

Modélisation de la salure profonde au droit et en aval du bassin potassique

Rapport final

BRGM/RP-54389-FR
juin 2006

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Recherche du BRGM 2003 EAU 06

M.L. Noyer, P. Elsass

Vérificateur :

Nom : André MENJOZ

Date : 05/06/2006

Original signé par A. MENJOZ

Approbateur :

Nom : Didier PENNEQUIN

Date : 06/06/2006

Original signé par D. PENNEQUIN

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



Mots clés : nappe d'Alsace, Bassin Potassique, aquifère multicouche, modèle maillé, maillage gigogne, hydrodynamique transitoire, transport de salure, effets densitaires, interactions nappe rivières, MARTHE, GARDENIA

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
NOYER M.L., ELSASS P. (2006) – Modélisation de la salure profonde au droit et en aval du bassin potassique. Rapport final BRGM/RP-54389-FR.

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

Synthèse

Cette étude a été réalisée sur crédits propres du BRGM (Direction de la Recherche) avec cofinancement de la Région Alsace, de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse et des Mines de Potasse d'Alsace (MDPA).

L'objectif de cette étude était la mise au point d'un modèle hydrodynamique de gestion de la pollution saline de la nappe d'Alsace, dans les couches superficielles comme en profondeur, au droit et en aval du Bassin Potassique. Ce modèle doit permettre de suivre l'évolution de la salure dans le temps et d'évaluer l'impact de différents scénarios d'arrêt des pompages de fixation ou de dépollution des MDPAs, pour apporter une aide à la décision.

Un modèle multicouche prototype avait été construit en 1998 sur la base des connaissances de l'époque, avec un maillage uniforme à la maille de 500 m cohérent avec le maillage du modèle hydrodynamique régional (LfU 1996). Malgré les résultats novateurs qu'il apportait, la taille des mailles était trop grande pour qu'il puisse servir de modèle de gestion.

La construction du nouveau modèle affiné s'est appuyée d'une part sur la réutilisation d'une partie des données du modèle prototype quand c'était possible et d'autre part sur l'analyse et l'intégration des nouvelles connaissances acquises depuis 1998.

Les étapes de réalisation de ce nouveau modèle ont donc été les suivantes :

- la redéfinition complète de la géométrie des couches alluviales prenant en compte les nouvelles données issues en particulier de la géophysique et de l'analyse des coupes de nouveaux forages réalisés récemment dans le Bassin Potassique ; de plus, une topographie plus réaliste tenant compte des affaissements dans le Bassin Potassique a été fournie par les MDPAs.
- une meilleure définition de l'historique des terrils et de leur impact en fonction des travaux de dépollution entrepris, en lien avec les MDPAs ;
- une discrétisation horizontale affinée à un maillage de 125 m dans la zone du Bassin Potassique ; en conséquence toutes les données sont prises en compte de façon beaucoup plus précises dans cette zone ;
- la mise à jour de toutes les données nécessaires pour l'hydrodynamique (données hydro-climatiques, données piézométriques, données du réseau hydrographique, recensement des pompages et des drains superficiels et profonds) ainsi que pour le transport (cartes de concentrations, chroniques de salure, données d'infiltration sous les terrils) ; ces données ont été complétées, analysées, critiquées et discrétisées pour adaptation au nouveau maillage et à la nouvelle période de calage ;
- le calage de l'hydrodynamique sur la piézométrie sur 27 cycles hydrologiques (janvier 1978 à décembre 2004) au pas de temps mensuel, en prenant en compte

les interactions dynamiques avec le réseau hydrographique (rivières, canaux, drains) ; environ 20 piézomètres et 5 stations de jaugeage ont servi de points de contrôle ;

- le calage du transport des chlorures sur les chroniques observées au pas mensuel de janvier 1992 à décembre 2004 avec contrôle sur les cartes de salure de 2004 et sur les évolutions en 19 piézomètres et 17 puits de fixation.

Malgré quelques imprécisions au voisinage immédiat des terrils où les effets densitaires sont très importants, notamment pour les terrils traités par dissolution accélérée, la restitution des cartes historiques des chlorures et des chroniques de concentrations observées est globalement satisfaisante.

Après finalisation du calage du modèle, différents scénarios d'exploitation ont été mis en œuvre pour prévoir l'évolution future de la salure dans la zone d'étude, en fonction de différentes hypothèses sur le maintien en fonctionnement des pompages de fixation et de dépollution.

Le scénario dit tendanciel était basé sur des prévisions de traitement des terrils et d'arrêt successif des pompages jusqu'en 2014 établies par les MDPA. Ce scénario prévoit notamment qu'en 2014 tous les terrils ont été traités et tous les ouvrages de pompage non utilisés pour l'AEP sont arrêtés.

Le scénario 1 reprenait les mêmes prévisions de traitement des terrils mais supposait que les pompages étaient maintenus au rythme de 2005 jusqu'en 2014, et qu'ensuite tous les pompages (hors AEP) dont la concentration était descendue en dessous de 200 mg/L étaient arrêtés.

La comparaison des simulations de ces deux scénarios aux échéances 2014 et 2027 montre que les prévisions des MDPA sont optimales sauf en ce qui concerne les barrières hydrauliques au Sud d'Ensisheim, qui devront probablement être maintenues en service plus longtemps que prévu, voire éventuellement au-delà de 2014.

Dans les deux cas les simulations indiquent que les langues salées aval seront largement nettoyées en surface en 2014 et en profondeur en 2027 ; dans le Bassin potassique il faudra attendre 2027 pour un nettoyage de la partie superficielle de la nappe, tandis que des concentrations jusqu'à 2 g/L pourront subsister en profondeur.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Etat des connaissances et données recueillies	13
2.1. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE	13
2.2. CONTEXTE DE LA SALURE.....	13
2.3. RAPPEL DES TRAVAUX ANTERIEURS	16
2.4. DONNEES POUR L'HYDRODYNAMIQUE	17
2.4.1. Données piézométriques.....	17
2.4.2. Données du réseau hydrographique	18
2.4.3. Données hydro-climatiques	26
2.4.4. Prélèvements.....	31
2.5. DONNEES POUR LE TRANSPORT DE SALURE	31
2.5.1. Cartes de salure	33
2.5.2. Données de salure dans les rivières	34
2.5.3. Infiltrations sur les terrils	37
2.5.4. Evolution des teneurs en chlorures aux points de contrôle	40
3. Construction du modèle hydrogéologique	43
3.1. MODELE CONCEPTUEL	43
3.1.1. Etat des connaissances.....	43
3.1.2. Alluvions rhénanes	46
3.1.3. Alluvions vosgiennes	46
3.2. DEFINITION DES COUCHES AQUIFERES	48
3.2.1. Définition des épaisseurs des couches	48
3.2.2. Zonage des perméabilités	52
3.3. CONSTRUCTION DU MODELE GEOMETRIQUE.....	53
3.3.1. Principe.....	53
3.3.2. Discrétisation de la topographie	54
3.3.3. Création des couches aquifères	56
3.3.4. Le problème du substratum.....	56
3.4. RESULTATS.....	60

4. Construction et calage du modèle numérique	63
4.1. GEOMETRIE DU MODELE	63
4.1.1. Cotes topographiques et maillage.....	63
4.1.2. Epaisseurs des couches	63
4.1.3. Limites verticales.....	64
4.2. METHODE DE CALAGE DU MODELE NUMERIQUE	65
4.2.1. Calage de l'hydrodynamique en régime permanent	65
4.2.2. Calage de l'hydrodynamique en régime transitoire.....	68
4.2.3. Calage du transport de masse en régime transitoire	69
4.3. RESULTATS DU CALAGE DU MODELE NUMERIQUE	70
4.3.1. Perméabilités calées	70
4.3.2. Piézométrie simulée en juin 2002	73
4.3.3. Emmagasinement et porosités calés	75
4.3.4. Historiques de charge	76
4.3.5. Historiques de débit aux stations de jaugeage	80
4.3.6. Historiques de salure	80
4.3.7. Cartes de concentration observées et simulées en 2004	81
4.3.8. Calcul du tonnage de chlorures dans la nappe.....	86
4.3.9. Conclusions sur le calage	88
5. Scénarios d'exploitation.....	91
5.1. SCENARIO TENDANCIEL.....	91
5.1.1. Définition du scénario.....	91
5.1.2. Cartes simulées en 2014	92
5.1.3. Suite du scénario tendanciel	93
5.2. SCENARIO 1.....	95
5.2.1. Définition du scénario.....	95
5.2.2. Cartes simulées en 2014	96
5.2.3. Cartes des écarts entre scénario tendanciel et scénario 1 en 2014	98
5.2.4. Suite du scénario 1	100
5.2.5. Cartes des écarts entre scénario tendanciel et scénario 1 en 2027	102
5.3. SCENARIO 1 TER	104
5.3.1. Définition du scénario.....	104
5.3.2. Cartes des écarts entre scénario 1 et scénario 1 ter en 2027	105
5.4. CALCULS DE TONNAGE	107

5.5. SCENARIO 2	108
5.5.1. Définition du scénario	108
5.5.2. Nouvelles données	110
5.5.3. Résultats.....	111
6. Conclusions	121
7. Bibliographie.....	125

Liste des figures

Figure 1 - Points de suivi de la piézométrie et carte de situation observée le 20 juin 2002	18
Figure 2 – Représentation discrétisée du réseau de rivières et canaux avec stations de jaugeage prises en compte.....	20
Figure 3 – Points de réalimentation de l'III et du canal de la Hardt.....	25
Figure 4 – Réseau de drains pris en compte dans le modèle	26
Figure 5 – Zoom sur les drains individualisés : Wittelsheim, Richwiller et Joseph Else Est	28
Figure 6 – Zones hydro-climatiques et stations météo	30
Figure 7 - Carte de concentration en chlorures en 1991 (mg/L) – couche 1	38
Figure 8 - Carte de concentration en chlorures en 1991(mg/L) – couche 2.....	39
Figure 9 - Carte de concentration en chlorures en 1991 (mg/L) – couche 3.....	40
Figure 10 – Localisation des points de suivi de la salure	41
Figure 11 – Carte morphologique de la plaine rhénane	44
Figure 12 – Coupe-type des alluvions rhénanes (d'après LGRB)	45
Figure 13 – Coupe géologique du puits de fixation Marie-Louise 2	47
Figure 14 – Caractéristiques de la couche 1 (alluvions récentes).....	49
Figure 15 – Caractéristiques de la couche 2 (alluvions anciennes supérieures)	50
Figure 16 – Caractéristiques de la couche 3 (alluvions anciennes inférieures)	51
Figure 17 – Corrélation entre transmissivité et débit spécifique dans l'aquifère rhénan (données de la Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan).....	52
Figure 18 – Exemple de profil Ouest-Est à travers le modèle géométrique	53
Figure 19 – Topographie en courbes de niveau de la zone d'étude (équidistance : 1m) - A noter, le relief important représenté par la colline de Pfastaff et le léger relief engendré par le dôme diapirique de Hettenschlag	55
Figure 20 – Rôle du substratum dans la construction du modèle géométrique – a) avec un affaissement se propageant depuis la couche 1 – b) avec le substratum de la BRAR.....	57

Figure 21 – Carte des affaissements miniers déduits de la différence entre la topographie MDPa 2003 et la topographie de l'IGN	59
Figure 22 – Modèle géométrique (maille de 500 m).....	61
Figure 23 – Maillage sur fond de la topographie	64
Figure 24 – Perméabilités de la couche 1 (en 10^{-3} m/s).....	71
Figure 25 - Perméabilités de la couche 2 (en 10^{-3} m/s).....	72
Figure 26 - Perméabilités de la couche 3 (en 10^{-3} m/s).....	73
Figure 27 – Charges simulées en régime permanent (en m) avec isovaleurs simulées (en bleu) et observées (en rouge)	74
Figure 28 – Calage en régime permanent sur la situation de Juin 2002 - Corrélation entre charges observées et simulées.....	75
Figure 29 – Zonation des emmagasinelements libres en couche 1 et valeurs en %.....	77
Figure 30 - Zonation des emmagasinelements libres en couche 2 et valeurs en %.....	78
Figure 31 - Zonation des emmagasinelements libres en couche 3 et valeurs en %.....	79
Figure 32 – Cartes de concentrations observées (en haut) et simulées (en bas) en 2004 (mg/L) couche 1.....	82
Figure 33 – Cartes de concentrations observées (en haut) et simulées (en bas) en 2004 (mg/L) couche 2.....	84
Figure 34 – Cartes de concentrations observées (en haut) et simulées (en bas) en 2004 (mg/L) couche 3.....	85
Figure 35 – Scénario tendanciel – concentrations en 2014 (mg/L) – couche 1	92
Figure 36 - Scénario tendanciel – concentrations en 2014 (mg/L) – couche 2.....	92
Figure 37 - Scénario tendanciel – concentrations en 2014 (mg/L) – couche 3.....	93
Figure 38 - Scénario tendanciel – concentrations en 2027 (mg/L) – couche 1	94
Figure 39 - Scénario tendanciel – concentrations en 2027 (mg/L) – couche 2.....	94
Figure 40 - Scénario tendanciel – concentrations en 2027 (mg/L) – couche 3.....	95
Figure 41 – Scénario 1 – concentrations en 2014 (mg/L) – couche 1	96
Figure 42 - Scénario 1 – concentrations en 2014 (mg/L) – couche 2	97
Figure 43 - Scénario 1 – concentrations en 2014 (mg/L) – couche 3	97
Figure 44 – Ecart en mg/L entre concentrations en 2014 calculées avec le scénario tendanciel et avec le scénario 1 (couche 1).....	98
Figure 45 - Ecart en mg/L entre concentrations en 2014 calculées avec le scénario tendanciel et avec le scénario 1 (couche 2).....	99
Figure 46 - Ecart en mg/L entre concentrations en 2014 calculées avec le scénario tendanciel et avec le scénario 1 (couche 3).....	99
Figure 47 – Scénario 1 – concentrations en 2027 (mg/L) – couche 1	101
Figure 48 - Scénario 1 – concentrations en 2027 (mg/L) – couche 2	101
Figure 49 - Scénario 1 – concentrations en 2027 (mg/L) – couche 3	102

Figure 50 - Ecart en mg/L entre concentrations en 2027 calculées avec le scénario tendanciel et avec le scénario 1 (couche 1).....	103
Figure 51 - Ecart en mg/L entre concentrations en 2027 calculées avec le scénario tendanciel et avec le scénario 1 (couche 2).....	103
Figure 52 - Ecart en mg/L entre concentrations en 2027 calculées avec le scénario tendanciel et avec le scénario 1 (couche 3).....	104
Figure 53 – Ecart en mg/L entre concentrations en 2027 calculées avec scénario 1 et avec scénario 1 ter (couche 1).....	105
Figure 54 - Ecart en mg/L entre concentrations en 2027 calculées avec scénario 1 et avec scénario 1 ter (couche 2).....	106
Figure 55 - Ecart en mg/L entre concentrations en 2027 calculées avec scénario 1 et avec scénario 1 ter (couche 3).....	106
Figure 56 - Historique des teneurs en chlorures aux puits EBE	109
Figure 57 - Historique des teneurs en chlorures aux puits de Colmar	109
Figure 58 – Carte modifiée des concentrations en chlorures en 1991 – couche 2	110
Figure 59 - Carte modifiée des concentrations en chlorures en 1991 – couche 3	111
Figure 60 – Scénario 2 : concentrations observées (en haut) et simulées (en bas) en 2004 (mg/L) - couche 2.....	113
Figure 61 - Scénario 2 : concentrations observées (en haut) et simulées (en bas) en 2004 (mg/L) - couche 3.....	114
Figure 62 – Evolutions comparées au piézo 3782X0152	115
Figure 63 - Evolutions comparées au piézo 3782X0140	116
Figure 64 - Evolutions comparées au piézo 3786X0087	117
Figure 65 - Evolutions comparées au puits EBE F6	118
Figure 66 – Evolution au puits EBE F3 – scénario 2 (non simulé au cours du calage).....	119
Figure 67 – Evolution au puits Neuland – scénario 2	119
Figure 68 – Evolution au puits Dornig – scénario 2	119

Liste des tableaux

Tableau 1 – Traitement des terrils	15
Tableau 2 – Données hydrologiques disponibles	22
Tableau 3 – Soutien d’étéage de l’Ill (en noir, débit mesuré ; en italique rouge, débit estimé).....	23
Tableau 4 – Pluviométrie moyenne par zone	27
Tableau 5 – Pluviométrie moyenne par station Météo	27
Tableau 6 – Prélèvements des ouvrages des MDPAs (1991-2004)	32

Tableau 7 – Evolution des chlorures dans les rivières (en mg/L)	34
Tableau 8 – Infiltrations sous les terrils en Tonnes de NaCl (source MDPa)	35
Tableau 9 – Surface occupée par les terrils en hectares (d'après document MDPa)	36
Tableau 10 – Données du modèle géométrique	54
Tableau 11 – Calcul du tonnage de chlorures dans la nappe en 2004.....	88
Tableau 12 – Scénarios d'exploitation du modèle.....	91
Tableau 13 – Pompages non arrêtés en 2014 pour le scénario 1	100
Tableau 14 – Calcul du tonnage de chlorures dans la nappe pour le scénario tendanciel et le scénario 1	107
Tableau 15 – Surfaces et volumes de nappe.....	107
Tableau 16 – Principaux scénarios d'exploitation du modèle	121

Liste des annexes

Annexe 1 Débits mensuels aux stations de jaugeage.....	127
Annexe 2 Calage de l'hydrodynamique : historiques de charge	133
Annexe 3 Calage de l'hydrodynamique : historiques de débit aux stations de jaugeage	141
Annexe 4 Calage du transport : historiques de salure aux piézomètres et puits de fixation	145
Annexe 5 Evolution des pompages et définition du scénario tendanciel	159

1. Introduction

La pollution saline issue principalement des terrils des Mines de potasse d'Alsace (MDPA) affecte une grande part du département du Haut-Rhin. Si la situation des tranches superficielles de l'aquifère montre une tendance générale à l'amélioration suite aux travaux de fixation et de dépollution des sources mises en œuvre par les MDPA avec le concours financier de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, des interrogations subsistent sur la salure des couches profondes de la nappe et sur son évolution future.

Il est donc utile de pouvoir disposer d'un modèle de gestion permettant de simuler l'évolution de la salure tant en surface qu'en profondeur et d'évaluer l'impact de différents scénarios d'arrêt de pompages ou de mise en place de barrages de dépollution, pour apporter une aide à la décision.

Les utilisations d'un tel modèle de gestion sont multiples, et comprennent notamment :

- Prévoir l'évolution à long terme de la salure de la nappe (objectif patrimonial de la Région Alsace et de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse),
- Tester des scénarios de pompages en nappe afin de définir un programme de dépollution de la nappe pour qu'elle redevienne potable sans traitement (objectif du SDAGE et du SAGE III-Rhin-nappe ainsi que des prescriptions de la DRIRE Alsace aux MDPA).

Le présent projet de modélisation a été lancé dans cet objectif en 2003 par le BRGM avec le concours financier de la Région Alsace, de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse et des MDPA, en prolongation d'un modèle multicouche prototype construit en 1998.

Le nouveau modèle de la salure de la nappe d'Alsace mis au point dans le cadre de cette étude permet de simuler l'hydrodynamique du système aquifère et le transport de chlorures au sein de ce système. La construction d'un tel modèle passe nécessairement par différentes étapes, brièvement résumées ci-après, qui seront détaillées dans la suite du rapport :

- la **collecte des données d'entrée et de calage** du modèle (prélèvements, données hydroclimatiques pour l'estimation de la recharge, données hydrologiques telles que les débits des rivières, historiques de charges, de concentrations, d'infiltrations sur les terrils, etc) ;
- la **synthèse hydrogéologique** des connaissances, en particulier la stratigraphie des formations rencontrées dans l'emprise de la zone d'étude, permettant de définir l'extension horizontale et verticale de ces différentes formations et leurs caractéristiques hydrogéologiques (aptitudes des formations contenues dans le domaine à l'écoulement et au stockage de l'eau souterraine) ;
- la définition d'un **modèle hydrogéologique conceptuel** des écoulements, c'est-à-dire une représentation simplifiée des écoulements réels au sein du domaine d'étude ; cette représentation doit être suffisamment proche de la réalité pour

restituer correctement les phénomènes à étudier et suffisamment schématisée pour pouvoir être utilisée en entrée d'un code de modélisation hydrodynamique, lequel va résoudre les équations de l'écoulement et du transport pour diverses « sollicitations » qui sont les interactions, variables dans le temps, avec le milieu extérieur au domaine ; ces interactions sont des « entrées » (infiltration de la pluie, flux entrant aux limites du domaine, alimentation par le réseau hydrographique, infiltrations sur les terrils...) ou des « sorties » (prélèvements par pompage AEP, industriels, agricoles, dépollution/fixation, flux sortant aux limites, drainage par le réseau hydrographique...);

- la résolution des équations de l'écoulement et du transport passe par la « **discrétisation** » du domaine d'étude, c'est-à-dire son découpage dans les 3 dimensions, en petits éléments, ou « mailles », dans lesquels on fait l'hypothèse que les différents paramètres physiques sont homogènes pour chaque maille, alors qu'ils sont hétérogènes à l'échelle de l'ensemble du domaine d'étude ; cette discrétisation des paramètres et la création de la base de données correspondante, au format lisible par le code hydrodynamique choisi résulte en un **modèle numérique** des écoulements pour le domaine d'étude considéré ;
- une fois « **calé** » (calibré) sur des situations réellement observées, le modèle numérique peut être utilisé comme un outil de **prévision** et de gestion pour tester les impacts sur le milieu aquifère de différents scénarios hypothétiques. Le « calage » du modèle numérique qui consiste à estimer aussi précisément que possible les paramètres physiques non directement accessibles à la mesure (perméabilité et coefficient d'emmagasinement des couches aquifères, coefficients d'échange avec la rivière, vitesses de transport...etc...) constitue l'étape la plus importante et la plus délicate dans la mise au point d'un modèle tel que celui de la salure.

Le code utilisé dans cette étude est le progiciel MARTHE du BRGM (Thiéry, 1995), qui est un outil très complet de modélisation 3D aux différences finies, applicable aux milieux poreux équivalents et pouvant traiter des configurations aquifères variées, des plus simples aux plus complexes. Il permet en particulier de traiter les interactions dynamiques entre un système aquifère stratifié à plusieurs couches et un réseau hydrographique superficiel (rivières et/ou canaux). Il est capable de gérer la disparition partielle de certaines couches et il est très robuste vis-à-vis des problèmes de dénoyage qui se présentent parfois lorsque l'épaisseur des couches devient faible, ce qui est le cas dans le bassin potassique.

2. Etat des connaissances et données recueillies

2.1. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

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 jusqu'au Rhin, pris en compte dans la modélisation, à l'est.

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'III, 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'III, 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'III, la puissance des sédiments aquifères, de 80 m environ en bordure de l'III, 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.

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

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.

2.2. CONTEXTE DE LA SALURE

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 ; 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, les saumures sont rejetées exclusivement dans le saumoduc créé en 1934 pour évacuer le sel vers le Rhin à hauteur de Fessenheim.

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.

La source initiale de la contamination saline est donc essentiellement constituée par les terrils des MDPA qui ont été alimentés par des dépôts de résidus salés jusqu'à la fin des années 50 et de résidus insolubles peu salés ensuite. L'origine de la salure de l'aquifère, pour sa part, résulte des processus de dissolution du sel des terrils par la pluie, depuis le 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 domaine des langues aval 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, 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 rédigés par le BRGM :

- 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.

Aujourd'hui tous ces terrils sont soit traités soit en cours de traitement, les plus salés font l'objet d'une dissolution accélérée avec collecte des eaux salées par un fossé de ceinture et les puits de fixation, les moins salés sont équipés d'une couverture étanche végétalisée voire simplement végétalisés (cf. tableau 1).

Dénomination	Date d'édification	Date d'arrêt des dépôts	Opérations en cours ou prévues sur les terrils
ALEX bassin à boues	1923	1963	Non traité
ALEX Terril ancien	1913	1933	Dissolution accélérée
ALEX Terril mixte	1913	1969	Dissolution accélérée
RODOLPHE	1930	1976	Dissolution accélérée partielle Etanchement -Végétalisation
MARIE-LOUISE	1920	1999	Dissolution accélérée partielle
AMELIE Nord	1924	2002	Dissolution accélérée partielle
AMELIE Est	1913	1929	Transféré sur Amélie Nord
AMELIE II	1913	1953	Etanchement-végétalisation
JOSEPH-ELSE Ouest	1912	1969	Etanchement-végétalisation
JOSEPH-ELSE Est	1959	1969	Dissolution accélérée
ANNA	1923	1974	Dissolution accélérée
FERNAND	1913	1968	Dissolution accélérée
EUGENE	1960	1986	Etanchement-végétalisation
THEODORE	1913	1959	Dissolution accélérée
ENSISHEIM Ouest	1920	1975	Etanchement-végétalisation
ENSISHEIM bassin à boues	1932	1964	Non traité
ENSISHEIM Est	1923	1932	Dissolution accélérée
ENSISHEIM Nord	1926	1961	Végétalisation

Tableau 1 – Traitement des terrils

Pour compléter le recensement des sources connues 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. Cette pollution devrait cesser à partir de 2005 suite à la mise en place d'une paroi étanche.

Toutes ces sources de salure connues et prise en compte dans la modélisation sont des sources anthropiques bien identifiées. Il n'est pas exclu qu'il existe aussi des sources naturelles telles que des remontées de saumure par des failles ou des phénomènes de dissolution de diapirs de sel, mais elles n'ont pas été clairement identifiées pour l'instant. L'hypothèse d'une source de salure naturelle entre Raedersheim et Ungersheim sera explorée dans un des scénarios d'exploitation du modèle.

2.3. RAPPEL DES TRAVAUX ANTERIEURS

Le BRGM avec ses différentes implantations (SGR Alsace et centre technique d'Orléans) a participé à différents projets transfrontaliers en partenariat avec les Allemands et parfois les Suisses :

- de 1993 à 1996, programme communautaire LIFE de modélisation hydrodynamique de la nappe d'Alsace à l'échelle régionale (hydrodynamique 2D seulement) sous maîtrise d'ouvrage de la LfU du Bade-Wurtemberg et de la Région Alsace ;
- de 1993 à 1996, programme communautaire INTERREG 1 de cartographie hydrogéologique transfrontalière du fossé du Rhin supérieur (maîtrise d'ouvrage LfU & Région Alsace) ;
- à partir de 1996, programme INTERREG 2 pour l'inventaire de la qualité des eaux souterraines dans la même zone (maîtrise d'ouvrage : Région Alsace, partenaires étrangers : Land et LfU du Bade-Wurtemberg, cantons de Bâle-Ville et de Bâle-Campagne).

A l'occasion de ces projets, la Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan (BRAR) base de données gérée pour le compte de la Région Alsace par le BRGM a été mise en place et différentes campagnes de reconnaissance géophysique ainsi que d'analyses géochimiques et isotopiques ont été menées, avec une importante participation du BRGM.

Un projet de développement de la Direction de la Recherche du BRGM (Noyer *et al.*, 1998) a permis de mettre au point, dans la même zone géographique, un premier véritable modèle multicouche de l'écoulement de la nappe des alluvions quaternaires ainsi que du transport de la salure issue des terrils du Bassin Potassique.

Ce modèle était un prototype, basé sur une discrétisation spatiale horizontale relativement grossière avec une maille uniforme de 500 m héritée du modèle LIFE ; par ailleurs, la discrétisation verticale en 3 couches correspondait à des connaissances encore incomplètes sur la topographie, le substratum marneux et la stratigraphie des alluvions.

Bien qu'insuffisamment précis, ce premier modèle de transport avait cependant permis des avancées non négligeables par rapport aux tentatives précédentes de modélisation avec en particulier, la restitution de trajectoires suivant correctement la forme des langues salées, y compris la variation brutale d'azimut de la langue Est.

Depuis cette modélisation, de nouvelles connaissances ont été acquises sur la stratigraphie des alluvions en exploitant les nouvelles données issues de travaux variés, en particulier : nouveaux forages des MDPAs, campagnes géophysiques, cartes des formations superficielles de la BRAR.

La description des nouvelles données géologiques et géophysiques ainsi que la méthode de construction du nouveau modèle conceptuel (hydrogéologique) sont présentées au chapitre 3.

2.4. DONNEES POUR L'HYDRODYNAMIQUE

Ce paragraphe est destiné à recenser et décrire les données qui ont servi au calage de l'hydrodynamique, en régimes permanent et transitoire. Certaines de ces données provenaient des travaux antérieurs. D'autres ont été acquises dans le cadre de cette étude.

Les études antérieures ont montré que la nappe d'Alsace est en interaction forte avec le réseau hydrographique (Rhin, rivières, canaux, drains). Les interactions dynamiques entre aquifère et réseau hydrographique doivent donc être soigneusement prises en compte dans la modélisation. Par conséquent, il faut recueillir les données propres à ce réseau.

Les autres données nécessaires sont les données de prélèvement, les données hydro-climatiques pour le calcul de la recharge et bien évidemment les données piézométriques sous la forme de carte et de chroniques.

2.4.1. Données piézométriques

a) Carte

Lors de l'étude de 1998, le calage de l'hydrodynamique avait été effectué en régime permanent sur la situation de Moyennes Eaux (ME) du 20 octobre 1986 puis en régime transitoire au pas de temps mensuel, sur 5 ans, entre la situation de ME d'octobre 1986 et la situation de Basses Eaux (BE) du 9 septembre 1991, incluant la situation de Hautes Eaux (HE) du 11 avril 1988.

Pour la nouvelle étude, le Comité de Pilotage a demandé que le calage en régime permanent soit effectué sur une situation plus récente ; c'est la situation, considérée comme de ME, du 20 juin 2002 qui a été retenue. La carte de la piézométrie observée a donc été établie à partir des mesures des réseaux APRONA et MDPA.

b) Chroniques

Les chroniques de charge mesurée sur une vingtaine de piézomètres répartis dans l'emprise du modèle ont été utilisées pour caler le modèle en régime hydrodynamique transitoire seul sur 14 années, soit de janvier 1978 à décembre 1991 puis sur 13 années complémentaires de 1991 à 2004 au cours du calage du transport. Ces chroniques ont été obtenues par extraction de la Banque de Données du Sous-sol du BRGM ou auprès de l'APRONA.

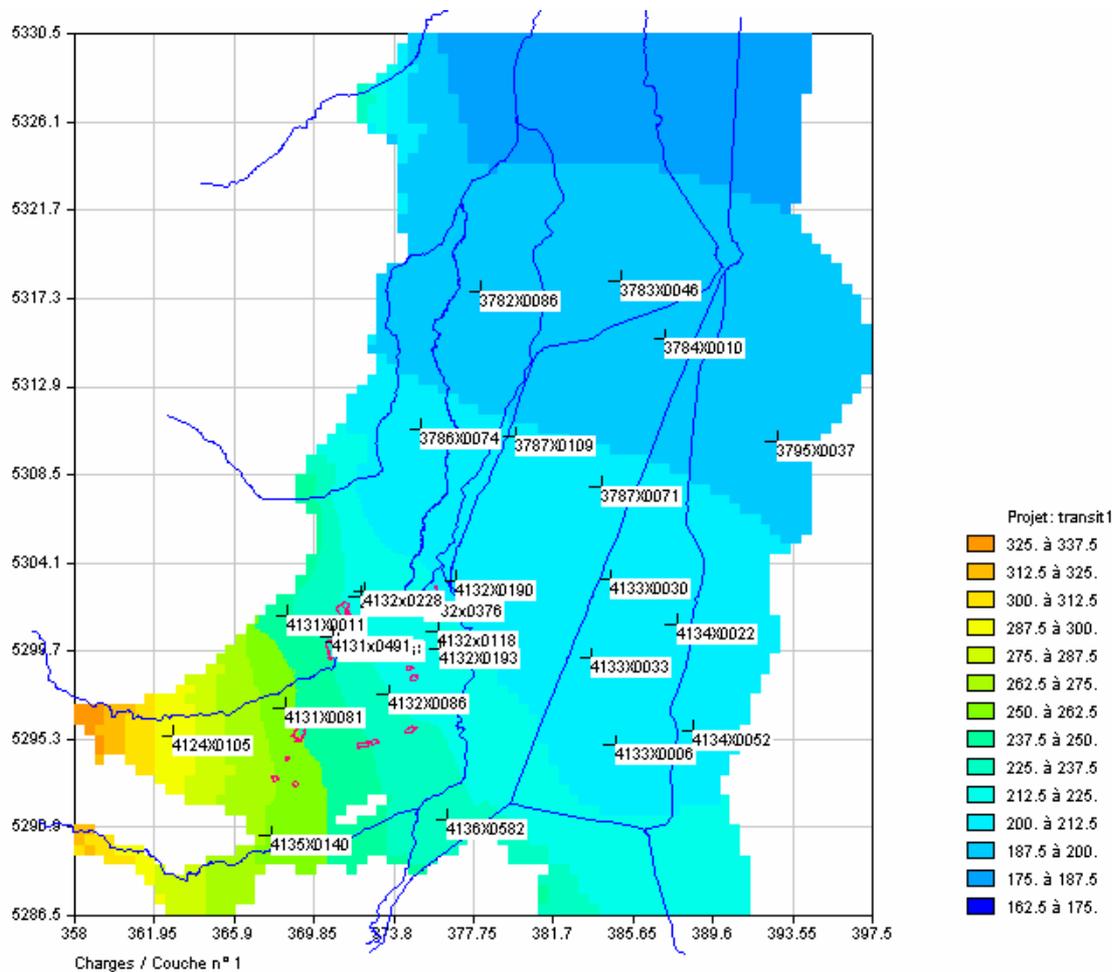


Figure 1 - Points de suivi de la piézométrie et carte de situation observée le 20 juin 2002

La plupart des chroniques sont disponibles sur la totalité de la période, excepté celles qui correspondent à des points de suivi des MDPAs, implantés récemment (après 2000) dans le Bassin Potassique.

