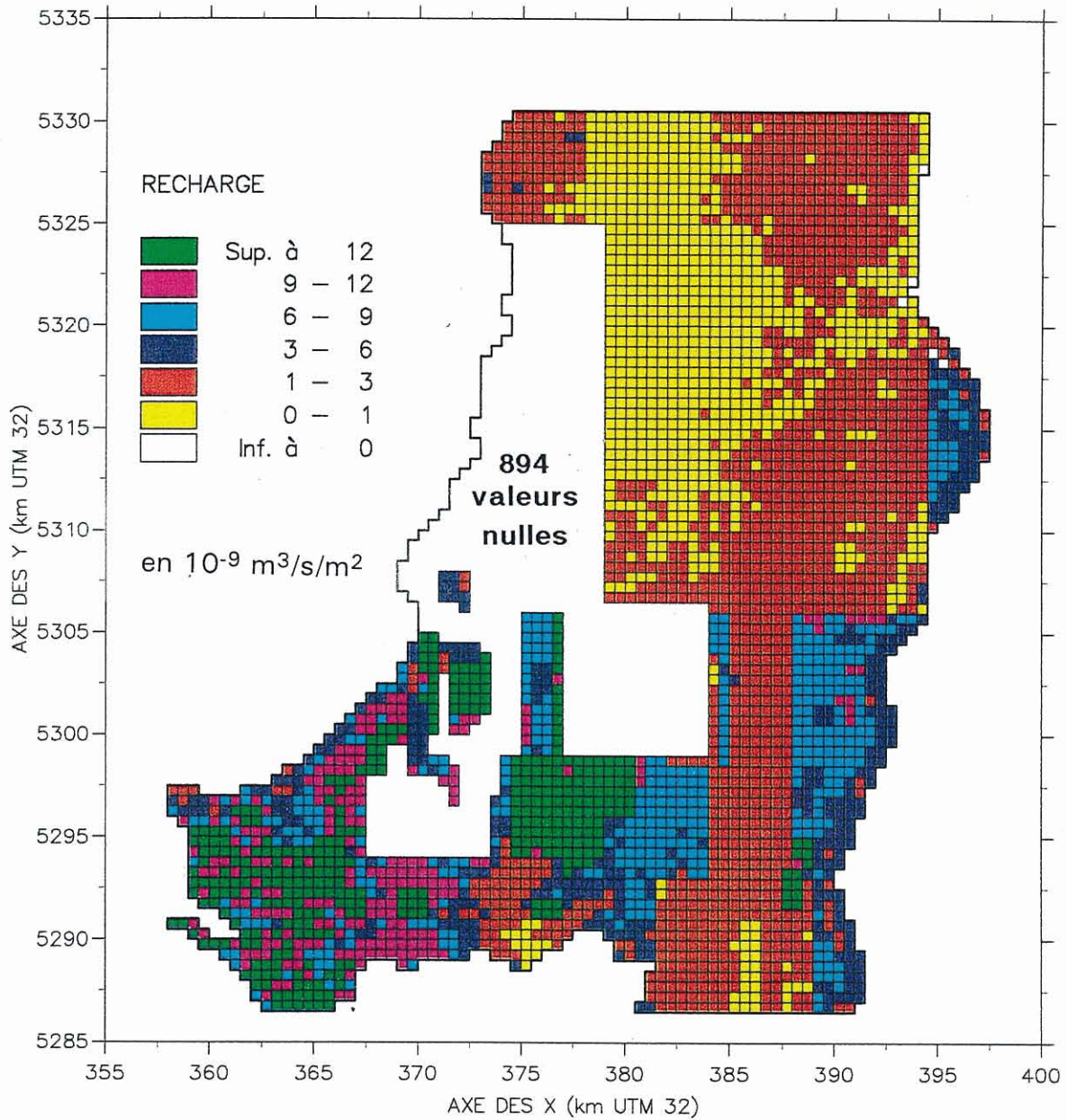


Fig. 9b - Carte de la recharge en basses eaux (données APRONA).

2.2.3. Préalages avec le code GARDENIA

a) Principes

GARDENIA est un modèle hydrologique global de bassin versant (BV) qui permet, si l'on dispose de longues séries de précipitations et d'ETP sur son bassin d'alimentation, de calculer :

- soit le débit à l'exutoire du BV ;
- soit le niveau en un point de la nappe sous-jacente.

Un modèle hydrologique global simule par une succession de réservoirs, les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un BV (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulements rapide, lent et très lent). Les transferts d'un réservoir à l'autre sont régis par des lois simples, particulières à chaque réservoir et contrôlées par les paramètres du modèle. En raison du caractère global de cette schématisation et de la complexité du système hydrologique réel, ces paramètres ne peuvent être déduits à priori des caractéristiques physiographiques ponctuelles du BV, mais doivent être calés sur une série d'observations (débits ou niveaux).

Les données nécessaires au calage sont :

- des séries ininterrompues des "entrées" du modèle c'est-à-dire pluie et ETP (éventuellement température de l'air, s'il y a prise en compte de la fonte de la neige) ;
- des séries, concomitantes aux séries d'entrées, mais non nécessairement continues d'observations (débits ou niveaux) sur lesquelles seront calées les "sorties" du modèle.

L'inertie d'un système hydrologique étant parfois considérable, le calcul des premières valeurs dépend énormément des conditions des années précédentes, aussi est-il nécessaire de prendre en compte dans les calculs quelques années de démarrage précédent les premières observations utiles.

Le modèle est global au sens où il considère une "entrée" globale (une lame d'eau sur le BV et une ETP) et une "sortie" ponctuelle (débit à l'exutoire du BV) ou niveau de la nappe en un point. Ce modèle simule le cycle de l'eau par un système de 3 à 4 réservoirs en cascade (fig. 10, extraite du rapport GARDENIA) qui se caractérisent ainsi, successivement :

- le réservoir superficiel représente les premières dizaines de centimètres du sol dans lesquelles se produit l'évapotranspiration (zone d'influence des racines de la végétation) ; ce réservoir est alimenté par la pluie (voire la fonte de la neige) et se vide d'abord par évapotranspiration réelle (ETR) puis, si sa hauteur RU dépasse la valeur de rétention RUMAX, par vidange de l'excédent ALIMH dans le réservoir intermédiaire H ;
- le réservoir intermédiaire H, qui représente la zone non saturée, est alimenté par le réservoir superficiel et vidangé par deux exutoires : par percolation dans le réservoir souterrain G1 suivant une loi exponentielle de constante de temps TPERC (la durée de demi-percolation ou temps de demi-montée du réservoir G1), par écoulement rapide à

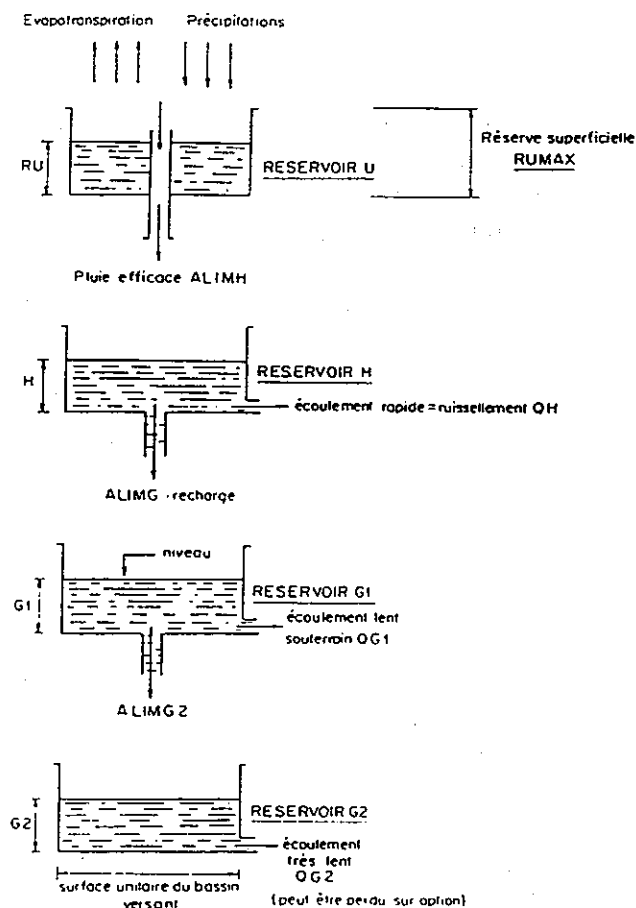


Fig. 10 - Schéma de fonctionnement du modèle GARDENIA.

l'extérieur (ruissellement) suivant une loi non-linéaire contrôlée par le paramètre NEQUIP (niveau du réservoir H pour lequel la percolation ALIMG et le ruissellement QH sont égaux) ;

- le réservoir souterrain G1 représente l'aquifère qui produit l'écoulement souterrain lent, voire très lent. Il est alimenté par ALIMG qui représente donc la recharge et est vidangé par un ou deux exutoires selon des lois exponentielles. Lorsqu'on considère un seul exutoire (cas de notre étude), la constante de temps TG1 représente le temps de demi-tarissement du réservoir souterrain G1 ;
- le réservoir souterrain G2, quand il existe, représente un aquifère profond ou une partie profonde de l'aquifère.

Pour notre étude, on a considéré un schéma à un seul réservoir souterrain G1.

b) Résultats

Les données ont été décrites au § 1.3.

Le tableau 2 (p. 25) montre que, sur les quatre premiers postes pour lesquels on dispose de séries de données (jusqu'à 32 ans), on peut définir une période commune de 14 ans de 1978 à 1991.

Des essais de pré-calage des paramètres en pluie-débit (tabl. 4) ont été tentés avec des séries de différentes durées, en prenant en compte la pluie de chaque poste et en observant les débits des différentes stations de jaugeage (cf. fig. 3). Le domaine d'étude ne recouvrant pas un BV complet, et les points d'observation ne constituant que des exutoires partiels, il est clair que les résultats ne peuvent fournir qu'une estimation des paramètres, par comparaison et recoupement des différentes valeurs obtenues.

N°	Pluies et ETP à :	Débits observés à :
1	Mulhouse (série courte 14 ans)	Ensisheim
2	Mulhouse (série longue 29 ans)	Ensisheim
3	Burnhaupt (série courte)	Ensisheim
4	Mulhouse (série longue)	Colmar
5	Burnhaupt(série courte)	Staffelfelden

Tabl. 4 - Essais GARDENIA effectués.

Parmi les paramètres calés par GARDENIA, il en est un, non encore cité, CFPLU qui est le coefficient correcteur de la lame d'eau introduit pour compenser une mauvaise représentativité des données pluviométriques issues des observations faites sur des stations dispersées.

L'essai 5 produit un calage avec CFPLU = 35.6 %, ce qui signifie qu'il n'est pas possible de caler les débits à Staffelfelden avec les seules données de pluie à Burnhaupt (moyenne annuelle sur 14 ans égale à 1045 mm d'après le tableau 2) ; la carte de l'AERM, dont sont issues les zones de la figure 4, fait apparaître une pluviométrie nettement plus élevée sur les Vosges d'où sont issues les rivières Doller, Thur, Lauch et Fecht (plus de 1700 mm/an) et sur lesquelles nous n'avons pas obtenu les données détaillées.

Parmi, les autres essais les plus significatifs sont les n° 1, 2 et 4 dont les résultats sont présentés sur les figures 11 a,b,c avec respectivement 4 années de démarrage sur 14 et 14 sur 29. Les paramètres calés sont résumés au tableau 5.

N° essai	1	2	4
CFPLU	8.62 %	11.34 %	6.78 %
CFETP	-20 %	-11.37 %	-15.16 %
RUMAX	97.43 mm	70.02 mm	68.13 mm
NEQUIP	30.73 mm	49.52 mm	48.69 mm
TPERC	1.73 mois	0.55 mois	0.96 mois
TG1	2.79 mois	2.02 mois	3.21 mois
Pluie efficace*	350.3 mm/an	325.7 mm/an	311.9 mm/an
Coef. ajustement	0.930	0.923	0.892

* la pluie efficace est la pluie moins l'ETR (terme ALIMH défini ci-dessus au § 2.2.3.), elle comprend donc le ruissellement et l'infiltration.

Tabl. 5 - Résultats des calages GARDENIA.

Les trois calages montrent tous un déficit de pluie (et un excédent d'ETP) pour les mêmes raisons que celles évoquées plus haut. Un point positif est la bonne cohérence

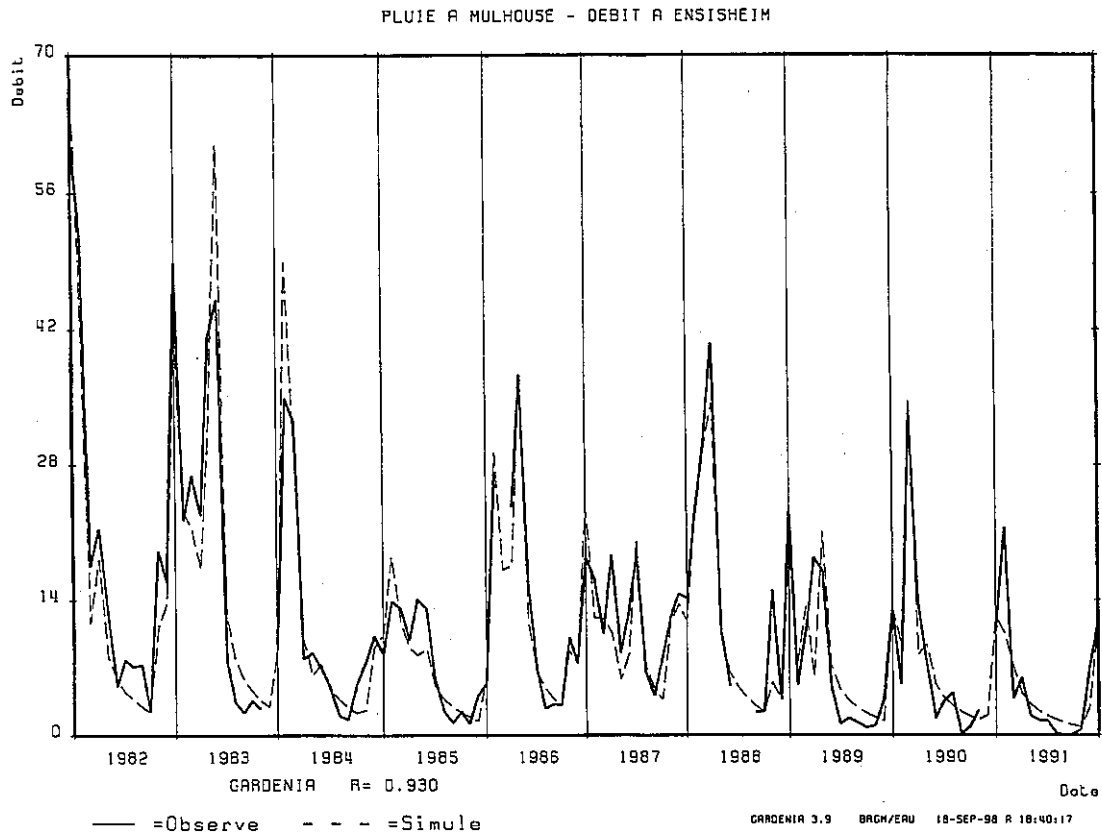


Fig. 11a – Calage GARDENIA – essai 1.

des résultats du tableau sur les longues séries observées respectivement à Mulhouse et à Colmar (à l'exutoire du modèle) : on peut en conclure que la pluie à Mulhouse, bien qu'insuffisante, permet une assez bonne première estimation des paramètres sur l'ensemble de la zone d'étude.

A l'examen des figures 11a, b et c, les observations à Colmar n'apparaissent cependant pas uniformément bien calées sur toute la période de simulation ; en particulier l'année 1987 est mal restituée (déficit du simulé par rapport à l'observé). Finalement, c'est la série courte à Ensisheim qui est la mieux restituée ; on a donc choisi de retenir les valeurs des paramètres de calage de cet essai (n° 1) comme estimations de départ pour les calculs avec MARTHE.

2.2.4. Données de MARTHE

Au tableau 1 (§ 1.2.2.), on a présenté les six zones hydroclimatiques définies à l'aide de la carte de l'AERM (cf. fig. 4). Par ailleurs, le tableau 2 (§ 1.3.1.) montre que les valeurs moyennes interannuelles à chaque station, sur une période commune de 14 ans, sont bien représentatives de la zone dans laquelle elles se trouvent, à part la valeur à Colmar-INRA qui dépasse la moyenne de sa zone.

Parmi les paramètres estimés par GARDENIA, ceux qu'il faut caler dans chaque zone sont ; comme indiqué au § 2.2.3. :

- RUMAX : le déficit maximal du sol ;
- CFETP : le coefficient correcteur global d'ETP ;

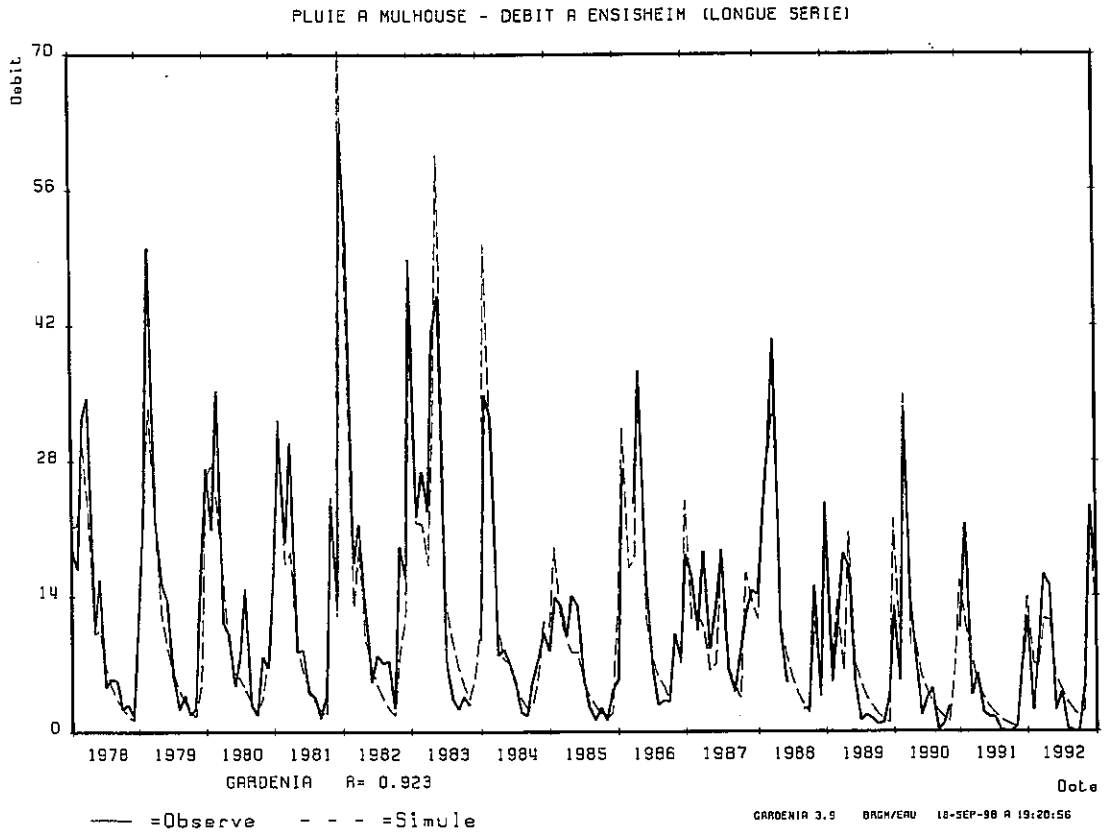


Fig. 11b – Calage GARDENIA : essai 2.

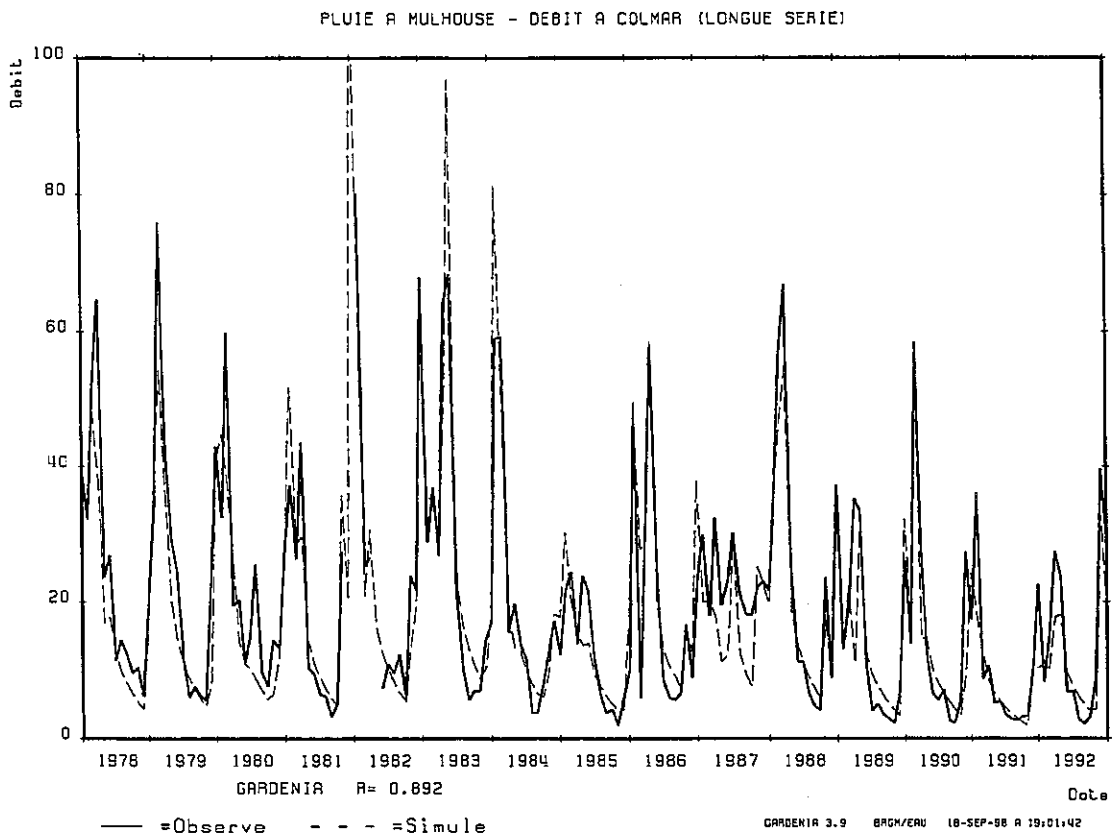


Fig. 11c – Calage GARDENIA : essai 4.

- TPERC : la durée de demi-percolation du réservoir H ;
- NEQUIP : le niveau du réservoir H correspondant à 50 % d'infiltration et 50 % de ruissellement.

Au paragraphe précédent, on a obtenu une estimation des paramètres de calage à partir de l'observation, sur la même période de 14 ans, de la pluie à Mulhouse et des débits à la station d'Ensisheim. Les paramètres obtenus sont donc considérés, en première approximation, comme représentatifs de ceux de la zone 4 où se trouve Mulhouse.

Le problème se pose d'estimer le jeu de paramètres de calage pour chacune des autres zones et ceci pour la situation de ME du 20 octobre 1986 que l'on veut modéliser en régime permanent. De plus, il faut définir dans chaque zone les flux de pluie et d'ETP.

Pour les valeurs de départ des paramètres de calage, on a généralisé à toutes les zones les valeurs estimées pour la zone 4 soit :

RUMAX = 97 mm, CFETP = - 20 %, TPERC = 1.73 mois, NEQUIP = 31 mm.

Le problème est plus compliqué, en régime permanent, pour les flux de pluie et d'ETP car on ne connaît pas la pluie et l'ETP représentatives du régime permanent.

On résout le problème en considérant une ETP nulle et une pluie égale à la pluie efficace moyenne, qui devient un paramètre de plus à caler. Le précalage avec GARDENIA ayant donné une valeur de 350.3 mm/an (cf. § 2.2.3.) pour la zone 4, soit 29.19 mm/mois, il faut estimer ce paramètre pour les autres zones.

Pour ce faire, constatant que l'ETP variait peu d'une zone à l'autre (cf. § 1.3.1), on a fait l'hypothèse que les pluies efficaces étaient proportionnelles aux pluviométries moyennes, d'où le tableau 6 :

N° zone	Station	Moy. pluie station sur 14 ans (mm/mois)	Valeur retenue pour la pluie/zone	Ratio pluie dans zone/pluie zone 4	Pluie efficace par zone (mm/mois)
1	Colmar-Inra	44.65	44.65	0.6831	19.94
2	Meyenheim	47.75	47.75	0.7305	21.32
3	Baldersheim	61	61	0.9331	27.24
4	Mulhouse	65.37	65.37	1	29.19
5	-	-	75*	1.147	33.49
6	Burnhaupt	87.08	87.08	1.332	38.88

* sup observé dans la zone 5 (cf. tableau 1)

Tabl. 6 - Estimation de la pluie par zones en régime permanent.

Les pluies efficaces calculées par cette méthode constituent les valeurs de départ du flux de pluie FLPLU en entrée de MARTHE (avec des flux d'ETP nuls : FLETP = 0).

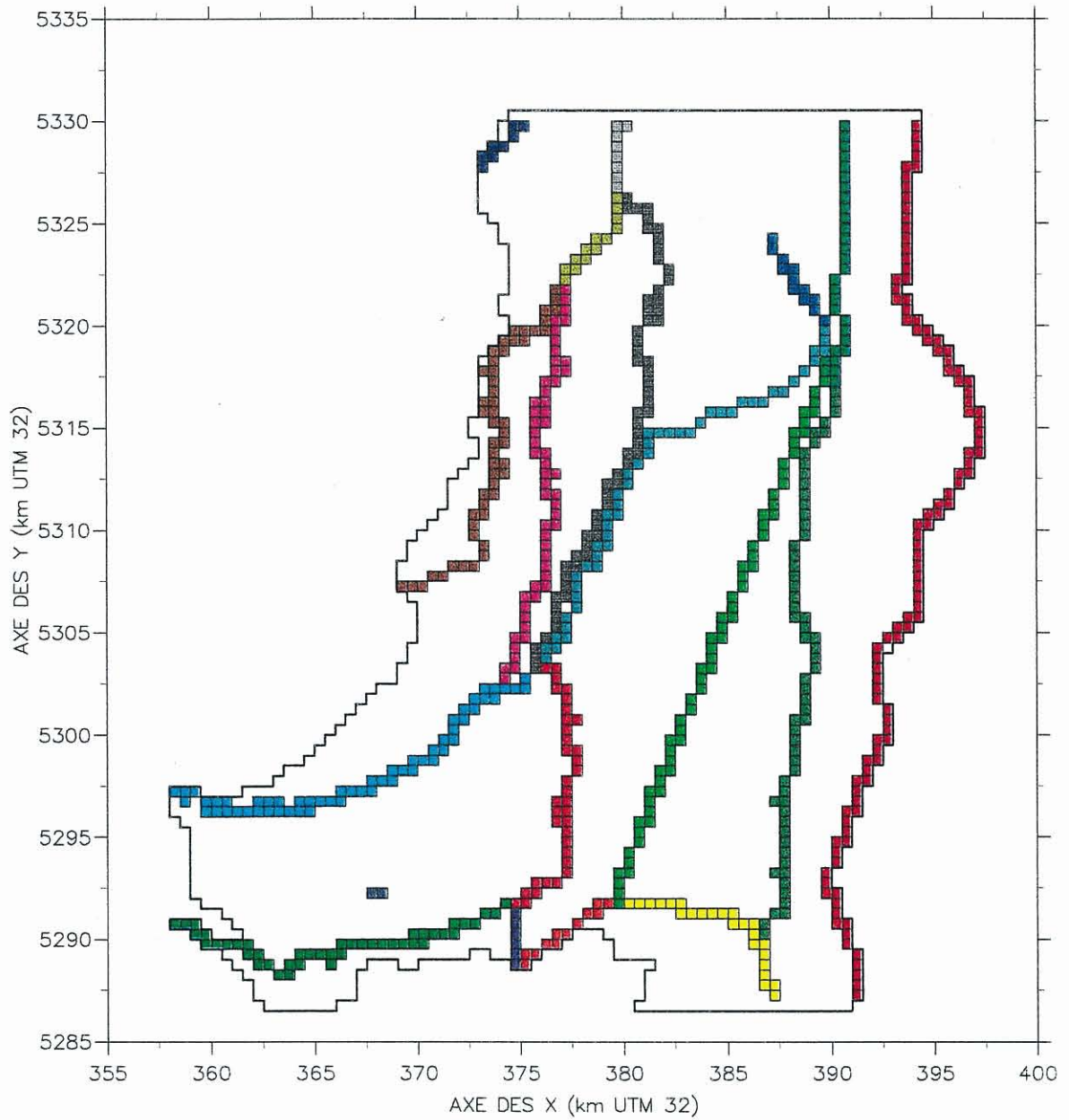


Fig. 12 – Discretisation du réseau hydrographique.

2.3. RELATION HAUTEUR/DÉBIT DANS LES COURS D'EAU

Lors de l'étude LIFE, les données de station de jaugeage n'ayant pas été prises en compte, les interactions nappe/réseau de surface ont été modélisées pour chacune des trois situations en gardant les cotes des rivières imposées, sans simulation ni contrôle des débits.

Les données de cours d'eau fournies par l'APRONA ont été décrites dans le rapport d'avancement (p. 20 à 23) et leur localisation est représentée sur la figure 6 de ce même rapport. On constate d'ailleurs qu'il manque quelques mailles pour connecter complètement les canaux entre eux.

2.3.1. Options de MARTHE

Rappelons que MARTHE prend en compte un réseau palmé de cours d'eau interconnectés qui interagissent avec la nappe, soit en infiltration soit en drainage (cf. § 2.1.2. et annexe 3) ; les cours d'eau sont organisés en affluents eux-mêmes découpés en tronçons, avec au maximum, un tronçon par maille du modèle (chaque tronçon de rivière peut avoir jusqu'à 3 tronçons amont mais un seul tronçon aval). Le réseau discrétisé, après raccordement des "chaînon manquants" entre canaux, est représenté sur la figure 12.

MARTHE permet de relier la hauteur d'eau au débit dans la rivière par une relation de type Manning-Strickler, à condition de disposer d'un certain nombre de paramètres et de variables complémentaires aux données initiales rappelées au § 1.2.1.

Les variables complémentaires sont les débits injectés ou pompés dans la rivière et en particulier les débits à l'amont, dans les tronçons "sources", c'est-à-dire les mailles d'entrée des rivières dans le domaine modélisé et pour des calculs en régime transitoire, la situation initiale (débits ou hauteurs initiales par tronçon).

Les nouveaux paramètres sont les valeurs par tronçon de la pente et de la rugosité du lit de la rivière. La pente n'est pas un paramètre très sensible et peut être estimée grossièrement à partir de la cote du fond du lit. Par contre, la rugosité est un paramètre de calage complémentaire qui influence beaucoup la hauteur d'eau dans la rivière.

2.3.2. Données de MARTHE

Pour le calage sur la situation de ME en régime permanent, le problème se pose du choix du débit à l'amont des cours d'eau, comme dans le cas du calcul de la recharge se posait celui du flux de pluie à considérer (cf. § 2.2.4.). Or ces deux variables sont fortement corrélées, les rivières réagissant très vite à un épisode pluvieux ; il convient donc d'examiner plus en détail, d'une part quel a été le régime des pluies sur le bassin d'alimentation des cours d'eau avant la date des ME (20 octobre 1986), d'autre part quels ont été les débits jaugés pendant la même période.

a) Variations de la pluviométrie

Nous n'avons pas obtenu la pluviométrie journalière.

Au tableau 7, on présente la pluviométrie mensuelle sur chacune des cinq stations pour les quatre mois précédant la situation de ME ainsi que la valeur moyenne interannuelle sur les quatorze années de référence citées au § 2.2.3.

On constate que :

- juillet est déficitaire par rapport à la moyenne, ce qui n'est pas étonnant, sauf sur la station de Colmar-Inra où il est fortement excédentaire ;
- août est fortement pluvieux partout et particulièrement sur les trois stations du sud ;
- septembre est assez sec ;
- octobre est assez pluvieux sur les trois stations du sud.

Station météo	Pluie moyenne interannuelle à la station sur 14 ans (mm/mois)	Pluie observée Juillet 86 (mm)	Pluie observée Août 86 (mm)	Pluie observée Sept. 86 (mm)	Pluie observée Oct. 86 (mm)
Colmar-Inra	44.65	74.4	88.6	45.1	45.4
Meyenheim	47.75	32.5	82.5	48.4	42.8
Baldersheim	61	32.8	187.1	45.6	56.9
Mulhouse	65.37	31	151.1	41.4	88.5
Burnhaupt	87.08	41	134.4	52.2	96.3

Tabl. 7 - Pluie mensuelle observée de juillet à octobre 1986.

b) Variations des débits des rivières

Sur les neuf stations de jaugeage pour lesquelles on dispose de données (cf. § 1.3.2. et fig. 3), quatre sont situées en dehors du domaine à modéliser, sur chacune des quatre rivières principales de la partie ouest soit Didenheim sur l'Ill, Masevaux sur la Doller, Willer-Thur sur la Thur, Guebwiller sur la Lauch. On a fait l'hypothèse que les débits de ces quatre stations constituaient une approximation acceptable (bien que sous-évaluée à cause de la distance) des débits "sources" de chaque rivière.

Si on examine les débits journaliers dans un intervalle de temps encadrant la date des ME, on obtient le tableau suivant des débits observés (en m³/s) :

Station de jaugeage	18 oct.	19 oct.	20 oct. (ME)	21 oct.	22 oct.	23 oct.	24 oct.
Didenheim	1.86	2.43	4.59	5.95	4.14	13.4	9.35
Masevaux	0.42	0.88	5.55	7.05	36.2	55.5	16.8
Willer	1.20	2.28	7.40	9.60	28.3	70.5	39.2
Guebwiller	0.39	0.69	1.67	1.64	4.43	11.7	7.50

Tabl. 8 - Débits journaliers mesurés autour du 20 octobre 1986.

On constate qu'à la date du 20 octobre, les quatre rivières subissent une crue dont le maximum est atteint le 23. Le régime des rivières est éminemment transitoire à la date du 20 octobre.

Si on examine les débits moyens mensuels sur la même période que la pluie, on obtient le tableau suivant :

Station de jaugeage	Débit moyen Juillet 86	Débit moyen Août 86	Débit moyen Sept. 86	Débit moyen Oct. 86	Débit moyen interannuel
Didenheim	1.99	2.21	1.67	3.63	6.18
Masevaux	0.59	0.64	0.99	5.85	3.18
Willer/Thur	2.33	2.72	4.08	9.50	5.44
Guebwiller	0.45	0.43	0.76	2.13	1.81

Tabl. 9 - Débits moyens mensuels de juillet à octobre 1986.

On constate que les débits moyens sont beaucoup plus importants en octobre 1986 que les trois mois précédents.

Au vu des résultats ci-dessus, les débits d'entrée sur les quatre sources où on dispose d'historiques sont estimés à partir de la moyenne de septembre 1986, pour démarrer le calage en régime permanent.

c) Autres données ou paramètres à caler

La relation de Manning-Strickler utilisée est de la forme suivante :

$$Q = \frac{1}{Rug} \cdot R_H^{2/3} \cdot \sqrt{\text{Pente}} \cdot \text{Aire}$$

avec :

- Q : débit dans la rivière (L^3T^{-1})
- Rug : rugosité du lit ($TL^{-1/3}$)
- R_H : rayon hydraulique (L)
- Pente : pente du lit (-)
- Aire : section mouillée (L^2)

Le rayon hydraulique, égal à la section mouillée divisée par le périmètre mouillé, est peu différent de la hauteur mouillée ; on constate donc que la relation est non linéaire entre la hauteur d'eau et le débit dans la rivière.

La rugosité est un paramètre qui varie de 0.02 à 0.15 en unités S.I. ($TL^{-1/3}$) selon le type de cours d'eau. A priori, elle est plus faible pour les canaux que pour les rivières.

La pente peut être calculée de tronçon en tronçon sur les rivières ; pour les canaux, en toute rigueur, la relation ci-dessus n'est pas applicable sur un bief où la pente est nulle ; on l'a utilisée cependant en considérant des pentes moyennes entre plusieurs biefs.

La section mouillée et le rayon hydraulique sont facilement calculables pour une situation donnée où on connaît la hauteur de la ligne d'eau puisque les paramètres géométriques des cours d'eau sont connus.

Au total, on doit prendre en compte douze "sources" de rivières ou canaux, qui sont soit des entrées de cours d'eau dans le modèle, soit des défluences et qui sont toutes à caler, en particulier pour les canaux pour lesquels on n'a pas obtenu, à la date de l'étude, d'estimation initiale.

On peut estimer assez précisément la rugosité sur les quatre sources considérées plus haut, puisqu'on connaît tous les paramètres intervenant dans la relation ci-dessus à la date du 20 octobre 1986 ; on en déduit une estimation de la rugosité tout au long de ces cours d'eau. Pour les autres cours d'eau, il faut caler ce paramètre en même temps que les coefficients d'échange (cf. chapitre 3).

A noter que le terme $R_H^{2/3} \cdot \sqrt{\text{Pente}} \cdot \text{Aire} = \text{Rug} \cdot Q$ est connu partout à la date des ME.

Au tableau 10, on donne le mode d'estimation de Rug pour les quatre rivières considérées plus haut, pour la Vieille-Thur, défluence de la Thur dont on connaît le débit source (station de Ungersheim) et pour le Rhin (dont on connaît le débit à la station de Kembs).

Maille source de	Largeur tronçon L (m)	Cote ligne d'eau Hv (m) le 20 oct. 86	Cote du fond Hf (m)	Périmètre mouillé P = L+2(Hv-Hf)	Section mouillée S = L(Hv-Hf)	Rayon hydraulique S/P	Pente (en 10 ⁻³)	$R_H^{2/3} \times \sqrt{\text{Pente}} \times S$	Débit rivière Q le 20 oct 86	Rugosité calculée
Doller	20	326.4	325.6	21.6	16	0.74	5.9	1.006	5.55	0.18
Thur	15	333.5	332.9	16.2	9	0.55	4.6	0.412	7.40	0.05
Lauch	8	222.9	222.5	8.8	3.2	0.36	4	0.103	1.67	0.06
Ill	20	237	236.4	21.2	12	0.56	4	0.519	4.59	0.11
V.Thur	18	221.9	221.6	18.6	5.4	0.29	1.2	0.082	0.51	0.16
Rhin	125	216.8	211.8	135	625	4.63	0.84	50.32	450	0.11

Tabl. 10 - Estimation des rugosités.

On constate que les rugosités estimées sont d'un ordre de grandeur vraisemblable bien qu'un peu élevé pour la Doller et la Vieille-Thur.

3. Calage de l'hydrodynamique en 2D

Etant donné les nouvelles options prises en compte pour la modélisation des écoulements de surface et souterrain (décrites au chapitre précédent), on a dû procéder au calage de nouveaux paramètres (et au recalage des anciens).

Ceci a été réalisé d'abord en régime permanent sur la carte observée des ME, différente de la carte calée par l'APRONA (cf. fig. 5a et § 1.3.4.) puis en régime transitoire, sur 5 ans, entre la situation de ME du 20 octobre 1986 et la situation de BE du 9 septembre 1991, incluant la situation de HE du 11 avril 1988.

3.1. CALAGE EN RÉGIME PERMANENT

3.1.1. Objectifs

Il s'agit de caler le champ de perméabilités de l'aquifère, la longueur des drains (cf. § 2.1.3.), les paramètres intervenant dans le calcul de la recharge (cf. § 2.2.4.), les perméabilités et les rugosités du lit des cours d'eau, les épaisseurs de colmatage, les débits "sources" de chaque affluent ou défluent (cf. § 2.3.2).

3.1.2. Données, hypothèses et méthode

Outre la nouvelle carte de piézométrie observée, on dispose des prélèvements corrigés dans la nappe (cf. § 1.3.3.) et de la première estimation des nouveaux paramètres à caler, réalisée comme décrit au chapitre 2.

Comme valeurs de départ des perméabilités de lit et des épaisseurs colmatées, on a repris les valeurs calées dans le cadre de l'étude LIFE.

Pour les conditions aux limites du modèle, on a aussi repris les résultats de l'étude LIFE soit (fig. 13) :

- des valeurs de flux entrant sur les limites ouest et sud-ouest (en vert), correspondant à des apports d'eau des versants des Vosges et du Sundgau (BURGEAP-IMF, 1996) ;
- des conditions de potentiel imposé sur les limites nord et sud (en bleu) ;
- un flux nul sous le Rhin (limite est) ;

Sur la figure 13, les mailles en rouge sont celles comportant un ou plusieurs ouvrages de prélèvement dans la nappe (AEP, AEI ou puits de fixation).

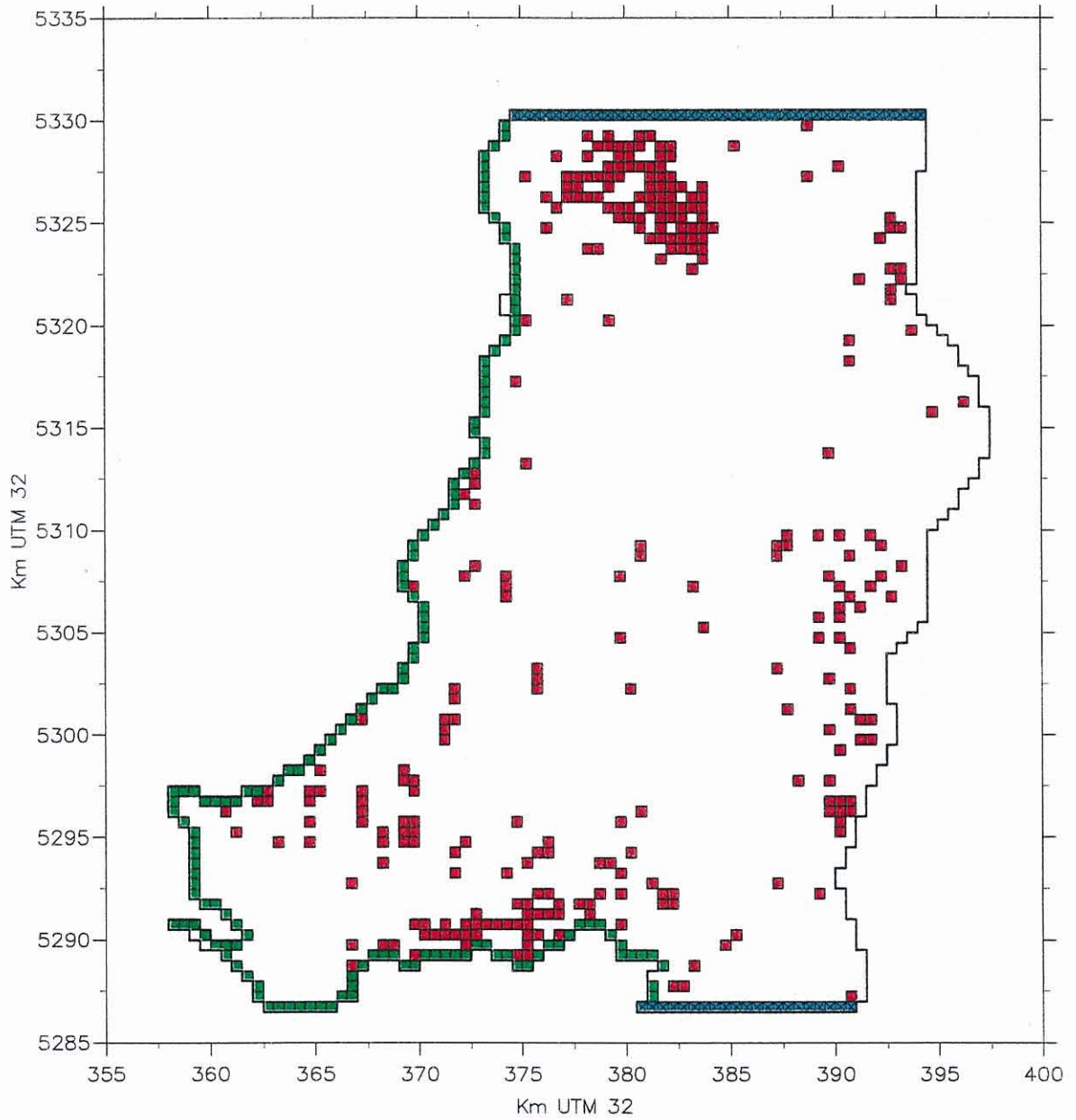


Fig. 13 – Prélèvements et conditions aux limites en 1986.

La méthode de calage suivie a été la suivante :

- première estimation de la carte de perméabilités K par modèle inverse maille à maille, en imposant la hauteur d'eau dans les rivières et tous les autres paramètres de calage à leur valeur estimée initiale ;
- détermination de zones de K et affinement des valeurs des K par calage automatique par zones ;
- sans toucher à la carte des perméabilités ainsi obtenue, calage "manuel" des autres paramètres en condition de Manning-Strickler pour les interactions nappe/cours d'eau.

3.1.3. Résultats

La figure 14 présente la carte de perméabilités calée de cette manière avec huit zones de K (une valeur unique par zone). La répartition physique de la perméabilité des alluvions, indiquée au § 1.1., est globalement restituée, avec une diminution d'est en ouest.

La carte piézométrique calculée est représentée sur la figure 15 par comparaison avec la carte observée. Le calage apparaît comme très bon. On notera cependant que cette carte, très lissée, ne représente la piézométrie qu'à l'échelle régionale ; les détails en sont absents, en particulier dans le Bassin Potassique où les forts prélèvements et le substratum tourmenté induisent certainement des variations locales importantes.

Les profils en long des rivières sont représentés sur les figures situées en annexe 4 (en trait continu : hauteur d'eau observée, en tirets : hauteur d'eau simulée). En tenant compte des échelles très différentes d'un dessin à l'autre, on constate que les calages sont bons pour les petites rivières et un peu moins bons, quoique satisfaisants, pour les canaux et le Rhin, à cause des ruptures brusques de niveau dues aux écluses ; en toute rigueur, la relation de Manning-Strickler ne s'applique pas dans ce cas.

Le tableau 11 présente le bilan en eau du modèle pour ce calcul en régime permanent sur la situation des ME.

	Entrées		Sorties	
	litres/sec	%	litres/sec	%
Limite H amont	783	4.35		
Limite H aval			2939	16.32
Flux entrant (coteaux)	1850	10.27		
Prélèvements			5942	33
Infiltration	6148	34.14		
Débordements			549	3.05
Rivières	9228	51.24	4570	25.37
Drains			4010	22.26
Total	18009	100	18010	100

Tabl. 11 - Bilan en eau en régime permanent - ME du 20 octobre 1986.

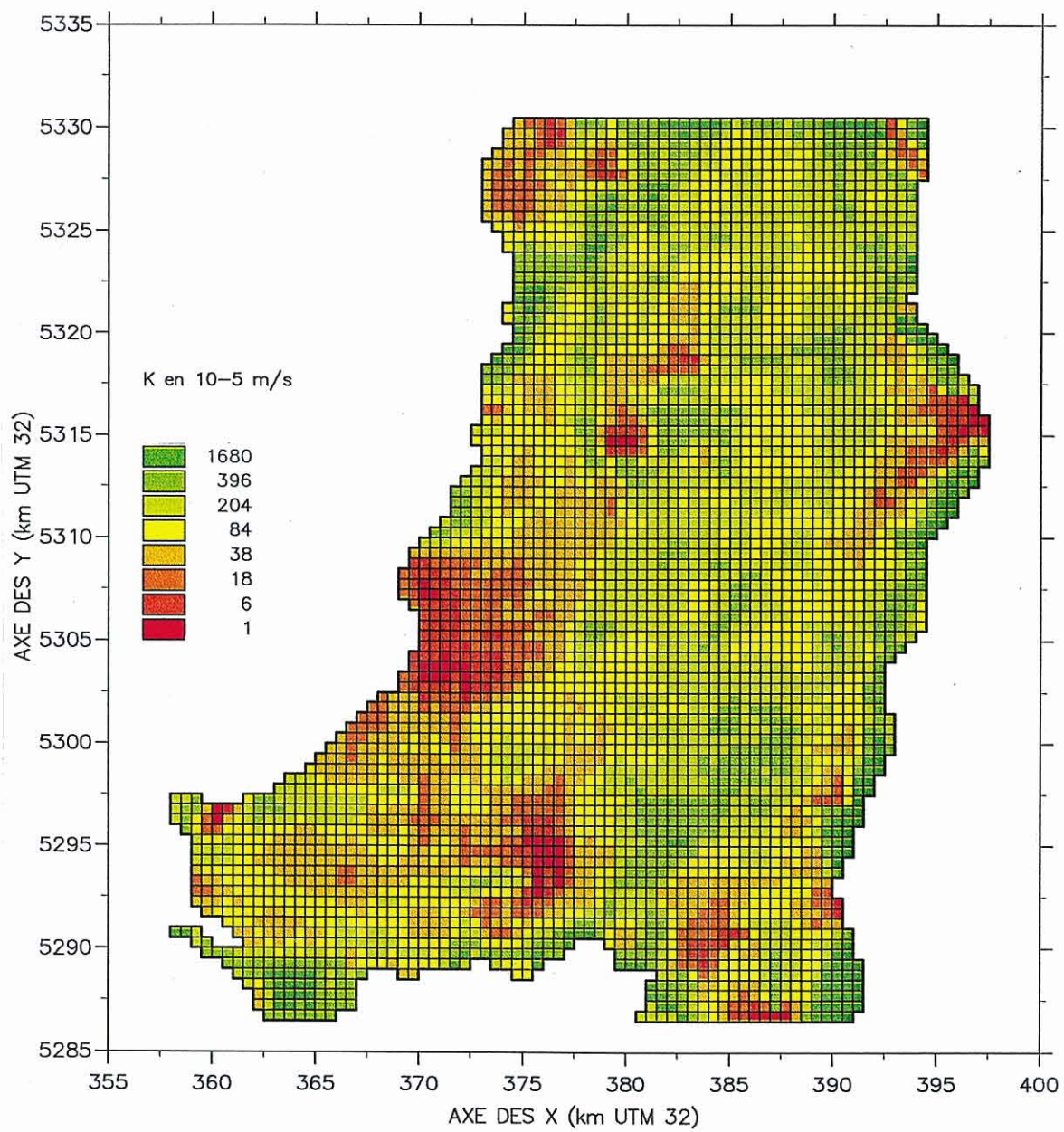
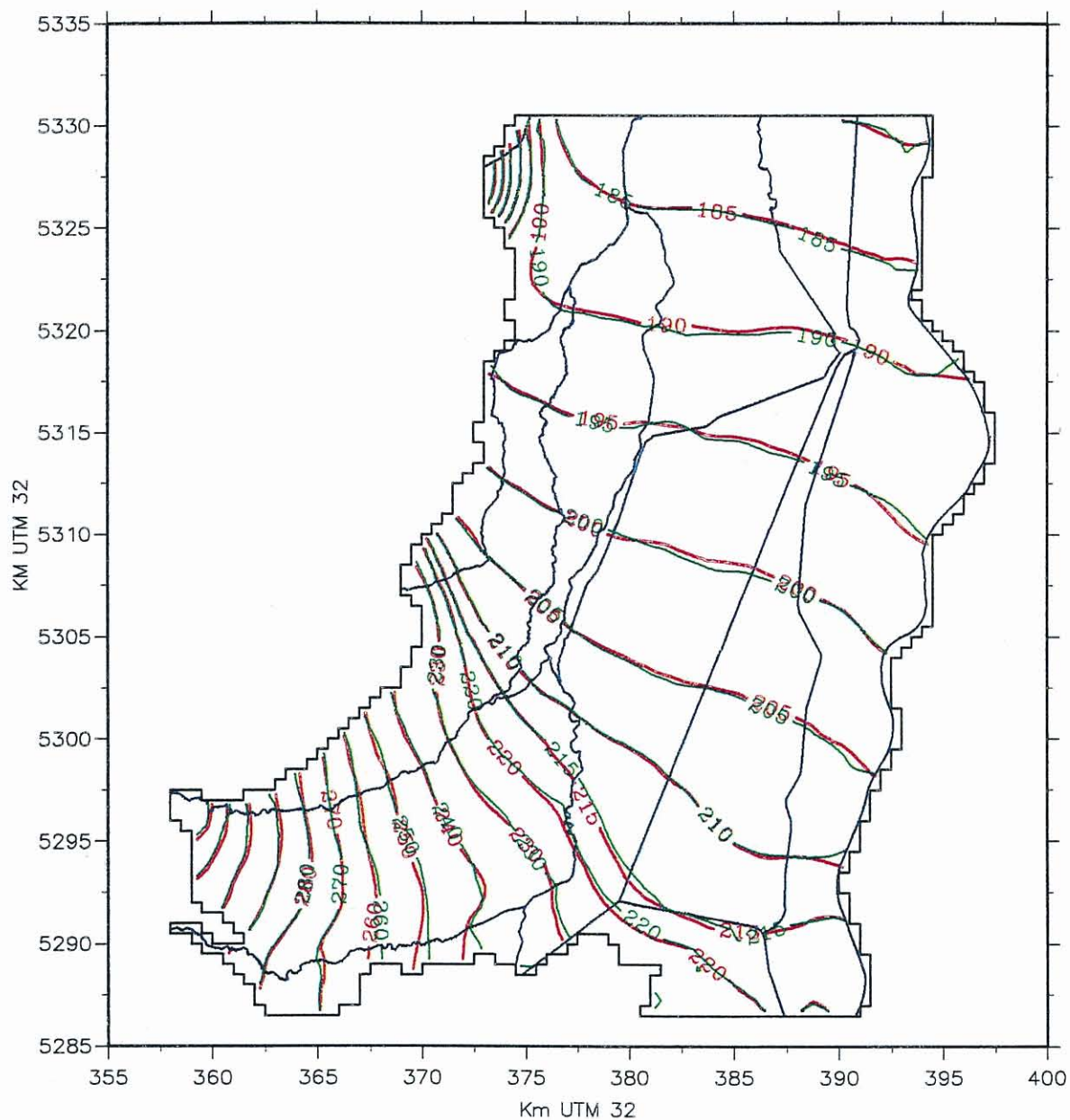


Fig. 14 - Perméabilités - 2D - Calage en régime permanent.



Observée (rouge) - Simulée (vert)

Fig. 15 - Piézométrie - 2D - Moyennes eaux du 20 octobre 1986.

On constate que l'influence du réseau hydrographique est loin d'être négligeable : en situation de ME, les rivières contribuent aux apports à la nappe pour 51.24 % du total et aux pertes pour 25.37 %, les drains prélevant en plus 22.26 % du total.

Du point de vue de la répartition géographique, les résultats détaillés (fichier RIVSIM.OUT produit par MARTHE) montrent que les petites rivières et les canaux alimentent la nappe presque partout ; seules les parties amont des rivières drainent. Quant au Rhin, il alimente sur certains secteurs et draine sur d'autres.

3.2. CALAGE EN REGIME TRANSITOIRE

3.2.1. Objectifs

Il s'agit d'améliorer le calage des perméabilités K et d'estimer les coefficients d'emmagasinement S (qui correspondent à la porosité puisque la nappe est libre) ; et aussi d'examiner en conditions "dynamiques" le comportement des interactions nappe/cours d'eau, en particulier aux points de contrôle que constituent les quatre stations de jaugeage situées à l'intérieur du modèle (cf. § 1.3.2. et fig. 3).

3.2.2. Données, hypothèses et méthode

Comme données d'entrée, on dispose :

- des variations de débits "sources" des cours d'eau, soit :
 - . des variations journalières de débit à l'amont des quatre rivières ouest (Ill, Doller, Thur et Lauch) et de la défluence que constitue la Vieille-Thur par rapport à la Thur (station de Ungersheim) ainsi qu'indiqué au § 1.3.2. ; elles sont assimilées aux variations des "sources" des rivières dans le modèle (cf § 2.3.2.) ;
 - . pour le Rhin, on a obtenu les variations mensuelles de débit à la station de Kembs qui jauge la partie du débit détournée dans le grand canal d'Alsace ;
 - . pour les canaux, on a gardé constante la valeur calée sur la situation de ME, en régime permanent ;
- des variations mensuelles de la pluie et de l'ETP pour chacune des six zones hydrologiques identifiées (cf. § 1.2.2.) ;
- des variations annuelles des prélèvements divers (AEP, AEI, puits de fixation du Bassin Potassique).

Comme données de contrôle, on dispose des évolutions de débit des rivières Thur et Ill aux quatre stations de jaugeage situées dans le modèle ainsi que d'historiques de charge sur une vingtaine de piézomètres (fig. 16).

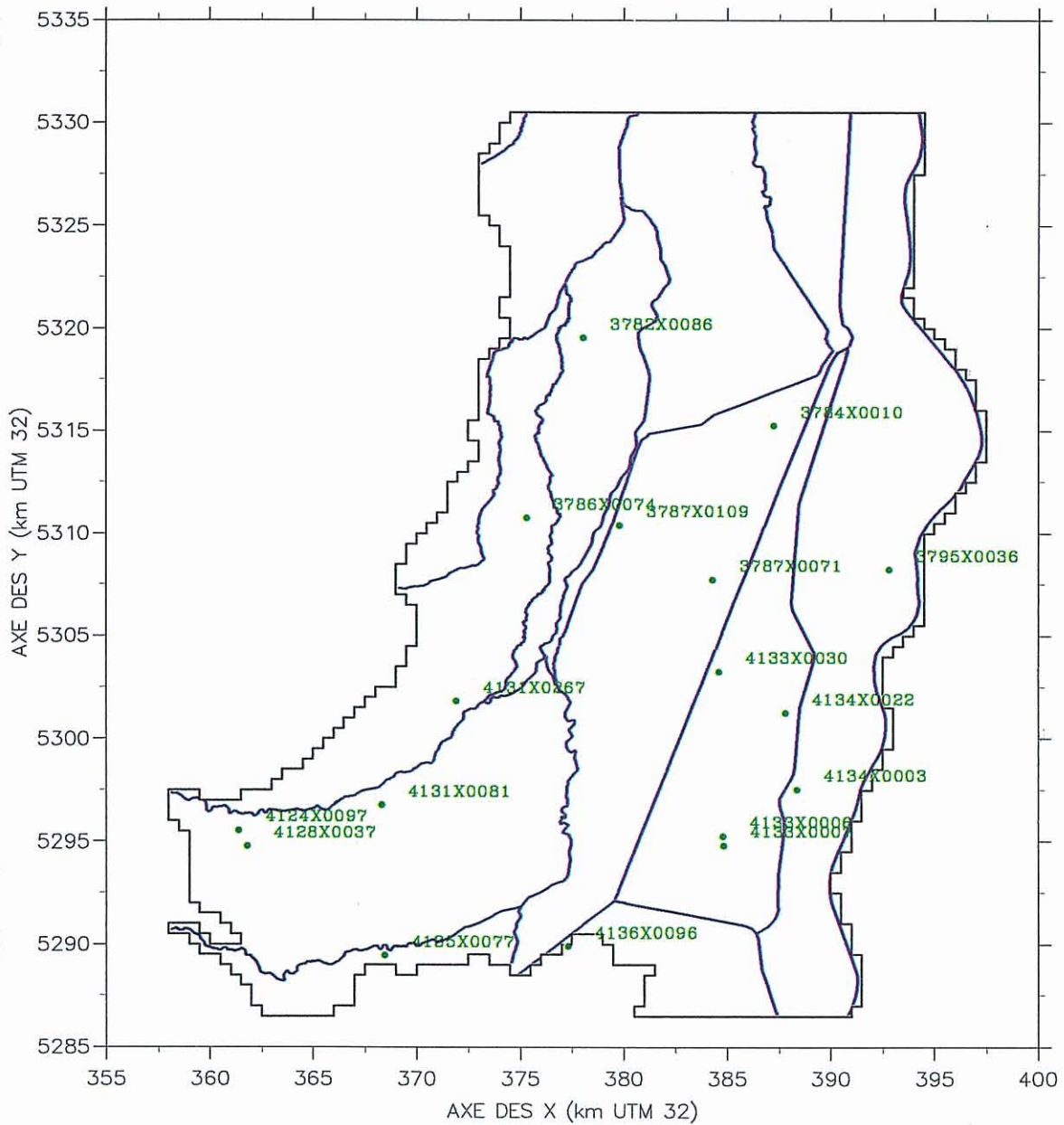


Fig. 16 – Localisation des piézomètres.

On a conservé les conditions aux limites du permanent (cf. supra) quoique, en toute rigueur, il aurait aussi fallu caler en transitoire les flux entrant par les coteaux ouest et sud (Vosges et Sundgau).

A partir de la situation de ME, on a effectué un calage automatique par zones (sept zones de perméabilités K et une zone de porosité S) au pas de temps mensuel sur la période allant des ME (20 octobre 1986) aux BE (9 septembre 1991) soit 59 pas de temps. On a pris en compte les variations mensuelles de pluie, d'ETP et de débit aux "sources" des cours d'eau en condition de Manning-Strickler, et les variations annuelles de prélèvements.

On s'est contenté d'une zone de porosité, le calage automatique par zones prenant déjà de l'ordre de 60 heures CPU sur la station DEC Alpha à notre disposition. On a affiné ensuite "manuellement" le calage des perméabilités du lit des rivières, comme pour le cas du régime permanent.

La carte des perméabilités recalée diffère peu de la première version (permanent) ; le S moyen sur la zone est élevé : 12 à 14 % selon le calage des paramètres de rivière.

3.2.3. Résultats

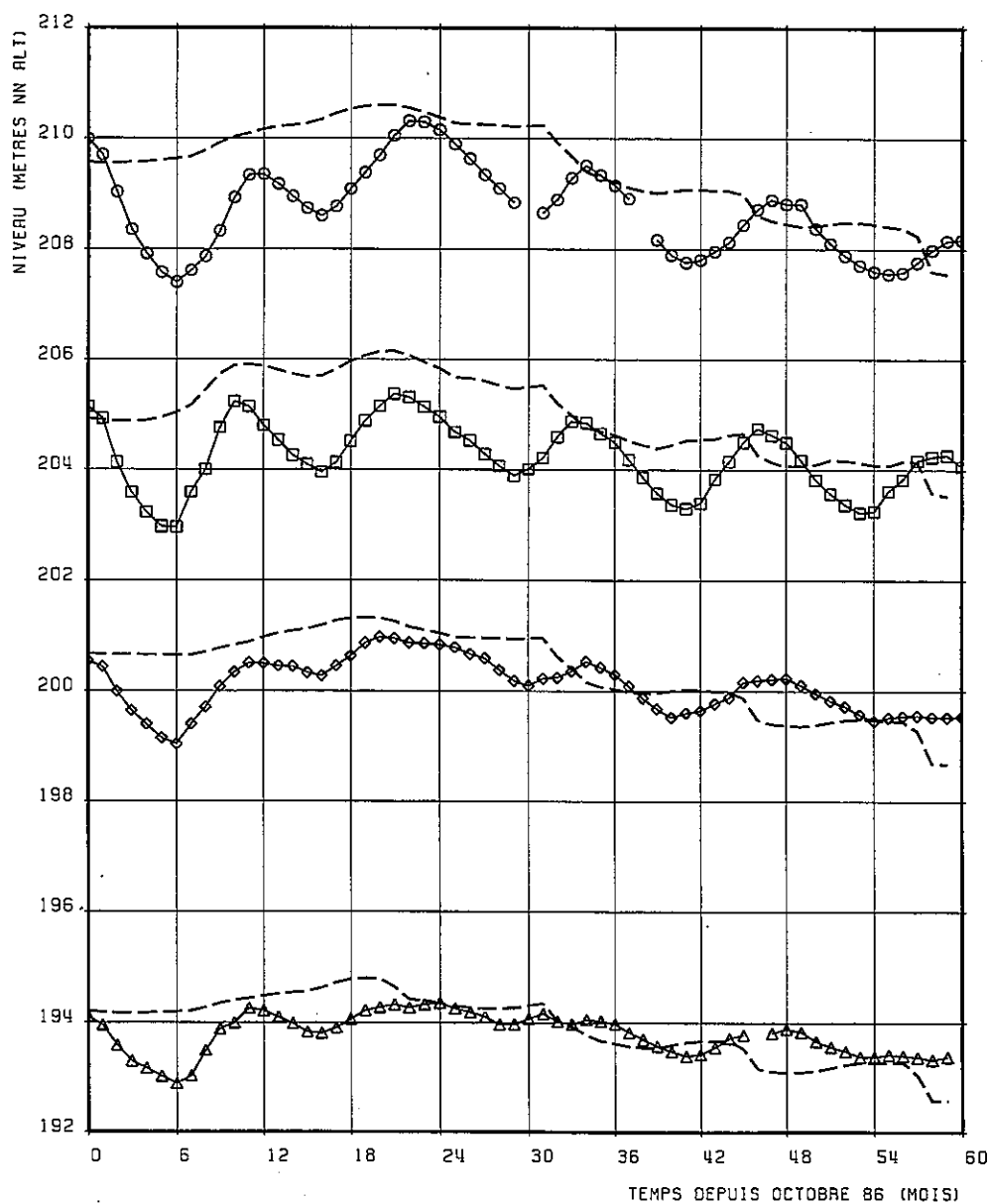
a) Piézométrie

La figure 16 montre que les piézomètres pour lesquels on a obtenu des historiques sont répartis, en gros, selon deux bandes nord-sud, une bande située à l'est entre le Rhin et les canaux de la Hardt et du Rhône au Rhin, une bande ouest proche des rivières vosgiennes et de l'Ill.

Pour la bande est, on présente sur la figure 17 (observé en trait continu avec symboles, simulé en tireté) les historiques de quatre piézomètres implantés d'amont en aval à environ 7 km l'un de l'autre ce qui correspond, au total, à une variation de niveau de nappe d'environ 20 m. De même pour la bande ouest, sont représentés sur la figure 18 les historiques de cinq piézomètres répartis sur une quarantaine de kilomètres d'amont en aval correspondants à une baisse de niveau de la nappe de 120 m.