La figure 1 présente la localisation de ces points de suivi de la piézométrie sur fond de carte observée de la situation du 20 juin 2002.

2.4.2. Données du réseau hydrographique

a) Caractéristiques des rivières et canaux

La figure 2 présente le réseau des rivières et canaux pris en compte. Une première remarque s'impose : étant donné ce que l'on sait sur le sens d'écoulement de la nappe et au vu de l'objectif de l'étude, axé sur l'évolution des langues salées, on aurait pu

concevoir de ne modéliser que la partie Ouest du modèle. Cette option n'a pas été retenue du fait de la difficulté de définir une condition à la limite Est autre que celle imposée par le Rhin et ses fluctuations.

Le réseau hydrographique pris en compte dans le modèle comprend donc les rivières de la partie Ouest du modèle, le Rhin et les principaux canaux, plus les drains. Les canaux sont traités comme des rivières, les drains qui ne peuvent pas infiltrer la nappe sont traités différemment. Les rivières et canaux peuvent au cours de la simulation soit alimenter soit drainer la nappe.

Pour le calcul des interactions dynamiques avec l'aquifère, Il faut d'abord établir l'arborescence et la hiérarchisation, c'est-à-dire les connexions d'amont en aval entre chaque tronçon de rivière et ses affluents (fig. 2).

Ensuite, les rivières et canaux doivent être représentés dans chaque maille du modèle où ils sont présents, à l'aide des paramètres suivants :

- longueur dans la maille ;
- largeur dans la maille ;
- cote du fond dans la maille ;
- cote de la ligne d'eau dans la maille ;
- épaisseur de colmatage du lit dans la maille;
- perméabilité de colmatage du lit dans la maille ;
- rugosité dans la maille.

Les paramètres géométriques (longueur, largeur, cote du fond) ont été fournis par l'APRONA pour la modélisation de 1998. Ils ont été repris et adaptés à la nouvelle taille des mailles.

Pour la cote de la ligne d'eau, on disposait des 3 situations de ME, HE et BE du modèle précédent. On a repris ici les valeurs de la situation de ME de 1986, faute de données pour la situation de juin 2002. On verra au chapitre traitant du calage que cette imprécision n'aura pas d'impact important puisqu'on a effectué le calage en régime transitoire.

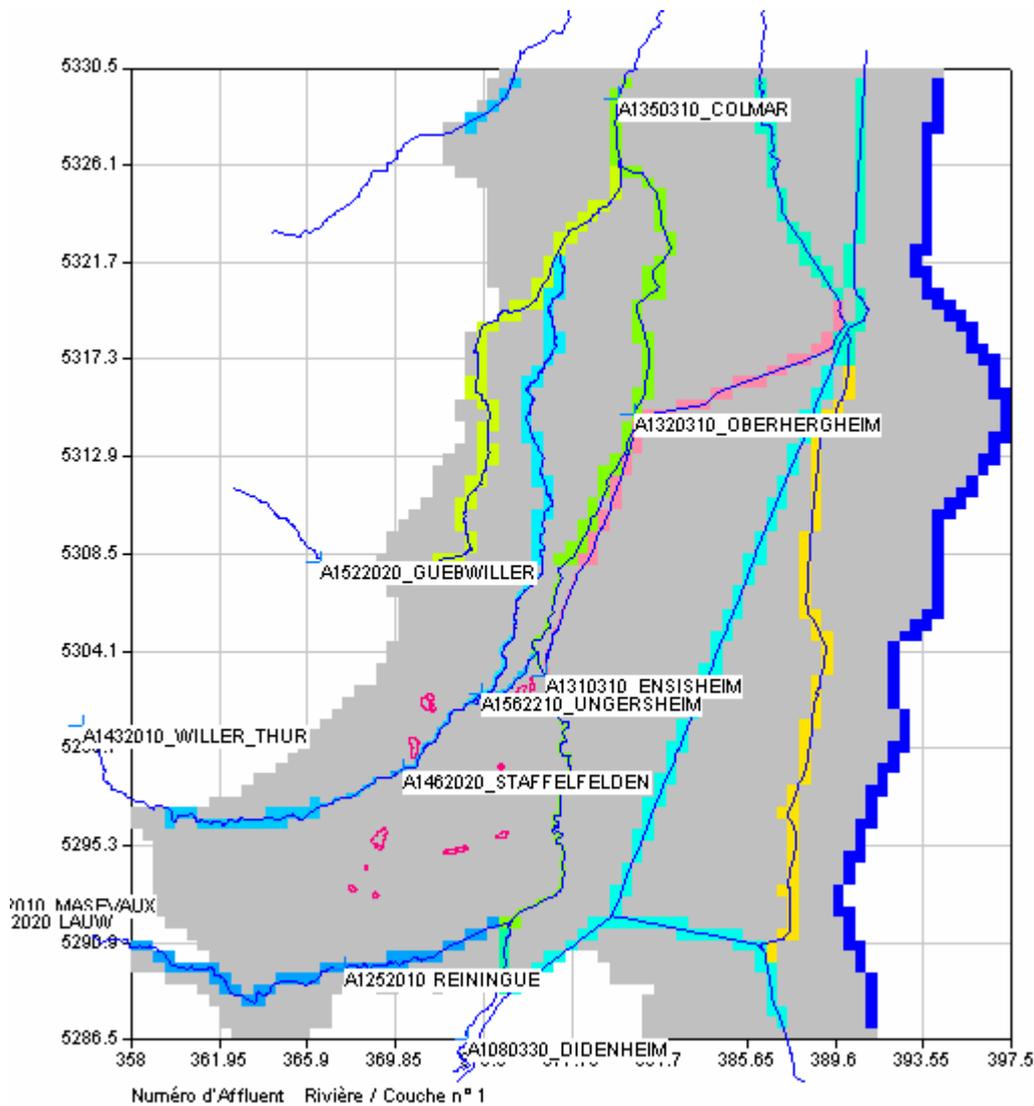


Figure 2 – Représentation discrétisée du réseau de rivières et canaux avec stations de jaugeage prises en compte

Les 3 derniers paramètres (épaisseur et perméabilité de colmatage du lit, rugosité) doivent être ajustés au cours du processus de calage.

Enfin il est nécessaire de disposer des débits des cours d'eau aux entrées dans le modèle ainsi que des éventuels prélèvements (par exemple défluences comme celle de la Vieille-Thur sur la Thur).

A l'époque où les données ont été collectées, les paramètres ci-dessus ont pu être définis avec une bonne précision pour le Rhin et les rivières de l'Ouest, y compris pour les débits aux stations de jaugeage qui sauf pour le Rhin sont suivies par la DIREN.

Par contre, en ce qui concerne les canaux, les données ci-dessus ne sont pas connues pour l'ensemble du réseau : de nombreux tronçons répertoriés sur divers documents n'ont pas pu être pris en compte (Muhlbach, Thierbach, les dérivations du canal de la Hardt telles que Munchhouse etc). Par ailleurs, les données aux stations de mesure suivies par la DDAF ne semblent pas aussi facilement accessibles que celles des stations suivies par la DIREN.

Pour la modélisation, on a donc disposé de données avec des degrés de précision différents :

- pour le Rhin et les rivières de l'Ouest : bonne définition de la géométrie et des débits d'entrée au pas de temps mensuel ;
- pour les canaux : définition moins précise, omission de certains tronçons, méconnaissance des fluctuations aux points d'entrée dans la plupart des cas : des valeurs moyennes ont été retenues.

Etant donné que à l'échelle régionale, la nappe est bien évidemment plus fortement contrainte par la condition à la limite liée au Rhin que par le fonctionnement des canaux, les omissions et imprécisions sur les paramètres des canaux ne peuvent pas influencer les écoulements suffisamment pour que cela modifie le comportement dans la partie du modèle qui nous intéresse dans le cadre de cette étude, celle des langues salées.

Cependant, suite à la demande présentée lors de la réunion du Comité de Pilotage du 27 avril 2005, les informations acquises sur la mise en eau périodique du canal de la Hardt ont été intégrées dans la modélisation.

b) Données hydrologiques

Pour l'étude de 1998, les données suivantes avaient été acquises :

- des historiques de débit sur 20 ans environ depuis 1975 sur 9 stations de jaugeage obtenues par interrogation de la banque HYDRO (fig. 2) ; sur les 9 stations, 5 servent à caractériser les débits d'entrée des rivières dans le modèle, il s'agit de Didenheim sur l'III, Masevaux sur la Doller, Willer sur la Thur, Ungersheim sur la Vieille-Thur (déflue de la Thur) et Guebwiller sur la Lauch ; les 4 autres sont utilisées comme points de contrôle du calage, il s'agit de Staffelfelden sur la Thur, Ensisheim, Oberhergheim et Colmar sur l'III ;
- les débits moyens mensuels du Rhin de janvier 1975 à mars 1998 à la station de Kembs (entrée du Rhin dans le modèle) et des informations sur les canaux fournis par le Service de la Navigation de Strasbourg et par la DDAF du Haut-Rhin.

Pour la présente étude, il a fallu acquérir les données complémentaires en tous ces points, au pas de temps mensuel, jusqu'en 2004 puisque le Comité de Pilotage a demandé, lors de sa réunion du 27 avril 2005 que le calage soit réalisé jusqu'à cette date. Pour les points de contrôle, on a pris en compte une station supplémentaire : Reiningue sur la Doller. Le tableau 1 résume les caractéristiques des séries recueillies.

Points d'entrée dans le modèle		
Rivière	Station	Période
Ill	Didenheim	01/1978 à 05/2005
Doller	Masevaux	01/1978 à 07/1999
	Lauw	08/1999 à 04/2005
Thur	Willer/Thur	01/1978 à 05/2005
Lauch	Guebwiller	01/1978 à 05/2005
Vieille-Thur	Ungersheim	01/1978 à 12/2000
Rhin	Kembs	01/1978 à 12/2003
Points de contrôle du calage		
Rivière	Station	Période
Ill	Ensisheim	01/1978 à 12/2003
	Oberhergheim	01/1978 à 09/2000
	Colmar	01/1978 à 12/2003
Thur	Staffelfelden	01/1978 à 04/2001
Doller	Reiningue	01/1978 à 12/2003

Tableau 2 – Données hydrologiques disponibles

On présente en annexe 1 les données brutes de chacune de ces séries obtenues par interrogation de la banque HYDRO (sauf pour le Rhin dont les données ont été obtenues du Service de la Navigation de Strasbourg sous forme de document papier seulement).

Les graphiques en annexe et le tableau 2 montrent que la période de recueil ne va pas jusqu'en fin 2004 pour certaines séries, soit parce que les données n'étaient pas présentes dans la banque HYDRO au moment du recueil (Ungersheim, Oberhergheim, Staffelfelden), soit parce qu'on n'a pas pu les obtenir à temps (année 2004 pour les débits du Rhin à Kembs).

Pour le traitement de ces données, il faut distinguer deux cas :

- **points d'entrée dans le modèle** : les valeurs mensuelles doivent être disponibles pour toute la période de calage ; lorsque des valeurs sont absentes en petit nombre, il faut les interpoler en se basant sur l'examen des chroniques aval sur la même rivière et en testant les corrélations entre les séries, par exemple les valeurs de l'Ill à Didenheim sont comparées à celles de l'Ill à Ensisheim (les graphiques en annexe 1 montrent que les 2 séries sont fortement corrélées). Un problème s'est posé pour la station d'Ungersheim qui n'est plus suivie à partir de janvier 2001 ; comme les débits mesurés sont faibles et en décroissance régulière et que, de plus, cette station est à l'aval du Bassin Potassique qui est la zone sensible pour notre propos, on a considéré qu'on pouvait répéter les valeurs de l'année 2000 jusqu'à fin 2004 ;

on a également répété les valeurs de 2003 pour estimer les débits 2004 manquants du Rhin à Kembs ;

- **points de contrôle du calage** : dans ce cas, il n'est pas nécessaire de compléter les séries ; on se contente de caler sur les points observés.

Au cours de sa réunion du 27 avril 2005, le Comité de Pilotage a demandé la prise en compte d'éléments complémentaires qui avaient été omis dans les premiers calculs faute d'information :

- la réalimentation de l'III par le Rhin (environ 4 m³/s prélevés sur le canal de Huningue pour soutenir l'étiage de l'III depuis les à secs des années 90) ;
- les fluctuations saisonnières de l'alimentation du canal de la Hardt qui n'est mis en eau qu'en été et pour lequel une alimentation moyenne en continu avait été considérée, comme pour les autres canaux pris en compte dans le modèle (cf § 2.4.2.a ci-dessus).

L'historique des débits d'alimentation du canal de la Hardt a pu être collecté auprès de la DDAF. Par contre le détail de la réalimentation de l'III depuis 1997 n'a pu être totalement obtenu. Le tableau 3 de synthèse ci-après a été construit d'après les informations obtenues et validé par la DIREN, la DDAF et le Conseil Général.

Les recherches menées ont conduit à considérer le schéma d'alimentation décrit à la figure 3 pour l'III et pour le canal de la Hardt. On considère que le canal est alimenté essentiellement par 2 prises d'eau : l'une sur le canal de Huningue et l'autre sur le Grand Canal à Ottmarsheim.

Auparavant, dans les calculs, on n'avait considéré que la prise sur le canal de Huningue avec une alimentation moyenne uniforme de 13 m³/s résultant du calage du modèle précédent, valeur qui apparaît cohérente avec les nouvelles données. Ces nouvelles informations sont prises en compte dans la suite des calculs et du calage.

Débits de soutien d'étiage de l'III (en m3/s)												
An/mois	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
1997	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>0.0</i>	<i>3.0</i>	<i>3.0</i>	<i>3.0</i>	<i>3.0</i>	<i>3.0</i>	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>
1998	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>	<i>2.0</i>	1.7	1.8	1.7	1.8	1.9	1.7	1.3	0.1
1999	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>	1.2	1.1	0.8	0.5	0.4	0.3	1.0	1.1	2.0	2.1
2000	0.9	0.5	1.1	1.1	1.0	1.2	1.5	1.4	1.1	0.6	1.4	2.0
2001	1.8	1.3	1.6	1.9	2.2	3.0	3.4	<i>3.0</i>	<i>2.0</i>	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>
2002	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>	<i>2.0</i>	<i>3.0</i>	<i>3.0</i>	<i>3.0</i>	<i>3.0</i>	<i>2.0</i>	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>
2003	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>	<i>3.0</i>	<i>3.0</i>	<i>3.0</i>	<i>3.0</i>	<i>3.0</i>	<i>3.0</i>	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>
2004	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>	<i>3.0</i>	<i>3.0</i>	<i>5.5</i>	<i>5.5</i>	<i>5.5</i>	<i>5.5</i>	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>
2005	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>	<i>0.5</i>	<i>3.0</i>	<i>3.0</i>	<i>5.5</i>						

Tableau 3 – Soutien d'étiage de l'III (en noir, débit mesuré ; en italique rouge, débit estimé)

c) Caractéristiques des drains

Les drains qui ne peuvent alimenter l'aquifère sont définis plus simplement que les rivières et canaux, à l'aide des paramètres suivants, dans chaque maille où ils sont présents :

- longueur dans la maille ;
- cote du fond dans la maille ;
- perméabilité d'échange avec la nappe dans la maille.

Le dernier paramètre doit être calé.

On disposait du fichier des drains fournis antérieurement par l'APRONA ; il a été complété par les données des MDPA. Les drains souterrains de Wittelsheim et Richwiller situés dans la zone d'affaissements miniers du Bassin Potassique et qui n'avaient pas été pris en compte dans les modélisations précédentes (fig. 4 et 5) ont fait l'objet d'un traitement particulier :

- le drain de Wittelsheim a pu être digitalisé assez précisément d'après les documents d'exécution puis ses altitudes ont été corrigées d'après la topographie actuelle, ce qui a permis de constater qu'il était bien conçu puisqu'il coulait toujours dans le bon sens malgré les affaissements différentiels ;
- les données détaillées sur le drain de Richwiller n'ont pu être retrouvées ; cependant, on l'a individualisé au mieux et au même titre que le drain de Wittelsheim en lui attribuant une profondeur maximale de 3 mètres.

L'ensemble du réseau des drains est représenté à la figure 4. Pour leur prise en compte dans le modèle, on a donc distingué 2 catégories :

- les 2 drains de Wittelsheim et Richwiller ainsi que à partir de 1999 le drain qui entoure le terroir Joseph Else Est (un fossé de près de 6 mètres de profondeur) dont la perméabilité a fait l'objet d'un calage personnalisé ;
- le reste du réseau de drains, constitué d'un chevelu complexe, pour lequel on a calé des paramètres uniformes moyens.

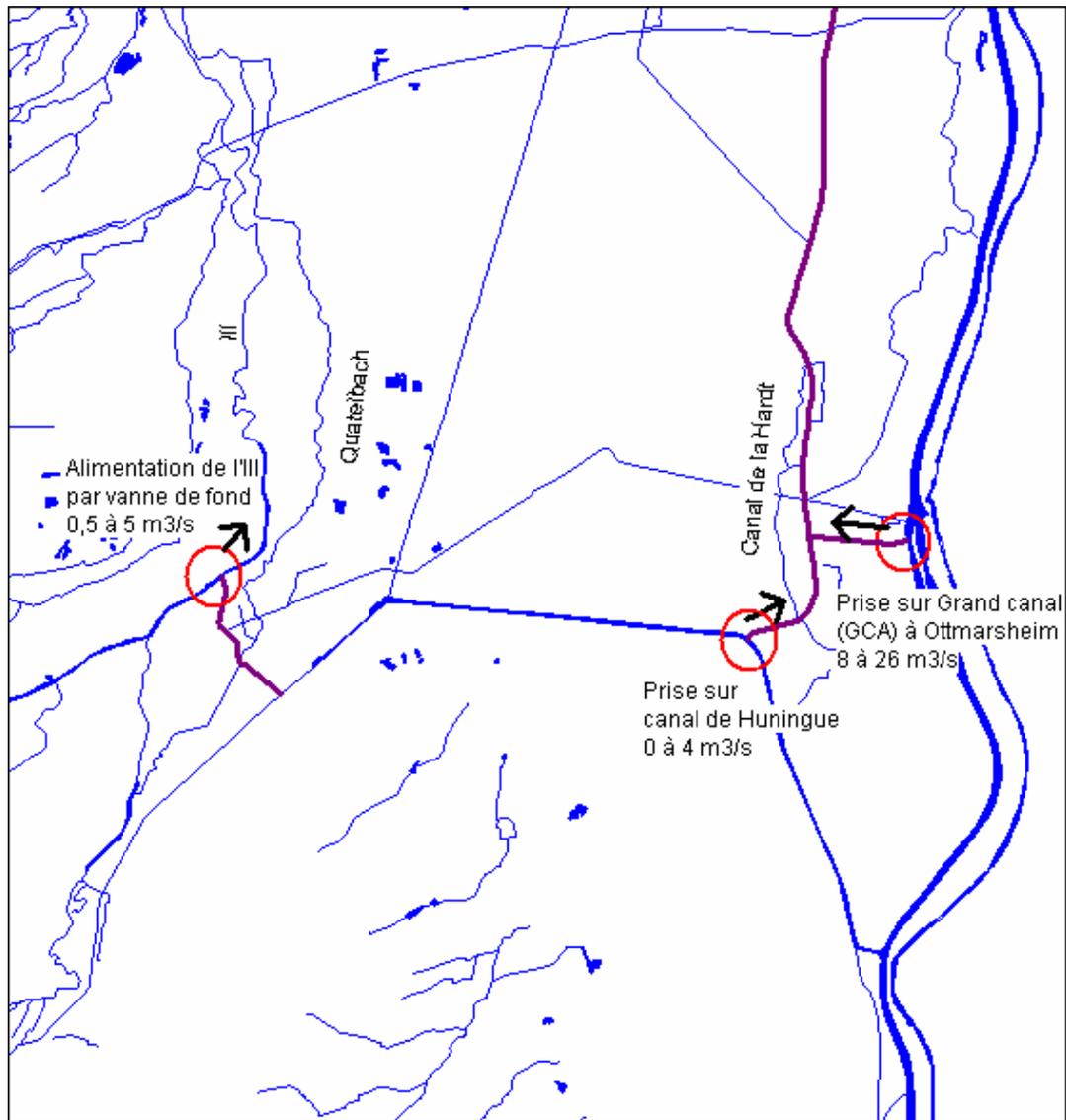


Figure 3 – Points de réalimentation de l'Ill et du canal de la Hardt

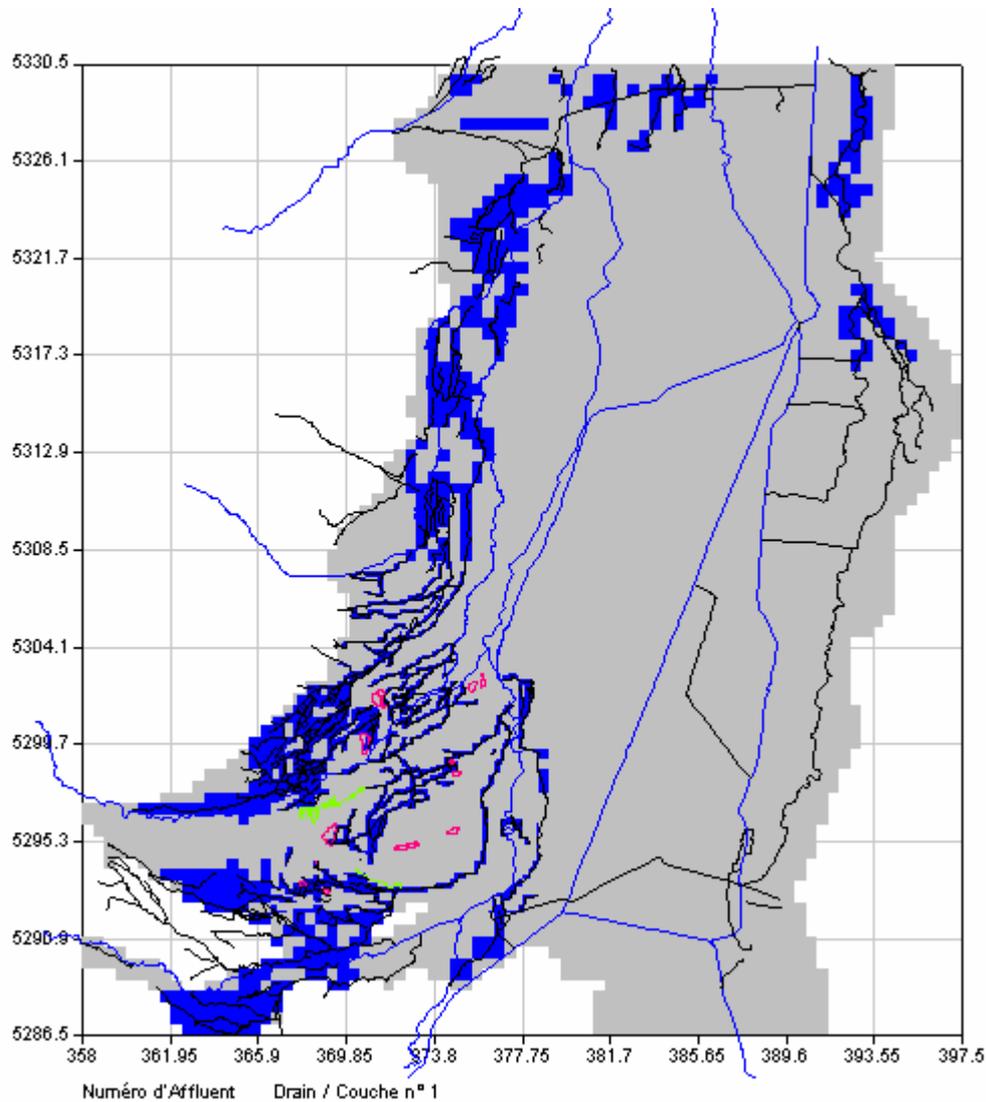


Figure 4 – Réseau de drains pris en compte dans le modèle

2.4.3. Données hydro-climatiques

En dehors des apports par le réseau hydrographique et les entrées aux limites amont, le système aquifère multicouche est alimenté par la recharge provenant des précipitations. Pour l'étude de 1998, on avait obtenu les données suivantes :

- une carte des hauteurs de précipitations annuelles du bassin Rhin-Meuse (AERM, 1995) ; à partir de cette carte, on avait défini six zones de pluviométrie croissante du Nord-Est au Sud-Ouest du modèle comme indiqué au tableau 4 ;

- de longues séries (1960 à 1990 environ) de précipitations, de température et de durée d'insolation sur les stations de Burnhaupt, Mulhouse, Baldersheim et Meyenheim plus quelques informations synthétiques sur celle de Colmar-Inra ; les caractéristiques de ces séries sont résumées au tableau 5 (Noyer et al., 1998)

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

Tableau 4 – Pluviométrie moyenne par zone

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

Tableau 5 – Pluviométrie moyenne par station Météo

Le numéro de zone indiqué au tableau 5 correspond à la situation géographique des stations par rapport à la première définition des zones d'après la carte de l'AERM. On constate qu'il existe une bonne cohérence entre les tableaux 4 et 5 sauf pour la station

de Colmar-INRA où l'année moyenne sur 20 ans est du niveau de la zone 2 plutôt que de la zone 1.

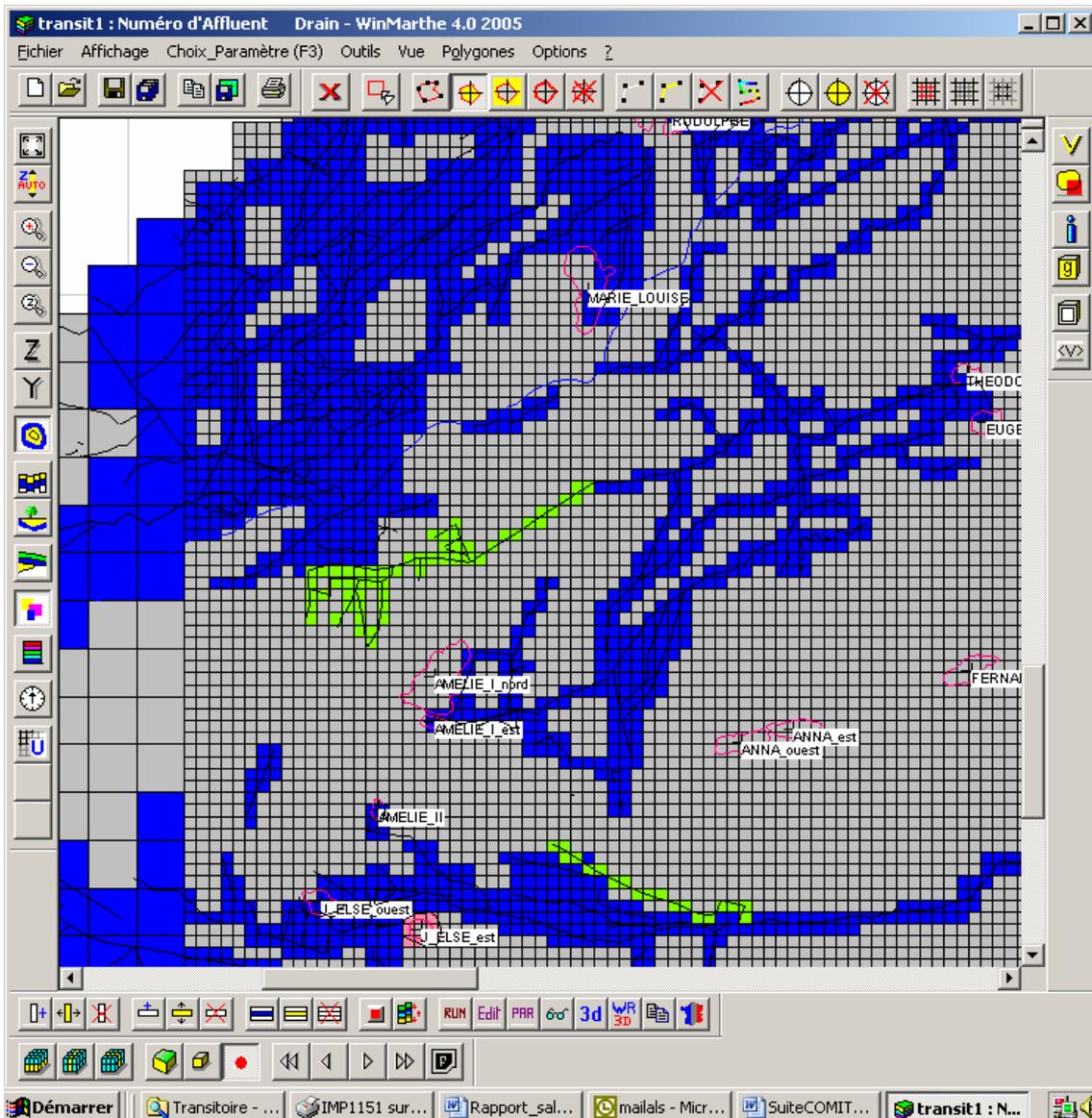


Figure 5 – Zoom sur les drains individualisés : Wittelsheim, Richwiller et Joseph Else Est

Pour la présente étude, on a donc réduit le nombre de zones à 5 en fusionnant les zones 1 et 2 ; ce choix est justifié par les constatations précédentes sur la station de Colmar. Il permet de limiter le volume de nouvelles données à acquérir dans une

région située à l'aval du modèle et donc beaucoup moins sensible que la partie amont en ce qui concerne le calcul de la recharge.

Les nouvelles zones (qui ont été ajustées au cours du calage) sont représentées sur la figure 6.

Pour la présente étude, il a donc fallu acquérir auprès de Météo-France des séries de données complémentaires jusqu'en 2004, sur les 4 stations retenues pour le calcul de la recharge soit Meyenheim, Baldersheim, Mulhouse et Burnhaupt.

- **Données de précipitations**

Les séries doivent être continues sur toute la période de simulation. Les précipitations mensuelles ont pu être obtenues auprès de la climathèque de Météo-France jusqu'en décembre 2004 aux stations de Meyenheim, Mulhouse et Burnhaupt (ou bien relayées par une station voisine comme Burnhaupt relayée par Gildwiller à partir de 1997).

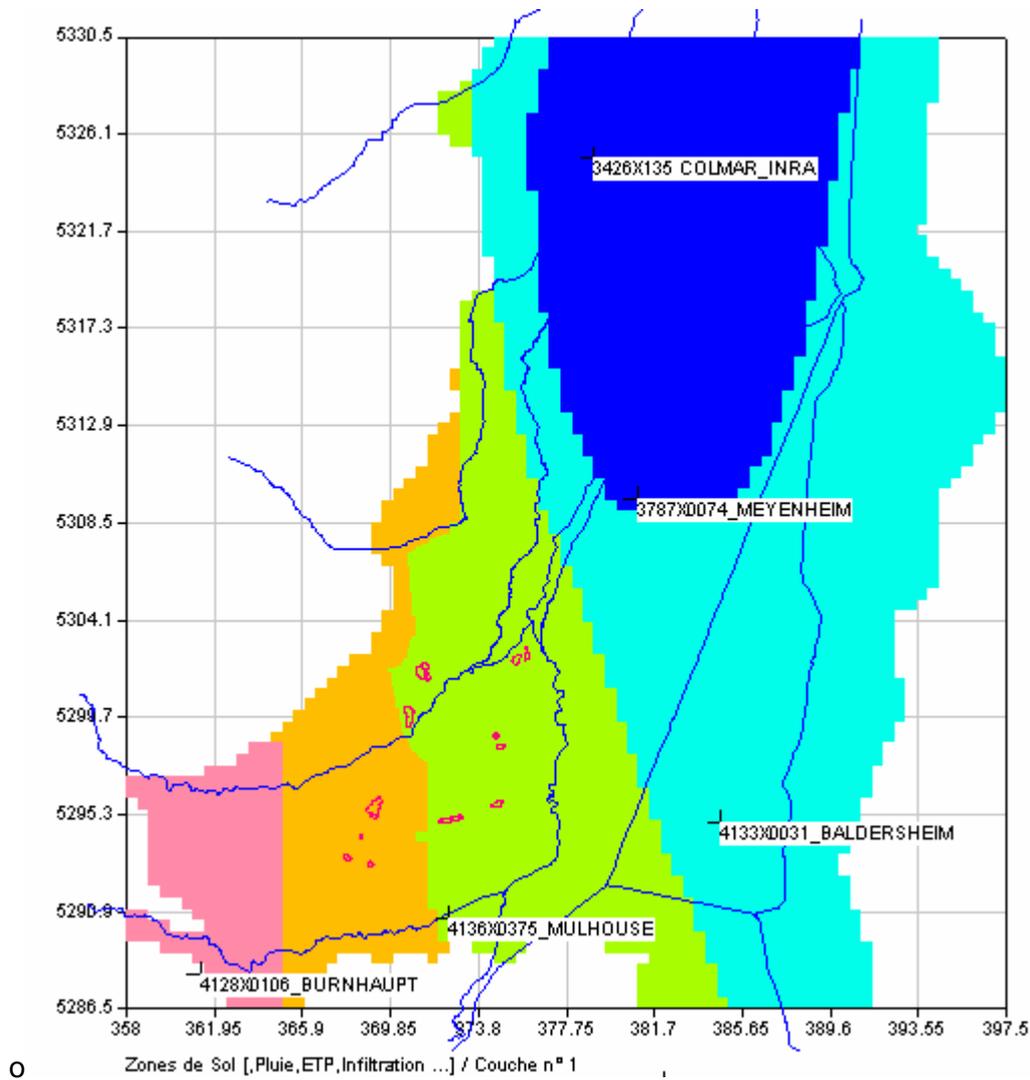
Par contre les données Météo-France de la station de Baldersheim présentent des discontinuités à partir de 1999 et la station n'est plus du tout suivie à partir de mars 2001. Les stations voisines les plus proches étant Mulhouse et Meyenheim, on a analysé à l'aide du logiciel SHALIMAR du BRGM les corrélations respectives entre les 3 séries et interpolé les valeurs manquantes à partir de la série la mieux corrélée à celle de Baldersheim soit Mulhouse.

- **Données pour le calcul de l'ETP**

L'évapotranspiration est une variable plus difficile à appréhender que la pluie, laquelle est mesurée directement et précisément. En fait, on ne peut en général estimer que l'évapotranspiration potentielle (ETP) à partir des données climatiques et non pas l'évapotranspiration réelle (ETR). De plus, plusieurs formules de calcul plus ou moins précises coexistent (Turc, Penman, etc..). L'imprécision sur cette variable doit en fait être compensée par le calage de l'ensemble des paramètres de recharge (cf chapitre 4).

Dans cette étude, on a choisi de calculer 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 travaux antérieurs (Noyer et al., 1998) ayant montré que les valeurs d'ETP varient très peu sur la zone d'étude, on a considéré que l'on pouvait utiliser une série unique pour le domaine d'étude, calculée à partir des paramètres mesurés à la station de Meyenheim.



■	Zones 1,2
■	Zone 3
■	Zone 4
■	Zone 5
■	Zone 6

Figure 6 – Zones hydro-climatiques et stations météo

2.4.4. Prélèvements

Pour l'étude antérieure de 1998, les prélèvements avaient été collectés de 1975 à 1997 sous la forme de cumuls annuels ($1000 \text{ m}^3 / \text{an}$) en chaque ouvrage ; ils comportent les AEP, AEI et les débits aux puits de fixation/dépollution du Bassin Potassique. Les données des ouvrages gérés par les MDPA ont été fournis par les MDPA, les données des ouvrages AEP par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, avec des compléments d'information demandés aux gestionnaires de champs captants comme EBE.

A l'occasion de la présente étude, les valeurs annuelles de prélèvements par ouvrage et par an ont été vérifiées et complétées sous la forme de 2 fichiers EXCEL contenant l'un les prélèvements des MDPA, de 1975 à 2002, suivis d'une mise à jour jusqu'en 2004 et l'autre tous les autres prélèvements jusqu'en 2001 sauf ceux destinés à l'irrigation, mal connus et donc négligés.

Le tableau 6 donne les valeurs des prélèvements des MDPA entre 1991 et 2004 ; la précision des données est remarquable pour une étude de ce genre.

On a compensé l'absence des données hors valeurs MDPA à partir de 2002 en répétant les valeurs de 2001.

Suite à la redéfinition de la géométrie du modèle, ces prélèvements ont ensuite été répartis dans chaque couche du modèle à partir de la position des zones crépinées de chaque ouvrage, extraite de la Banque des données du sous-sol.

Le préprocesseur WinMarthe permet d'importer au format d'entrée du logiciel MARTHE les valeurs ainsi obtenues et de les sommer par maille et par couche. On obtient ainsi les fichiers annuels de prélèvements lisibles par MARTHE. Ces valeurs 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.

Pour les calculs avec MARTHE, les valeurs de prélèvements sont transformées en m^3 par s, unité de travail choisie pour assurer plus facilement la cohérence avec les débits des rivières.

2.5. DONNEES POUR LE TRANSPORT DE SALURE

Le BRGM grâce à son Service Régional Alsace assure le contrôle et le suivi de la contamination de la nappe par la salure et édite à ce titre des rapports annuels. Pour ces rapports, il établit les cartes de situation annuelles de la salure à partir des relevés aux différents points de mesure et dispose donc d'une partie des données nécessaires à la modélisation du transport, soit essentiellement les valeurs de concentration en chlorures en différents points de la nappe et du réseau hydrographique.

Les autres données nécessaires à la modélisation concernent les terrils (superficie, historique des traitements et des infiltrations, évolution programmée) et les puits de

fixation/dépollution (concentrations et débits, évolution) ; ces données sont fournies par les MDPAs.

Indice	Nom_MDPA	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
04131X0110	Berrwiller	69	65	57	52	52	54	48	62	58	39	26	9	0	0
04131X0127	Berrwiller	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	28	10	0	0
04131X0137	Bollwiller	130	35	116	0	0	36	273	300	335	252	285	295	17	259
04131X0138	Bollwiller	130	35	116	0	0	380	389	353	272	307	292	346	333	322
04131X0139	Bollwiller	130	35	116	0	0	500	438	500	535	422	284	282	222	317
04131X0140	Bollwiller	130	35	116	0	0	230	225	167	228	191	208	202	167	162
04131X0141	Captage Dynamitière	427	546	508	575	481	466	450	114	136	141	148	160	146	155
04131X0142	Captage Dynamitière	375	480	447	506	423	410	396	153	171	135	178	169	165	179
04131X0143	Captage Dynamitière	282	361	336	380	318	308	297	122	133	126	129	123	120	134
04131X0144	Captage Dynamitière	512	655	611	691	578	559	540	258	224	207	294	328	275	303
04131X0159	Wittelsheim gare	0	0	0	0	0	0	0	0	92	204	143	74	0	45
04131X0172	Wittelsheim gare	0	0	0	0	0	0	0	0	163	277	225	132	0	113
04131X0173	Puits terril VA+Wittels.gare	338	337	321	403	392	290	389	0	0	0	0	0	0	0
04131X0174	Puits terril VA+Wittels.gare	221	220	210	263	256	190	254	0	0	0	0	0	0	0
04131X0175	Puits terril VA+Wittels.gare	259	258	246	309	300	222	298	0	0	0	0	0	0	0
04131X0176	Puits terril VA+Wittels.gare	244	244	232	291	284	210	282	0	0	0	0	0	0	0
04131X0177	Puits terril VA+Wittels.gare	194	193	184	231	225	167	223	0	0	0	0	0	0	0
04131X0178	Puits terril VA+Wittels.gare	75	74	71	89	87	64	86	0	0	0	0	0	0	0
04131X0179	Puits terril VA+Wittels.gare	70	70	67	84	81	60	81	0	0	0	0	0	0	0
04131X0180	Langenzug	231	237	238	264	301	280	258	218	254	265	449	350	0	401
04131X0181	Langenzug	231	237	238	264	301	280	258	213	303	405	372	321	0	209
04131X0182	Langenzug	231	237	238	264	301	280	258	0	0	0	0	0	0	0
04131X0183	Langenzug	231	237	238	264	301	280	258	253	249	318	256	227	0	181
04131X0184	Langenzug	231	237	238	264	301	280	258	858	525	581	422	480	0	454
04131X0185	Langenzug	231	237	238	264	301	280	258	336	313	342	282	280	0	307
04131X0186	Langenzug AEP	228	298	302	307	328	316	305	433	429	390	636	729	0	574
04131X0187	Langenzug AEP	228	298	302	307	328	316	305	88	39	59	101	101	0	1
04131X0188	Langenzug AEP	228	298	302	307	328	316	305	106	85	75	84	56	0	0
04131X0189	Langenzug AEP	228	298	302	307	328	316	305	138	178	160	160	179	0	51
04131X0190	Langenzug AEP	228	298	302	307	328	316	305	284	377	362	300	376	0	392
04131X0191	Langenzug AEP	228	298	302	307	328	316	305	400	372	360	169	208	0	173
04131X0213	Puits terril VA+Wittels.gare	246	246	234	294	286	286	376	394	371	331	333	385	359	272
04131X0214	Puits terril VA+Wittels.gare	246	246	234	294	286	459	396	643	491	424	308	432	368	365
04131X0215	Puits terril VA+Wittels.gare	246	246	234	294	286	464	367	588	439	1249	1274	1235	1119	1086
04131X0216	Puits terril VA+Wittels.gare	246	246	234	294	286	432	511	667	864	951	1186	1211	1123	1032
04131X0228		333	167	96	335	330	121	132	138	233	168	174	201	0	0
04131X0240	GALLI	150	290	330	330	370	380	360	176	206	204	205	180	0	0
04131X0241	GALLI	150	285	327	327	374	385	364	191	189	212	190	218	0	0
04131X0246	Max	279	300	348	276	304	158	143	100	168	190	189	224	246	237
04131X0247	Max	279	300	348	276	304	248	181	191	225	295	293	355	279	308
04131X0251	Max	29	31	36	28	31	56	63	73	53	90	102	106	122	90
04131X0252	Max	29	31	36	28	31	46	54	81	40	64	66	81	77	57
04131X0253	Max	29	31	36	28	31	71	54	117	52	73	75	82	99	86
04131X0254	Max	29	31	36	28	31	69	80	91	63	57	55	6	0	0
04131X0255	Max	29	31	36	28	31	68	115	83	56	81	114	114	0	0
04131X0256	Max	29	31	36	28	31	78	77	143	50	84	74	12	0	0
04131X0257	Max	29	31	36	28	31	70	100	250	95	99	71	15	0	0

Tableau 6 – Prélèvements des ouvrages des MDPAs (1991-2004)
En milliers de m3 par an (source MDPAs)

Indice	Nom_MDPA	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
04131X0378	Langenzug AEP	351	447	446	519	448	466	491	460	502	481	510	393	0	424
04131X0389	puits fixation	839.1	688.4	640.5	609	621.2	617	638	533	512	528	490	590	534	592
04131X0409	puits fixation	0	0	0	0	0	144	284	267	356	313	336	349	314	352
04131X0416	puits fixation	0	0	0	0	34.82	80	53	46	50	147	73	94	89	82
04131X0418	Piézo 413-1-418 Amélie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	57	54
04131X0419	Piézo 413-1-419 Amélie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	70	54
04131X0443	puits fixation	446.7	491.9	525	581.6	572.3	503	510	462	575	502	496	484	458	457
04131X0444	puits fixation	514.7	603.7	652.3	579.6	550.3	592	468	451	472	505	507	503	491	530
04131X0462	Alex n°1	0	0	0	0	0	0	109	106	111	98	171	130	63	2
04131X0466	Alex n°2	0	0	0	0	0	0	86	120	112	86	114	132	143	4
04131X0509	Amélie n° 6	0	0	0	0	0	0	0	0	27	80	83	87	79	82
04131X0510	Amélie n° 7	0	0	0	0	0	0	0	0	47	112	97	117	129	133
04131X0511	Amélie n° 8	0	0	0	0	0	0	0	0	42	103	120	136	128	126
04131X0512	Marie-Louise n°1	0	0	0	0	0	0	0	0	55	118	125	129	121	127
04131X0513	Marie-Louise n°2	0	0	0	0	0	0	0	0	68	136	133	148	153	160
04131X0514	Marie-Louise n°3	0	0	0	0	0	0	0	0	45	117	126	135	117	127
04131X0559	Amélie n° 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	62	204
04131X0560	Amélie n° 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	78	229
04131X0561	Amélie n° 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	763
04132X0074	Ruelisheim	746.2	702.3	875.4	1628	842.3	832.3	0	742	802	763	595	702	1190	1334
04132X0075	Ruelisheim	0	0	0	0	784.9	633.6	0	590	636	626	577	590	848	963
04132X0115	Ensisheim A et B	1653	1183	838	1772	1299	982	2000	1800	1720	1705	2361	2549	1000	0
04132X0230	Ensisheim 1	1746	1535	1114	2303	1554	1565	1381	1095	1858	1430	1833	2606	2412	3009
04132X0231	Ensisheim 2	1083	1365	1734	2364	3169	1275	1310	1067	1821	625	1528	2550	2667	1960
04132X0232	Ensisheim 3	1770	932	1251	1082	1156	1115	1250	1045	1634	1749	1495	1694	2467	2661
04132X0233	Ensisheim 4	1721	1766	1663	1577	1700	1499	1455	1143	1900	1546	2097	2493	2750	2229
04132X0234	Ensisheim 5	2061	3068	2321	5222	1709	1535	2000	1500	2411	2634	2723	2192	1000	0
04132X0235	Ensisheim 6	1311	1848	1484	2465	2050	1542	2000	500	0	0	0	0	0	0
04132X0239	Ensisheim A et B	1653	1183	838	1772	1299	982	1136	1143	1096	0	1434	2131	2000	0
04132X0245	Ensisheim 7	614	1237	1293	1100	1493	1564	2000	2000	0	0	1310	0	0	0
04132X0291	puits fixation	1138	1181	1067	1597	1792	1876	1657	1992	1973	0	2287	2359	2167	2372
04132X0302	puits fixation	0	0	0	130.9	136.9	146.6	108	139	156	0	173	195	161	198
04132X0303	puits fixation	0	0	0	383.4	345.4	318.2	311	340	352	0	362	416	356	467
04132X0330	puits fixation	0	0	0	0	0	86.96	225	214	268	0	266	265	234	282
04132X0331	puits fixation	0	0	0	0	0	251.6	641	719	687	0	927	1023	804	620
04132X0383	Ensisheim Sud	0	0	0	0	0	0	0	0	0	113	1073	1061	1000	915
04132X0393	Ensisheim Sud	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	75	860	811	853
04132X0394	Puits Ungersheim 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34	212	204
04132X0395	Ensisheim Sud	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	134	350	216	275
04132X0397	Ensisheim Sud	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1117	1300	1385
04132X0398	Ensisheim Sud	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	338	348	353
04132X0399	Anna 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	159	674	654	670
04132X0419	Anna 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	134	500	553
04132X0424	Drain Théodore	0	0	0	0	0	0	0	0	418	400	526	468	286	0
04135X0212	VJ1 ZP 085	339	249	259	336	383	298	0	283	334	0	636	380	315	314
04135X0213	VJ2 ZP 083	707	693	564	711	632	403	0	333	421	0	401	423	413	416
04135X0240	Gravière Michel	665	313	22	284	87	107	43	0	0	0	0	0	0	0
04135X0404	Drain Joseph-Else Est	0	0	0	0	0	0	0	0	272	300	472	620	285	0

Tableau 6 (suite) – Prélèvements des ouvrages des MDPA (1991-2004)
En milliers de m3 par an (source MDPA)

2.5.1. Cartes de salure

Pour la simulation du transport, deux situations de salure ont été discrétisées, couche par couche, à partir des données observées. Il s'agit de la situation de 1991 choisie comme condition initiale pour le calage du transport et de la situation de 2004 destinée à la validation des résultats en fin de période de calage. Ces deux situations

permettent de disposer d'un plus grand nombre de points de mesure des chlorures grâce aux inventaires transfrontaliers de la nappe menés par la Région Alsace en 1991/1992 et 2003/2004.

Les 3 cartes de la situation de 1991 sont représentées aux figures 7 à 9 avec l'échelle de couleur choisie par le Comité de Pilotage à partir d'un compromis entre les représentations utilisées respectivement pour les inventaires transfrontaliers et les cartographies annuelles de la salure.

Les cartes de 2004 sont présentées au chapitre 4 avec les résultats du calage du transport. Il est important de noter ici que si les cartes de la première couche du modèle (alluvions récentes superficielles) sont relativement bien renseignées, celles des deux couches plus profondes sont nécessairement très interprétatives car on ne dispose que d'une faible densité de points de mesure.

2.5.2. Données de salure dans les rivières

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 mensuelles et annuelles de la concentration en chlorures. Les informations disponibles sont résumées au tableau 7. Elles ont été exploitées pour caractériser les variations annuelles de l'infiltration moyenne en chlorure de chaque tronçon de cours d'eau (repéré par le code « affluent » au tableau 7).

Station	3786X0093	3782X0098	4132X0258	4136X0404	4132X0251	3787X0089			4132X0257
Rivière	LAUCH	V. THUR aval	V. THUR amont	ILL amont	ILL sup.	ILL Ober.	ILL AVAL	DOLLER	THUR
Affluent	41	16	16	31	32	33	34	11	15
Années									
1990	15.7	110	83	27.9	25.2	69	69	12.6	51
1991	18	92	83	30	20	59	59	10	60
1992	18	127	83	30	20	49	49	10	62
1993	18	168	74	30	20	41	41	10	39
1994	18	92	81	30	20	37	37	10	42
1995	19.5	88	72.9	30.5	19.8	38	38	10	41
1996	19.8	121	93.8	32.3	24	42.6	43	10.2	90.2
1997	20.25	97	93.3	33.75	23.5	42.2		9.1	77.6
1998	36.75	86.5	79.7	32.5	22	47.6		11	85.2
1999	13.8	58.8		28.9	22.8	51.4		8.3	66.3
2000	14	57		28	16	38		7	55
2001	11	55		25	18	32		8	52
2002	14	73		24	15	29		8	58

Tableau 7 – Evolution des chlorures dans les rivières (en mg/L)

Infiltration NaCl en tonnes (source bilans annuels MDPA)

Dénomination	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
ALEX Terril ancien													
ALEX Terril mixte	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200	7200	4000	0	0	
ALEX bassin à boues													
RODOLPHE	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2400	2300	2400	2400	1600	200
ENSISHEIM Est	8500	8500	8500	8500	8500	5400	3600	600	600	600	0	0	
ENSISHEIM Nord	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	800	600	0	0
ENSISHEIM Ouest	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100	2500	2000	800	200	0	0
MARIE-LOUISE	20600	20600	20600	20600	20600	24700	22000	17800	16600	16000	16000	16000	15000
AMELIE Nord	13800	13800	13800	13800	13800	23200	21700	19800	14000	15000	14300	13500	10000
Amélie Est	5300	5300	5300	5300	5300	5300	5300	5300	5300	5300	5300	5300	3200
AMELIE II	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	1500	200	200	100	0	0
JOSEPH-ELSE Ouest	9500	9500	9500	9500	9500	9500	9500	9500	9500	9500	9500	9500	6500
JOSEPH-ELSE Est	5000	5000	5000	5000	5000	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100
FERNAND	10500	10500	10500	10500	10500	5000	5000	5000	5000	5000	5000	2000	1500
ANNA	7900	7900	7900	7900	7900	7900	7900	7900	7900	7900	7900	7900	7900
EUGENE	5600	5600	5600	5600	5600	5600	5600	5600	5600	5600	5600	5600	5600
THEODORE	6800	6800	6800	6800	6800	6800	6800	6800	6800	6800	3000	600	0
TOTAL	110000	110000	110000	110000	110000	113000	107000	96400	87500	83000	73000	65100	53000

Tableau 8 – Infiltrations sous les terrils en Tonnes de NaCl (source MDPA)

(en jaune : modifications des infiltrations suite à des travaux de réaménagement)

Dénomination	01/01/2004	01/01/2003	01/01/2002	01/01/2001	01/01/2000	01/01/1999	01/01/1998	01/01/1997	01/01/1996	01/01/1995
ALEX bassin à boues	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5
ALEX Terril ancien	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
ALEX Terril mixte	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8
AMELIE Est	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
AMELIE II	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
AMELIE Nord	34.5	34.5	34.5	34.5	34.5	34.5	34.5	34.5	34.5	34.5
ANNA	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7
ENSISHEIM bassin à boues	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
ENSISHEIM Est	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	7.1	7.1	7.1	7.1
ENSISHEIM Nord	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
ENSISHEIM Ouest	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
EUGENE	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9
FERNAND	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6
JOSEPH-ELSE Est	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
JOSEPH-ELSE Ouest	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
MARIE-LOUISE	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9
RODOLPHE	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3
THEODORE	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4
TOTAL	158.5	158.5	158.5	158.5	158.5	158.5	164.6	164.6	164.6	164.6

- (1) ENSISHEIM - bassin à boues : l'abandon de ce terril a été prononcé le 14.09.1994. De ce fait la surface totale ne comprend plus ce terril.
 (2) ENSISHEIM Est : terril dissous partiellement en 1998

Tableau 9 – Surface occupée par les terrils en hectares (d'après document MDPa)

2.5.3. Infiltrations sur les terrils

Les données d'infiltration sur les terrils pour la période de calage soit 1991-2004 ont été fournies par les MDPA (tableau 8) ainsi que la superficie de ces terrils (tableau 9). Les données d'infiltration des terrils sont estimées par les MDPA sur la base de l'étude dite Graillat (Graillat et Brunck, 1980) et ajustées au fur et à mesure des observations faites au cours des travaux sur les terrils et suivant l'évolution de leur surface d'emprise au cours de leur réaménagement. Les tableaux sont présentés annuellement à la Commission interservices de contrôle des rejets des MDPA qui les valide.

Les terrils étanchés sont supposés donner lieu à une infiltration nulle au bout de deux années, temps estimé pour que le ressuyage du terril soit achevé. Il est important de noter ici que **les infiltrations des terrils en cours de dissolution accélérée sont par convention les mêmes que si le terril restait à la pluie**, en raison de la reprise des eaux infiltrées par le relevage du fossé de ceinture et par les puits de fixation et de la difficulté d'estimer la part réellement infiltrée. Cette convention, nous le verrons, sera la cause de quelques difficultés dans la modélisation.

A l'aide de ces deux tableaux et en se référant à la stoechiométrie, les infiltrations par terril en tonnes de Na Cl par an sont transformées en kg de Cl⁻ par mois et par m²; ces valeurs sont lues directement par MARTHE à chaque pas de temps de calcul du modèle.

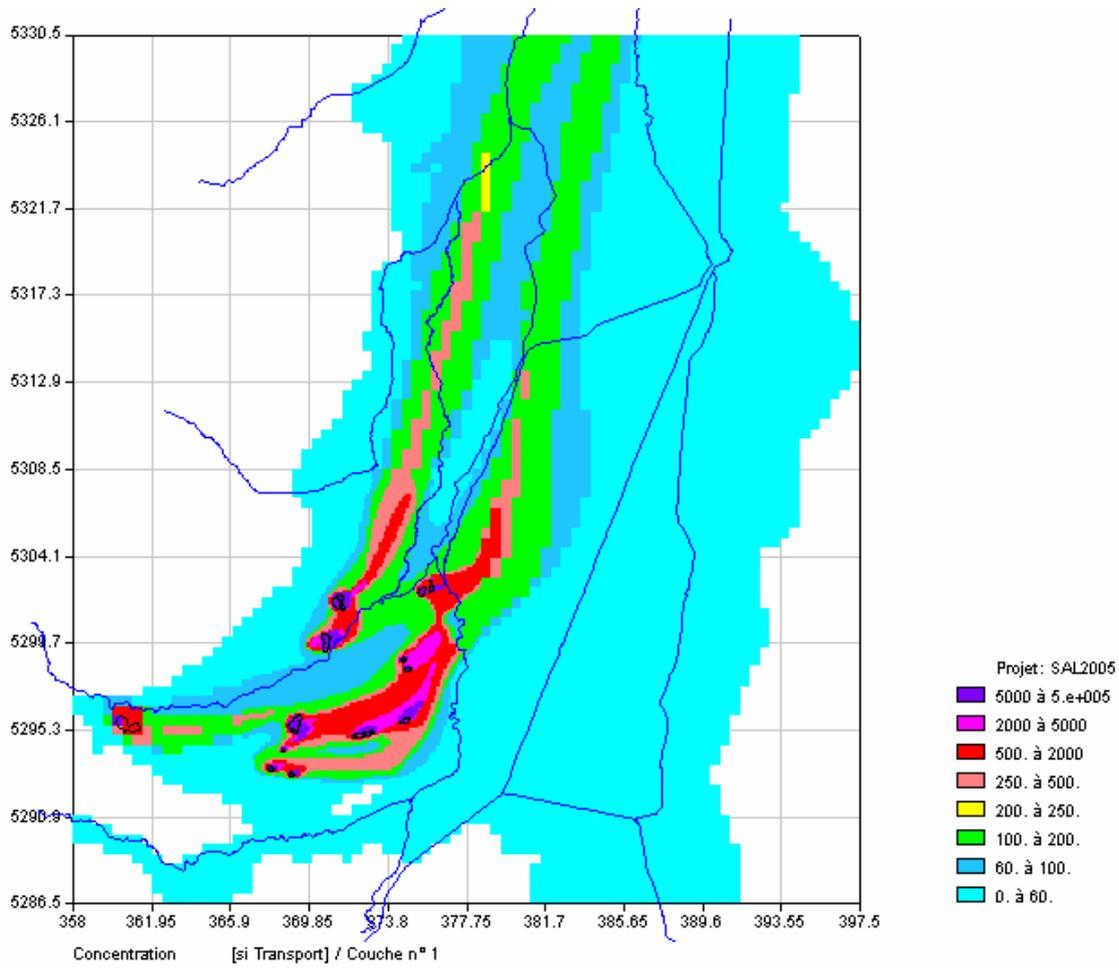


Figure 7 - Carte de concentration en chlorures en 1991 (mg/L) – couche 1

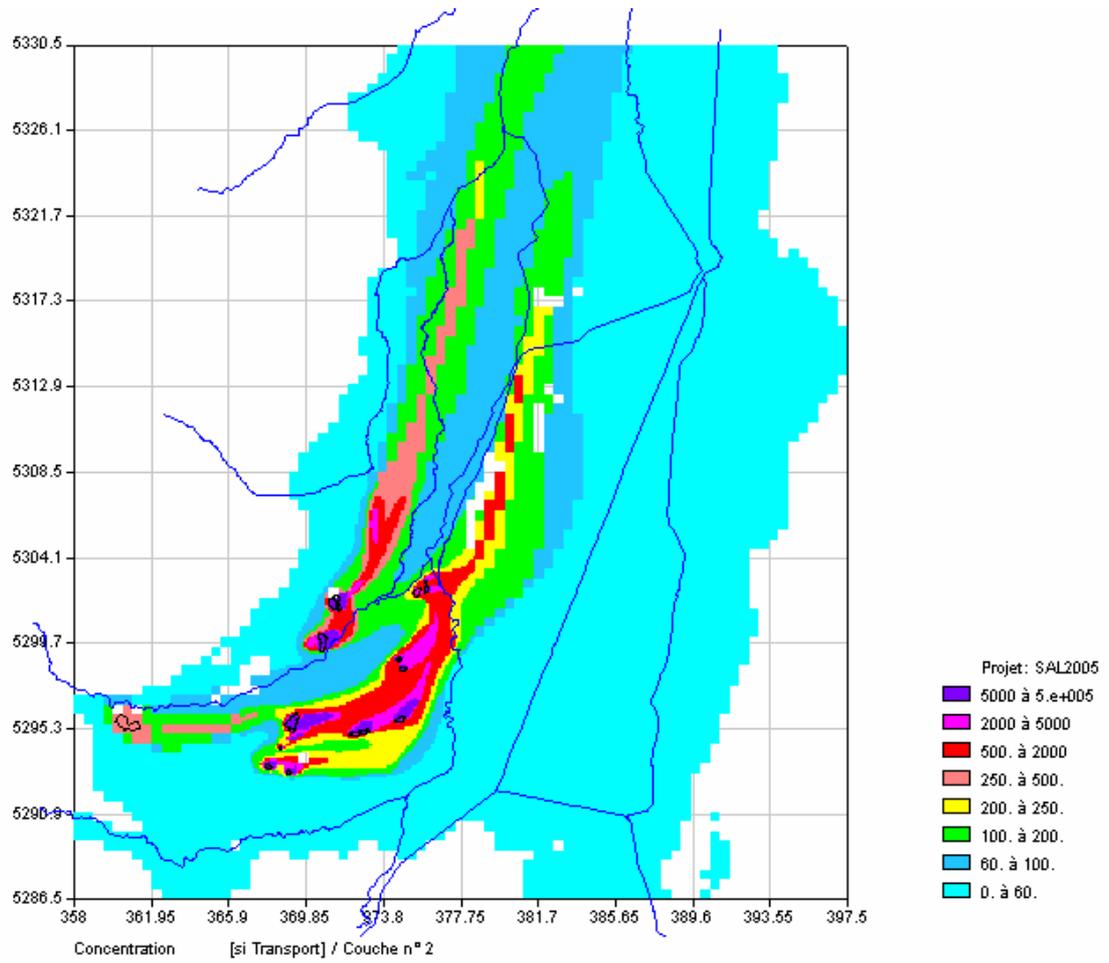


Figure 8 - Carte de concentration en chlorures en 1991(mg/L) – couche 2

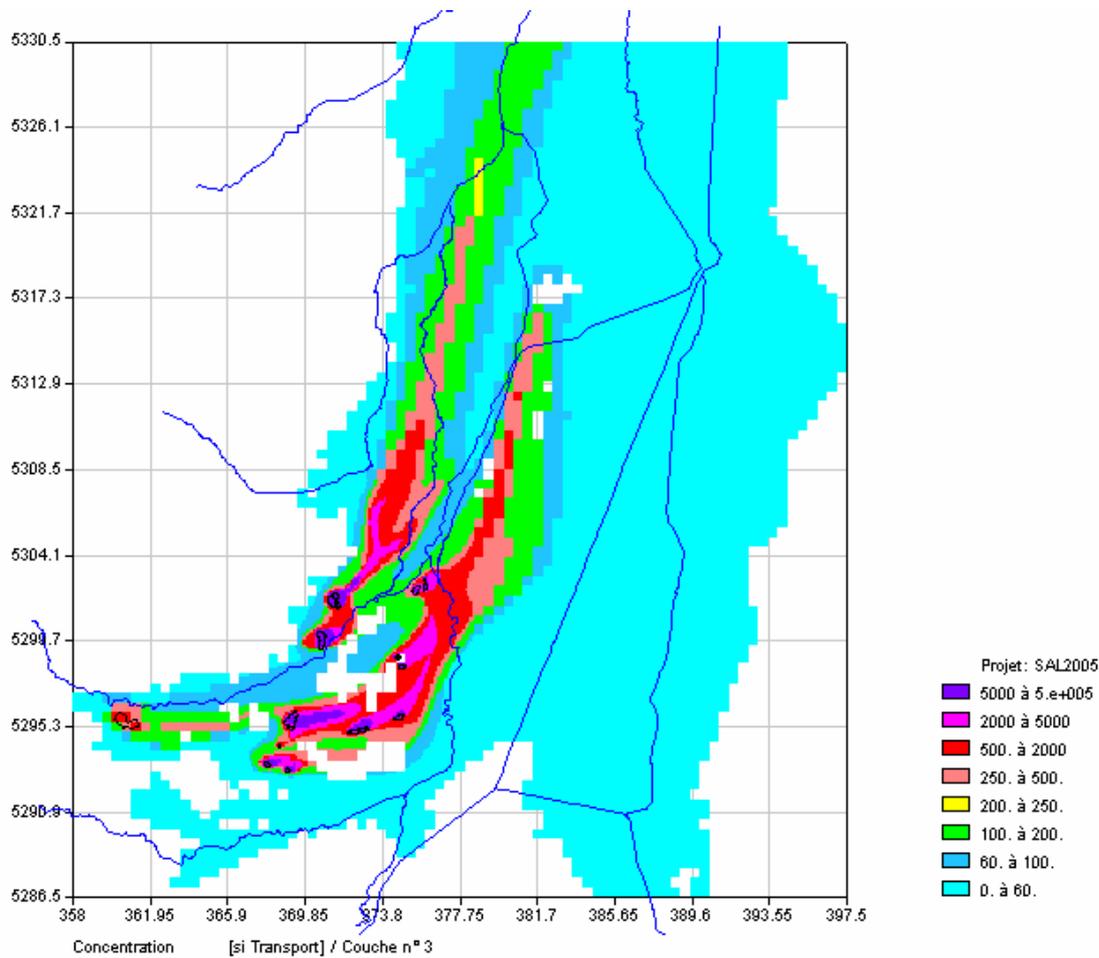


Figure 9 - Carte de concentration en chlorures en 1991 (mg/L) – couche 3

2.5.4. Evolution des teneurs en chlorures aux points de contrôle

Pour contrôler le calage du transport, on a rassemblé les historiques d'évolution de la salure disponibles au BRGM. Il s'agit :

- d'une part de 19 historiques sur des puits et des piézomètres comportant un ou plusieurs niveaux crépinés et répartis dans le Bassin potassique et les langues Est et Ouest. La localisation de ces piézomètres est présentée à la figure 10.
- d'autre part de 17 historiques sur des puits de fixation ou dépollution situés en aval des terrils.