A cette échelle régionale, on constate que les historiques simulés rendent compte correctement de la baisse globale de la nappe bien qu'ils ne reproduisent pas le détail des variations observées, lesquelles sont globalement similaires dans une bande et très différentes d'une bande à l'autre :

- à l'est (fig. 17), les observations exhibent des plongements très importants en avril 1987 (mois 6) très bien corrélés et inexplicables par la pluviométrie ou les prélèvements ; ces plongements se reproduisent, quoique moins marqués, avec une périodicité annuelle et le modèle ne les simule pas ;



- piézomètre 4133 X 0006
- piézomètre 4134 X 0022
- ◇ piézomètre 3787 X 0071
- △ piézomètre 3784 X 0010

Fig. 17 – Piézomètres est.

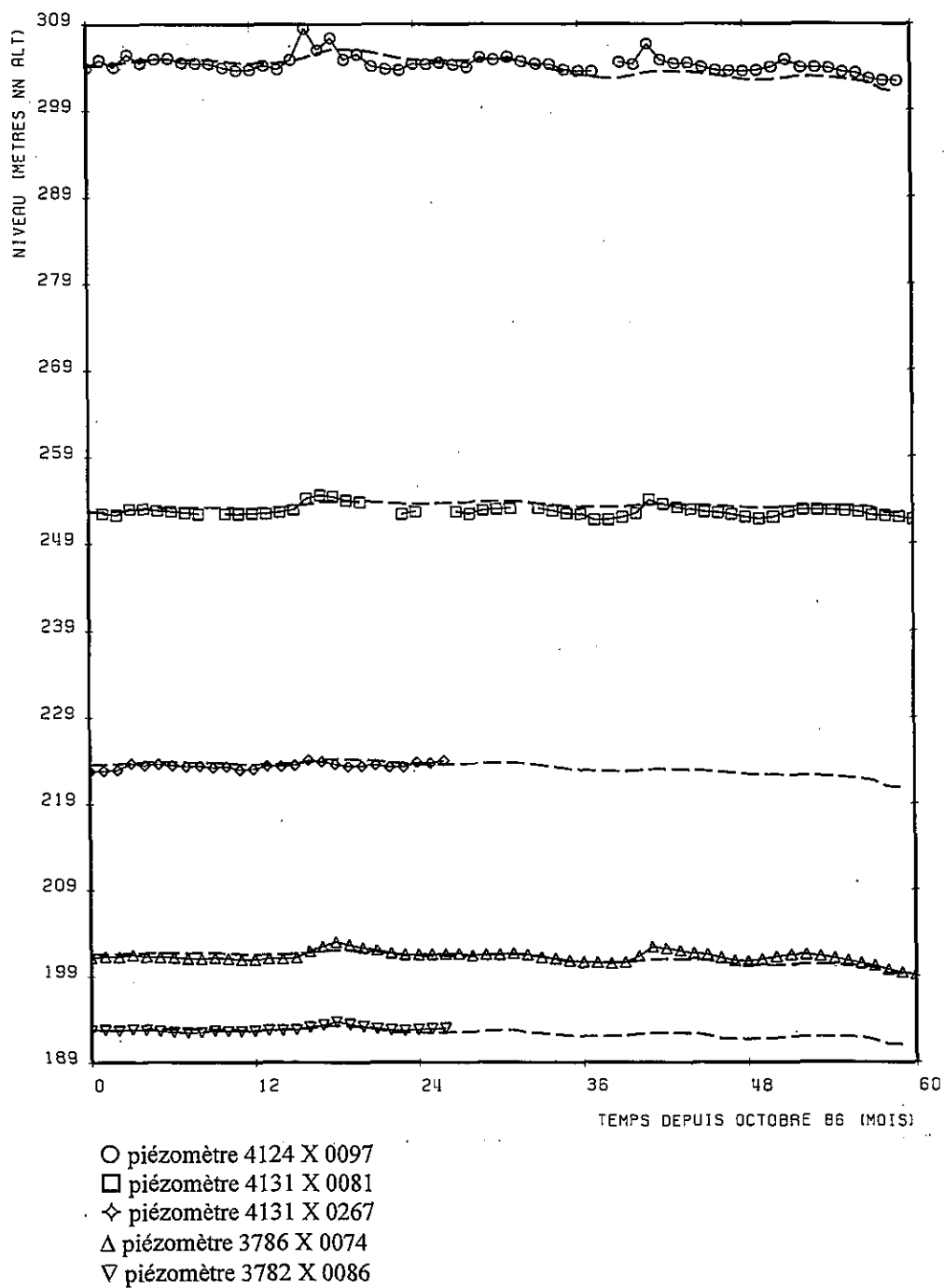


Fig. 18 – Piézomètres ouest.

- à l'ouest, (fig. 18 et plus visible sur figures en annexe 5 avec échelle dilatée), on n'observe pas le même comportement des piézomètres, qui suivent plutôt les fluctuations des rivières.

On a recherché dans les fluctuations du débit des canaux les causes des variations périodiques des piézomètres de la bande est, non restituées par le modèle ; en effet, faute d'information, le débit aux "sources" des canaux a été gardé constant dans la modélisation (cf. § 3.2.2.). On a finalement obtenu de la DDA, des informations montrant qu'il existe tout un réseau de petits canaux d'irrigation branchés sur les canaux principaux, en particulier le canal de la Hardt.

Le tableau 12 et la figure 19 font apparaître les variations saisonnières de débit arrivant dans ce canal à partir des prises d'eau sur le canal de Huningue et sur le Grand Canal d'Alsace. On observe que chaque année, le volume prélevé aux prises d'eau croît d'un facteur 6 à 20 entre mars et juillet/août ; comme le canal de la Hardt alimente la nappe, déjà en situation de ME (cf. § 3.1.3.), il n'est pas surprenant que les piézomètres exhibent les fluctuations observées.

La valeur entrée dans le modèle à la "source" du canal de la Hardt qui est la prise d'eau sur le canal de Huningue, (l'autre à Ottmarsheim n'étant pas modélisée) a été calée en ME (octobre 1986) à 13 m³/s ; c'est bien l'ordre de grandeur de la somme des contributions des deux prises d'eau indiquées au tableau 12 chaque année en septembre/octobre.

Une autre cause d'erreur pour les piézomètres situés près du Rhin est la surestimation du débit passant dans celui-ci, estimé par rapport aux mesures à la station de Kembs sur le Grand Canal d'Alsace, et non sur le Rhin "délaisé". En conséquence, les échanges nappe/Rhin sont surestimés ; c'est bien ce qu'on observe sur les variations du piézomètre 3795X0036 très proche du Rhin (cf. ann. 5).

Par contre, pour ce qui concerne les piézomètres ouest, les écarts entre observé et simulé sont dus à un calage insuffisamment affiné (une seule zone d'emmagasinement). Des tests que nous n'avons pas poussés faute de temps ont montré qu'on restituait beaucoup mieux les pics en baissant l'emmagasinement S mais il faut redéfinir les zones de perméabilité car par ailleurs les historiques plongent trop sur la période de 5 ans.

b) Débits des rivières

Les figures 20a à 20d présentent les historiques de débit (observé en trait continu avec symbole "cercle", simulé en tireté) des rivières Thur et Ill aux quatre stations de jaugeage situées dans le modèle.

Pour les trois premières stations, Staffelfelden sur la Thur, Ensisheim et Oberhergheim sur l'Ill, on remarque sur les courbes simulées :

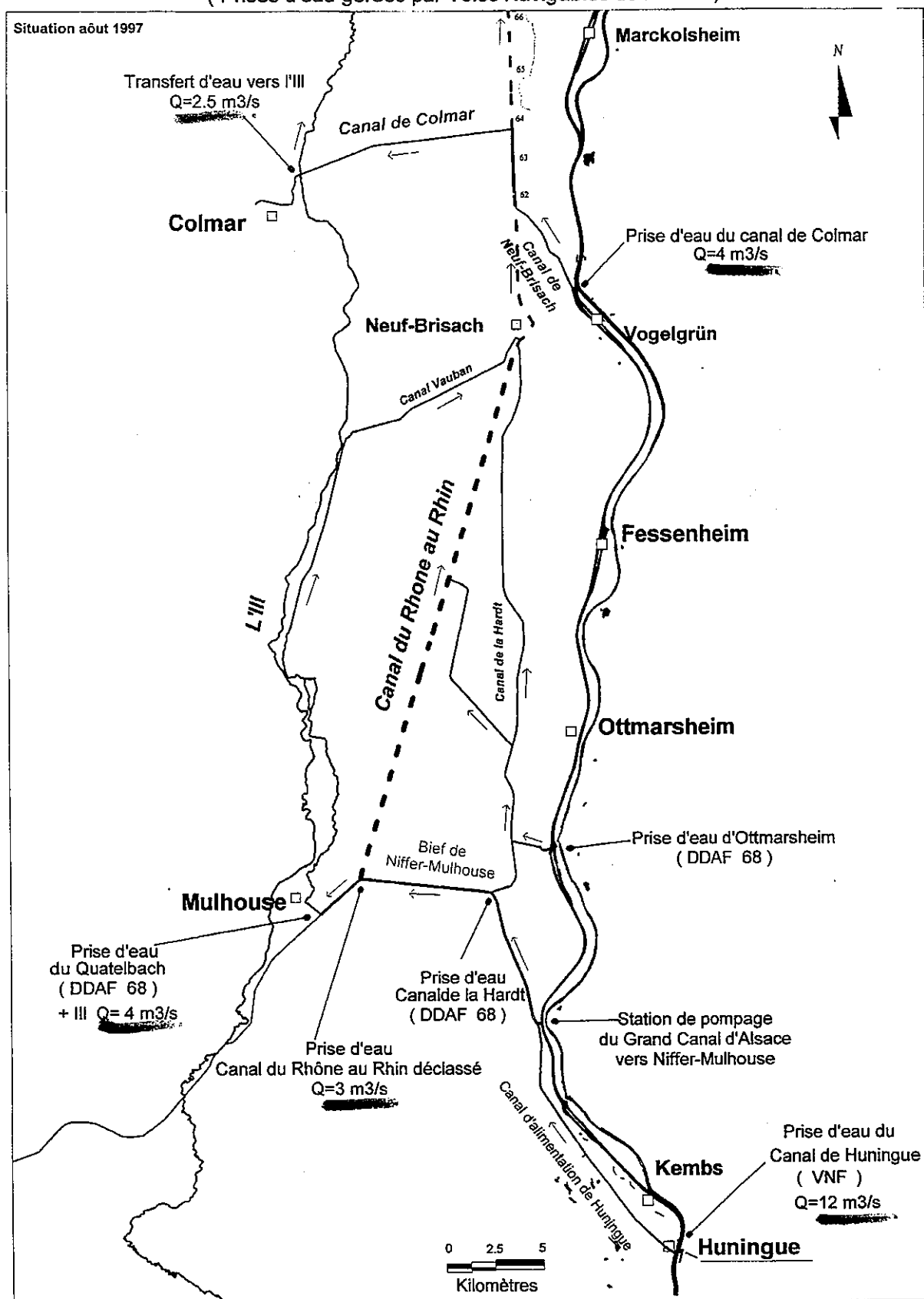
Modèle de la nappe d'Alsace – Projet de développement 312 – Rapport final

ZONE SUD	CANAL DE LA HARDT				MÜHLBACH			CANAL DE MUNCHHOUSE			
VOLUME TOTAL DELIVRE EN M3	Prise sur Grand Canal d'Alsace à Ottmarshéim	Prise sur Canal de Huningue	PK 8.5 AVAL	PK 19.65 AVAL	Prise sur Canal de la Hardt au PK 3.5	Prise G.C.A. Chalampé	Prise G.C.A. à Blodelshéim	Prise sur Canal de la Hardt PK 8.5	Canal de jonction avec canal du Rhône au Rhin	Prise sur Canal du Rhône au Rhin	Canal de jonction avec canal du Rhône au Rhin
Jan-89	6912000	1339200			267840	259200	2678400		5269536	4971456	
Fév-89	5616000	1209600			4838400	241920	2419200		4205952	4425408	
Mar-89	4622400	1382400	1036800	1036800	725760	440640	1944000		2657664	3438720	
Avr-89	20736000	2592000	14638000	14472000	2592000	423360	1296000		4207680	4147200	
Mai-89	22291200	2678400	11145600	9374400	2678400	527040	1339200		8061984	4548960	
Jun-89	27993600	3067200	16156800	11404800	2592000	492480	1442880		10160640	4100544	
Jul-89	32914800	3947400	19756800	12553200	2631600	263160	2631600		12526416	3868452	
Aoû-89	24537600	4017600	13651200	8380800	2678400	267840	267840		10661760	4642272	
Sep-89	20736000	1512000	10368000	7776000	2592000	233280	2073600		5849600	4121280	
Oct-89	9072000	1296000	1036800	776600	2592000	259200	1296000		6280416	2534976	
Nov-89	6523200	1296000			2030400	259200	1296000		3142368	1560384	
Déc-89	3801600	1339200			267840	466560	1339200		2249856	1217376	
Jan-90	1771200	1339200			267840	172800	362880		1553472	830304	
Fév-90	172800	1209600			656640		898560		200448	107136	
Mar-90		1339200			803520		1468800				
Avr-90	9936000	1296000	9331200	8035200	1123200	224640	2592000				
Mai-90	22204800	2548800	13824000	13392000	1339200	535680	2635200		4872096	1738368	
Jun-90	28252800	2332800	17884800	12960000	2332800	518400	2592000		8833536	3553632	
Jul-90	32054400	3456000	20476800	15897600	2678400	535680	2678400		11107584	4917888	
Aoû-90	36979200	3531200	24451200	19094400	2678400	535680	2678400		11677824	5410368	
Sep-90	26611200	1296000	11404800	10713600	2592000	518400	2592000		11301120	5235840	
Oct-90	22118400	1339200	9676800	9676800	2548800	535680	1339200				
Nov-90		1296000			777600	518400	1296000				
Déc-90		1339200			803520	535680	1296000				
Jan-91		1874880			1071360	622080					
Fév-91		1693440			967680	648000	1209600				
Mar-91		1874880			1071360	803520	1339200				
Avr-91	12441600	1753920	8985600	6912000	1944000	751680	1252800				
Mai-91	23155200	1874880	15811200	12355200	2678400	803520	1339200				
Jun-91	23328000	1814400	15552000	12960000	2592000	777600	1512000				
Jul-91	36982800	3283200	237600	18403200	2419200	1287360					
Aoû-91	35164800	2678400	18576000	14342400	2678400	1339200	2678400				
Sep-91	32744800	2592000	14604600	12009600	2592000	1296000	2592000				
Oct-91	9331200	4406400	3888000	3110400	1728000	1339200	2678400				
Nov-91		5184000			1296000	1296000	1900800				
Déc-91		3801600			1339200	1339200	1339200				
Jan-92		2678400			1339200	993600	1123200				
Fév-92		2505600			1252800	86400	1252800				
Mar-92		2678400			1339200	1339200	1339200				
Avr-92	6912000	2592000	3542400	3542400	1296000	1296000	1296000				
Mai-92	23068800	3153600	13392000	13392000	1814400	1339200					
Jun-92	26956800	3888000	15552000	14083200	2592000	1296000	1857600				
Jul-92	36979200	4017600	21168000	16070400	2678400	1339200	2678400				
Aoû-92	36288000	4017600	20217600	16070400	2678400	1339200	2678400				
Sep-92	25142400	1555200	11577600	9244800	2592000	1296000	2592000				
Oct-92	8294400	2289600	3888000	3369600	820800	129600	2592000				
Nov-92		5184000			51840	1036800	1944000				
Déc-92		5356800				803520	1339200				
Jan-93		5356800				803520	1339200				
Fév-93		4838400			51840	725760	1209600				
Mar-93		5356800			267840	907200	1339200				
Avr-93	10368000	3758400	6566400	4752000	259200	1296000	1296000				
Mai-93	24364800	3456000	14428800	11750400	267840	1339200	1339200				
Jun-93	34905600	3585600	17107200	14428800	2678400	1339200	2678400				

Tabl. 12 - Estimation des débits mensuels délivrés par le réseau de canaux.

ESTIMATION DES DEBITS TRANSITANTS SUR LE SECTEUR DE HUNINGUE-COLMAR

(Prises d'eau gérées par Voies Navigables de France)



SERVICE DE LA NAVIGATION DE STRASBOURG
Pôle S.I.G.

C:\SNS\CARTES\DebitsansHUNCOLM.WOR

Fig. 19 - Estimation des débits dans les canaux.

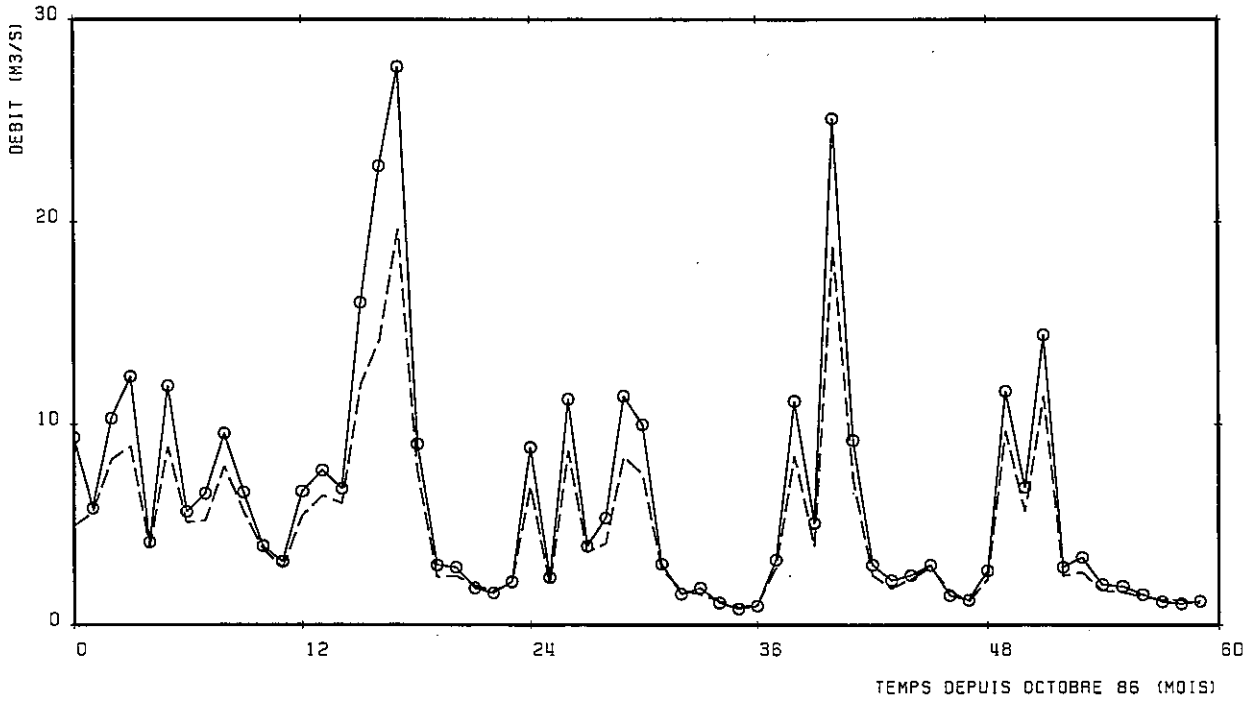


Fig. 20a - Débit de la Thur à Staffelfelden, observé (-o-), simulé (- - -).

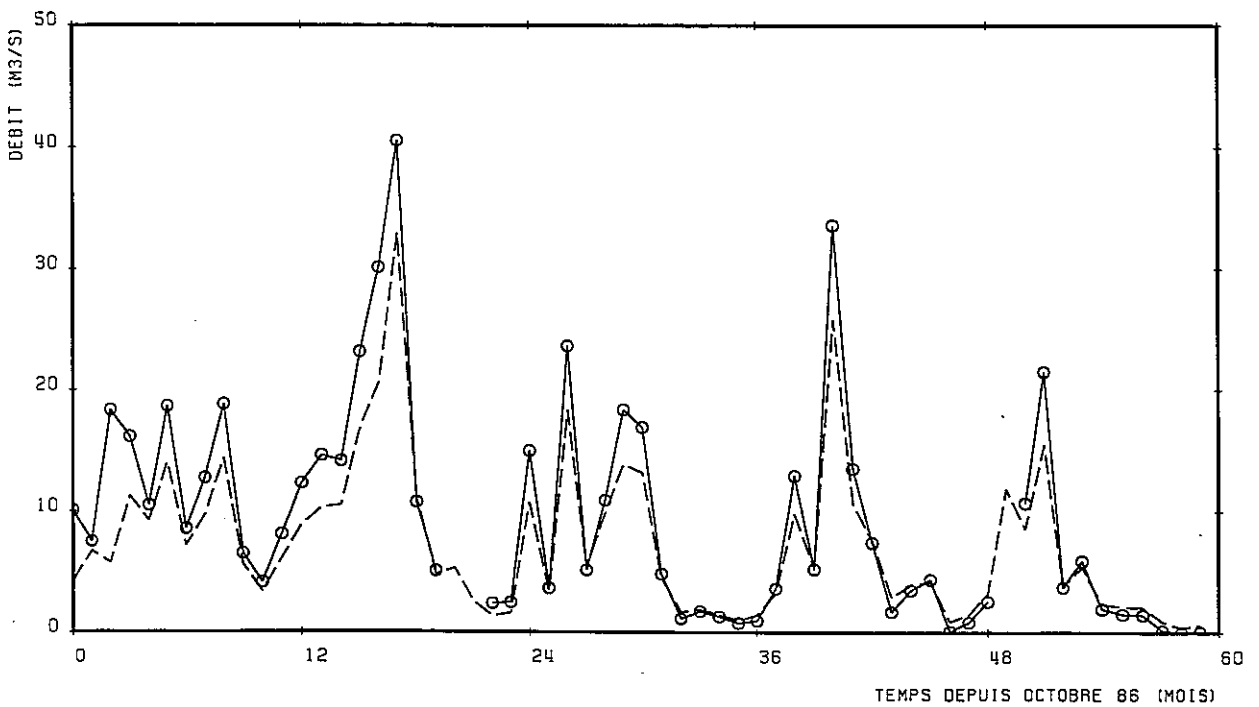


Fig. 20b - Débit de l'Ill à Ensisheim, observé (-o-), simulé (- - -).

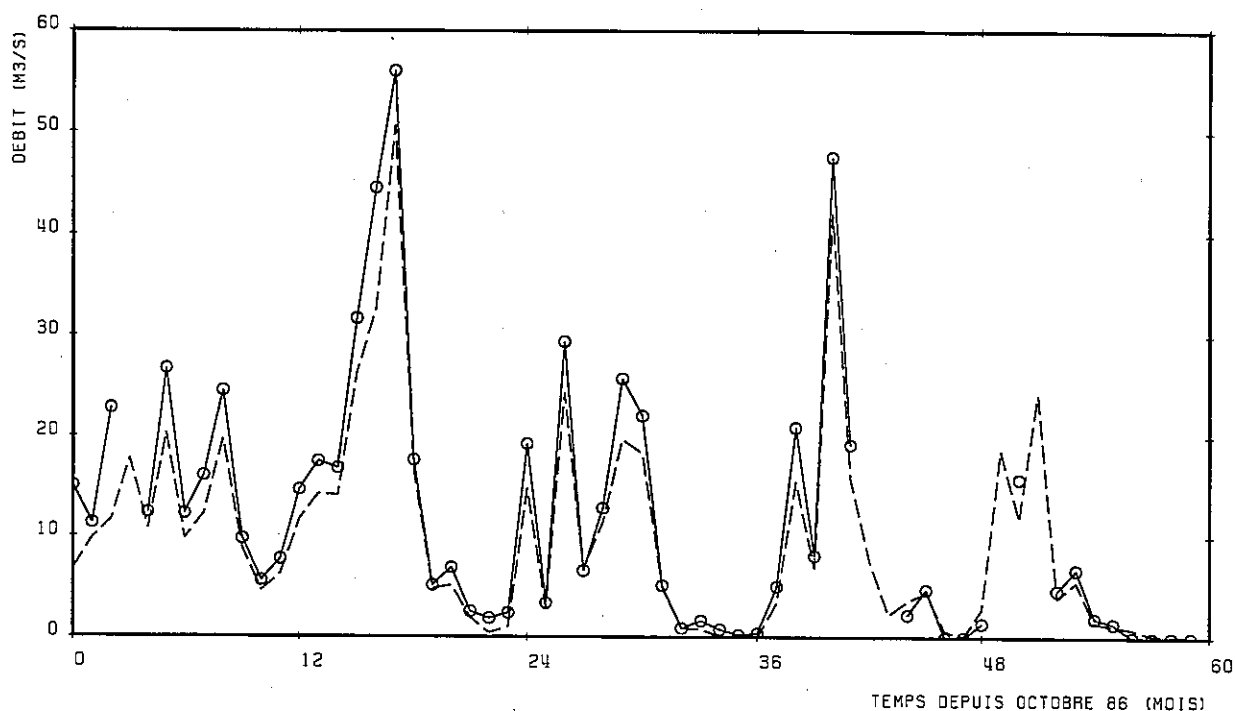


Fig. 20c – Débit de l'Ill à Oberhergheim, observé (-o-), simulé (- - -).

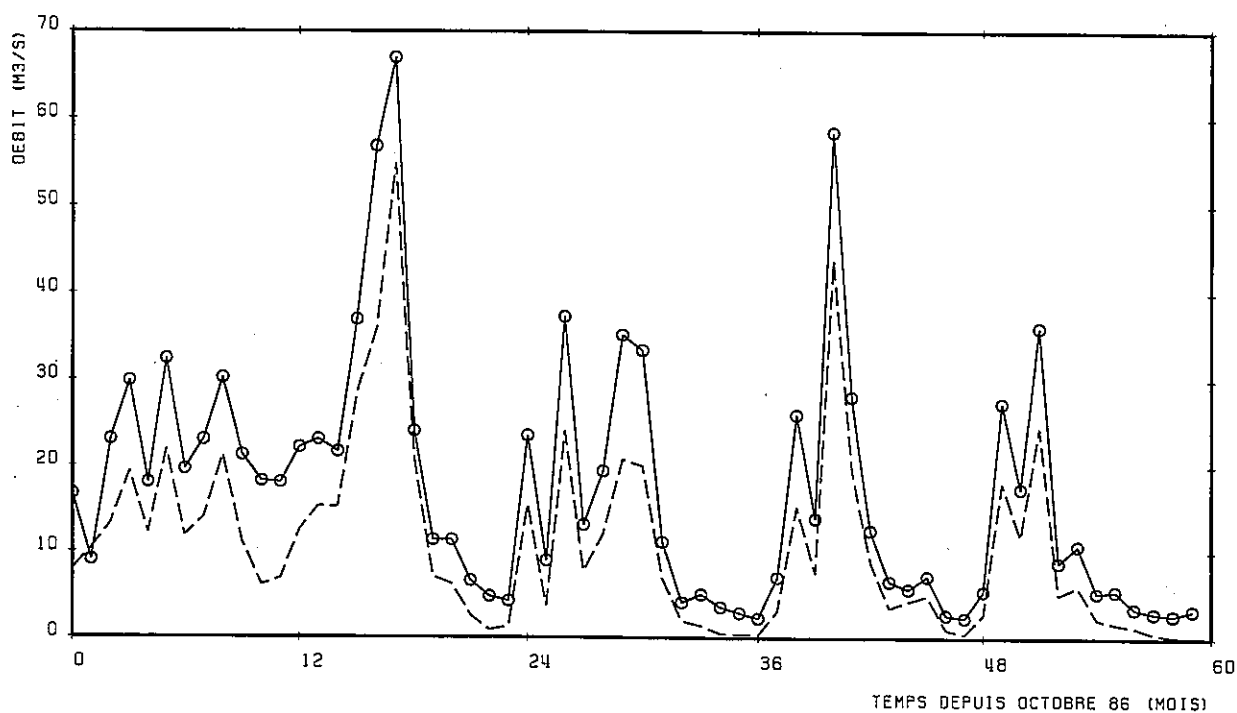


Fig. 20d – Débit de l'Ill à Colmar, observé (-o-), simulé (- - -).

- une période initiale de 2 à 3 mois, mal calée, correspondant à la mise en régime transitoire du modèle ; en effet, on part d'une situation calée en régime permanent sur les ME d'octobre 1986 qui, si elle représente correctement la piézométrie reflète mal la pluviométrie et le débit des rivières, lesquelles sont en crue à la date du 20 octobre 1986 (cf. § 2.3.2.) ;
- sur le reste de la période de simulation, un bon accord global entre le simulé et l'observé, très bon sur les étiages, un peu moins bon sur les pointes dont la restitution fine nécessiterait un pas de temps journalier au lieu de mensuel.

Pour la quatrième station, Colmar à l'aval du modèle, on observe un déficit systématique du simulé par rapport à l'observé. Ce déficit s'explique à la lecture du document fourni par la Navigation de Strasbourg (fig. 19) qui fait apparaître le canal de Colmar, non pris en compte dans le modèle, lequel transfère 2.5 m³/s vers l'Ill ; c'est bien l'ordre de grandeur du déficit apparaissant sur la figure 20d, en particulier aux étiages (et la station de jaugeage est bien située en aval de la confluence avec le canal !).

Comme dans le cas des piézomètres de la bande est, l'analyse des résultats conduit à découvrir les données manquantes du modèle et les écarts entre observé et simulé qui découlent de l'absence de ces données mettent en évidence leur impact physique sur le comportement du système global nappe/cours d'eau.

3.3. APTITUDE DU MODÈLE 2D A REPRÉSENTER LES LANGUES

3.3.1. Trajectoires

L'étape suivante de l'étude consiste à examiner si le modèle 2D ainsi calé est en mesure de restituer l'évolution des langues salées.

La figure 21 présente les trajectoires depuis les terrils obtenues à partir du champ de vitesse résultant du calage en régime permanent. Ces trajectoires sont superposées à un habillage qui correspond aux contours à 200 mg/l des deux langues est et ouest en 1990.

Ces trajectoires, qui correspondent à la piézométrie observée en 1986 (et qui varient peu en 1988 ou 1991), ne permettent pas d'expliquer la configuration des langues : en particulier, le changement brusque d'azimut de la langue est n'est pas restitué et les trajectoires issues des terrils Marie-Louise, Alex et Rodolphe sortent très rapidement de la langue ouest, qui n'aurait jamais pu exister dans ces conditions.

Il est clair que la forme des langues ne peut être expliquée par la seule piézométrie, décrite assez grossièrement à l'échelle régionale, qui a servi au calage hydrodynamique du modèle 2D.

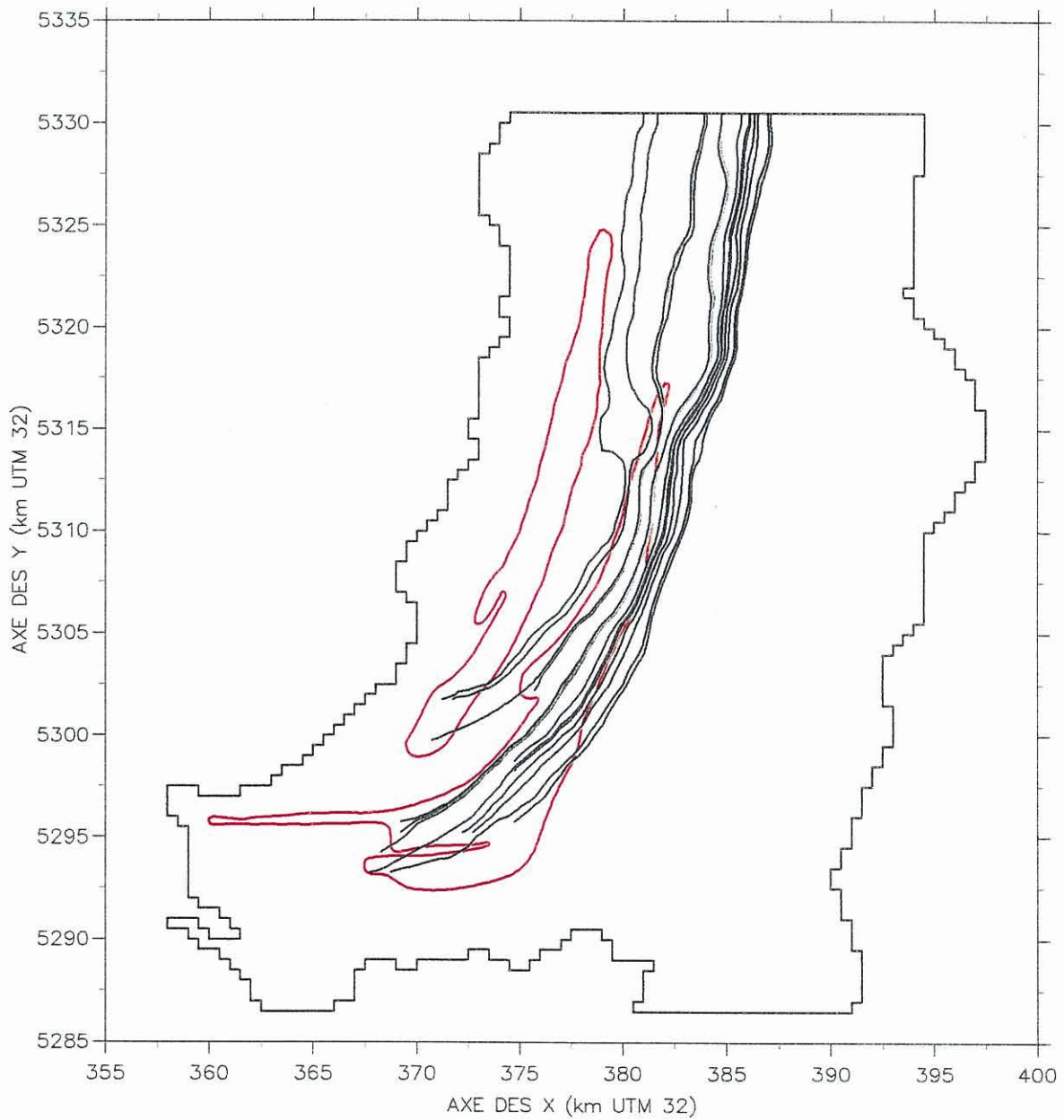


Fig. 21 - Trajectoires à partir des terrils – 2D.

3.3.2. Vitesses

Si l'on examine les temps de traversée en régime permanent depuis les terrils jusqu'à la limite nord du modèle (environ 40 km), on observe des durées de 100 à 200 ans selon la trajectoire considérée, soit des vitesses de 200 à 400 m/an.

Sachant que l'exploitation de la potasse a commencé au début du siècle, jamais la langue salée à 200 mg/l n'aurait pu atteindre Colmar en 1975 ainsi qu'il est observé dans la réalité. Les mesures ponctuelles de vitesse donnent par ailleurs des valeurs très variables, de 300 m/an à 36 km/an, donc globalement plus élevées que les valeurs simulées.

3.4. CONCLUSION SUR LES RÉSULTATS DU MODÈLE 2D

Si la piézométrie et ses variations temporelles sont bien restituées par le modèle monocouche 2D, par contre, le champ de vitesses modélisé ne permet pas de rendre compte de façon adéquate de la direction et de l'évolution des langues salées.

Par ailleurs, des tests comparatifs de transport hydrodispersif, avec ou sans prise en compte de la densité des eaux saumâtres, ont fait apparaître des résultats similaires, ce qui s'explique par le fait que la concentration, très forte au voisinage des terrils (de l'ordre de 50 g/l) décroît très rapidement quand on s'en éloigne ; de ce fait, la prise en compte des effets densitaires dans le transport ne paraît utile qu'au voisinage immédiat des terrils et n'apporte pas d'aide en 2D monocouche pour la restitution de la forme des langues.

Ceci veut dire que les calages réalisés, à partir des observations de la seule piézométrie, donnent lieu à un champ de paramètres aptes à reproduire seulement la piézométrie et ses évolutions. Pour restituer correctement le champ de vitesses, il faut procéder au calage de façon différente en intégrant d'une manière ou d'une autre l'information représentée par les langues salées qui fait intervenir des circulations à différentes profondeurs (cf. chapitre 6 et suivants).

Ceci a conduit à la réalisation du modèle multicouche décrit au chapitre suivant.

4. Construction d'un modèle conceptuel multicouche

La simulation numérique de l'évolution des langues de pollution salée issues des terrils du Bassin Potassique implique la modélisation des phénomènes de transport et de diffusion du sel avec, à priori, prise en compte de la densité des eaux salées qui peut atteindre la saturation au droit des terrils.

Or les modélisations réalisées en 2D monocouche ont montré que la densité ne joue un rôle important qu'au voisinage immédiat des terrils, ceci du fait de la décroissance très rapide des concentrations quand la distance aux terrils augmente. La prise en compte des effets densitaires dans la modélisation du transport de salure n'est donc pas déterminante pour la restitution des langues salées à l'échelle régionale et le facteur fondamental reste le champ de vitesses dû au gradient de charge. Ceci sera vérifié au chapitre 8.

Le champ de vitesses n'ayant pu être restitué de façon adéquate avec le modèle monocouche 2D et les observations sur ouvrages multicrêpinés permettant d'envisager l'existence des mouvements de la salure différenciés selon la profondeur, on a estimé qu'il fallait prendre en compte une représentation tridimensionnelle de l'écoulement.

Pour ce faire, la redéfinition des caractéristiques géométriques et lithologiques des alluvions s'est avérée primordiale.

4.1.ÉTAT DES CONNAISSANCES GÉOLOGIQUES SUR LES ALLUVIONS RHENANES

Du point de vue géologique, les alluvions grossières de la plaine rhénane ont été déposées au Quaternaire par le Rhin, apportant du matériel clastique d'origine alpine, et ses affluents qui érodaient les Vosges et la Forêt-Noire. Les alternances climatiques glaciaires et interglaciaires ont engendré des épisodes de transport de haute énergie entrecoupés de périodes plus calmes, où coexistaient terrasses exondées recouvertes de sédiments loessiques et zones de sédimentation clastique fine argilo-silto-sableuse. La structure des alluvions est donc très complexe ; les dépôts clastiques fins intercalés dans les alluvions grossières sont lenticulaires et entrecoupés de chenaux plus grossiers, et leur corrélation est donc assez aléatoire.

Cependant les hydrogéologues allemands du Bade-Wurtemberg ont traditionnellement distingué trois sous-niveaux dans les alluvions rhénanes, d'après les observations faites au nord de Karlsruhe, où les intercalations fines ont des épaisseurs et des continuités beaucoup plus importantes qu'en Alsace. Ils distinguent ainsi des alluvions supérieures : *oberes Kieslager* (OKL), des alluvions moyennes : *mittleres Kieslager* (MKL) et des alluvions inférieures : *unteres Kieslager* (UKL), séparées par des intercalaires silteux

(*oberes Zwischenhorizont* (OZH) et *unteres Zwischenhorizont* (UZH) respectivement) (Elsass et Rau, 1995).

Ces vues concrétisées par une cartographie hydrogéologique du Service géologique du Bade-Wurtemberg (GLA, 1977) sont aujourd'hui contestées, les datations ayant montré la difficulté de corréler entre eux les intercalaires clastiques fins rencontrés dans les forages. Les travaux menés dans le cadre du projet européen LIFE de modélisation hydrodynamique de la nappe du Rhin Supérieur ont cependant montré qu'il était possible d'appliquer un tel schéma aux alluvions rhénanes du secteur Strasbourg-Offenburg, où il existe un niveau intercalaire supérieur suffisamment étendu pour être pris en compte dans une modélisation régionale, bien que composé d'au moins trois niveaux distincts se relayant et étagés sur une dizaine de mètres de puissance (BRGM-Région Alsace, 1996).

Dans le secteur qui nous intéresse et qui correspond à la zone 4 du projet LIFE, l'existence d'intercalaires argileux était connue localement côté français. Côté allemand, la plaine est en fait très réduite et le bassin de Freiburg ou Markgräflerland correspond à des formations de piémont de la Forêt-Noire très développées. Les hydrogéologues allemands y distinguent traditionnellement deux séquences d'alluvions : une séquence supérieure perméable et une séquence inférieure d'alluvions très altérées et très peu perméables, au point qu'elles ne sont pas incluses dans l'aquifère (GLA, 1977).

Des contacts ont été pris avec les géologues du GLA afin de faire le point sur l'état des connaissances sur l'aquifère, et des sondages ont été examinés en commun de part et d'autre du Rhin : sondage de Bremgarten en Allemagne, sondage de IPE IV à Strasbourg. Herr Wirsing (GLA) a attiré notre attention sur le sondage de Geiswasser (indice national 02391X0001) foré en 1928 près du Rhin. Ce forage levé à l'époque par N. Théobald (1948), et mentionné dans la notice de la feuille Freiburg (Groschopf *et al.*, 1996), a servi de référence pour les cartes hydrogéologiques allemandes, bien qu'il ait pu être interprété de différentes façons. Ce forage a traversé la plus grande épaisseur d'alluvions de la plaine d'Alsace. En aval, les alluvions sont moins puissantes, c'est pourquoi on parle de la fosse de Geiswasser.

Le forage de Geiswasser présente la succession suivante de formations alluviales quaternaires :

- une séquence supérieure de sables, graviers et galets d'origine alpine non altérés (0 - 41 m) ;
- une séquence moyenne de sables, graviers et galets alpins légèrement altérés (41 - 82 m) ;
- une intercalation de silt sableux calcaireux jaune ("argile jaune") (82 - 83 m) ;
- une séquence inférieure de sables, graviers et galets alpins très altérés, souvent cimentés ("conglomérats"), dans laquelle on observe des galets de calcaire oligocène d'origine locale (93 - 201 m) ;
- une séquence basale argileuse et sableuse, avec de petits galets, surmontant les marnes tertiaires (201 - 236 m).

Cette succession d'alluvions rhénanes rappelle évidemment la tripartition des hydrogéologues allemands. La séquence basale correspond, elle, à ce que les géologues français appellent la "formation de transition", série de quelques mètres à une dizaine de mètres de niveaux argileux souvent rencontrée à la base des alluvions dans le Bassin Potassique. Quelques forages ont rencontré des sables entre ces argiles "de transition" et les marnes tertiaires, que l'on a pu attribuer, de façon très hypothétique, au Pliocène.

L'examen détaillé des coupes des sondages du Bassin Potassique enregistrés dans la Banque du sous-sol indique que les alluvions (sables, graviers et galets) sont essentiellement d'origine vosgienne. La partie inférieure des alluvions est souvent notée comme plus argileuse ou plus sableuse ; on y signale aussi fréquemment des galets altérés ou corrodés. En traçant des coupes sériées, il semble bien que l'on puisse systématiquement distinguer une séquence supérieure d'alluvions vosgiennes fraîches surmontant une séquence plus ancienne, plus argilo-sableuse et à galets corrodés. Une intercalation argileuse de 1 à 2 m de puissance sépare localement les deux séquences. On retrouve ainsi la subdivision en deux séquences d'alluvions connue côté allemand dans la région de Freiburg.

La coupe de référence pour ce secteur peut être prise au puits Anna (indice national 04132X0002), décrit dans un document des Mines Domaniales de Potasse d'Alsace de 1936 :

- une séquence supérieure de sables et galets d'origine vosgienne (6 - 11 m) ;
- une séquence moyenne de graviers vosgiens "en partie fortement décomposés et par endroit accompagnés de limon" (11 - 35 m) ;
- une séquence inférieure où le matériel vosgien est mélangé avec du matériel alpin (35 - 41,4 m) ;
- un niveau basal de "tertiaire décomposé et remanié avec galets du Rhin isolés", surmontant les marnes tertiaires (41,4 - 44 m).

4.2. SUBDIVISIONS ADOPTÉES

Le schéma indiqué sur la figure 22 peut ainsi être adopté pour les subdivisions de l'aquifère rhéman dans le secteur situé entre Mulhouse et Colmar : sur les flancs des Vosges et de la Forêt-Noire, les cônes de déjection des alluvions en provenance des massifs peuvent être subdivisés en deux séquences, une ancienne plus altérée et de plus faible perméabilité, et une récente moins altérée et plus perméable. Côté allemand, le contraste de perméabilité est tel que l'on n'a pas jugé utile de compter la séquence ancienne dans l'aquifère. Côté alsacien, le contraste est moins important, ce qui explique que cette distinction n'ait jamais été faite très clairement.

On notera également que dans les vallées vosgiennes les alluvions récentes occupent les fonds de vallée tandis que les alluvions anciennes sont préservées dans des terrasses actuellement perchées ; pour la Doller, le passage d'une disposition à l'autre se fait au niveau de Pont d'Aspach (F. Ménillet (BRGM) , communication orale). Ceci reflète les

mouvements tectoniques quaternaires : surrection des Vosges, de la Forêt-Noire, du horst de Mulhouse, subsidence de la fosse de Geiswasser.

Le milieu de la plaine d'Alsace est occupé par des alluvions rhénanes à prédominance alpine, que l'on peut grossièrement subdiviser en trois sous-niveaux d'alluvions de plus en plus altérés et de moins en moins perméables en profondeur. Le manque de forages bien décrits ne permet pas de préciser la zone de passage des alluvions des bordures aux alluvions rhénanes ; on ne peut affirmer avec certitude que la séquence supérieure des alluvions rhénanes correspond effectivement à la séquence supérieure des alluvions vosgiennes ou schwarzwaldiennes, comme nous l'avons supposé dans notre schéma.

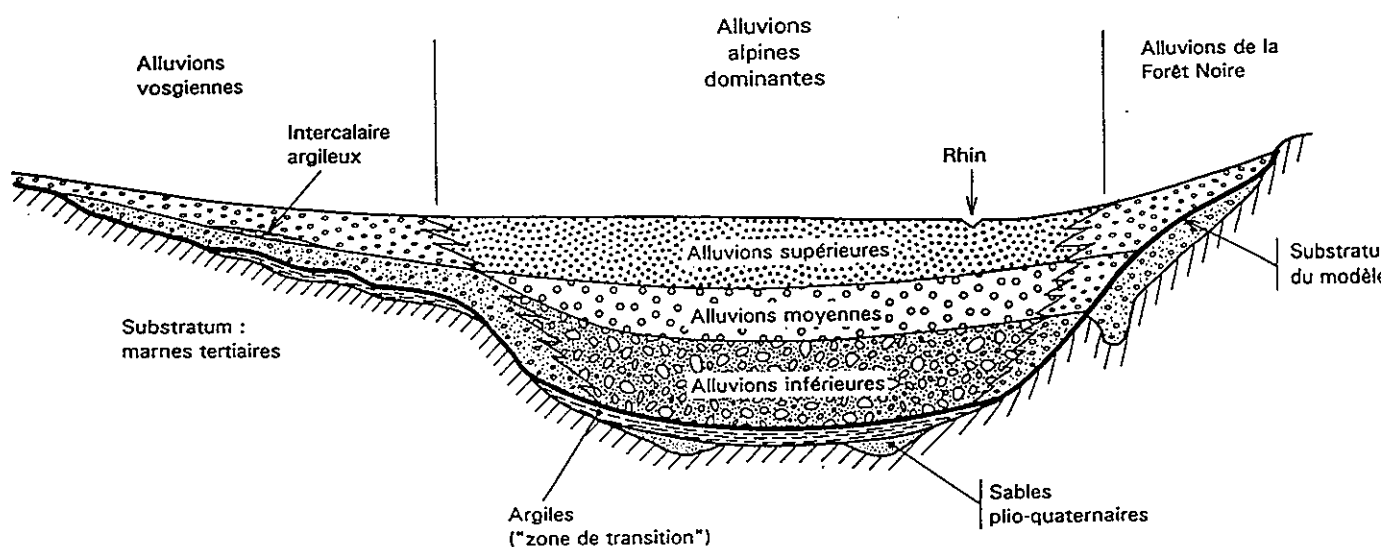


Fig. 22 – Schéma de principe des subdivisions adoptées.

4.3. MÉTHODE DE TRAVAIL

La zone 4 définie dans le cadre du projet LIFE s'étend sur plus de 40 km de Mulhouse au sud à Colmar au nord. Elle inclut les cônes d'épandage de la Thur et de la Doller. Une extraction de la Banque du sous-sol a permis d'identifier 1300 forages répertoriés avec des coupes géologiques. Les travaux ont été menés en plusieurs étapes de préparation des données puis d'interprétation cartographique.

4.3.1. Codification

Dans une première étape, un code de faciès a été attribué aux passes lithologiques des forages extraits de la Banque du sous-sol suivant la méthodologie développée dans le

cadre du projet Interreg de Cartographie hydrogéologique transfrontalière (Elsass et Rau, 1995). Les codes faciès à 4 caractères sont signifiants et identifient des faciès-types de l'aquifère (graviers fins, graviers sableux, sables graveleux, etc.), auxquels on peut associer une perméabilité moyenne. Cette codification permet de réaliser des restitutions graphiques et des traitements numériques après importation des données dans le logiciel GDM du BRGM.

4.3.2. Coupes sériées

Dans une deuxième étape, les données des 1300 forages ont été importées dans GDM pour Windows et des coupes sériées verticales ont été tracées, de direction W-E dans la plaine et S-N dans le cône d'épandage de la Thur. Ces coupes ont permis de vérifier qu'il était effectivement possible de distinguer les deux séquences d'alluvions dans le cône de la Thur et plus généralement sur la bordure ouest de la plaine. Elles ont également permis de vérifier la continuité des lentilles argileuses intercalaires. Dans la zone de plaine par contre les forages profonds sont des forages de recherche de potasse ou d'exploration pétrolière, qui détaillent rarement la coupe des alluvions, et permettent donc seulement de tracer la base de l'aquifère.

4.3.3. Calcul de perméabilités

Dans une troisième étape, des valeurs de perméabilité ont été attribuées aux faciès-types et des perméabilités moyennes par tranches de 10 m de profondeur ont été calculées avec GDM, en conservant seulement les sondages décrits en détail et en éliminant les coupes non significatives. Ces perméabilités moyennes ont été reportées sur des cartes suivant un code couleur (de rouge pour peu perméable à bleu pour très perméable). Cette méthode, qui dans la zone 2 du projet LIFE, avait permis de délimiter des zones de différentes perméabilités à cause du contraste entre les sables vosgiens et les graviers rhénans (BRGM-Région Alsace, 1996b), ne donne pas de bons résultats dans la zone 4. En effet, la description des forages par les foreurs ou les hydrogéologues privilégie la granulométrie (sables-graviers-galets) au détriment de la lithologie (nature des galets), de sorte que le contraste de perméabilité entre alluvions rhénanes et vosgiennes ne ressort pas bien dans le secteur de la zone 4.

4.3.4. Reports cartographiques

Sur les cartes de perméabilités par tranches de 10 m, on a également reporté des symboles particuliers à l'emplacement des forages, indiquant d'une part la présence et la profondeur de faciès à galets altérés, et d'autre part la profondeur des intercalaires argileux rencontrés dans la tranche de profondeur correspondante. Ces reports ont été utiles pour la cartographie des épaisseurs des alluvions supérieures.

Une extraction des données d'essais de pompage collectées dans le cadre de la Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan (programme cofinancé par la Région Alsace et le

BRGM : BRGM-Région Alsace, 1996c) a également été réalisée sous MapInfo. Les résultats d'essais de pompage donnent généralement des valeurs de débit spécifique, les perméabilités ne sont calculées que dans une minorité de cas. On a réalisé deux cartes, l'une des forages dont les crépines se situent en dessous de 20 m de profondeur (187 ouvrages), l'autre des forages dont les crépines se situent entièrement au-dessus de 20 m (96 ouvrages). Sur ces cartes ont été reportées en points de couleur les classes de débit spécifiques (analyse thématique des données), et à côté ont été reportées les valeurs numériques des perméabilités lorsqu'elles étaient disponibles.

4.4. RÉSULTATS

4.4.1. Cartographie des alluvions supérieures

Elle est donnée à la figure 23a. Dans le secteur des alluvions vosgiennes du cône de déjection de la Thur (Bassin potassique *sensu stricto*), les isocontours des épaisseurs des alluvions supérieures ont été tracés d'après la carte des profondeurs des intercalaires argileux dans la tranche des 20 premiers mètres et/ou des profondeurs des premiers faciès à galets corrodés, en s'aidant des interprétations des coupes sériées. Les épaisseurs varient de 10 à 15 m, les niveaux argileux paraissant plutôt moins profonds (paléoterrasses séparées par des paléochenaux ?). On sait par ailleurs que la terrasse située entre la Doller et la Thur est constituée d'alluvions anciennes très peu perméables.

Dans le centre de la plaine, il n'y a aucune information en dehors du forage de Geiswasser déjà mentionné et du forage DP34 (indice national 03788X0007), pour lequel nous disposons d'un levé détaillé de la granulométrie. Au sud, dans le Fossé de Sierentz, nous savons qu'il n'y a pas d'alluvions anciennes, et que la profondeur des alluvions varie entre 20 et 30 m. Les alluvions anciennes apparaissent au débouché nord du Fossé de Sierentz, où deux forages (04138X0174 et 04138X0136) nous donnent 30 m d'alluvions récentes surmontant 5 à 7 m d'alluvions anciennes. On en déduit que la nappe d'alluvions récentes présente une épaisseur d'une trentaine de mètres au sud du secteur d'étude.

Aussi a-t-on tracé dans un premier temps les épaisseurs des alluvions rhénanes supérieures *sensu lato*, comprenant alluvions supérieures et moyennes. Les courbes de profondeur ont été tracées dans la plaine parallèlement à celles du substratum de façon à obtenir une augmentation de puissance régulière du sud jusqu'à la fosse de Geiswasser. A l'est, les courbes ont été calées sur les interprétations allemandes de l'épaisseur des alluvions supérieures (GLA, 1977, Herrmann et Stober, 1996).

Le dôme de Hettenschlag est un dôme de sel diapirique où les épaisseurs d'alluvions se réduisent à moins de 30 m, alors qu'elles sont de plus de 100 m de part et d'autre. Il est très probable que la montée diapirique ait continué jusqu'au Quaternaire récent. On a donc supposé que les mouvements quaternaires réduisaient l'épaisseur des alluvions récentes tout au long de la crête orientée nord-sud du diapir de Meyenheim.

A partir des cartes de répartition des débits spécifiques, on a ensuite établi des isocontours (débits spécifiques faibles, moyens, etc.), dont les valeurs ont été définies à partir des valeurs numériques de perméabilité mesurées localement ; la correspondance est généralement très bonne. A l'est, les courbes ont été raccordées à celles de la carte récente des perméabilités des alluvions inférieures à 30 m de profondeur du GLA (Herrmann *et al.*, 1996).

Dans les alluvions vosgiennes, les perméabilités varient entre 0.1 et 10^{-3} m/s, ce qui est conforme aux modèles monocouches antérieurs. Dans les alluvions rhénanes de la plaine, elles augmentent des bordures vers le centre plaine pour atteindre des valeurs mesurées de 22 à 25×10^{-3} m/s. De telles valeurs sont conformes aux cartographies allemandes récentes mais ne paraissent cependant pas réalistes sur des épaisseurs pouvant atteindre 80 m, par comparaison avec les valeurs du modèle monocouche LIFE qui dépassent peu 5×10^{-3} m/s pour une épaisseur de 160 m. Un calcul rapide montre qu'une perméabilité de 15×10^{-3} sur 40 m équivaut à une perméabilité de 5×10^{-3} sur 160 m. Aussi a-t-on limité la zone centrale à une valeur de 15×10^{-3} m/s.

4.4.2. Cartographie des alluvions moyennes

Etant donné les difficultés de concilier les valeurs de perméabilité très élevées rencontrées dans les alluvions rhénanes près de la surface avec les valeurs adoptées par les modèles antérieurs, il a paru utile de distinguer une séquence d'alluvions rhénanes supérieures fraîches et très perméables et une séquence d'alluvions moyennes plus altérées et supposées moins perméables. On a supposé qu'elles existaient lorsque les épaisseurs des alluvions supérieures dépassaient 30 m (ligne pointillée sur la carte de la figure 23b) et on leur a attribué des isocontours d'épaisseur parallèles au substratum.

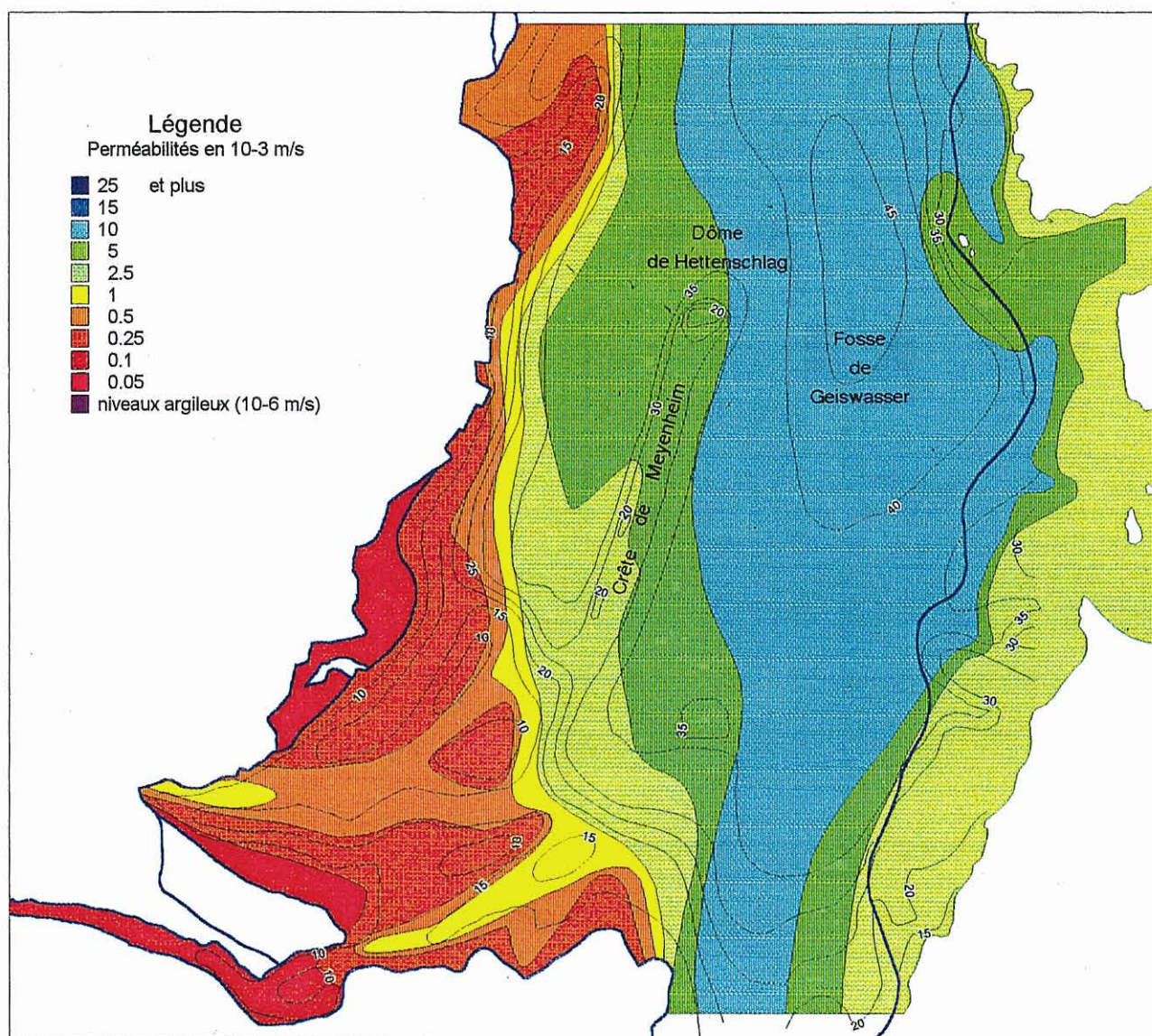
Les valeurs de perméabilité ont été extrapolées des valeurs cartographiées côté allemand pour la tranche d'alluvions entre 30 et 60 m de profondeur (Herrmann *et al.*, 1996). On a par contre supposé qu'à l'ouest l'influence des alluvions vosgiennes de bordure se faisait sentir et diminuait la perméabilité.

Les niveaux argileux situés proches de l'interface entre les alluvions supérieures et les alluvions inférieures ont été cartographiés lorsqu'ils semblaient présenter une continuité. L'image ainsi donnée est certainement très simplifiée par rapport à la réalité, mais valable à l'échelle du 1/250 000 qui correspond au maillage du modèle.

La perméabilité des niveaux argileux a été prise par analogie à 10^{-6} m/s.

4.4.3. Cartographie des alluvions inférieures

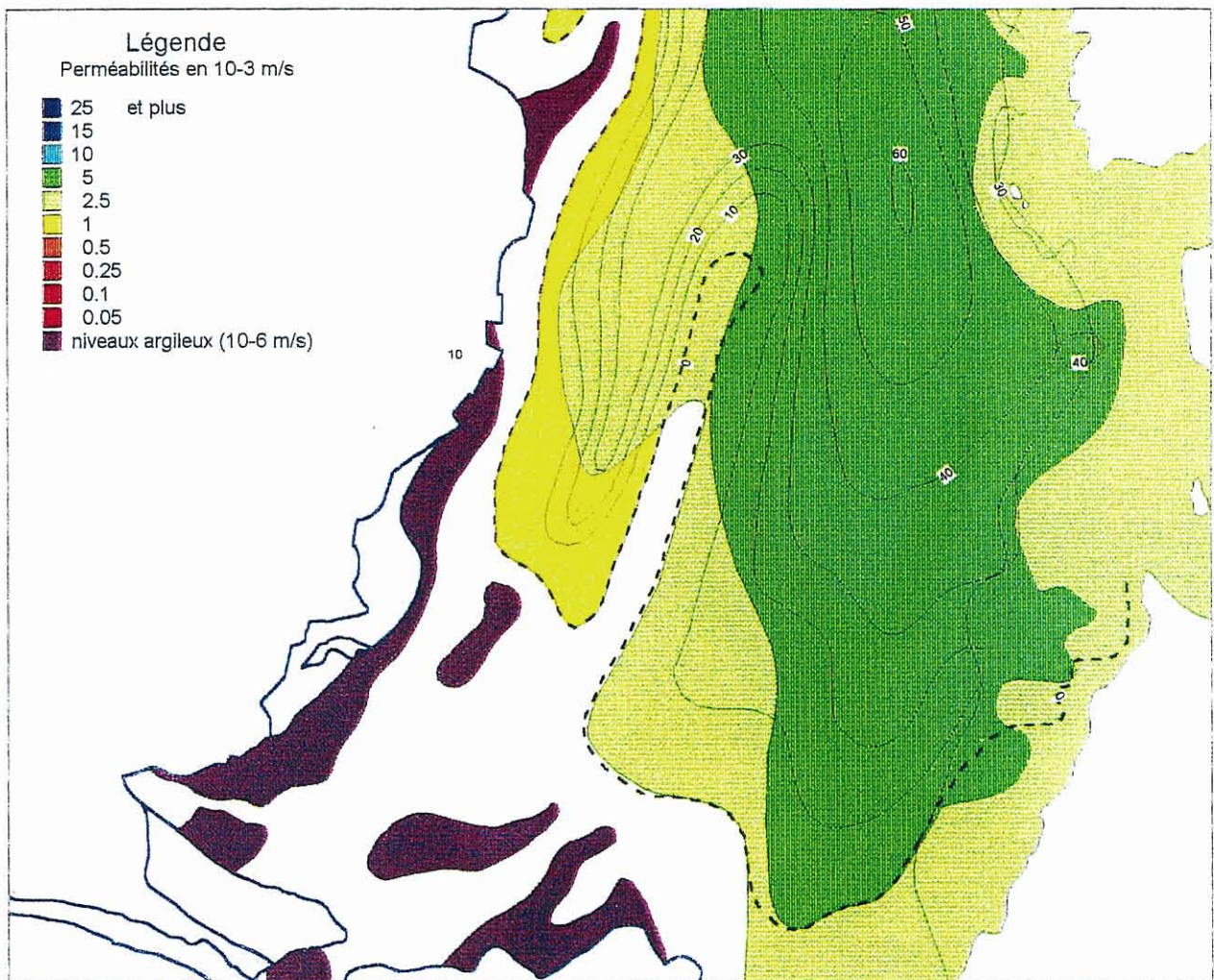
Les épaisseurs des alluvions inférieures ont été déduites de la carte du substratum par différence. Aussi est-ce cette carte qui est représentée sur la figure 23c. Cette cartographie du substratum avait été établie antérieurement dans le cadre du projet LIFE (BRGM-Région Alsace, 1996a). Le substratum de la partie correspondant au Bassin



Isopaques des alluvions supérieures en m

Echelle 1/300 000

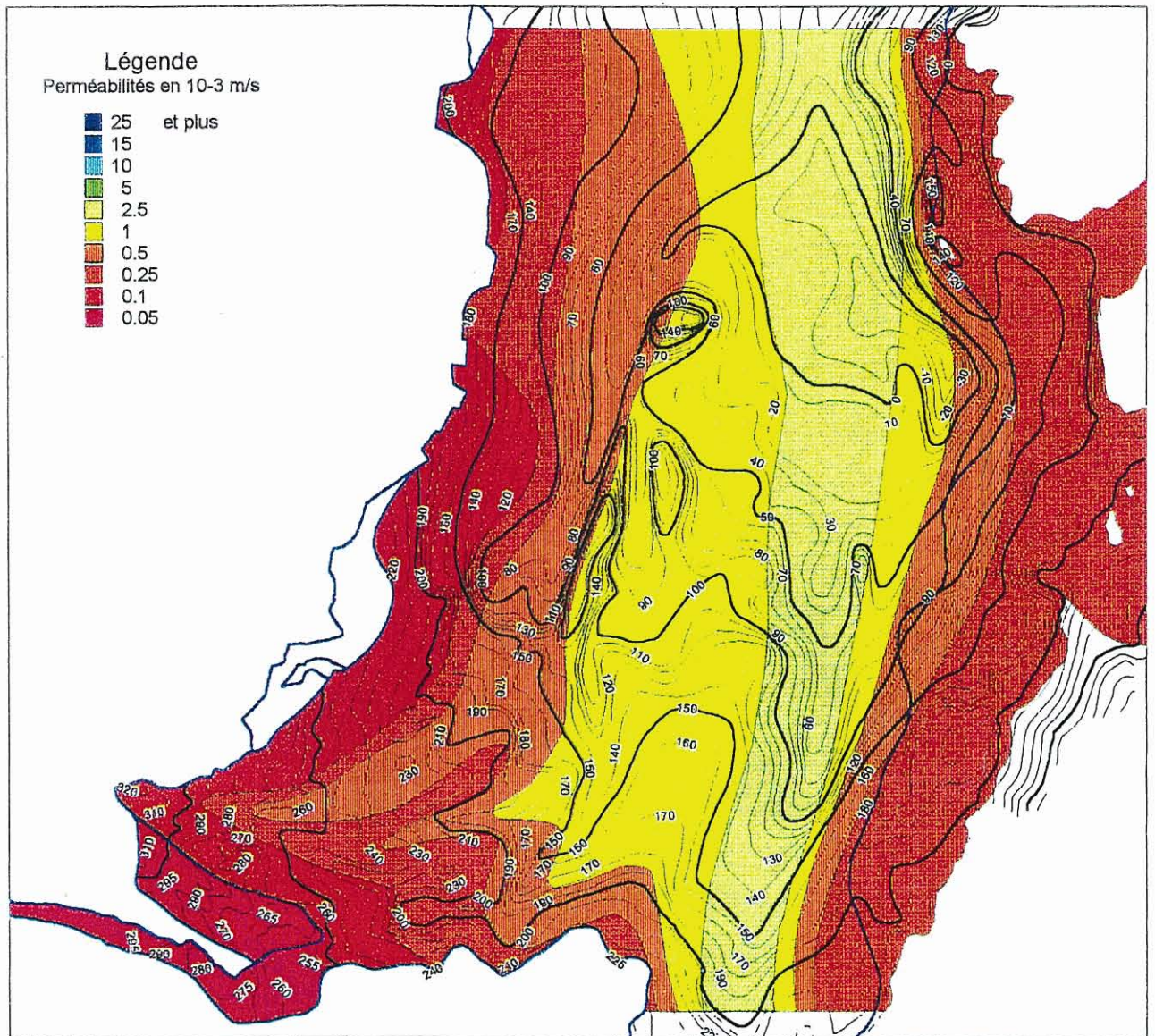
Fig. 23a - Alluvions supérieures - Carte des perméabilités estimées.



Isopaques des alluvions moyennes en m
En pointillé : limite supposée des alluvions moyennes

Echelle 1/300 000

Fig. 23b - Alluvions moyennes – Carte des perméabilités estimées.



Isohyptes du substratum et cote en m

Echelle 1/300 000

Fig. 23c - Alluvions inférieures - Carte des perméabilités estimées.

Potassique a été revu par rapport au modèle LIFE, qui incorporait un substratum interpolé de façon automatique par le bureau d'études GEMMES. La zone située près du Rhin a également fait l'objet de quelques retouches en accord avec les géologues du GLA (Herr Wirsing).

Nous disposons de nombreuses mesures de débit spécifique et de quelques perméabilités dans les alluvions anciennes du Bassin Potassique. Les valeurs sont souvent peu différentes de celles des alluvions supérieures et ont été cartographiées entre 0.1 et 0.5×10^{-3} m/s. Côté allemand, on a repris la cartographie récente du GLA pour la tranche inférieure à 60 m, qui donne des ordres de grandeur de perméabilités tout à fait similaires (Herrmann *et al.*, 1996).

Pour la partie centre plaine, nous ne disposons d'aucune donnée. Nous avons supposé, par analogie, des perméabilités de l'ordre de 10^{-3} m/s et un chenal central d'alluvions rhénanes plus "propres" à 2.5×10^{-3} m/s.

4.5. MAILLAGE

Les cartes d'épaisseur en isovaleurs des alluvions supérieures et moyennes ont été transformées en maillage dans la grille du modèle sous GDM pour Windows. L'interpolation a été obtenue par krigeage linéaire sans dérive avec un voisinage rectangulaire de 6 par 6 km. L'épaisseur des alluvions inférieures a ensuite été déduite par différence de l'épaisseur totale des alluvions, calculée d'après le modèle du substratum de la zone 4 de LIFE.

5. Construction et calage du modèle numérique multicouche

Ce chapitre décrit les étapes suivantes :

- construction du modèle discrétisé multicouche au maillage horizontal actuel de 500 m, à partir de la topographie, du substratum et des trois couches alluviales identifiées au chapitre 4, c'est-à-dire définition de l'extension spatiale de chaque couche, des zones de paramètres, des conditions aux limites, répartition des apports et prélèvements dans chaque couche ;
- calage des paramètres hydrodynamiques à partir des observations de la piézométrie, et de la forme des langues salées.

5.1. CONSTRUCTION DU MODELE NUMÉRIQUE

5.1.1. Nouvelles données

Au chapitre 4, on a rappelé comment trois couches plus ou moins aquifères ont été identifiées à partir des coupes sériées des forages, soit :

- alluvions récentes (couche 1) ;
- alluvions intermédiaires plus intercalaires argileux (couche 2) ;
- alluvions anciennes (couche 3).

Il en est résulté la création des données de base suivantes pour la construction du modèle numérique multicouche :

- épaisseurs de chaque couche interpolées sur la grille du maillage de 500 m ;
- ordres de grandeur des perméabilités estimées à partir des informations lithologiques et des résultats de pompages d'essai.

Les perméabilités avant calage (cf. fig. 23 a à c) sont estimées à des valeurs environ 10 fois plus fortes dans la couche 1 que dans la couche 3.

Les épaisseurs de chaque couche (fig. 24 a à c) augmentent globalement du sud-ouest vers le nord-est, depuis une valeur parfois très faible (de l'ordre du mètre) jusqu'à environ 50 m pour la couche 1, 60 m pour la couche 2 et 200 m pour la couche 3. La couche 2 disparaît complètement sur une partie du domaine d'étude, en particulier dans la zone du Bassin Potassique où seuls quelques intercalaires argileux discontinus sont décelables.

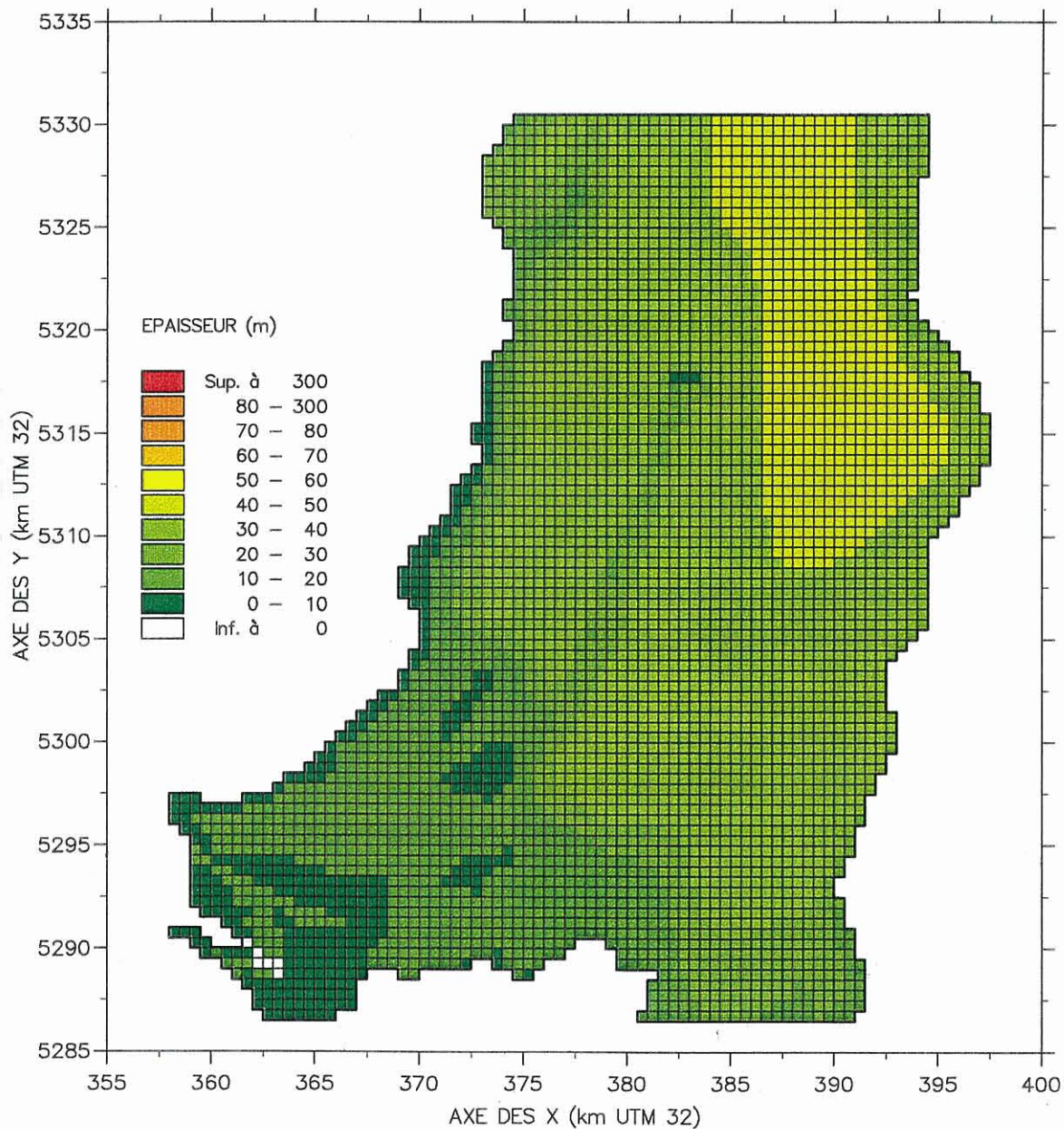


Fig. 24a - Epaisseurs des alluvions supérieures.

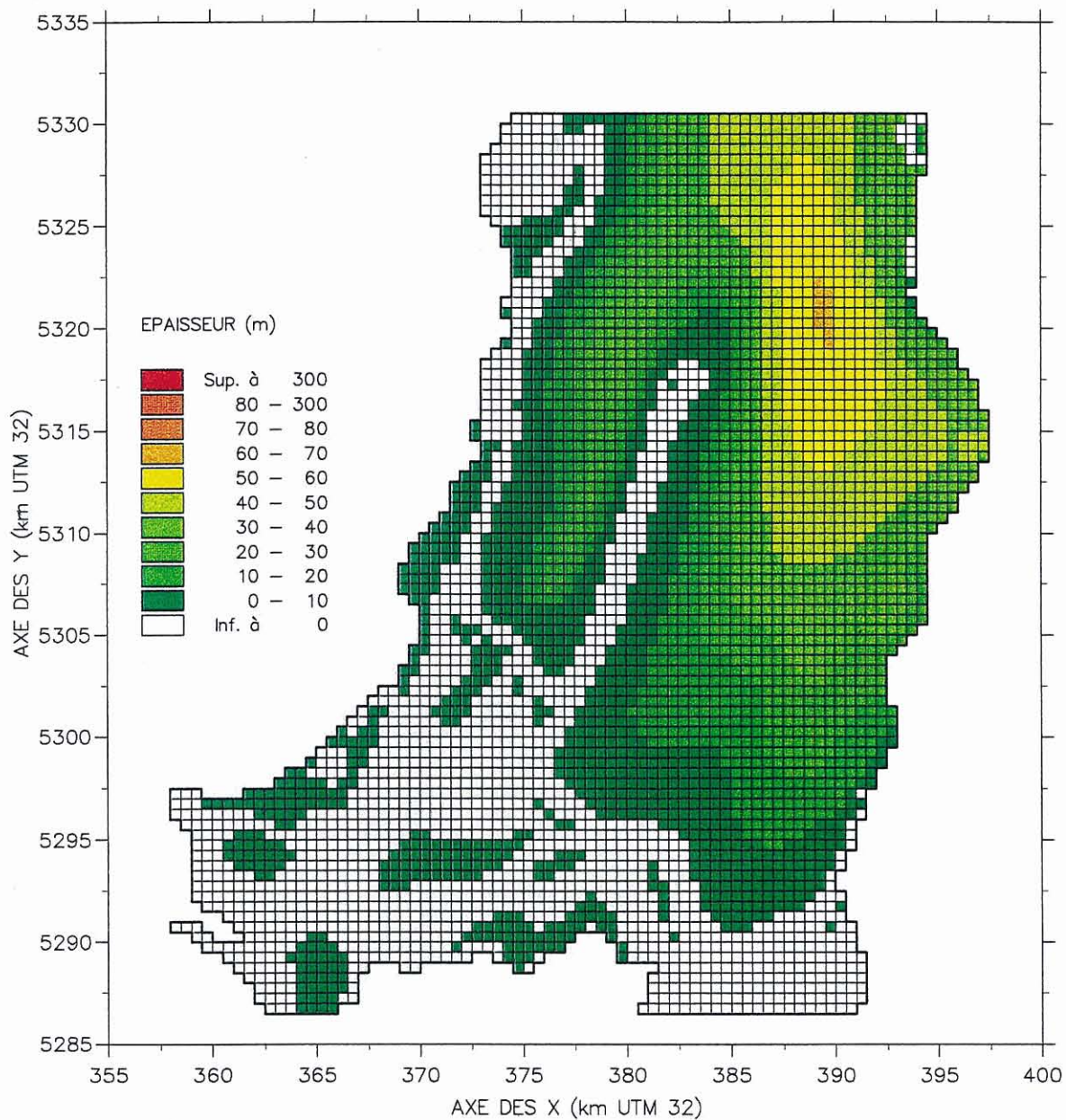


Fig. 24b - Epaisseurs des alluvions moyennes + intercalaires argileux.

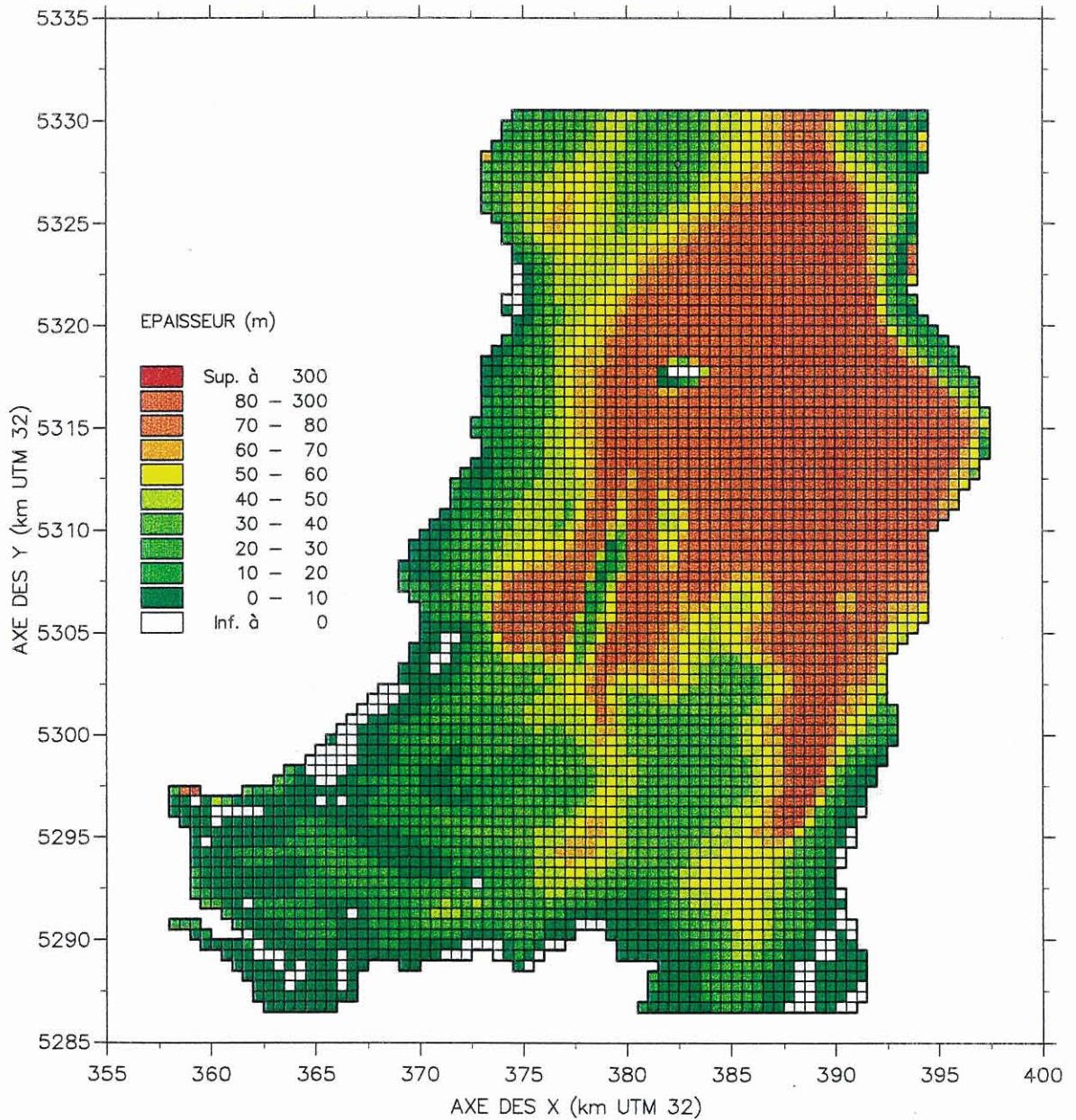


Fig. 24c - Epaisseurs des alluvions inférieures.

5.1.2. Construction d'un modèle robuste

Dans un premier temps, comme on pensait que les effets densitaires seraient prédominants, on avait envisagé, pour une meilleure prise en compte de ces effets, de subdiviser chaque couche physique en trois sous-couches de mailles (cf. rapport d'avancement). Après examen des résultats du transport densitaire en 2D (cf. § 3.4), on a estimé que ce découpage n'était pas indispensable, d'autant plus qu'on conservait une grande taille de maille (500 m) dans le plan horizontal. Le modèle numérique comporte donc seulement 3 couches de mailles, une par couche aquifère.

On a conservé l'extension horizontale de chaque couche telle que définie par le modèle conceptuel aux modifications suivantes près :

- retrait des intercalaires argileux de la couche 2, difficiles à prendre en compte dans la géométrie de la couche ;
- rectification légère des limites de la couche 3 pour éviter d'avoir des épaisseurs de couche trop faible (seuil fixé à 1 m).

Il a fallu ensuite affecter à chaque couche les différentes données nécessaires au calcul soit :

- *prélèvements annuels* : attribution à chaque couche des débits mesurés dans une maille donnée, soit en tenant compte des cotes des crépines dans les forages, lorsqu'elles sont connues et des perméabilités estimées de chaque couche soit, en absence d'information sur les cotes des crépines, en répartissant les débits au prorata des transmissivités estimées par couche (pour plus de détail voir § 8.3) ;
- *conditions aux limites* : on a conservé celles du modèle 2D pour la couche 1 soit les valeurs de flux entrant sur les limites ouest et sud-ouest, un flux nul sous le Rhin et des potentiels imposés ailleurs (cf. § 3.1.2.) ; pour les 2 autres couches on a conservé les potentiels imposés et choisi une condition de flux nul ailleurs (ce qui revient à supposer qu'il n'y a pas d'alimentation en profondeur depuis les Vosges et le Sundgau) ;
- *recharge* : on a conservé les paramètres calés en 2D ;
- *paramètres du réseau hydrographique* : on a repris les paramètres calés en 2D comme point de départ du calage multicouche.

Des essais avant calage ont permis d'effectuer un certain nombre d'ajustements :

- corrections ponctuelles du substratum de chaque couche pour éviter les dénoyages avant calcul ;
- corrections ponctuelles des perméabilités estimées avant calage dans les couches 1 (alluvions récentes) et 3 (alluvions anciennes), également pour correction des dénoyages, en particulier dans le Bassin Potassique où les épaisseurs aquifères sont faibles et les prélèvements élevés.

Au final, vingt zones de perméabilité (10 dans la couche 1, 3 dans la couche 2 et 7 dans la couche 3) sont identifiées avant calage, soit 18 zones "physiques" déterminées par la

géologie et la géophysique comme indiqué au chapitre 4 et 2 zones "numériques" d'extension très limitée.

A noter que l'option intitulée "calcul en pseudo-ZNS" a été d'une grande utilité pour un contrôle optimal du dénoyage ; cette option constitue manifestement l'un des atouts qui assurent au code MARTHE une très grande robustesse dans les situations numériquement difficiles.

5.2. CALAGE EN RÉGIME PERMANENT

5.2.1. Hypothèses et méthode

Les perméabilités du modèle multicouche ont été recalées par zones, en régime permanent, sur la situation des ME (oct. 86).

Pour ce faire, on a effectué plusieurs itérations du processus suivant :

- calage automatique des perméabilités par zones ; la piézométrie réellement observée étant plutôt celle de la couche du haut (pas de piézomètre profond), on en a tenu compte dans le calage automatique en prenant la même piézométrie observée pour les trois couches et en accordant un poids 4 fois plus fort à celle de la couche 1 qu'à celle des deux autres ;
- examen des cartes piézométriques simulées, des champs de vitesse et des trajectoires à partir des terrils ;
- ajustement du coefficient d'anisotropie verticale et redéfinition des zones de perméabilités ; on a procédé en jouant de préférence sur les zones du centre plaine dans les couche 2 et surtout 3 où les perméabilités estimées sont le moins bien connues et en touchant le moins possible aux zones de la couche 1 supposées mieux connues (cf. chap. 4).

La zone du Bassin Potassique et la bordure sud du modèle, zone "sensible", déjà en 2D, d'un point de vue numérique, du fait de la faible épaisseur d'aquifère et des forts prélèvements, a présenté quelques problèmes (dénoyages ponctuels de la couche 1) ne remettant pas en cause la convergence des calculs et le résultat final.

5.2.2. Résultats

Les figures 25a à c présentent les cartes de perméabilités calées de cette manière, avec habillage par les contours des langues à 200 mg/l. Un rapprochement avec les cartes des zones de perméabilités avant calage (cf. fig. 23a à c) montre que la répartition estimée est bien conservée pour les couches 1 et 2 et davantage perturbée pour la couche 3.

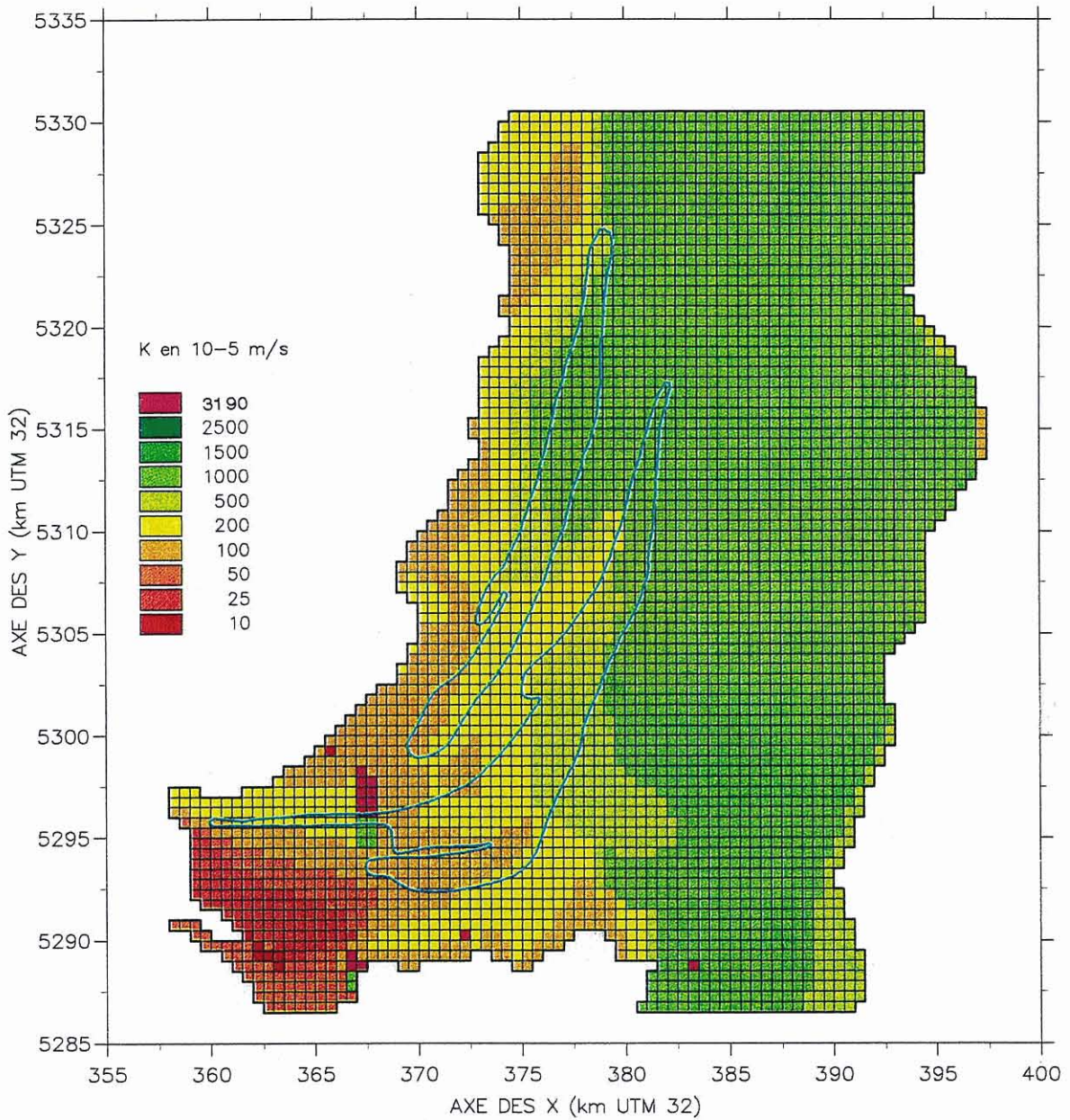


Fig. 25a - Modèle multicouche - Perméabilités de la couche 1 (après calage).

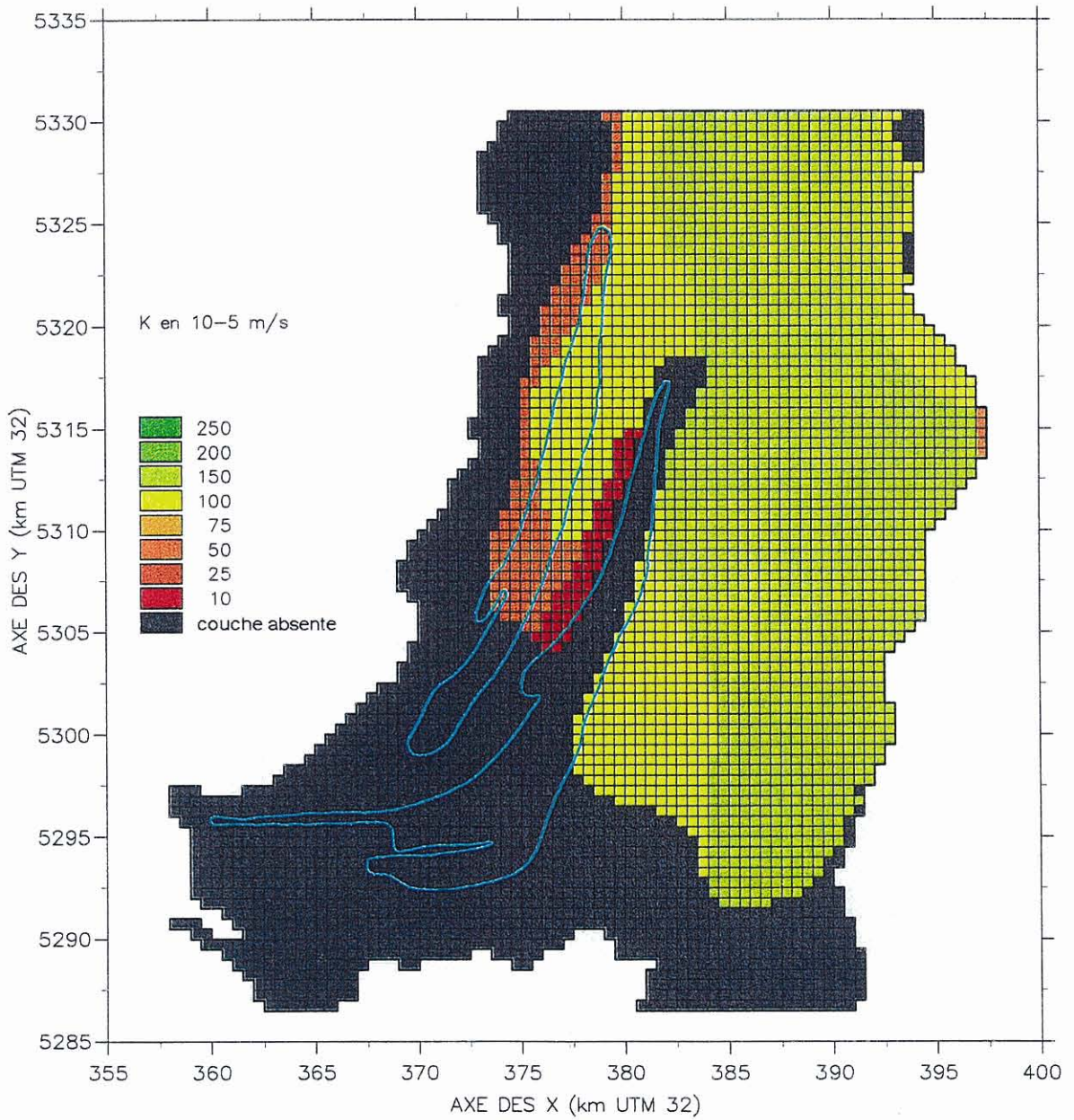


Fig. 25b - Modèle multicouche - Perméabilités de la couche 2 (après calage).

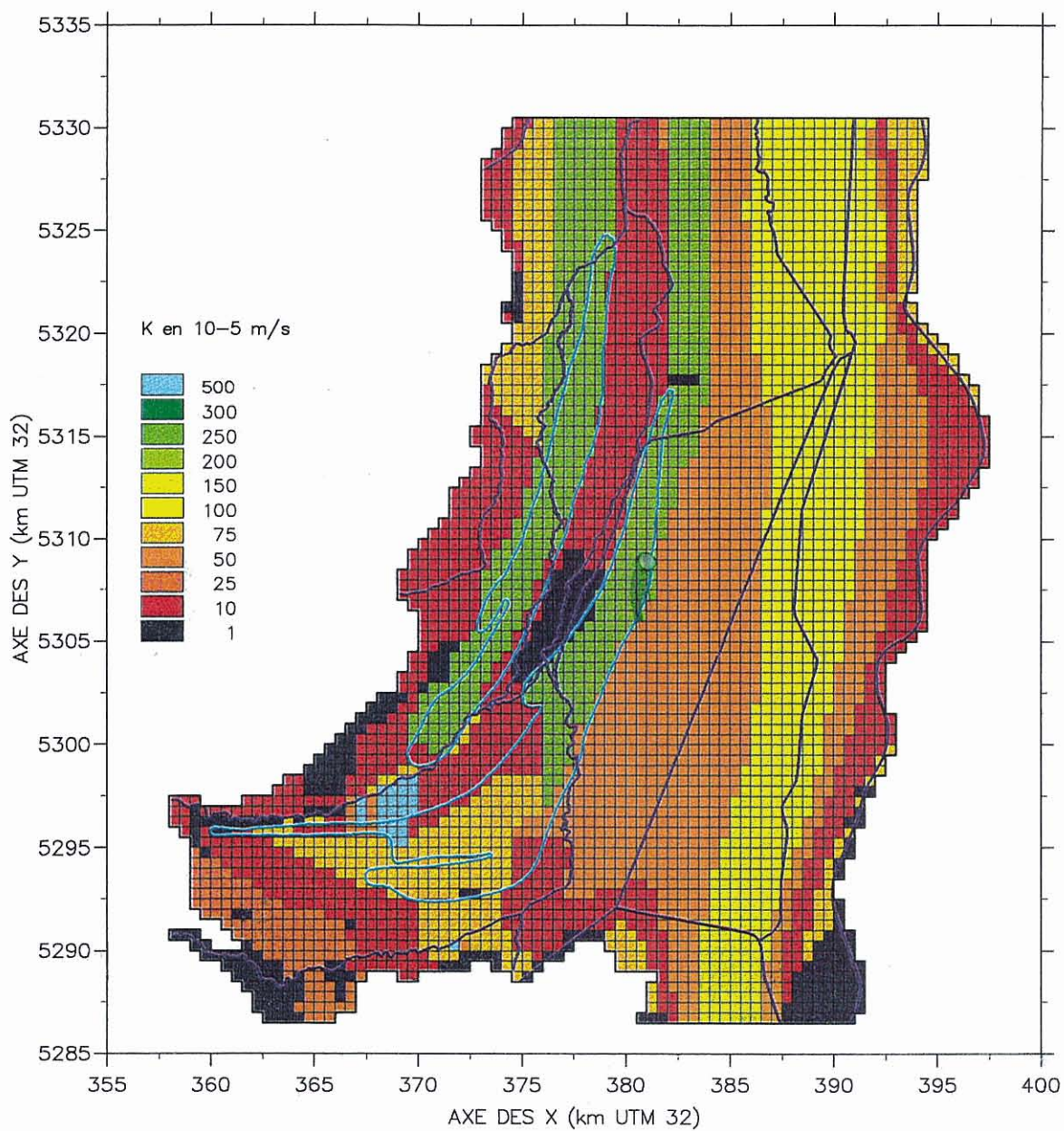


Fig. 25c - Modèle multicouche - Perméabilités de la couche 3 (après calage).

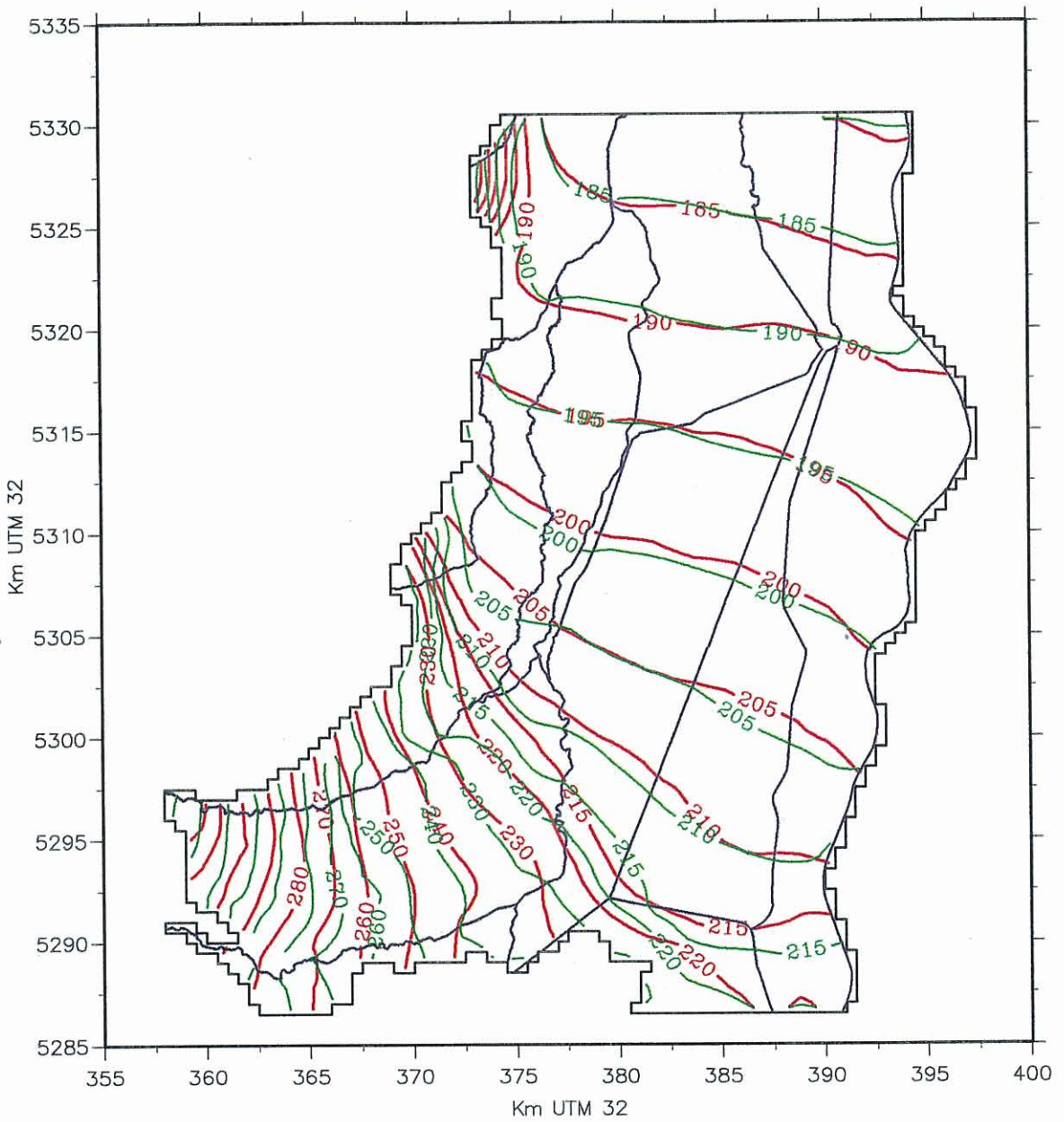


Fig. 26 - Modèle multicouche - ME (oct. 86) - Piézométries observée (rouge) et calculée (vert) dans la couche 1.

La figure 26 présente la carte piézométrique calculée dans la couche 1 par comparaison avec la carte observée, obtenue avec les perméabilités des figures 25 et un coefficient d'anisotropie verticale assez élevé (0.5). Les résultats sont similaires dans les couches 2 et 3 et non présentés.

L'examen de la figure 26 met en évidence une correspondance entre isovaleurs observées et simulées moins bonne que dans le cas du modèle monocouche, en particulier dans le Bassin Potassique (cf. fig. 15). Ce résultat n'est pas vraiment surprenant puisqu'on a calé à la fois sur la piézométrie des ME et sur la forme des langues salées dont on a vu au § 3.3 qu'elles étaient mal restituées par le champ de vitesses issu de la piézométrie "observée". On avait par ailleurs noté (cf. § 3.1.3) que la carte "observée" était beaucoup trop lisse pour représenter finement la piézométrie dans cette zone.

En ce qui concerne les profils en long des rivières, les nouveaux résultats simulés sont pratiquement identiques à ceux obtenus dans le cas du modèle monocouche (cf. ann. 4).

5.3. APTITUDE DU MODÈLE MULTICOUCHE À REPRÉSENTER LES LANGUES

5.3.1. Trajectoires

Avec ce modèle multicouche, on obtient un résultat tout à fait intéressant. En effet, on observe (fig. 27) que les trajectoires issues des terrils se calent bien sur les langues salées ce qui n'était pas le cas en monocouche (cf. fig. 21), en particulier, l'inflexion de la langue est restituée et les trajectoires issues des terrils Marie-Louise, Alex et Rodolphe restent dans la langue ouest.

5.3.2. Vitesses

Si l'on examine, comme dans le cas du monocouche (cf. § 3.3.2) les temps de traversée depuis les terrils jusqu'à la limite nord du modèle (environ 40 km) on observe, avec le modèle multicouche, des durées allant de 33 à 80 ans, soit des vitesses de 500 m/an à 1,2 km/an, ce qui correspond mieux aux observations (voir aussi chap. 6).

5.4. CONCLUSION SUR LES RESULTATS DU MODELE MULTICOUCHE

Le modèle numérique, qui vient d'être décrit, est appelé "multicouche" plutôt que "3D" car bien que les écoulements soient tridimensionnels dans chacune des couches, il n'y a que trois valeurs de chaque champ calculé sur une verticale (une par couche); pour réaliser un véritable modèle 3D, il faudrait discrétiser plus finement chaque couche alluviale, ce que nous avons renoncé à faire dans le cadre de cette étude.

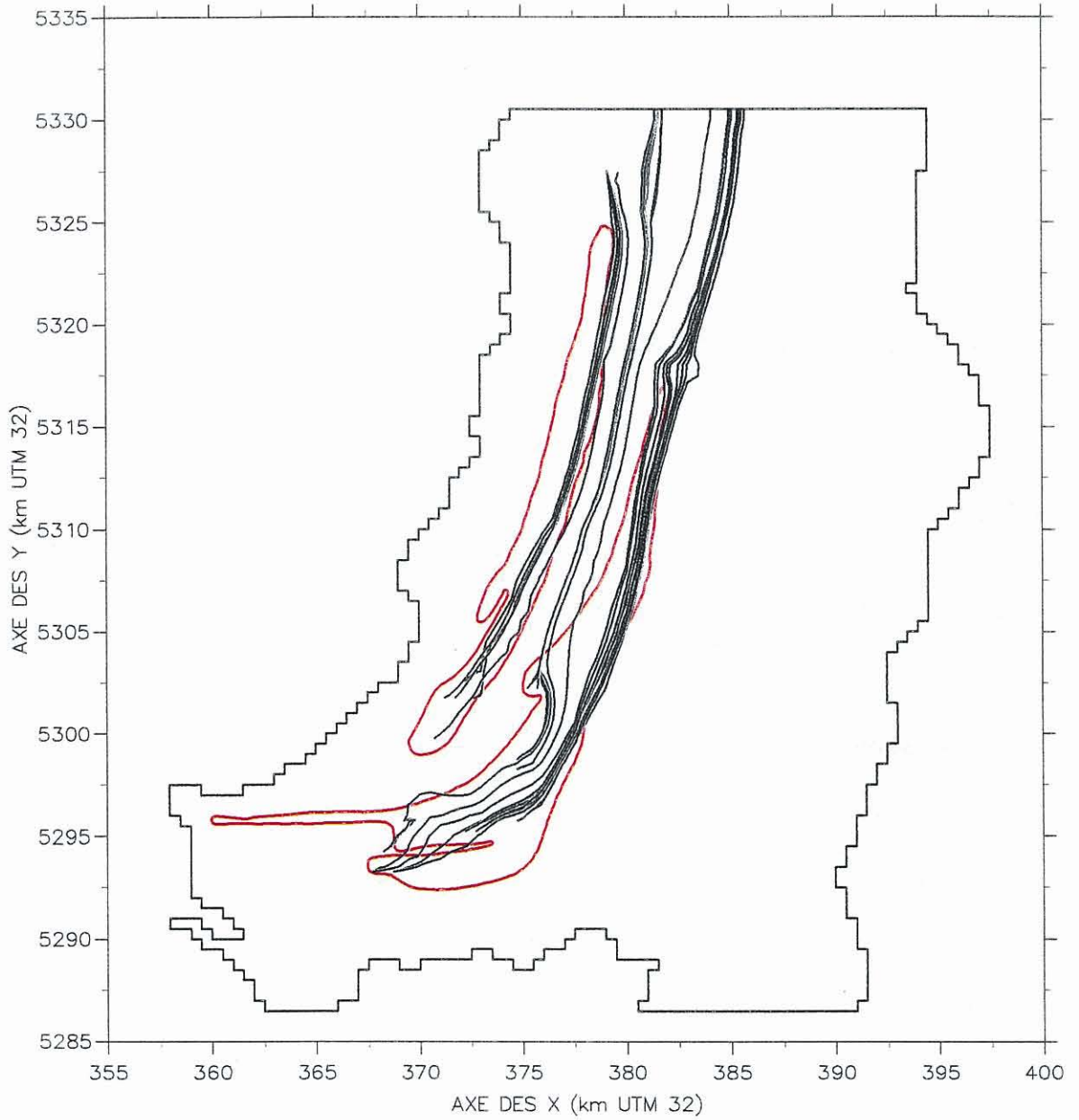


Fig. 27 – Modèle multicouche - Trajectoires à partir des terrils.

On a montré qu'avec ce nouveau modèle, on obtient d'une part une piézométrie beaucoup moins lissée que la piézométrie régionale "observée" mais qui reste tout à fait réaliste, d'autre part un champ de vitesses de l'ordre de grandeur des valeurs mesurées ponctuellement ainsi que des trajectoires à partir des terrils qui suivent la direction des langues observées.

Il reste maintenant à examiner si ce modèle permet pleinement de modéliser l'évolution des langues en réalisant des simulations de transport de la salure. Ceci sera décrit aux chapitres suivants.

6. Contexte et données de la salure

Ce chapitre présente tout d'abord schématiquement le contexte de la salure en rappelant la nature des sources, les diverses actions mises en oeuvre pour en limiter les effets, ainsi que les processus ayant contribué à la migration du sel au sein de l'aquifère. La seconde partie présente les données disponibles décrivant les phénomènes observés et exploitables pour la préparation de la modélisation des transferts. Les principales informations et données rappelées ci-après sont extraites de documents du SGR Alsace et de Antea/ALS.

6.1. CONTEXTE ET SOURCES DE LA CONTAMINATION

6.1.1. Origine de la salure

L'existence de la contamination de la nappe phréatique par les chlorures, localisée dans la partie ouest du secteur Mulhouse-Colmar (Haut-Rhin), résulte de la conjonction de trois phénomènes principaux : l'exploitation des mines de potasse, l'infiltration vers l'aquifère et les transferts par entraînement induits par l'hydrodynamique locale ou régionale.

L'exploitation des mines de potasse a été mise en oeuvre dès le début du siècle au nord-ouest de Mulhouse, dans le secteur dit du "Bassin Potassique". Le traitement du minerai, après extraction de la potasse (KCl), a engendré, en grandes quantités, deux types de résidus disposés en terrils à la surface du sol : le chlorure de sodium (NaCl, soluble) et divers stériles (schistes argileux insolubles). Ces dépôts solides ont été particulièrement intenses entre 1913 et 1933, puis limités aux insolubles, et ont ensuite totalement cessé dès 1970. Dix sept terrils ont été édifiés entre 1913 et 1960 avec une surface occupée au sol de l'ordre de 10 hectares en moyenne (tabl. 13).

La migration du sel vers la nappe phréatique par infiltration est liée à la présence des alluvions superficielles perméables et aux rejets dans le réseau hydrographique (rivières). Les principaux processus à l'origine de ces migrations sont : le ruissellement des eaux de pluie sur les flancs des terrils ainsi que la percolation à travers leur volume, les rejets de saumures dans les bassins perméables, les rivières alsaciennes et le Rhin, ainsi que quelques fuites accidentelles sur le trajet du saumoduc de rejet vers le Rhin. Ces différents rejets d'effluents liquides (saumures) dans les rivières et bassins à boues ont cessé à partir de 1975. La percolation des eaux de pluie au sein des terrils et le ruissellement de surface sont par contre les processus permanents d'apport à la nappe durant la période étudiée, avec toutefois une amplitude décroissante compte tenu de l'arrêt des dépôts solides et de la baisse de la teneur moyenne en sel résiduelle.

Les processus de transfert découlent des différents mécanismes caractérisant l'hydrodynamique de l'aquifère Rhénan : infiltration des pluies, alimentation par les coteaux à l'ouest, recharge par les cours d'eau, pompages, écoulement régional. Le champ d'écoulement régional intercepte les diverses infiltrations verticales de saumures denses et engendre, par transfert au sein de l'aquifère, la formation de langues salées qui s'étendent sur plusieurs dizaines de kilomètres en aval des terrils et également de part et d'autre du tracé des cours d'eau contaminés par les rejets (Ill, Rhin, Thur et Vieille Thur).

La source initiale de la contamination saline est ainsi essentiellement constituée par les terrils des MDPA qui ont été alimentés par dépôts de résidus salés jusqu'à la fin des années 30. L'origine de la salure de l'aquifère, pour sa part, résulte des processus de dissolution du sel des terrils par la pluie, depuis la début de l'exploitation de la potasse d'Alsace. Ces caractéristiques de l'origine superficielle de la salure conduisent à distinguer deux zones d'intérêt quant à la modélisation du réservoir et à l'analyse des données expérimentales :

- le domaine du Bassin Potassique, qui inclut les terrils et les processus d'infiltration, avec des concentrations locales maximales ;
- le réseau élargi (complément du domaine global étudié) dans lequel se manifestent principalement des mécanismes de transfert et de dispersion liés à l'hétérogénéité du champ de vitesse. Dans ce domaine, hors des sources principales d'apport les concentrations du fluide sont nettement plus faibles. Les seules sources de salure secondaires présentes, de plus faible amplitude, sont constituées par l'infiltration due aux échanges nappe-rivières.

Au sein du Bassin Potassique (fig. 28), les quinze terrils principaux constituant les sources superficielles de contamination s'organisent en sept secteurs, dont le suivi périodique détaillé fait l'objet des rapports annuels de surveillance et de synthèse de la salure :

- Alex et Rodolphe ;
- Marie-Louise ;
- Amélie I, II et nord ;
- Joseph Else est et ouest ;
- Anna et Fernand ;
- Théodore et Eugène ;
- Ensisheim nord, est et ouest.

Pour compléter le recensement des sources de salure, il convient d'ajouter une dernière composante de plus faible amplitude localisée en amont du Bassin Potassique (sud-ouest du domaine modélisé). Au débouché de la vallée de la Thur, la nappe est contaminée par les terrils industriels de l'Ochsenfeld. Les sous-produits des processus industriels engendrent, entre autres éléments, des concentrations excessives en chlorures. Les dispositifs de dépollution, mis en place en 1974, limitent l'impact à une langue étroite (200 mg Cl/l) qui vient rejoindre la pollution issue des terrils du Bassin Potassique.

La figure 28, focalisée sur le domaine du bassin potassique, montre que la connaissance expérimentale de la distribution de la salure (et de son évolution au cours du temps) permet une appréciation indirecte de l'hydrodynamique de l'aquifère. On constate en particulier que le champ de vitesse à l'origine des transferts observés apparaît nettement plus hétérogène que le laisse supposer le simple examen de la carte de la piézométrie expérimentale. En terme de problématique, ce défaut de cohérence apparent peut être dû soit à un effet d'intégration lors de la détermination de la piézométrie (loi de Darcy isodensitaire, hétérogénéité), soit à l'incidence éventuelle des effets densitaires.

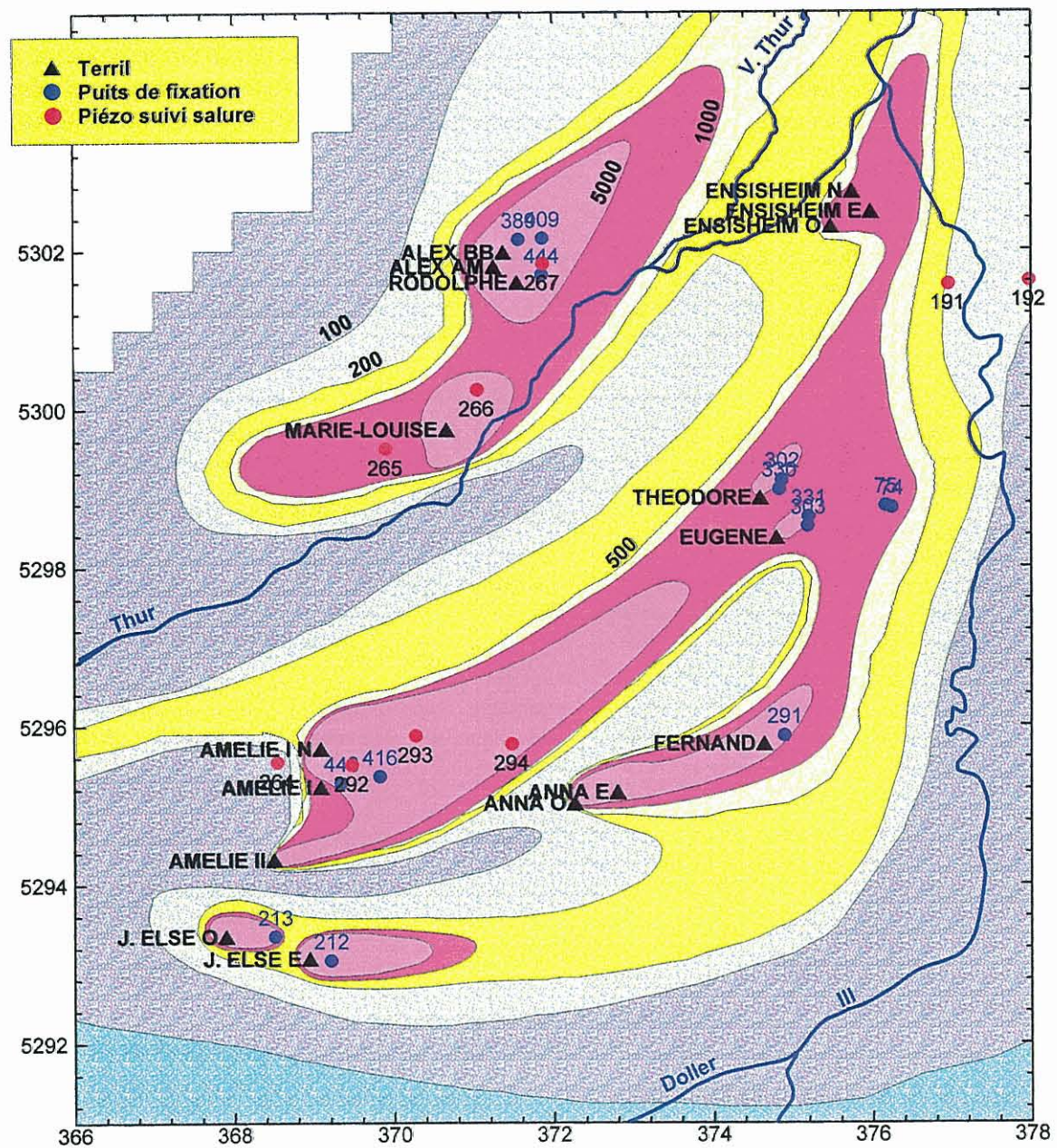


Fig. 28 - Secteur du Bassin Potassique : localisation des terrils, origine des langues salées et salure moyenne de la nappe phréatique en 1975.

Au plan de la phénoménologie observée à plus grande échelle, les sept secteurs peuvent être réunis en deux groupes à l'origine des deux langues salées principales qui prennent naissance au sein du Bassin Potassique (fig. 28) :

- la langue ouest, avec son origine le long de la rive gauche de la Thur et de la Vieille Thur, et incluant les deux secteurs : Alex-Rodolphe et Marie-Louise ;
- la langue est, avec son origine localisée dans le triangle défini par les trois cours d'eau : Thur, Doller et Ill. La source de cette seconde langue salée inclut les cinq autres secteurs répertoriés précédemment.

Au plan de la modélisation des transferts, ces premiers éléments décrivant le contexte et l'origine de la salure montrent qu'il est nécessaire de prendre en compte une série discrète de sources de masse (ou de concentration) distribuée dans le domaine du Bassin Potassique.

Dénomination des terrils	Date de mise en place	Date d'arrêt des dépôts	Surface au sol (ha)	Tonnage NaCl au 01.01.97	Teneur en NaCl (%)	Observations (Actions achevées et en cours)
Alex Terril ancien	1913	1933	3.0	0	0	Dissolution terminée (1989-1993)
Alex Terril mixte	1913	1969	6.8	300 000	13	Dissolution en cours depuis 1993
Alex bas. boue	1923	1963	13.5	0	0	
Rodolphe	1930	1976	7.3	270 000	11	Dissolution terminée, étanchement en cours
Ensisheim Est	1923	1935	7.1	0	0	Dissolution en cours d'achèvement
Ensisheim Nord	1926	1961	1.6	40 000	24	Etude de traitement en cours
Ensisheim Ouest	1920	1975	3.8	198 000	30	Etude de traitement en cours
Marie-Louise	1920	en cours	30.9	1 551 000	10	Dessert mine Marie-Louise jusqu'en 2002
Amélie Nord	1924	en cours	34.5	1 358 000	12	Dessert mine Amélie jusqu'en 2004
Amélie Est	1913	en cours	2.7	303 000	59	Dissolution programmée
Amélie II	1913	en cours	2.6	55 000	23	Essais d'étanchement-végétalisation en cours
Joseph Else	1912	1929	7.0	524 000	24	Etude de faisabilité d'étanchement en cours
Ouest	1959	1953	6.2	785 000	44	Etude de faisabilité de traitement prévue
Joseph Else Est	1913	1969	10.6	388 000	17	Dissolution en cours depuis 1995
Fernand	1923	1969	16.7	795 000	20	Dissolution en cours depuis 1995
Anna	1960	1968	5.9	271 000	8	Etude de faisabilité de traitement prévue
Eugène	1913	1974	4.4	382 000	39	Etude de faisabilité d'étanchement prévue
Théodore		1986 1959				Dissolution programmée
Total			164.6	7 220 000	14	

Tab. 13 - Caractéristiques d'édification et tonnage restant sur les différents terrils au 01/01/1997 (d'après rapport BRGM R39746).

6.1.2. Evolution des sources de salure

Les différentes sources de salure superficielles ont connu des modifications en fonction de l'évolution des processus industriels (abandon progressif des dépôts solides, traitements des rejets, etc.). En parallèle, la multiplication des mesures périodiques, la surveillance et les synthèses réalisées ont permis une meilleure connaissance de l'état de contamination de la nappe phréatique et la mise en œuvre d'une série d'actions pour limiter l'incidence des sources de salure. Parmi les principales actions, on peut citer :

- la mise en place de puits de fixation ou de dépollution à l'aval immédiat des terrils (1975-1985, réf. tabl. 16). Cette technique permet de stopper l'alimentation des langues salées par la réalisation locale de "barrages hydrauliques" ;
- un programme de résorption des terrils les plus salés par dissolution accélérée engagé en 1989. Cette technique supprime les sources de salure les plus intenses atteignant la nappe ;
- l'évacuation directe des saumures par le saumoduc vers le Rhin (Fessenheim) ;
- l'arrêt des rejets salés dans l'Ill et ses affluents à partir de 1975 ;
- la canalisation des eaux de ruissellement vers le saumoduc avec surveillance et entretien préventif de celui-ci vis-à-vis des fuites accidentelles ;
- la neutralisation de l'effet d'infiltration sur les terrils peu salés par des techniques d'étanchement-végétalisation.

Le tableau 13 fournit une information plus détaillée sur l'application de ces différentes actions, en parallèle avec l'état du tonnage restant et de la teneur moyenne en NaCl des terrils.

Au plan de la modélisation, le recensement de ces principales actions, mises en œuvre depuis une vingtaine d'années, conduit à considérer l'évolution au cours du temps de l'intensité des sources de contamination discrètes intégrées dans l'approche numérique.

6.1.3. Historique des études réalisées

L'état et l'évolution de la salure de la nappe phréatique font l'objet d'un suivi attentif depuis une trentaine d'années, essentiellement en raison de l'impact sur la qualité des eaux en aval des rejets. Les principaux éléments bibliographiques mentionnés sont extraits de la synthèse des données préliminaire à la modélisation (Vançon, 1997).

Plusieurs captages d'eau importants, à l'ouest de la plaine rhénane, ont connu une augmentation sensible de leur teneur en chlorure : Syndicat d'Ensisheim, Bollwiller et Environs (EBE), captage de l'agglomération de Colmar, etc. En 1969, estimant pouvoir échapper à la contamination saline à priori superficielle, la Ville de Colmar a fait procéder à l'approfondissement de ses puits. Après une courte période de répit, les teneurs se sont remises à augmenter.

Sur la base de ce type de constat et sous l'égide de la Commission Interservices de Contrôle des Rejets des MDPAs, de nombreuses études ont été mises en oeuvre pour : connaître l'état de la contamination, comprendre les mécanismes associés à la propagation de la salure et prendre les mesures de restauration de la qualité de l'eau les plus efficaces.

Ces nombreuses études recouvrent les différents aspects de la connaissance et de la surveillance de la nappe phréatique :

- les campagnes de mesures piézométriques et chimiques sur les forages de production d'eau et les puits de contrôle ;
- les campagnes de prospection géophysique pour une meilleure connaissance de la distribution spatiale de la salure ;
- les essais d'injection de traceur en rivière avec mesures dans les forages et piézomètres ;
- les mesures de vitesse ponctuelles ;
- l'établissement d'un rapport annuel détaillé de suivi et de synthèse, dès le début des années 1970, sur la bases des données expérimentales acquises et archivées ;
- la modélisation numérique de l'hydrodynamique de la nappe et du transfert de la salure. Entrepris dès 1978 par le groupe BRGM, ces travaux ont eu pour objectif d'évaluer l'impact des mesures à prendre pour réduire la pollution saline et prévoir l'évolution des phénomènes à moyen et long terme ;
- les travaux effectués dans le cadre du projet européen LIFE (Allemagne, France, Suisse), couvrant l'approche hydrodynamique de l'intégralité de la nappe rhénane.

Dans le domaine de la modélisation numérique, où s'intègre la présente étude, un premier modèle 2D plan à mailles carrées de 500 m de côté a été mis au point dès 1978 (SGR/ALS) pour reconstituer l'évolution de la langue ouest, de l'origine des dépôts à nos jours. Basée sur la méthode des différences finies, l'approche a été complétée au cours des années 1980 par l'introduction des méthodes de type "Random Walk". Les résultats de ces travaux de modélisation ont mis en évidence plusieurs types de difficultés :

- la relative étroitesse de la langue salée ouest, qui conserve pendant plusieurs kilomètres une largeur de l'ordre de 500 m ;
- la direction de propagation de la salure, avec un azimuth de 20 à 30° plus au nord que celui de l'écoulement régional déduit des cartes de la piézométrie observée ;
- la faible vitesse de propagation des chlorures ; le pic de pollution lié à l'utilisation maximale (1958-1961) des bassins d'évacuation de la mine Alex atteignant Colmar, situé 25 km en aval, après un temps de transfert de l'ordre de 25 à 30 ans.

Les travaux de modélisation du SGR/ALS sur ce thème se sont poursuivis jusqu'en 1991 avec la simulation de l'ensemble des langues salées du Bassin Potassique ; la structure de la nappe étant schématisée en deux couches aquifères superposées (partie superficielle et partie profonde). Le calage de ce modèle du Bassin Potassique a

nécessité la reconstitution de l'historique de l'ensemble des terrils et l'analyse des données sur la base de la synthèse Graillat-Brunck-Jacob. Issues de cette approche, les principales données caractéristiques de l'infiltration des terrils, très différenciés (Vançon, 1997) ont été utilisées dans la présente étude pour contraindre les flux massiques à l'origine des sources de salure.

6.2. DONNÉES DE LA SALURE

Les données spécifiques utilisées décrivant la salure se décomposent en trois groupes :

- les informations rassemblées dans le document de synthèse édité annuellement par le SGR Alsace. Cinq situations types ont été sélectionnées pour les besoins de l'étude : 1975, 1980, 1985, 1990, et 1995 ;
- les fichiers relatifs au suivi expérimental périodique de 17 piézomètres de contrôle. Cette sélection parmi l'ensemble des points de contrôle permet un échantillonnage des diverses zones d'intérêt (Bassin Potassique et langues salées, fig. 29). Cette sélection figure également parmi les ouvrages suivis dans les documents de synthèse annuelle ;
- l'infiltration de la saumure sous les terrils du Bassin Potassique, déduite du calage des modèles locaux antérieurs.

6.2.1. Rapports de synthèse annuels

Ce type de document est la source principale de données pour la modélisation. Etant attaché à un concept de surveillance, ce document renseigne essentiellement sur les effets observés induits par la contamination saline, et peu par contre, sur le détail des causes (infiltration des saumures sous terrils). Les informations rassemblées conservent la même structure pour les différents rapports couvrant la période retenue (1975-1995). Les données collectées et interprétées périodiquement s'organisent en 8 groupes.

a) Données concernant les eaux de surface (réseau hydrographique)

Les mesures proviennent des stations équipées pour l'enregistrement des débits et pour la mesure des teneurs en chlorure. Ces stations échantillonnent les principales rivières : Thur, Vieille Thur, Ill.

Les mesures acquises à différentes fréquences sont interprétées et restituées sous la forme de tableaux des moyennes annuelles sur la dernière décade courante. Les données concernent le débit, la teneur et la charge en chlorure représentatives de l'évolution des cours d'eau. Ces informations ont été exploitées pour caractériser l'infiltration moyenne en chlorure de chaque cours d'eau au pas annuel (contraintes extérieures du modèle).

b) Données concernant les eaux souterraines

Les données sont relatives aux teneurs en chlorure mesurées dans les piézomètres de contrôle et les forages de production.

Pour le réseau élargi, les mesures concernent l'évolution à fréquence annuelle des teneurs dans les piézomètres de contrôle ou forages caractéristiques (cas des puits de Colmar par exemple).

Pour le Bassin Potassique, les résultats sont présentés par secteurs, associés aux terrils (réf. paragraphe 6.1.1) et rappellent l'évolution à fréquence annuelle des différentes variables :

- volume pompé, teneur moyenne en chlorure, masse de sel extraite par les puits de fixation/dépollution implantés à l'aval immédiat des terrils ;
- teneur mesurée dans les piézomètres voisins des différents terrils.

Ces données ne sont pas utilisées comme contraintes extérieures du modèle de transfert, mais essentiellement comme information de contrôle des résultats de la modélisation.

c) Bilan de la décontamination de la nappe

Ces données synthétiques renseignent sur l'efficacité des techniques de dépollution mises en oeuvre et les différentes actions correctrices à envisager.

d) Résultats des campagnes de géophysique

Réalisés depuis quelques années, ces travaux spécifiques (profils de résistivité) complètent les synthèses (mesures ponctuelles) en donnant une image des zones polluées, et par comparaison avec des profils antérieurs, l'évolution dans le temps de la salure. Ces données sont interprétées par le SGR Alsace pour préciser la carte annuelle de l'état de la salure moyenne.

e) Tableau des mesures de salure de la nappe

Le tableau des teneurs mensuelles en chlorure (annexe des rapports) fournit les données acquises sur l'ensemble des piézomètres de contrôle. Ces informations ponctuelles sont à l'origine des cartes établies chaque année.

f) Cartes de la salure de la nappe phréatique

Deux cartes sont généralement établies chaque année : la carte relative au réseau élargi (recouvrant l'ensemble du domaine modélisé) et la carte détaillée du Bassin Potassique. Ces cartes, nécessaires à la modélisation du transfert de la salure, présentent deux types de difficultés pour leur exploitation pratique :

- représentant la salinité dite moyenne, les cartes intègrent en fait des informations issues de piézomètres profonds ou plus superficiels. Il s'en suit qu'une analyse détaillée des niveaux crépinés associés à chaque mesure est nécessaire pour préciser la distribution de la salure selon la profondeur de chaque couche du modèle 3D. Préciser cette information impliquerait de pouvoir disposer d'un interpolateur 3D efficace et d'un échantillonnage de points suffisant ;
- hormis pour les cartes très récentes, la majorité des cartes périodiques disponibles n'existent que sur support papier. Leur exploitation pour les besoins de la modélisation (fichiers semis du code MARTHE, tracés à différentes échelles, comparaison de cartes, etc.) nécessite une étape préalable de digitalisation.

g) Evolution des teneurs en chlorure aux puits de contrôle

La série de graphiques figurant généralement en annexe représente l'évolution de la teneur mesurée sur une série de piézomètres caractéristiques, de par leur localisation ou leur taux de variation.