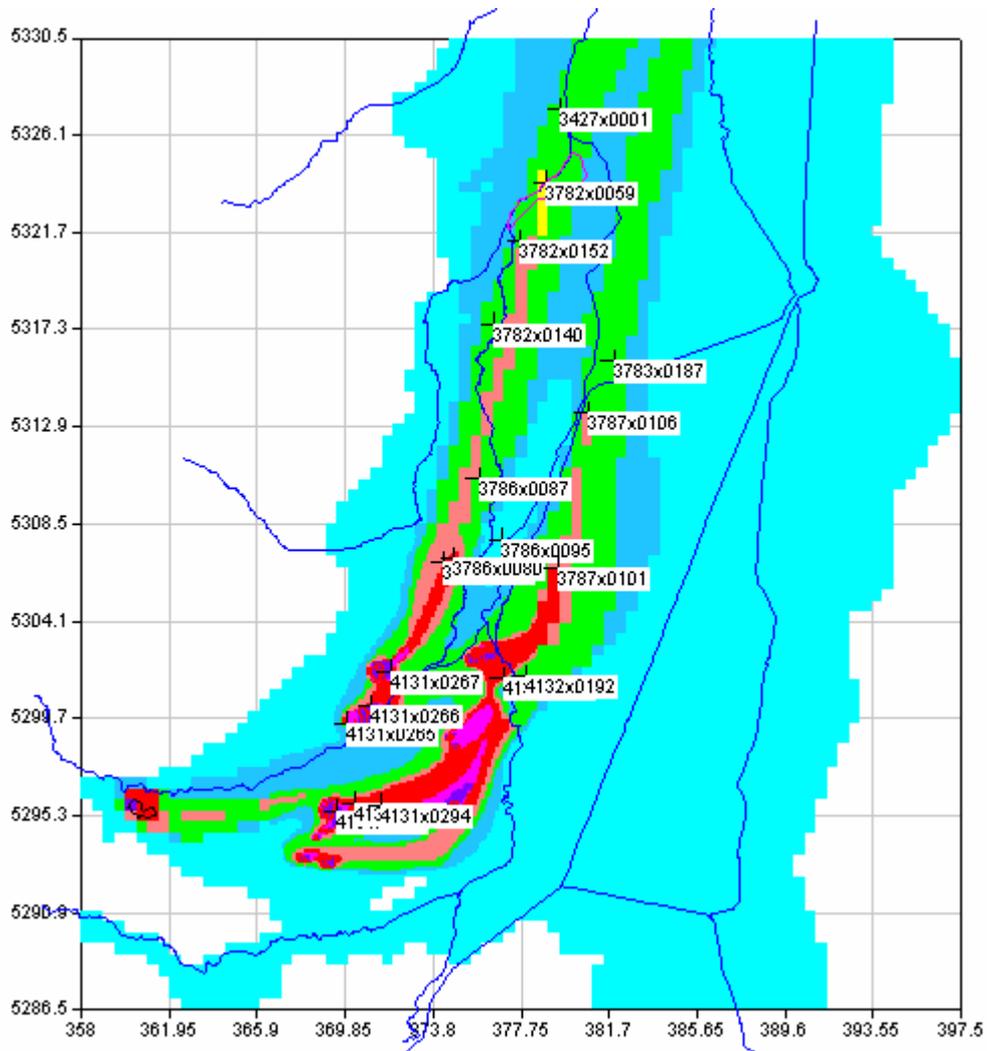


Figure 10 – Localisation des points de suivi de la salure

3. Construction du modèle hydrogéologique

3.1. MODELE CONCEPTUEL

3.1.1. Etat des connaissances

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, tandis que les affluents des Vosges et de la Forêt-Noire apportaient des matériaux érodés de ces massifs anciens.

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.

Le secteur d'étude est caractérisé par les cônes de déjection des rivières vosgiennes à l'Ouest, notamment l'immense cône de déjection des alluvions de la Thur qui s'ouvre en éventail jusqu'à Mulhouse où il est rejoint par les alluvions de la Doller (fig. 11). Le domaine des alluvions rhénanes à matériel alpin se situe à l'Est, on peut y distinguer la basse terrasse rhénane et l'ancien lit mineur du Rhin, inactif depuis la rectification de Tulla au 19^{ème} siècle. Les domaines vosgien et rhénan sont séparés par la plaine d'épandage de l'Ill couverte de limons (fig. 11).

La distinction entre les domaines d'alluvions vosgiennes et alpines est fondamentale pour l'hydrogéologie car les alluvions rhénanes d'origine alpine sont bien roulées et bien classées avec peu de fines, tandis que les alluvions vosgiennes qui ont subi un transport plus court sont moins bien roulées et moins "propres" (c'est-à-dire plus argileuses et silteuses).

Il existe une zone de mélange entre les deux domaines, où alluvions vosgiennes et rhénanes peuvent être interstratifiées mais surtout où des éléments vosgiens sont repris dans les dépôts rhénans. Cette zone est cependant relativement étroite, de l'ordre de 2 à 3 km de largeur, témoignant d'une stabilité dans le temps du régime d'apports respectifs du Rhin et de ses affluents.

En ce qui concerne les subdivisions à l'intérieur des alluvions, un modèle conceptuel multicouche avait été établi dans le cadre de la modélisation hydrodynamique réalisée par le BRGM en 1997 (Noyer *et al.* 1998). Il était basé sur les travaux transfrontaliers menés en collaboration avec les équipes du Service géologique du Bade-Wurtemberg.

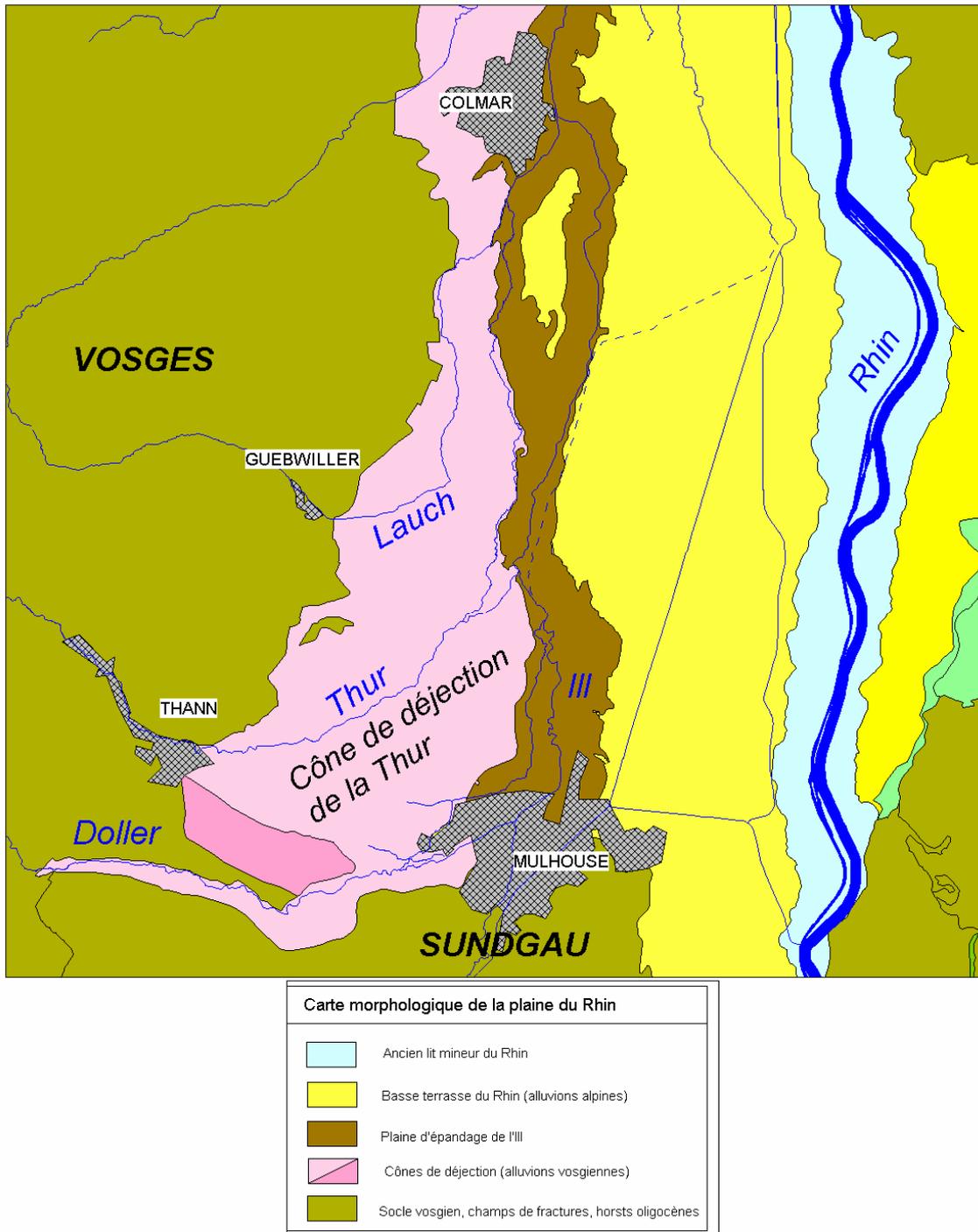


Figure 11 – Carte morphologique de la plaine rhénane

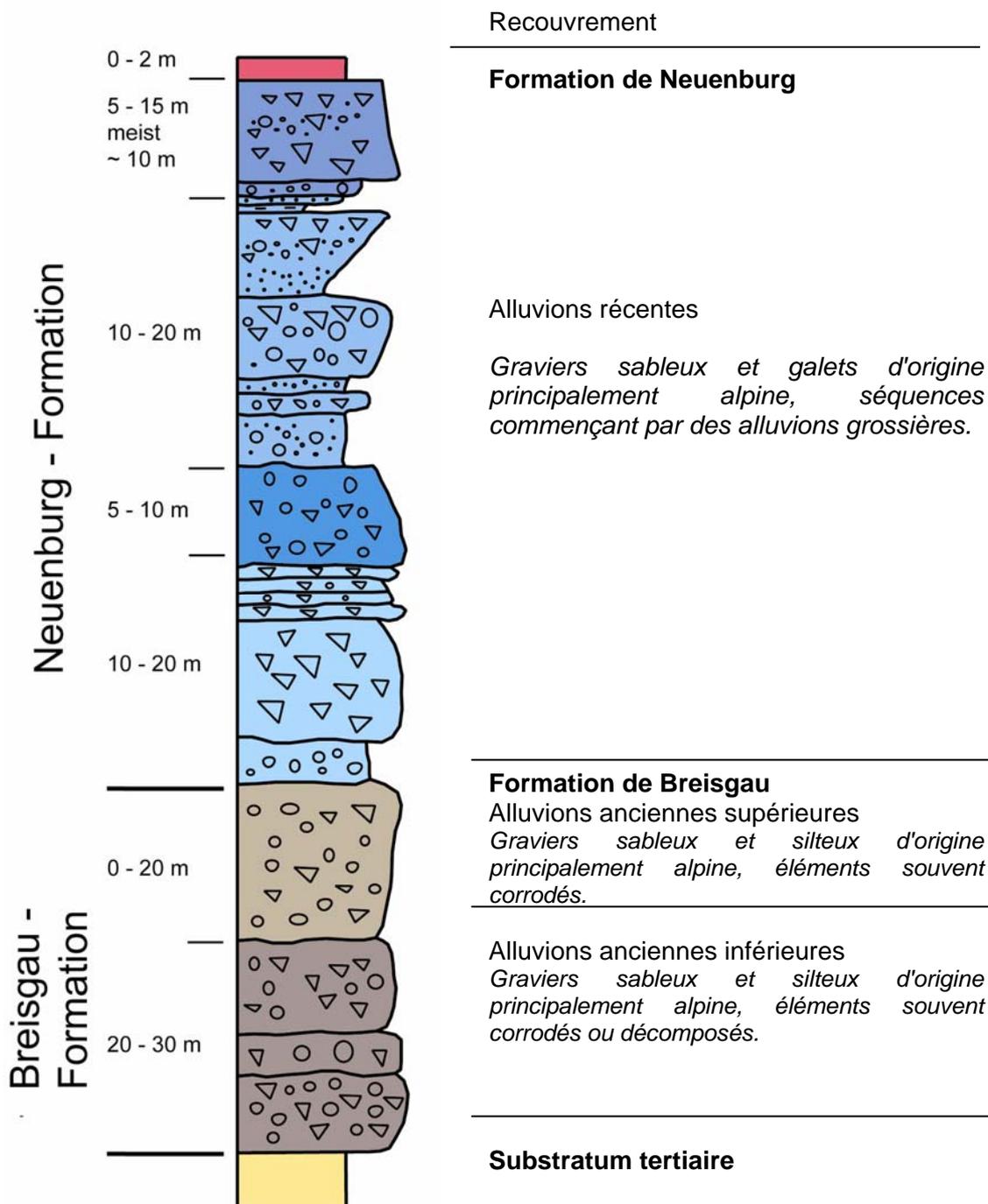


Figure 12 – Coupe-type des alluvions rhénanes (d'après LGRB)

3.1.2. Alluvions rhénanes

Le modèle conceptuel de 1998 définissait 3 niveaux d'alluvions dans les alluvions rhénanes ; il a été confirmé par les forages réalisés dans le cadre du projet INTERREG II de "Reconnaissance transfrontalière de l'aquifère profond dans la bande rhénane entre Fessenheim et Breisach" (Regierungspräsidium Freiburg, 2002). On distingue ainsi (cf. Fig. 12) dans les alluvions rhénanes :

- Couche 1 : Les alluvions récentes ou "formation de Neuenburg" qui sont peu altérées et très perméables ; elles comprennent des séquences distinctes d'alluvions plus grossières, et sont généralement plus grossières à la base. On a distingué lorsque c'était possible la partie supérieure T1 et la partie inférieure T2 ;
- Couche 2 : La séquence supérieure moyennement perméable des alluvions anciennes ou "formation de Breisgau" notée T3 ;
- Couche 3 : La séquence inférieure souvent peu perméable des alluvions anciennes ou "formation de Breisgau" notée T4.

Ce modèle conceptuel en 3 couches a été conservé dans la présente étude pour les alluvions rhénanes.

3.1.3. Alluvions vosgiennes

Le modèle conceptuel des alluvions vosgiennes a par contre évolué. On distinguait en effet dans les alluvions vosgiennes du Bassin potassique une séquence supérieure d'alluvions vosgiennes non altérées perméables surmontant une séquence plus ancienne, plus argilo-sableuse et à galets corrodés, parfois très peu perméable, avec une intercalation argileuse de 1 à 2 m de puissance séparant localement les deux séquences.

Or les forages réalisés depuis dans le bassin potassique à l'aval des terrils Amélie et Rodolphe notamment ont mis en évidence la présence d'une séquence basale d'alluvions vosgiennes de sables grossiers à graviers voire à blocs, relativement perméables, parfois isolées sous un niveau argileux qui avait été confondu avec le substratum. On pourra prendre pour référence le forage du puits de fixation Marie-Louise 2 (04131X0513), dont on peut synthétiser la coupe de la façon suivante (cf. fig. 13) :

- 0 à 1 m : Recouvrement ;
- 1 à 7 m : Alluvions vosgiennes non altérées, présentant deux séquences plus grossières à la base avec une intercalation argileuse ;
- 7 à 24 m : Alluvions anciennes à galets altérés, passages argileux entre 16 et 22 m ;
- 24 à 26 m : Niveau argileux brun-roux ;

- 26 à 28,30 m : Alluvions de base : sables argileux à galets altérés et blocs.

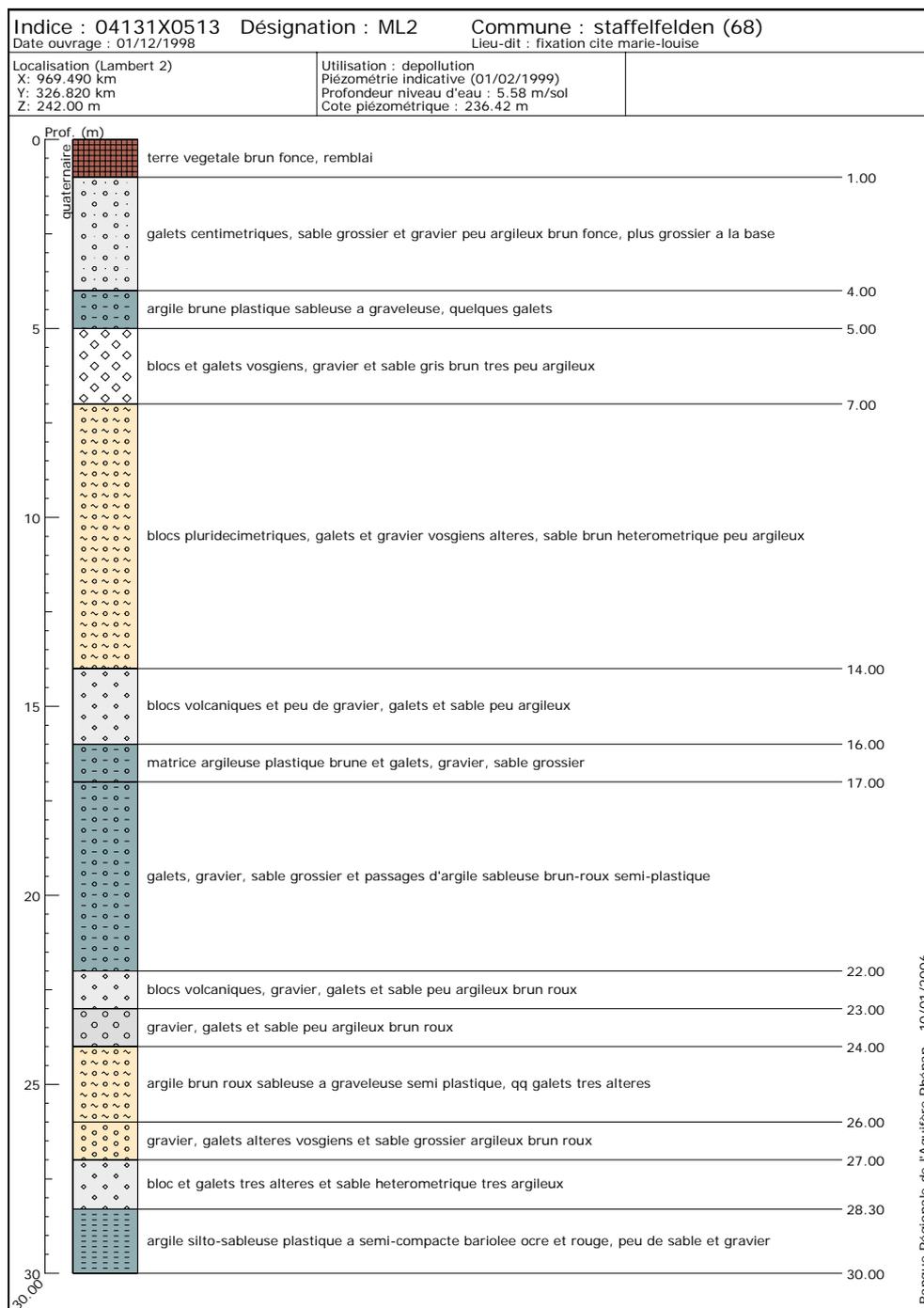


Figure 13 – Coupe géologique du puits de fixation Marie-Louise 2

Le modèle conceptuel adopté pour les **alluvions vosgiennes** du Bassin potassique est ainsi le suivant :

- Couche 1 : Alluvions récentes perméables comprenant souvent deux séquences notées T1 et T2 ;
- Couche 2 : Alluvions anciennes à passages argileux, localement semi-perméables, notées T3 ;
- Couche 3 : Alluvions de base formant des chenaux irréguliers, moyennement perméables, notées T4.

3.2. DEFINITION DES COUCHES AQUIFERES

3.2.1. Définition des épaisseurs des couches

La zone d'étude s'étend sur plus de 40 km de Mulhouse au Sud à Colmar au Nord. 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.

Dans une première étape, les coupes des forages ont été passées en revue, le code lithologique correspondant au faciès a été contrôlé et ajusté le cas échéant pour distinguer alluvions rhénanes et alluvions vosgiennes. Un code de T1 à T4 a de plus été noté lorsque l'une des subdivisions définies plus haut était apparente.

Dans une deuxième étape, des coupes sériées verticales de direction W-E dans la plaine et S-N dans le cône d'épandage de la Thur ont été tracées pour contrôle, à l'aide du logiciel GDM pour Windows. Dans le cône de la Thur et plus généralement sur la bordure ouest de la plaine, il est possible de distinguer les différentes séquences d'alluvions. Dans la zone de plaine rhénane 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 en général seulement de tracer la base de l'aquifère. Cette étape a permis de conforter et de préciser les interprétations faites à partir des coupes des forages individuels.

Dans une troisième étape, les données des forages individuels ont été exportées vers le logiciel MapInfo et reportées sous forme de points représentant :

- l'épaisseur de la couche 1 des alluvions récentes, en regroupant les séquences T1 et T2, qui ne pouvaient pas toujours être distinguées,
- l'épaisseur de la couche 3 des alluvions basales T4 (si présentes).

Les épaisseurs de ces deux couches ont fait l'objet d'une interpolation manuelle. Les résultats sont présentés respectivement avec les figures 14 et 16.

La couche 2 n'a pas été cartographiée car elle devait se déduire de l'épaisseur totale des alluvions diminuée des 2 autres couches.

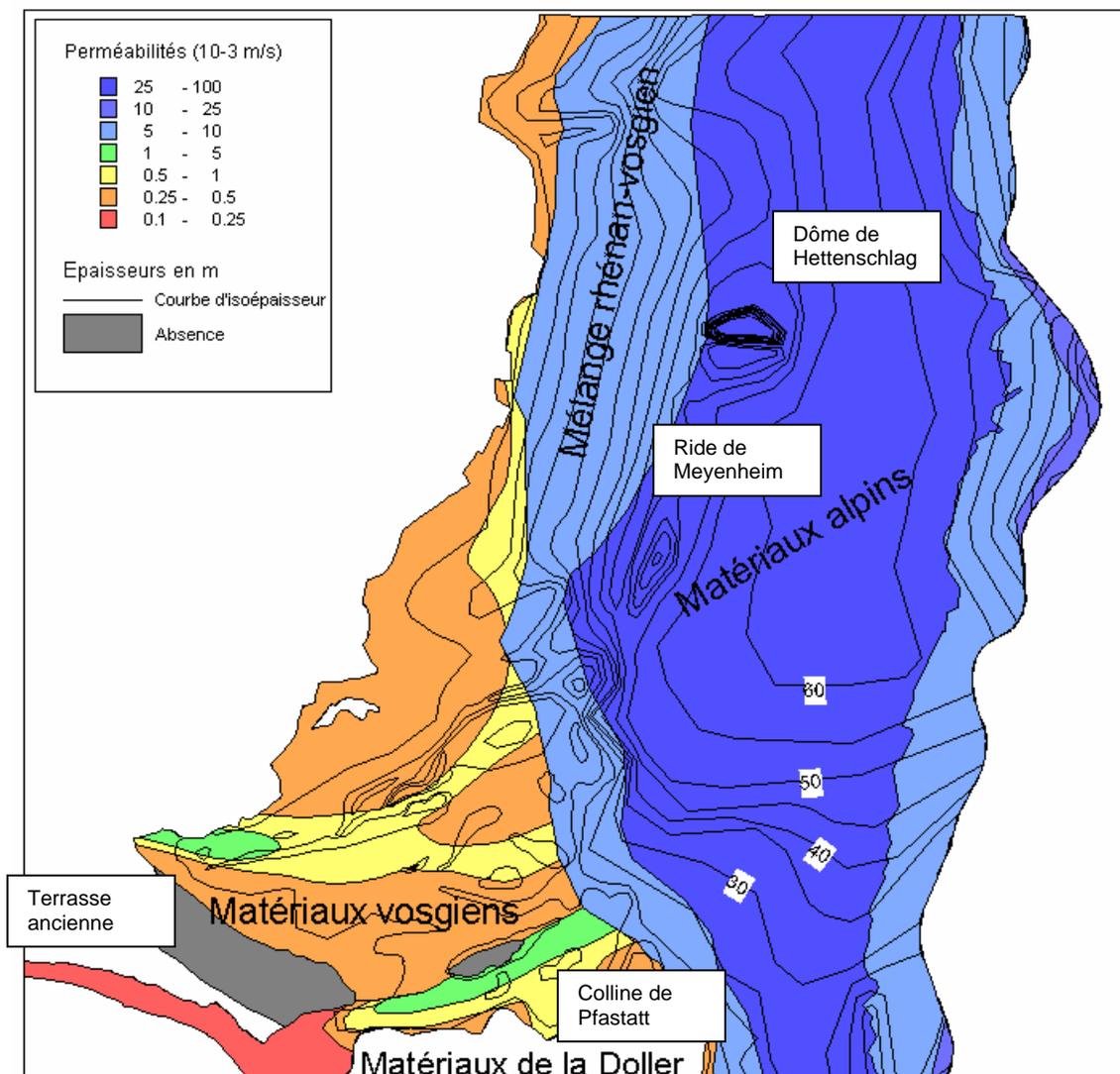


Figure 14 – Caractéristiques de la couche 1 (alluvions récentes)

Dans la carte de la couche 1 ci-dessus, le domaine rhénan à matériaux alpins à fortes perméabilités (en bleu, supérieures à $5 \cdot 10^{-3}$ m/s) et épaisseur entre 30 et 60 m occupe la plaine actuelle. On distingue un chenal à matériel sableux moins perméable à l'Est le long du Rhin actuel, et une frange à mélange de matériaux alpins et vosgiens à l'Ouest. La présence des diapirs se manifeste par des réductions d'épaisseur le long de la ride de Meyenheim et surtout au niveau du dôme de Hettenschlag.

A l'Ouest, le domaine des matériaux vosgiens correspondant aux cônes de déjection est caractérisé par des chenaux plus perméables proches des cours actuels de la Thur et de la Doller. On note l'absence des alluvions récentes sous la colline de Pfastatt et dans la terrasse ancienne au Sud de la Thur.

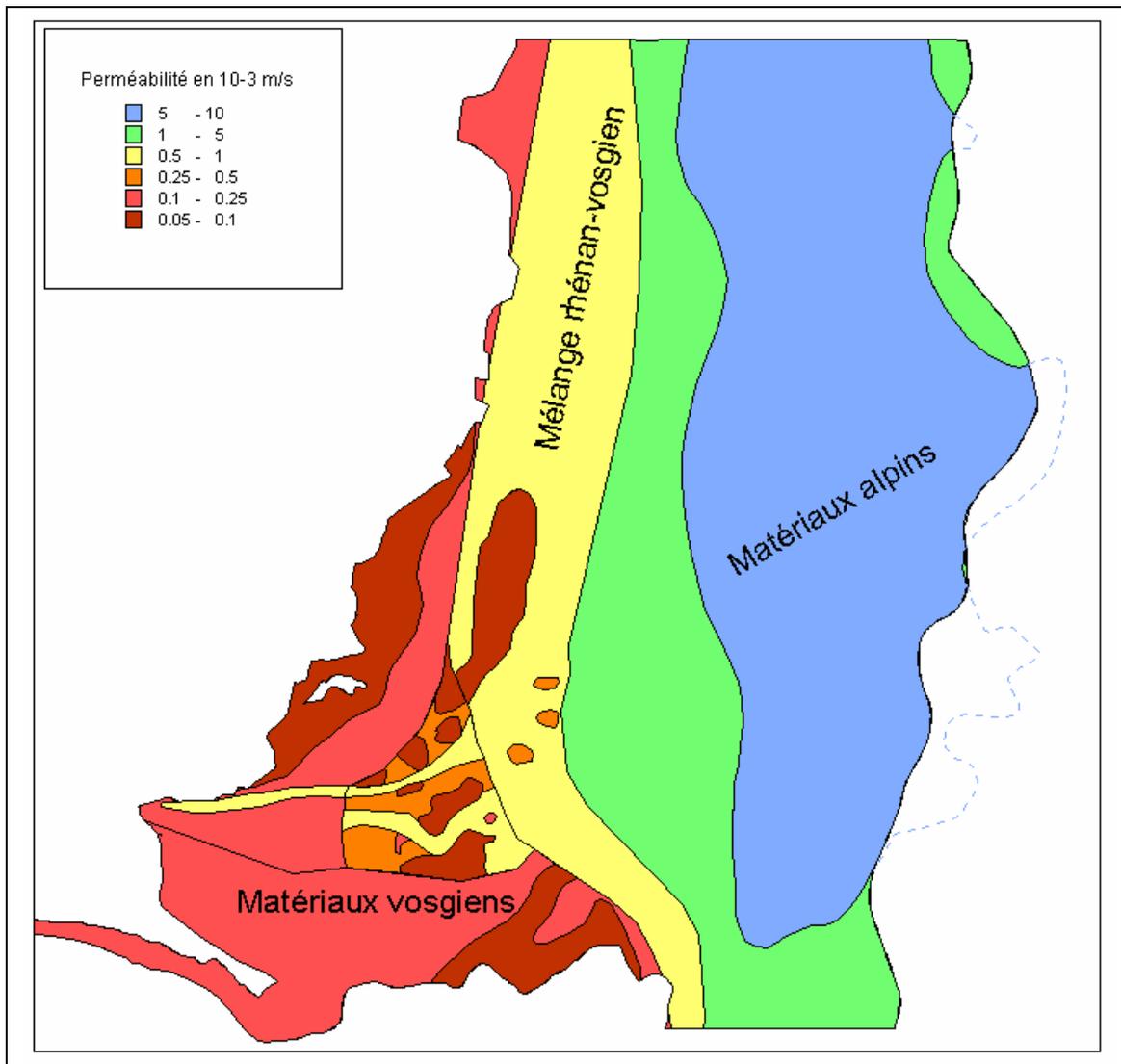


Figure 15 – Caractéristiques de la couche 2 (alluvions anciennes supérieures)

Sur la carte de la couche 2 ci-dessus le domaine rhénan à l'Est est constitué de matériaux rhénans un peu altérés, les perméabilités sont encore supérieures à $1 \cdot 10^{-3}$ m/s en dehors de la frange de mélange avec les alluvions vosgiennes. Les limites de perméabilité à l'Ouest ont été harmonisées avec les travaux du Service géologique du Bade-Wurtemberg.