Ces données sont utilisées soit pour le contrôle des résultats simulés soit pour préciser localement les cartes de salure initiale de la modélisation (situation de 1975).

h) Liste des points de contrôle de la salure

Cette liste (également fournie sous forme de fichiers par le SGR Alsace) détaille les principales caractéristiques des piézomètres et forages : indice national des ouvrages, désignation, zones crépinées, type de puits (AEI, AEP).

Le tableau 14 donne une estimation de l'évolution du nombre de points mesurés sur la période d'étude 1975-1995.

	1975	1980	1985	1990	1995	1996
Cours d'eau :						
Bassin Potassique	16	15	7	5	5	5
Réseau élargi	10	11	9	6	4	4
Total	26	26	16	11	9	9
Nappe phréatique :						
Bassin Potassique	159	168	158	160	208	191
Réseau élargi	> 132	233	222	194	142	140
Total	> 291	391	380	354	350	331
Total	> 317	417	396	365	359	340

Tabl. 14 - Evolution du nombre de points mesurés pour la caractérisation de la salure de la nappe phréatique (d'après rapports de synthèse annuels, SGR Alsace).

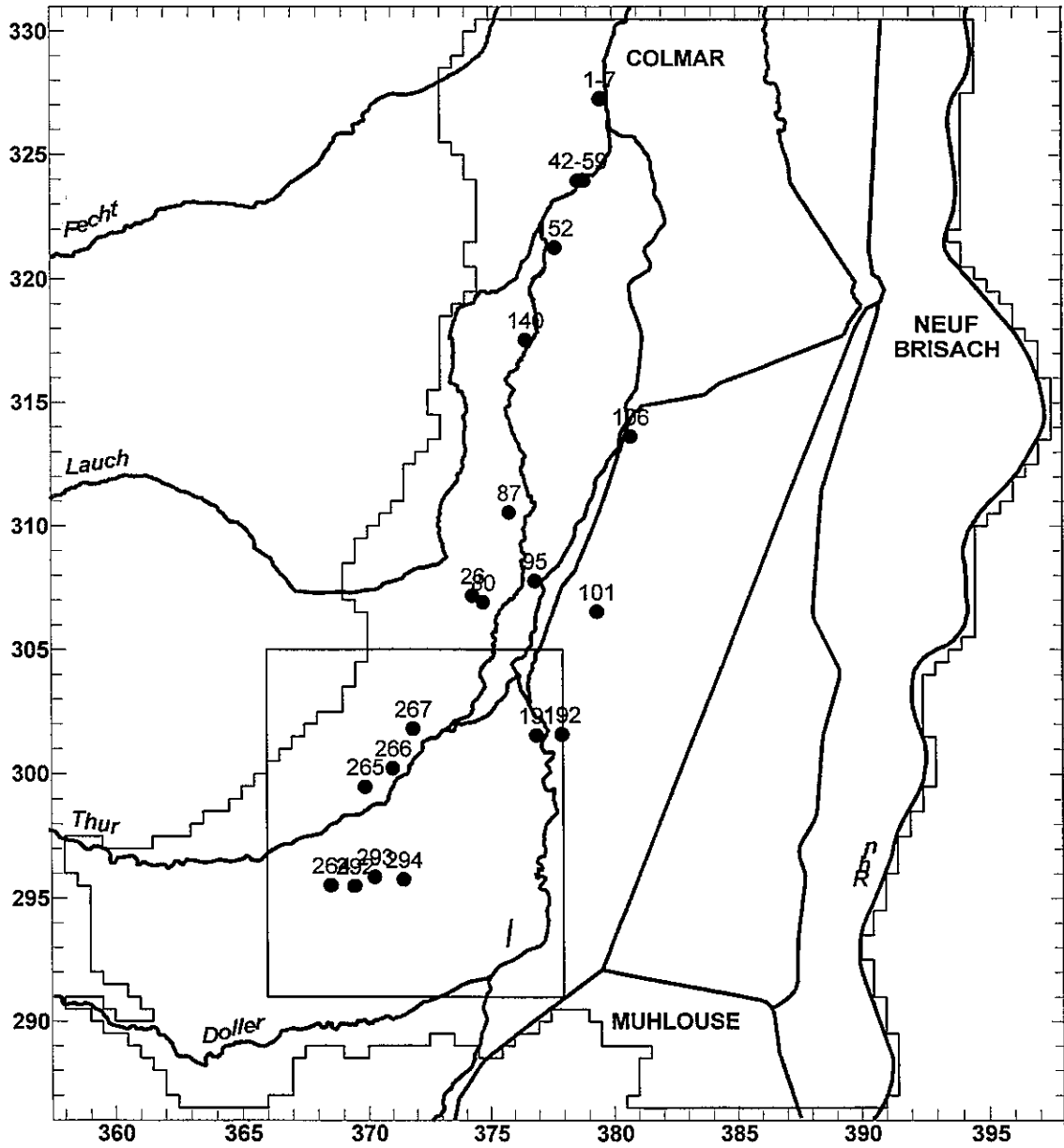


Fig. 29 - Localisation des points de contrôle sélectionnés pour le suivi de la salure (17 piézomètres et 4 forages de la ville de Colmar).

6.2.2. Piézomètres de contrôle de la salure

Les points sélectionnés, au nombre de 21, comprennent 17 piézomètres et 4 forages localisés sur la carte de la figure 29. Les piézomètres retenus se situent le long des deux langues salées observées et à l'intérieur du Bassin Potassique. Les 4 forages supplémentaires considérés sont des ouvrages d'eau de la ville de Colmar (Neuland 1-2 et Dornig 1-2). Ces ouvrages sont caractéristiques dans la mesure où leur teneur en chlorure a atteint en 1975 le seuil de potabilité (200 mg Cl/l).

Disposant des fichiers des mesures périodiques pour ces différents points de contrôle, les historiques d'évolution des teneurs en chlorure sont reproduits en annexe (A6.1 à A6.10). Il convient de signaler que le trait continu joignant les points expérimentaux n'a pas de signification physique. Ce mode de représentation n'est destiné qu'à faciliter la lecture des graphiques en matérialisant les séquences chronologiques mesurées.

Parmi l'ensemble des 21 points de contrôle, 10 ouvrages ne comportent qu'un seul niveau crépiné. Les autres ouvrages sont des piézomètres multiples permettant d'échantillonner plusieurs niveaux. Les intervalles de profondeur crépinés ont été convertis en cote absolue (m NN alt) ; ces indications sont rappelées sur les graphiques d'évolution des teneurs mesurées (annexes). La désignation, les coordonnées et les références des points de contrôle retenus sont répertoriés dans le tableau 15.

Xutm 32 (km)	Yutm 32 (km)	Indice national	Nb. de niveaux crépinés	Désignation des ouvrage
376.523	5317.553	3782X0140	1	Piézomètre profond Bois de Rouffach
377.725	5321.283	3782X0152	4	Piézomètre profond Mattenmuhl
374.293	5307.190	3786X0026	1	Forage 3 EBE Merxheim
374.731	5306.921	3786X0080	4	Piézomètre profond Merxheim
375.825	5310.560	3786X0087	3	Piézomètre triple Munwiller aval
376.891	5307.790	3786X0095	5	Piézomètre profond Meyenheim
379.362	5306.545	3787X0101	4	Piézomètre profond Meyenheim
380.731	5313.631	3787X0106	3	Piézomètre Ensisheimer Weg Blodelsheim
368.532	5295.533	4131X0264	1	Piézomètre Cité Amélie 1
369.893	5299.490	4131X0265	1	Piézomètre Est carreau Staffelfelden
371.040	5300.235	4131X0266	1	Piézomètre Nord capatage Dynamitière
371.868	5301.819	4131X0267	1	Piézomètre Grosswald
369.462	5295.504	4131X0292	3	Piézomètre triple puits 2 captage terril
370.265	5295.867	4131X0293	3	Piézomètre triple Wasserweg
371.470	5295.763	4131X0294	3	Piézomètre triple Nonnenbruch
376.949	5301.555	4132X0191	3	Piézomètre profond Ensisheim rive gauche ill
377.966	5301.598	4132X0192	3	Piézomètre profond Ensisheim rive droite ill
378.652	5323.987	3782X42/59	2	Puits Neuland Colmar
379.526	5327.864	3427X1/7	2	Forages Grosser Dornig Colmar

Tabl. 15 - Liste et références des points de contrôle sélectionnés.

6.2.3. Puits de fixation et de dépollution

Les puits de fixation ou de dépollution (fig. 28) implantés à l'aval immédiat des terrils ont été mis en place progressivement à partir de 1975. L'évolution des volumes annuels extraits est reproduite dans le tableau 16.

Les principaux puits de fixation/dépollution ont été réalisés jusqu'en 1989 ; les variations de débits sont significatives et doivent être prises en compte dans les données de la modélisation.

Les teneurs en chlorure extraites sont reproduites dans le tableau 17 ; il s'agit des moyennes annuelles exprimées en g/l. On peut tout d'abord remarquer que les teneurs extraites, avec un maximum de 50 g/l sont inférieures aux valeurs d'infiltration sous terrils (estimées de l'ordre de 190 g Cl-/litre de solution). le taux de dilution maximal d'environ 25 % est lié à plusieurs caractéristiques :

An	PF Alex	PF Rodo	PF Ung	PD Rue1	PD Rue2	PF Eug1	PF Eug2	PF Thé1	PF Thé2	PF Fern	PF Am1	PF Am2	PD J.E.O	PD J.E.E
1975	79													
1976	643													
1977	650													
1978	616													
1979	632										40			
1980	489	238									424			
1981	436	325									430			
1982	465	411									478			
1983	546	447									435			
1984	532	400									490			
1985	591	392									473			
1986	539	384								1248	420			
1987	546	366								1272	510			
1988	565	367		901						1112	578			
1989	562	382		940						985	477		818	270
1990	641	452		932						1076	487		852	309
1991	839	515		746						1138	447		745	343
1992	688	604		703						1181	492		692	251
1993	640	652		875						1067	525		566	252
1994	609	580		1628		383		131		1597	582		702	347
1995	621	550		842	785	345		137		1792	572	35	632	383
1996	677	677	137	832	633	318	252	147	87	1876	532	82	445	355

Tabl. 16 - Volume annuel produit par les puits de fixation ou de dépollution réalisés à partir de 1975 (en milliers de m³).

- la distance entre terril et ouvrage de captage (hectométrique à kilométrique) ;
- l'intervalle crépiné et le profil de débitmétrie à l'intérieur de celui-ci, compte tenu des propriétés hydrauliques des différentes couches productives ;
- l'extension de l'aire de captage de chaque ouvrage, qui est a priori supérieure à celle du seul panache d'infiltration ;
- l'amplitude relative de la densité de flux d'infiltration de saumure par rapport à la vitesse d'écoulement régional sous le terril.

La réponse d'un puits de fixation apparaît dépendante de nombreux paramètres locaux et fortement liée à la dynamique de comportement des terrils associés. L'interprétation de la réponse impose également, comme pour celle des piézomètres de contrôle, d'intégrer les données décrivant les intervalles crépinés ainsi que les profils de débitmétrie. Du point de vue de la modélisation, ces contraintes nécessiteraient une approche locale détaillée (modèle gigogne, "maillage écossais", ou modèle local spécifique).

6.2.4. Terrils et infiltration de la salure

La dissolution du sel par les eaux de pluie et l'infiltration de la saumure sous les terrils sont des processus complexes, peu quantifiés dans le détail. Les données disponibles concernent d'une part les modèles simplifiés à l'échelle de chaque terril dans son ensemble et les bilans globaux établis pour le Bassin Potassique.

An	PF Alex	PF Rodo	PF Ung	PD Rue1	PD Rue2	PF Eug1	PF Eug2	PF Thé1	PF Thé2	PF Fern	PF Am1	PF Am2	PD J.E.O	PD J.E.E
1975	43.5													
1976	36.8													
1977	30.5													
1978	29													
1979	27										9.8			
1980	25.1	21.2									11.2			
1981	23.4	20.8									10.1			
1982	22.8	19.9									14.7			
1983	22.9	19.8									11.2			
1984	23.6	19.6									8.3			
1985	21.4	18.5									8.6			
1986	19.2	17.3								12.0	9.2			
1987	18.3	15.7								11.0	8.5			
1988	18.5	15.5		2.5						10.3	8.9			
1989	18.6	17.4		2.7						10.3	8.4		7.9	23.0
1990	25.3	16.6		3.0						9.2	8.2		6.3	17.6
1991	49.4	16.5		3.2						9.0	6.7		6.2	15.6
1992	46.6	30.7		2.4						8.9	6.2		5.8	15.2
1993	39.7	29.1		2.7						8.9	5.5		5.6	16.1
1994	50.1	23.1		2.4		3.8		4.5		8.8	6.6		5.0	12.6
1995	40.4	23.0		2.6	2.0	4.1		6.2		8.2	6.2	16.6	4.8	11.1
1996	22.5	13.8	16.0	2.6	2.0	3.8	4.7	3.8	2.4	8.5	3.4	16.8	6.0	15.9

Tabl. 17 - Teneur annuelle en chlorure mesurée dans les puits de fixation ou de dépollution réalisés à partir de 1975 (en g/l de Cl).

Les principales caractéristiques des terrils ont été rappelées dans le tableau 13. D'après les rapports de surveillance périodique : $18.5 \cdot 10^6$ tonnes de NaCl ont été déposées et $7.7 \cdot 10^6$ tonnes resteraient en place en 1996. Les produits de dissolution sont estimés à $0.11 \cdot 10^6$ tonnes pour l'infiltration annuelle vers la nappe et $0.54 \cdot 10^6$ tonnes rejetés par le saumoduc (dissolution artificielle).

La surface moyenne au sol d'un terril est de l'ordre de $100\ 000 \text{ m}^2$. Selon les cas, cette surface très variable représente de 6 % à 130 % de la surface d'une maille du modèle ($500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$). Une première estimation de la quantité de saumure infiltrée est

généralement déterminée pour chaque teruil à partir d'un bilan massique simple. Ce dernier intègre les données suivantes :

- les caractéristiques principales des terrils : surface au sol, forme, coefficient d'infiltration, pluviométrie ;
- la concentration maximale de la saumure en fin de processus de percolation, sensiblement égale à la valeur à saturation, soit 353 kg de NaCl dissous par m³ d'eau de pluie (on admet implicitement que la cinétique de dissolution est rapide) ;
- la section verticale d'aquifère, normale à l'écoulement, contaminée par l'infiltration et la vitesse de l'écoulement régional sous le teruil.

Ces estimations et les synthèses des MDPA ont été exploitées pour les modélisations antérieures des langues salées dans le Bassin Potassique (Vançon, 1997). Ce sont les résultats de cette approche, en terme de calage de l'historique d'infiltration qui seront utilisés pour la modélisation des transferts. Les fichiers exploités expriment l'évolution de la masse totale infiltrée sous chaque teruil au pas annuel sur la période 1959-1990. Le tableau 18 fournit l'évolution des débits massiques annuels d'infiltration sous les différents terrils.

6.2.5. Cartes de distribution de la salure

Les 5 cartes retenues, couvrant la période 1975-1995 au pas de 5 ans, ont été digitalisées afin de disposer d'une référence informatisée exploitable pour la suite de l'étude. La démarche classique utilisée regroupe les étapes suivantes :

- définition d'un repère de coordonnées unique (km UTM 32) à partir des données des limites des 1/8^{ème} de feuille (seul repère disponible sur les documents originaux) ;
- saisie à la tablette à digitaliser des points définissant les courbes isovaleur pour la carte du réseau élargi et celle du Bassin Potassique de chaque situation ;
- fusion des informations digitalisées issues des deux cartes ;
- création d'une série de fichiers élémentaires regroupant les coordonnées des points d'une même courbe isovaleur ;
- digitalisation et saisie des informations "d'habillage" des cartes : rivières, canaux.

Ces données n'ont pas fait l'objet d'une interprétation et traduisent les informations expérimentales initiales. Les 5 cartes sont reproduites sur les figures 30 à 34. La figure 28 (chapitre 6.1.1.) donne un exemple de restitution de l'état de 1975 limité au domaine du Bassin Potassique.

L'examen des 5 cartes permet de dégager les principales caractéristiques de la distribution de la salure ainsi que celles de l'évolution constatée au cours de la période de 20 ans étudiée (1975-1995) :

- les langues salées trouvent leur origine au sud-ouest du domaine : Bassin Potassique et débouché de la Thur ;

- l'entraînement par l'écoulement se traduit tout d'abord par un azimuth est, il s'infléchit ensuite fortement vers le nord au centre du Bassin Potassique, puis conserve sur une distance de l'ordre de 25 km un azimuth sensiblement constant orienté N 10°E ;
- la plaine rhénane est très peu affectée par la contamination ;
- en terme d'évolution, la langue salée issue des terrils de l'Ochsenfeld (débouché de la Thur) est persistante, avec une faible contamination (de l'ordre de 200 mg/l) ;
- l'évolution au sein du Bassin Potassique se traduit par la progression des eaux douces en rive droite de la Thur, identifiant deux langues salées distinctes : l'une au nord du tracé Thur-Vieille Thur, l'autre au nord du tracé Doller-Ill ;
- cette évolution selon deux axes parallèles se poursuit sur toute la partie aval du Bassin Potassique en direction de Colmar. La langue ouest voit sa largeur se réduire au cours du temps et se concentrer le long du tracé de la Vieille Thur. La langue est se déploie le long du cours de l'Ill (rive droite) avec une tendance à la dispersion vers l'est (confirmée par les mesures de géophysique) ;
- le long du profil de chaque langue salée, les teneurs maximales se résorbent progressivement en raison de la diminution des alimentations en saumures (processus de dépollution à l'aval des terrils).

Terril	Joseph Else O	Joseph Else E.	Amélie Nord	Amélie Est	Amélie II	Anna Est	Anna Ouest	Fernand	Théodore	Eugène	Ensisheim Est	Ensisheim Nord	Ensisheim Oues	Alex	Rodolphe	Marie-Louise
Surface	70 000	62 000	345 000	27 000	26 000	83 500	83 500	106 000	44 000	59 000	71 000	16 000	38 000	98 000	73 000	309 000
Année																
1975	4 200	2 400	15 343	1 201	1 156	3 100	3 100	3 000	900	2 700	4 090	922	2 189	6 877	5 123	12 600
1976	3 900	2 400	15 343	1 201	1 156	3 100	3 100	3 000	900	2 700	4 090	922	2 189	6 877	5 123	12 600
1977	3 900	2 400	15 343	1 201	1 156	3 100	3 100	2 700	900	1 800	4 090	922	2 189	6 877	5 123	12 600
1978	3 600	2 100	15 343	1 201	1 156	3 100	3 100	2 700	900	1 800	4 090	922	2 189	6 877	5 123	12 600
1979	3 300	2 100	15 343	1 201	1 156	3 100	3 100	2 700	900	1 500	4 090	922	2 189	6 877	5 123	12 600
1980	3 300	2 100	15 343	1 201	1 156	3 100	3 100	2 500	600	1 500	4 090	922	2 189	6 877	5 123	12 600
1981	3 000	1 800	15 343	1 201	1 156	2 950	2 950	2 200	600	1 500	3 919	883	2 098	6 533	4 867	12 600
1982	3 000	1 800	15 343	1 201	1 156	2 800	2 800	2 200	600	1 500	3 749	845	2 006	6 189	4 611	12 000
1983	2 700	1 800	15 343	1 201	1 156	2 650	2 650	2 200	600	1 500	3 578	806	1 915	5 846	4 354	11 400
1984	2 700	1 500	14 563	1 140	1 097	2 500	2 500	1 900	600	1 500	3 408	768	1 824	5 674	4 226	10 800
1985	2 400	1 500	13 783	1 079	1 039	2 450	2 450	1 900	600	1 500	3 351	755	1 794	5 330	3 970	10 200
1986	2 400	1 500	13 263	1 038	999	2 300	2 300	1 900	600	1 200	3 181	717	1 702	4 986	3 714	9 900
1987	2 400	1 500	12 482	977	941	2 150	2 150	1 600	600	1 200	3 010	678	1 611	4 814	3 586	9 300
1988	2 100	1 200	11 962	936	902	2 100	2 100	1 600	600	1 200	2 954	666	1 581	4 642	3 458	8 700
1989	2 100	1 200	11 182	875	843	1 950	1 950	1 600	600	1 200	2 783	627	1 490	4 470	3 330	8 400
1990	1 800	1 200	10 662	834	804	1 800	1 800	1 600	300	1 200	2 613	589	1 398	4 126	3 074	8 100

Tabl. 18 - Flux massique d'infiltration sous les terrils (t de Cl/an).

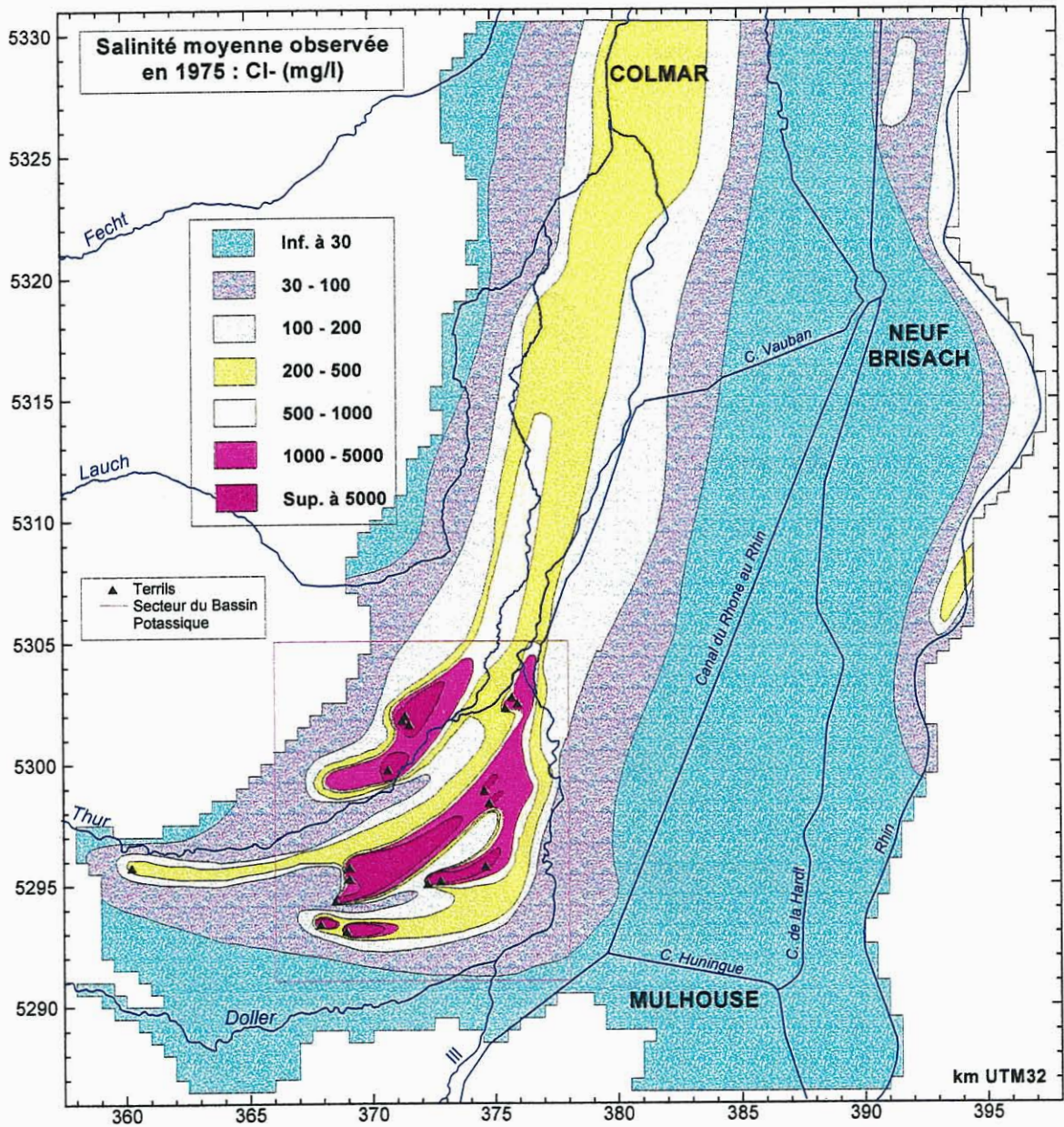


Fig. 30 - Carte de la salure moyenne observée en 1975 (mg Cl⁻/l)

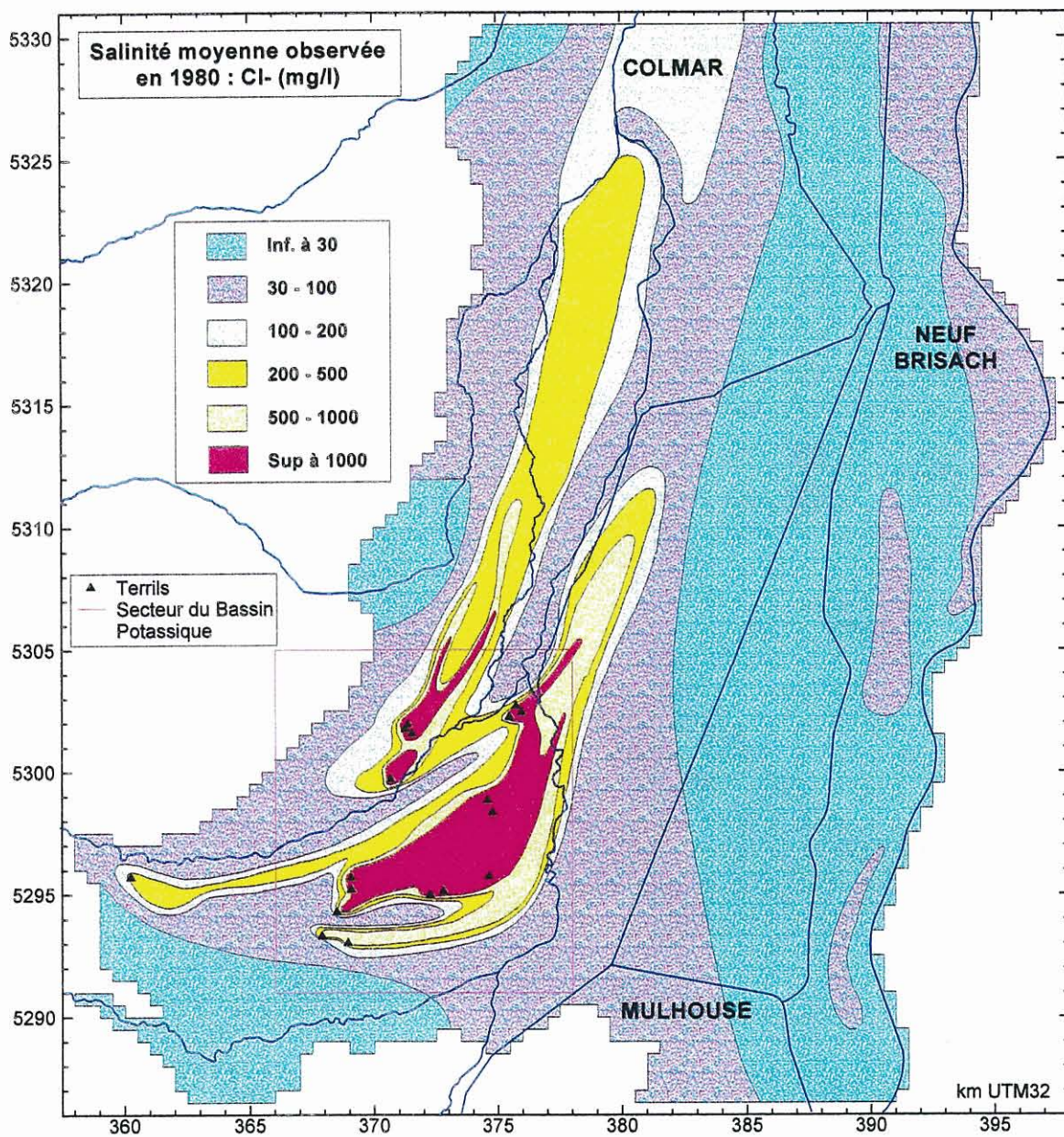


Fig. 31 - Carte de la salure moyenne observée en 1980 (mg Cl⁻/l)

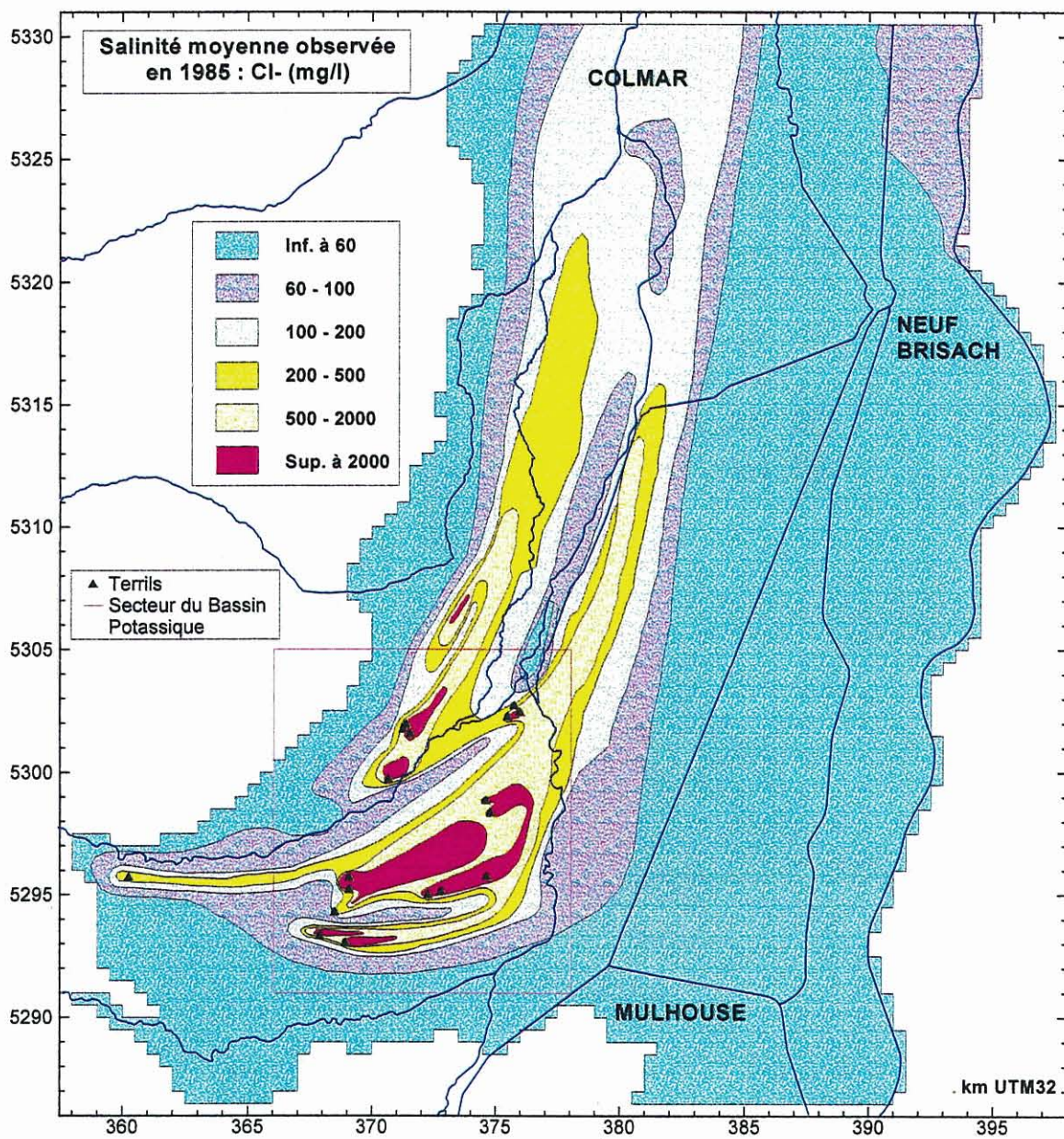


Fig. 32 - Carte de la salure moyenne observée en 1985 (mg Cl⁻/l)

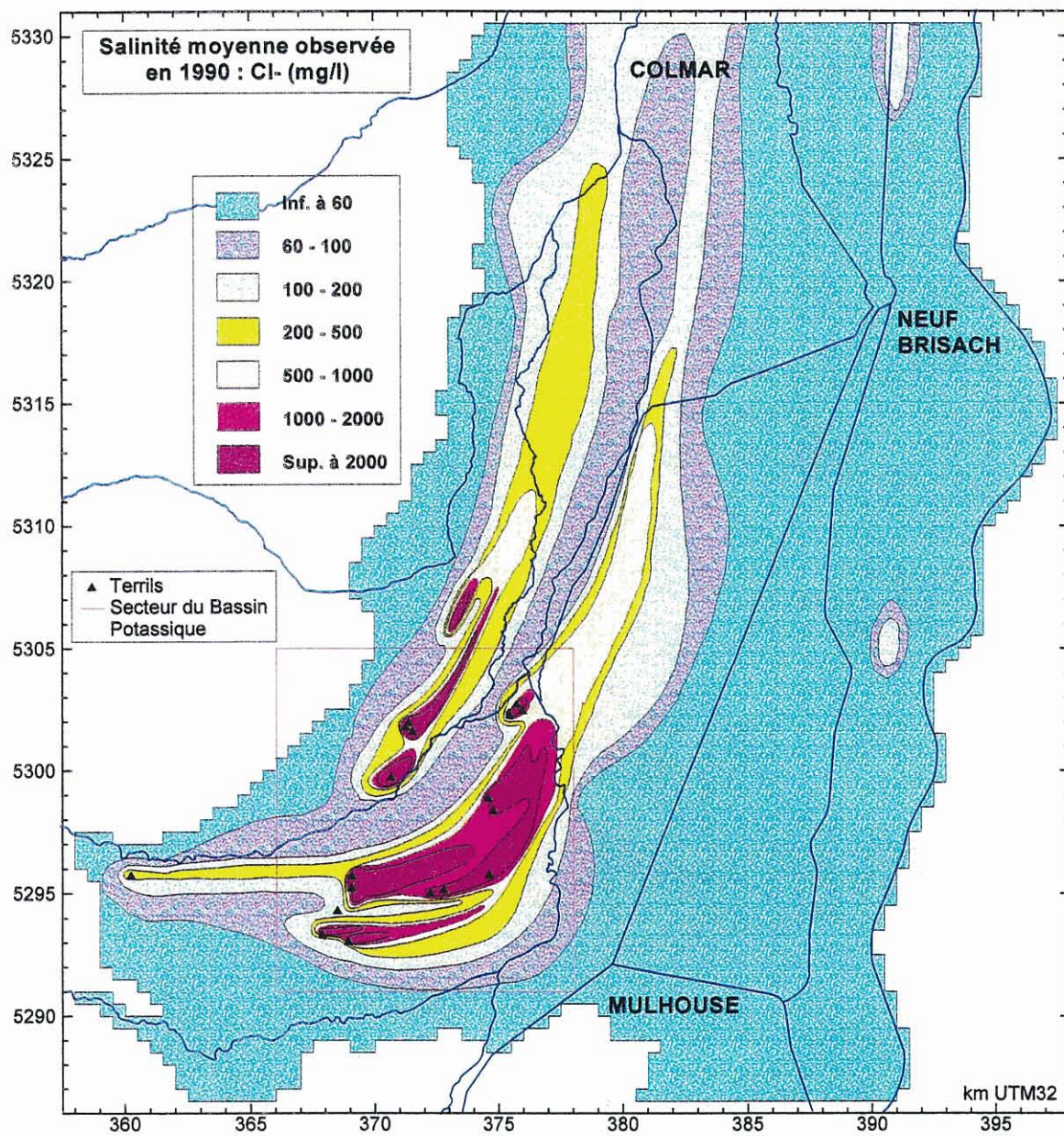


Fig. 33 - Carte de la salure moyenne observée en 1990 (mg Cl⁻/l)

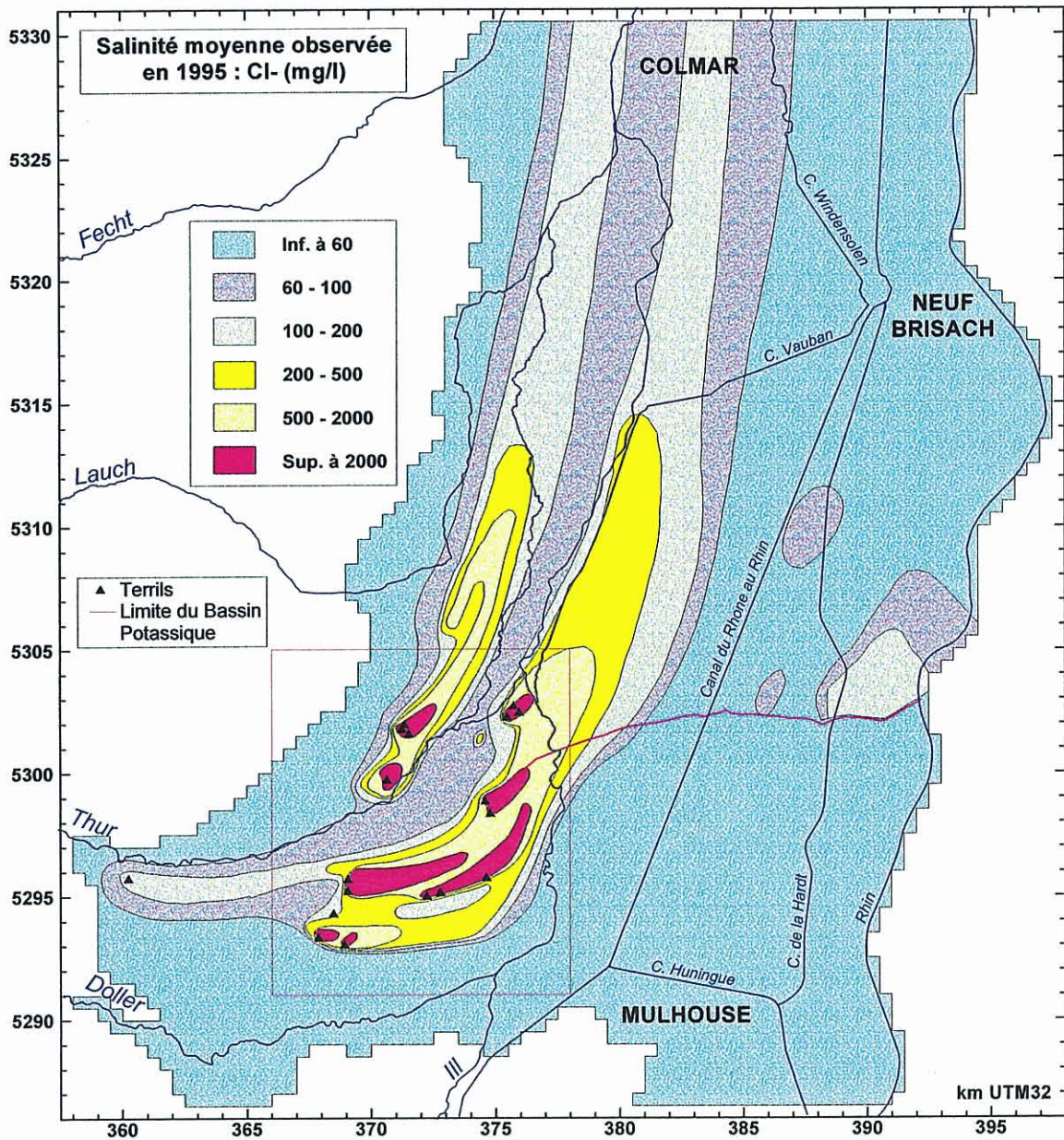


Fig. 34 - Carte de la salure moyenne observée en 1995 (mg Cl⁻/l)

7. Traitement des données pour la modélisation des transferts de la salure

Ce chapitre s'inscrit en complément du précédent, décrivant les données disponibles relatives à la salure. Sur la base des contraintes caractérisant ce contexte, il présente les objectifs de l'approche numérique, les hypothèses envisagées et le traitement des données retenues pour la modélisation.

7.1. OBJECTIFS DE LA MODÉLISATION

La modélisation se propose de reproduire l'évolution de la distribution de la salure associée à l'hydrodynamique de l'aquifère sur une période d'une vingtaine d'années, à partir d'une situation initiale choisie en 1975. L'approche réalisée constitue d'une part une démonstration des fonctionnalités de la version 5.7 du code MARTHE pour le traitement d'un problème complexe, et d'autre part une évaluation d'un modèle de simulation du comportement de la nappe d'Alsace. A terme ces travaux pourraient évoluer vers l'élaboration d'un modèle de gestion focalisé plus particulièrement sur la réponse aux divers problèmes posés par les industriels exploitant les ressources du sous-sol et les instances publiques.

Dans le cadre de la problématique générale de la modélisation, les principaux objectifs de l'approche sont les suivants :

- recenser et valider les données nécessaires ;
- évaluer l'incidence relative des divers processus physiques élémentaires ;
- identifier les interactions fortes liant les processus hydrodynamiques et les processus de transfert ;
- évaluer les caractéristiques et la qualité requises du maillage-support permettant une description des phénomènes (causes et effets) ;
- reproduire les tendances majeures de la phénoménologie observée.

Le problème étudié se situe dans la catégorie des modélisations de phénomènes inter-dépendants 3D (hydrodynamique et transferts) en régime transitoire, en présence de divers interactions ou couplages entre processus élémentaires :

- échanges nappe-rivière (hydraulique et chimique) ;
- forces motrices de l'écoulement d'origine à la fois gravitaire et densitaire ;
- couplage entre la concentration en sel induite par le transfert, et la masse volumique du fluide contribuant à l'hydrodynamique.

7.2. MÉTHODES, HYPOTHÈSES ET CONTRAINTES

7.2.1. Discrétisation du domaine

Le contexte général décrit au chapitre 6 a permis de montrer une importante variabilité de la distribution spatiale de la salure, avec une hétérogénéité très inégale, répartie schématiquement en deux sous-domaines. Le secteur du Bassin Potassique se caractérise par des amplitudes et des gradients locaux particulièrement intenses associés aux sources de salure, tandis que le reste du réseau élargi se décrit par de faibles concentrations et de faibles gradients. Un maillage géométrique cohérent avec ces observations devrait donc pouvoir intégrer à la fois le degré de connaissance du milieu (paramètres connus) et les propriétés des phénomènes à reproduire, en exploitant un découpage du domaine en mailles de taille variable.

7.2.2. Taille des mailles

La nature des sollicitations extérieures du modèle conditionnant le comportement de l'aquifère est également très hétérogène. Ces diverses sollicitations imposées sont de trois types en fonction de l'étendue de leur surface d'application :

- les processus associés aux drains et rivières s'appliquent sur un support géométrique quasi-linéaire ;
- l'infiltration de la saumure issue des terrils s'applique sur une surface très variable (réf. paragraphe 6.2.5) ;
- les nombreux débits d'exhaure sont des informations ponctuelles à l'échelle du domaine.

Le choix de la taille de la maille est ainsi une donnée sensible pour l'approche des transferts en fonction du niveau de détail que l'on souhaite reproduire. Sachant qu'au sein d'une maille, la valeur d'une variable est représentée par une moyenne, deux types d'intégration implicite en découlent :

- l'amplitude maximale d'un phénomène induit par une sollicitation locale intense sera réduite à une moyenne, compte tenu de la taille de la maille correspondante (cas de la vitesse de transfert au voisinage des cours d'eau ou des forages, gradient de concentration au voisinage des terrils par exemple) ;
- lorsque plusieurs sollicitations extérieures s'expriment dans une même maille, la variable restituée par le calcul résulte de l'intégration globale des processus. Dans ce cas, la cause la plus intense imposera l'effet induit dominant. Ce phénomène est particulièrement sensible au voisinage des terrils où l'on peut rencontrer au sein d'une même maille, d'une part l'infiltration verticale descendante de la saumure dense, et d'autre part une vitesse à composante verticale ascendante induite par plusieurs forages (cas d'une couche supérieure plus perméable). Selon l'intensité relative des processus élémentaires imposés, l'effet résultant moyen calculé, issu de cette compétition, n'est pas nécessairement l'effet observé localement.

Ces contraintes pratiques liées à la taille de la maille choisie ont une incidence directe sur la manière d'interpréter les résultats de la simulation par rapport aux mesures ponctuelles de contrôle disponibles (historique des mesures aux piézomètres et aux puits par exemple). Les mêmes difficultés sont rencontrées pour la saisie des données, lors de la génération d'un champ de concentration initial très hétérogène (fichier semis).

7.2.3. Régime transitoire et pas de temps

Le choix du pas de temps est à examiner en parallèle avec celui de la taille des mailles. Les contraintes qui conditionnent le choix du pas de temps sont principalement :

- la connaissance de l'historique des données décrivant les sollicitations extérieures imposées. La majorité des données (concentrations aux limites extérieures, concentrations des rivières, flux massiques infiltrés sous les terrils, débits des puits d'exhaure) sont, soit admises comme constantes, soit connues sous la forme de moyennes annuelles ;
- la dynamique de réponse du système en terme de transfert. Cette dernière est nettement plus lente que celle de l'hydrodynamique pure ;
- l'amplitude locale de la vitesse de transfert en liaison avec la taille de la maille et le schéma de calcul choisi ;
- le respect des critères numériques spécifiques au transfert (nombre de Péclet et nombre de Courant).
- le mode de traitement des non-linéarités (débit d'échange des cours d'eau, surface libre) et des couplages (relation "concentration dense" - masse volumique). Avec le code de calcul MARTHE, cette dernière contrainte est prise en compte indépendamment, au moyen des sous-pas de calcul gérés par quelques paramètres : coefficients de relaxation, nombre d'itérations, incertitude maximale ;
- la durée globale des calculs, compte tenu du nombre d'itérations internes nécessaire.

7.2.4. Hypothèses principales retenues

En raison de l'interdépendance des processus (hydrodynamique et transferts) et de la variation des débits, les deux phénomènes sont calculés simultanément en régime transitoire, au même pas de temps annuel ("pas du modèle"). Chaque pas de temps comprend le calcul hydrodynamique, le calcul du transfert de la salure et les ajustements liés aux variations de la densité.

Bien que le maillage utilisé pour le calcul hydrodynamique ne soit pas localement optimisé pour l'estimation des transferts, la discrétisation en mailles régulières de 500 m de coté a été conservée pour l'ensemble de l'approche. La conséquence principale de ce choix se manifeste au sein du Bassin Potassique, vis-à-vis du détail des concentrations estimées. Un choix différent, avec une plus grande précision locale, aurait nécessité une révision de l'ensemble des nombreux fichiers existants, ainsi que la recherche de nouvelles données.

Le début de la simulation est fixé en 1975. Cette date coïncide avec l'arrêt des rejets en rivières (Thur, Vieille Thur) ainsi que dans les gravières et bassins à boues. Le nombre de sollicitations extérieures du modèle est ainsi stabilisé sur la période étudiée, à l'exception des débits des nouveaux puits de fixation/dépollution, en nombre réduit, mis en service à partir de 1975. Le choix de cette situation initiale coïncide également avec la disponibilité de deux cartes expérimentales détaillées.

7.3. DONNÉES POUR LA MODÉLISATION

Ce paragraphe rappelle quelques conversions d'unités utiles, puis décrit les contraintes extérieures imposées pour la modélisation des transferts ainsi que les paramètres du milieu. Il précise également les options du code de calcul retenues.

7.3.1. Unités et conversions

Les données expérimentales (cartes de la salure, historiques, flux massique, etc.) sont généralement fournies en unités pratiques et dans un système d'unités distinct de celui de la convention interne du code de calcul. Dans ce sens, le code MARTHE possède une grande souplesse permettant d'ajuster automatiquement les unités d'entrée-sortie des données au moyen de coefficients de conversion :

- les données fournies relatives à la salure sont exprimées en mg de chlorure par litre de solution (réf. cartes expérimentales) et restituées en sortie, après calcul, dans les mêmes unités ;
- lorsque l'on intègre les effets densitaires, en sélectionnant l'une des lois internes de densité, cette dernière nécessite la connaissance de la concentration en équivalent-NaCl (kg/m^3 par défaut). Il convient alors de fournir le coefficient de conversion liant la concentration en Cl^- à la concentration en NaCl, compte tenu des unités correspondantes. En se référant à la stoechiométrie, la concentration en kg NaCl/m^3 de solution (unité interne par défaut) s'obtient en multipliant la concentration en $\text{mg Cl}^-/\text{l}$ par le facteur : $1.648 \cdot 10^{-3}$. A saturation par exemple, et à 25°C , la concentration est de l'ordre 317 g de NaCl/l ou $192 \text{ g Cl}^-/\text{l}$, pour une densité de 1.2 ;
- de la même manière, les flux d'infiltration sous terrils sont, selon les documents de référence, fournis soit en t NaCl/an soit en $\text{t Cl}^-/\text{an}$. L'utilisation du facteur de conversion précédent (agissant sur les masses) permet de faciliter l'introduction des données en conservant les unités d'origine et de contrôler les résultats de calcul dans les mêmes unités.

7.3.2. Distribution de la salure initiale en 1975

La réalisation du fichier décrivant l'état initial de 1975 est une étape importante dans la mesure où le détail des informations fournies conditionne largement la simulation de l'évolution de la saumure au cours du temps. En effet, les vitesses de transfert étant faibles et très hétérogènes, l'évolution de la distribution de la salure simulée en aval du

Bassin Potassique dépend fortement des caractéristiques, amplitudes maximales et gradients décrits par cette situation initiale.

Le traitement nécessaire des données de 1975 a consisté à transformer les fichiers issus de la digitalisation (points des seules courbes isovaleur) en fichiers-semis (une valeur par maille au pas de 500 m). Plusieurs méthodes d'interpolation ont été évaluées, y compris le krigeage avec ou sans recherche de voisinage anisotrope, et la transformation des variables (logarithme). Les difficultés pour cet exercice sont liées à la variation de l'anisotropie du voisinage de recherche à considérer, à l'existence de courbes isovaleur très voisines, aux très forts gradients locaux et à la densité de points fortement hétérogène (conséquence de la digitalisation). La méthode utilisée pour traiter ce type de carte se résume en quelques étapes :

- utilisation des interpolateurs inclus dans le logiciel SURFER, en choisissant la méthode par triangulation. Il s'agit d'un interpolateur exact par voisinage à variation linéaire, respectant les points fournis, le domaine de recherche pouvant être ajusté ;
- superposition et évaluation avec la carte des isovaleurs digitalisées ; des points expérimentaux repris sur les cartes initiales ont été ensuite rajoutés afin de reproduire plus fidèlement les gradients locaux ;
- exportation des résultats estimés (fichiers Ascii) aux noeuds d'une grille régulière coïncidant avec le maillage souhaité et filtrage par le masque du contour extérieur ;
- utilisation du logiciel INGRID (chaîne MARTHE) pour générer un fichier-semis cohérent avec les conventions du code de calcul ;
- duplication du fichier pour constituer un premier semis 3D à trois couches.

A ce stade, une difficulté subsiste dans la mesure où l'on ne connaît qu'une seule carte de la salure dite moyenne, indépendamment de la profondeur des mesures, alors que l'objectif est de disposer de la description des trois niveaux du modèle. Les trois cartes ont été modifiées manuellement, principalement dans le Bassin Potassique, en intégrant les informations complémentaires (géophysique, piézomètres profonds) communiquées par le SGR Alsace et la réponse des simulations comparée à l'historique d'évolution des piézomètres de contrôle. L'état retenu comme champ initial (fig. 35a et b) demeure toutefois perfectible dans le détail, et même par zone (niveau inférieur).

En utilisant les paramètres de contrôle requis, ce même fichier peut être utilisé soit pour un calcul isodensitaire (la concentration étant celle d'un traceur), soit pour un calcul avec couplage densitaire (concentration dense corrélée à la densité du fluide).

7.3.3. Contraintes sur la salure des rivières

On utilise dans ce cas également l'option "concentration extérieure" qui permet de contraindre automatiquement les seuls flux d'échange rivière-nappe positifs (infiltration).

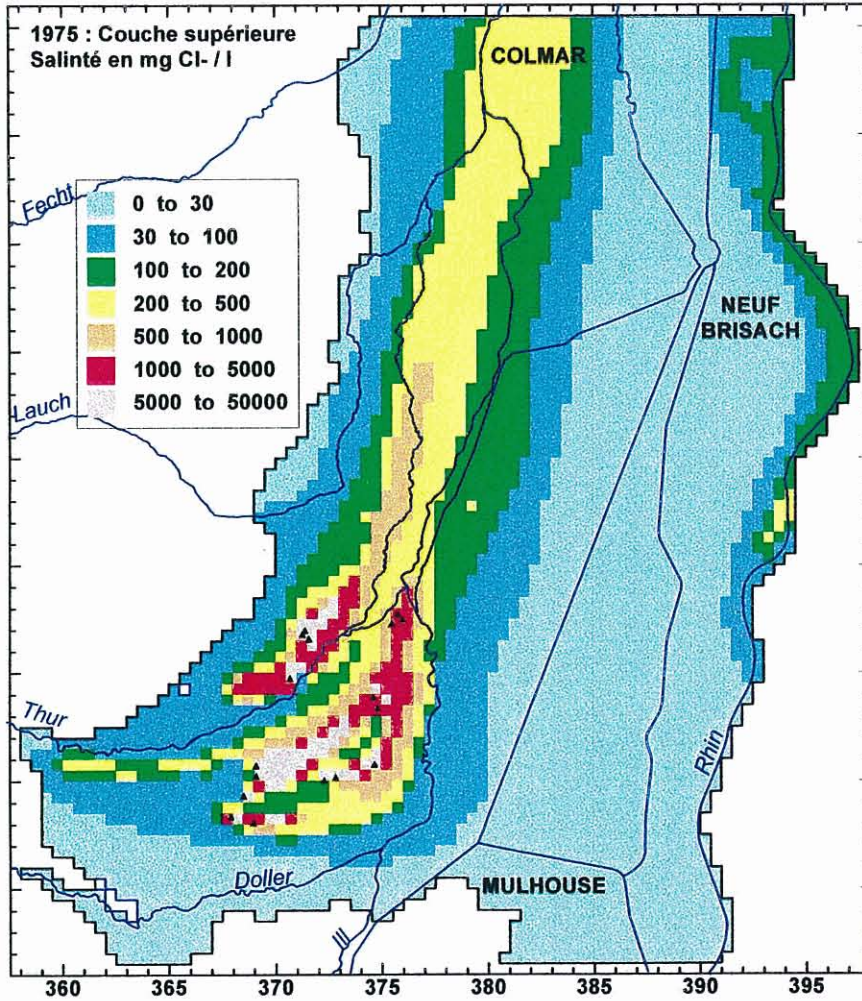


Fig. 35a - Situation initiale pour la modélisation en 1975 : couche supérieure (fichier-semis).

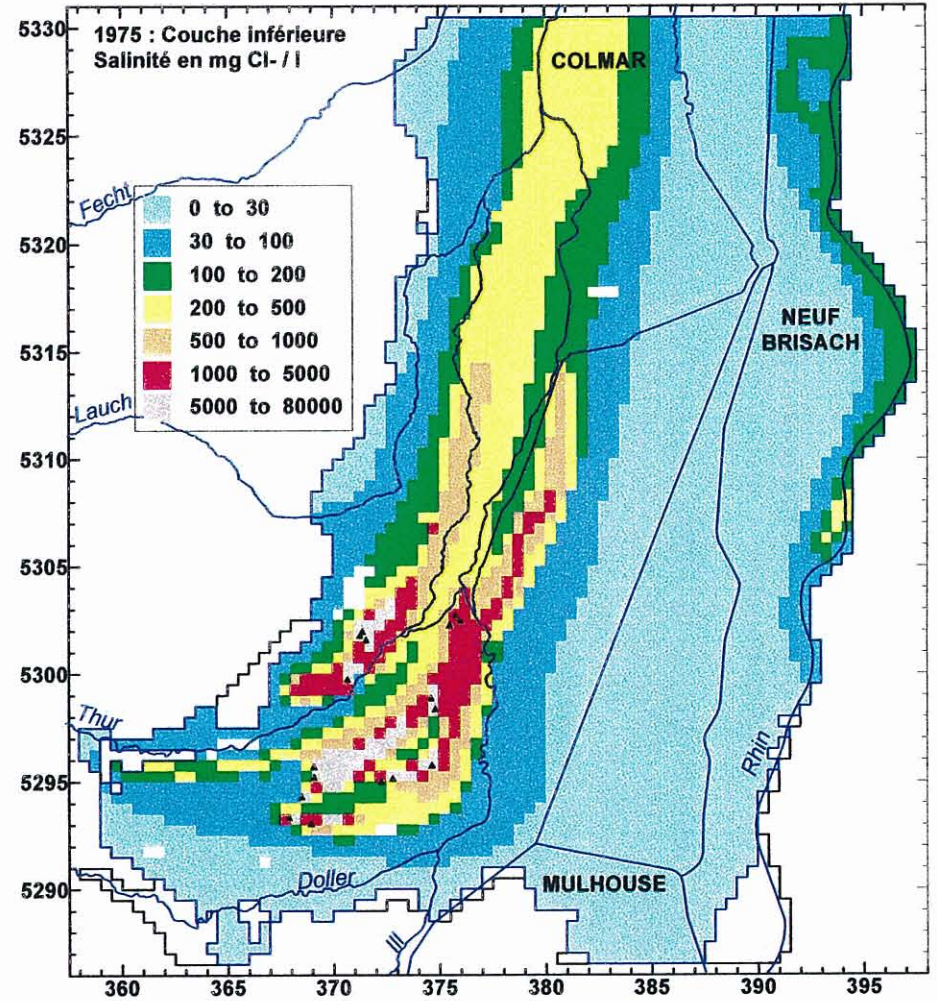


Fig. 35b - Situation initiale pour la modélisation en 1975 : couche inférieure (fichier-semis).

Les contraintes extérieures imposées aux rivières ont été estimées à partir des mesures de débit et de concentration aux stations de contrôle (réf. rapports annuels de suivi de la salure). L'historique schématique de ces évolutions est détaillé dans le tableau 19. Compte tenu des faibles variations, on retient des valeurs de concentration constantes pour les sections des principales rivières, au cours de la période simulée.

Rivière	Lauch amont	Lauch aval	Fecht	III aval	III amont	III sup.	III inf.	Vieille Thur	Thur amont	Thur aval	Doller	Rhin amont	Rhin aval
Station	Merx.	Herri.			Brun.	Rueli.	Ober.	Unge.	Staff.	Ensis.	Reini.		Seltz
Point contrôle	378- 6-093	378- 2-098			413- 6-404	413- 2-251	378- 7-089	413- 2-258	413- 1-404	413- 2-257	413- 5-319		
Affluent	41	42	12	34	31	32	33	16	15	15	11	4	4
Année													
1975	22	116	20	196	20	30	196	80	100	100	10	30	136
1976	20	156	20	108	20	30	108	80	100	100	10	30	131
1977	20	88	20	50	18.9	30	50	80	100	100	10.9	30	116
1978	21.8	76	20	51	22.2	30	51	80	100	100	25.8	30	124
1979	12.4	92	20	43	21.5	30	43	80	100	69	14.9	30	126
1980	20	80	20	40	21.3	30	40	58.7	100	51	14.2	30	115
1981	20	97	20	48	25	30	48	60	100	45	15	30	98
1982	20	99	20	45	25	30	45	60	100	45	15	30	98
1983	20	115	20	54	25	30	54	60	100	45	15	30	122
1984	20	92	20	52	25	30	52	61.2	100	42.7	15	30	137
1985	55	11	20	58	34.5	30	57.5	84.2	212	53.3	38	30	141
1986	20	86	20	44	30	27	44	85	100	40	15	30	127
1987	20	93	20	46	30	27	46	85	100	40	15	30	103
1988	20	146	20	42	30	27	42	85	100	40	15	30	106
1989	20	92	20	58	30	27	58	96	100	20.5	15	30	120
1990	15.7	110	20	69	27.9	25.2	69	83	60.5	51	12.6	30	136
1991	18	92	20	59	30	20	59	83	60	60	10	30	120
1992	18	127	20	49	30	20	49	83	60	62	10	30	120
1993	18	168	20	41	30	20	41	74	60	39	10	30	120
1994	18	92	20	37	30	20	37	81	60	42	10	30	120
1995	19.5	88	20	38	30.5	19.8	38	72.9	95.6	41	10	30	120
1996	19.8	121	20	43	32.3	24	42.6	93.8	73.9	90.2	10.2	30	120
Moyen retenu const.	20	100	déf.	50	déf.	25	50	80	80	80	12	déf.	déf.

Tabl. 19 - Estimation de l'évolution de la salure des rivières (mg Cl/l) et valeurs constantes retenues pour la simulation.

7.3.4. Conditions aux limites extérieures du domaine

Pour le calcul des transferts, la concentration doit être précisée sur toutes les limites extérieures à l'amont de l'écoulement. Par défaut, le code MARTHE attribue une valeur de concentration nulle sur toutes les surfaces d'alimentation caractérisées par un flux entrant (pluie, rivières, puits d'injection). Pour les sollicitations imposées aux limites du domaine (bordure des Vosges, nord et sud du modèle), on utilise l'option "concentration

extérieure" (de type traceur ou dense) avec une valeur constante de 20 mg Cl-/l. Cette option permet d'imposer la valeur de la concentration du fluide entrant, et d'ignorer cette contrainte dans le cas d'un flux sortant. Les concentrations imposées aux limites extérieures du domaine sont admises comme constantes au cours du temps.

7.3.5. Infiltrations dues aux terrils

Compte tenu de la discrétisation du domaine et de la localisation des 17 terrils renseignés, l'infiltration induite par ces derniers est répartie sur 16 mailles. Les valeurs utilisées (cf. tabl. 18) sont déduites des travaux de modélisation antérieurs (Vançon, 1997), et imposées sous la forme de moyennes annuelles, c'est-à-dire au début de chaque pas du modèle. Les valeurs mentionnées dans le tableau 18 montrent une décroissance des masses infiltrées sur la période 1975-1990, avec une réduction moyenne de l'ordre de 50 %. Les valeurs postérieures à 1990, non disponibles, ont été admises égales à la dernière valeur connue.

Les options du code MARTHE offrent plusieurs possibilités pour introduire un apport massique imposé :

- le flux massique imposé, soit une masse par unité de temps et de surface ; il s'agit de l'option utilisée ;
- l'injection instantanée de masse (Dirac), qui est généralement appliquée à un pas de temps court (répartition de la masse imposée sur la durée du pas de temps) ;
- à l'aide d'un code spécial (fichier des paramètres généraux), on peut enfin préciser si la masse imposée s'applique par unité de surface (concept de densité de flux) ou pour la surface de la maille (prise en compte automatiquement).

Les conditions d'infiltration massique relatives aux terrils de l'Ochsenfeld n'étant pas connues, celles-ci ont été traduites par une concentration imposée dans la maille correspondante (200 mg/l).

7.3.6. Paramètres du milieu et du fluide

Les principaux paramètres du milieu associés aux processus de transfert ont été introduits sous la forme de valeurs homogènes pour l'ensemble du domaine et n'ont pas fait l'objet d'un calage.

Ces paramètres, qui pourraient également être fournis de manière discrète, par zone ou spatialisée, sont les suivants :

- Diffusivité moléculaire : 10^{-9} m²/s
- Dispersivité longitudinale : 0 à 50 m
- Dispersivité transversale : 0 à 5 m
- Porosité cinématique : 9 à 12 %

La valeur de la porosité est directement issue de la phase de calage du régime hydraulique transitoire ; sa modification constitue une méthode pour ajuster localement ou globalement le temps de transfert de la salure.

Pour les paramètres du fluide, le choix concerne essentiellement la loi de densité. L'option utilisée consiste à retenir la loi dite "Schlumberger-VDB" qui prend en compte la concentration et la température (constante dans ce cas).

Les variations de viscosité avec la concentration (isotherme) ne sont pas prises en compte. Pour une température moyenne de 10 °C par exemple, une variation de la concentration de 0 à 25 g/l (valeur moyenne sous les terrils) conduit à une augmentation de 4 % environ de la viscosité. Les zones à forte concentration, au voisinage des sources de saumure, étant stables, on peut ainsi considérer que cette variation est déjà intégrée dans le processus de calage des perméabilités.

7.3.7. Choix du potentiel hydraulique

Avec la prise en compte de la densité, plusieurs choix sont offerts quant au potentiel hydraulique retenu pour la résolution du système d'équations. Ce choix concerne essentiellement la précision des calculs et les charges imposées :

- calcul standard des charges (isodensitaire) ;
- résolution en charges réelles (densitaire) ;
- résolution en pression (densitaire) ;
- résolution en charges d'eau douce (densitaire).