Le domaine vosgien à l'Ouest est caractérisé par des graviers argileux assez peu perméables (de l'ordre de $1 \cdot 10^{-4}$ m/s). Les nombreux sondages dans la zone des terrils du bassin potassique ont permis de distinguer des chenaux plus perméables et des zones argileuses très peu perméables d'après les descriptions lithologiques des ouvrages : les "taches" de faible perméabilité correspondent à des zones où les alluvions sont décrites comme très argileuses ou comprenant beaucoup d'intercalations de niveaux argileux.

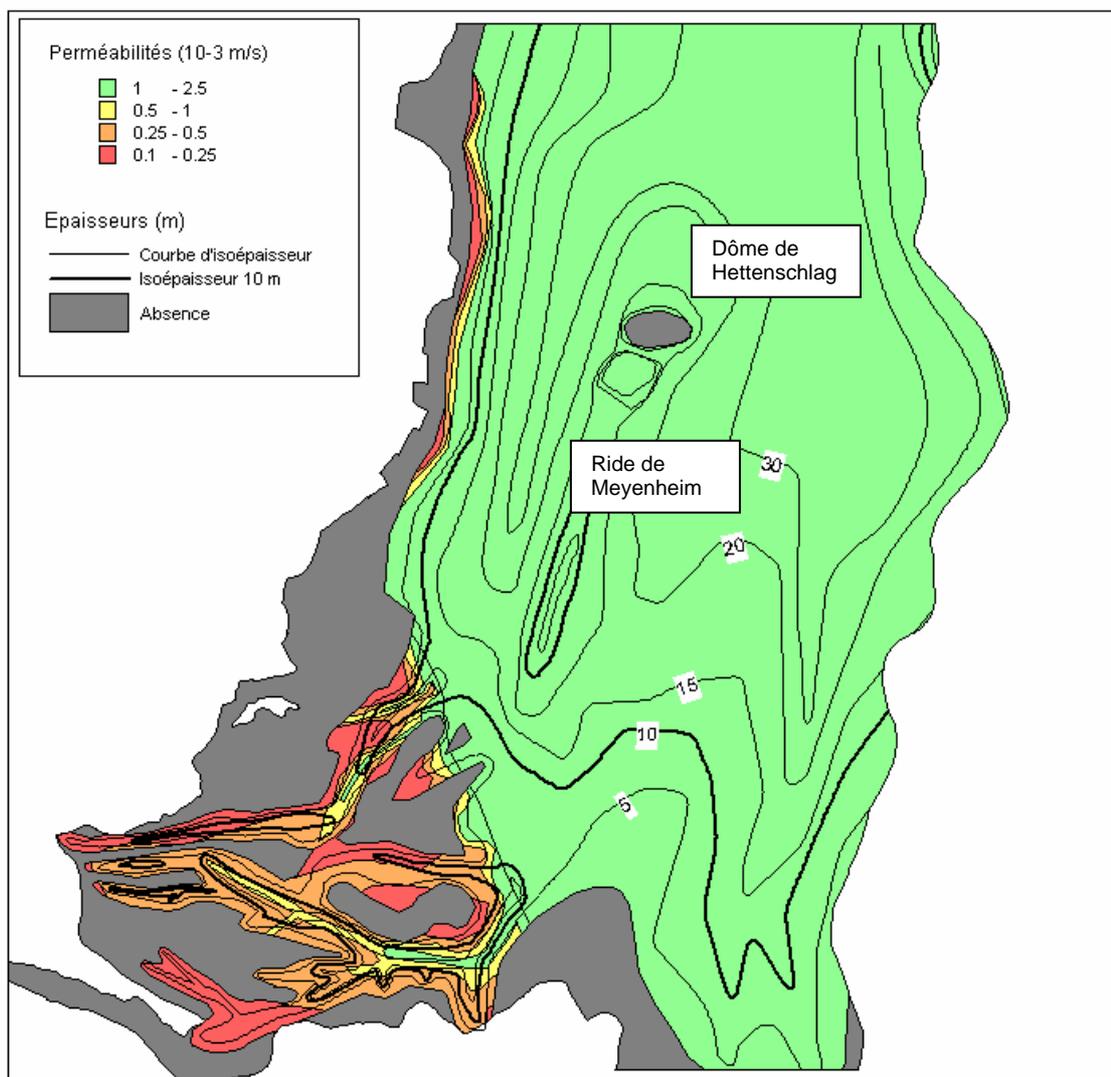


Figure 16 – Caractéristiques de la couche 3 (alluvions anciennes inférieures)

La carte de la couche 3 ci-dessus distingue à l'Est un domaine rhénan d'alluvions alpines de 0 à 30 m d'épaisseur, dans lesquelles il n'a pas été possible de faire des zonages de perméabilité en raison du faible nombre de sondages (en vert, perméabilités de l'ordre de $1 \cdot 10^{-3}$ m/s). On notera la diminution d'épaisseur voire l'absence au droit des diapirs de Meyenheim et de Hettenschlag, et la réduction de largeur vers le Sud : en effet les alluvions anciennes sont érodées dans la trouée de Sierentz-Saint-Louis.

Dans le domaine vosgien à l'Ouest la couche 3 se résout à des chenaux d'alluvions basales un peu plus perméables que les alluvions anciennes sus-jacentes. Leur disposition qui suit les paléo vallées du substratum tertiaire est très importante pour les écoulements gravitaires de salure dense au voisinage des terrils.

3.2.2. Zonage des perméabilités

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 été réalisée sous MapInfo. Les données d'essais de pompage donnent généralement des valeurs de débit spécifique, les perméabilités ne sont calculées que dans une minorité de cas.

Afin de disposer de plus de mesures pour l'interprétation des zones de perméabilité, il a été tiré avantage de l'assez bonne corrélation entre le débit spécifique et la transmissivité dans l'aquifère rhénan (fig. 17). Lorsque les résultats d'essais de pompage ne donnaient pas de transmissivité, celle-ci a été supposée égale au débit spécifique. Une perméabilité a ensuite été déduite en divisant la valeur de la transmissivité par la hauteur crépinée.

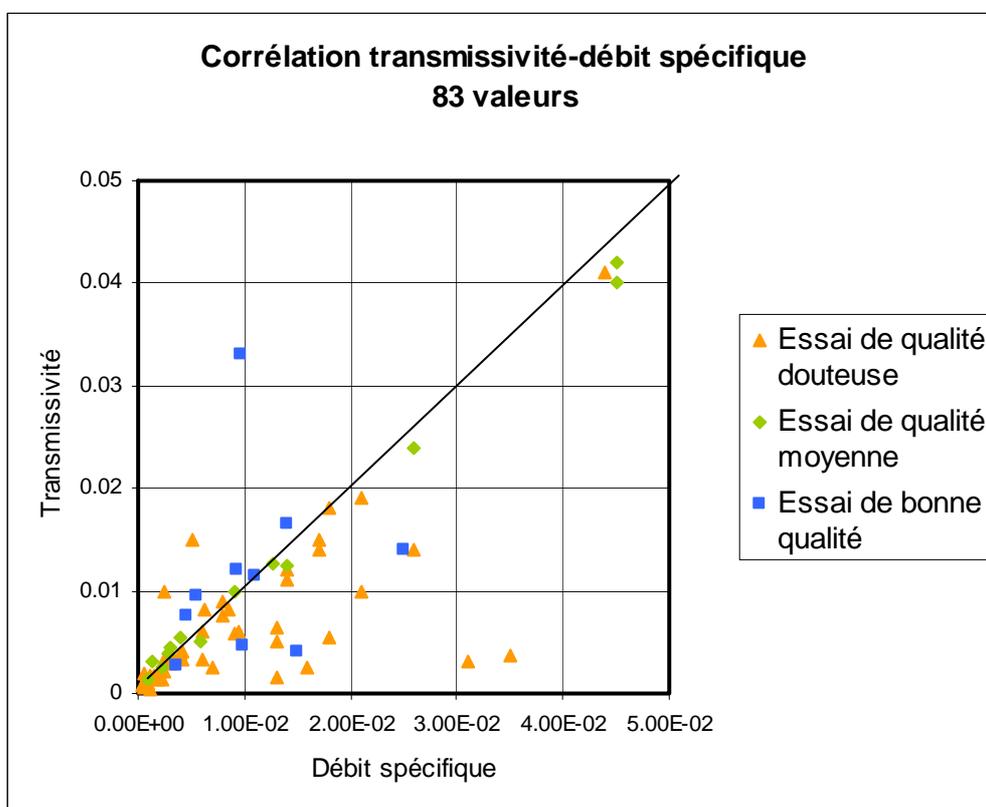


Figure 17 – Corrélation entre transmissivité et débit spécifique dans l'aquifère rhénan (données de la Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan)

Les valeurs de perméabilité ainsi obtenues ont été reportées sur des cartes et ont permis d'attribuer des valeurs de perméabilité moyenne aux zonages établis d'après la lithologie (cf. figs. 14 à 16).

3.3. CONSTRUCTION DU MODELE GEOMETRIQUE

3.3.1. Principe

Le modèle géométrique doit être construit comme le modèle hydrodynamique sur un maillage carré de 500 m resserré dans le bassin potassique à 125 m (maillage gigogne). Il aura donc 3 couches d'épaisseur variable comme le modèle conceptuel (fig. 18). La différenciation entre alluvions vosgiennes et rhénanes sera faite au niveau des perméabilités.

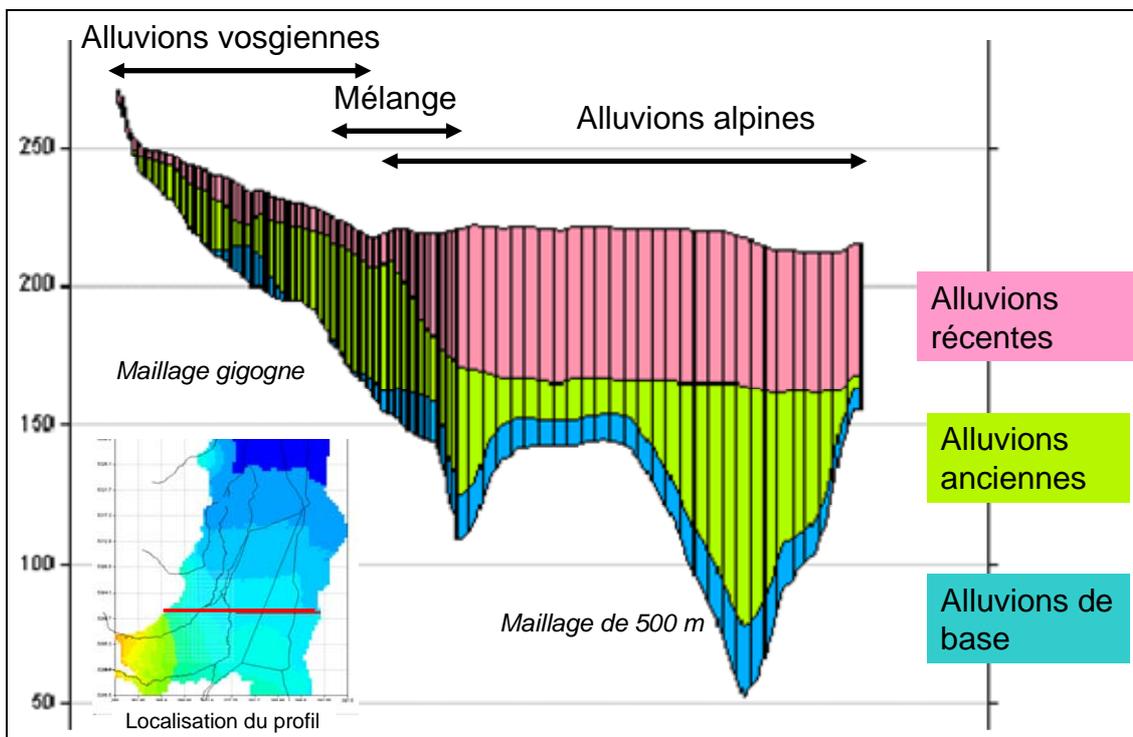


Figure 18 – Exemple de profil Ouest-Est à travers le modèle géométrique

Il faut ainsi créer un modèle maillé contenant pour chaque nœud les informations listées dans le tableau 10. La surface du sol est donnée par la topographie de l'IGN mais sera corrigée en fonction des données les plus récentes, afin de prendre en compte les affaissements miniers notamment.

La carte du substratum de l'aquifère est tenue à jour dans le cadre de la Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan sous maîtrise d'ouvrage de la Région Alsace. Nous verrons qu'elle devra également être corrigée.

Les épaisseurs des couches 1 et 3 (alluvions récentes et basales) ont été définies sous forme de courbes de niveau (cf. paragraphe 3.2.1) tandis que les perméabilités des 3

couches sont disponibles sous forme de zonages (cf. paragraphe 3.2.2). L'épaisseur de la couche 2 sera obtenue par différence (tableau 10).

Information	Unité	Variable	Source
Coordonnées UTM32 du nœud	x en km	X_UTM	d'après le maillage du modèle
	y en km	Y_UTM	
Cote de la topographie	z en m IGN	Ztopo	d'après les données IGN et MDPA
Epaisseur de la couche 1	en m	Eal1	interprétation géologique
Perméabilité de la couche 1	en 10-3 m/s	Pal1	interprétation géologique
Cote de la base de la couche 1	z en m IGN	Zal1	= Ztopo - Zal1
Epaisseur de la couche 2	en m	Eal2	= Zal1 - Zal2
Perméabilité de la couche 2	en 10-3 m/s	Pal2	interprétation géologique
Cote de la base de la couche 2	z en m IGN	Zal2	= Zsub + Eal3
Epaisseur de la couche 3	en m	Eal3	interprétation géologique
Perméabilité de la couche 3	en 10-3 m/s	Pal3	interprétation géologique
Cote de la base de la couche 3 = cote du substratum	z en m IGN	Zsub	interprétation géologique de la BRAR

Tableau 10 – Données du modèle géométrique

3.3.2. Discrétisation de la topographie

La base de la topographie a été reprise de la topographie du modèle précédent basée sur le modèle numérique de terrain (MNT) de l'IGN (Noyer *et al.* 1998). Dans le Bassin potassique les MDPA tiennent une topographie à jour, prenant en compte les affaissements miniers. Ils ont donc mis à disposition du projet des courbes de niveau topographiques à jour à décembre 2003. Comme l'exploitation minière s'est arrêtée en septembre 2002 et que les affaissements résultant du foudroyage des tailles¹ se propagent rapidement vers la surface et sont complètement stabilisés dans un délai de 2 à 3 ans², on peut considérer que la topographie des MDPA à décembre 2003 est, à 20 cm près, la **topographie définitive du bassin minier**.

¹ Foudroyage des tailles : effondrement provoqué des vides laissés par l'exploitation, au fur et à mesure de l'avancement des travaux

² Communication orale de M Rulleau (MDPA), voir aussi MDPA (1991)

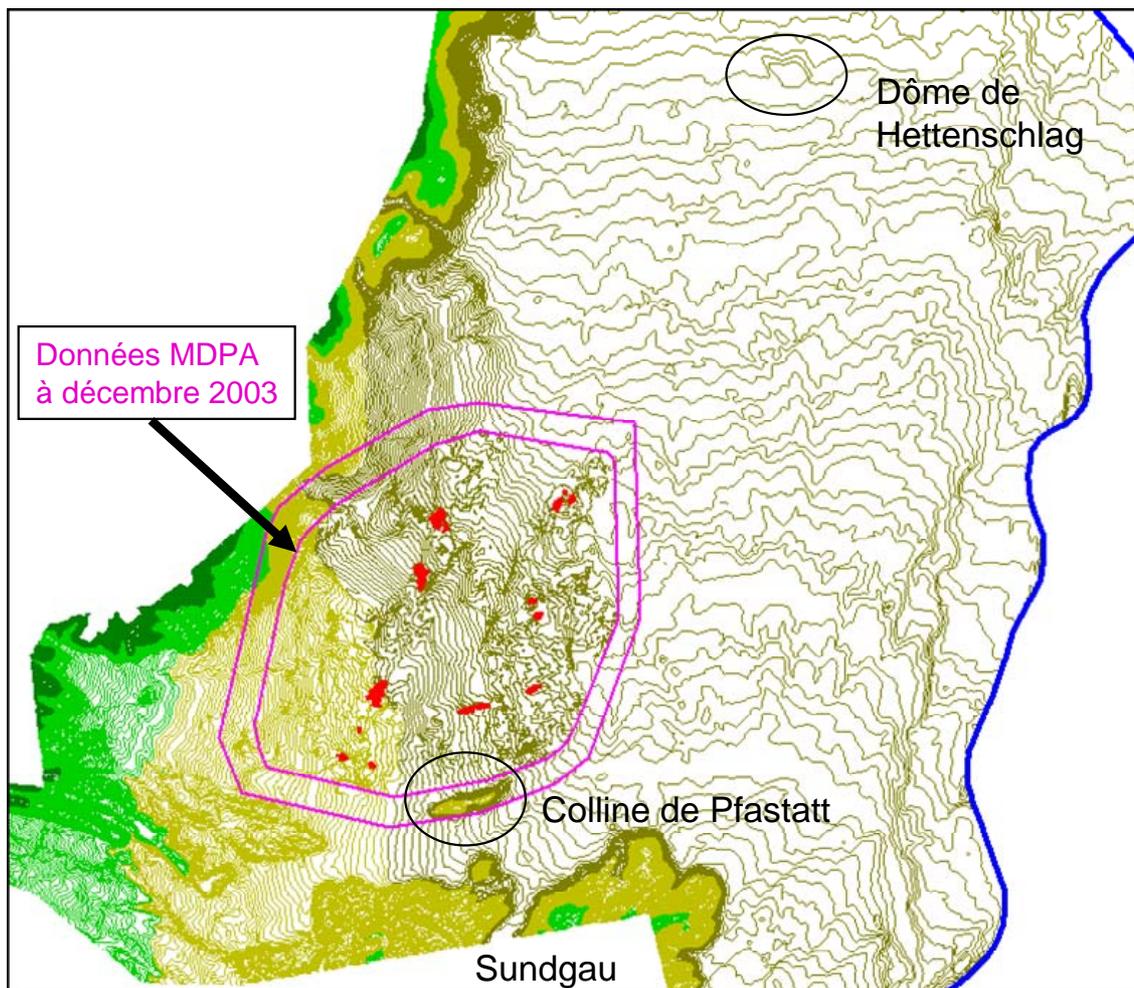


Figure 19 – Topographie en courbes de niveau de la zone d'étude (équidistance : 1m) - A noter, le relief important représenté par la colline de Pfastatt et le léger relief engendré par le dôme diapirique de Hettenschlag

La topographie en courbes de niveau fournie par les MDPA, couvrant plus de 128 km², a été insérée dans une topographie en courbes de niveau créée à partir du MNT de l'IGN (fig. 19). Les courbes de niveau ont ensuite été raccordées dans une zone tampon d'un kilomètre de large. Les reliefs constitués par les terrils des MDPA (en rouge sur la figure 19) ont été aplanis afin que la topographie résultante représente bien le toit de l'aquifère.

Enfin les courbes de niveau harmonisées ont été importées dans le logiciel GDM et ont fait l'objet d'une interpolation géostatistique (krigeage) dans la grille du modèle à 500 m et dans celle du modèle gigogne à la maille de 125 m. L'interpolation a été faite à partir des points de ces courbes avec un modèle linéaire avec dérive linéaire qui donne de bons résultats pour la restitution de topographies. La grille résultante a été exportée dans un fichier Excel.

Les courbes de niveau du substratum fournies par la Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan ont été interpolées de la même façon et intégrées aux fichiers Excel des résultats.

3.3.3. Création des couches aquifères

Les épaisseurs des couches 1 et 3 ont également fait l'objet d'un krigeage réalisé à partir des courbes de niveau tracées par le géologue. Le modèle employé était un simple modèle linéaire sans dérive afin d'éviter la création d'artefacts d'extrapolation.

Les données résultantes ont été importées dans les fichiers Excel des grilles respectives du modèle et du gigogne. Les cotes de la base des couches alluvionnaires ont ensuite été calculées à partir des cotes de la topographie et du substratum, suivant les formules du tableau 10.

Les valeurs de perméabilités des différentes couches ont été attribuées aux nœuds de la grille, sans interpolation, d'après les cartes des zonages de perméabilité disponibles sous MapInfo. Tous les nœuds situés dans une même zone de perméabilité sont ainsi affectés de la même perméabilité.

3.3.4. Le problème du substratum

Lors des essais de calage de la piézométrie dans le modèle hydrodynamique, il est apparu que la piézométrie n'était pas bien restituée dans certains secteurs affectés par les affaissements miniers : elle était généralement trop proche de la surface. Une réflexion critique a alors été menée sur la façon dont le modèle avait été créé.

Les affaissements miniers se propagent depuis les travaux miniers à plus de 400 m de profondeur : ils affectent donc le substratum aussi bien que la topographie, l'épaisseur des couches alluvionnaires étant globalement préservée (fig. 20a). Les affaissements miniers provoquent des affaissements d'amplitude variable, pouvant atteindre 5 à 6 m au maximum, qui sont fonction de l'épaisseur de la ou des couches exploitées (deux couches ont en effet été exploitées dans le bassin potassique) et de la largeur des stots³ laissés en place.

En construisant le modèle géométrique, il avait été assumé implicitement que le substratum de la BRAR prenait en compte les affaissements. Or ce n'est pas nécessairement le cas.

³ Stot : Minerai laissé en place dans une exploitation afin de protéger certains ouvrages comme les puits d'extraction par exemple.

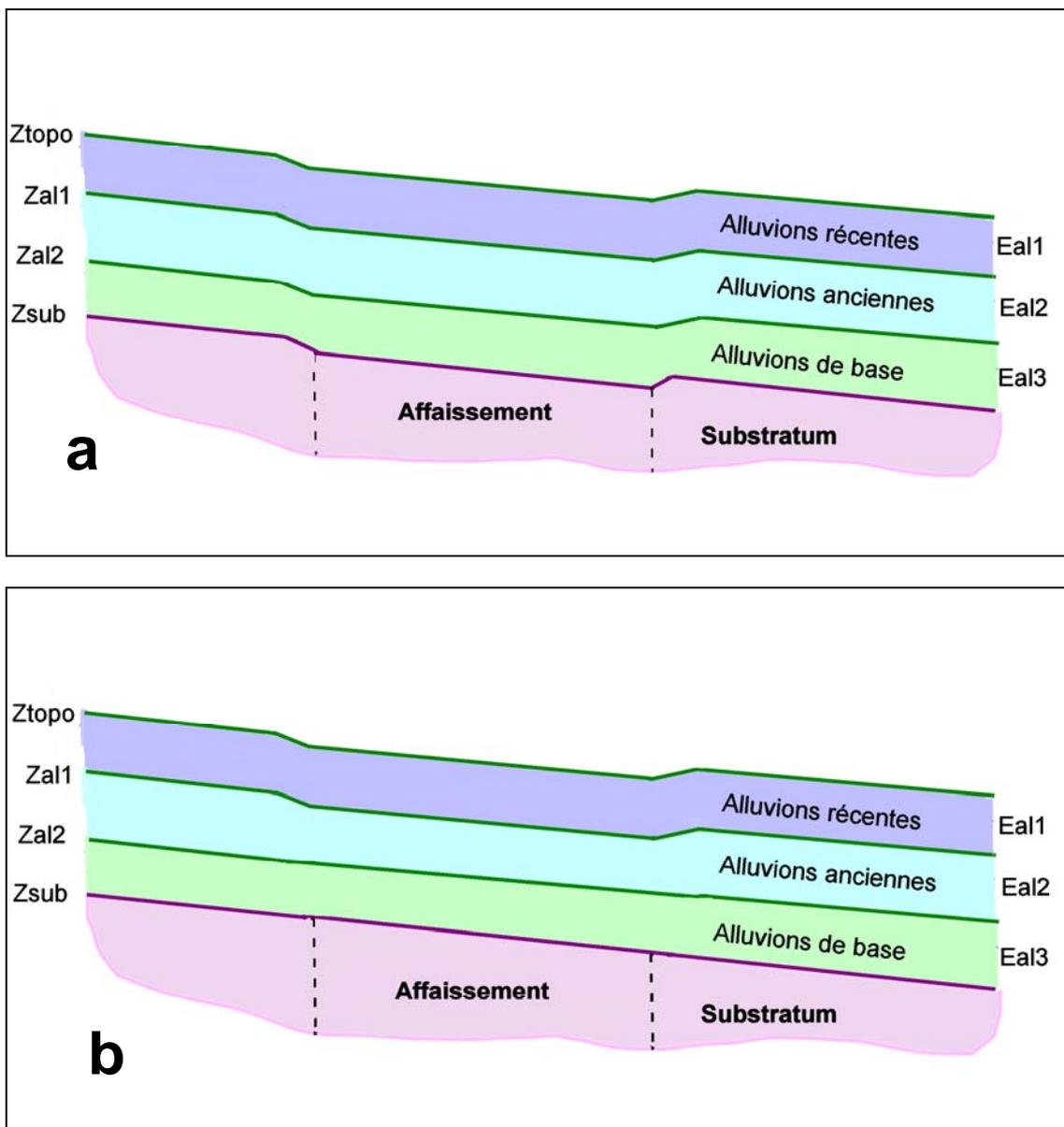


Figure 20 – Rôle du substratum dans la construction du modèle géométrique – a) avec un affaissement se propageant depuis la couche 1 – b) avec le substratum de la BRAR

En effet le substratum de la BRAR est tracé à partir des données de sondages ayant atteint la base de l'aquifère. La cote de la base de l'aquifère est obtenue en déduisant la profondeur du substratum de la cote de la surface du sol où est situé le forage. Une première difficulté provient du fait que la cote du sol des forages anciens utilisés pour la cartographie peut être antérieure aux affaissements. En fait, en l'absence de nivellement par un topographe, la cote du sol est déduite de la carte IGN à 1/25 000, qui est cohérente avec le MNT de l'IGN.

Une deuxième difficulté plus fondamentale est que l'amplitude des affaissements est généralement inférieure à 5 m, ce qui est peu par rapport à la précision de la carte du substratum dont les courbes de niveau sont tracées avec une équidistance de 10 m seulement, en raison de la densité relativement faible des sondages. De plus les courbes de niveau du substratum sont tracées dans l'idée de représenter une paléotopographie et sont lissées en conséquence, alors qu'un affaissement devrait apparaître comme une dépression à bords anguleux.

On peut donc dire que la carte du substratum de la BRAR ignore les affaissements miniers. Avec la méthode de construction géométrique adoptée, ceci induit un "étranglement" de l'aquifère (par réduction d'épaisseur de la couche 2) au niveau des zones d'affaissement minier, provoquant une remontée du niveau de la nappe de quelques mètres dans le modèle (fig. 20b).

Il était donc nécessaire de corriger le substratum en fonction des affaissements miniers, mais nous ne disposons pas de carte de l'amplitude des affaissements sur l'ensemble du bassin potassique depuis le début de l'exploitation. Nous avons alors raisonné que la différence entre la topographie de l'IGN et celle des MDPA de fin 2003 nous donnerait une information sur les affaissements survenus après les levés de la carte topographique de l'IGN. L'IGN consulté sur la date des levés de la carte topographique dans le bassin potassique n'a pas su répondre à cette question.

Nous avons fait l'exercice de calculer la différence entre la topographie des MDPA discrétisée dans le modèle géométrique et le MNT de l'IGN. Le résultat est reporté sur la carte des zones exploitées en figure 21. Les différences sont cohérentes avec les zones exploitées dans la partie centre et nord du gisement (sauf une zone au NW de Marie-Louise), et les différences les plus importantes apparaissent bien dans les secteurs où les deux couches ont été exploitées. Il n'y a pas de différences dans la partie extrême sud, pourtant exploitée récemment, où seule une couche peu épaisse a été exploitée.

Il semble donc bien que la topographie de l'IGN représente un état ancien encore peu affecté par les affaissements miniers. La différence avec la topographie récente des MDPA représente donc les affaissements, à quelques corrections près (NW de Marie-Louise). Nous avons donc corrigé le modèle géométrique de la façon suivante :

- Abaissement de la cote du substratum (Z_{sub}) et de la cote de la base de la couche 2 (Z_{al2}) de la valeur de l'affaissement,
- Augmentation de l'épaisseur de la couche 2 (E_{al2}) de la même valeur (car cette épaisseur est déduite des autres cotes).

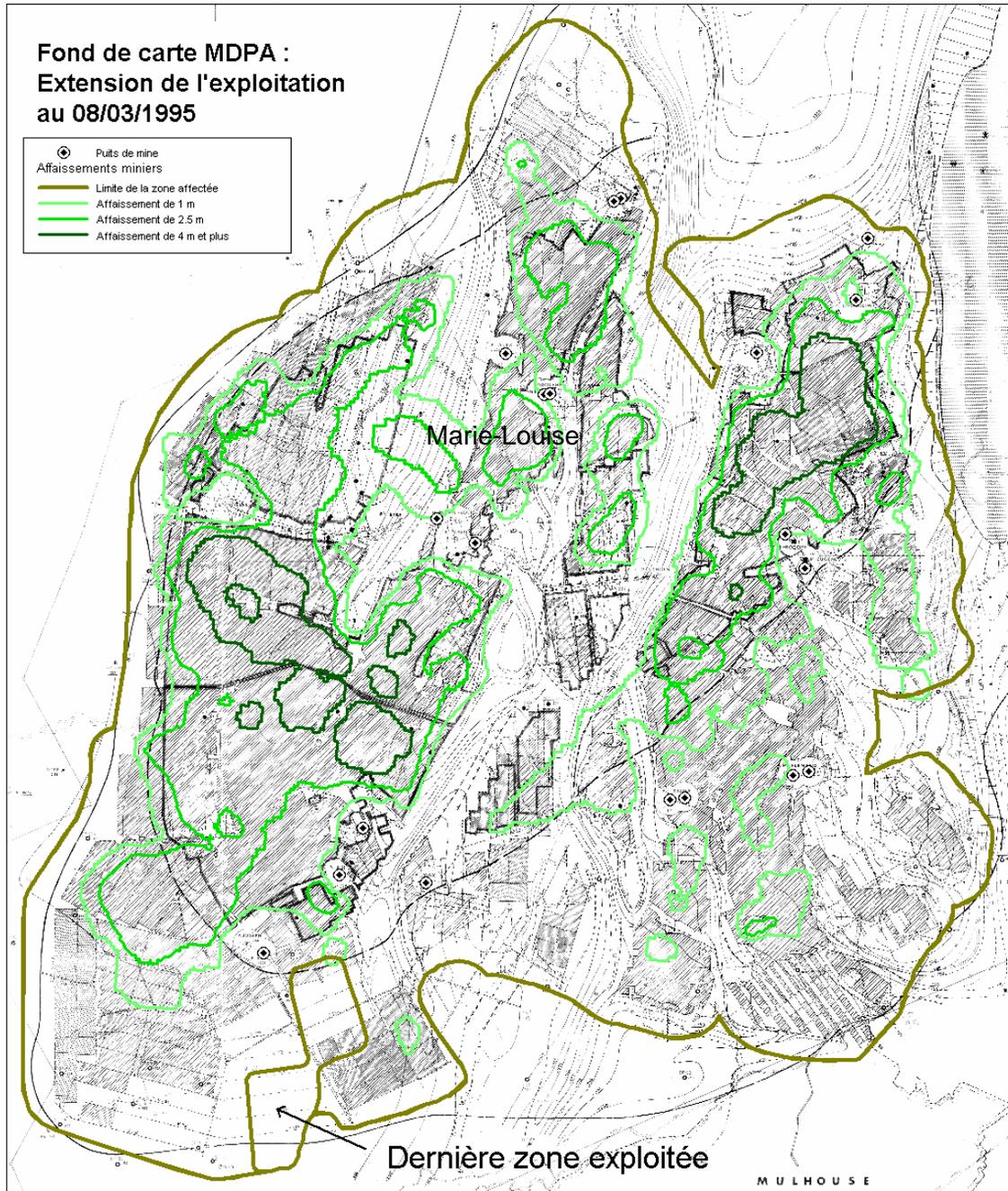


Figure 21 – Carte des affaissements miniers déduits de la différence entre la topographie MDPA 2003 et la topographie de l'IGN

3.4. RESULTATS

Les trois couches du modèle géométrique après discrétisation dans la maille de 500 m sont présentées en figure 22.

Le contraste entre le domaine rhénan à l'Est, affecté par les mouvements diapiriques surtout au niveau des alluvions anciennes, et le domaine vosgien à l'Ouest, beaucoup moins puissant, apparaît nettement. A chaque maille sont rattachées des estimations de perméabilité.

Le modèle gigogne à la maille de 125 m a été traité de la même manière ; ces données ont été intégrées dans le modèle hydrodynamique.

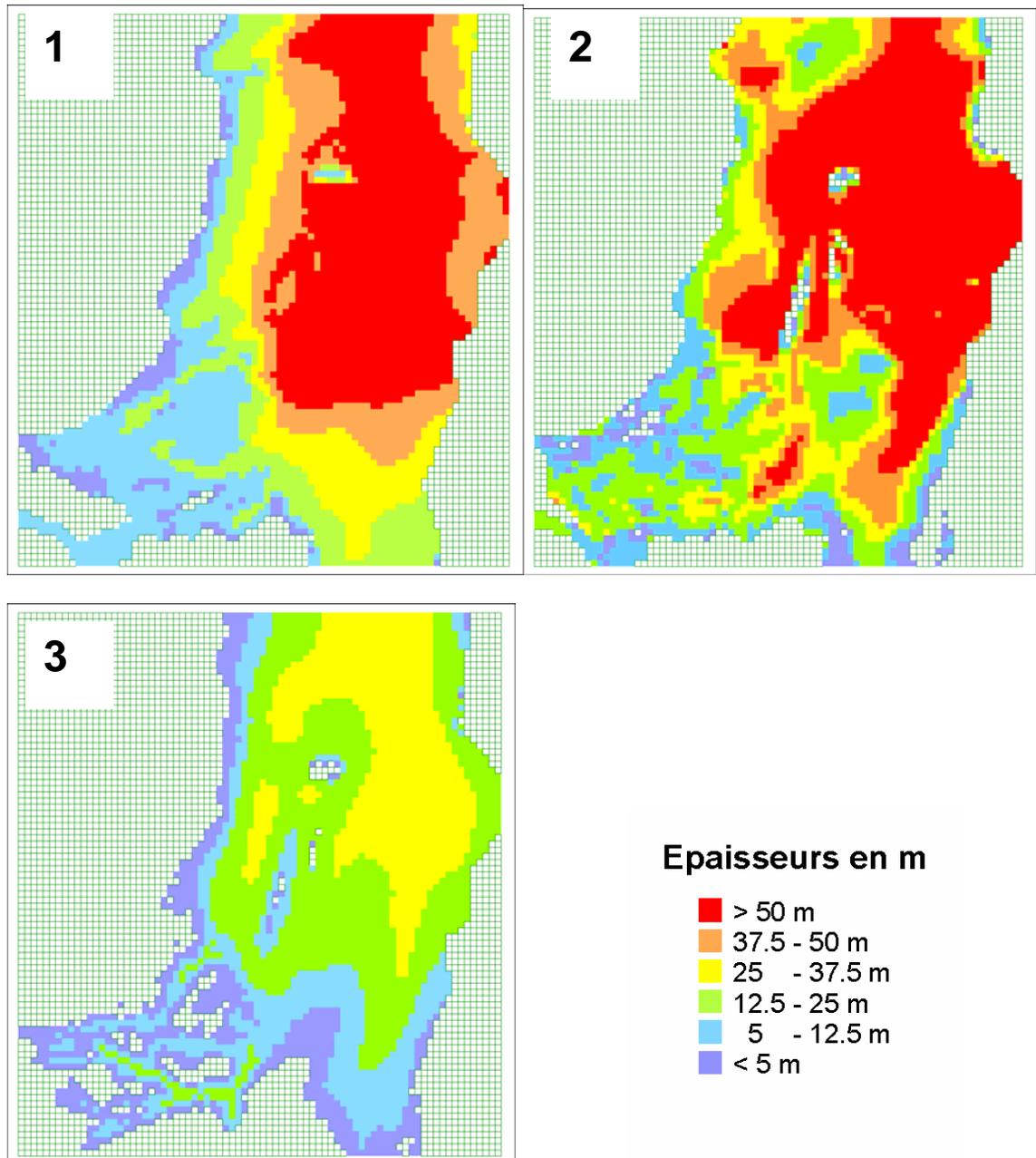


Figure 22 – Modèle géométrique (maille de 500 m)
(1) couche 1 - Alluvions récentes
(2) couche 2 – Alluvions anciennes
(3) couche 3 – Alluvions de base

4. Construction et calage du modèle numérique

Le chapitre 3 a présenté les options ayant conduit à la nouvelle définition de la stratigraphie du modèle en trois couches alluvionnaires.

Les champs spatialisés sont interpolés aux centres des mailles du modèle de taille variable (125 m dans le Bassin Potassique et 500 m ailleurs).

4.1. GEOMETRIE DU MODELE

La géométrie du modèle est parfaitement déterminée par les champs suivants qui ont été redéfinis pour cette étude :

- la topographie, limite supérieure du modèle, qui constitue une cote de débordement potentiel ;
- le substratum de chacune des 3 couches (établi à partir de la topographie et des épaisseurs alluvionnaires successives) ;
- les limites verticales.

4.1.1. Cotes topographiques et maillage

La figure 23 présente le maillage surperposé à la carte de la topographie. On distingue le maillage de 500 m en dehors de la zone du Bassin Potassique. Dans cette zone du BP, le maillage gigogne est à la taille uniforme de 125 m afin de pouvoir bien individualiser les influences des différentes sollicitations (prélèvements et infiltrations des terrils).

Pour des raisons de lisibilité, ce maillage fin n'apparaît pas sur la figure 23. On notera la représentation du réseau hydrographique en bleu et des terrils des MDPA en rouge.

4.1.2. Epaisseurs des couches

Elles sont présentées au chapitre précédent, fig. 22.

On constate que dans chaque couche les épaisseurs varient énormément en augmentant globalement du sud-ouest vers le nord-est depuis une valeur parfois très faible (de l'ordre du mètre) jusqu'à environ 65 m pour la couche 1, 175 m pour la couche 2 et 37 m pour la couche 3. Aucune de ces couches n'est totalement continue sur l'ensemble du domaine d'étude.

C'est un des atouts du code MARTHE de savoir gérer de façon robuste et optimale la disparition locale des couches ainsi que les problèmes numériques susceptibles de se produire par dénoyage dans la partie sud-est de faible épaisseur.

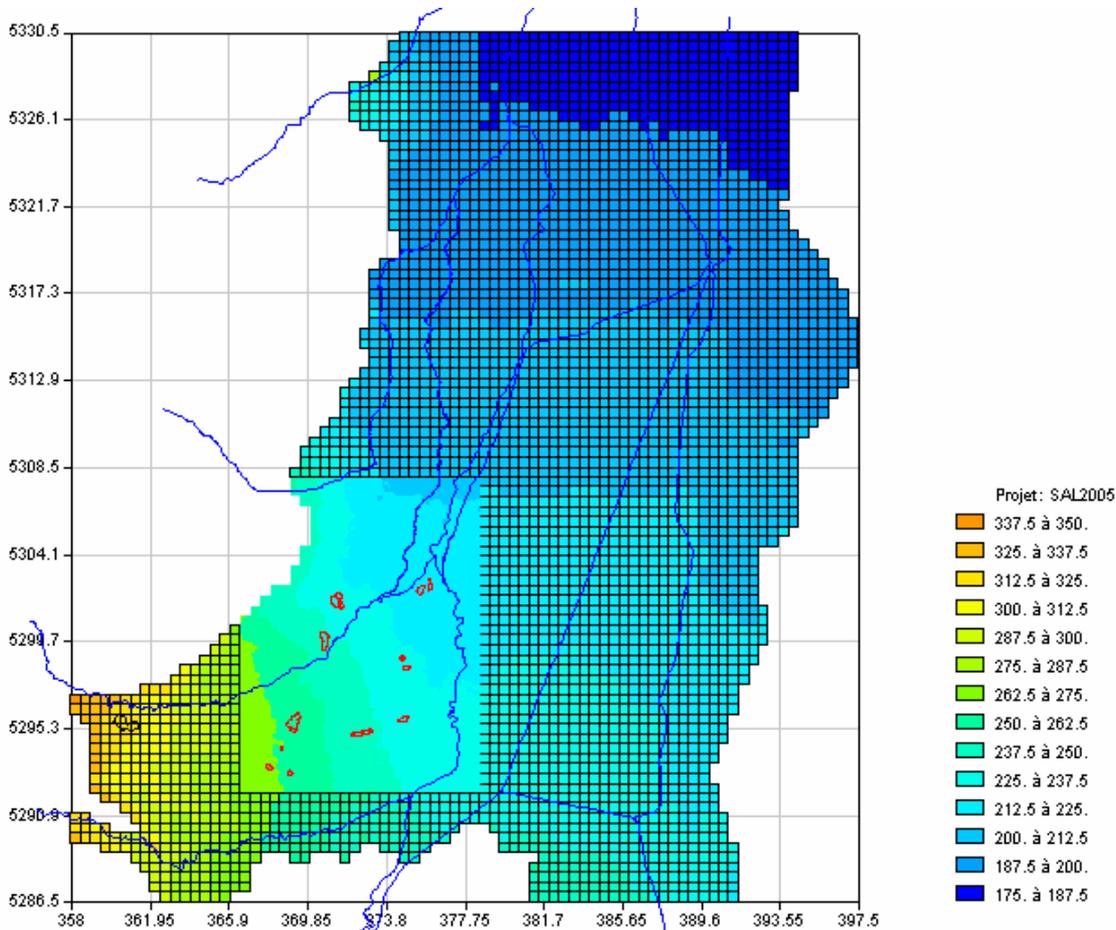


Figure 23 – Maillage sur fond de la topographie

4.1.3. Limites verticales

Les cartes des épaisseurs montrent que les extensions horizontales des couches ne sont pas identiques et que par conséquent les limites diffèrent d'une couche à l'autre.

Des limites verticales communes ont été définies en prenant l'enveloppe des limites de chaque couche. Les conditions hydrogéologiques imposées sur ces limites ont été ajustées au cours du calage en régime permanent, comme décrit au § 4.2.1.

4.2. METHODE DE CALAGE DU MODELE NUMERIQUE

Comme indiqué au chapitre 1, le calage du modèle numérique consiste à estimer aussi précisément que possible les paramètres physiques non directement accessibles à la mesure ou connus avec insuffisamment de précision (perméabilités et coefficients d'emmagasinement des couches aquifères, coefficients d'échange avec les rivières, recharge par zone, conditions aux limites etc...) en ajustant les résultats simulés aux observations (cartes et chroniques de piézométrie et de salinité, débits aux stations de jaugeage de contrôle, orientation des langues salées et trajectoires).

Le calage hydrodynamique se décompose en deux phases :

- le calage en régime permanent sur la piézométrie « moyenne » de juin 2002 intégrant une situation de ME sur les rivières différente de celle de 2002 (cf § 2.4.2.) ; il permet d'obtenir une première estimation d'une partie des paramètres ;
- le calage en régime transitoire qui permet de prendre en compte l'inertie du système aquifère par le biais des coefficients d'emmagasinement, sur la période 1978-2004 pour laquelle on dispose de chroniques piézométriques, de débits aux stations de jaugeage, de données hydro-climatiques et des fluctuations annuelles des prélèvements.

Le calage du transport fait intervenir, en plus des paramètres liés à l'hydrodynamique transitoire, les paramètres liés aux sources de pollution (caractéristiques géométriques des terrils, historique des infiltrations sous les terrils et des teneurs en chlorures des rivières). Il permet d'affiner les variables telles que la porosité cinématique et la dispersivité et donc de mieux définir les trajectoires et les vitesses dont une première estimation a été obtenue lors du calage de l'hydrodynamique seule en régime transitoire. On procède à partir d'une situation de salinité initiale observée et on ajuste les résultats simulés aux observations (cartes et chroniques de salinité).

En résumé, on doit réaliser 3 étapes successives de complexité croissante au cours du calage du modèle : hydrodynamique permanente, hydrodynamique transitoire, transport. Il faut en général itérer sur les phases transitoires (hydrodynamique et transport).

4.2.1. Calage de l'hydrodynamique en régime permanent

Le calage en régime permanent est une étape préliminaire au véritable calage qui ne peut se faire qu'en régime transitoire.

Il permet cependant de vérifier la validité du zonage des perméabilités et des recharges et de tester, comme indiqué ci-dessus, différentes hypothèses sur les conditions aux limites, paramètres des rivières et trajectoires.

a) Zones de recharge

Au chapitre 2, on a expliqué la procédure de définition géographique des zones de recharge à partir des données disponibles. La figure 6 présente une cartographie de ces zones.

Le code MARTHE offre la possibilité de réaliser un "bilan hydro-climatique intégré" dans ces 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) ;
- la 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 dans la maille rivière la plus proche du réseau hydrographique.

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, on peut effectuer une estimation des paramètres à l'aide du modèle hydrologique global GARDENIA du BRGM (Thiéry, 2003) ce qui facilite le calage.

Les paramètres à caler dans chaque zone sont les suivants :

- RUMAX : le déficit maximal du sol (en mm) ;
- CFETP : le coefficient correcteur global d'ETP (en %) ;
- TPERC : la durée de demi-percolation du réservoir H représentant la zone non saturée au réservoir souterrain représentant la nappe (en mois dans le cas de cette étude) ;
- NRUIP : le niveau du réservoir H correspondant à 50 % d'infiltration et 50 % de ruissellement, ou d'équipercolation (en mm).

La signification physique de ces paramètres ainsi que la procédure de pré-calage à l'aide du code GARDENIA sont décrits en détail dans le rapport de 1998 (Noyer et al., 1998).

b) Calage du champ de perméabilité

Un premier zonage a été réalisé au moment de la construction du modèle conceptuel (chapitre 3) à partir de résultats de pompages d'essai et de mesures de débits spécifiques. Ce zonage est approximatif et les zones et valeurs dans les zones doivent ensuite être affinées au cours du calage du modèle.

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 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 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.

Cette alternance de calages automatiques par zones et d'ajustement manuels est réalisée au cours des 3 phases de calage (hydrodynamique permanente, transitoire et transport).

Les résultats sont présentés au § 4.3.

c) Paramètres des rivières, canaux et drains

MARTHE permet de relier la hauteur d'eau au débit dans la rivière par une relation de type Manning-Strickler à condition de disposer de paramètres comme la pente et la rugosité du lit. Cette option a été retenue dans la présente étude. Une première estimation de l'ordre de grandeur des rugosités est réalisée à l'aide d'une procédure détaillée dans Noyer *et al.*, 1998.

Les paramètres à caler sont donc, comme indiqué au chapitre 2, pour chaque maille rivière : les perméabilités verticales, les épaisseurs de colmatage et la rugosité du lit. La procédure de calage est manuelle ; on doit itérer sur le calage de ces paramètres et sur celui des perméabilités de l'aquifère.

Pour les drains, il faut caler essentiellement les perméabilités d'échange avec la nappe. Comme indiqué au chapitre 2, on a défini deux types de drains : ceux qui peuvent être décrits de façon relativement précise (Wittelsheim, Richwiller, Joseph Else Est) et tous les autres.

Au final, le calage montre un impact significatif des drains sur l'aquifère mais nettement moins important que celui des rivières.

d) Conditions aux limites

La topographie constitue une cote de débordement pour l'aquifère alluvial qui est de type nappe libre.

Sur les limites verticales, on avait retenu dans le cas du modèle précédent (Noyer *et al.*, 1998) :

- des valeurs de flux entrant dans la couche 1 sur les limites ouest et sud-ouest correspondant à des apports d'eau des versants des Vosges et du Sundgau et

provenant d'une étude antérieure (BURGEAP-IMF, 1996) ; une condition de flux nul dans les 2 autres couches, ce qui revient à supposer qu'il n'y a pas d'alimentation en profondeur depuis les Vosges et le Sundgau ;

- des conditions de potentiel imposé sur les limites nord et sud dans toutes les couches ;
- un flux nul sous le Rhin dans toutes les couches, le Rhin étant lui-même en interaction dynamique avec l'aquifère alluvial dans la couche 1.

Dans le cadre de cette étude, on a, au cours du calage, été amené à revoir les conditions aux limites ouest et sud-ouest, les valeurs de flux calculés antérieurement ne paraissant plus totalement adaptées.

Au final, les conditions de flux dans la couche 1 ont été remplacées par des conditions de potentiel imposé, les autres conditions étant conservées.

e) Trajectoires

Les trajectoires simulées sont ajustées en même temps que la piézométrie en jouant sur les perméabilités des couches de façon à suivre l'enveloppe des langues salées (avec en particulier le changement brusque d'azimut de la langue est). Il s'agit dans cette phase de caler les directions mais pas encore les vitesses, ce qui ne peut être réalisé qu'en régime transitoire.

4.2.2. Calage de l'hydrodynamique en régime transitoire

Il s'agit d'évaluer le champ des coefficients d'emménagement libre (correspondant à la porosité) et d'améliorer les valeurs obtenues pour les paramètres estimés au cours du calage en régime permanent, en particulier les perméabilités dans l'aquifère et les coefficients d'échange avec les rivières.

Pour ce faire, on utilise les longues séries de données décrites au chapitre 2 :

- des variations de débits "sources " des cours d'eau, soit :
 - des variations mensuelles 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) ; elles sont assimilées aux variations des "sources" des rivières dans le modèle (§ 2.4.2);
 - 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 sauf pour le canal de la Hardt dont on a pris en compte les fluctuations à partir du moment où elles ont été connues ;
- des variations mensuelles de la pluie et de l'ETP pour chacune des six zones hydrologiques ;
- des variations annuelles des prélèvements divers soit AEP, AEI, puits de fixation/dépollution du Bassin Potassique (§ 2.4.4.).

Comme données de contrôle, on dispose des évolutions de débit des rivières Thur et Ill aux cinq stations de jaugeage situées dans le modèle (fig.2) ainsi que d'historiques de charge sur une vingtaine de piézomètres (fig. 1).

Le calage est réalisé au pas de temps mensuel entre janvier 1978 et décembre 2004 soit sur 27 ans, à partir de la situation de ME obtenue lors du calage en régime permanent.

Les résultats sont présentés au § 4.3.

4.2.3. Calage du transport de masse en régime transitoire

Au cours de cette phase, on s'efforce d'obtenir la meilleure estimation possible des vitesses de transport et des paramètres de dispersion ce qui passe donc par une amélioration du calage des porosités mais aussi éventuellement un affinage des autres paramètres, en particulier des perméabilités qui permettent de calculer les vitesses de Darcy dont dépendent les vitesses réelles.

Pour ce faire, on cherche à reproduire deux types de données observées :

- les cartes de concentration en chlorures établies pour 2004, en fin de période de calage ;
- les évolutions sur 19 piézomètres comportant un ou plusieurs niveaux crépinés et répartis dans le Bassin Potassique et les langues Est et Ouest et sur 17 puits de fixation ou dépollution situés en aval des terrils (cf § 2.5.4.).

Remarque sur ces données « observées » :

- les cartes des chlorures sont, comme les cartes piézométriques, obtenues par interpolation entre des valeurs observées ponctuelles et, à ce titre, sont évaluées avec une marge d'incertitude, surtout dans les couches inférieures moins bien renseignées ;
- les mesures ponctuelles sur les chroniques de concentration présentent aussi une marge d'incertitude difficile à évaluer et certainement plus importante que celle qu'on peut rencontrer sur les chroniques piézométriques ; en effet, de par la méthode de mesure, elles sont souvent relativement discontinues contrairement aux mesures de niveau d'eau ; de plus, sur les ouvrages multicrépinés, il faut les attribuer à une des 3 couches du modèle et, selon l'épaisseur de la couche et la position des crépines, elles sont plus ou moins représentatives de la concentration moyenne dans la couche en question.

Remarque sur le calcul du transport : lors du montage du projet, il avait été envisagé de prendre en compte dans ce calcul les effets densitaires. A ce moment là, on pensait pouvoir simplement affiner le modèle existant (celui de 1998).

Or l'acquisition de nouvelles données tant géologiques que géophysiques a nécessité de refaire un modèle conceptuel nouveau et de recalculer complètement ce modèle, ce qui a impliqué de passer beaucoup plus de temps que prévu sur les étapes amont au

calcul du transport *stricto sensu*. A cette occasion, le choix a été fait d'affiner la discrétisation horizontale dans tout le Bassin Potassique où la superficie des mailles a été divisée par 16 par rapport au modèle prototype, ce qui permet une bien meilleure individualisation des différents termes sources (infiltration sous les terrils, pompages dans les puits de fixation/dépollution ...).

De ce fait, le nouveau modèle, une fois calé, est par construction beaucoup plus précis que le précédent alors même que, comme pour le modèle prototype, on a conservé la discrétisation verticale en 3 couches avec des épaisseurs très variables dans l'emprise du modèle et très faibles dans le Bassin Potassique.

Les premiers tests ont montré que l'effet densitaire n'intervenait qu'au voisinage immédiat des terrils, et que le transport isodensitaire sous l'effet du gradient de pression seul était prépondérant à l'aval. D'autre part une simulation détaillée de l'effet densitaire au voisinage des terrils nécessiterait de faire des "zooms" sur les terrils à partir du modèle général, en multipliant le découpage vertical des couches.

Aussi, afin de ne pas compliquer inutilement les calculs déjà lourds, la décision a été prise de simuler l'effet densitaire sous les terrils en répartissant l'infiltration dans les 3 couches du modèle. Cette répartition est calée sur les teneurs observées dans les puits de fixation à l'aval des terrils et sur les cartes observées en 2004 dans chaque couche.

Cette décision de modélisateur a été actée en réunion du Comité de Pilotage du 27 avril 2005.

Les résultats sont présentés au § 4.3.

4.3. RESULTATS DU CALAGE DU MODELE NUMERIQUE

4.3.1. Perméabilités calées

Le champ de perméabilités après calage final est présenté aux figures 24 à 26 avec une échelle en 10^{-3} m/s.

On observe que les zones et valeurs de ce champ sont globalement en accord avec l'ordre de grandeur des premières estimations résultant de la géophysique et des mesures locales (pompages d'essai et débits spécifiques) présentées aux figures 14 à 16 du chapitre 3.

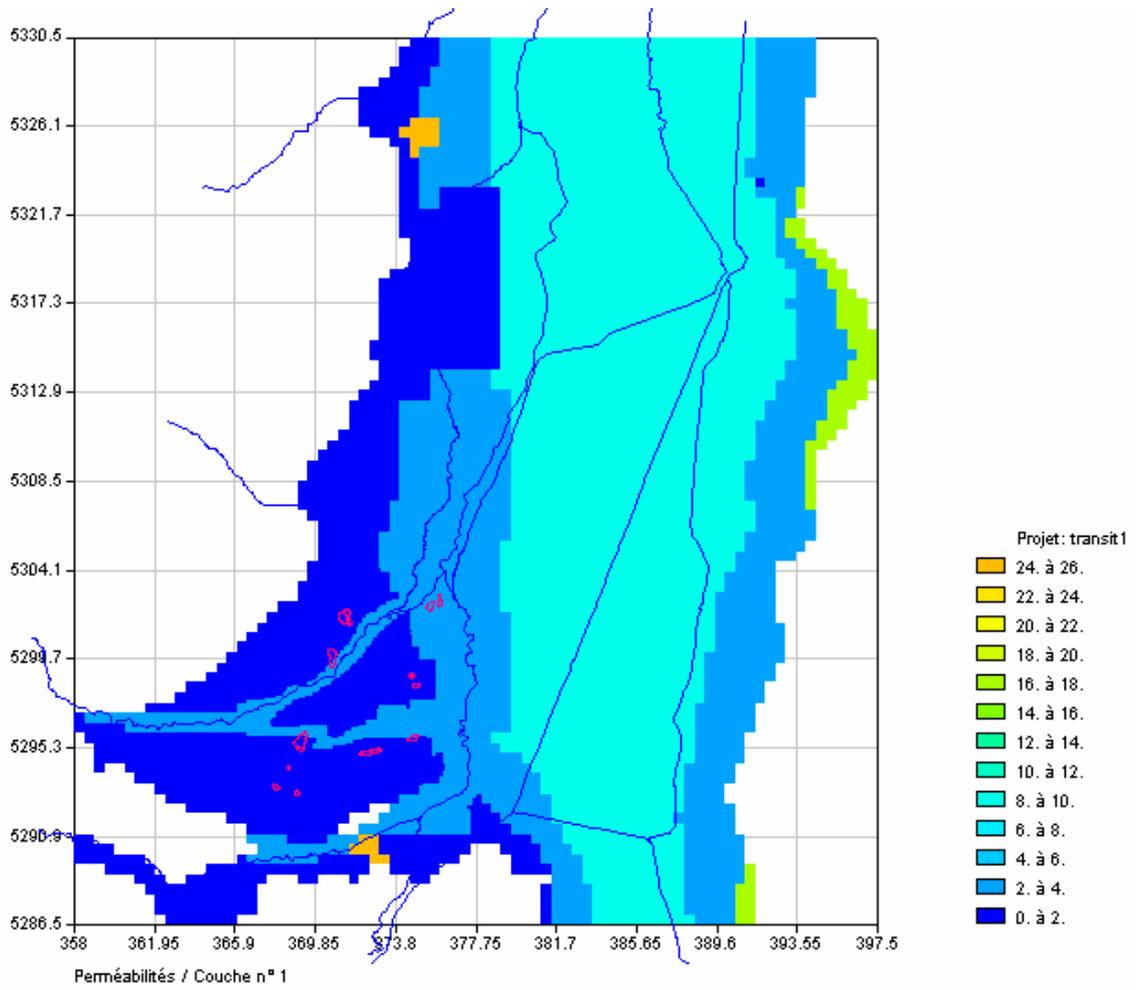


Figure 24 – Perméabilités de la couche 1 (en 10^{-3} m/s)

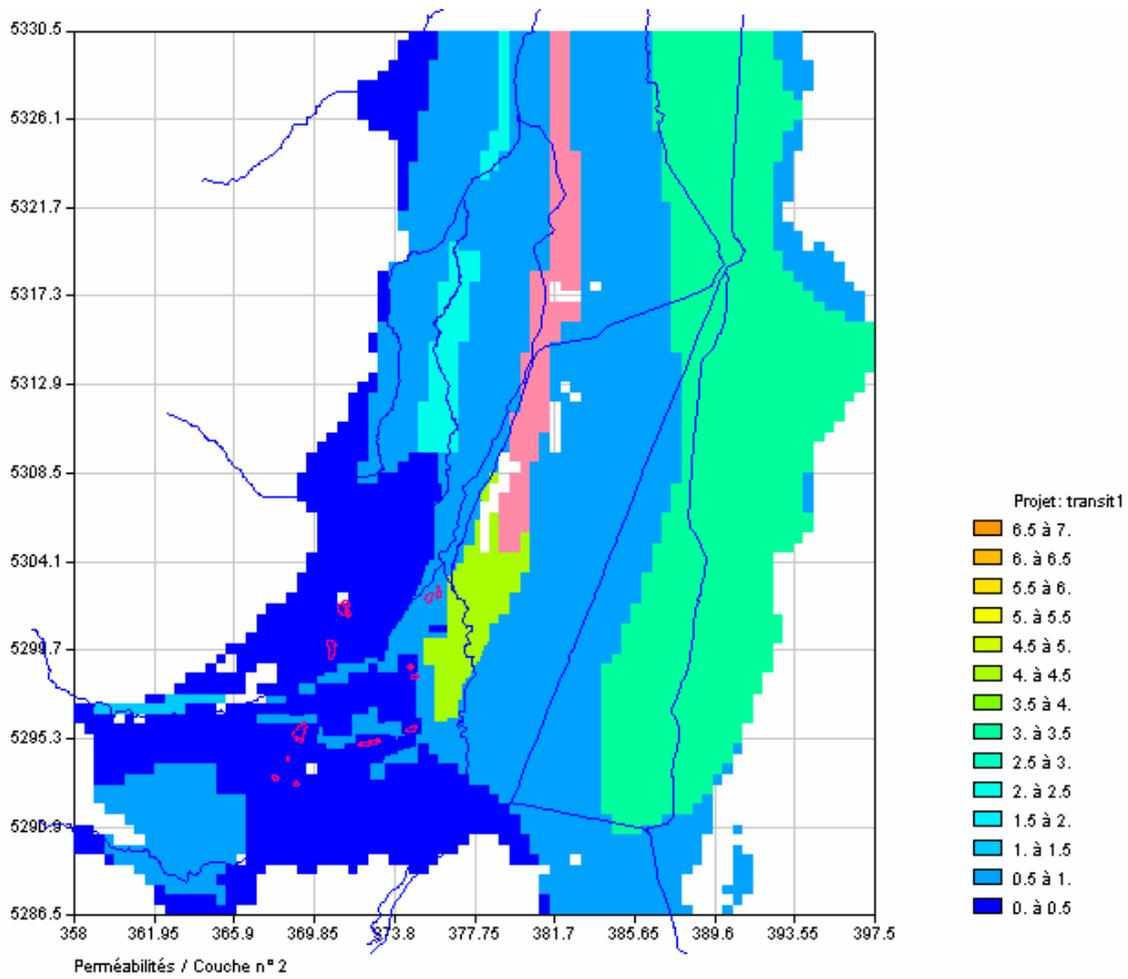


Figure 25 - Perméabilités de la couche 2 (en 10^{-3} m/s)

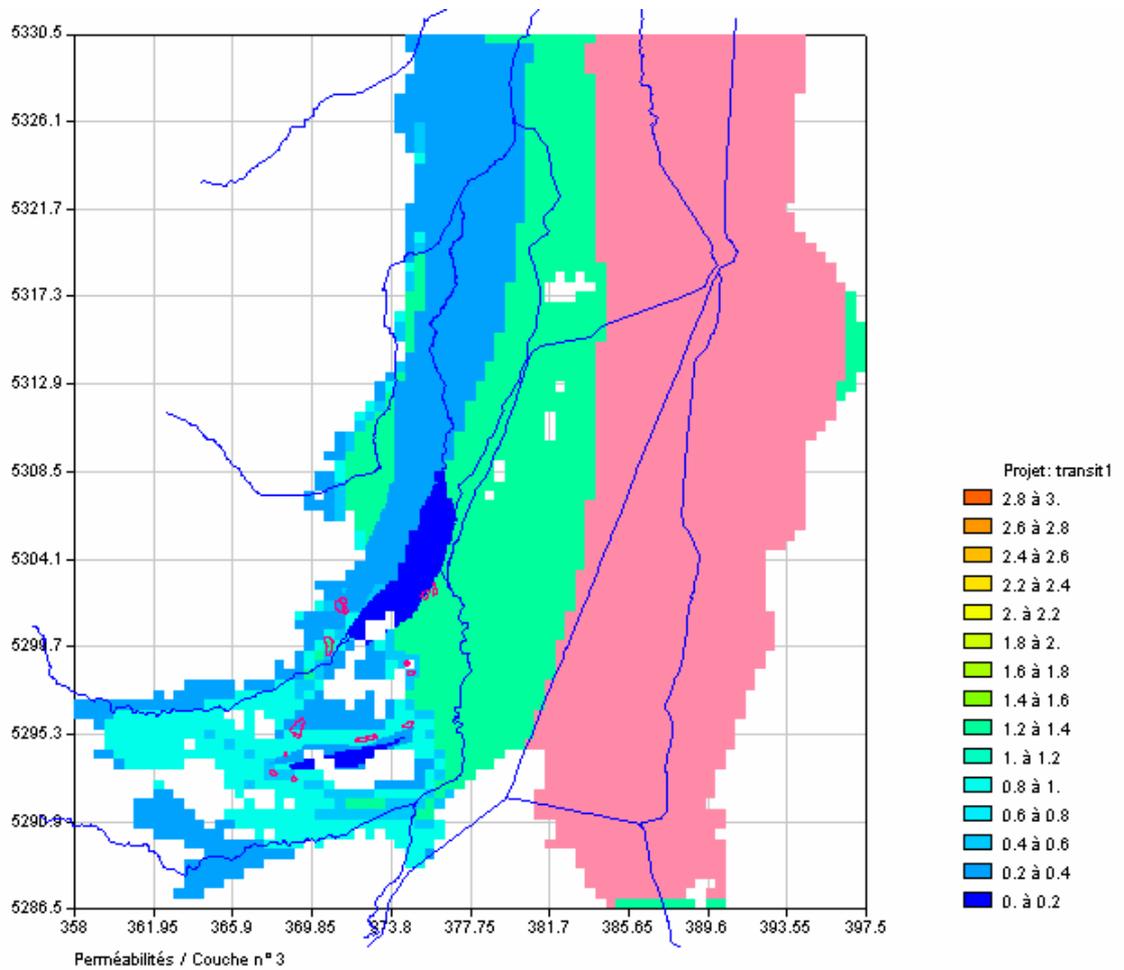


Figure 26 - Perméabilités de la couche 3 (en 10^{-3} m/s)

4.3.2. Piézométrie simulée en juin 2002

La figure 27 présente la carte de la piézométrie simulée avec les isovaleurs observées et simulées. Cette carte résulte du calage en régime permanent sur la situation de ME de juin 2002.