Le choix retenu est la résolution en charges d'eau douce (option conseillée du code de calcul). Cette option n'a que deux implications pratiques, sans conséquence dans le cas traité :

- lorsque l'on définit une zone équipotentielle ; dans ce cas le potentiel constant recherché est exprimé en charge d'eau douce. Cette situation aurait pu être rencontrée si les puits de fixation par exemple avaient été traduits par 3 mailles équipotentielles afin de ne pas imposer le débit à priori dans chacune des 3 couches de l'aquifère. Le potentiel constant serait alors exprimé en charge d'eau douce, et non en charge réelle ;
- en présence d'un potentiel imposé, ce dernier est exprimé implicitement en charge d'eau douce. Dans le cadre de l'étude, les seuls potentiels contraints sont imposés au nord et au sud du domaine (continuité de l'aquifère rhénan), c'est-à-dire dans un secteur où la concentration est très faible ou minimum (20 mg/l) et par conséquent la densité égale à l'unité. Si tel n'était pas le cas, la solution consisterait à imposer également la masse volumique, d'où une charge équivalente à la pression.

8. Résultats de la modélisation des transferts

Ce chapitre présente les principaux résultats issus de la simulation des transferts. La présentation est focalisée sur les différents centres d'intérêt : cartes des concentrations en chlorures, historique des piézomètres de contrôle de la salure, puits de fixation, temps de transfert et trajectoires des particules du fluide. Les calculs de simulation ont été réalisés selon deux hypothèses (densitaire et isodensitaire) afin de quantifier les effets spécifiques éventuels ou d'évaluer l'erreur associée à leur simplification. L'examen de l'incidence de la discrétisation géométrique permet enfin de relier les contraintes associées, aux principaux écarts entre les résultats de simulation et les données expérimentales.

8.1. CARTES DE LA SALURE

Les cartes de la salure présentées par la suite sont issues de la simulation en régime transitoire, couplée à l'hydrodynamique, et incluant les effets densitaires. Les cartes traduisent l'évolution de la distribution de la salure à partir de la situation de référence initiale de 1975 décrite sous sa forme discrétisée à la figure 35. Les résultats présentés ont été sélectionnés tous les 5 ans afin de permettre une comparaison avec les cartes expérimentales (cf. fig. 30 à 34). Les classes de valeur et de couleur sont conservées sur les deux jeux de cartes. Chaque carte reproduit la distribution de la salure de la couche supérieure et de la couche inférieure. La couche médiane, absente dans toute la partie sud-ouest (Bassin Potassique) n'est pas représentée.

8.1.1. Cartes du réseau élargi

L'examen des cartes simulées (fig. 36 à 39) montre tout d'abord que la phénoménologie générale des transferts et son évolution sont correctement reproduites par rapport aux observations :

- à partir de la situation initiale de 1975, caractérisée par une seule langue salée (cartes moyennes), le long du tracé de la Vieille Thur, la simulation traduit l'amorce de la langue est (1980), puis le développement de deux langues séparées ;
- la salure maximale au sein des deux langues se résorbe progressivement sous l'incidence de la mise en place des puits de fixation ;
- les concentrations moyennes (200 à 500 mg/l) de la langue est se propagent vers l'aval (entraînement par l'écoulement), avec une tendance au déplacement vers l'est conforme aux observations (mesures chimiques et géophysiques) ;
- le tracé de la langue ouest se déploie progressivement en rive gauche de la Vieille Thur, tandis que celui de la langue est occupe la rive droite de l'III ;

- l'effet conjugué de l'infiltration des rivières et de l'ajustement des perméabilités contribue au développement de la bande à faible concentration (100 à 200 mg/l) séparant les deux langues salées. Cette bande s'aligne en rive gauche de l'III.

La comparaison des cartes observées et simulées n'est pas systématiquement aisée dans la mesure où les résultats de simulation donnent le détail de la distribution de la salure dans chacune des trois couches de l'aquifère. D'autre part, lors de la réalisation manuelle des cartes expérimentales, un poids plus ou moins fort a pu être affecté à certains points isolés très superficiels ou profonds. En fait, pour la comparaison avec la carte expérimentale moyenne, les cartes simulées pourraient être superposées et examinées par transparence pour restituer l'effet moyen, en intégrant un facteur de pondération avant cette opération. Certains phénomènes locaux sont cependant moins fidèlement restitués, malgré les diverses tentatives d'ajustement des différents paramètres :

- au centre du domaine, chacune des langues salées est affectée d'une dispersion transversale apparente qui augmente leur largeur. Cette caractéristique est liée notamment à la discrétisation géométrique (cf. § 8.6), à la représentation des gradients hétérogènes et à un ajustement non optimal de la perméabilité. On peut noter à ce propos que le code de calcul MARTHE permet un ajustement automatique de la perméabilité en fournissant simultanément des données hydrodynamiques et chimiques avec une pondération différenciée sur chacune des informations fournies ;
- la dispersion transversale apparente au sein des langues salées explique également le fait que la séparation de ces dernières est moins nettement reproduite. La concentration minimale de cette bande intercalaire est ainsi de l'ordre de 200-300 mg/l au lieu de 100 mg/l sur les cartes observées (un niveau dans l'échelle des couleurs) ;
- le nord-ouest du domaine est caractérisé par des concentrations simulées plus faibles (60 mg/l au lieu de 100-150 mg/l). Cette sous-estimation locale des concentrations apparaît induite par deux phénomènes : un flux hydraulique d'alimentation trop élevé en provenance des Vosges (flux imposé) ainsi qu'une incidence trop forte des échanges nappe-rivière dans la partie aval de l'III par rapport à la vitesse locale de la nappe (effet d'écran des pompes de Colmar, cf. § 8.6).

8.1.2. Cartes du Bassin Potassique

La distribution de la salure dans le Bassin Potassique est également reproduite dans ses grandes tendances. L'hétérogénéité très forte en terme d'amplitude et de gradient de concentration est filtrée par l'effet de moyenne des mailles ; certaines caractéristiques de détail sont ainsi masquées. Cet effet affecte notamment la propagation de la langue d'eau douce qui se développe en rive droite de la Thur (sud-ouest), ainsi que celle qui identifie les deux langues salées initiales issues des terrils Amélie II et Joseph Else.

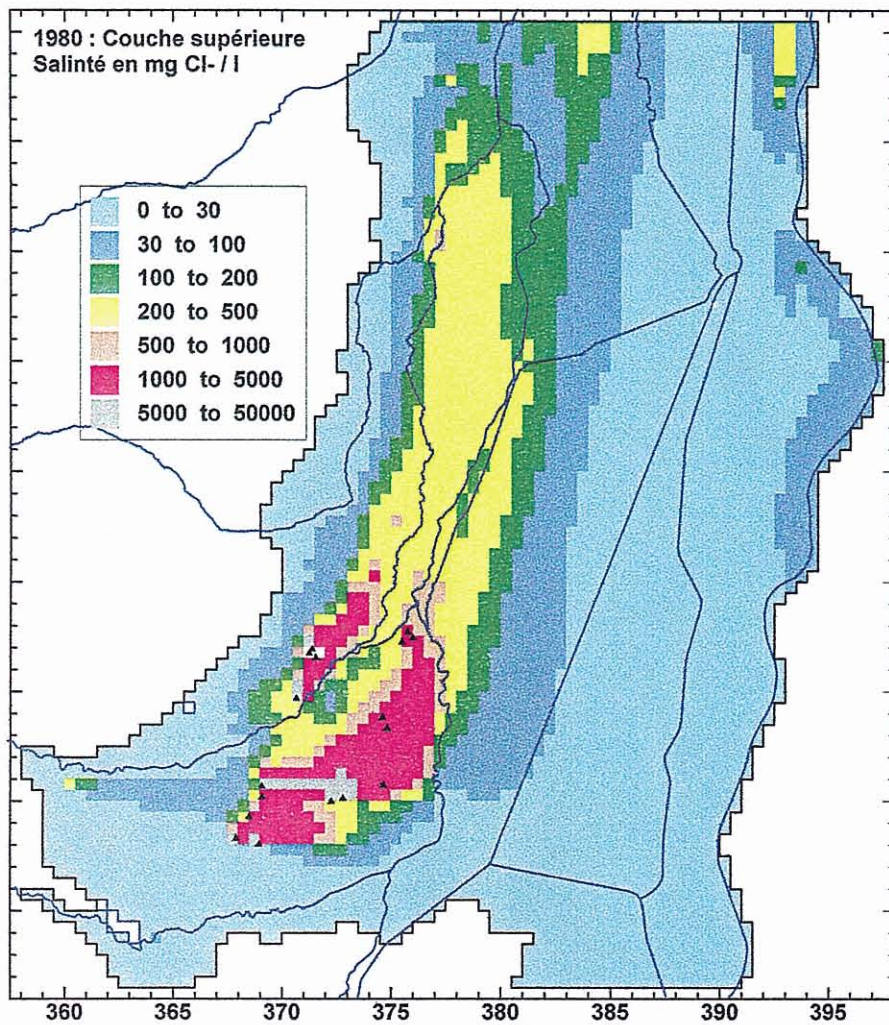


Fig. 36a - Carte de la salure simulée en 1980 : couche supérieure.

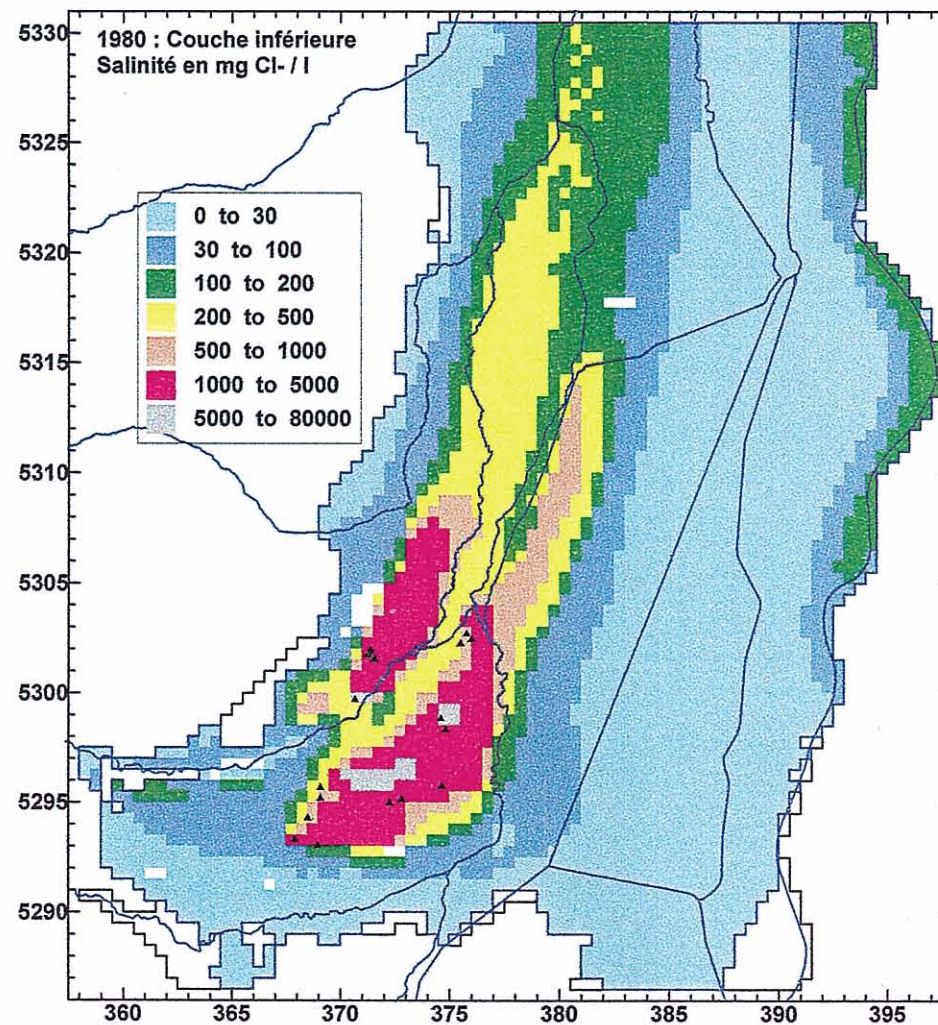


Fig. 36b - Carte de la salure simulée en 1980 : couche inférieure.

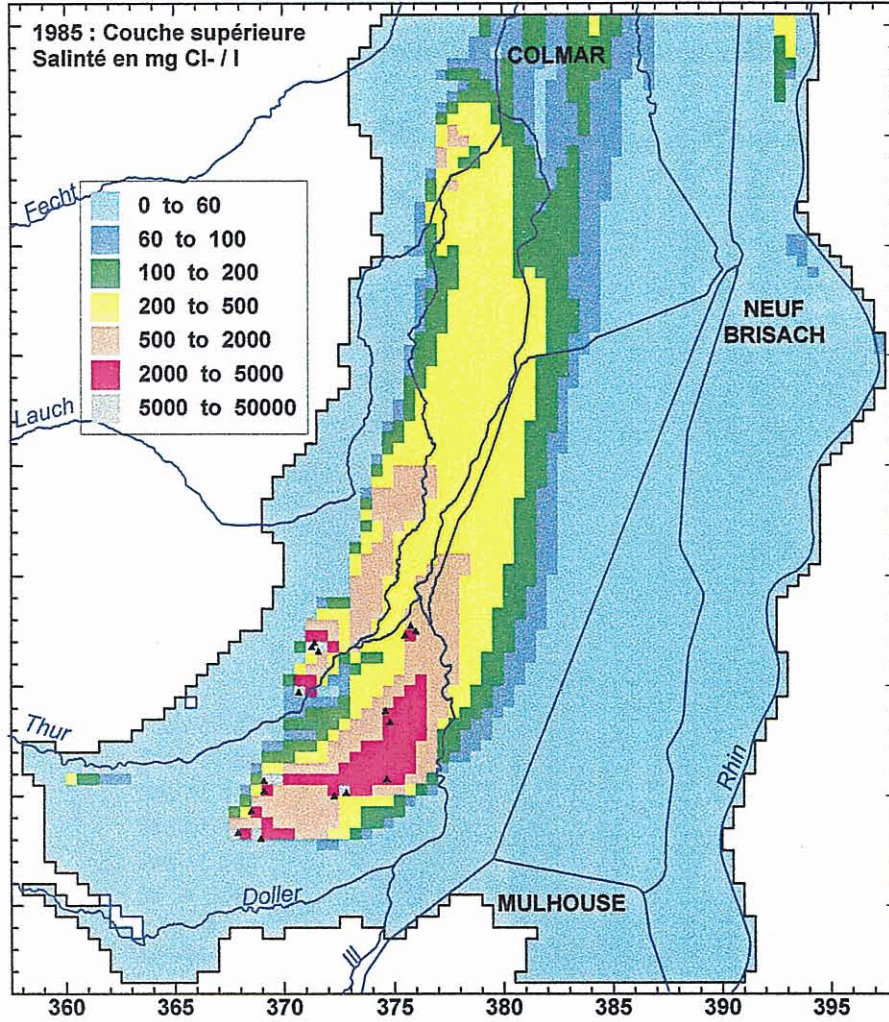


Fig. 37a - Carte de la salure simulée en 1985 : couche supérieure.

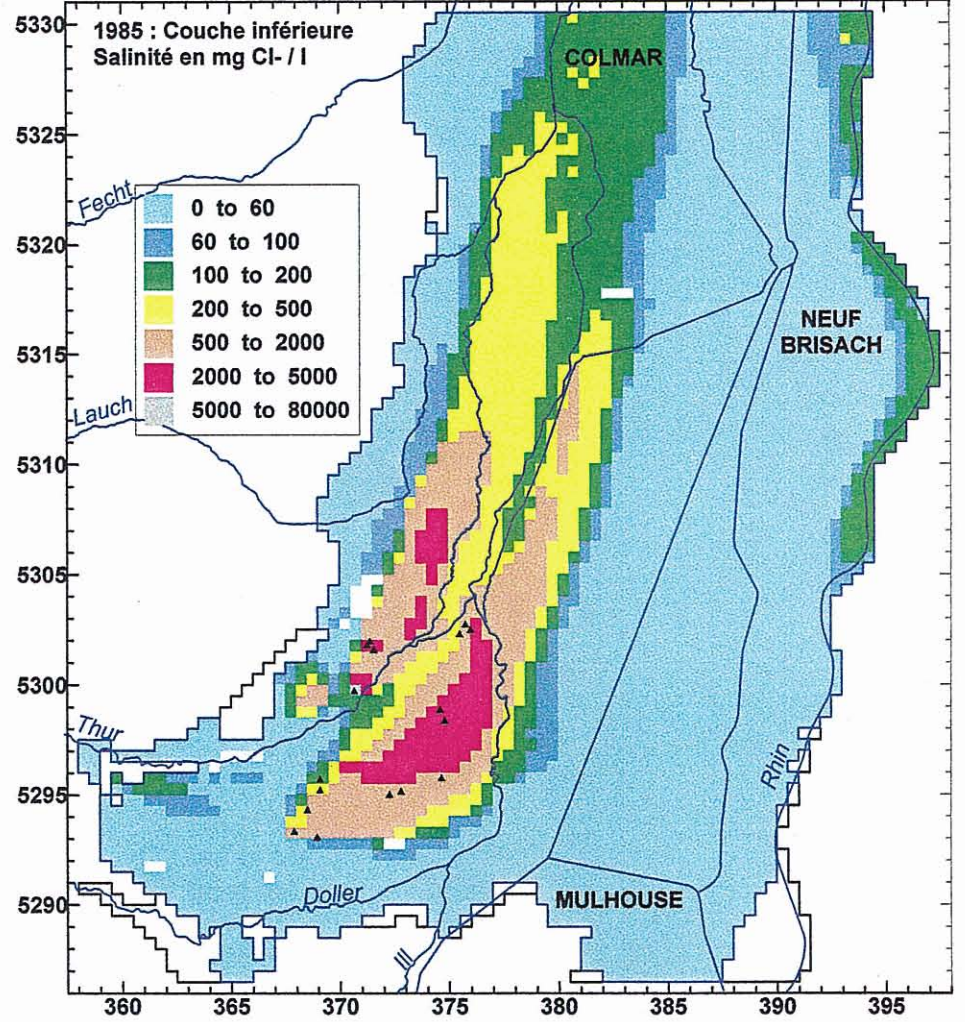


Fig. 37b - Carte de la salure simulée en 1985 : couche inférieure.

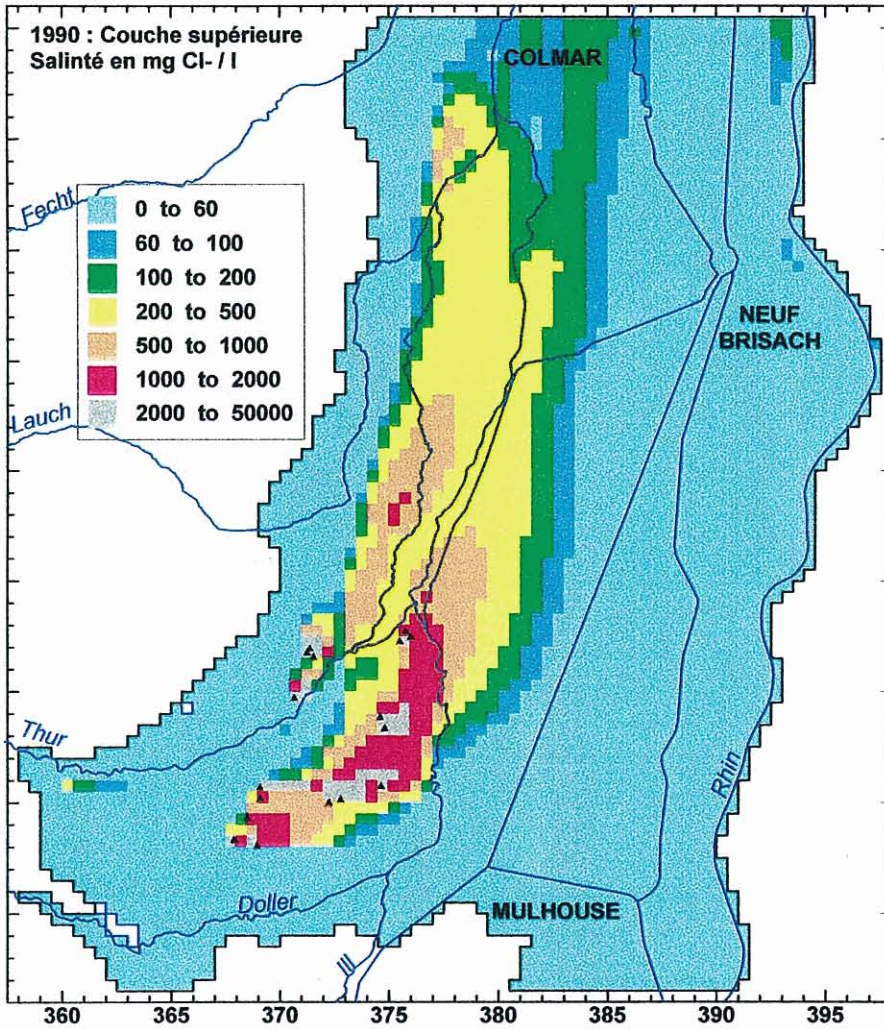


Fig. 38a - Carte de la salure simulée en 1990 : couche supérieure.

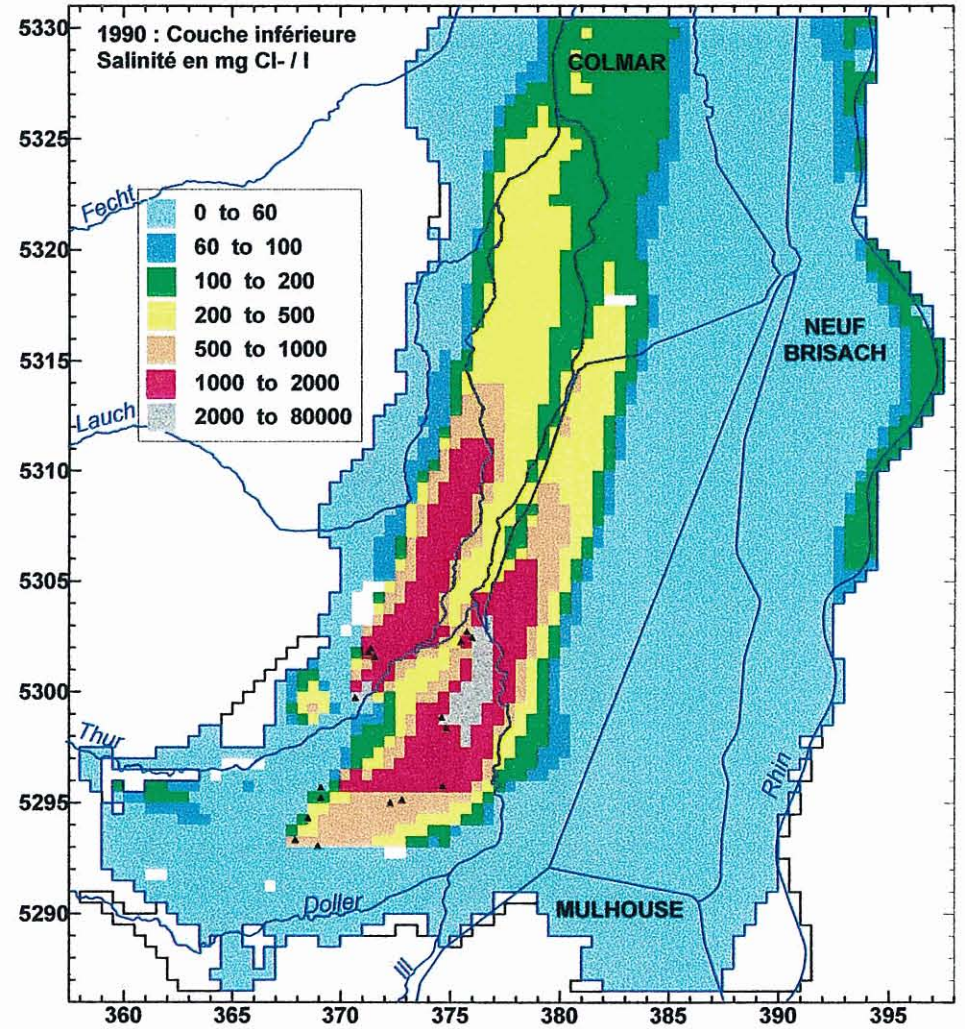


Fig. 38b - Carte de la salure simulée en 1990 : couche inférieure.

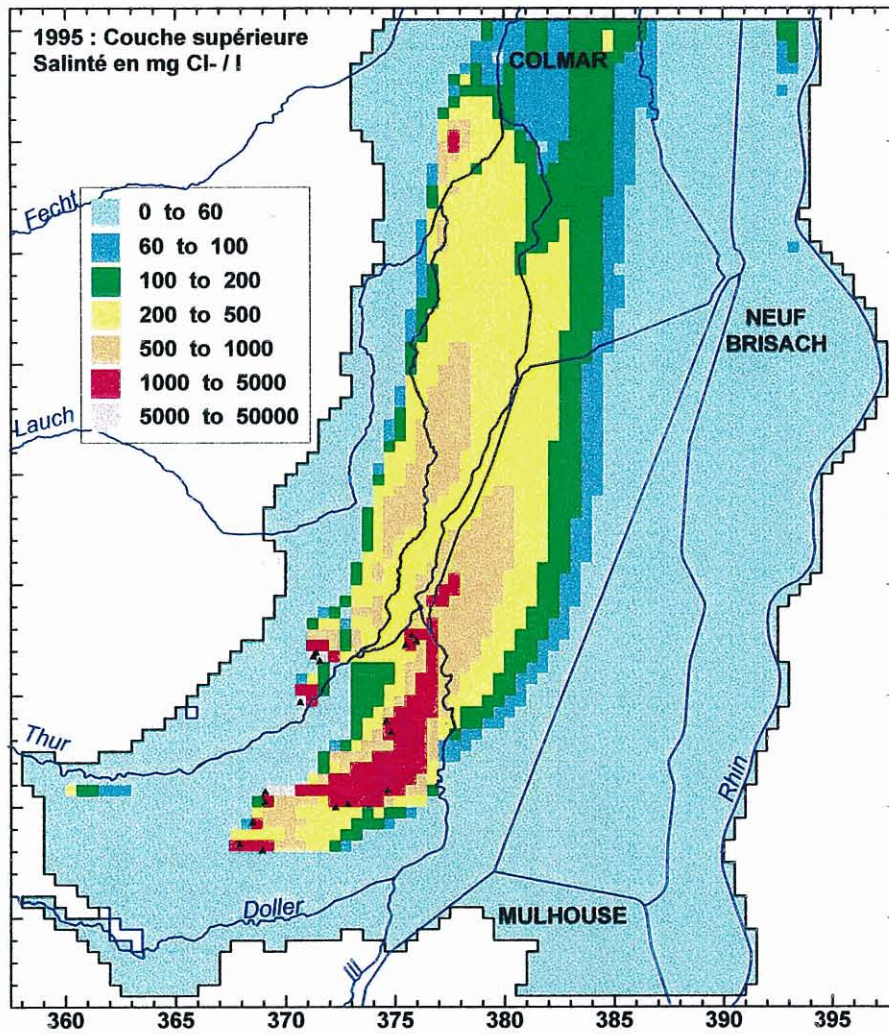


Fig. 39a - Carte de la salure simulée en 1995 : couche supérieure.

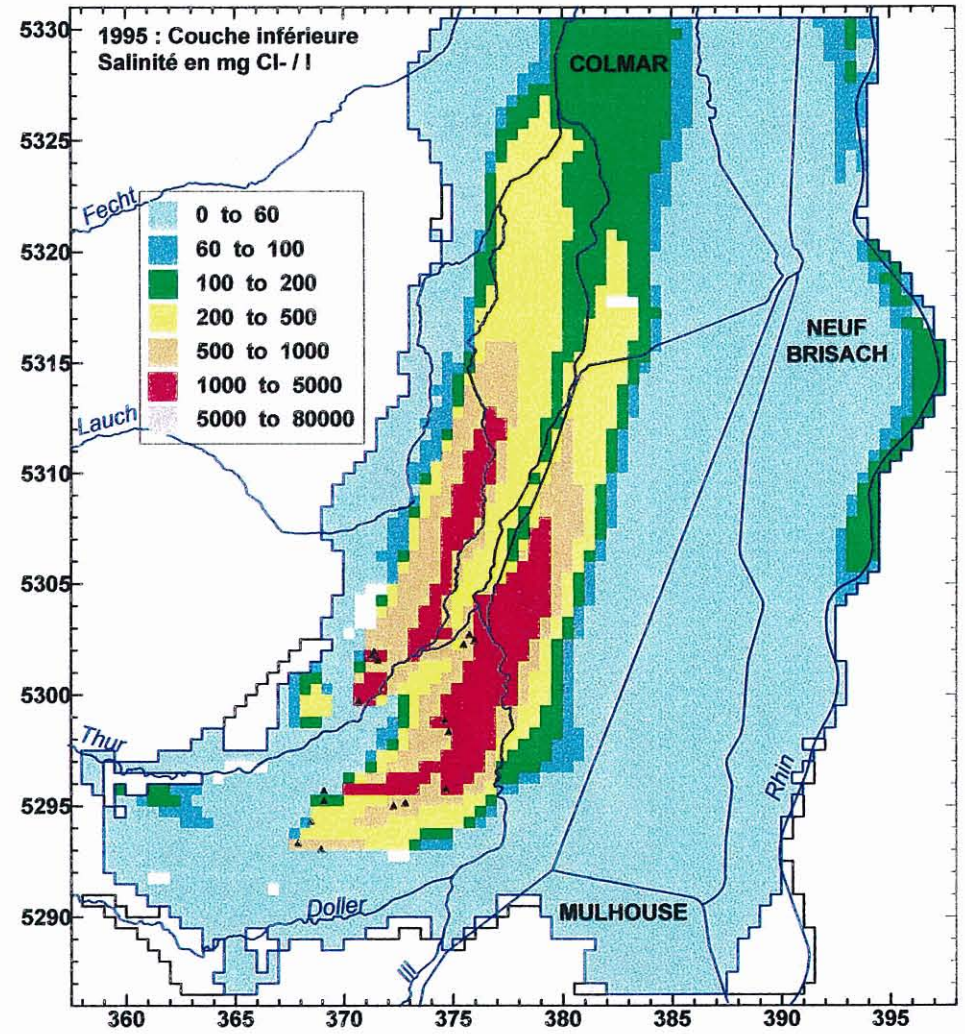


Fig. 39b - Carte de la salure simulée en 1995 : couche inférieure.

On peut noter enfin que la langue salée issue des terrils J. Else rejoint en fait celle plus importante du groupe Amélie-Anna-Fernand, alors que sa migration réelle est plutôt orientée vers l'est et individualisée. Cette anomalie locale est probablement liée à un champ de vitesse local peu précis et perturbé par les pompages. On peut remarquer également que le tracé expérimental de la langue J. Else suit précisément celui de la rivière Dollerbaechlein, laquelle n'est pas prise en compte dans la modélisation.

8.1.3. Principales incertitudes

Les principales incertitudes recensées concernent :

- l'incidence de la discrétisation géométrique horizontale et verticale (cf. § 8.6) ;
- la connaissance insuffisante de la distribution de la salure profonde (couche inférieure du modèle notamment) ;
- le calage des perméabilités qui n'est pas optimal. En terme de transfert et compte tenu de la faible largeur des langues salées réelles, on constate que la variabilité sur l'azimut de la vitesse est aussi importante que celle caractérisant l'amplitude. Un calage simultané sur la base de la piézométrie et de la distribution de la salure permettrait d'optimiser la cohérence entre les caractéristiques de l'hydrodynamique calculée et les cartes de la salure observée.

8.2. HISTORIQUES AUX PIEZOMETRES DE CONTROLE

L'examen des historiques simulés en un point de contrôle et la comparaison avec les observations apportent un complément d'information très utile sur plusieurs points :

- le décalage temporel entre les courbes simulées et observées lorsqu'elles sont similaires renseigne sur la validité des paramètres de transfert : vitesse, porosité ;
- la forme et les anomalies de la réponse simulée peuvent permettre de juger si la distribution de la salure en amont du point de contrôle, à un instant donné (et notamment à l'état initial), est cohérente avec les observations à une date ultérieure. Ces informations sont utiles par exemple pour corriger ou préciser localement la distribution initiale lorsque celle-ci n'est connue qu'à partir d'un faible nombre de piézomètres profonds ;
- la répartition verticale de la concentration grâce notamment aux piézomètres multi-crépines.

Parmi les 17 piézomètres de contrôle et les 4 puits d'alimentation examinés, 3 exemples sont présentés. Les figures 40 à 42 illustrent les points expérimentaux (fichiers du SGR-Alsace), les valeurs simulées obtenues à l'aide de l'option "historique" du code MARTHE, la structure locale de l'aquifère pour la maille concernée ainsi que la localisation de l'intervalle de mesure (crépines).

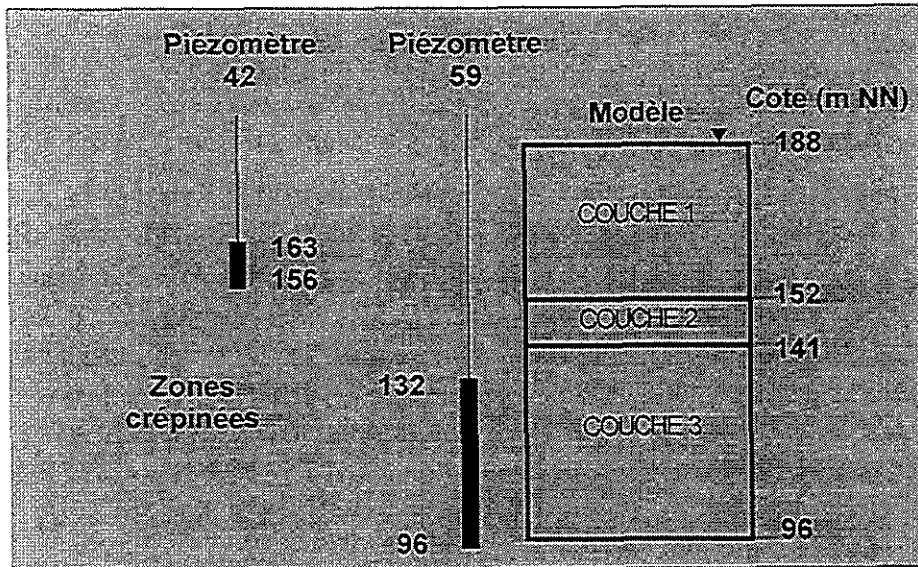
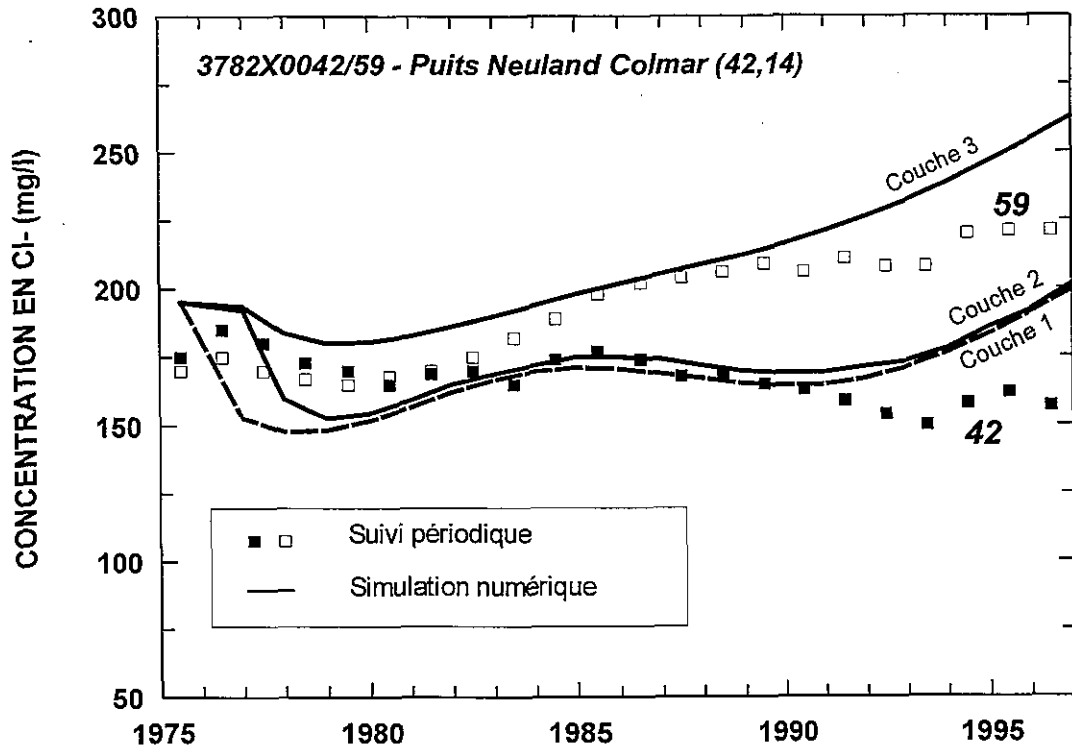


Fig. 40 - Comparaison des historiques mesurés et simulés aux puits de Neuland Colmar.

8.2.1. Puits Neuland Colmar

Les deux puits Neuland Colmar (42 et 59) situés au nord du domaine sont très intéressants dans la mesure où leur concentration traduit une partie de l'histoire de la contamination induite par l'activité du Bassin Potassique depuis le début du siècle.

Localisés à 25 km en aval du terriil Alex, ces forages ont connu ou approchent la teneur limite de 200 mg Cl⁻/l (seuil de potabilité).

La comparaison des résultats de la figure 40 montre une bonne restitution de la concentration. L'incertitude principale affecte essentiellement les résultats postérieurs à 1990, avec deux causes principales :

- la variabilité latérale de la vitesse simulée (estimation non optimale) qui est d'autant plus sensible lorsque l'on se situe en bordure ou sur l'axe d'une langue salée (cas fréquent pour un certain nombre de piézomètres de contrôle) ;
- l'estimation initiale de la salure de 1975, à une quinzaine de kilomètres en amont du point considéré.

8.2.2. Piézomètre Nord-Dynamitière

Le piézomètre 266 est situé au sein du Bassin Potassique (cf. fig. 29) et à 650 m en aval du terriil Marie-Louise. L'évolution de la concentration simulée dans les deux couches aquifères (fig. 41) est cohérente avec la mesure effectuée dans la couche inférieure. La concentration maximale est obtenue dans la couche inférieure, et le comportement des deux couches est en fait peu différencié à partir de 1985. La forte décroissance de la teneur durant les cinq premières années est bien reproduite, avec un léger décalage temporel.

8.2.3. Piézomètre triple Nonnenbruch

Le piézomètre 294 est localisé au sud du Bassin Potassique et à 3 km en aval (est) du terriil Amélie-Nord. Il s'agit d'un piézomètre multiple qui fournit plusieurs informations selon la profondeur.

L'évolution observée traduit les variations du champ de vitesse local au cours du temps. On peut constater que l'évolution de la salure profonde (fig. 42) est bien reproduite par les simulations, tandis que la couche supérieure s'en distingue peu (effet de la discrétisation ou incertitude sur l'évaluation de la vitesse locale).

Ce piézomètre particulier montre également, sur la base des trois mesures réalisées au sein de la couche inférieure du modèle, qu'il existe probablement une assez forte hétérogénéité verticale de la perméabilité ou du faciès au sein de cette même couche schématisée. La discrétisation verticale choisie a ainsi un fort effet intégrateur vis-à-vis des observations de détail.

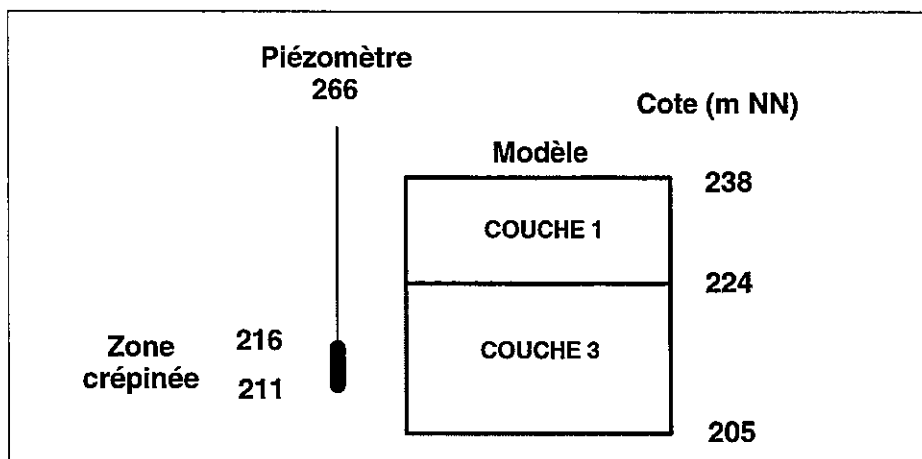
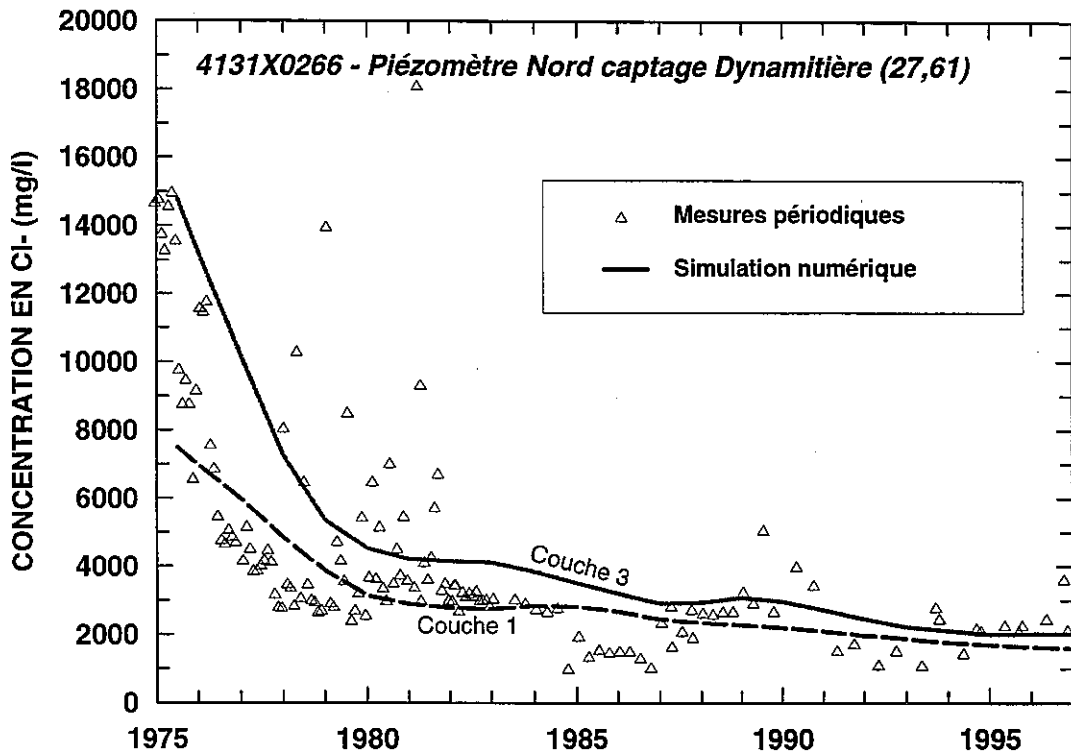


Fig. 41 - Comparaison des historiques mesurés et simulés au piézomètre 266.

8.3.2. Puits de fixation Rodolphe

Le puits de fixation Rodolphe capte principalement la couche supérieure du modèle. Compte tenu des perméabilités des deux niveaux, la production moyenne simulée (fig. 44) a été déterminée à partir d'une pondération équilibrée des débits. La tendance expérimentale ainsi que l'ordre de grandeur de la teneur sont restitués. La réponse expérimentale postérieure à 1991 est liée à la dissolution accélérée et n'est pas reproduite dans le détail en raison du maintien de la sollicitation imposée (infiltration massive du terril égale à celle de 1990 pour les cinq dernières années de modélisation).

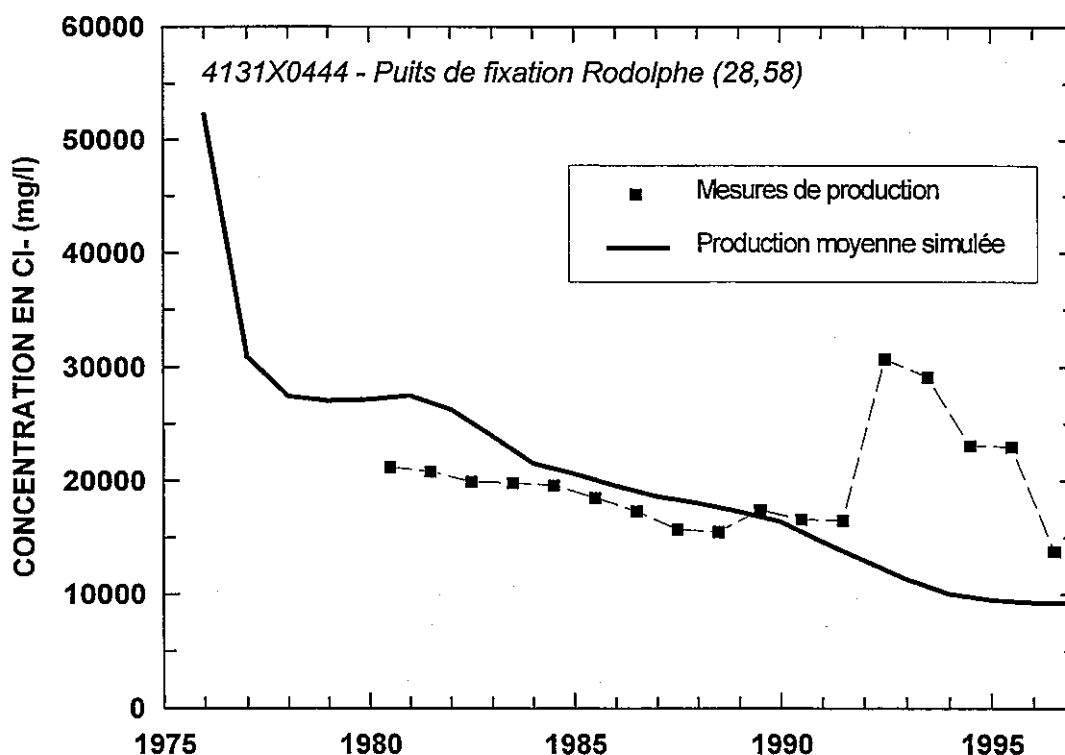


Fig. 44 - Concentrations mesurées et simulées au puits de fixation Rodolphe.

8.3.3. Puits de fixation Amélie-Est

Le puits de fixation 443 est localisé à l'est du terril Amélie-Est. Ce forage capte le niveau inférieur et une partie du niveau supérieur. Compte tenu des perméabilités des couches supérieure et inférieure, la pondération des teneurs par les débits est respectivement de 72.5 et 27.5 %. Malgré l'incertitude numérique sur l'estimation de la teneur moyenne de production, cette dernière reproduit correctement les observations. On notera également qu'en raison de la présence de plusieurs forages de production dans la même maille, la percolation verticale de la saumure dense est limitée et par conséquent décalée vers l'aval de l'écoulement.

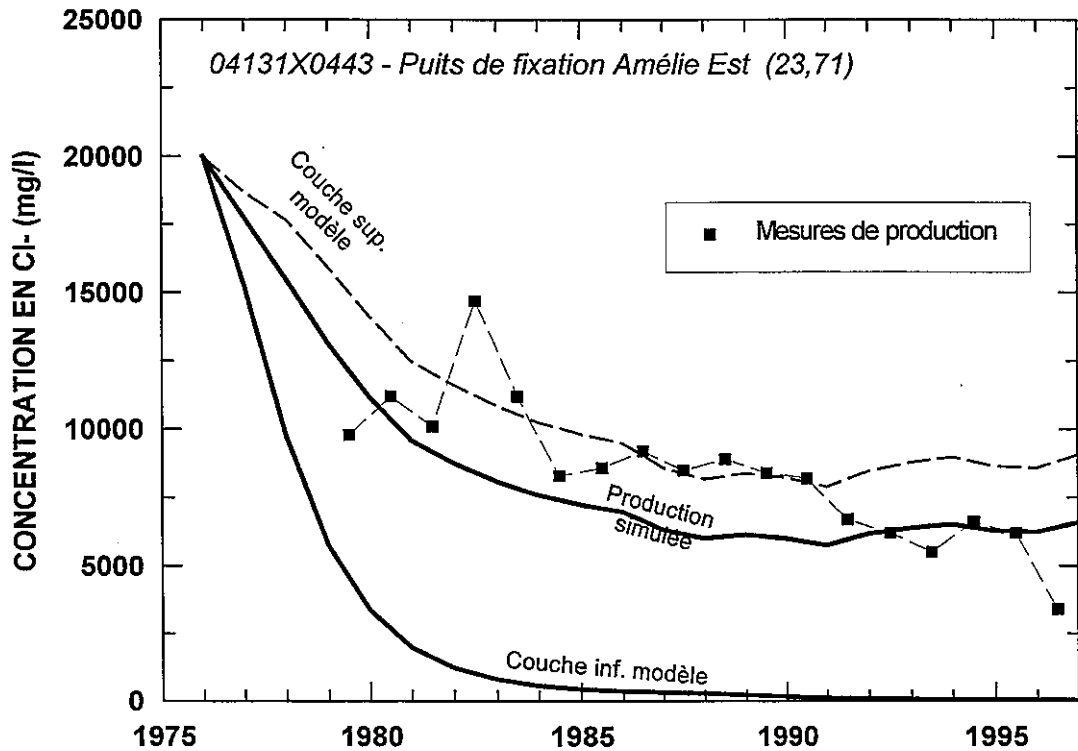


Fig. 45 - Concentrations mesurées et simulées au puits de fixation Amélie-Est.

Dans le cas des puits de fixation ou de dépollution, l'interprétation et la comparaison des résultats sont plus complexes que ceux des piézomètres de contrôle car les réponses observées et simulées incluent plusieurs phénomènes locaux :

- la mesure, tout d'abord, reflète la teneur moyenne de production liée à la hauteur crépinée, au nombre de couches sollicitées et à leur perméabilité. La moyenne expérimentale est une fonction de la salure (non connue) de chaque couche, pondérée par le profil de débitmétrie ;
- au plan des contraintes extérieures imposées, la répartition verticale des débits par couche a été fixée à partir des perméabilités initiales. En fait, le profil de débit devrait être implicite, en déclarant par exemple que les mailles-puits sont équipotentielles (option du code MARTHE), ou en ajustant les débits imposés par couche (débit total invariant) en parallèle avec le calage des perméabilités ;
- enfin, au plan numérique (cf. § 8.6), lorsqu'une maille-terril est influencée par plusieurs pompages dans la même maille ou une maille contigüe, une compétition s'établit entre la percolation verticale de la saumure dense et la composante verticale de la vitesse locale due aux productions. Si la perméabilité de la couche supérieure est élevée, alors la percolation verticale et la concentration de la couche inférieure peuvent être sous-estimées (effet de moyenne liée à la taille de la maille).

8.4. TRAJECTOIRES ET TEMPS DE TRANSFERT

Le calcul puis le tracé des trajectoires des particules constituent une technique simple pour faciliter le calage des paramètres hydrodynamiques sous la contrainte des directions de propagation des transferts connues. Une première phase de calage schématique peut ainsi être réalisée à partir du seul calcul hydrodynamique en régime transitoire ou permanent, en sélectionnant l'option "calcul des trajectoires". Le fichier d'entrée nécessaire contient dans ce cas les coordonnées des centres de l'ensemble des mailles-terrils ; ces informations étant doublées afin de restituer les trajectoires différenciées dans les principales couches du modèle.

La figure 46 reproduit la distribution spatiale des trajectoires issues des mailles-terrils dans la couche inférieure et sur la durée totale de simulation de 21 ans. Les trajectoires simulées (calcul densitaire) sont superposées avec la carte de la salure expérimentale initiale (1975). La comparaison des informations permet d'examiner à la fois les particularités de détail et les singularités (incertitudes numériques) :

- avec la mise en place progressive des puits de fixation, la direction de l'écoulement évolue en rive gauche de la Vieille Thur, d'où un déplacement de la langue ouest ;
- l'incidence des pompages en aval des terrils, ainsi que la précision numérique, conditionnent fortement le départ des trajectoires et par conséquent leur tracé ultérieur ;
- en raison d'un calage local perfectible de la perméabilité, les trajectoires issues des terrils J. Else rejoignent celles des terrils Anna, au lieu de suivre un azimuth est, parallèle au tracé de la Dollerbaechlein (exclue du modèle). Pour les mêmes raisons, les trajectoires issues des terrils Ensisheim rejoignent la rive gauche de l'Ill en contribuant à surestimer les teneurs dans la bande de séparation entre les deux langues salées.

Les dates associées aux trajectoires permettent d'identifier les temps de transfert et les vitesses moyennes au sein de chaque langue salée ; la porosité étant dans le cas présenté de 12 % :

- pour la langue ouest (Bollwiller) et dans la couche inférieure, le temps de transfert entre la principale source (Alex) et Colmar à l'aval, est de l'ordre de 32 ans. La vitesse moyenne de migration de la salure est comprise entre 800 m/an à l'aval et 980 m/an au voisinage des sources ;
- pour la langue est, et dans la couche inférieure représentée, le temps de migration entre le groupe Amélie et Colmar est de l'ordre de 40 à 50 ans selon les trajectoires suivies ;
- enfin, les trajectoires ayant leur origine en couche inférieure (fig. 46) sont représentées en projection dans cette dernière. Le tracé complet 3D est en fait plus complexe. Compte tenu de la distribution des perméabilités et des pompages, 30 % environ des trajectoires rejoignent, temporairement ou non, la couche supérieure.

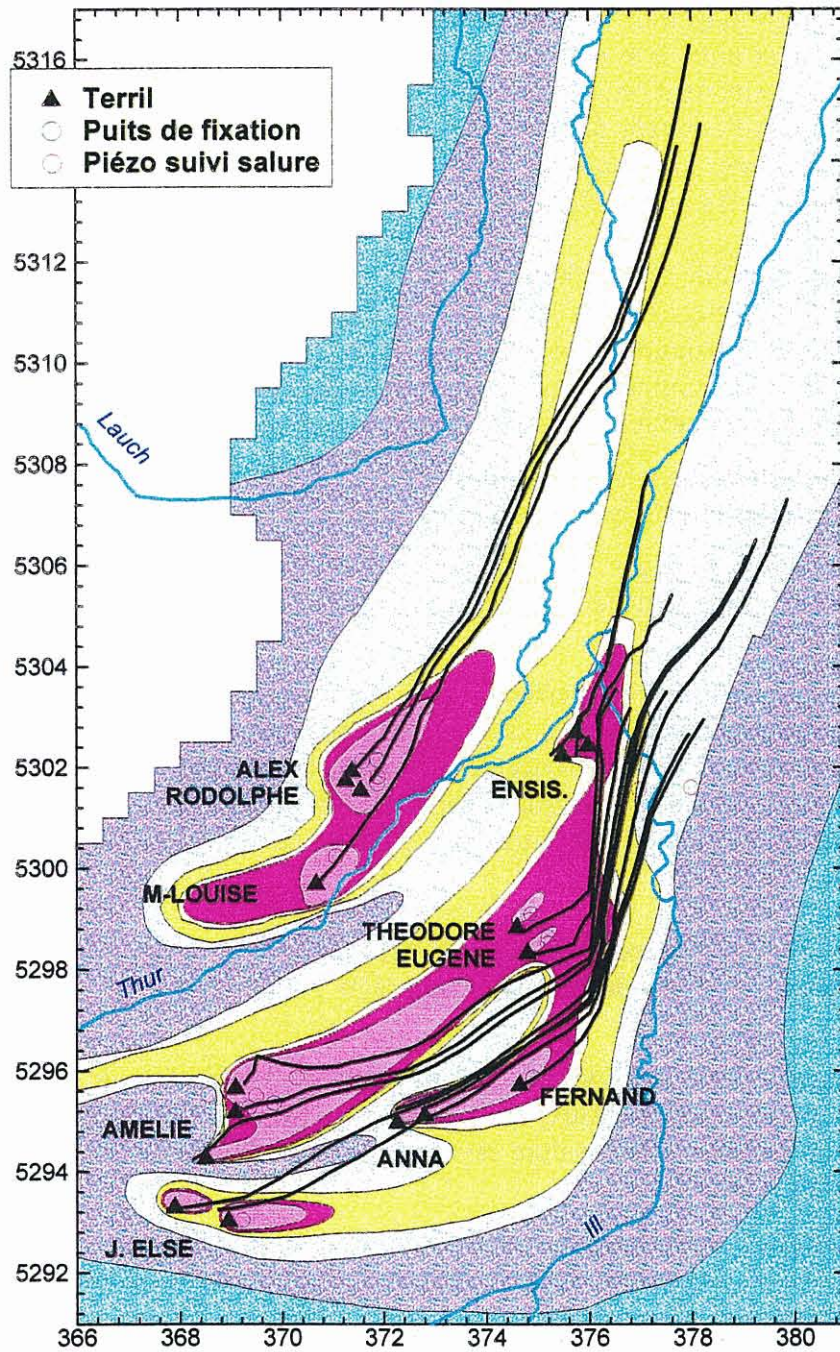


Fig. 46 - Distribution des trajectoires de particules issues des mailles-terrils dans la couche inférieure (simulation avec prise en compte des effets de densité).

8.5. INCIDENCE DES PHENOMENES DENSITAIRES

La simulation des transferts de la salure induits par l'hydrodynamique a été réalisée selon deux hypothèses : d'une part en intégrant les effets densitaires (option "concentration dense" du code MARTHE) et d'autre part avec l'approche hydrogéologique classique (isodensitaire, fluide de densité égale à l'unité). La comparaison des résultats permet d'évaluer l'incidence des effets densitaires, ou d'estimer l'erreur associée à l'hypothèse isodensitaire par exemple.

8.5.1. Rappel de la phénoménologie générale

La vitesse de filtration V dans le milieu poreux est définie par la loi de Darcy qui, sous sa forme généralisée, s'écrit :

$$V = -\frac{K}{\mu} \cdot (\nabla P + \rho \cdot g \cdot \nabla Z)$$

La formulation classique isodensitaire consiste à admettre que la masse volumique ρ est constante, ce qui permet de faire dériver la vitesse d'un potentiel scalaire unique à rotationnel nul (concept de charge hydraulique). Lorsque les variations spatiales de la masse volumique sont incluses, on peut développer la relation précédente pour faire apparaître les deux forces motrices de l'écoulement sous la forme :

$$V = -k \cdot \left(\nabla H + \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \cdot \nabla Z \right)$$

k , étant la perméabilité hydrogéologique (m/s), et H , la hauteur de colonne d'eau douce par exemple équilibrant la pression de l'aquifère. En considérant un aquifère de faible épaisseur pour simplifier, on remarque que la force motrice globale de l'écoulement (termes entre parenthèses) comprend alors deux composantes : le gradient de charge hydraulique exprimé en hauteur de colonne d'eau douce et un terme correctif fonction à la fois de la masse volumique réelle du fluide et du pendage de la couche aquifère. Le terme correctif, supposé nul dans le cas de l'approche isodensitaire, est le facteur spécifique qui permet d'évaluer simplement les effets densitaires. Ce dernier facteur induit, dans le cas général, plusieurs types de conséquences :

- les deux forces motrices responsables de l'écoulement s'ajoutent selon les règles du calcul vectoriel, pour donner la force motrice globale. En terme d'amplitude de la vitesse du fluide, il en découle que celle-ci peut être amplifiée ou même s'annuler localement, selon que les directions des deux forces motrices sont dans le même sens ou en opposition ;
- en raison de la composition des forces motrices, l'azimut de la vitesse résultante peut être notablement modifié. Dans l'hypothèse d'un milieu isotrope, l'azimut résultant sera donc schématiquement parallèle au gradient de pression dans les zones où les variations de pendage et de densité sont faibles, et parallèle à la ligne de plus grande pente lorsque le gradient régional de pression sera faible ;

- l'examen de la dernière relation montre également que le champ de vitesse possède dans ce cas un rotationnel non nul. La conséquence pratique principale s'exprime par le fait que la vitesse résultante n'est plus orthogonale aux lignes d'égal potentiel hydraulique H. L'interprétation des résultats de simulation de l'écoulement est alors plus complexe, car il convient d'examiner conjointement plusieurs cartes (densité, pendage, pression) ;
- enfin, la composante rotationnelle étant essentiellement liée aux gradients de densité et d'altitude, l'intégration des phénomènes densitaires n'est envisageable que si ces informations sont connues avec une précision ou un détail suffisant.

8.5.2. Application au domaine étudié

Il a été rappelé au chapitre 6 que la distribution spatiale de la salure (et par conséquent celle de la masse volumique) se répartit essentiellement selon un axe nord-sud à l'ouest de l'aquifère rhénan, et schématiquement en deux zones : le Bassin Potassique et l'aval de celui-ci en direction de Colmar. Pour préciser l'incidence des effets densitaires il est alors utile d'examiner conjointement la carte des altitudes du substratum :

- le Bassin Potassique regroupe l'ensemble des sources de contamination. Ces sources quasi ponctuelles, à alimentation continue, sont le lieu des concentrations les plus élevées avec des gradients maximaux dans leur voisinage immédiat. Il a pu être observé également que le gradient de concentration diminue très rapidement avec la distance aux terrils, hormis à l'aval de ceux-ci. Dans ce domaine, l'altitude du substratum, bien qu'hétérogène, varie peu et se caractérise par un gradient régional faible. On peut ainsi en déduire que la force motrice d'origine densitaire ne sera sensible qu'au voisinage des terrils où existent précisément les gradients de concentration les plus élevés ;
- l'aval du Bassin Potassique se caractérise par une variation nettement plus importante de l'altitude du substratum : deux "vallées" profondes orientées nord-sud se matérialisent de part et d'autre du dôme de Hettenschlag et pourraient être à l'origine d'effets densitaires sur l'écoulement. L'examen de la distribution de la salure montre par contre que l'amplitude de la concentration (100 à 500 mg/l) et son gradient sont particulièrement faibles. Dans ce sens également, et à l'exception de quelques anomalies locales, l'impact des effets densitaires sur l'écoulement sera faible.

En comparant les cartes issues des deux approches (densitaire et isodensitaire), il a ainsi pu être constaté qu'il n'existe pas de manifestations significatives des effets densitaires à l'échelle du domaine étudié. Il subsiste par contre des effets locaux de faible amplitude liés, soit à des variations du gradient de concentration, soit au pendage des couches productives.

Le tableau 20 permet de quantifier les principaux effets locaux. Ce tableau reprend les informations relatives à l'écoulement dans les mailles du modèle situées à l'aplomb des terrils et en comparant les résultats issus des deux approches réalisées. L'évolution du vecteur vitesse est décrite par ses deux principales caractéristiques : l'azimut horizontal et l'amplitude. La concentration maximale étant localement de l'ordre de 50 g/l et le

gradient régional d'altitude plutôt faible, les effets résultants sont modérés par rapport à ce que l'on obtient généralement dans le contexte d'un bassin sédimentaire de grande extension par exemple.

Terril	Maille	Couche	Azimut vitesse horizont. isodens.	Azimut vitesse horizont. densit.	Variation azimuth (dens-Iso) en degrés	Module vitesse isodens. (m / an)	Module vitesse densitaire (m / an)	Ratio V. Dens. V. Isod.
Alex	27,58	S	N 49 E	N 58 E	9	21	25	1.19
		I	N 60 E	N 60 E	0	1460	15	0.01
Rodolphe	28,58	S	N 38 E	N 33 E	-5	20	21	1.05
		I	N 46 E	N 46 E	0	1340	1391	1.04
Marie-Louise	26,62	S	N 31 E	N 19 E	-12	79	129	1.63
		I	N 45 E	N 44 E	-1	766	814	1.06
Ensisheim N.	36,56	S	N 13 E	N 17 E	4	136	134	0.98
		I	N 36 E	N 34 E	-2	197	204	1.04
Ensisheim O+E	36,57	S	N 7 O	N 6 O	-1	464	470	1.01
		I	N 3 E	N 3 E	0	163	17	0.10
Eugène	34,65	S	N 69 E	N 69 E	0	542	583	1.08
		I	N 75 E	N 75 E	0	839	848	1.01
Théodore	34,64	S	N 66 E	N 66 E	0	375	413	1.10
		I	N 58 E	N 58 E	0	187	189	1.01
Fernand	34,70	S	N 56 E	N 57 E	1	899	952	1.06
		I	N 62 E	N 62 E	0	429	438	1.02
Anna E	30,71	S	N 70 E	N 69 E	1	492	558	1.13
		I	N 67 E	N 68 E	1	448	467	1.04
Anna O	29,71	S	N 72 E	N 70 E	2	442	514	1.16
		I	N 71 E	N 70 E	-1	479	498	1.04
Amélie N	23,70	S	N 46 E	N 33 E	-13	157	194	1.24
		I	N 69 E	N 59 E	-10	880	949	1.08
Amélie II	22,73	S	N 61 E	N 56 E	-5	473	618	1.31
		I	N 57 E	N 52 E	-5	1041	1056	1.01
Amélie E	23,71	S	N 72 E	N 57 E	-15	69	107	1.55
		I	N 80 E	N 74 E	-6	1126	1166	1.04
J. Else O	20,75	S	N 67 E	N 44 E	-23	63	296	4.70
		I	N 90 E	N 83 E	-7	618	552	0.89
J. Else E	22,75	S	N 93 E	N 79 E	-14	298	517	1.73
		I	N 99 E	N 84 E	-15	769	744	0.97

Tabl. 20 - Incidence des effets densitaires sur l'azimut et l'amplitude de la vitesse (application aux mailles-terrils).

En terme de variation d'azimut du vecteur vitesse au voisinage des terrils, l'effet des phénomènes densitaires se traduit en moyenne par une réduction de 5 à 20 degrés. Les trajectoires des particules de fluide (cf. fig. 46) accusent une tendance à s'infléchir plus rapidement vers le nord. En terme d'amplitude, il existe également des variations locales de l'ordre de 5 à 30 % qui ont toutefois une incidence modérée sur la distribution des trajectoires et sur les temps de transfert correspondants.

En résumé, et au plan pratique, pour une évaluation des phénomènes à l'échelle régionale, l'approche densitaire n'apparaît pas indispensable en première analyse. Cette conclusion ne pourrait toutefois pas être retenue pour une approche locale (cas d'un modèle détaillé des terrils par exemple). On peut enfin noter que le temps de calcul requis pour l'approche densitaire est nettement plus important (facteur minimum de l'ordre de 2 à 3).

L'incidence des effets densitaires sur la composante verticale de l'écoulement reste faible, à l'exception du proche voisinage des terrils. Cette incidence est toutefois mal traduite dans le cadre de l'étude en raison de la discrétisation verticale retenue (2 mailles aquifère dans le domaine du Bassin Potassique) et de la présence simultanée de plusieurs forages de production au sein de la majorité des mailles-terrils. Ce type d'investigation nécessiterait une modélisation locale détaillée ou un modèle spécifique dédié à cette analyse.

8.6. INCIDENCE DE LA DISCRETISATION

La discrétisation géométrique du domaine en mailles régulières de 500 m de côté résulte d'un compromis (cf. chap. 7) intégrant les diverses contraintes classiques de la modélisation : nature, nombre et traitement des données, variabilité des phénomènes à reproduire, temps de calcul requis, objectifs de l'approche (locale ou régionale, phénomènes détaillés ou tendance d'ensemble).

D'une manière générale, la variabilité de la distribution de la salure observée est nettement plus importante que celle de la piézométrie. La distribution des gradients de ces mêmes variables relève d'un constat analogue. Dans le détail, la principale caractéristique du champ de salure à reproduire est la relative étroitesse des langues salées induites par les transferts. Cette dimension caractéristique de l'ordre de 500 à 1000 m est du même ordre que celle de la maille choisie. Il s'en suit nécessairement que l'effet de la taille de la maille estompe les forts gradients qui ont une incidence immédiate sur la reproductibilité des phénomènes locaux les plus visibles. Les conséquences de cette première remarque sont cohérentes avec les objectifs de l'étude qui s'est proposé de reproduire l'évolution régionale de la salure, de restituer les tendances générales et de montrer l'adaptation des fonctionnalités du code de calcul au type de problème posé. Dans l'absolu, et pour ce type de problème, le choix de la discrétisation horizontale doit être fixé essentiellement par les contraintes numériques les plus sévères, c'est-à-dire celles induites par les processus de transfert.

Un second point à mentionner vis-à-vis de la discrétisation horizontale est celui de la reproductibilité des phénomènes locaux interdépendants. Les deux principaux exemples illustratifs de ce point sont : l'interaction terrils-forages (compétition entre l'infiltration verticale et les pompages) et la multiplicité des forages d'exhaure à forte densité d'implantation (effet d'écran vis-à-vis de l'écoulement régional).

La figure 47 illustre le premier type d'exemple ; il s'agit de trois forages sensiblement alignés selon un axe perpendiculaire à l'écoulement est localisés dans la même maille (27,61). Ces forages (Dynamitière) sont situés à 650 m en aval du terril Marie-Louise. Les distances entre ouvrages sont de 103 m pour le couple 266-141 et de 80 m pour le couple 141-142. On peut noter que les mesures rendent compte d'une langue salée, permanente, extrêmement étroite, que le maillage retenu ne peut reproduire.

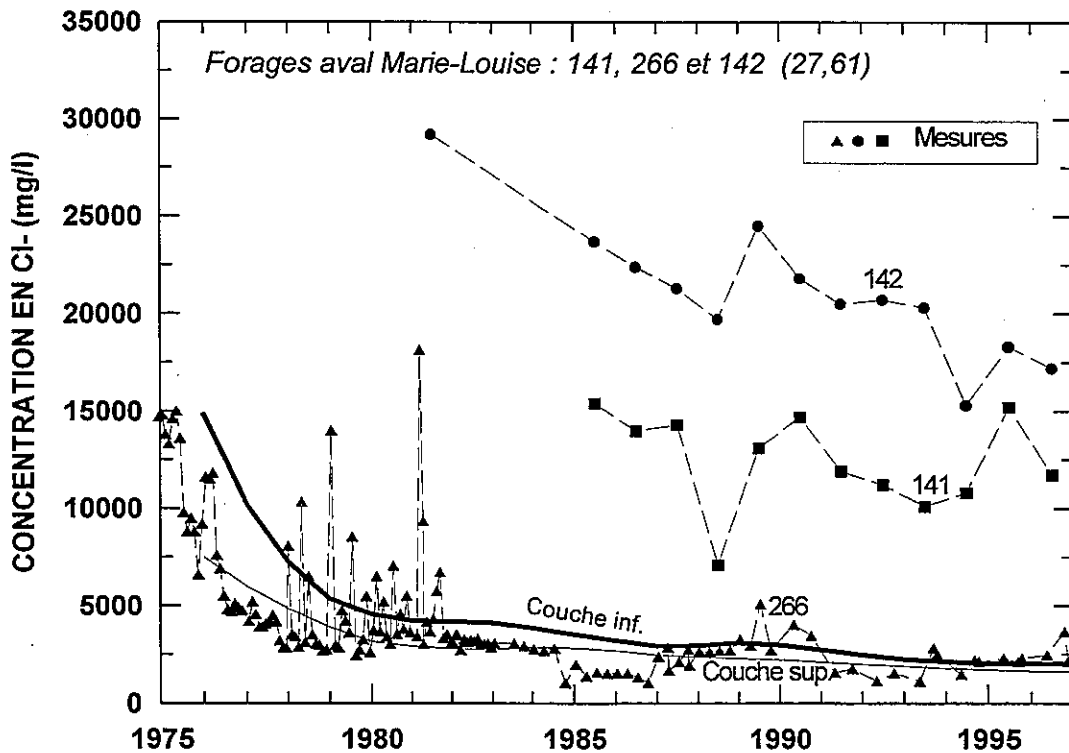


Fig. 47 - Incidence de la discrétisation : historique de la concentration simulée et mesurée dans trois forages de la même maille du modèle (27,61).

Le modèle (courbes continues) restitue en fait la concentration moyenne de la maille, très cohérente avec les mesures du forage 266, le plus éloigné du 142. Ce phénomène de moyenne et de filtrage des singularités, lié à la taille de la maille, n'est pas sans conséquence car il conditionne directement la concentration au sein de la langue salée qui se propage vers l'aval pour alimenter la langue régionale de Bollwiller. Ce phénomène de sous-estimation des effets d'une source de contamination (en terme de concentration maximale) affecte également l'amplitude de la réponse des piézomètres de contrôle de la saumure les plus proches dans le sens de l'écoulement. Cet effet de discrétisation, fréquent dans le Bassin Potassique, explique la difficulté à restituer correctement les concentrations maximales. Par contre, en aval, le bilan massique étant toujours conservé par le modèle, les concentrations plus faibles ne sont pas affectées.

Un autre exemple significatif de ce premier type concerne la situation dans laquelle une maille-terril contient également un ou plusieurs puits de production. Il s'établit alors une compétition entre le flux de percolation vertical de la saumure dense (dirigé vers le bas)

et la vitesse résultante des pompages. Dans le cas où la perméabilité de la couche supérieure est plus élevée que celle de la couche inférieure, la vitesse locale possède alors une composante verticale positive. Ainsi, en conséquence de la taille de la maille, l'incidence de l'infiltration de la saumure sur la concentration du fluide profond se trouve masquée ou même annulée. A l'aplomb d'un terril, on peut alors constater, à l'opposé des observations expérimentales, que la concentration du fluide profond est inférieure à celle du fluide superficiel. Le phénomène physique se rééquilibre ensuite, mais avec un décalage vers l'aval de l'écoulement moins perturbé.

Le second type d'exemple concerne l'incidence des nombreux puits de pompage au sud de Colmar. Lorsque les puits d'exhaure sont nombreux et par effet d'intégration des prélèvements au sein des mailles, on peut rencontrer une situation dans laquelle une série de mailles contiguës en dépression est disposée perpendiculairement à l'écoulement. Cette situation rencontrée au sud de Colmar constitue un effet d'écran hydraulique qui perturbe ou masque les transferts chimiques à l'aval. Ce phénomène, lié à la discrétisation géométrique, explique en partie le fait que le modèle ne restitue pas correctement la concentration observée au nord-ouest du domaine (isovaleur à 200 mg/l, fig. 36 à 39).

En résumé, le choix de la discrétisation géométrique est une étape importante de l'approche car la taille des mailles choisies conditionne le niveau de filtrage de l'incidence des phénomènes singuliers, qu'ils aient ou non un impact sur la phénoménologie observée.

Conclusion

L'objectif de ce projet de développement était essentiellement la réalisation d'une action de démonstration des capacités du BRGM en matière de modélisation d'un système aquifère complexe ainsi que de la haute technicité de ses outils, en particulier ceux qui ont été utilisés dans le cadre de cette étude, les codes MARTHE et GARDENIA.

Pour réaliser cette action de démonstration, on a choisi de modéliser un secteur de la nappe d'Alsace compris entre Mulhouse et Colmar d'une part, le Rhin et les Vosges d'autre part, cette zone réunissant un certain nombre de critères intéressants pour notre étude :

- la diversité des phénomènes physiques à prendre en compte dans la modélisation (important réseau hydrographique interagissant avec la nappe, présence de langues de pollution par des saumures) ;
- la disponibilité de données nombreuses et publiques ;
- l'intérêt de l'Administration dans la perspective de la fermeture des exploitations de potasse en 2004 ;
- le contexte international (nappe transfrontalière).

Dans ce cadre, on a pu valider sur des données de terrain trois options récentes du code MARTHE :

- le bilan hydroclimatique intégré permettant une évaluation réaliste de la recharge de la nappe et du ruissellement vers les cours d'eau ;
- le traitement des interactions nappe/réseau de surface prenant en compte une relation hauteur d'eau/débit dans les rivières ;
- le transport densitaire pour tenir compte des concentrations élevées dans la nappe au voisinage des terrils.

Pour ce faire, on a construit un premier modèle monocouche, dont la géométrie et les données de base sont héritées du modèle LIFE et sur lequel on a mis en œuvre les deux premières options (bilan hydroclimatique intégré et interaction dynamique avec un réseau de rivières, canaux et drains).

Les calages avec ce modèle de l'hydrodynamique, en régime permanent sur la situation de moyennes eaux du 20 octobre 1986, puis en régime transitoire, au pas de temps mensuel, des moyennes eaux de 1986 aux basses eaux du 9 septembre 1991, ont permis une bonne restitution de la piézométrie et de ses fluctuations (aux données manquantes près) ainsi que des profils en long des cours d'eau et des historiques de débit sur 4 stations de jaugeage.

Par contre, le champ de vitesses résultant de ces calages ne permet pas de rendre compte de façon adéquate de la direction et de l'évolution des langues salées. Ceci veut dire que

les calages réalisés, à partir des observations de la seule piézométrie, donnent lieu à un champ de paramètres aptes à reproduire seulement la piézométrie et ses évolutions. Pour restituer correctement le champ de vitesses, il faut procéder au calage de façon différente en intégrant d'une manière ou d'une autre l'information représentée par les langues salées qui fait intervenir des circulations à différentes profondeurs.

Le champ de vitesses n'ayant pu être restitué de façon adéquate avec le modèle monocouche 2D et les observations sur les ouvrages multicrépinés permettant d'envisager l'existence de mouvements de la salure différenciés selon la profondeur, on a estimé qu'il fallait prendre en compte une représentation tridimensionnelle de l'écoulement.

Pour ce faire, la redéfinition des caractéristiques géométriques et lithologiques des alluvions a permis d'identifier trois couches plus ou moins aquifères correspondant respectivement aux alluvions récentes (couche 1), alluvions intermédiaires plus intercalaires argileux (couche 2), alluvions anciennes (couche 3).

Un modèle numérique à 3 couches a été construit à partir de la définition des extensions et épaisseurs de chaque couche alluviale, ainsi que des zones de perméabilité identifiées.

Le recalage de l'hydrodynamique, en régime permanent, avec ce nouveau modèle a permis d'obtenir d'une part une piézométrie beaucoup moins lissée que la piézométrie régionale "observée" mais qui reste tout à fait réaliste, d'autre part un champ de vitesses de l'ordre de grandeur des valeurs mesurées ponctuellement ainsi que des trajectoires à partir des terrils qui suivent la direction des langues observées.

L'analyse des mesures expérimentales décrivant la salure de l'aquifère a permis de consulter une très importante base de données, relativement unique en France, concrétisant près d'une trentaine d'années de surveillance périodique. Une partie de ces informations ponctuelles (piézomètres, forages de production) a été exploitée comme contrainte extérieure de la modélisation pour préciser la distribution initiale de la simulation 3D. Une sélection, non exhaustive, des données restantes a été utilisée pour le contrôle des résultats de calcul. Les principales distributions expérimentales de la salure, sélectionnées au pas de cinq ans (1975-1995), et disponibles initialement sous la forme de cartographies manuelles ont été digitalisées. Les fichiers correspondants réalisés permettent de nombreuses utilisations ultérieures :

- la restitution cartographique à différentes échelles ;
- la comparaison des cartes entre elles ;
- les modifications ou corrections locales en fonction des résultats de simulation ou à l'issue d'une interprétation spécifique plus détaillée ;
- la génération automatique des fichiers nécessaires (fichiers-semis par exemple) pour l'exploitation de modèles numériques.

Le traitement des données pour la réalisation des simulations a consisté à sélectionner les informations à imposer comme contraintes extérieures du modèle. Cette phase

nécessite d'intégrer à la fois les contraintes du maillage géométrique retenu et la connaissance de la fréquence d'échantillonnage des séries temporelles, dans le cas des conditions évolutives. En accord avec la dynamique des phénomènes observés, un pas de modélisation annuel a été retenu. Compte tenu de la discrétisation et d'une information peu détaillée sous les terrils, les contraintes d'infiltration de la saumure sont schématisées. Les bilans massiques étant assurés par définition, il s'en suit que la distribution des teneurs simulées en aval des sources de contamination est respectée. Par contre, plus localement et au voisinage des terrils, l'amplitude et les gradients maximaux de la teneur en sel peuvent être sous-estimés.

La réalisation de la simulation des transferts couplés sur la période 1975-1995 a été conduite selon deux hypothèses : isodensitaire, classique en hydrogéologie et densitaire. Ces deux hypothèses, associées à la visualisation des trajectoires des particules de fluide, permettent de quantifier l'incidence des effets densitaires couplés. Les résultats de simulation montrent que, dans ce cas d'étude particulier, la prise en compte des effets densitaires ne modifie pas de manière significative les résultats de l'approche hydrogéologique classique, au moins pour une analyse à l'échelle de l'ensemble du domaine. Dans le détail, et pour une analyse plus précise de la phénoménologie au voisinage des terrils, des modèles spécifiques ou un affinement local de la discrétisation apparaissent nécessaires.

Au plan de la validité et du contrôle des résultats de simulation par rapport aux observations, les principales caractéristiques de la distribution de la salure ont pu être reproduites. Les écarts locaux constatés s'expliquent essentiellement par l'incidence de la taille des mailles (discrétisation régulière en mailles de 500 m de côté) et par le processus de calage des perméabilités qui demeure perfectible dans le détail.

Enfin, les nombreuses fonctionnalités du code de calcul MARTHE sont particulièrement bien adaptées au traitement de ce type de problème :

- la prise en compte des diverses données, exprimées généralement en unités pratiques spécifiques, est aisément intégrée grâce aux coefficients de conversion agissant en entrée et en sortie ;
- les transferts associés aux échanges nappe-rivières sont inclus et gérés automatiquement en fonction du signe de ces derniers (infiltration ou drainage) et de l'évolution du régime hydrodynamique. La version du code de calcul utilisé n'intègre pas les transferts au sein des rivières ; les teneurs imposées qui sont traduites à partir des mesures représentent une moyenne évaluée par tronçon de rivières ou par affluent ;
- l'usage des mailles-historiques permet de sélectionner les points de contrôle renseignés expérimentalement et de faciliter l'interprétation des nombreux résultats de la simulation en régime transitoire.

Bibliographie

- ANTEA (1996) - Projet LIFE. Modélisation des eaux souterraines de la plaine d'Alsace. Secteurs Mulhouse-Colmar zone 4 et Bâle-Mulhouse zone 5. Rap. A07533.
- BRGM (1976) - Contrôle et surveillance de la nappe phréatique dans le département du Haut-Rhin : Rapport de synthèse sur les mesures effectuées en 1975. Mai 1976.
- BRGM (1981) - Contrôle et surveillance de la nappe phréatique dans le département du Haut-Rhin : Rapport de synthèse sur les mesures effectuées en 1980. Rapport R 81 SGN SGAL 849, Juin 1981.
- BRGM (1986) - Contrôle et surveillance de la nappe phréatique dans le département du Haut-Rhin : Rapport de synthèse sur les mesures effectuées en 1985. Rapport R 86 SGN 269 ALS, Mai 1986.
- BRGM (1991) - Contrôle et surveillance de la nappe phréatique dans le département du Haut-Rhin : Rapport de synthèse sur les mesures effectuées en 1990. Rapport R 32689, Mai 1991.
- BRGM (1996) - Contrôle et surveillance de la nappe phréatique dans le département du Haut-Rhin : Rapport de synthèse sur les mesures effectuées en 1995. Rapport R 38889, Mai 1996.
- BRGM (1996) - Projet LIFE. Modélisation des secteurs français en régime permanent pour les basses eaux. Rap. R 39068.
- BRGM (1997) - Contrôle et surveillance de la nappe phréatique dans le département du Haut-Rhin : Rapport de synthèse sur les mesures effectuées en 1996. Rapport R 39417, Avril 1997.
- BRGM (1997) - La salure de la nappe phréatique d'Alsace : Bilan 1996 et perspectives. Rapport R 39746, Décembre 1997.
- BRGM - Région Alsace (1996a) - Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan. Compte rendu d'avancement 1995 : fichiers du substratum. Rapport R 38643, mai 1996.
- BRGM - Région Alsace (1996b) - Projet LIFE. Description multicouche de l'aquifère rhénan. Secteur de Strasbourg. Rapport R 39066, septembre 1996.
- BRGM - Région Alsace (1996c) - Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan. Rapport annuel 1995. Rapport R 39065, novembre 1996.

- BURGEAP-IMF Strasbourg (1996) - Région ALSACE - Projet LIFE - Modélisation des secteurs de Colmar et de Mulhouse/Bâle en régime permanent pour les Hautes Eaux et les Moyennes Eaux.
- Boisson M., Thiéry D. (1991) - Logiciel GARDENIA - modèle Global A Réservoirs pour la simulation des DEbits et des Niveaux Aquifères - Guide d'utilisation (version 3.2). Rapport BRGM R 32209.
- Elsass P., Rau S. (1995) - Coupes hydrogéologiques Strasbourg-Offenburg. Notice. Initiative communautaire INTERREG, Cartographie hydrogéologique du Rhin supérieur. Région Alsace, Strasbourg, avril 1995.
- GLA (1977) - Hydrogeologische Karte von Baden-Württemberg. Oberrheingebiet, Bereich Kaiserstuhl-Markgräflerland. Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg i. Br., Allemagne.
- Groschopf R., Kessler G., Leiber J., Maus H.J., Ohmert W., Schreiner A., Wimmenauer W. (1996) - Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:50 000. Erläuterungen zum Blatt Freiburg i. Br. und Umgebung. Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg i. Br., Allemagne.
- Herrmann A., Stober I. (1996) - Mächtigkeiten der gut durchlässigen Schichten in den quartären Kieslagern des Oberrheingrabens zwischen Basel und der Nordgrenze des Lkr. Karlsruhe. Rapport GLA 2924.01/96-4763, Freiburg i. Br., sept. 1996.
- Herrmann A., Meinken W., Stober I. (1996) - Durchlässigkeiten im Quartär des Oberrheingrabens zwischen Basel und der Nordgrenze des Lkr. Karlsruhe. Rapport GLA 1107.01/96-4763, Freiburg i. Br., mars 1996.
- Martin J.C., Elsass Ph., Noyer M.L. (1997) – Modèle de la nappe d'Alsace. Projet de développement 312 – Rapport d'avancement n°1. Rap. BRGM R 39661.
- MDPA (1936) - La potasse dans le monde. Chapitre IV, France-Bassin de Mulhouse, Tome N°II. Catalogue des puits et sondages. Mines Domaniales de Potasse d'Alsace, mars 1936.
- Théobald N. (1948) - Carte de la base des formations alluviales dans le sud du Fossé rhénan. Mémoires du Service de la Carte géologique d'Alsace-Lorraine N°9, Strasbourg, Lehrmittel-Verlag Offenburg/Mainz.
- Thiéry D. (1993) - Modélisation des aquifères complexes - Prise en compte de la zone non saturée et de la salinité. Calcul des intervalles de confiance. *Revue Hydrogéologie*, 1993, n° 4 pp. 325-336.
- Thiéry D. (1995) - Modélisation 3D du transport de masse avec le logiciel MARTHE. Version 5.4. Rapport BRGM R 38463 HYT/DR 95.

Thiéry D. (1998a) - Modélisation 3D des écoulements à densité variable avec le logiciel MARTHE. Version 5.7. Rapport BRGM R 40130.

Thiéry D. (1998b) - Modélisation couplée Nappe-Rivières-Drains-Précipitations avec le logiciel MARTHE. Version 5.7. Rapport BRGM (à paraître).

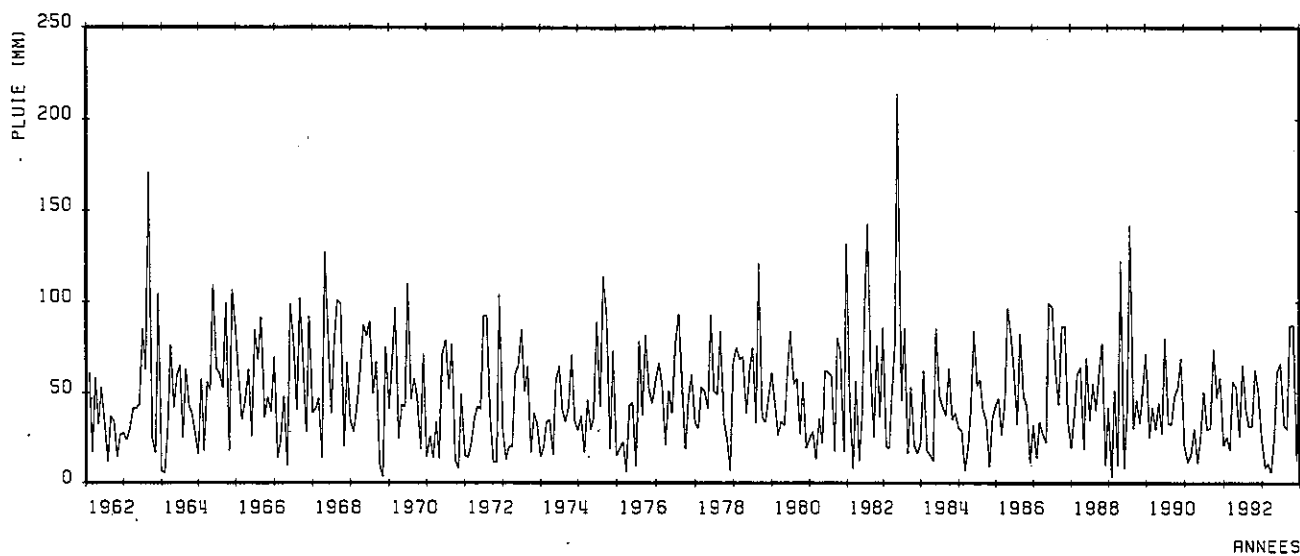
Vançon J.P., Stref P. (1986) - Salure de la nappe phréatique dans le département du Haut-Rhin : Mise en place du modèle hydrochimique du Bassin Potassique, rapport de présentation. Rapport BRGM 86 SGN 483 ALS, Août 1986, 47 p.

Vançon J.P. (1997) - Modélisation de la salure issue du Bassin Potassique : Acquisition de données. Rapport ANTEA A09693, Juin 1997, 20 p.

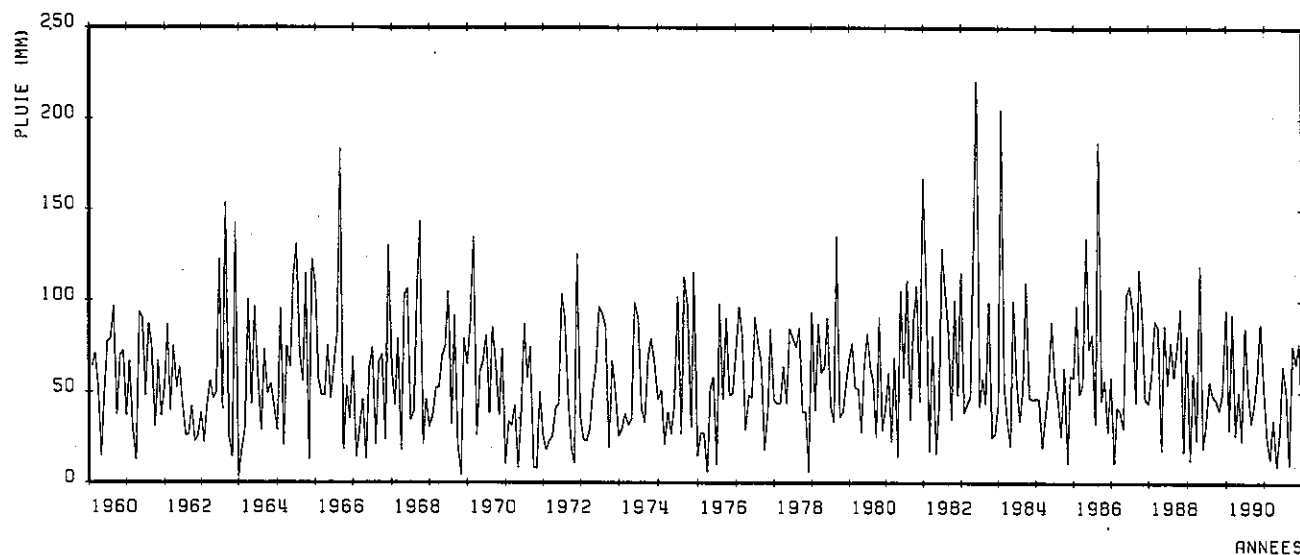
ANNEXE 1

Précipitations et évapotranspirations aux stations météo

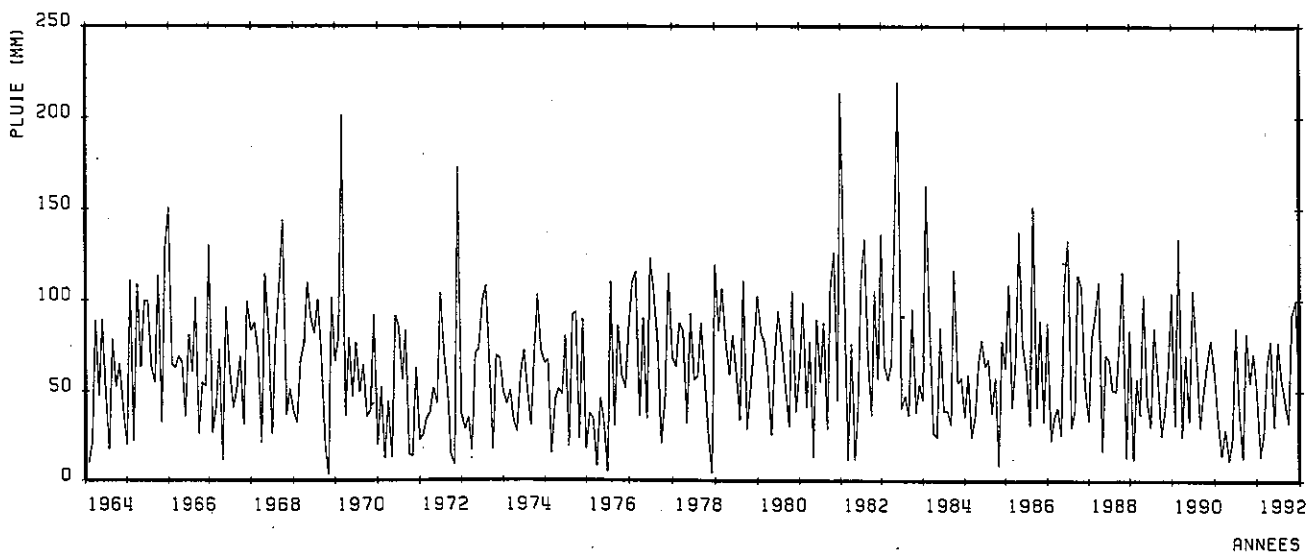
POSTE DE MEYENHEIM



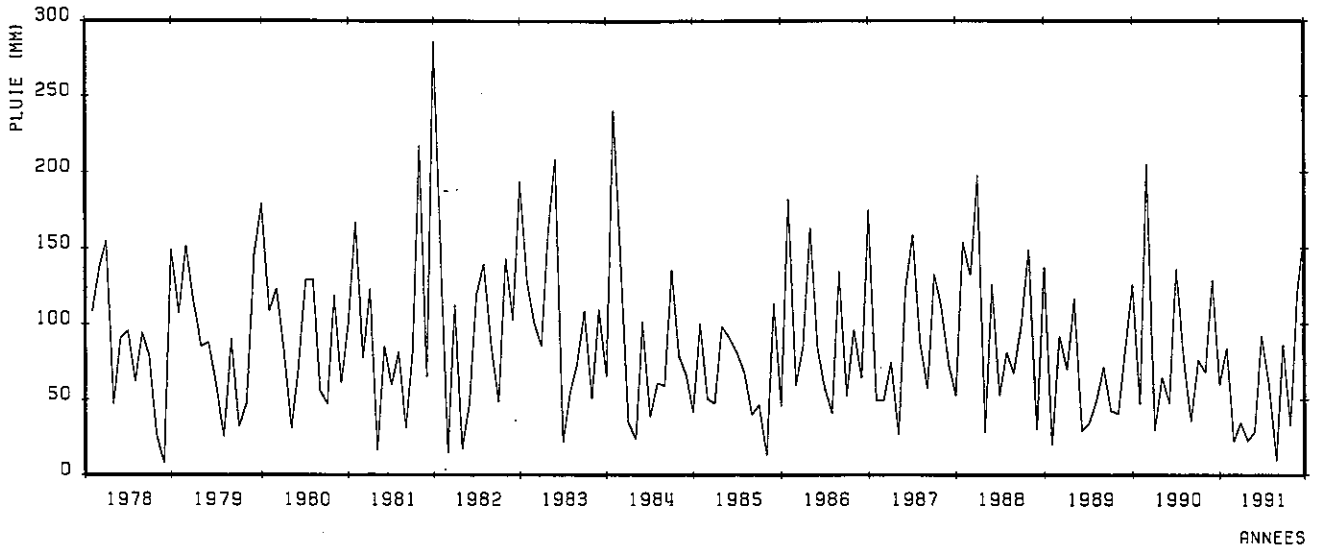
POSTE DE BALDERSHEIM



POSTE DE MULHOUSE

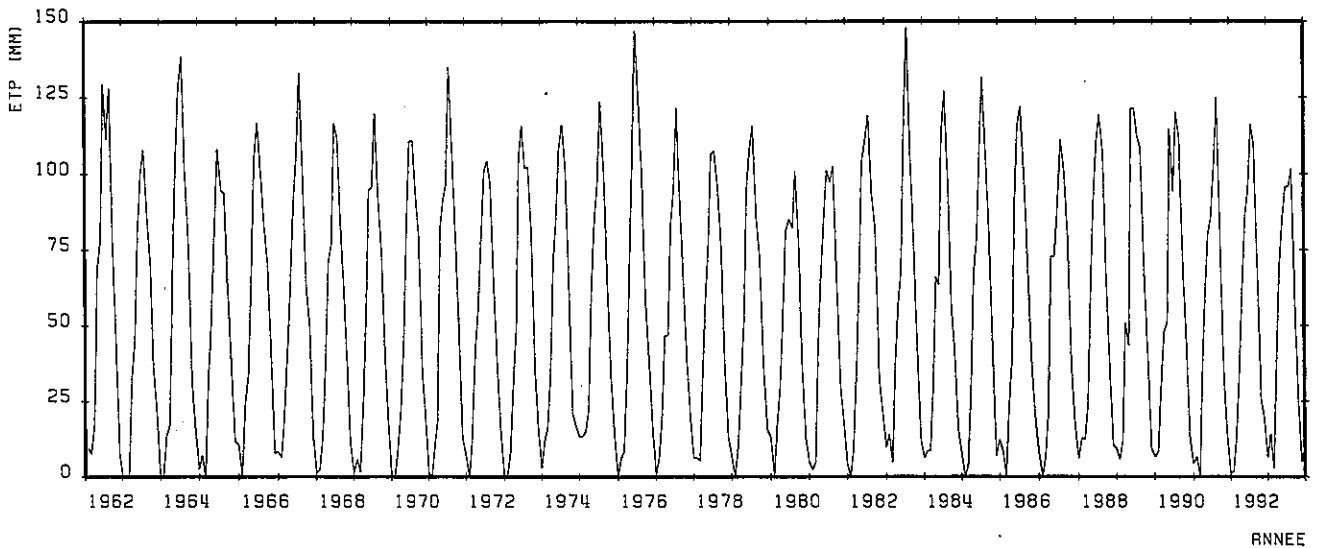


POSTE DE BURNHAUPT



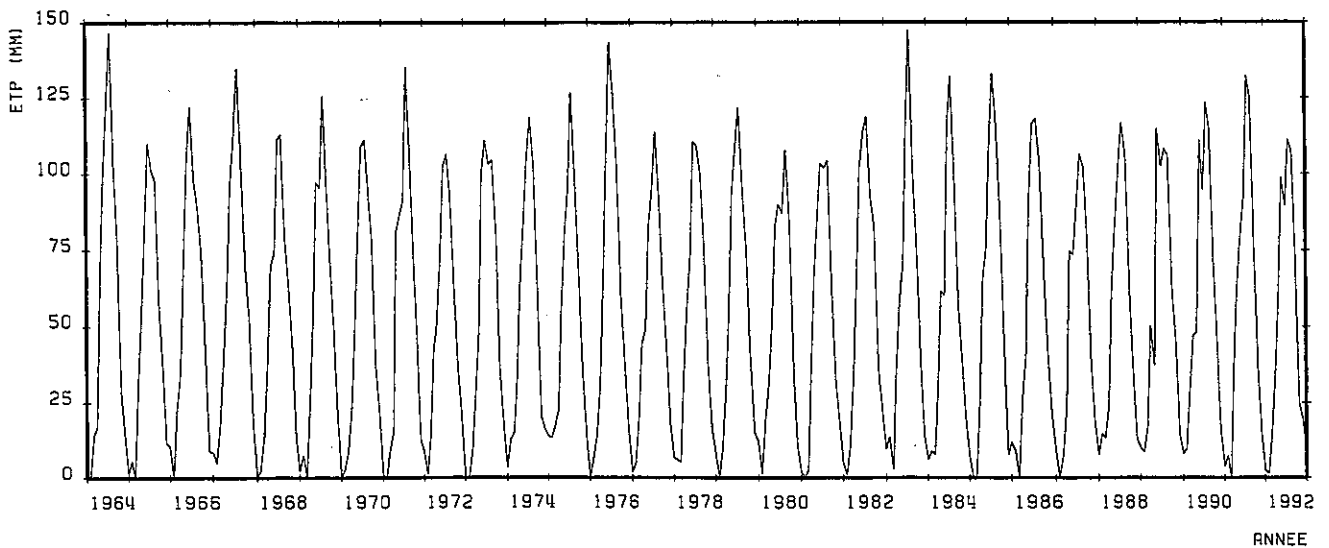
SHALIKAR 1.8 BRGM/ERU 26-JUN-97 A 15:30:58

MEYENHEIM - ETP CALCULEE PAR ETPTURC



SHALIKAR 1.9 BRGM/ERU 16-SEP-98 A 17:01:15

MULHOUSE - ETP CALCULEE PAR ETPTURC

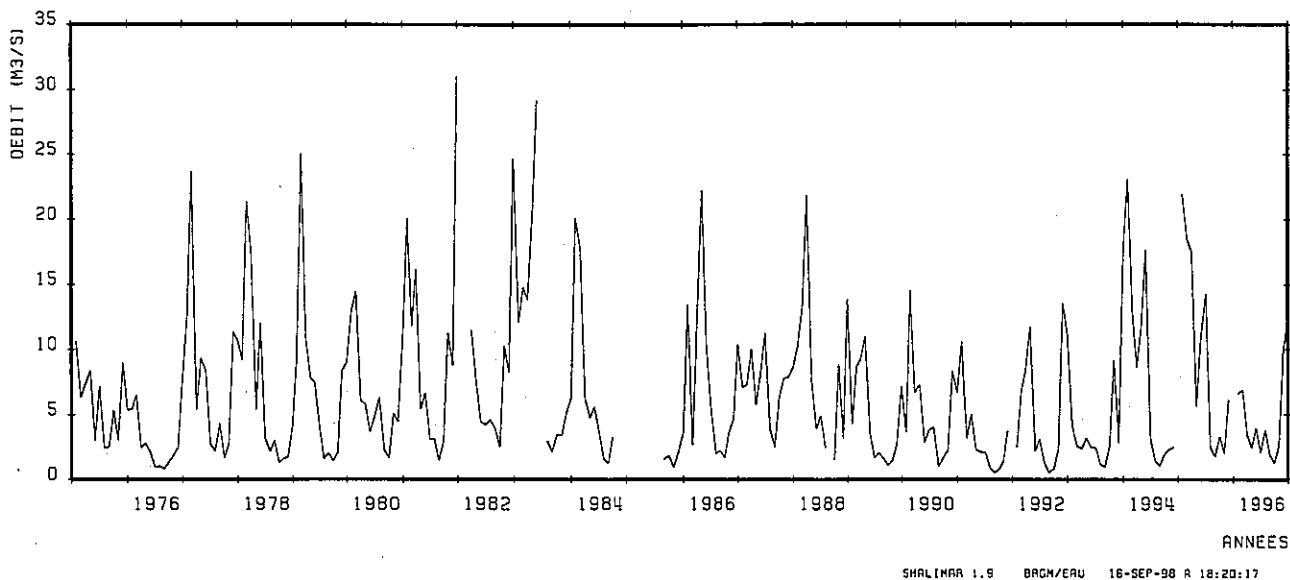


SHALIKAR 1.9 BRGM/ERU 16-SEP-98 A 17:02:38

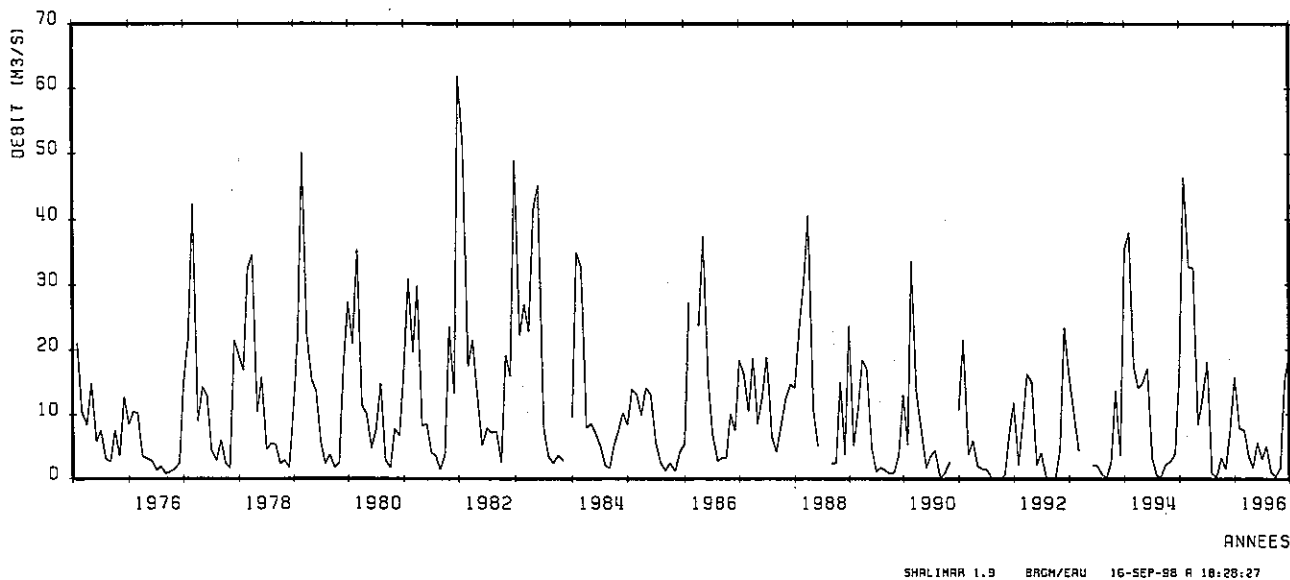
ANNEXE 2

Débits mensuels aux stations de jaugeage

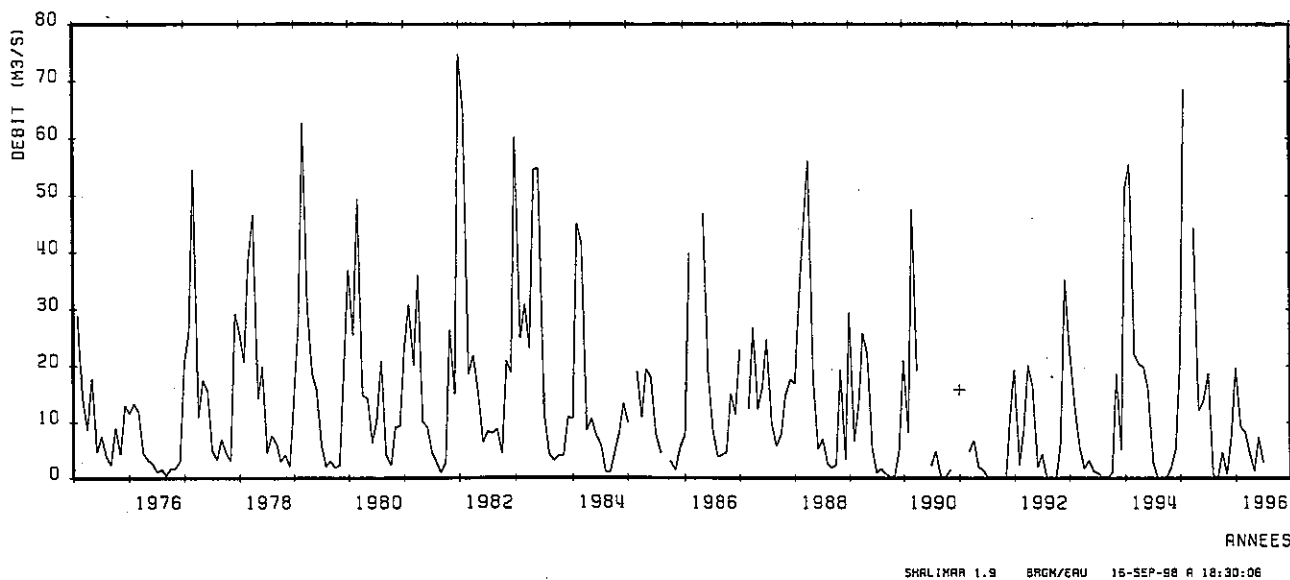
STATION A1080330 - DIDENHEIM



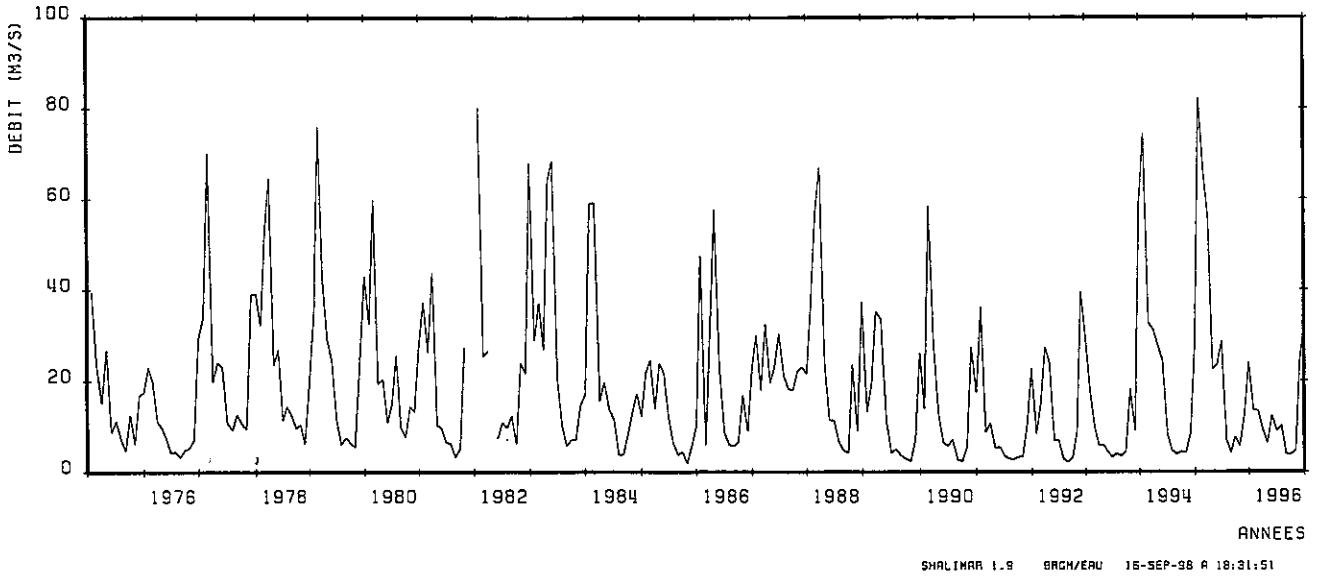
STATION A1310310 - ENSISHEIM



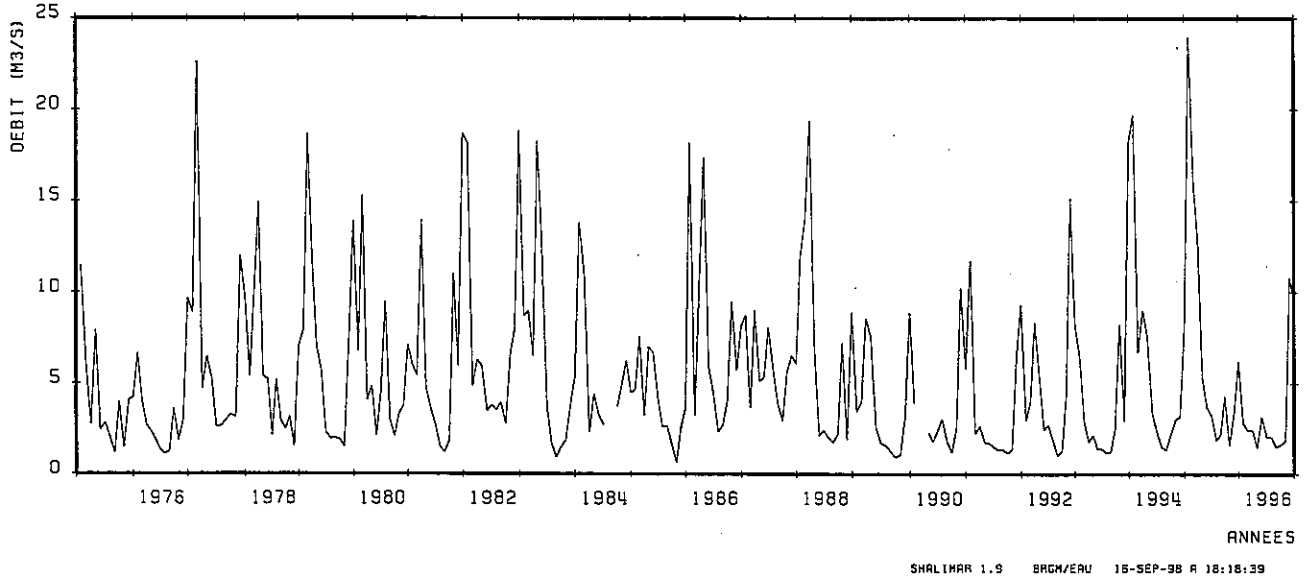
STATION A1320310 - OBERHERGHEIM



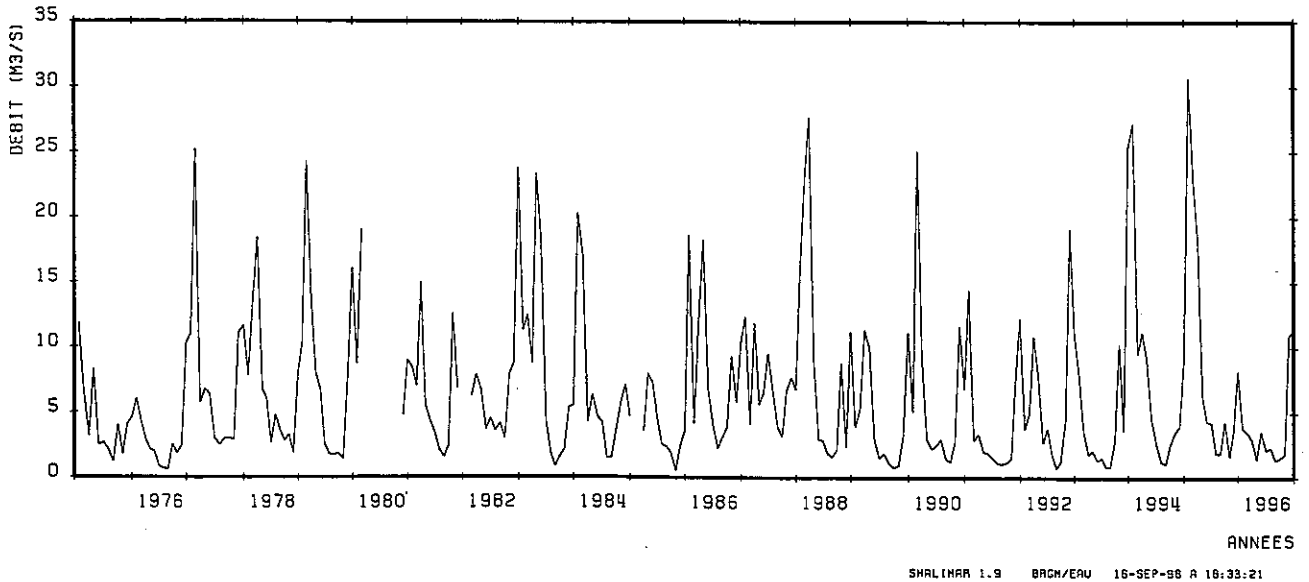
STATION A1350310 - COLMAR



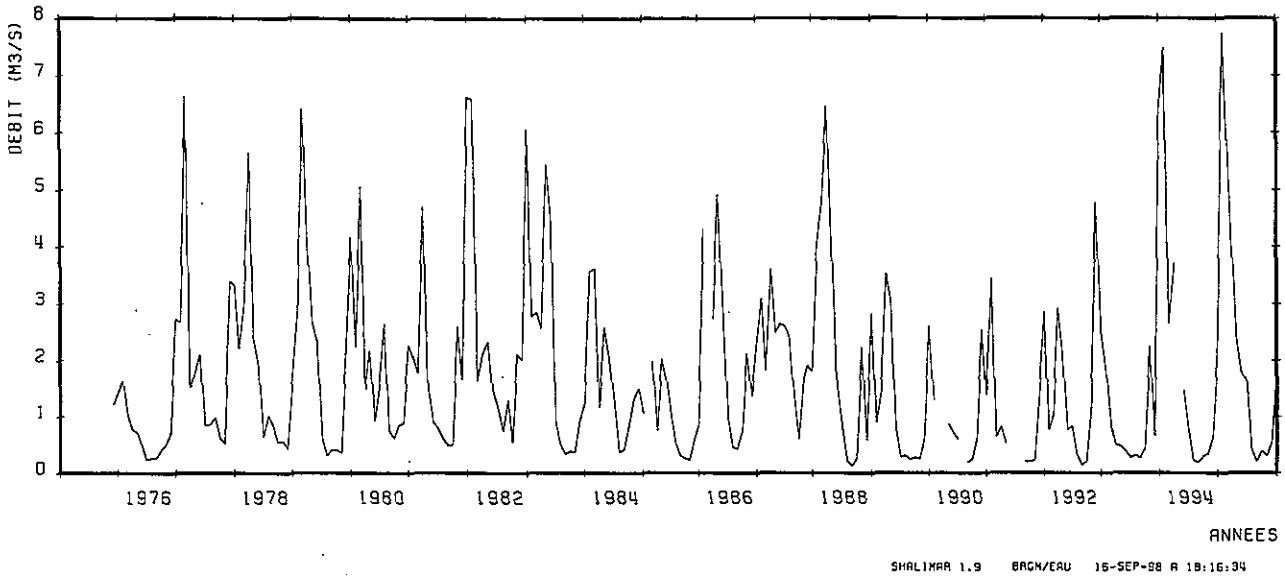
STATION A1432010 - WILLER/THUR



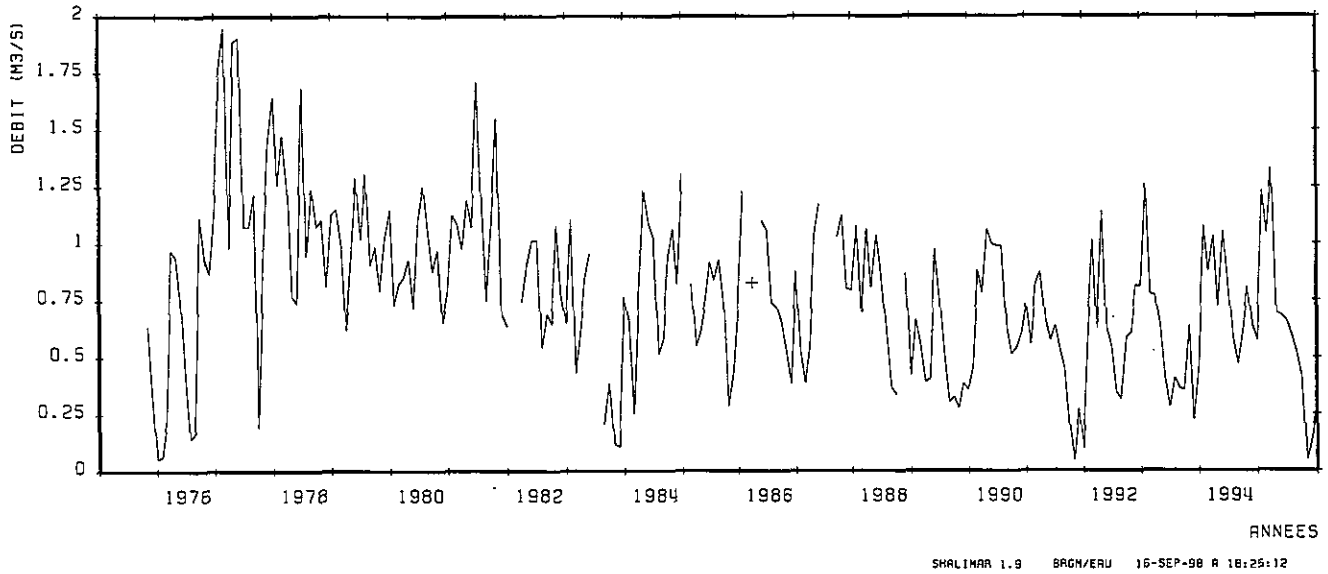
STATION A1462020 - STAFFELFELDEN



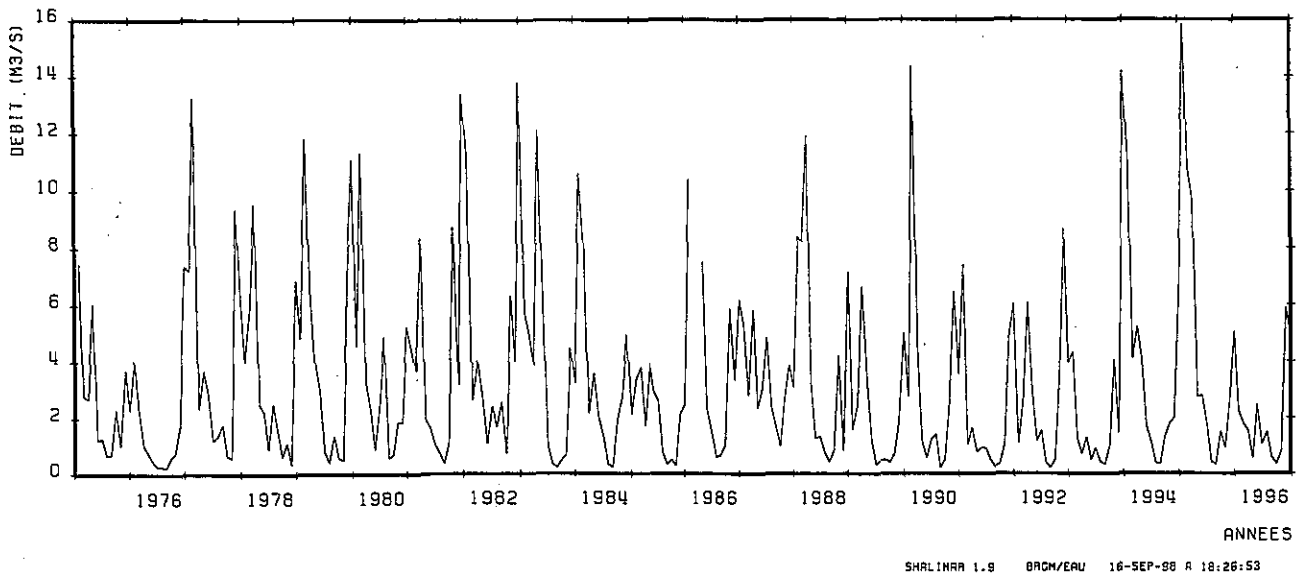
STATION A1522020 - GUEBWILLER



STATION A1562210 - UNGERSHEIM



STATION A1222010 - MASEVAUX



ANNEXE 3

**Couplage nappe-rivière dans le modèle MARTHE
et couplage nappe-drains.
Bilan pluie-ETP-ruissellement**

Version de décembre 1998

D. Thiéry

1. Réseau Hydrographique

1.1 Organisation du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est organisé en **affluents** eux même découpés en **tronçons**. Un affluent est un ensemble linéaire de tronçons (sans confluences). Chaque affluent peut avoir jusqu'à 3 affluents amonts et se jette dans 1 affluent aval au maximum. Si un affluent n'a pas d'affluent aval, son extrémité aval est un **exutoire**. Si un affluent n'a pas d'affluent amont, son extrémité amont est une **source**. Il peut y avoir autant d'exutoires et autant de sources qu'on le souhaite. Chaque maille du modèle peut contenir au maximum un tronçon du réseau hydrographique. Le modèle hydrodynamique peut être monocouche ou multicouche.

1.2 Numérotation des éléments du réseau hydrographique

Un tronçon de rivière est défini par son **numéro d'affluent** et par son **numéro de tronçon**. Dans un affluent les tronçons ont des numéros de tronçon **croissants** de l'amont à l'aval. Ces numéros n'ont pas besoin d'être continus. Ils doivent être croissants dans un même affluent. Des affluents différents peuvent avoir le même numéro de tronçon. Le nombre d'affluents est limité à 999 ; le nombre de tronçons dans un même affluent est limité à 999 . Le nombre total de tronçons n'est pas limité. Pour la commodité on peut découper un affluent (réel) en plusieurs affluents modèle en série

1.3 Données nécessaires dans chaque maille

- Longueur du tronçon de cours d'eau (unité de longueur du modèle)
- Largeur du tronçon de cours d'eau (unité de longueur du modèle)
- Cote (absolue) du fond de la rivière (fond de l'eau) (unité de charge)
- Epaisseur du lit de la rivière (en dessous du fond de l'eau) (unité de charge)
- Perméabilité du lit de la rivière (unité de perméabilité)
- Cote (absolue) de l'eau dans la rivière (unité de charge)
- Débit injecté (ou pompé) dans la rivière (unité de débit ; >0 si injecté)
- Débit amont (sources) dans la rivière (dans les tronçons sources)
Si les calculs sont en régime transitoire :
- Débit (écoulement) initial dans la Rivière
Si on connaît une relation Hauteur-Débit Manning :
- Rugosité du lit de la rivière (unités SI, de l'ordre de 0.02 à 0.1)
- Pente du lit de la rivière (adimensionnel ; de l'ordre de 1/100 à 1/1000)

1.4 Données nécessaires une seule fois

- Arbre de branchement des affluents : c'est à dire numéro de l'affluent aval de chaque affluent.

1.5 Affectation ou modification des données

Toutes les données de rivières (hauteurs, longueurs etc.) peuvent, comme les autres paramètres, être définis par Semis, par Zone, par Couche ou par Maille. Les données rivières peuvent en outre être définies par **tronçon** c'est à dire par couple "affluent-tronçon".

1.6 Options de calcul

- Si on le souhaite on peut calculer des **hauteurs d'eau** dans les tronçons de la rivière : on admet une **loi de Manning** simplifiée ou complète.
- Si on a une relation hauteur débit (et si on est en transitoire) : on peut faire un **routing** (prenant en compte le stockage dans la rivière).
- Si on a une relation hauteur débit : on peut **imposer** en certaines mailles la **hauteur dans la rivière** : on fixe un débit injecté égal à 9999 ; le modèle calcule alors le débit à injecter (ou à prélever) pour maintenir cette hauteur.
- Schéma d'échange : plusieurs lois d'échange sont possibles.

1.7 Initialisation

- Si on ne donne pas de loi hauteur-débit (cas le plus simple) : on donne des hauteurs dans les tronçons de la rivière (ces hauteurs resteront inchangées).
- Si on donne une loi hauteur-débit : on peut donner des hauteurs initiales dans la rivière ou bien donner des débits dans les tronçons de la rivière, le modèle recalcule alors les hauteurs correspondantes. A chaque pas de temps le modèle calcule les débits et les hauteurs.

1.8 Schémas numériques pour la résolution

Il faut définir les paramètres suivants :

- Nombre maximal d'itérations de calcul (pour la rivière)
- Variation maximum de débit entre 2 itérations pour convergence
- Coefficient de relaxation (éventuel)

Si on a une relation Hauteur + Routing :

- Schéma de résolution : résolution en **débit** ou résolution en **hauteur**

S'il n'y a pas de relation Hauteur-débit : toujours résolution en débits

1.9 Résultats du calcul

1.9.1 Historiques dans des mailles sélectionnées

- Débit dans la rivière
- Débit échangé avec la nappe (>0 si alimente la nappe)
- Débit prélevé calculé (différent du débit souhaité si le débit du cours d'eau est insuffisant ou si la convergence est insuffisante)
- Hauteur dans la rivière (si on a donné une loi Hauteur-Débit)

1.9.2 Semis

- Débit dans la rivière
- Débit échangé avec la nappe (>0 si alimente la nappe)
- Débit prélevé calculé (différent du débit souhaité si le débit du cours d'eau est insuffisant ou si la convergence est insuffisante)
- Hauteur dans la rivière (si on a donné une loi Hauteur-Débit)

2. Réseau de Drains

Un ensemble de drains peuvent être introduits dans le modèle MARTHE. Ces drains peuvent (au choix) être hiérarchisés en réseau palmé exactement identique à un réseau hydrographique, ou bien être des points indépendants sans relations amont-aval.

2.1 Organisation du réseau de drains

Si les drains sont hiérarchisés en réseau, le réseau de drains est organisé en **affluents** eux même découpés en **tronçons** exactement comme un réseau hydrographique. Il est possible d'avoir simultanément un réseau de drain et un réseau hydrographique, ces 2 réseaux étant totalement indépendants. Une maille du modèle peut donc avoir à la fois un tronçon de drain et un tronçon de rivière

2.2 Numérotation des éléments de drain

Un tronçon de drain est défini par son **numéro d'affluent** et par son **numéro de tronçon**, que les soient hiérarchisés en réseau ou non. Ces numéros servent à indiquer au modèle où il y a un drain. Dans le cas où il n'y a pas de réseau structuré il suffit de donner simplement un numéro de tronçon (on peut utiliser toujours le même numéro de tronçon par exemple égal à 1).

2.3 Données nécessaires dans chaque maille contenant un drain

- Longueur du tronçon de drain (unité de longueur du modèle)
- Altitude du (milieu du) drain (unité de charge)
- Coefficient de Perméabilité du drain (unité de perméabilité)

2.4 Données nécessaires une seule fois

- Arbre de branchement des affluents de drains : c'est à dire numéro de l'affluent aval de chaque affluent. (Seulement dans le cas d'un système hiérarchisé).

2.5 Affectation ou modification des données

Toutes les données de drains (Numéros, altitudes, longueurs, perméabilités etc.) peuvent, comme les autres paramètres, être définis par Semis, par Zone, par Couche ou par Maille. les données de drains peuvent en outre être définies par **tronçon** c'est à dire par couple "affluent-tronçon".

2.6 Options de calcul

- On peut choisir entre un réseau de drains hiérarchisés en tronçons et affluents ou un ensemble de drains non hiérarchisés.

2.7 Initialisation

Pas d'initialisation.

2.8 Schémas numériques pour la résolution

On peut définir les paramètres suivants (**uniquement pour un système hiérarchisé**) :

- Nombre maximal d'itérations de calcul (pour cumuler les débits des drains). Facultatif : par défaut ce nombre d'itérations est pris égal au nombre d'affluents.
- Variation maximum de débit entre 2 itérations pour convergence (des cumuls de débits).