La superposition des isovaleurs montre que le calage est globalement tout à fait satisfaisant quoique un peu moins bon dans la zone des affaissements du Bassin Potassique.

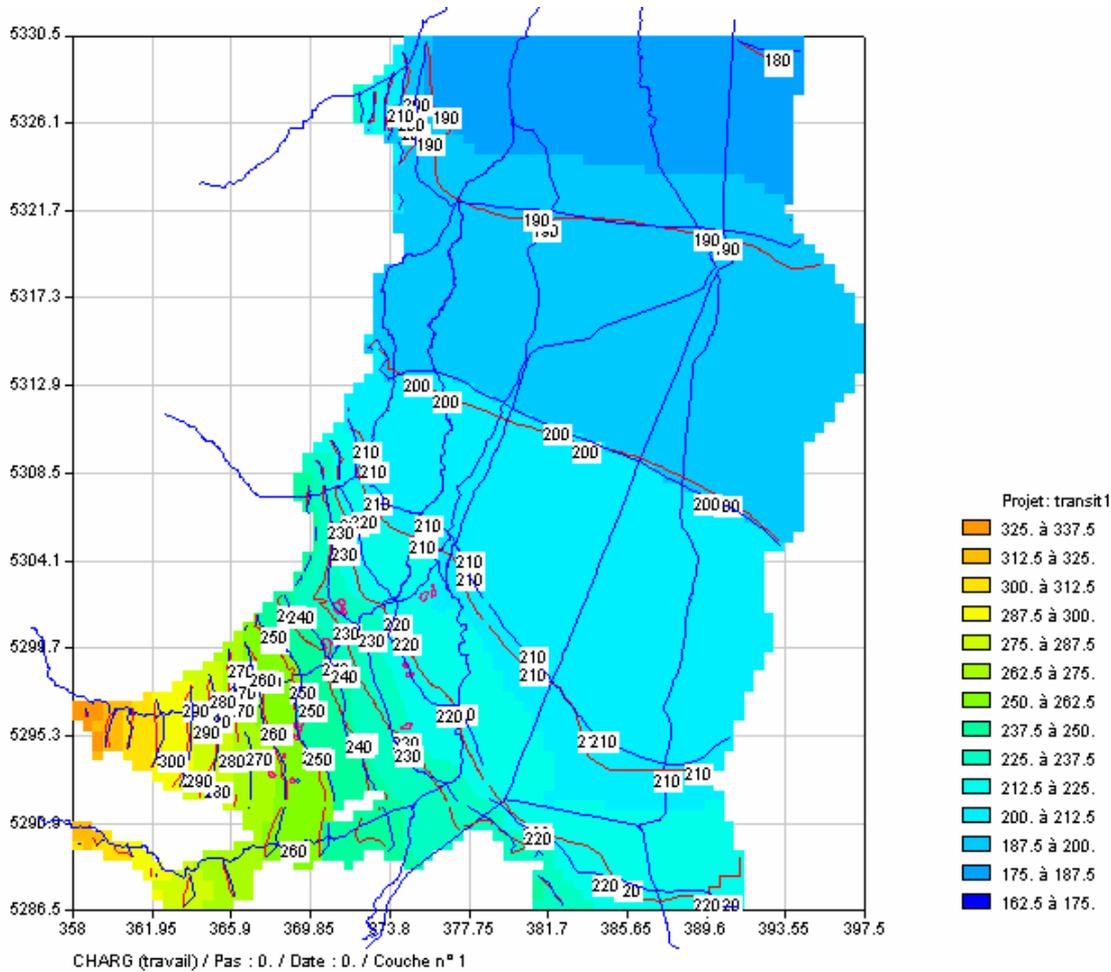


Figure 27 – Charges simulées en régime permanent (en m) avec isovalues simulées (en bleu) et observées (en rouge)

La carte piézométrique « observée » résulte d'une interpolation manuelle par l'hydrogéologue entre les valeurs mesurées ponctuellement ; la précision de cette carte dépend fortement de la densité des points de mesure et de leur répartition.

Ceci explique qu'il y ait inévitablement quelques écarts entre les isovalues observées et simulées comme il apparaît à la figure 27.

Afin de mieux expliciter ces résultats, on a représenté à la figure 28 la relation entre les valeurs simulées et observées aux points de mesure. On constate que la corrélation est excellente avec un coefficient d'ajustement très proche de 1. La moyenne des valeurs absolues des écarts est égale à 1.04 m.

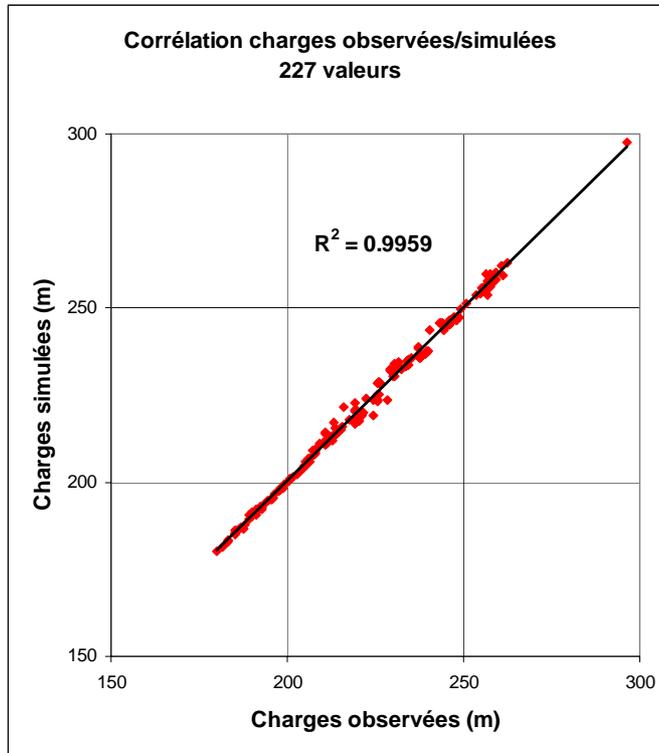


Figure 28 – Calage en régime permanent sur la situation de Juin 2002 - Corrélation entre charges observées et simulées

4.3.3. Emmagasinement et porosités calés

Le calage en régime transitoire permet d'obtenir le champ des coefficients d'emmagasinement libre et captif.

Si la perméabilité caractérise la capacité du milieu poreux saturé à favoriser l'écoulement, le coefficient d'emmagasinement caractérise sa capacité à stocker et à restituer l'eau.

Dans le modèle, il faut prendre en compte deux sortes de coefficients d'emmagasinement : le coefficient en nappe libre et le coefficient en nappe captive du fait de l'existence d'une géométrie multicouche :

- en nappe libre, le coefficient d'emmagasinement est proche de la porosité efficace de la formation exprimée en % ;
- en nappe captive, il caractérise la quantité d'eau que l'on peut extraire en décomprimant la formation saturée ; dans le modèle, on considère en fait le coefficient d'emmagasinement spécifique, exprimé en m^{-1} qui correspond à la proportion d'eau récupérée, rapportée à une hauteur unité de formation saturée.

Le calage conduit à une valeur de $10^{-4} m^{-1}$ du coefficient d'emmagasinement spécifique S_s uniforme dans le domaine.

En ce qui concerne l'emmagasinement libre S_L , on présente aux figures 29 à 31 le zonage résultant du calage. Les porosités cinématiques qui permettent de calculer les vitesses de transport de masse sont assimilées aux porosités efficaces et donc aux emmagasinevements libres.

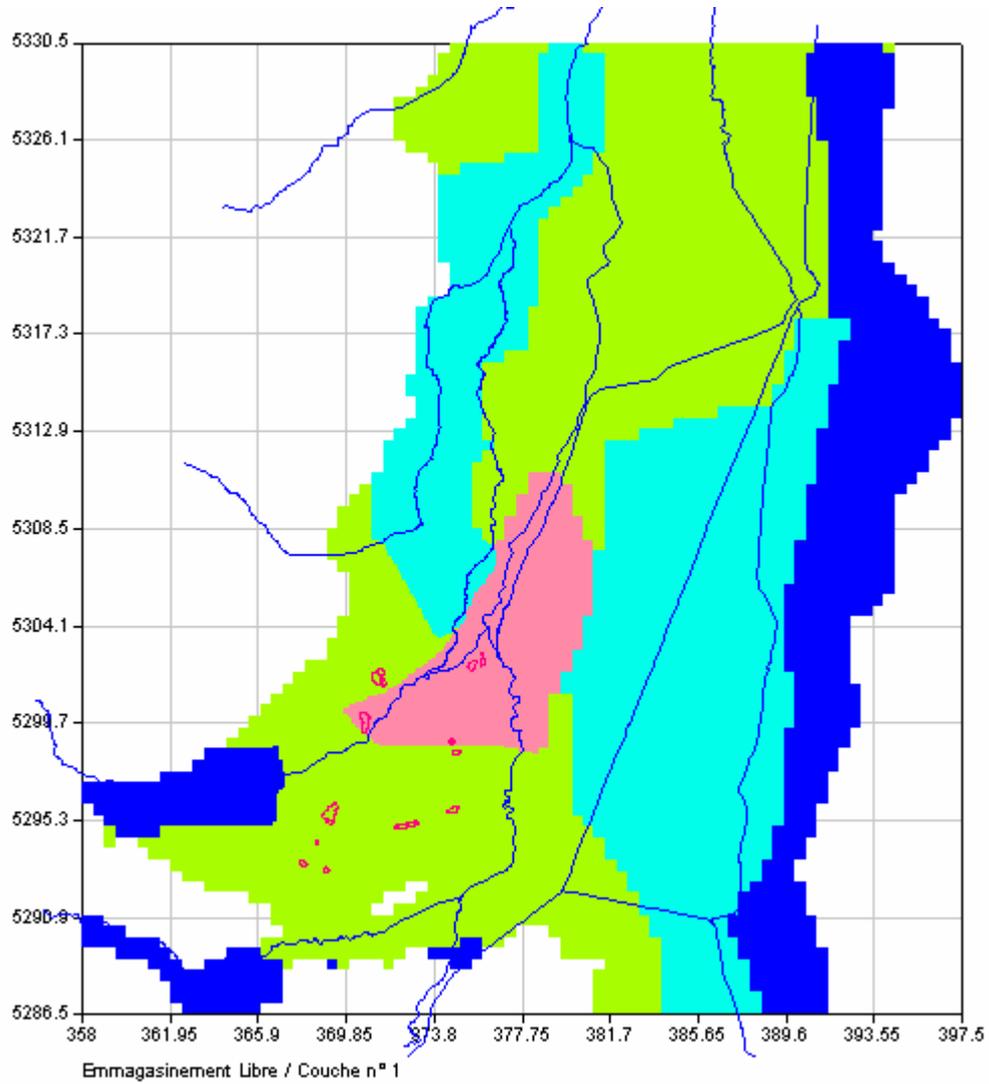
4.3.4. Historiques de charge

Le calage de l'hydrodynamique en régime transitoire permet de simuler les historiques de charge observés dont l'implantation est présentée à la figure 1.

On peut distinguer deux groupes d'historiques selon qu'ils sont situés dans la partie est du modèle, entre le Rhin et l'III ou bien dans la partie ouest du modèle soit dans le Bassin Potassique et en aval de celui-ci.

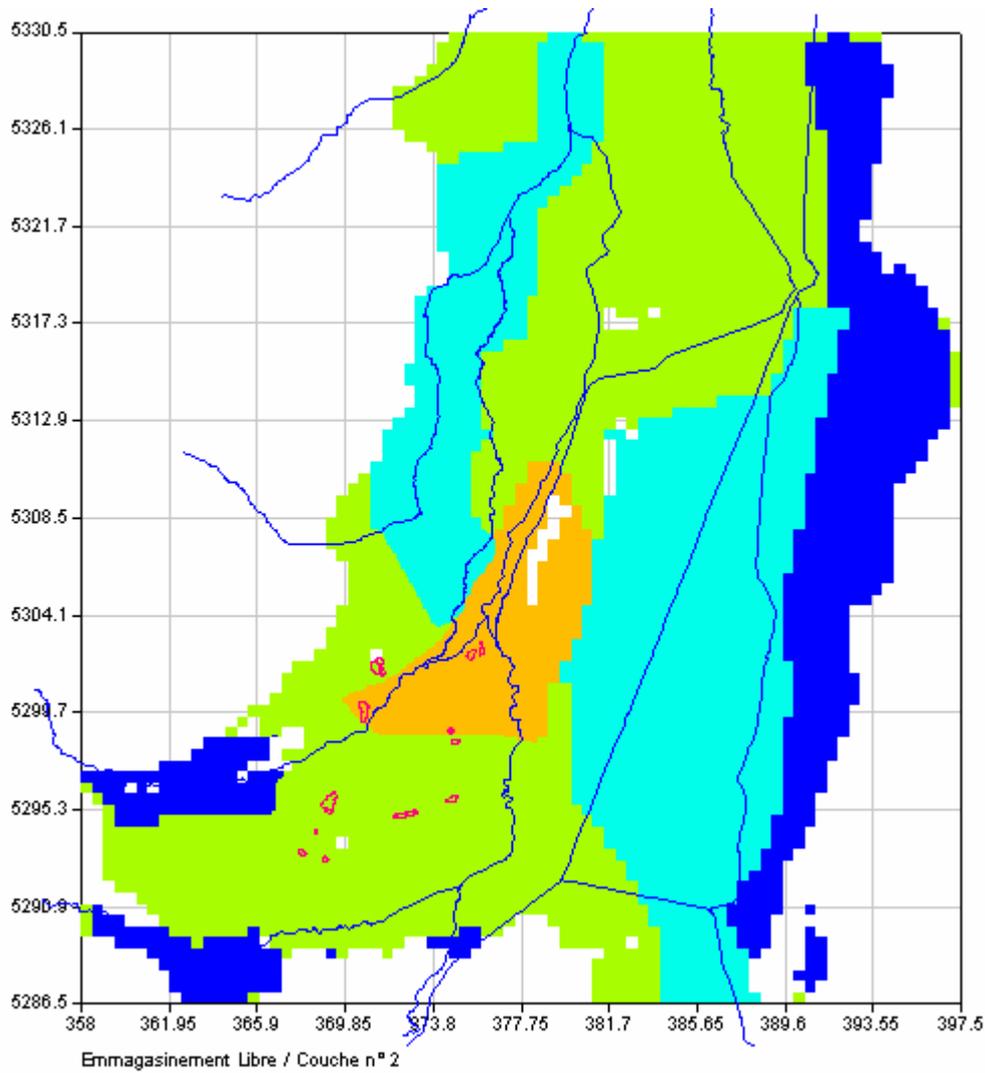
On présente en annexe 2 les résultats du calage sous la forme de graphes superposant les valeurs mesurées et simulées. On observe :

- une période de mise en régime du modèle sur quelques cycles hydrologiques, rendue nécessaire du fait de l'écart entre la situation simulée au départ (juin 2002) et la situation observée (janvier 1978) globalement plus basse, surtout dans le centre plaine ;
- ensuite à partir des années 90, une représentation de l'évolution des piézomètres plus ou moins bonne selon les points mais globalement tout à fait satisfaisante étant donné l'état des connaissances.



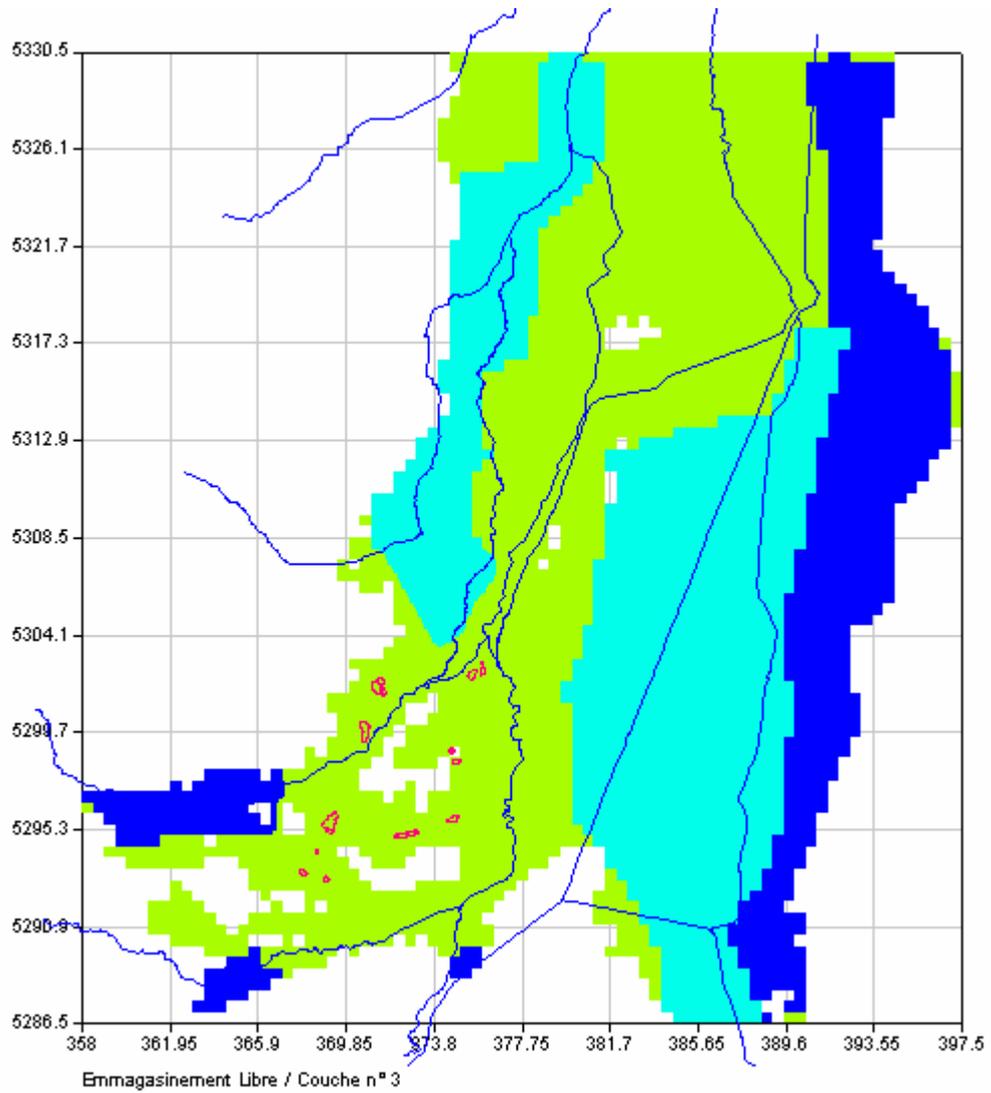
■	8
■	12
■	15
■	20

Figure 29 – Zonation des emmagasinelements libres en couche 1 et valeurs en %



	8
	12
	15
	16

Figure 30 - Zonation des emmagasineurs libres en couche 2 et valeurs en %



■	8
■	12
■	15

Figure 31 - Zonation des emmagasinelements libres en couche 3 et valeurs en %

4.3.5. Historiques de débit aux stations de jaugeage

On présente en annexe 3 les évolutions des débits observés et simulés aux 5 stations de jaugeage de contrôle du modèle.

Comme pour les piézomètres, la restitution est globalement satisfaisante, les étiages étant très bien restitués, les pointes un peu moins bien selon les cas.

4.3.6. Historiques de salure

On présente à l'annexe 4 les évolutions des chroniques de salure observées et simulées.

Pour plus de lisibilité, on n'a représenté que les évolutions aux couches captées, sauf lorsqu'il y avait une incertitude sur la position des crépines par rapport à la couche testée (cf. § 4.2.3).

On distingue a) Piézomètres de la langue Ouest du Nord au Sud, b) Piézomètres de la langue Est du Nord au Sud, c) Puits de fixation/dépollution.

Sur ces figures, il faut davantage considérer la pente et son sens de variation que la valeur absolue du point de départ des chroniques simulées, laquelle peut différer de la valeur observée du fait de la construction de la carte initiale par interpolation : les valeurs aux points observés ne se retrouvent pas nécessairement exactement au départ des courbes simulées.

Les intervalles de variation sont très différents d'un dessin à l'autre. On peut faire les remarques suivantes :

a) Piézomètres de la langue Ouest

- Au Nord du modèle, les simulations sur les puits de Colmar (03427X0001 et 03782X0059) ne permettent pas de restituer la croissance de la teneur observée en ces points ; on soupçonne l'existence d'une source complémentaire de chlorures à l'Ouest du modèle, qui pourrait provoquer les augmentations de teneur observées, hypothèse qui sera testée à l'aide du scénario 2.
- Les autres chroniques de la langue Ouest sont globalement bien restituées, tout particulièrement celle au puits EBE 03786X0029.

b) Piézomètres de la langue Est

- Les piézomètres les moins bien simulés sont les deux ouvrages 04131X0292 et 0293 en aval immédiat d'Amélie ; ceci pourrait être dû à des effets densitaires non pris en compte à proximité du terril.
- Par contre le 04131X0294 Nonnenbruch, situé un peu plus en aval dans l'axe de la langue salée d'Amélie, est bien reproduit.

c) Puits de fixation

- Pour les puits Dynamitière en aval de Marie-Louise, les teneurs simulées sont inférieures aux teneurs observées : on peut là encore suspecter les effets densitaires non pris en compte.
- Par contre, les puits de fixation en aval d'Amélie sont bien simulés. Il faut noter que les pics observés pendant les opérations de dissolution ne peuvent pas être reproduits par le modèle (la dissolution accélérée n'est pas spécifiquement prise en compte faute de données pertinentes disponibles).
- Les teneurs simulées aux puits de fixation Aire de stockage, Rodolphe, Alex et Ungersheim sont un peu faibles. Il faut cependant tenir compte des phases de dissolution accélérée pour Alex et Rodolphe, entre 91 et 95, qui ne peuvent être simulées : elles ont un impact sur l'évolution de la concentration même après arrêt de la dissolution d'où un écart entre observé et simulé qui ne peut être résorbé.
- Les puits Ensisheim, Fernand et Eugène sont bien simulés.
- Le puits de fixation Théodore montre des pics observés pendant les opérations de dissolution qui ne peuvent pas être reproduits.
- Au puits Joseph Else – Est, les teneurs simulées sont sous estimées ; par contre le puits Joseph Else – Ouest est bien simulé.

4.3.7. Cartes de concentration observées et simulées en 2004

Aux figures 32 à 34, les cartes de concentration observées et simulées en 2004 sont présentées, pour chaque couche du modèle, avec l'échelle de couleur définie par le Comité de Pilotage.

Ces cartes appellent les observations suivantes :

Couche 1

Langue Ouest	Teneurs bien simulées ; la branche ouest de la langue n'est pas simulée en l'absence d'une autre source de salure
Terrils Marie-Louise et Alex-Rodolphe	Les teneurs apparaissent trop fortes en aval (puits de fixation sous-estimés)
Langue Est	Teneurs bien simulées mais étalement excessif de la langue vers l'Est
Terrils Ensisheim	La simulation montre un effet de dilution par les infiltrations de l'III qui est probablement plus exact que la carte "observée"
Terrils Théodore et Eugène	Impact de Théodore plus faible car la dissolution accélérée n'est pas simulée
Terrils Amélie, Anna et Fernand	Simulation très bonne
Terrils et langue Joseph Else	Impact des terrils beaucoup trop fort : mauvaise simulation de la fixation

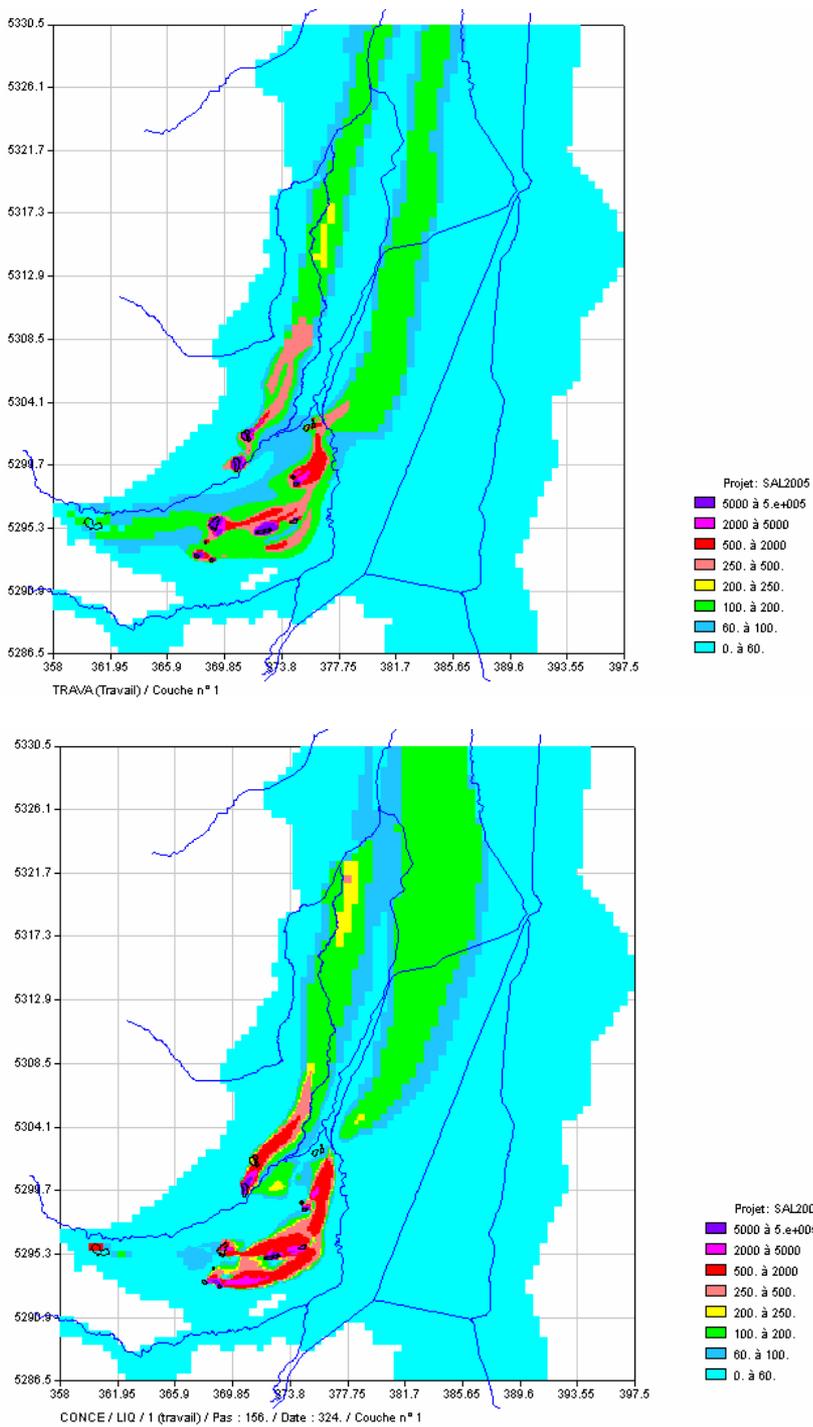


Figure 32 – Cartes de concentrations observées (en haut) et simulées (en bas) en 2004 (mg/L) couche 1

Couche 2

Langue Ouest	Teneurs un peu sous-estimées ; la branche ouest de la langue n'est pas simulée en l'absence d'une autre source de salure
Terrils Marie-Louise et Alex-Rodolphe	Les teneurs apparaissent trop fortes en aval (puits de fixation sous-estimés)
Langue Est	Teneurs bien simulées
Terrils Ensisheim	Bonne simulation
Terrils Théodore et Eugène	Simulation acceptable, les teneurs observées à l'amont ne peuvent être expliquées (source naturelle ?)
Terrils Amélie, Anna et Fernand	Simulation très bonne
Terrils et langue Joseph Else	Impact des terrils trop fort. On remarque sur la carte simulée une langue salée s'écoulant vers le NE entre Amélie et Anna. Ce phénomène n'est pas observé du fait du manque de piézomètres dans ce secteur et mériterait d'être contrôlé par géophysique.

Couche 3

Langue Ouest	Teneurs bien simulées
Terrils Marie-Louise et Alex-Rodolphe	Les teneurs apparaissent trop fortes en aval (puits de fixation sous-estimés)
Langue Est	Teneurs bien simulées
Terrils Ensisheim	Les teneurs en aval des terrils apparaissent plus élevées dans la simulation, mais nous n'avons pas de piézomètres pour trancher.
Terrils Théodore et Eugène	Simulation acceptable
Terrils Amélie, Anna et Fernand	Simulation bonne sauf au niveau d'Amélie où les teneurs sont sous-estimées (non prise en compte des effets densitaires ?)
Terrils et langue Joseph Else	Simulation acceptable.

On observe un bon accord global du simulé à l'observé, en dehors de certains terrils où soit la fixation n'est pas bien reproduite et les teneurs en aval apparaissent surestimées, soit les concentrations élevées observées sous les terrils sont sous-estimées. Ces défauts peuvent être imputés soit à la non prise en compte de la dissolution accélérée dans le modèle soit à la non prise en compte des effets densitaires sous les terrils.