2.9 Résultats du calcul

2.9.1 Historiques dans des mailles sélectionnées

- Débit dans les drains
- Débit échangé avec la nappe (>0 si alimente la nappe)

2.9.2 Semis

- Débit dans les drains
- Débit échangé avec la nappe (>0 si alimente la nappe)

2.10 Schéma d'échange

Un drain ne peut que **drainer** une nappe; il ne peut pas l'alimenter. Si la charge de la nappe est inférieure à l'altitude du drain, il n'y a pas de débit échangé. Un élément de drain n'a pas de capacité (comme un tuyau de drainage) : il n'y a pas de hauteur d'eau dans le drain mais seulement une altitude. le débit échangé Q - de la nappe vers le drain - est calculé comme suit :

$$Q = K \cdot L \cdot (H_{\text{Nappe}} - \text{Alti}_{\text{Drain}})$$

3. Bilan Pluie - ETP - Ruissellement

A chaque pas de temps un Bilan entre la pluie et l'Evapotranspiration potentielle peut être réalisé dans chaque "zone de pluie" du modèle. Ces zones deviennent donc des "zones de bilan hydroclimatique". On peut ainsi calculer :

- Un excédent de pluie par bilan hydrologique Pluie/ETP faisant intervenir un déficit maximal du sol (Réserve Utile des agronome)
- L'excédent de pluie peut alors (si on le souhaite) être décomposé entre une **infiltration** (dans les mailles de la zone hydroclimatique) et un **ruissellement** qui est introduit au cours du pas de temps (sans propagation à la surface du sol) dans la maille rivière la plus proche s'il y a un réseau hydrographique. (le ruissellement n'est pas introduit dans un réseau de drains). S'il n'y a pas de réseau hydrographique le ruissellement est infiltré dans la nappe comme l'infiltration.
- A noter que, dans le cas où il y a un réseau hydrographique, si la nappe déborde en un point extérieur au réseau hydrographique, le débit de débordement est introduit dans le tronçon de rivière le plus proche. Le débordement suit donc un schéma analogue à celui du ruissellement. S'il n'y a pas de réseau hydrographique, le débordement quitte l'hydrosystème.

On peut obtenir, par une option sélectionnée dans le paragraphe "Hydroclimatologie", la description du bilan hydrologique de chaque zone hydroclimatique à chaque pas de temps.

Une **reprise à la nappe** peut être calculée (contrôlée par 2 paramètres) quand le déficit maximal du sol est atteint et quand l'ETP est supérieure à la pluie.

3.1 Bilan Pluie ETP

3.1.1 Paramètres physiques

Dans chaque zone hydroclimatique on peut réaliser un bilan pluie/ETP suivant la méthode de Thornthwaite. Il faut alors définir les paramètres suivants :

- Déficit maximal du sol (exprimé en "unité des hauteurs d'infiltration et d'ETP" c'est à dire par défaut en mm) : Objet RUMAX
- Coefficient correcteur global d'ETP exprimé en % : Objet CFETP

3.1.2 Variables

Chaque zone hydroclimatique a un état initial :

- Déficit du sol : Objet RUSOL
- A chaque pas de temps (ou en régime permanent) on peut introduire ou modifier 2 flux d'entrée :
- Le flux de pluie (exprimé en "unité des hauteurs d'infiltration et d'ETP" par "Durée de référence des Hauteurs d'infiltration" c'est à dire par exemple en mm/mois ou mm/an) : Objet FLPLU
 - Le flux d'ETP (même unité que les flux de pluie) : Objet FLETP
- Remarque : Il vaut mieux utiliser ces nouvelles variables FLPLU et FLETP (toutes

positives ou nulles) plutôt que la variable utilisée dans les versions précédentes : INFIL (positive=excédent de pluie; négative=reprise à la nappe).

Par défaut si on ne définit pas les paramètres RUMAX et CFETP l'excédent de pluie est égal à FLPLU - FLETP

3.2 Décomposition de l'excédent en infiltration et ruissellement

Cette décomposition est simulée par un réservoir appelé **H** (pour Hypodermique) caractérisé par 2 paramètres (le schéma est semblable à celui du modèle global **Gardenia** mais le schéma de Marthe est **continu** et donc indépendant du pas de temps).

3.2.1 Paramètres physiques

Dans chaque zone hydroclimatique on peut définir les paramètres suivants :

- Durée de demi-percolation du réservoir H (exprimé en "Durée de référence des Hauteurs d'infiltration" c'est à dire en fait en unité de temps des bilans hydroclimatiques" c'est à dire par exemple en mois) : Objet TPERC
N.B. Attention **unité de temps des bilans hydroclimatiques** et non pas unite de temps des pas de modèle.
- Niveau du réservoir H correspondant à 50% d'infiltration et 50% de ruissellement - donc EQUIpercolation - (exprimé en hauteur hydroclimatique donc par défaut en mm) : Objet NEQUIP.

3.2.2 Variables

Chaque zone hydroclimatique a un état initial du réservoir H :

- Etat initial : Objet HISOL

3.3 Reprise par évapotranspiration à la nappe

Cette reprise par évapotranspiration à la nappe doit être demandée par une option sélectionnée dans le paragraphe "Hydroclimatologie". La reprise peut avoir lieu uniquement quand le déficit maximal du sol est atteint et quand l'ETP est supérieure à la pluie. La reprise à la nappe dépend de la profondeur de la nappe (et non pas de la zone hydroclimatiques). Elle est donc contrôlée par 2 paramètres qui peuvent être définis par Semis, par Couche, par zone géométrique ou par maille. les 2 paramètres qui contrôlent cette reprise à la nappe par évapotranspiration dont les suivants :

Paramètres physiques

- Epaisseur désaturée pour laquelle la reprise par évapotranspiration n'est pas diminuée et se produit au taux de l'Evapotranspiration Potentielle. En nappe libre, tant que la charge est supérieure à la cote du toit de la nappe diminuée de cette épaisseur : la reprise par évapotranspiration à la nappe se produit au taux nominal. Cette épaisseur est en unité de charge. Objet E_ETP

- Epaisseur, en dessous de la limite précédente, pour laquelle la reprise devient nulle. (Même unité). Objet Z_ETR

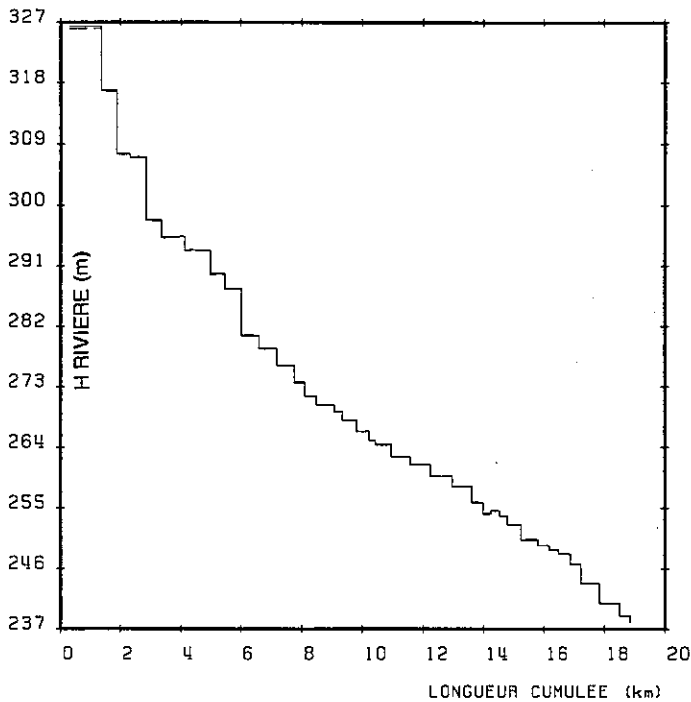
Donc en résumé : si $HNAP > TOIT - E_ETP \Rightarrow$ reprise à la nappe au taux nominal
si $HNAP < TOIT - E_ETP - Z_ETR \Rightarrow$ pas de reprise
si $TOIT - E_ETP < HNAP < TOIT - E_ETP - Z_ETR \Rightarrow$ reprise
diminuée par le rapport $[HNAP - (TOIT - E_ETP - Z_ETR)] / Z_ETR$

HNAP étant la charge de la nappe dans la couche affleurante.

ANNEXE 4

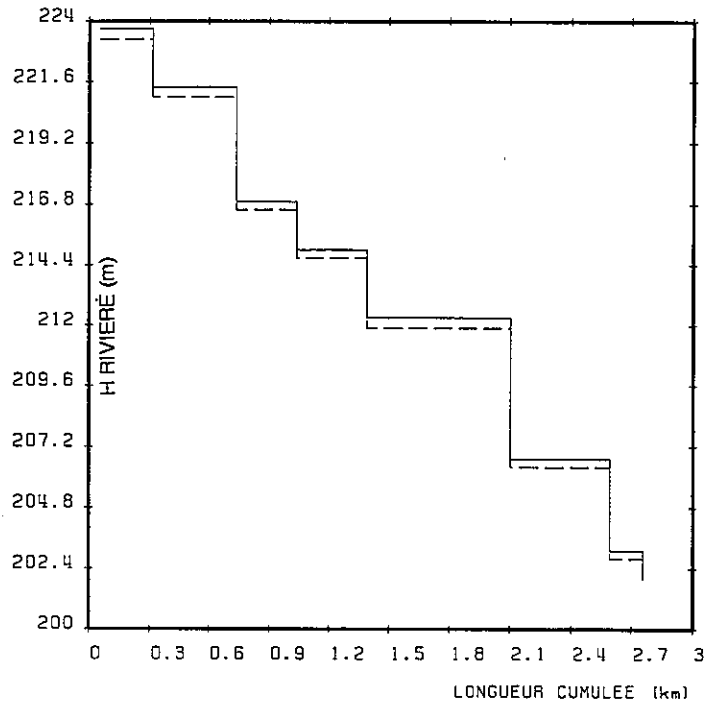
Profils en long des cours d'eau observé (—) simulé (---)

PROFIL EN LONG : AFFLUENT 11 (DOLLER)



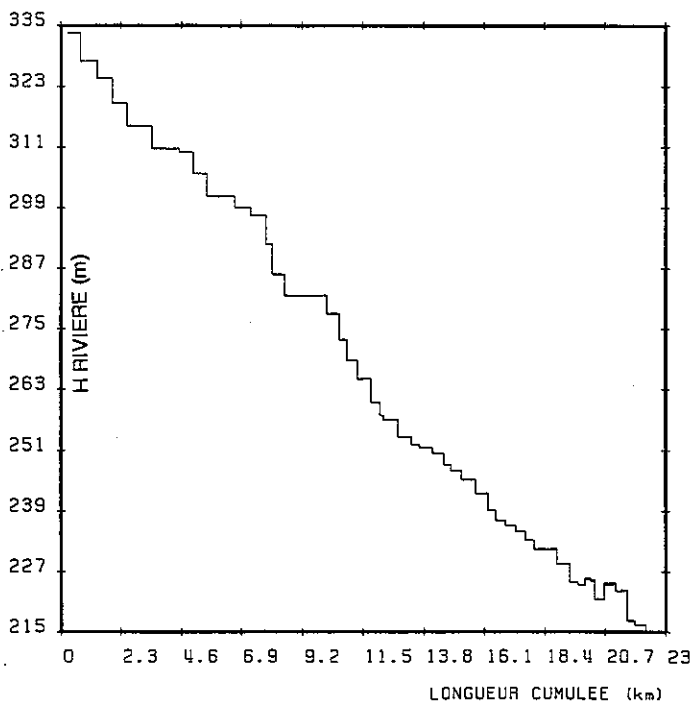
GRECO 3.7 BRGM/ERU 1-OCT-98 A 16:04:20

PROFIL EN LONG : AFFLUENT 12 (FECHT)



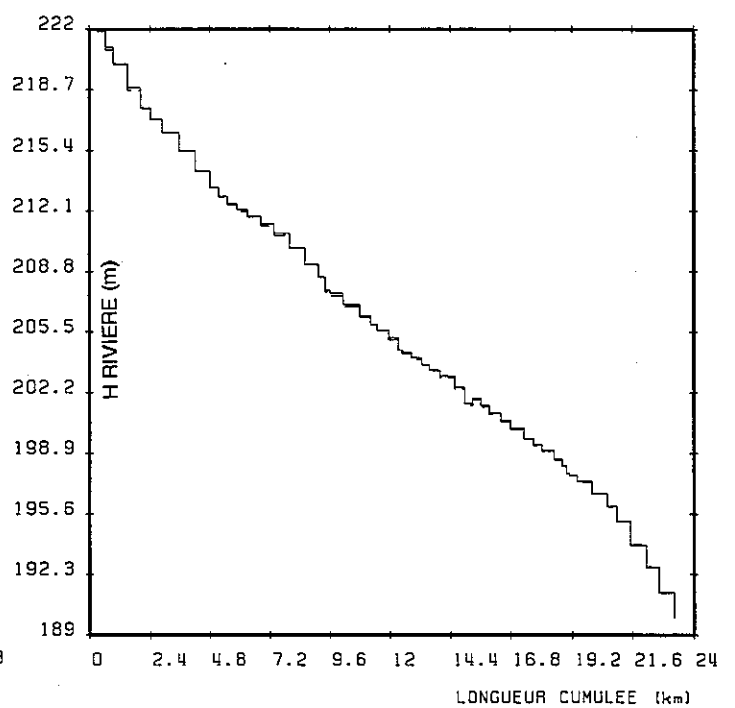
GRECO 3.7 BRGM/ERU 1-OCT-98 A 16:05:31

PROFIL EN LONG : AFFLUENT 15 (THUR)



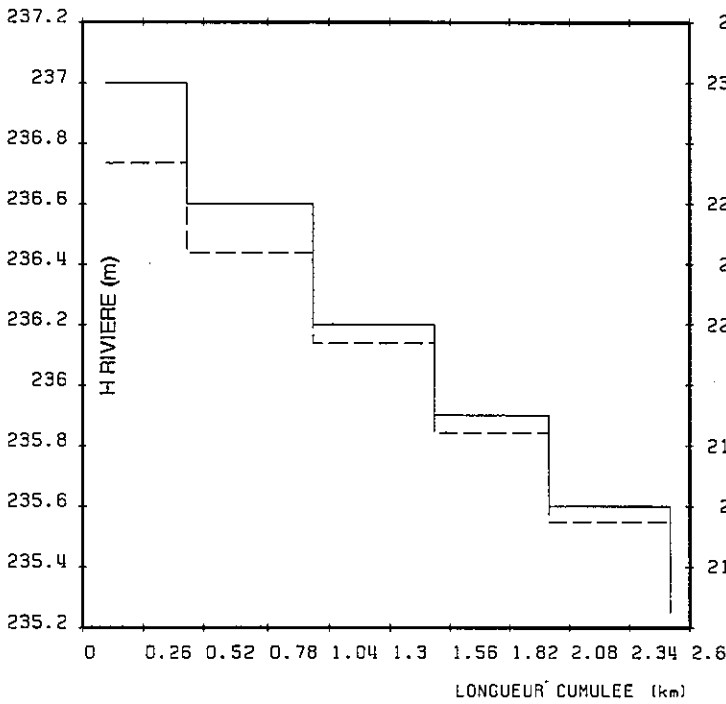
GRECO 3.7 BRGM/ERU 1-OCT-98 A 16:06:45

PROFIL EN LONG : AFFLUENT 16 (VIEILLE THUR)

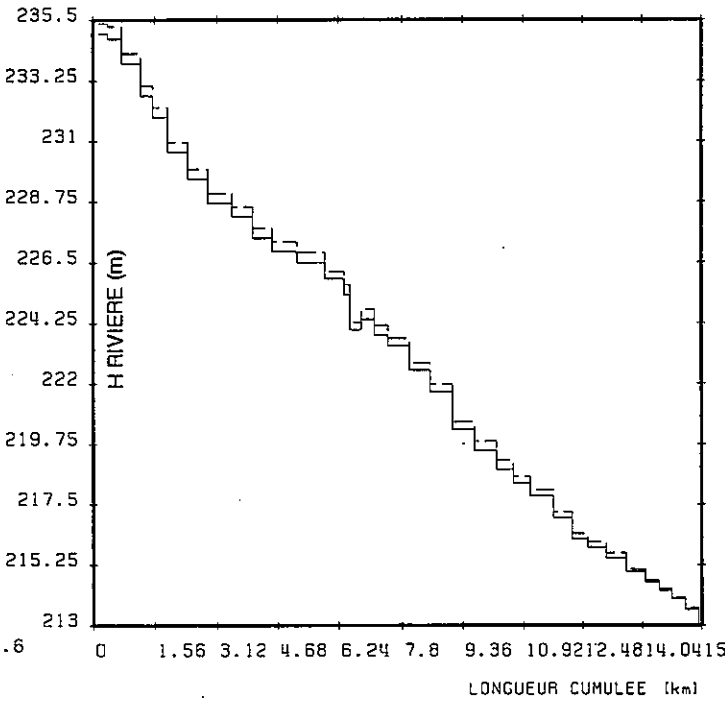


GRECO 3.7 BRGM/ERU 1-OCT-98 A 16:07:52

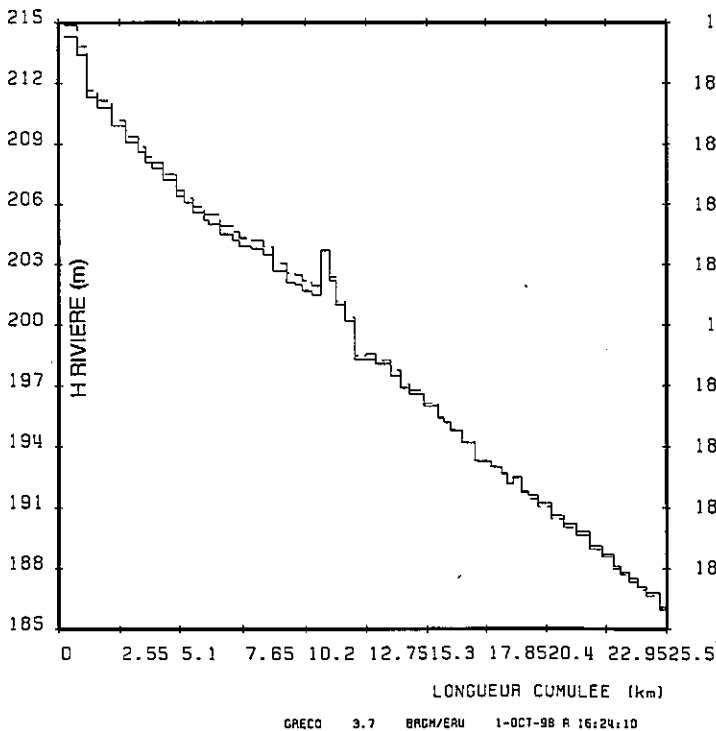
PROFIL EN LONG : AFFLUENT 31 (ILL - 1)



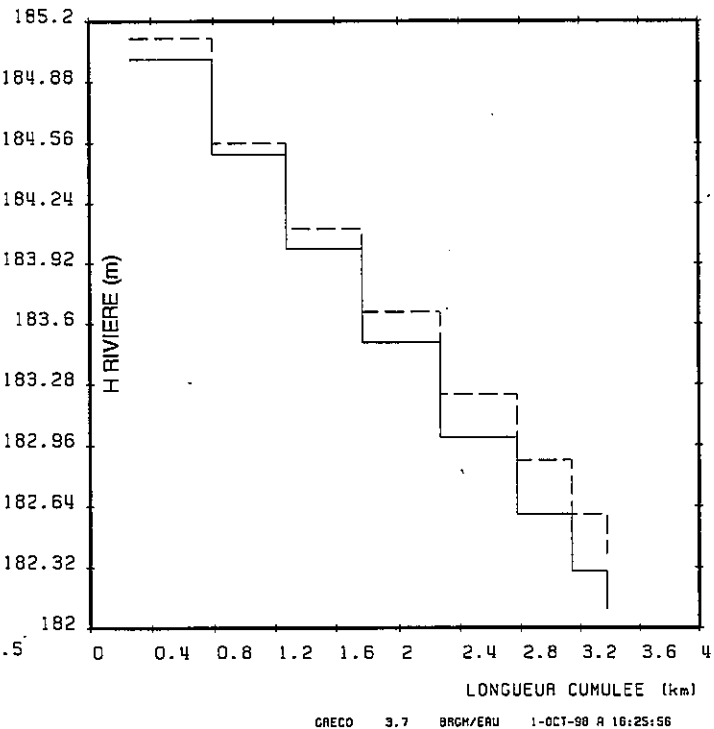
PROFIL EN LONG : AFFLUENT 32 (ILL - 2)



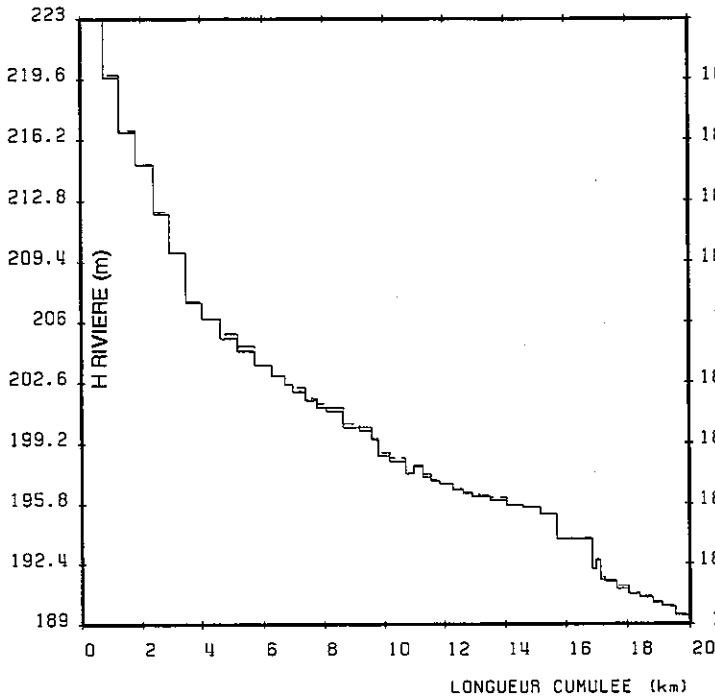
PROFIL EN LONG : AFFLUENT 33 (ILL - 3)



PROFIL EN LONG : AFFLUENT 34 (ILL - 4)

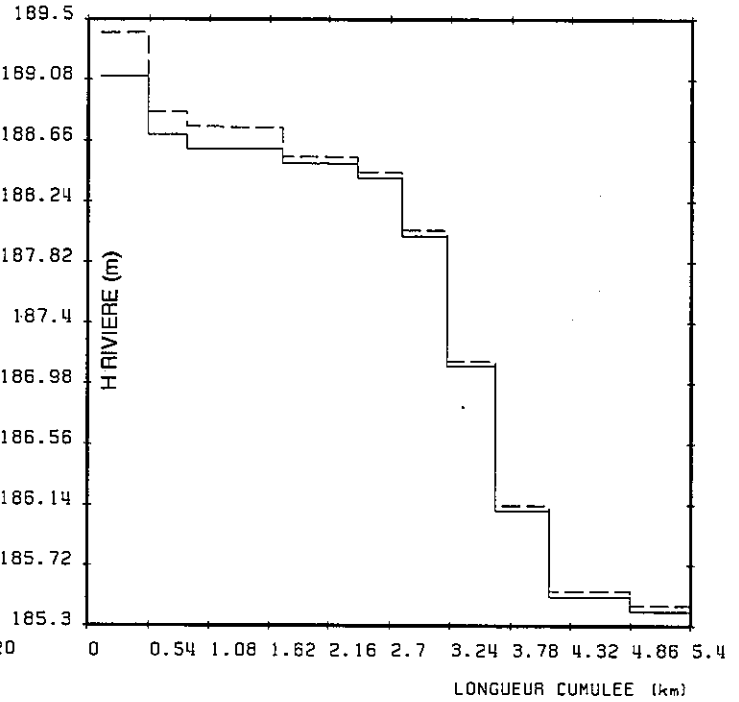


PROFIL EN LONG : AFFLUENT 41 (LAUCH - 1)



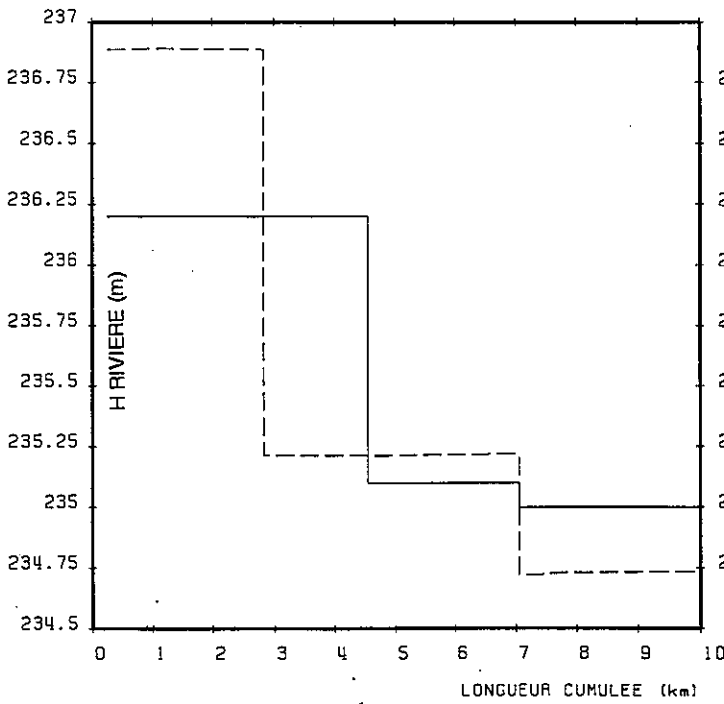
GRECO 3.7 BRGM/ERU 1-OCT-98 R 16:27:00

PROFIL EN LONG : AFFLUENT 42 (LAUCH - 2)



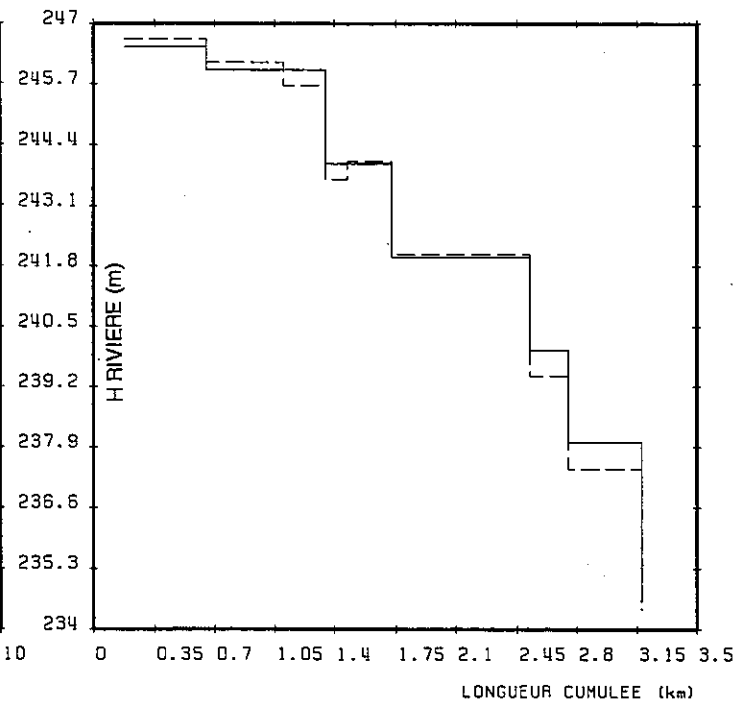
GRECO 3.7 BRGM/ERU 1-OCT-98 R 16:28:15

PROFIL EN LONG : AFFLUENT 21 (CANAL DE HUNINGUE)



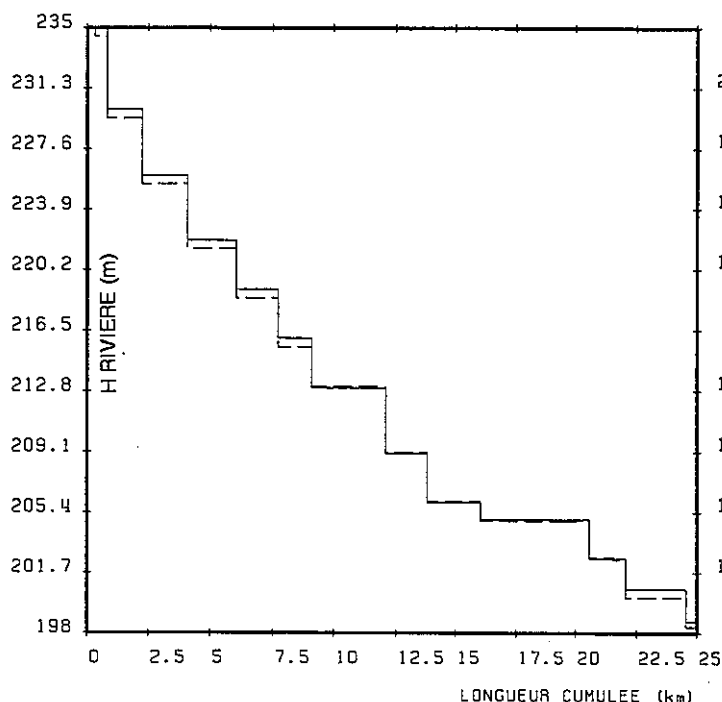
GRECO 3.7 BRGM/ERU 1-OCT-98 R 16:36:16

PROFIL EN LONG : AFFLUENT 22 (CANAL RHONE RHIN - 1)



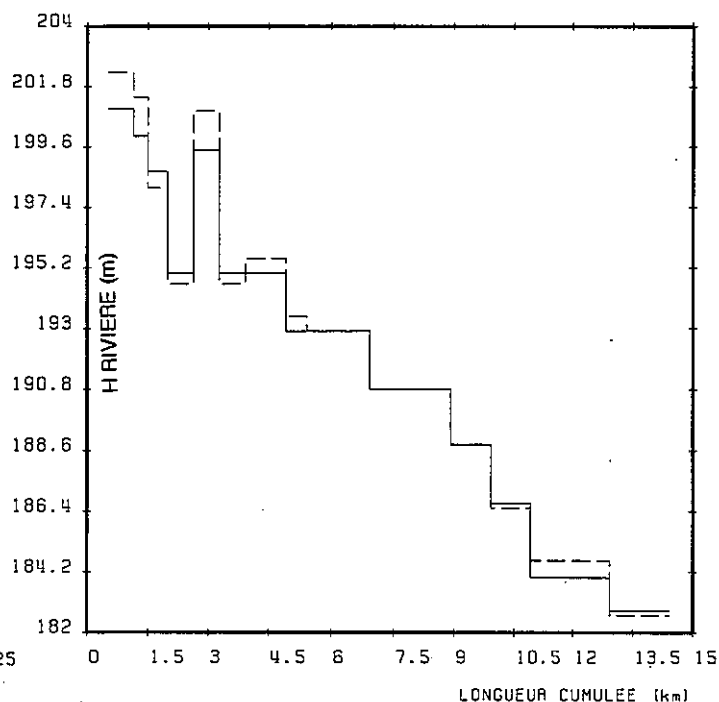
GRECO 3.7 BRGM/ERU 1-OCT-98 R 16:37:40

PROFIL EN LONG : AFFLUENT 23 (CANAL RHONE RHIN - 2)



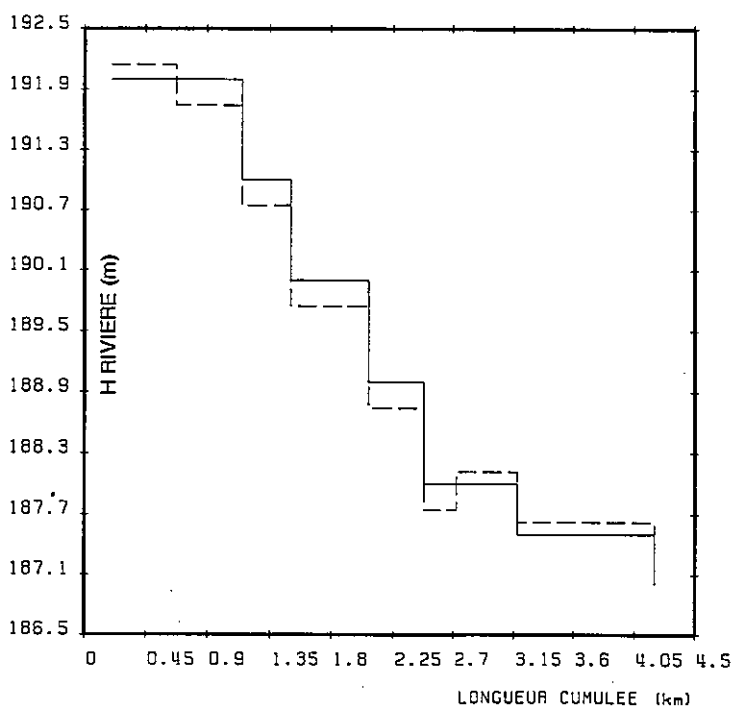
GRECO 3.7 BRGM/ERU 1-OCT-98 A 16:39:14

PROFIL EN LONG : AFFLUENT 24 (CANAL RHONE RHIN - 3)



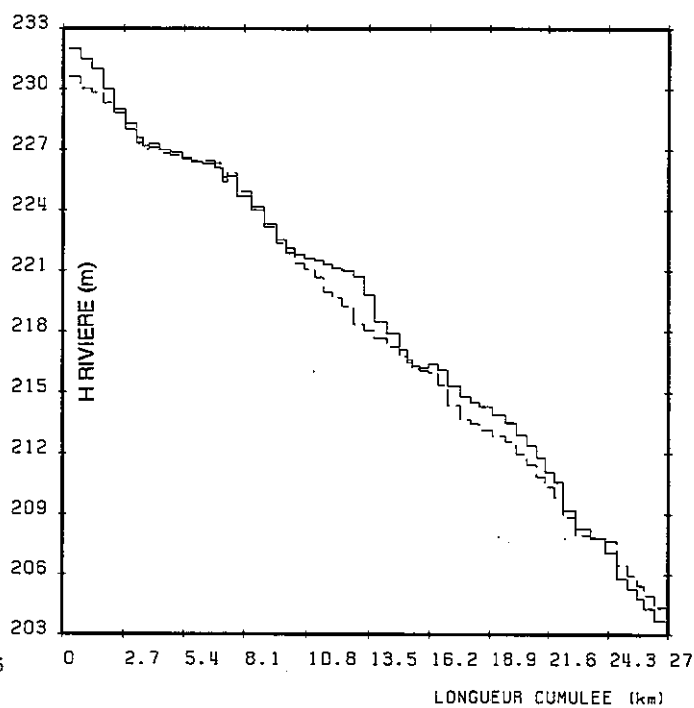
GRECO 3.7 BRGM/ERU 1-OCT-98 A 16:40:26

PROFIL EN LONG : AFFLUENT 25 (CANAL DE WINDENSOLENI)

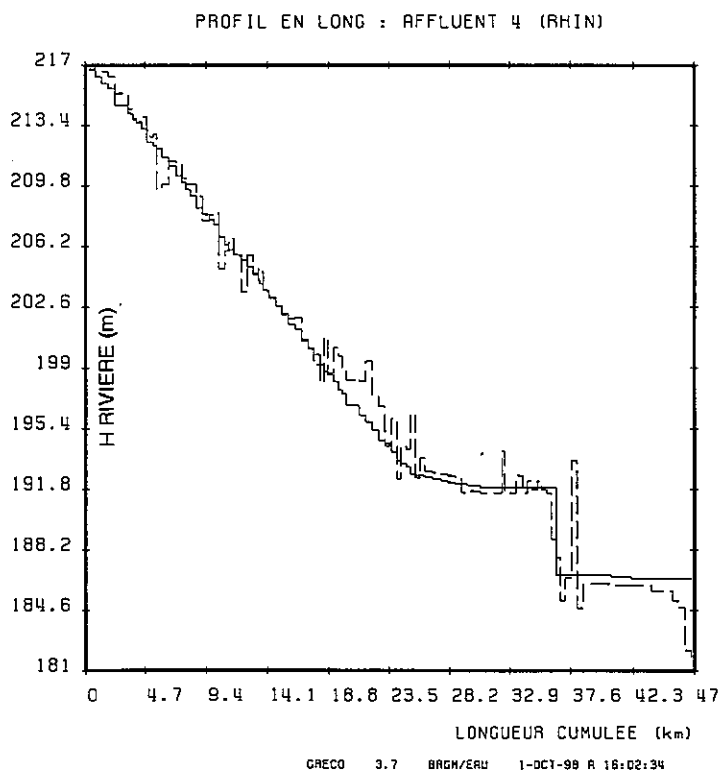
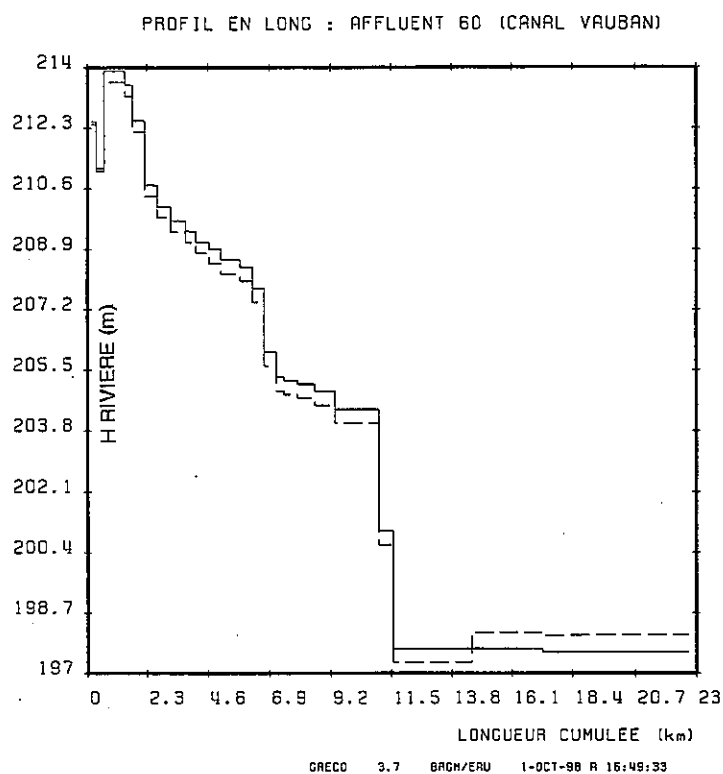


GRECO 3.7 BRGM/ERU 1-OCT-98 A 16:42:19

PROFIL EN LONG : AFFLUENT 50 (CANAL DE LA HARDT)

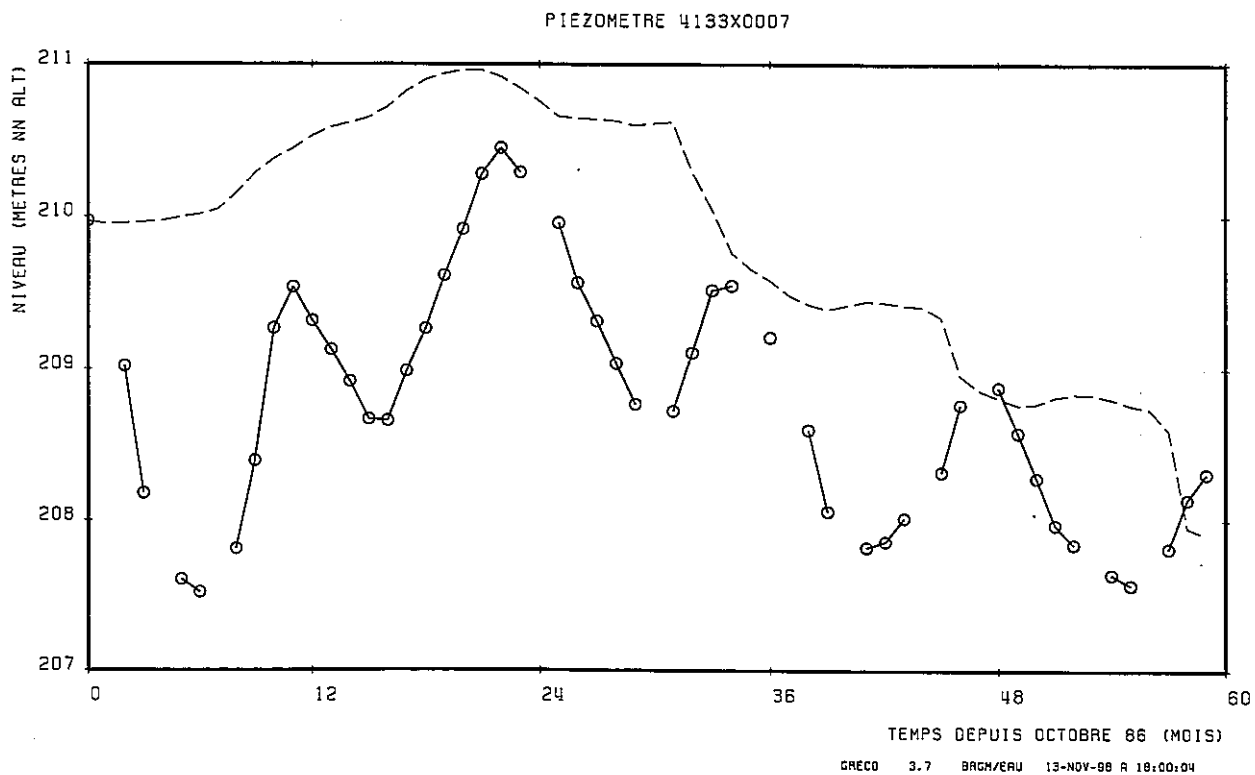
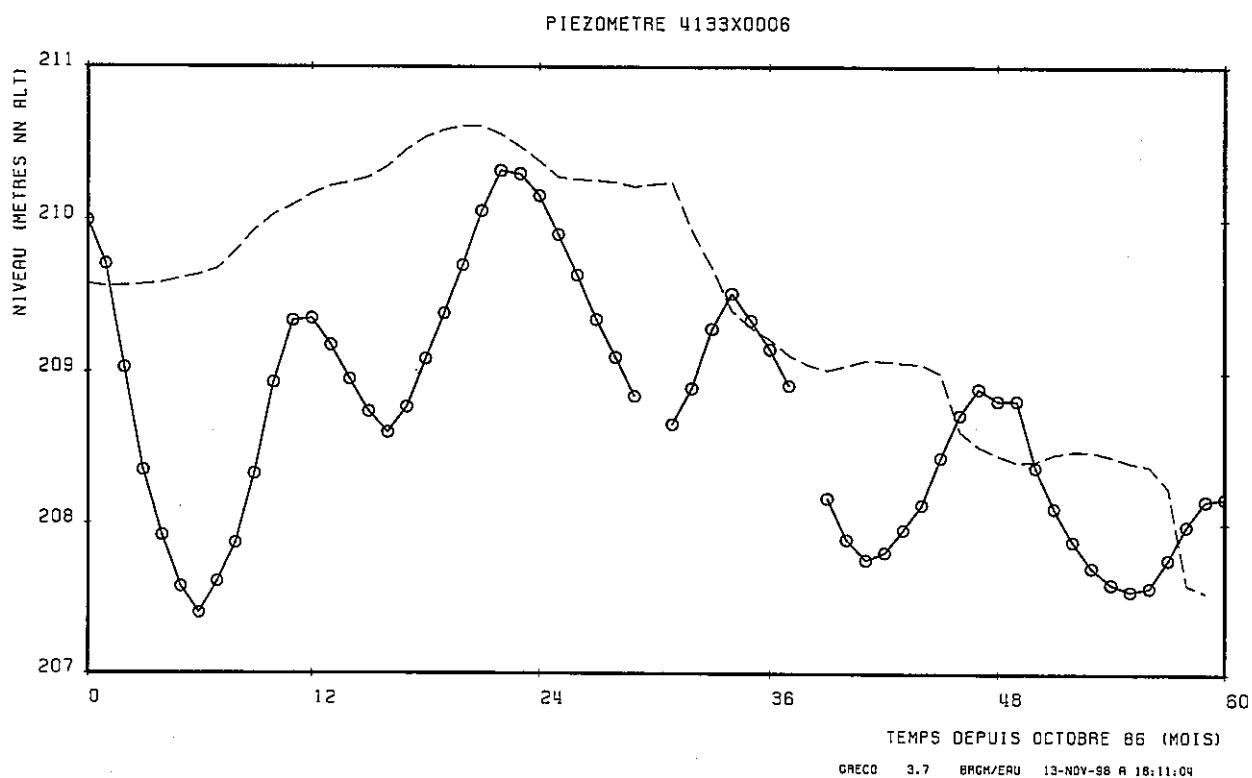


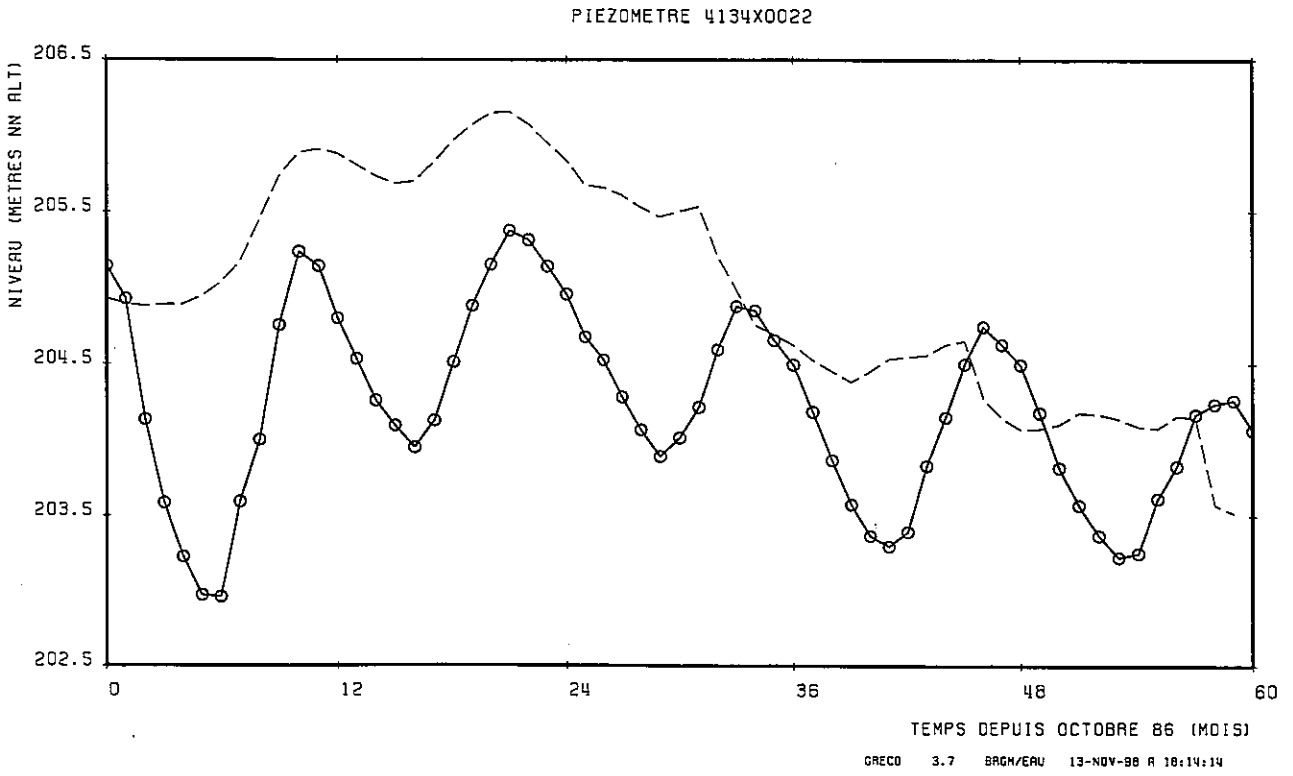
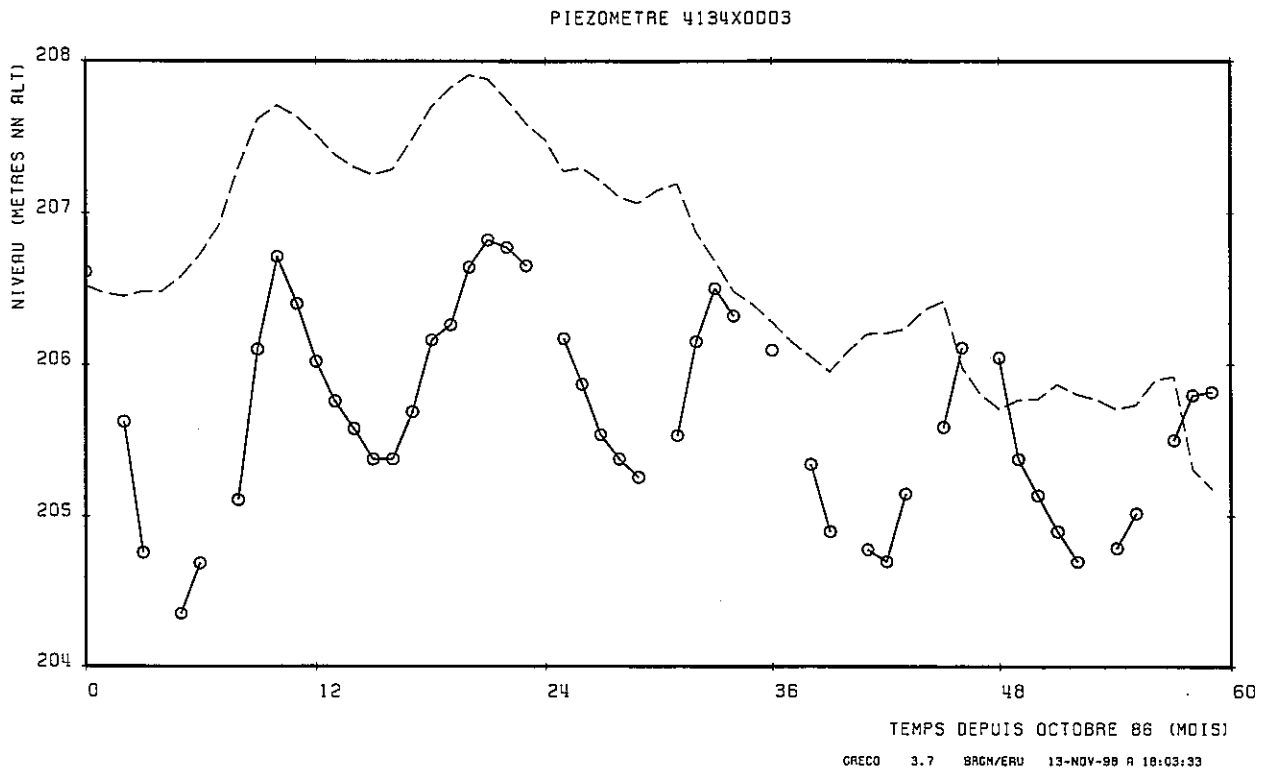
GRECO 3.7 BRGM/ERU 1-OCT-98 A 16:47:55



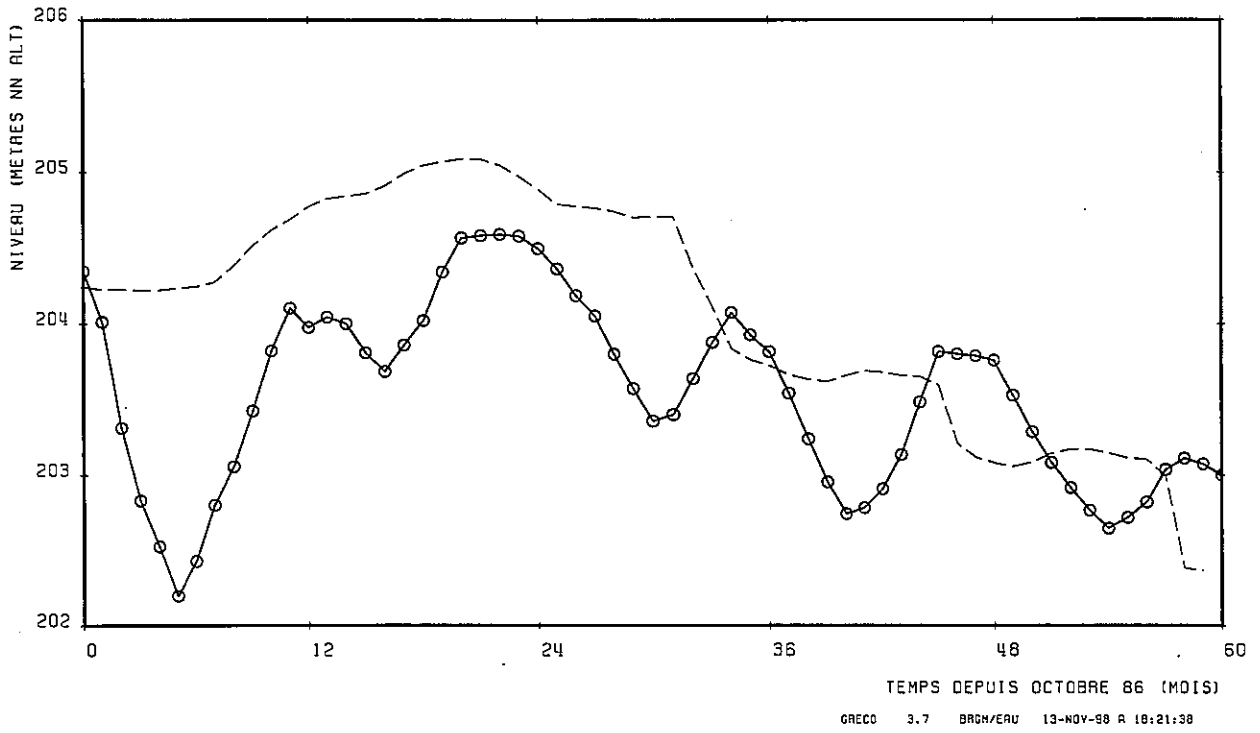
ANNEXE 5

Variations piézométriques observé (-o-) simulé (---)

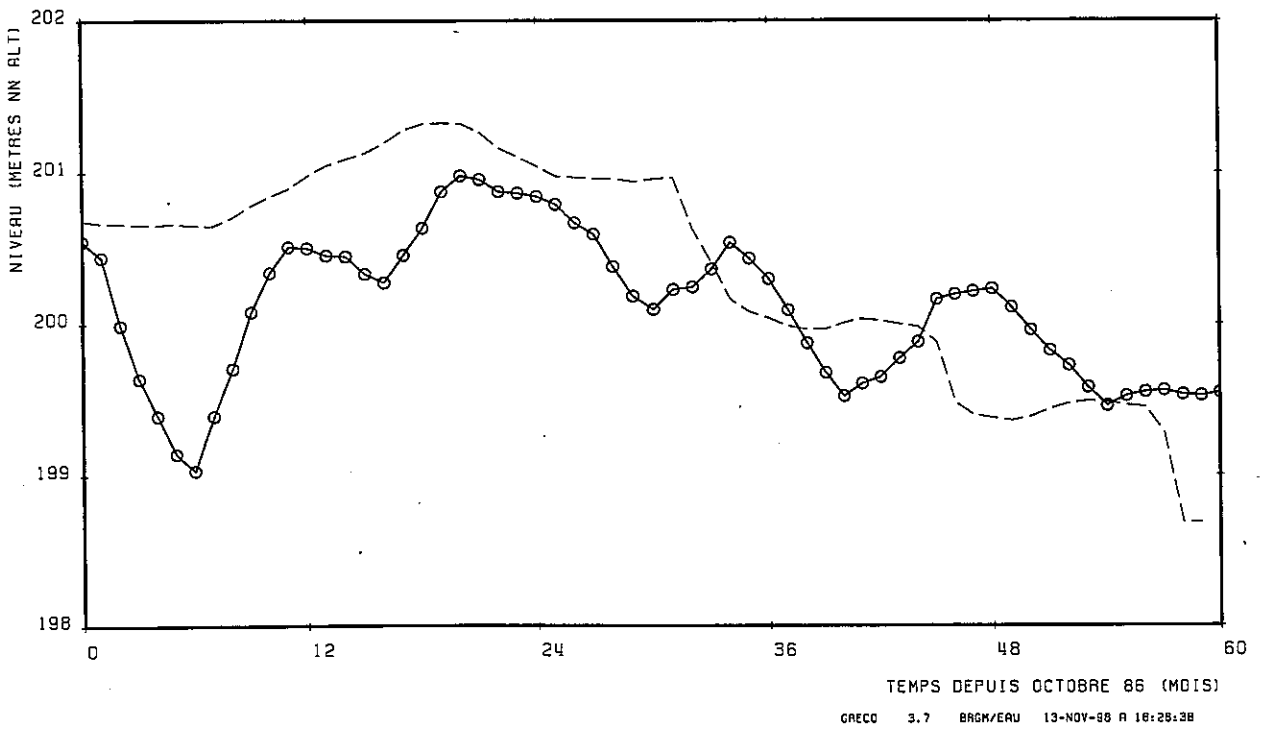


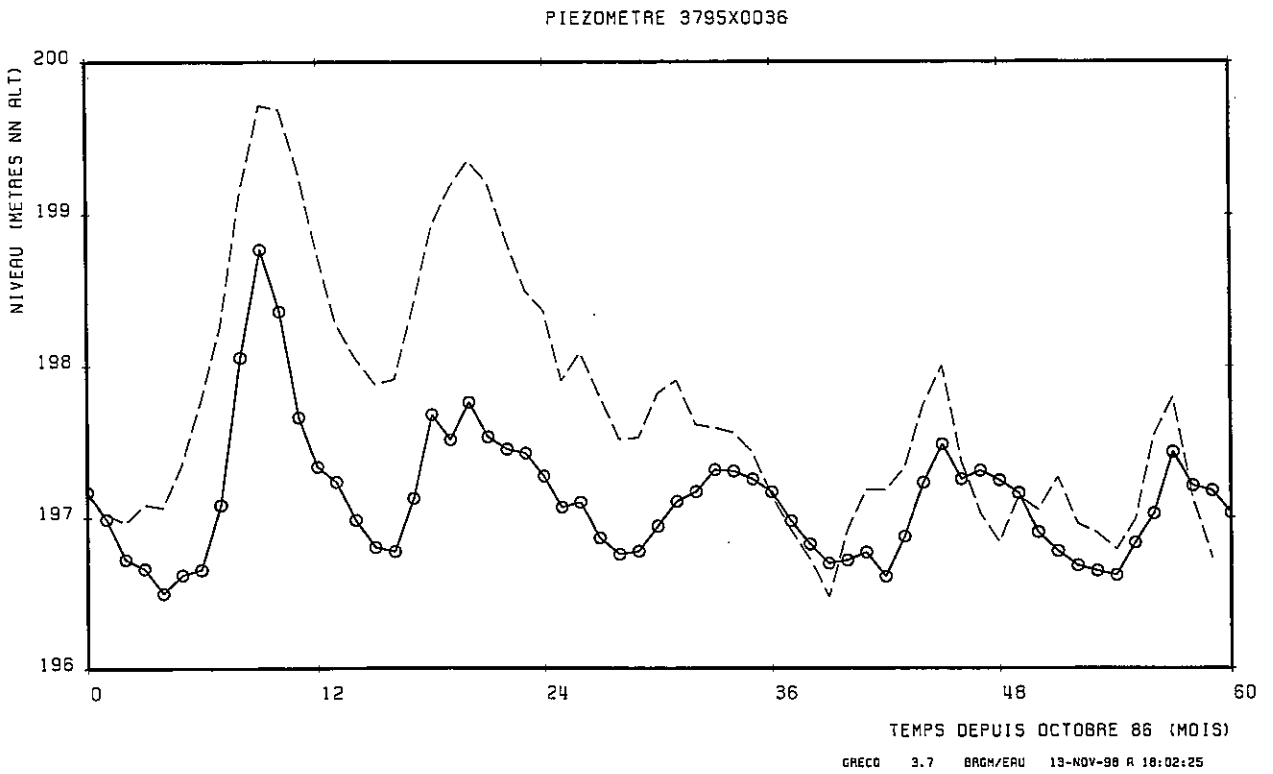
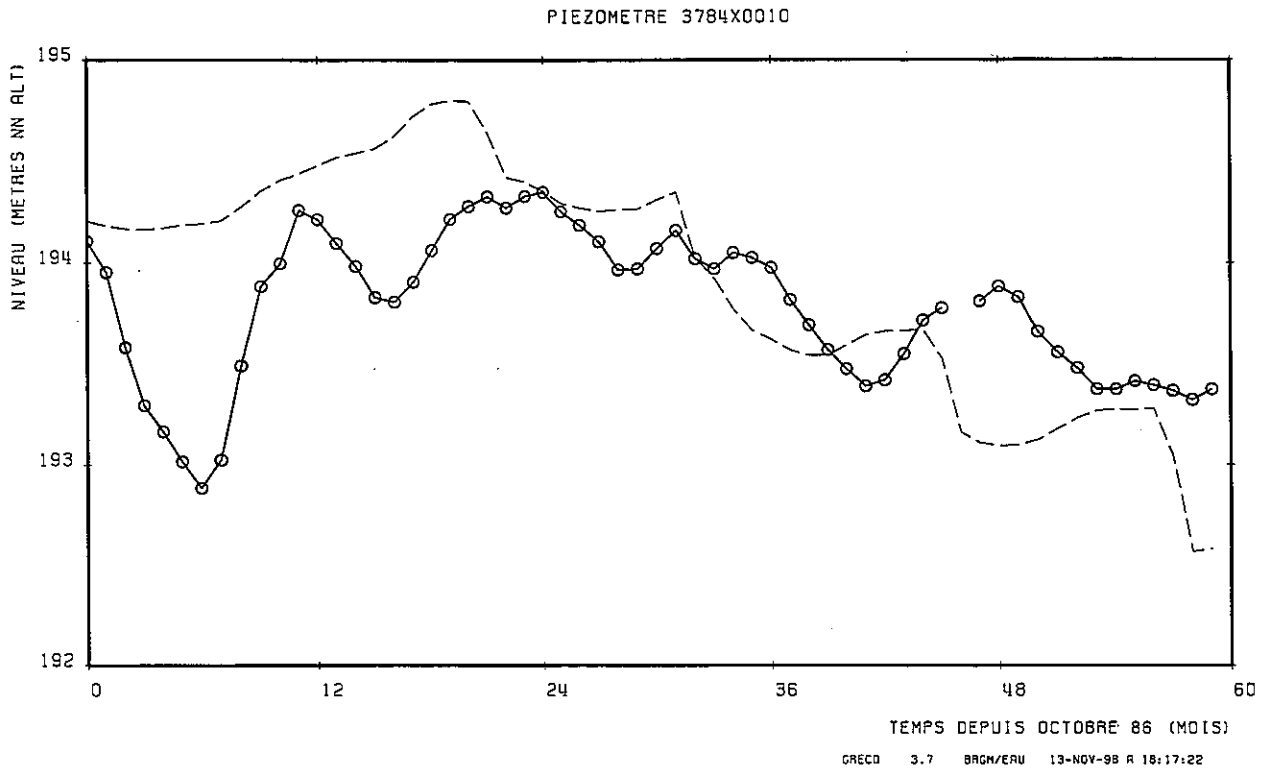


PIEZOMETRE 4133X0030

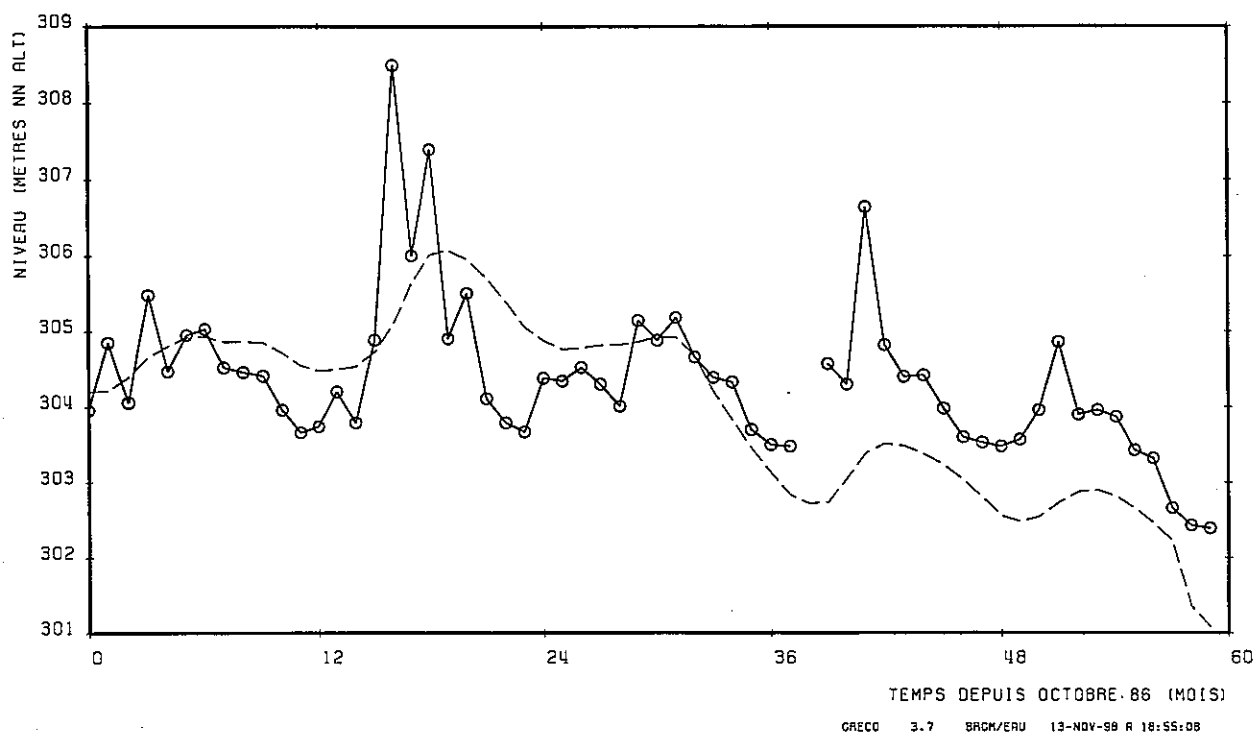


PIEZOMETRE 3787X0071

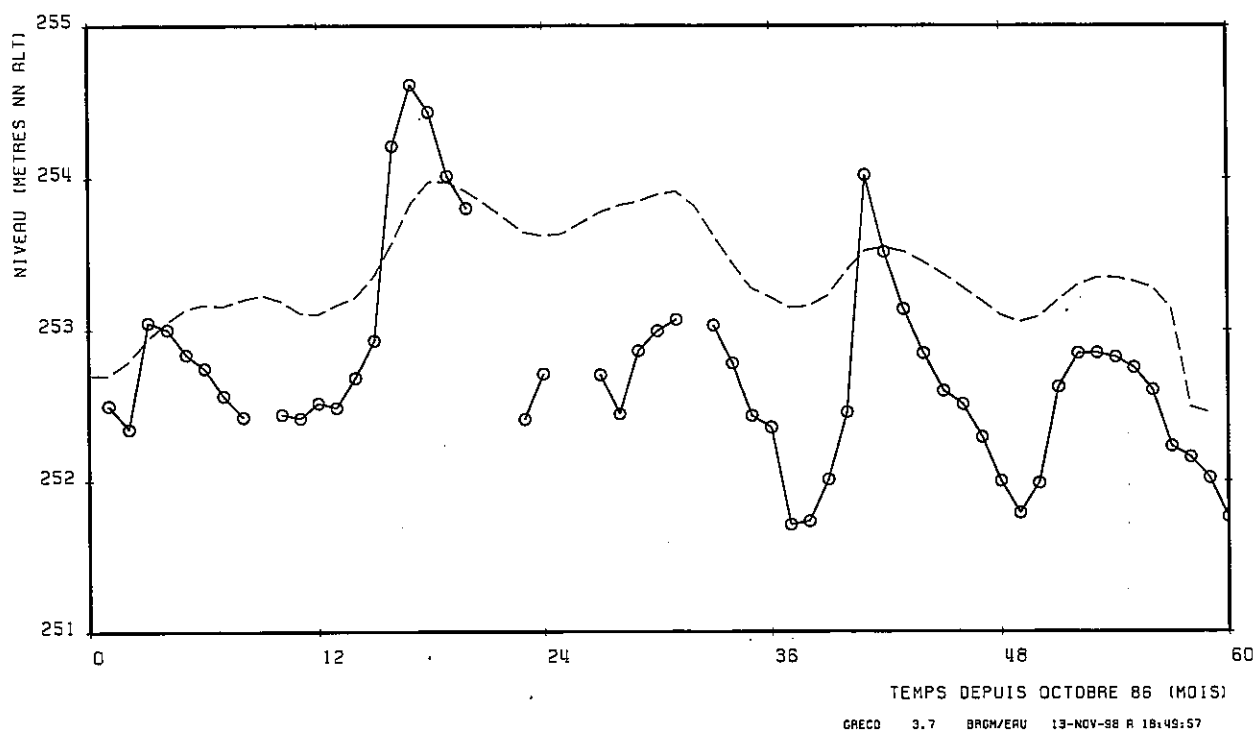


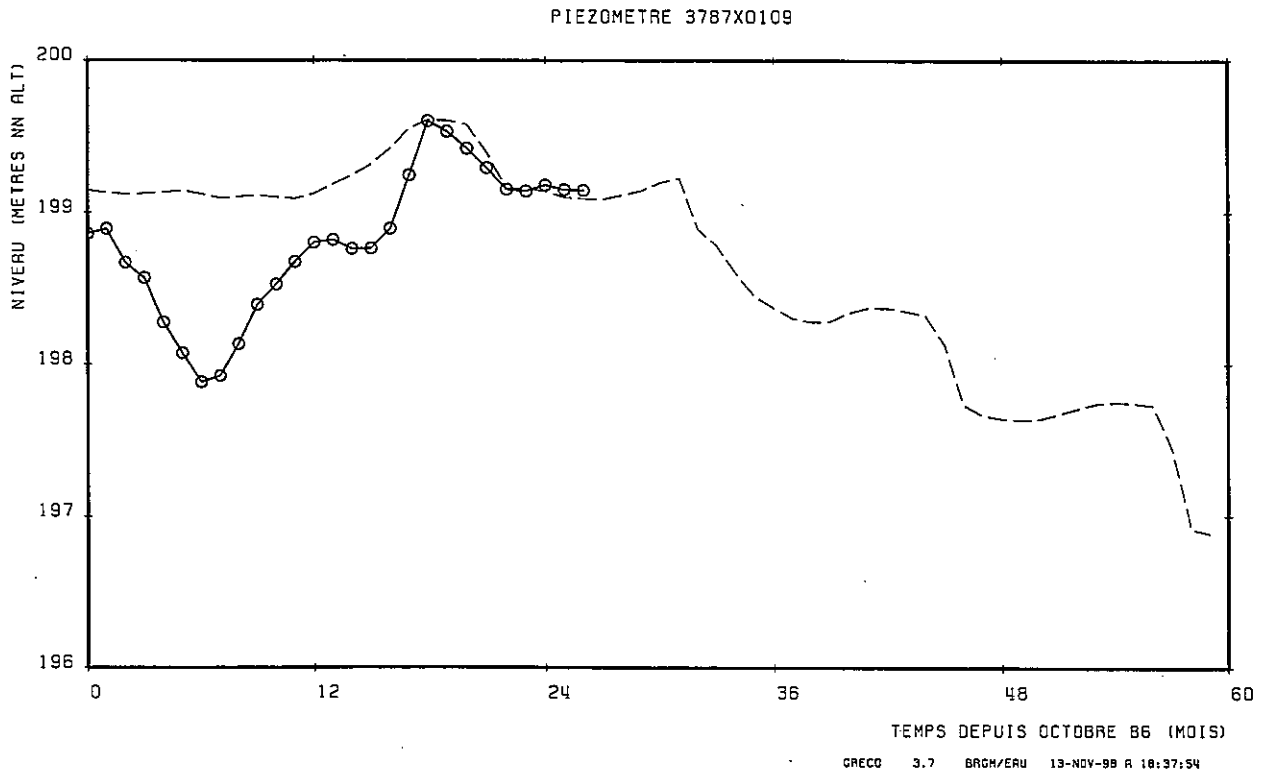
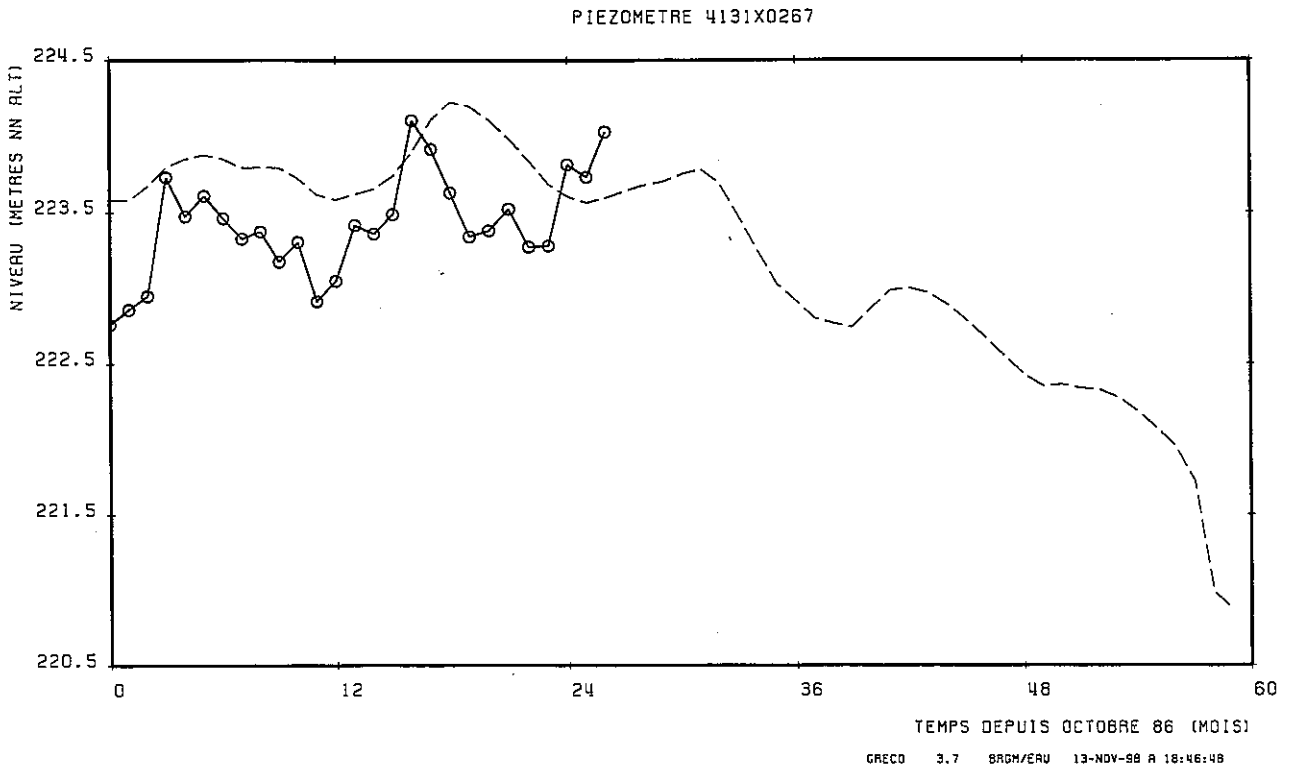


PIEZOMETRE 4124X0097

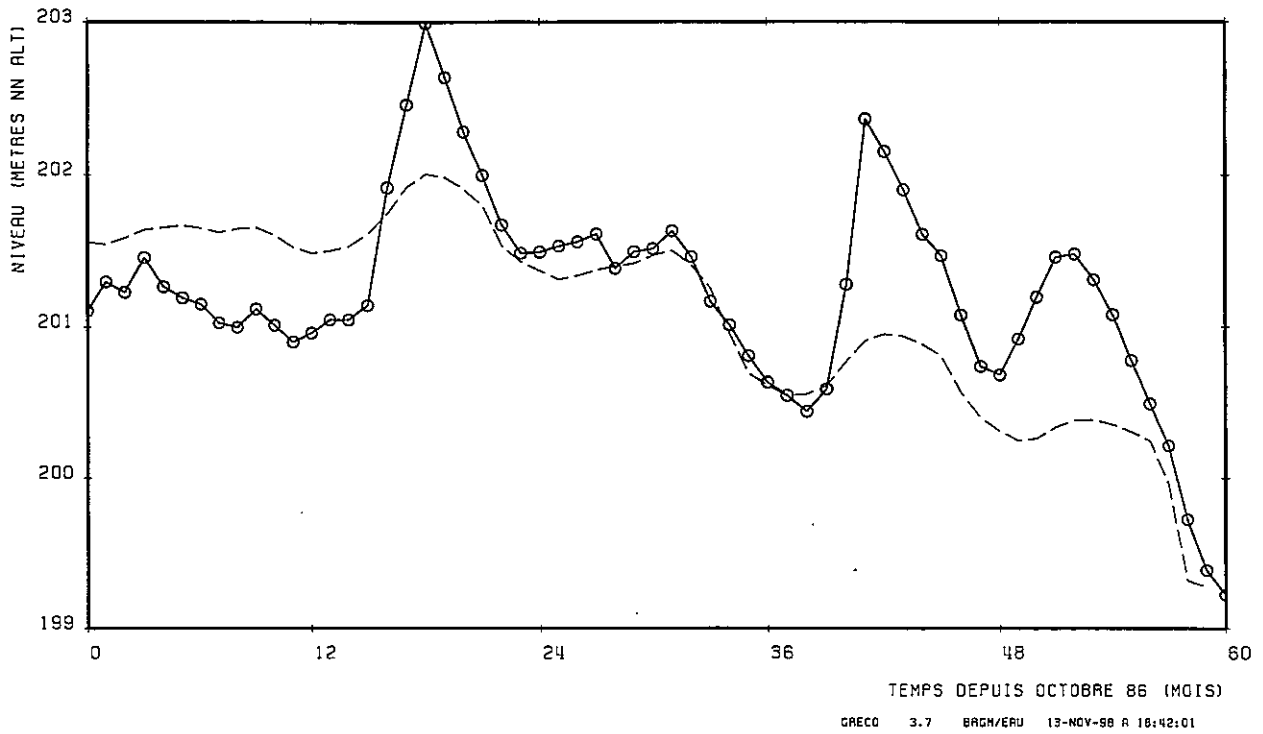


PIEZOMETRE 4131X0081

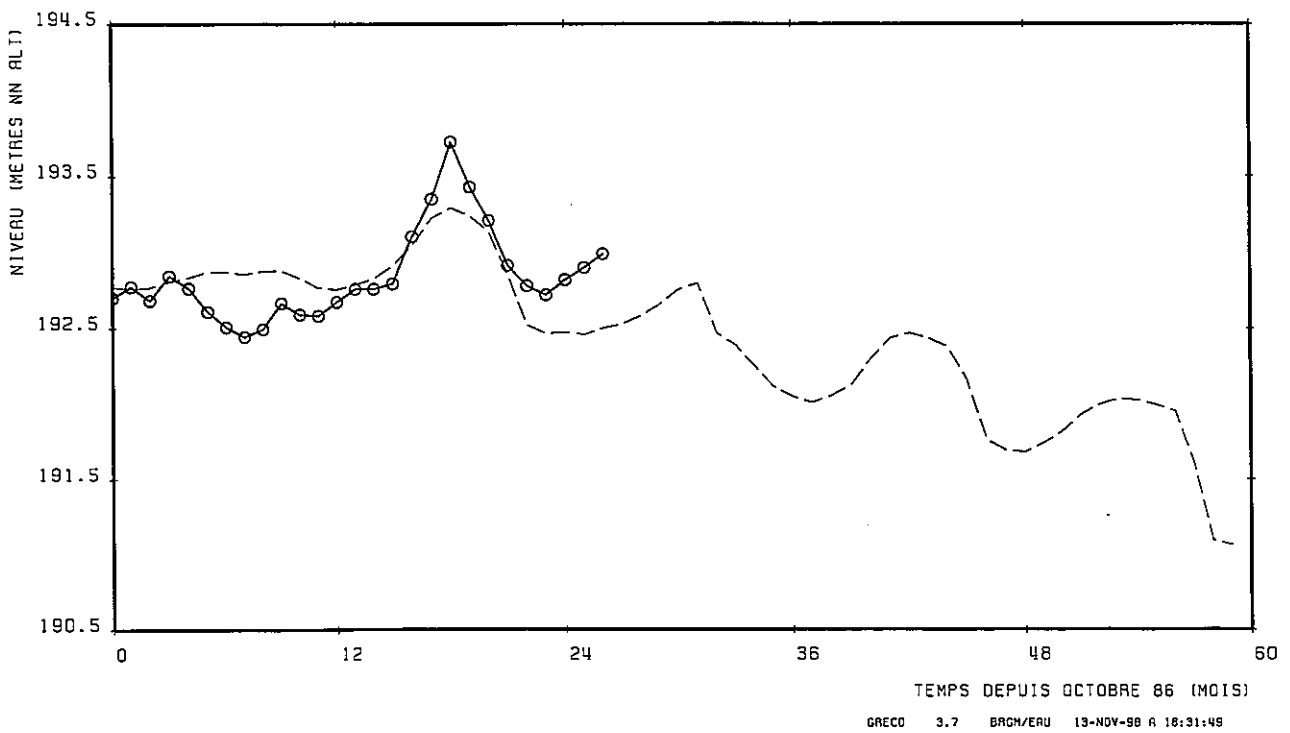




PIEZOMETRE 3786X0074



PIEZOMETRE 3782X0086



ANNEXE 6

Historiques des concentrations mesurées dans les piézomètres et les puits

Sommaire

Ann. 6.1 - Historique des concentrations mesurées dans les piézomètres 140 et 152.

Ann. 6.2 - Historique des concentrations mesurées dans les piézomètres 26 et 80.

Ann. 6.3 - Historique des concentrations mesurées dans les piézomètres 87 et 95.

Ann. 6.4 - Historique des concentrations mesurées dans les piézomètres 101 et 106.

Ann. 6.5 - Historique des concentrations mesurées dans les piézomètres 264 et 265.

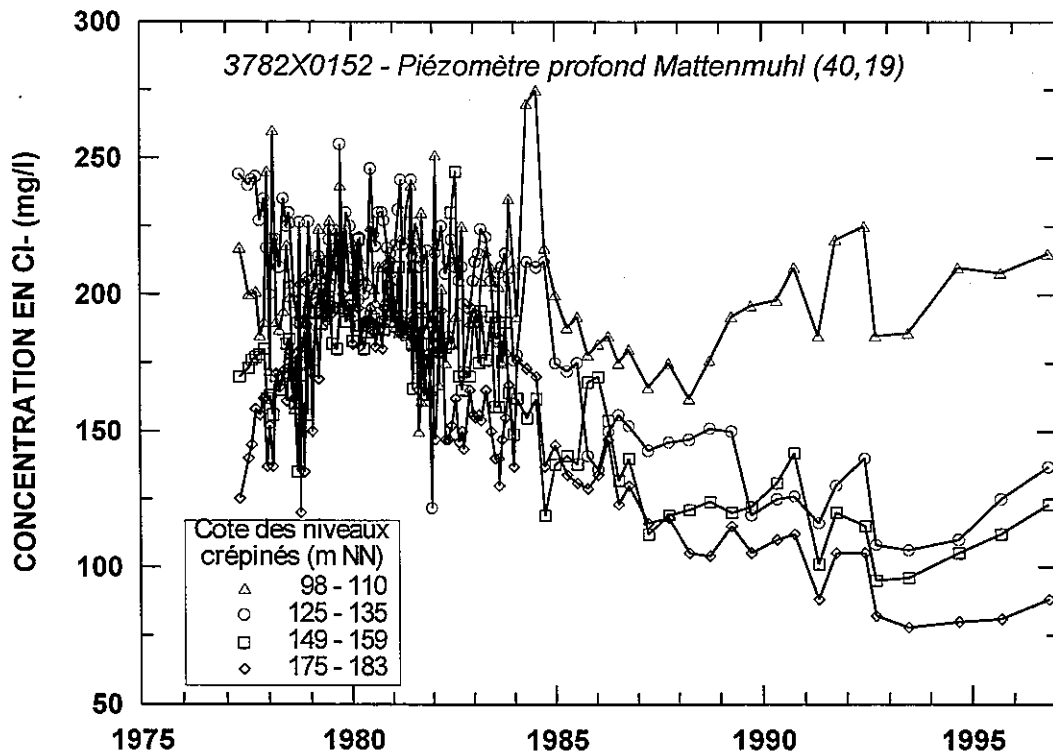
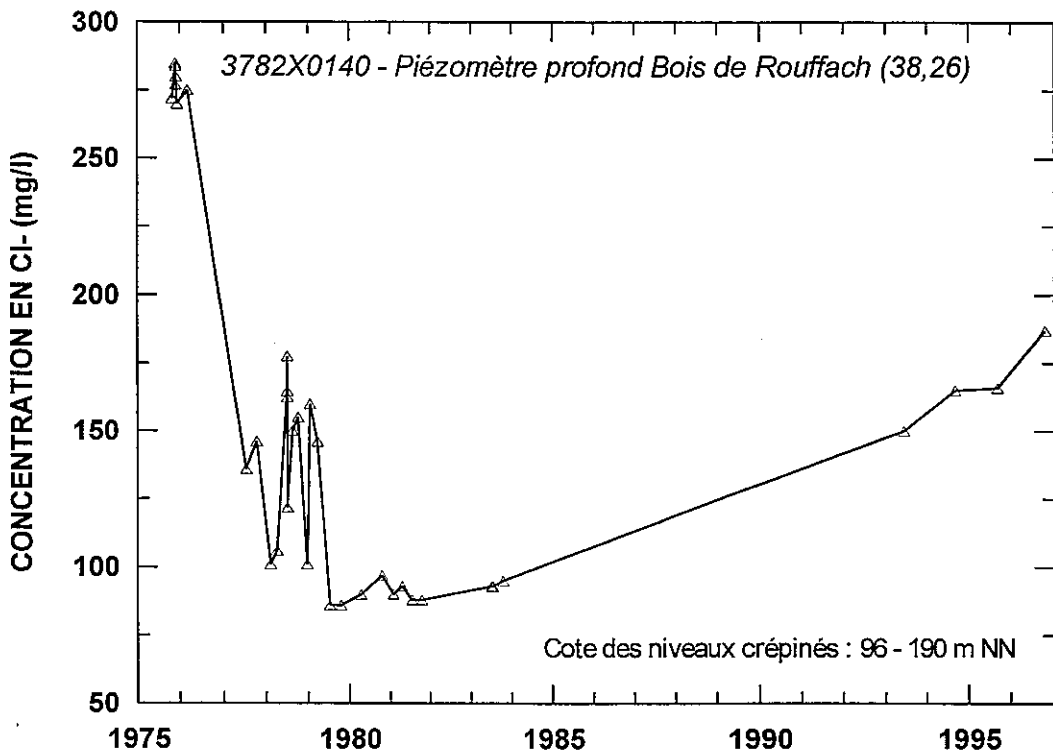
Ann. 6.6 - Historique des concentrations mesurées dans les piézomètres 266 et 267.

Ann. 6.7 - Historique des concentrations mesurées dans les piézomètres 292 et 293.

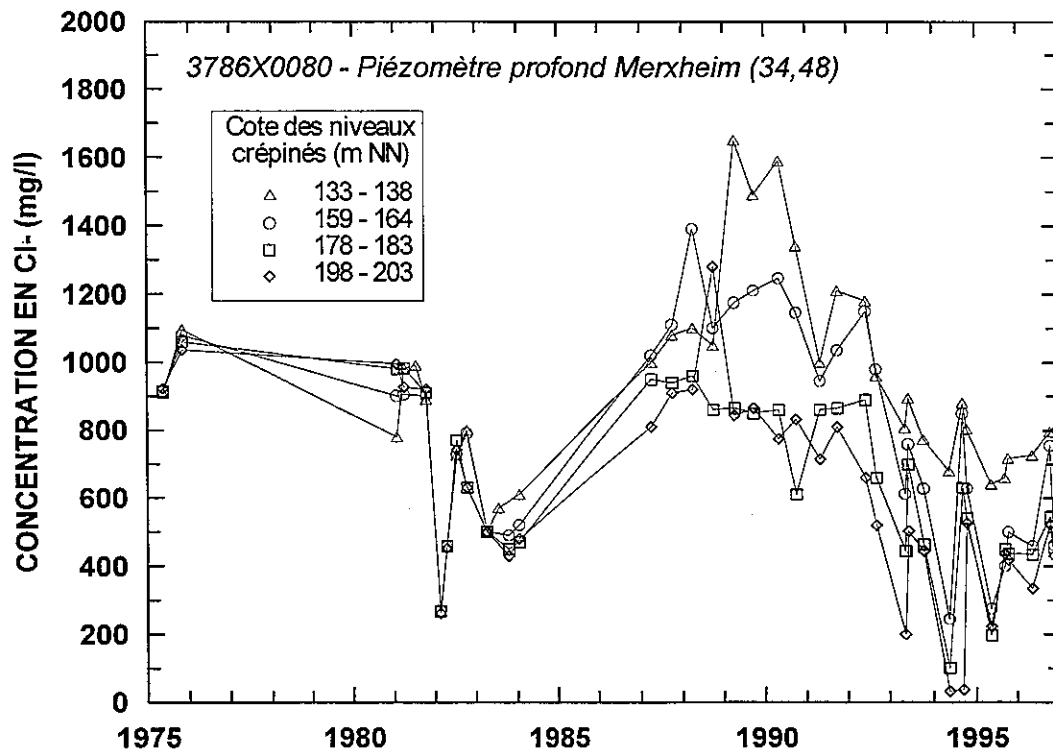
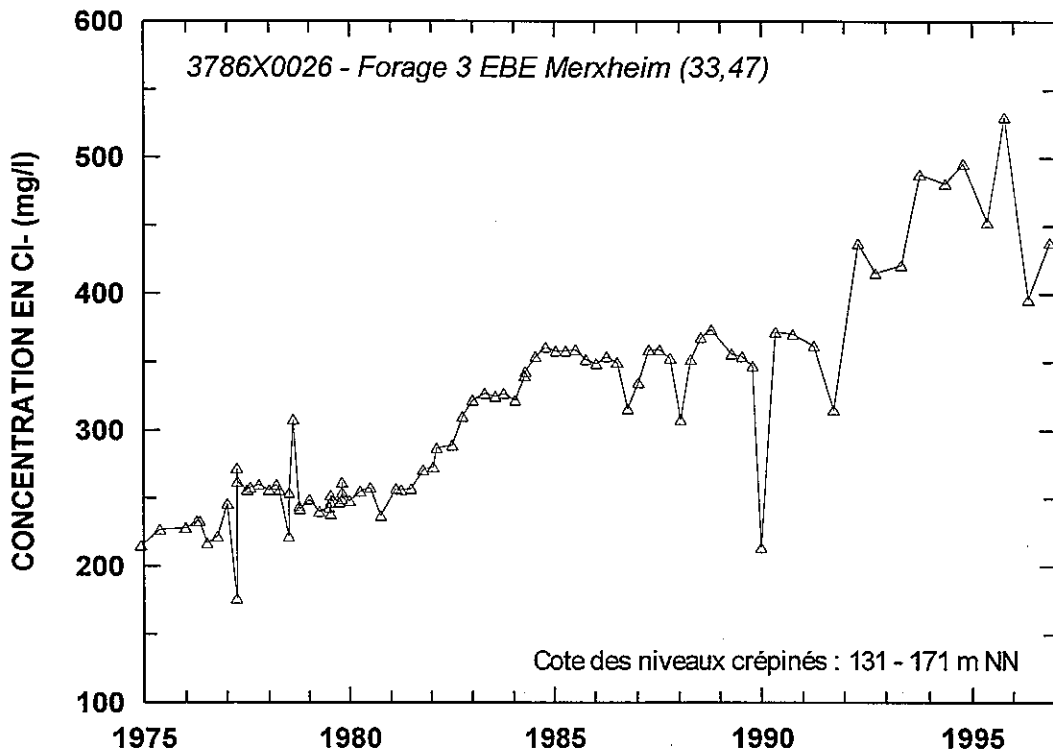
Ann. 6.8 - Historique des concentrations mesurées dans les piézomètres 294 et 191.

Ann. 6.9 - Historique des concentrations mesurées dans le piézomètre 192.

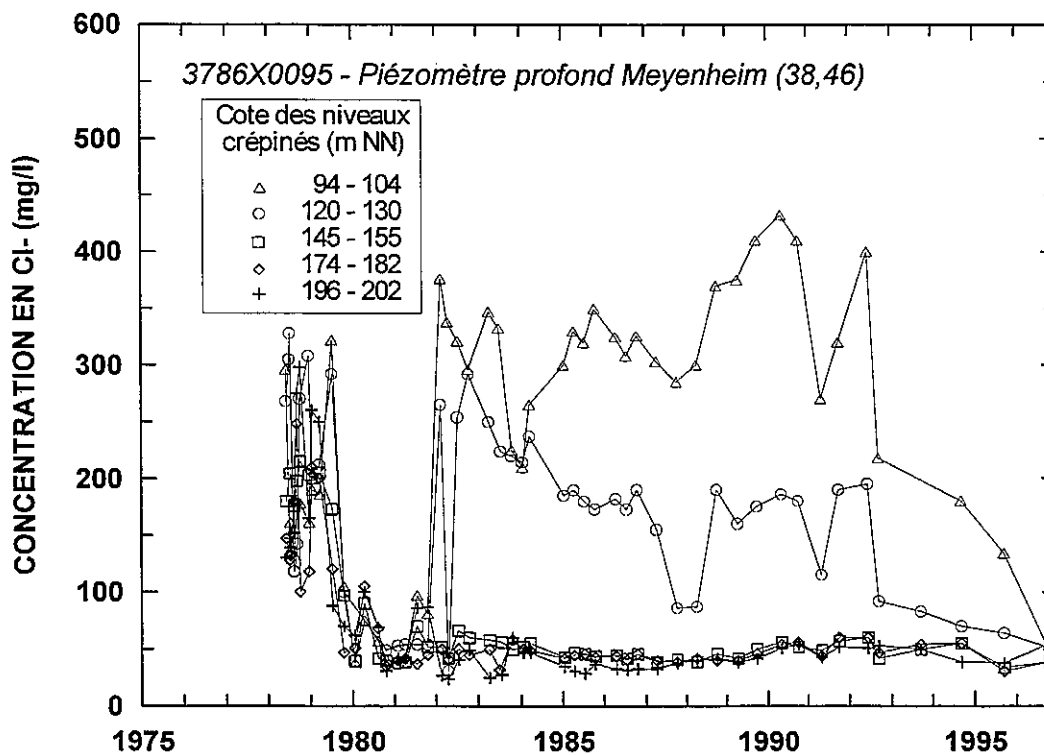
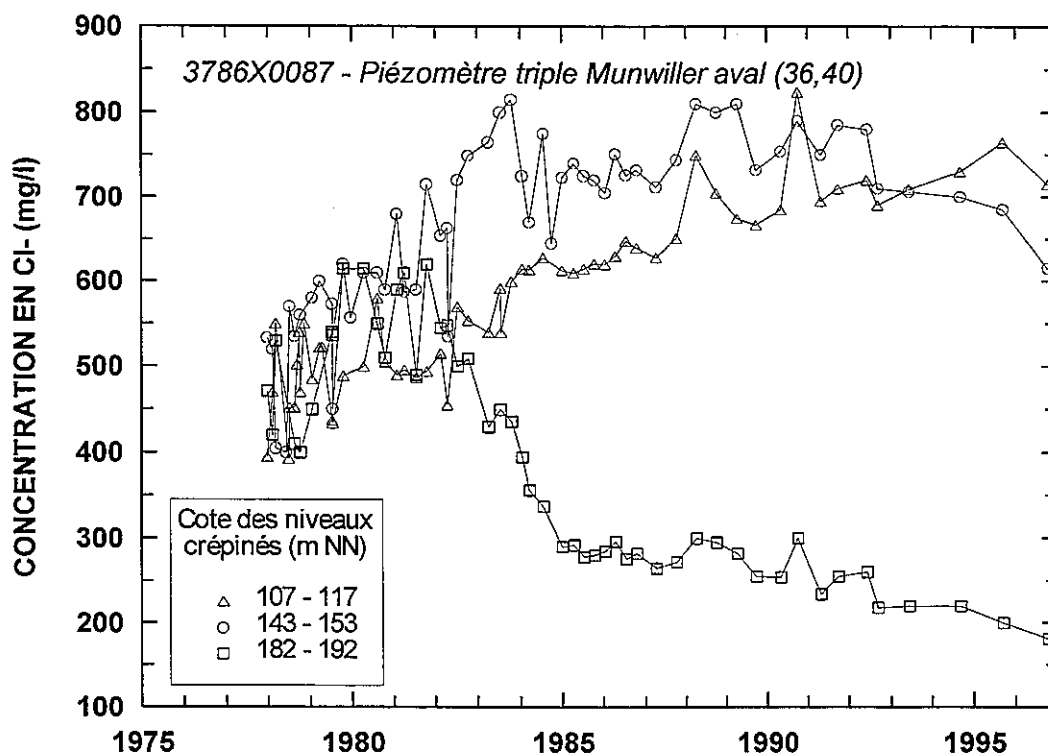
Ann. 6.10 - Historique des concentrations mesurées dans les puits de Colmar.



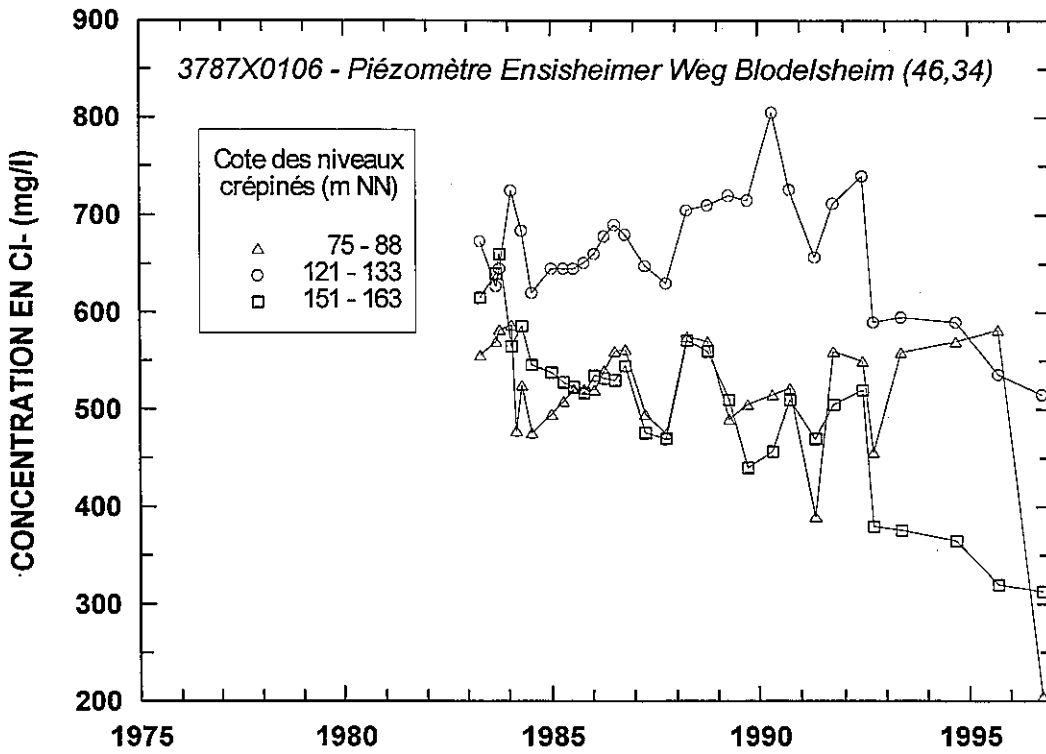
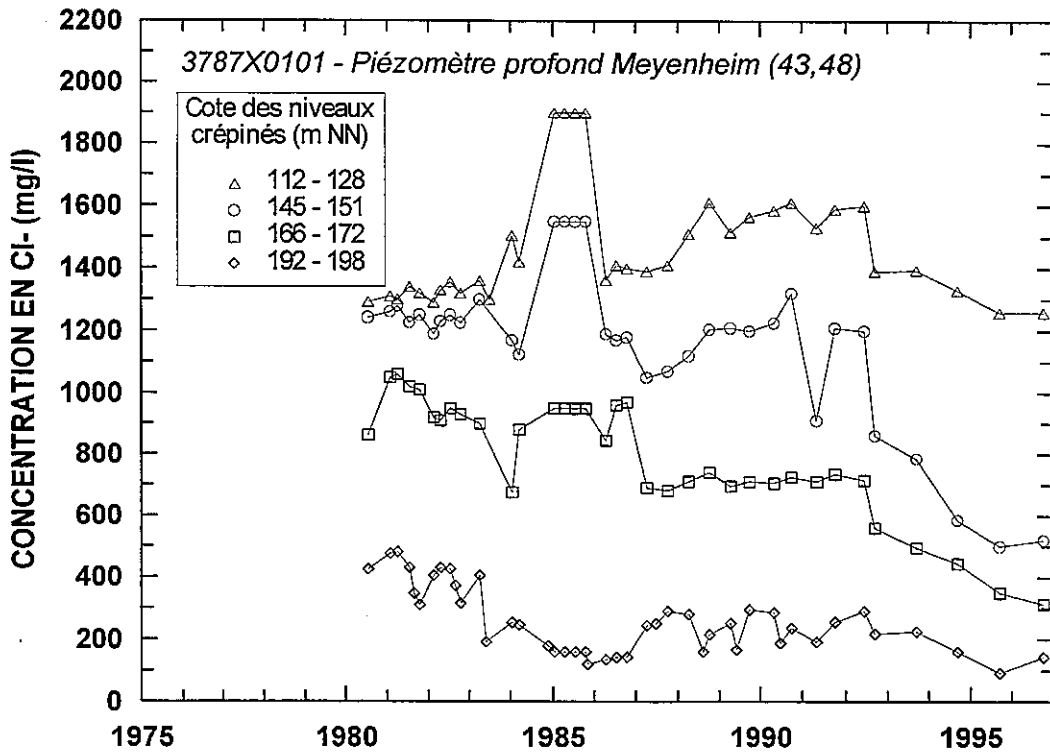
Ann. 6.1 - Historique des concentrations mesurées dans les piézomètres 140 et 152.



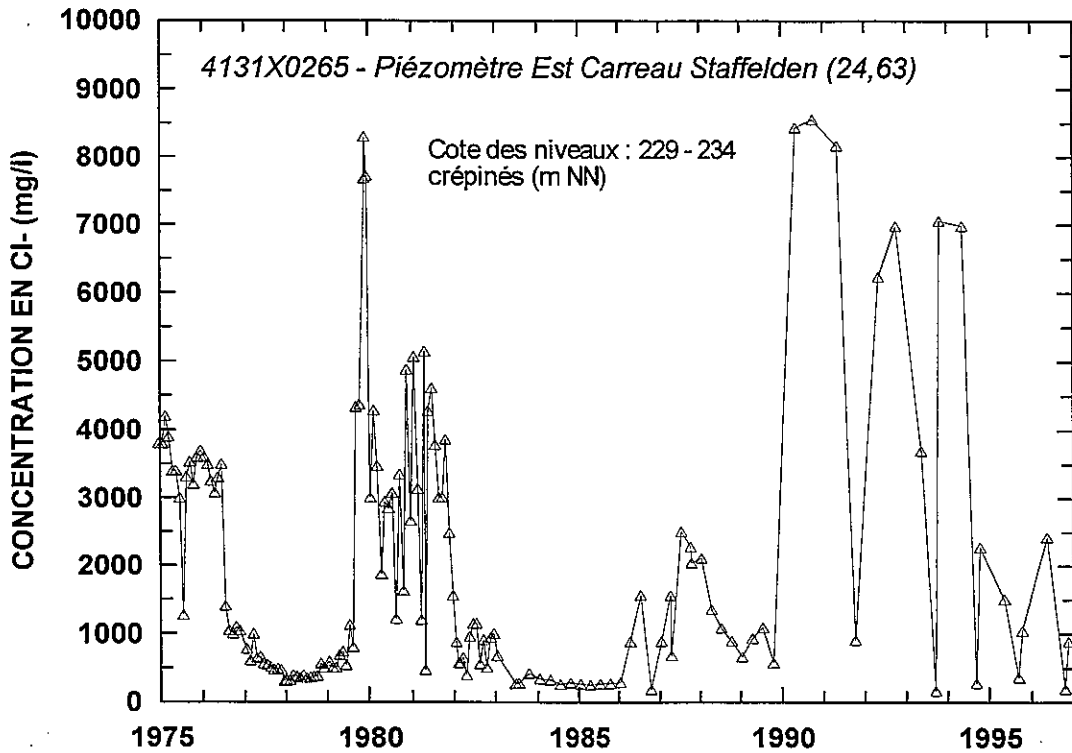
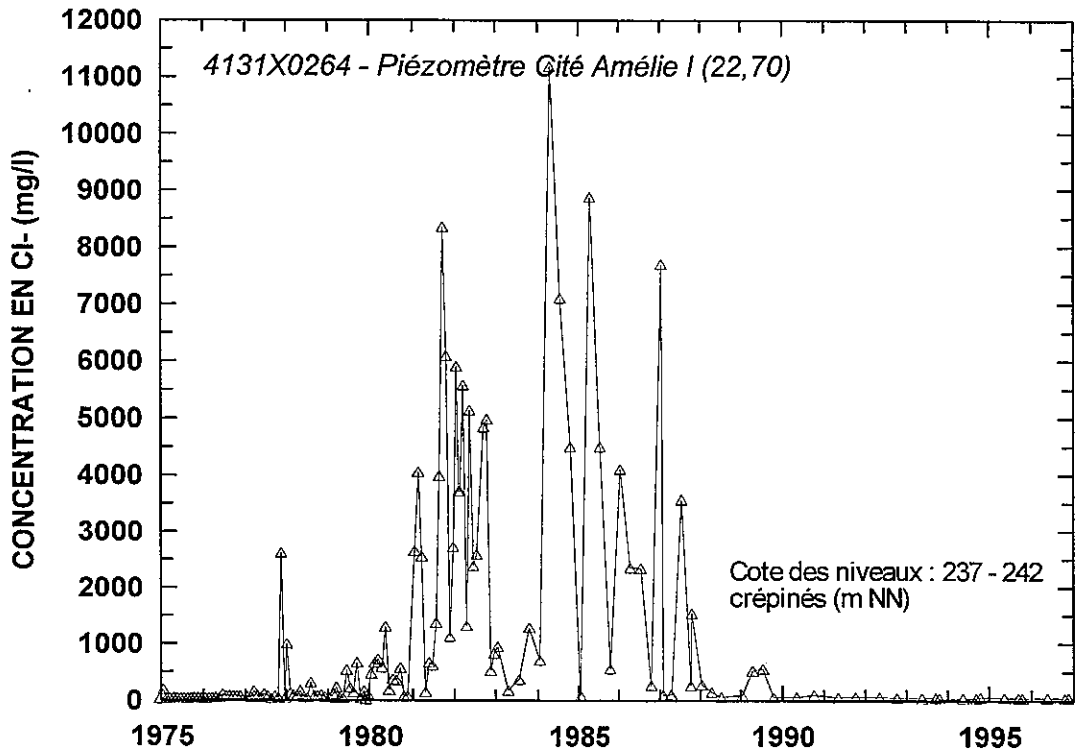
Ann. 6.2 - Historique des concentrations mesurées dans les piézomètres 26 et 80.



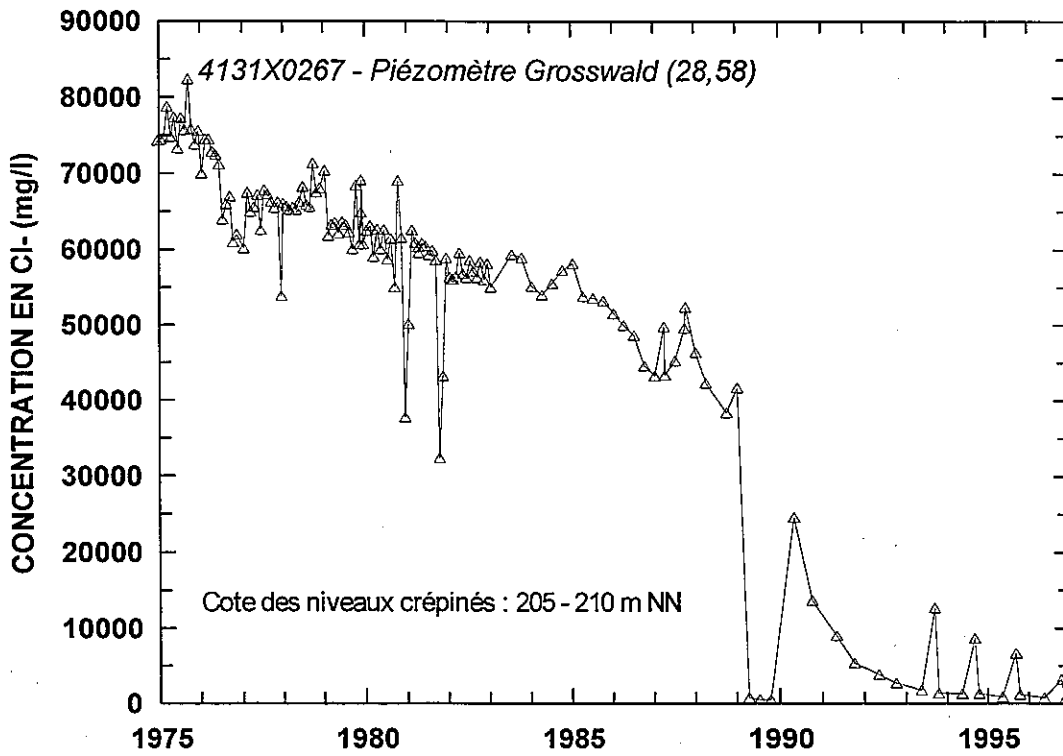
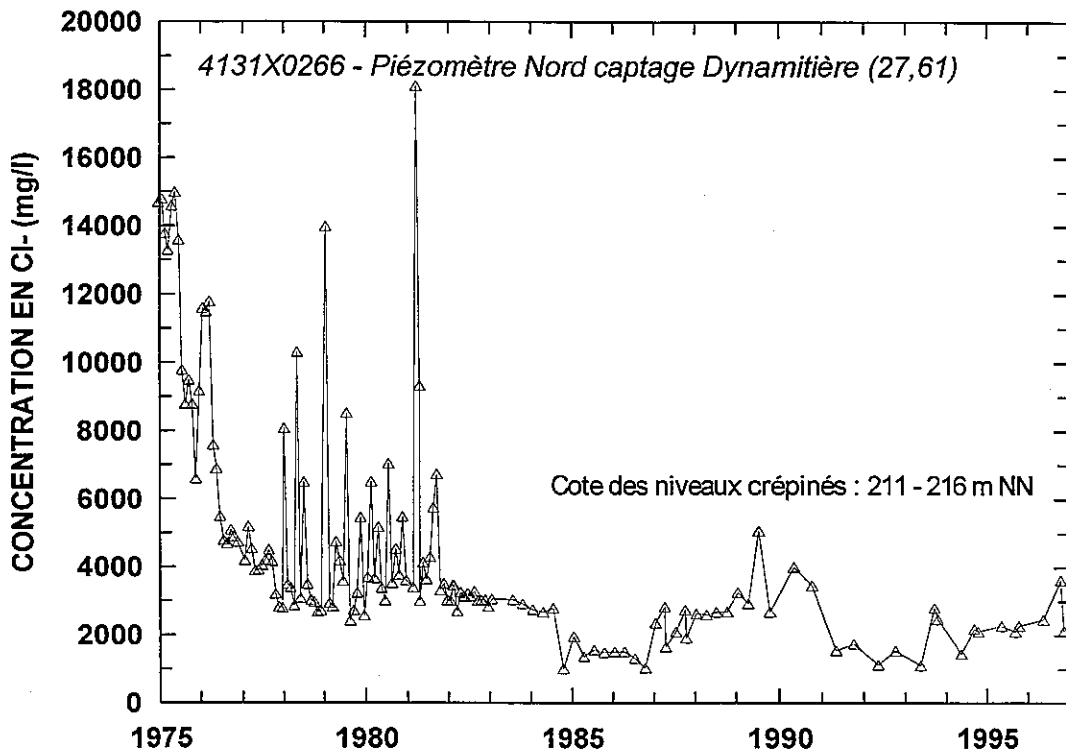
Ann. 6.3 - Historique des concentrations mesurées dans les piézomètres 87 et 95.



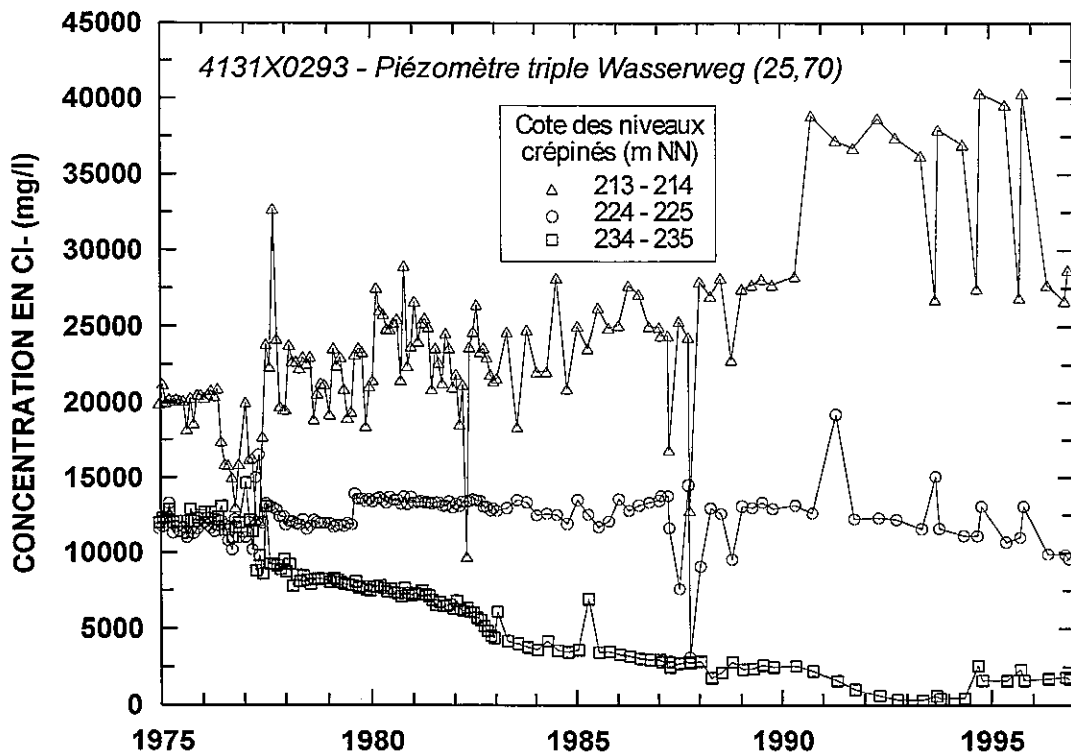
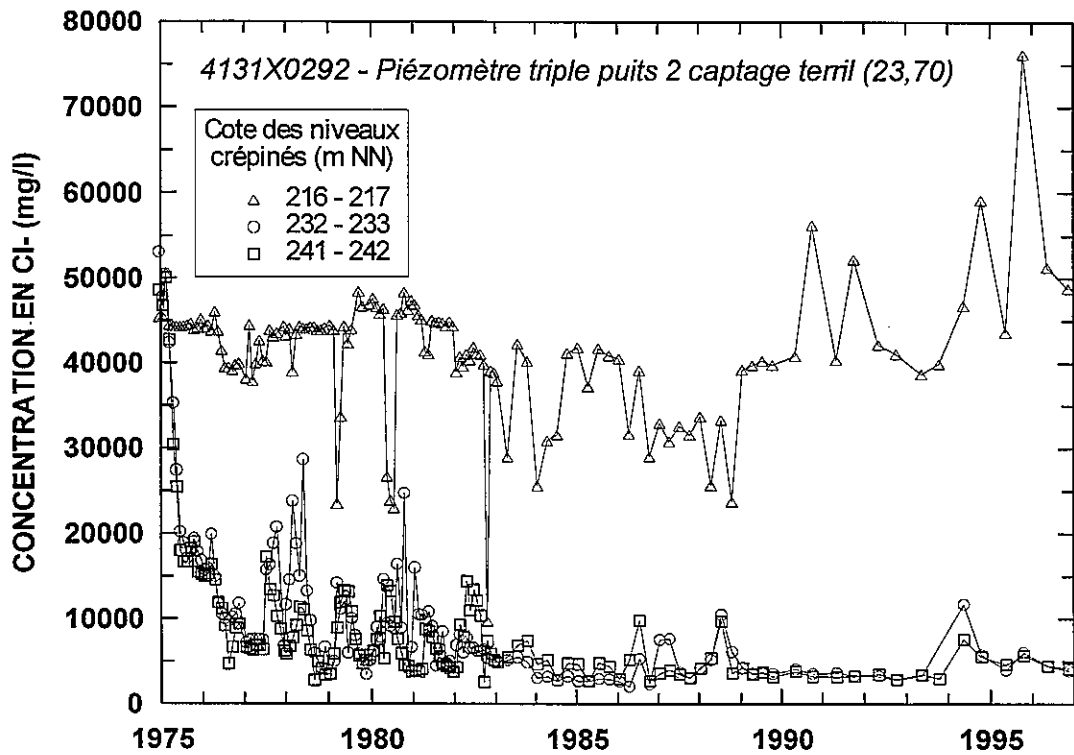
Ann. 6.4 - Historique des concentrations mesurées dans les piézomètres 101 et 106.



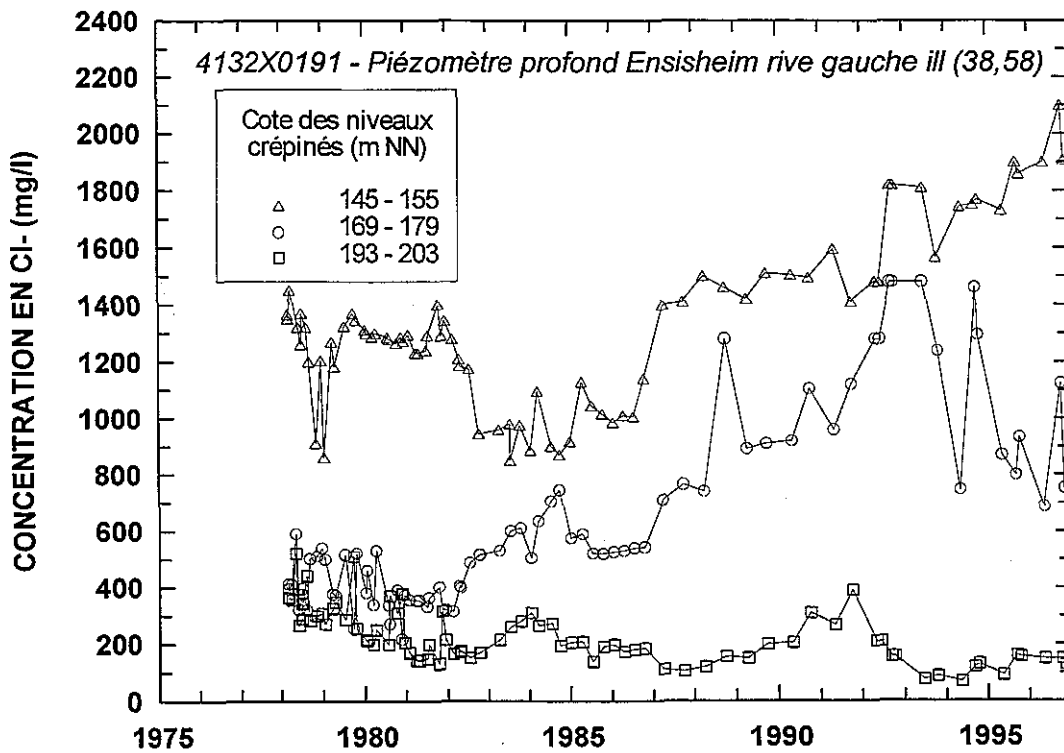
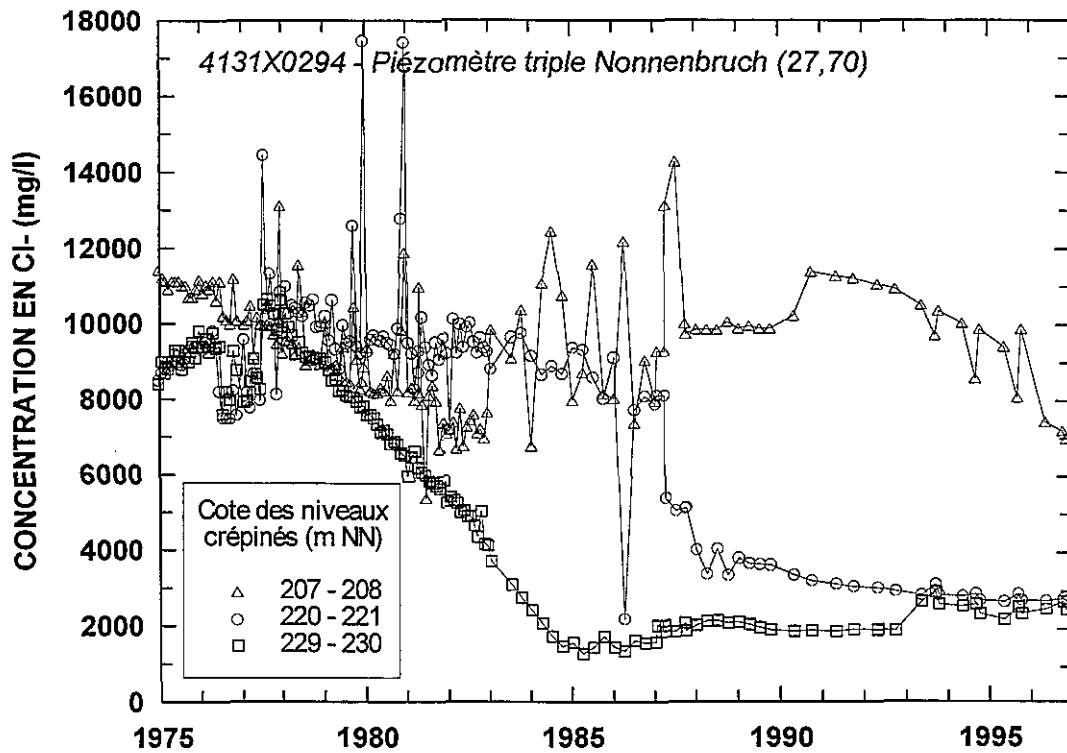
Ann. 6.5 - Historique des concentrations mesurées dans les piézomètres 264 et 265.



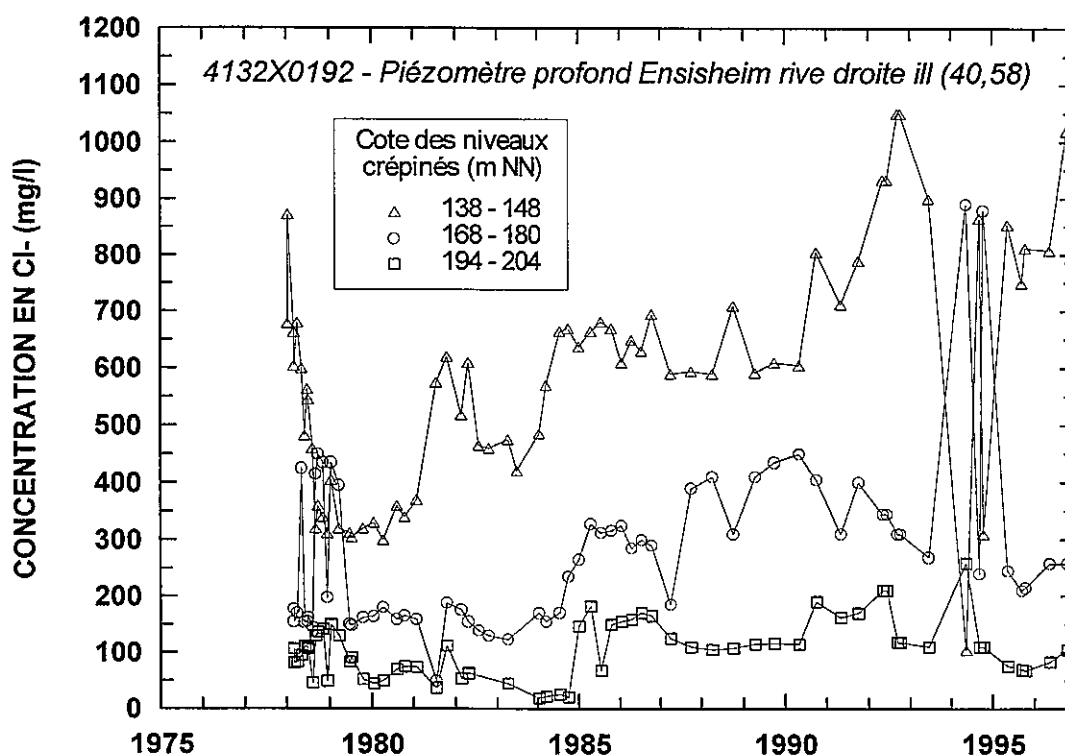
Ann. 6.6 - Historique des concentrations mesurées dans les piézomètres 266 et 267.



Ann. 6.7 - Historique des concentrations mesurées dans les piézomètres 292 et 293.



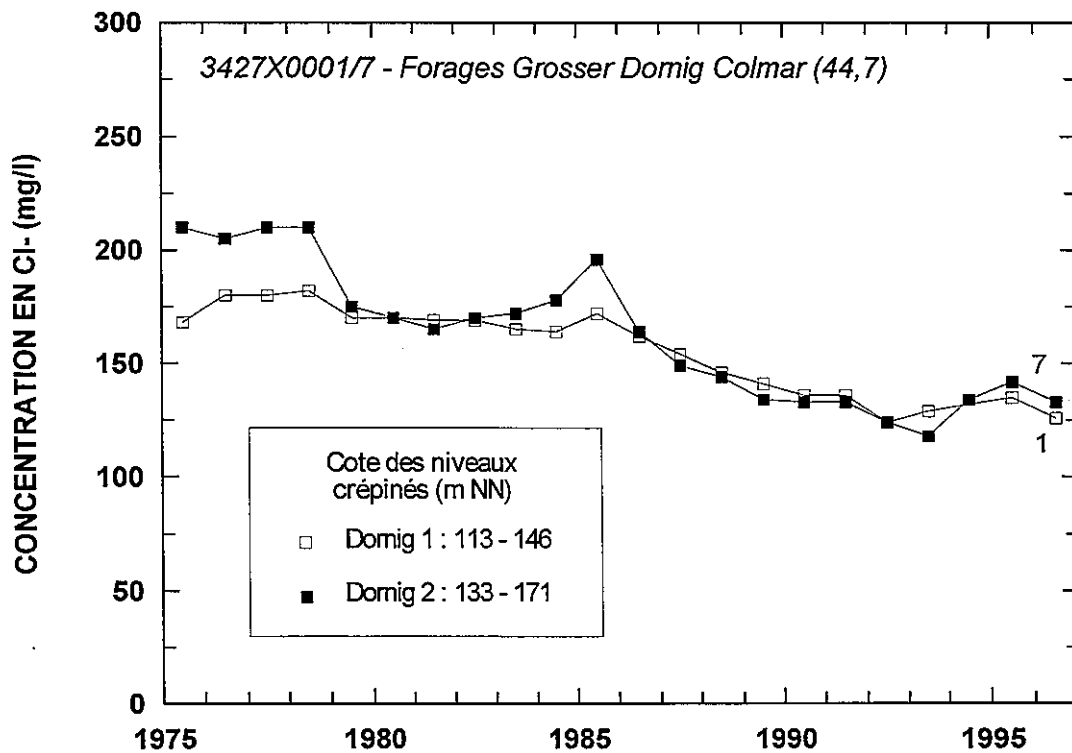
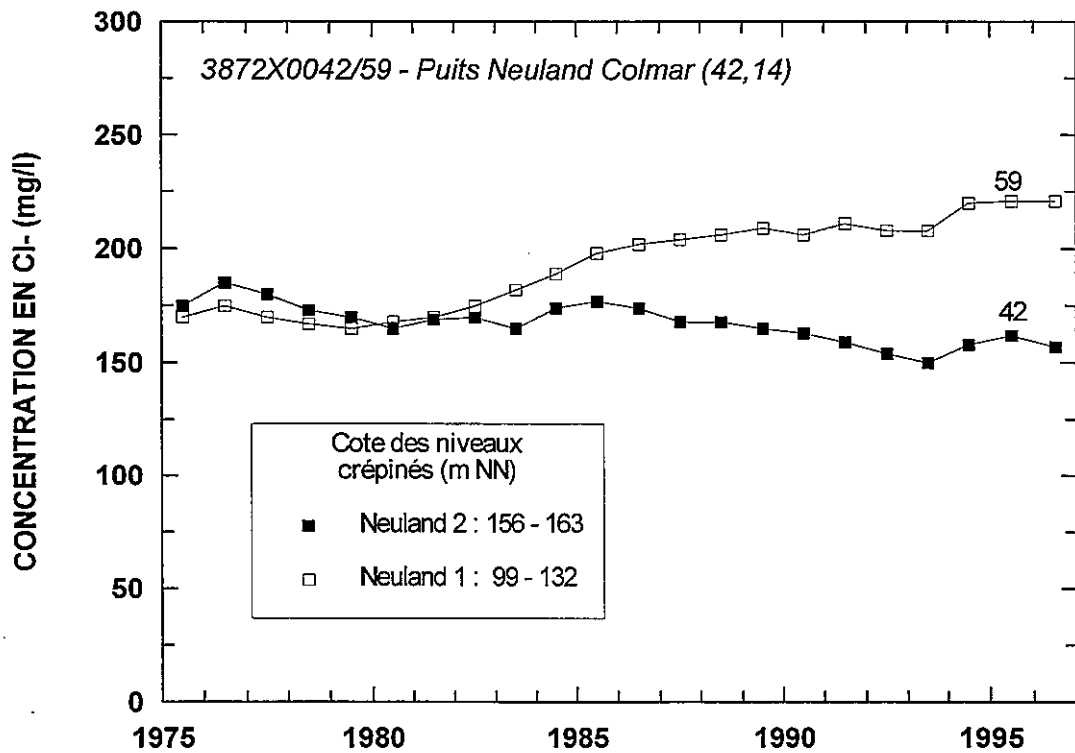
Ann. 6.8 - Historique des concentrations mesurées dans les piézomètres 294 et 191.



Ann. 6.9 - Historique des concentrations mesurées dans le piézomètre 192.

Xutm (km)	Yutm (km)	Indice national	Nb. de niveaux crépinés	Désignation des ouvrage
376.523	5317.553	3782X0140	1	Piézomètre profond Bois de Rouffach
377.725	5321.283	3782X0152	4	Piézomètre profond Mattenmuhl
374.293	5307.190	3786X0026	1	Forage 3 EBE Merxheim
374.731	5306.921	3786X0080	4	Piézomètre profond Merxheim
375.825	5310.560	3786X0087	3	Piézomètre triple Munwiller aval
376.891	5307.790	3786X0095	5	Piézomètre profond Meyenheim
379.362	5306.545	3787X0101	4	Piézomètre profond Meyenheim
380.731	5313.631	3787X0106	3	Piézomètre Ensisheimer Weg Blodelsheim
368.532	5295.533	4131X0264	1	Piézomètre Cité Amélie 1
369.893	5299.490	4131X0265	1	Piézomètre Est carreau Staffelfelden
371.040	5300.235	4131X0266	1	Piézomètre Nord capatage Dynamitière
371.868	5301.819	4131X0267	1	Piézomètre Grosswald
369.462	5295.504	4131X0292	3	Piézomètre triple puits 2 captage terill
370.265	5295.867	4131X0293	3	Piézomètre triple Wasserweg
371.470	5295.763	4131X0294	3	Piézomètre triple Nonnenbruch
376.949	5301.555	4132X0191	3	Piézomètre profond Ensisheim rive gauche ill
377.966	5301.598	4132X0192	3	Piézomètre profond Ensisheim rive droite ill
378.652	5323.987	3782X42/59	2	Puits Neuland Colmar
379.526	5327.864	3427X1/7	2	Forages Grosser Dornig Colmar

Liste et références des points de contrôle sélectionnés.



Ann. 6.10 - Historique des concentrations mesurées dans les puits de Colmar.

BRGM
DIRECTION DE LA RECHERCHE
Laboratoire Géochimie et Hydrogéologie
BP 6009 - 45060 ORLEANS Cedex 2 - France - Tél. : 33 (0)2 38.64.34.34