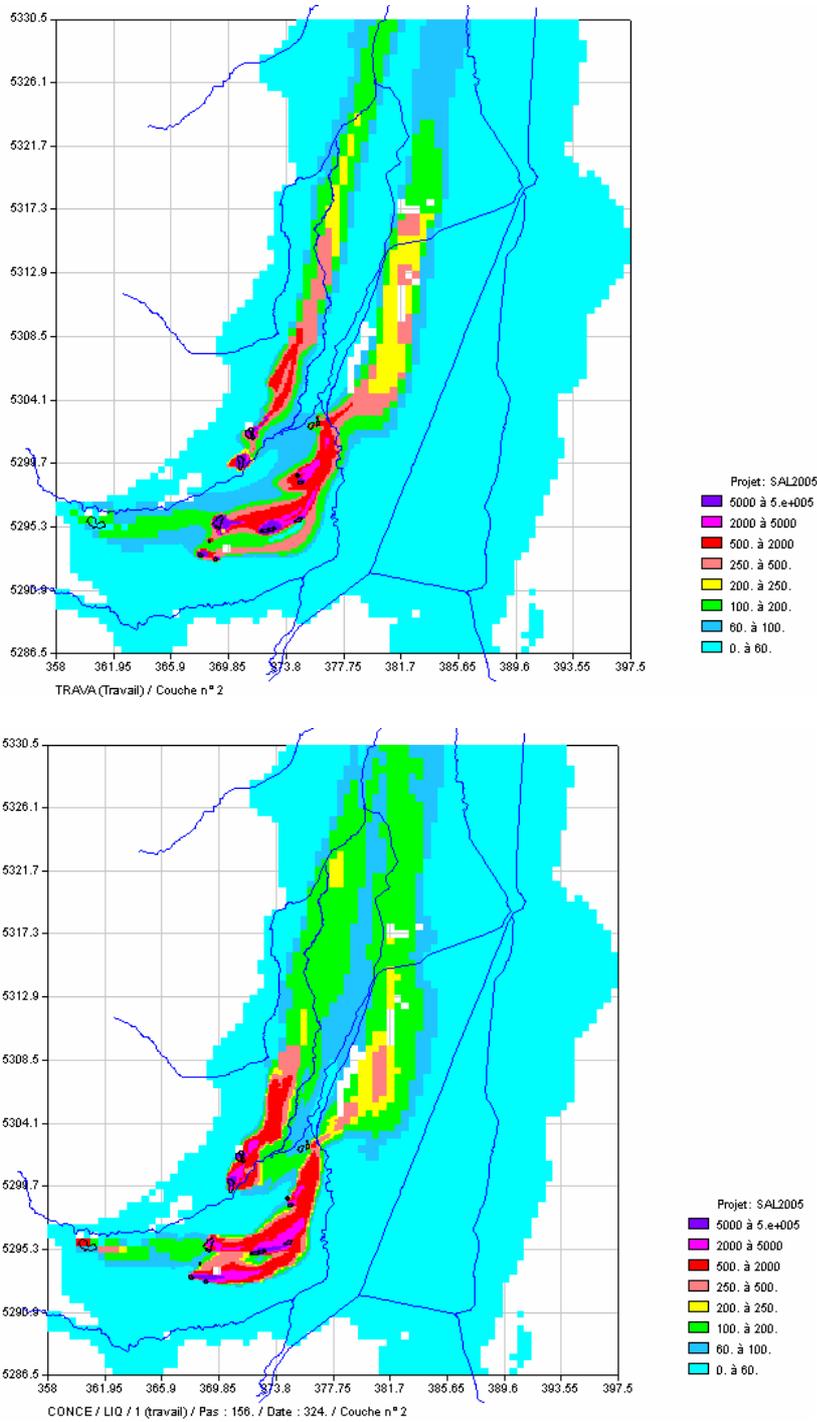


Figure 33 – Cartes de concentrations observées (en haut) et simulées (en bas) en 2004 (mg/L) couche 2

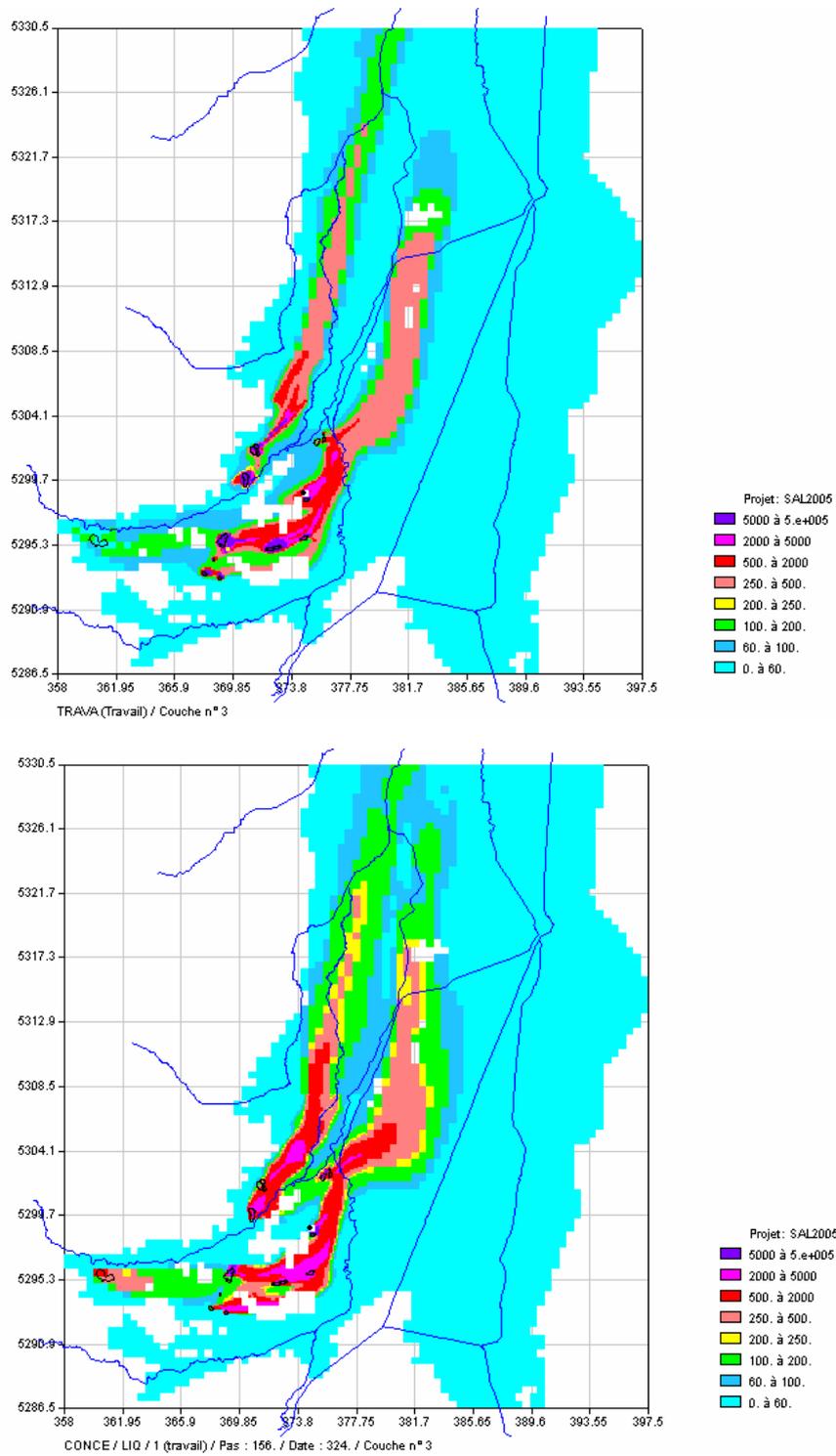


Figure 34 – Cartes de concentrations observées (en haut) et simulées (en bas) en 2004 (mg/L) couche 3

4.3.8. Calcul du tonnage de chlorures dans la nappe

A la demande du Comité de pilotage, le tonnage de chlorures présents dans la nappe calculé par le modèle a été comparé au tonnage de chlorures estimé par le BRGM et les MDPA en 2004 suivant différentes méthodes de calcul.

En effet le BRGM (Service géologique régional Alsace) a effectué un calcul de cubage des chlorures dans la nappe en 2004 à partir de cartes d'isovaleurs pour chaque couche du modèle. Le cubage est effectué par la méthode des sections pour chaque couche, à la teneur de coupure de 250 mg/L, en prenant en compte les mêmes épaisseurs que dans le modèle, mais avec des porosités uniformes pour chaque couche : 15 % pour les alluvions récentes, 10 % pour les alluvions anciennes argileuses et 15 % pour les alluvions de base graveleuses.

Ce cubage donne une estimation de 455 000 tonnes de chlorures dans la nappe en 2004. La difficulté de ce type de calcul tient dans le choix de la valeur de concentration prise pour chaque isocontour (la concentration moyenne de la surface entre les contours à 1 g/L et à 5 g/L par exemple est impossible à déterminer de façon exacte par des méthodes manuelles). Le tonnage des langues salées aval, dont la surface immense est multipliée par une valeur moyenne arbitraire, est de ce fait très incertain.

Les MDPA ont de leur côté évalué le tonnage de chlorures dans la nappe à partir d'un bilan historique des infiltrations des terrils et des tonnages extraits de la nappe par les pompages, et aboutissent à une estimation de 436 000 tonnes de chlorures dans la nappe en 2004. Ce cubage, bien que cohérent avec le précédent, ne prend cependant pas en compte de teneur de coupure et néglige donc les chlorures disparus par dilution en aval. Si les tonnages extraits de la nappe sont des grandeurs mesurées, il faut bien noter que les tonnages infiltrés dans la nappe sont des estimations très approximatives (basées sur le rapport Graillat de 1980), dont la précision est impossible à évaluer.

Il était donc intéressant de comparer ces estimations convergentes malgré leur mode de calcul très différent avec le tonnage de chlorures présents dans la nappe en 2004 d'après la simulation. Ce tonnage est de 332 000 tonnes à la teneur de coupure de 250 mg/L, en prenant en compte la géométrie du modèle (épaisseurs mouillées des alluvions) et les porosités issues du calage des évolutions piézométriques et du transport. On constate que les tonnages obtenus par les estimations des MDPA et par la cartographie du BRGM sont supérieurs de plus de 25 % aux calculs du modèle de simulation (tableau 11).

Une différence de 25 % entre des cubages aussi complexes n'est pas *a priori* déraisonnable : en exploitation minière on qualifie des réserves affectées d'une incertitude de ± 25 % de certaines à probable, suivant le type de minerai considéré.

Une comparaison détaillée fait apparaître que la moitié de la différence entre les deux calculs (60 000 tonnes de moins dans le modèle) est localisée dans les couches 1 et 3 de la langue salée du terril Amélie aux terrils Fernand-Anna (tableau 11). En effet, comme nous l'avons vu plus haut, les concentrations calculées par le modèle sont beaucoup plus faibles que les concentrations observées sous et à l'aval immédiat du

terril Amélie, ce qu'on peut attribuer à la fois à la non prise en compte des travaux de dissolution accélérée qui réalimentent en continu le stock de saumures concentrées sous le terril (on observe en effet des concentrations jusqu'à 40 g/L en profondeur sous certains terrils) et à la non prise en compte par le modèle de l'effet densitaire qui fixe ces saumures sur place.

La même observation peut être faite à propos des secteurs Marie-Louise (près de 30 000 tonnes de moins dans le modèle) et Théodore-Eugène (13 000 tonnes de moins), et ce pour les mêmes raisons de non-prise en compte des travaux de dissolution en cours.

En ce qui concerne le secteur Joseph Else par contre, le modèle donne plus de 20 000 tonnes de plus que le calcul manuel, notamment au niveau de la couche 2. Ceci peut s'expliquer par des problèmes de géométrie (les terrils sont en effet très petits par rapport aux mailles du modèle), et par un manque de données dans cette couche pouvant avoir entraîné une sous-estimation du tonnage par le calcul manuel.

Pour se rendre compte de l'effet des fortes concentrations sur le cubage de la salure, il faut considérer que les environs immédiats du terril Amélie représentent près de 20 000 tonnes de chlorures si l'on suppose que ces chlorures ont une teneur moyenne de 15 g/L. Or cette teneur moyenne pourrait aussi bien être du double, portant le stock à Amélie à 40 000 tonnes de chlorures sur un demi-kilomètre carré.

En conclusion sur cet aspect du problème, on notera que les 3 méthodes de calcul décrites ci-dessus, basées sur des hypothèses différentes et comportant chacune une part d'imprécision due au mode de calcul choisi et aux aspects physiques négligés dans chaque cas, présentent toutes une incertitude importante et que les évaluations du tonnage de sel contenu dans la nappe doivent être considérées avec beaucoup de précaution.

Résultats du modèle pour 2004

Secteur	Couche	Tonnage Cl (t)	Différence avec le cubage manuel
Amélie-Fernand-Anna	Couche 1	1504	-33509
	Couche 2	59606	4045
	Couche 3	16461	-33355
	<i>Total</i>	<i>77571</i>	<i>-62819</i>
Joseph-Else	Couche 1	5119	1544
	Couche 2	35256	28575
	Couche 3	6436	-8657
	<i>Total</i>	<i>46811</i>	<i>21463</i>
Langue Est	Couche 1	0	-3821
	Couche 2	13070	-47766
	Couche 3	37163	14844
	<i>Total</i>	<i>50233</i>	<i>-36743</i>
Langue Ouest	Couche 1	7167	-8537
	Couche 2	57893	-8812
	Couche 3	38227	12780
	<i>Total</i>	<i>103287</i>	<i>-4570</i>
Marie-Louise	Couche 1	3442	-889
	Couche 2	8178	-6711
	Couche 3	3089	-19316
	<i>Total</i>	<i>14709</i>	<i>-26916</i>
Theodore-Eugene	Couche 1	4616	-4304
	Couche 2	27702	-8708
	Couche 3	7512	-666
	<i>Total</i>	<i>39830</i>	<i>-13678</i>
Grand total	Couche 1	21848	-49515
	Couche 2	201705	-39376
	Couche 3	108889	-34371
	<i>Total</i>	<i>332442</i>	<i>-123262</i>

Tableau 11 – Calcul du tonnage de chlorures dans la nappe en 2004

4.3.9. Conclusions sur le calage

Si l'on considère la complexité du problème à traiter :

- complexité de la géométrie induisant des risques de dénoyage et de problèmes numériques : couches d'épaisseur très variable, disparaissant localement ; épaisseur très faible dans le Bassin Potassique ; zone d'affaissement de la topographie ; forte hétérogénéité des paramètres physiques ;
- complexité des phénomènes pris en compte impliquant un grand nombre de paramètres à caler : interactions dynamiques entre aquifère et réseau

hydrographique (rivières, canaux, drains) ; transport de masse avec de forts gradients au voisinage des terrils source ;

le calage réalisé est assez satisfaisant.

Les défauts du modèle apparaissent essentiellement au voisinage immédiat des terrils et ne devraient pas pénaliser la simulation à long terme du devenir des langues aval.

5. Scénarios d'exploitation

Suite au calage du modèle, différents scénarios d'exploitation ont été simulés à la demande du Comité de Pilotage. Ils sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Scénario	Période 1991-2004	Période 2004-2014	Période 2014-2027
Scénario tendanciel		<i>Prévisions d'arrêt successif des pompages par les MDPA</i>	<i>Tous les pompages de fixation/dépollution sont à l'arrêt</i>
Scénario 1		<i>Les pompages de fixation/dépollution sont maintenus au régime 2005-2006</i>	<i>Les pompages de fixation/dépollution à moins de 200 mg/L en 2014 sont à l'arrêt</i>
Scénarios 1 bis et 1 ter		<i>Comme scénario 1 avec différentes hypothèses sur le fonctionnement des puits EBE</i>	
Scénario 2	<i>Source supplémentaire entre Ungersheim et Raedersheim</i>		

Tableau 12 – Scénarios d'exploitation du modèle

5.1. SCENARIO TENDANCIEL

5.1.1. Définition du scénario

Ce scénario prévisionnel correspond aux hypothèses suivantes :

- simulation de décembre 2004 à décembre 2014 ;
- répétition des données des cycles hydroclimatiques de 1991 à 2000 ;
- valeurs 2004 des concentrations des rivières conservées ;
- arrêt de l'infiltration sous le terzil de l'Ochsenfeld à partir de 2005 ;
- prélèvements et flux de masse de 2004 à 2014 selon les prévisions actuelles des MDPA (cf. annexe 5)

5.1.2. Cartes simulées en 2014

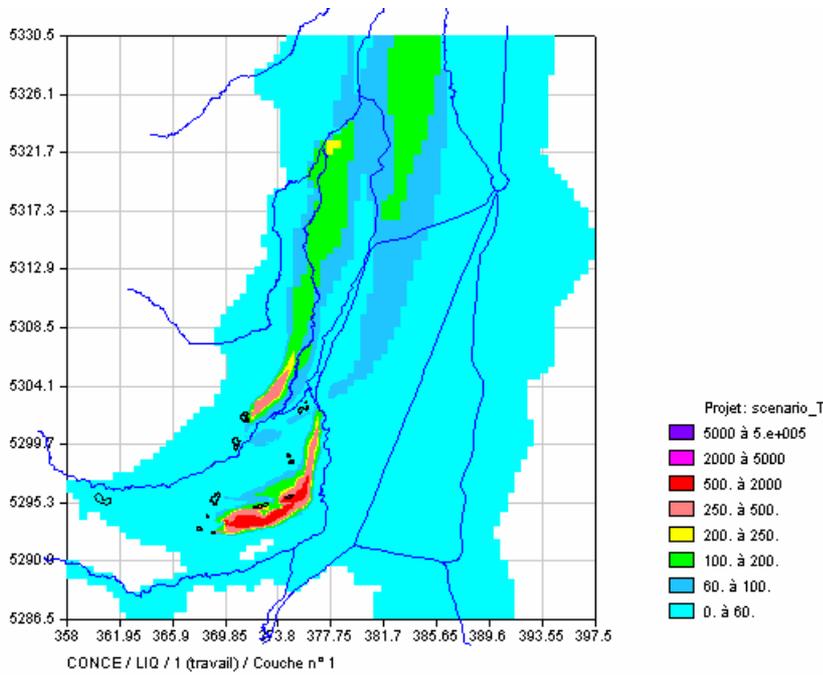


Figure 35 – Scénario tendanciel – concentrations en 2014 (mg/L) – couche 1

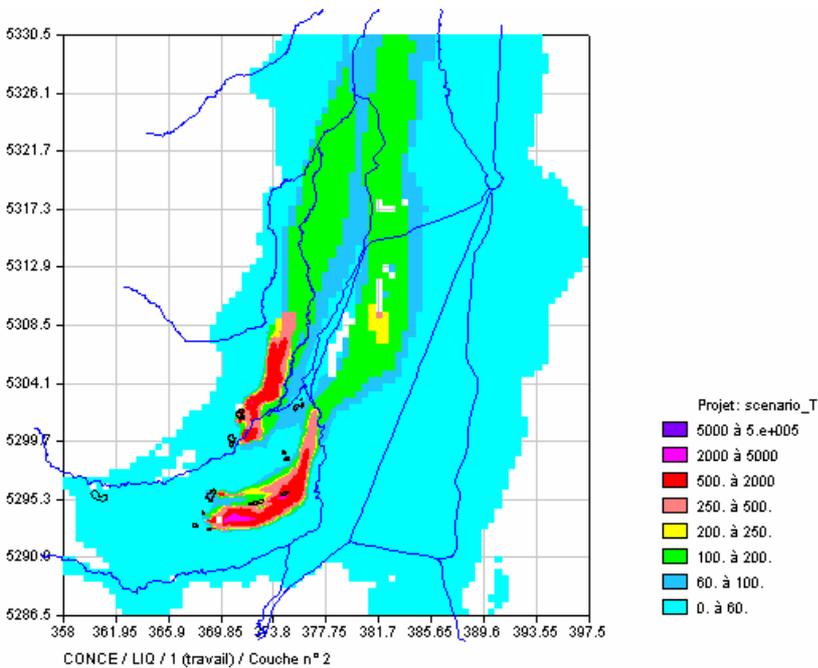


Figure 36 - Scénario tendanciel – concentrations en 2014 (mg/L) – couche 2

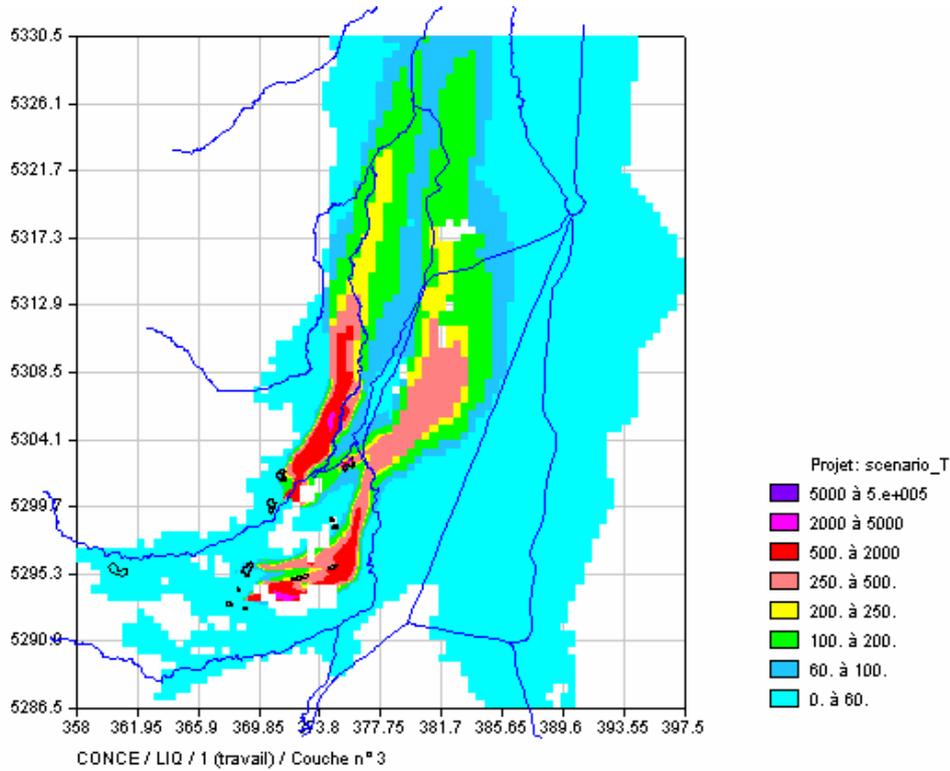


Figure 37 - Scénario tendanciel – concentrations en 2014 (mg/L) – couche 3

5.1.3. Suite du scénario tendanciel

En fin 2014, on arrête tous les prélèvements aux puits de fixation/dépollution et on poursuit la simulation jusqu'en 2027.

Les figures 38 à 40 présentent les résultats obtenus en 2027. On constate que la couche 1 est pratiquement totalement nettoyée. Pour ce qui est de la couche 2, seule la langue Est est totalement nettoyée en 2027. En couche 3, il reste une petite zone à teneur supérieure à 200 mg/L dans la langue Est.

La langue Ouest se nettoie beaucoup plus lentement du fait de plus faibles perméabilités en couches 2 et 3, en particulier à l'aval des terrils Alex et Marie-Louise.

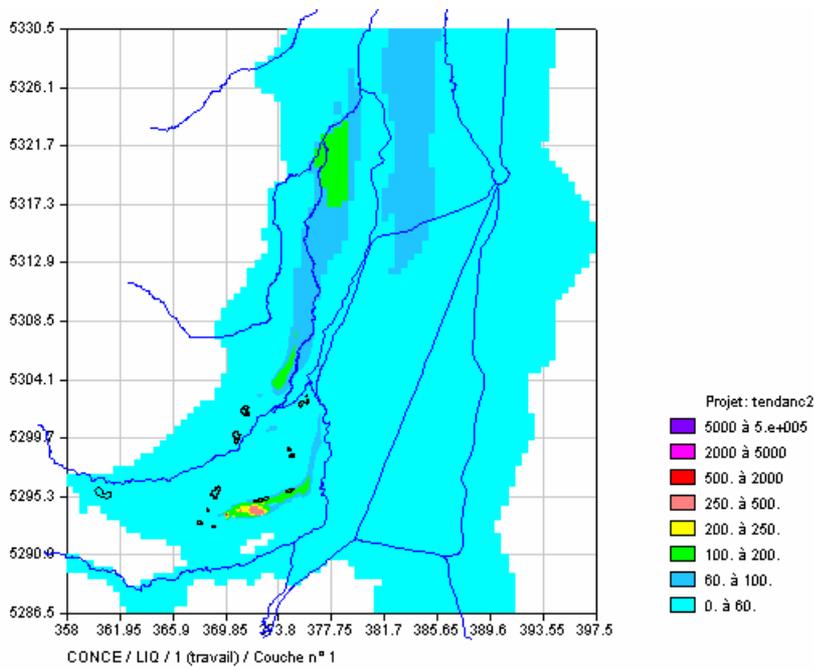


Figure 38 - Scénario tendanciel – concentrations en 2027 (mg/L) – couche 1

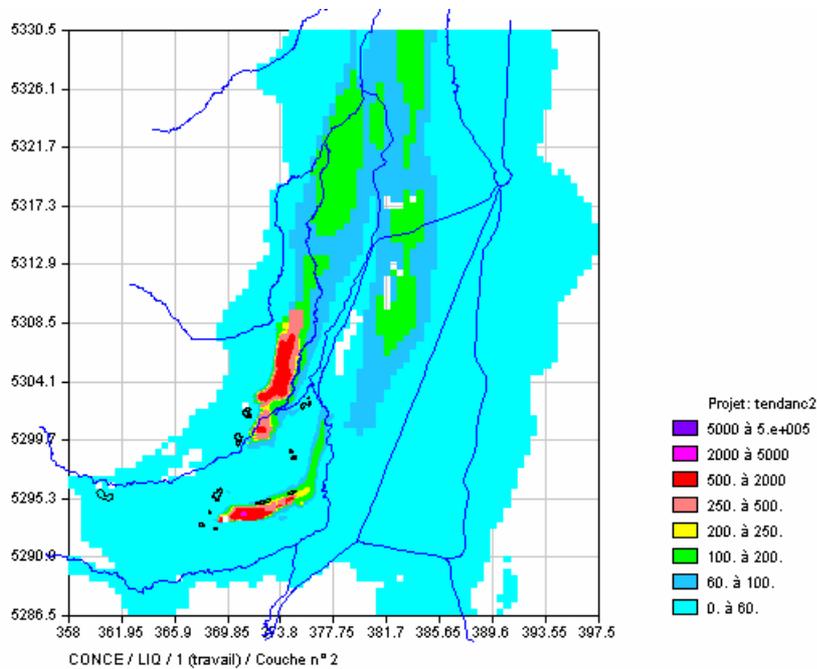


Figure 39 - Scénario tendanciel – concentrations en 2027 (mg/L) – couche 2

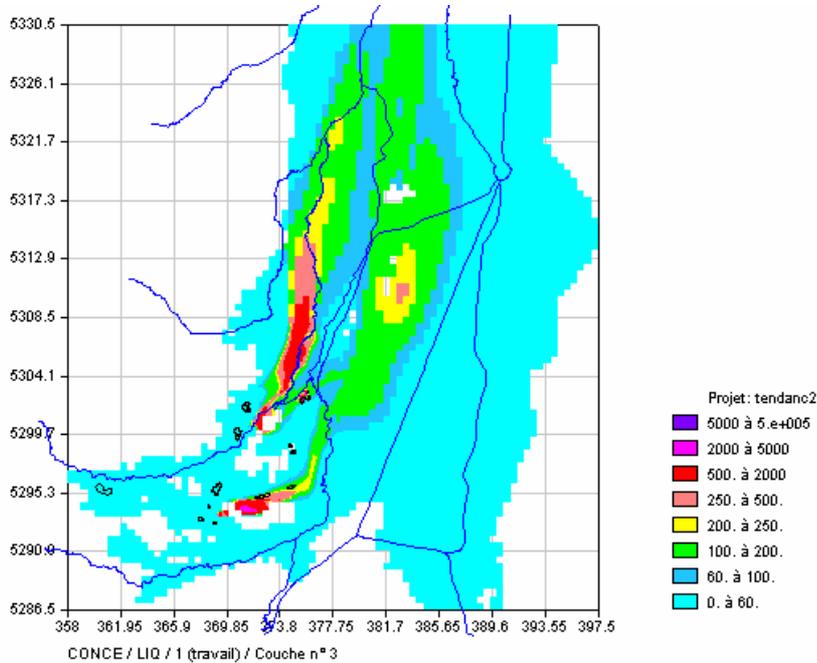


Figure 40 - Scénario tendanciel – concentrations en 2027 (mg/L) – couche 3

5.2. SCENARIO 1

5.2.1. Définition du scénario

Ce scénario prévisionnel correspond aux hypothèses suivantes :

- simulation de décembre 2004 à décembre 2014 ;
- répétition des données des cycles hydroclimatiques de 1991 à 2000 ;
- valeurs 2004 des concentrations des rivières conservées ;
- arrêt de l'infiltration sous le terriil de l'Ochsenfeld à partir de 2005 ;
- prélèvements de 2006 conservés pour les puits de fixation/dépollution
- flux de masse de 2004 à 2014 selon scénario MDP.

5.2.2. Cartes simulées en 2014

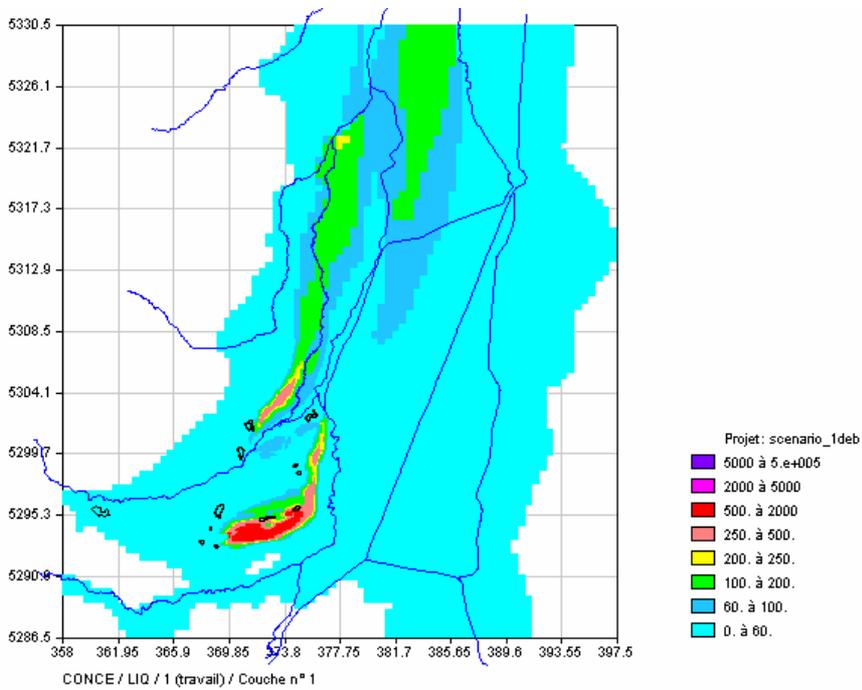


Figure 41 – Scénario 1 – concentrations en 2014 (mg/L) – couche 1

Les différences avec les résultats du scénario tendanciel (fig. 35 à 37) sont faibles et limitées au voisinage des terrils.

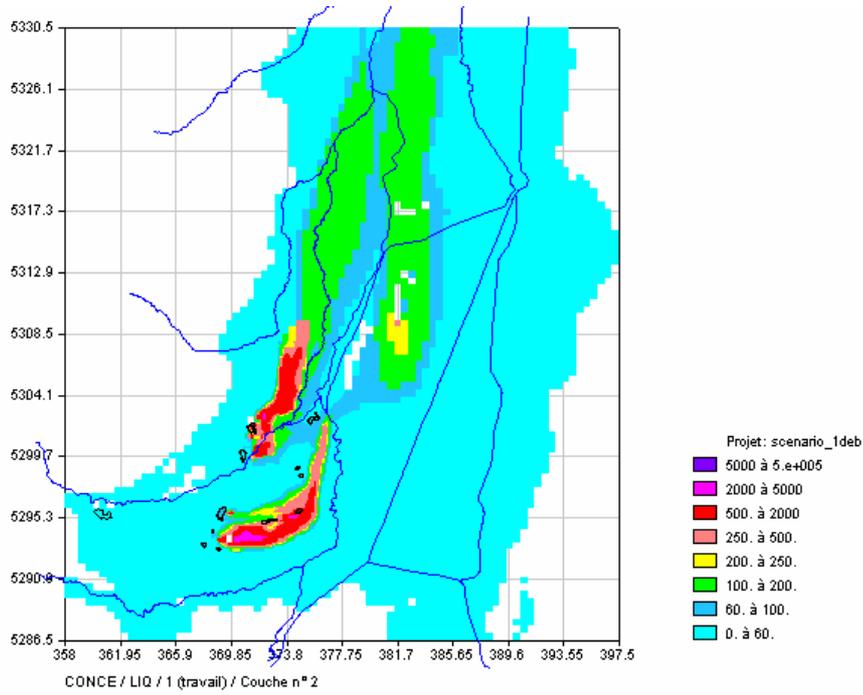


Figure 42 - Scénario 1 – concentrations en 2014 (mg/L) – couche 2

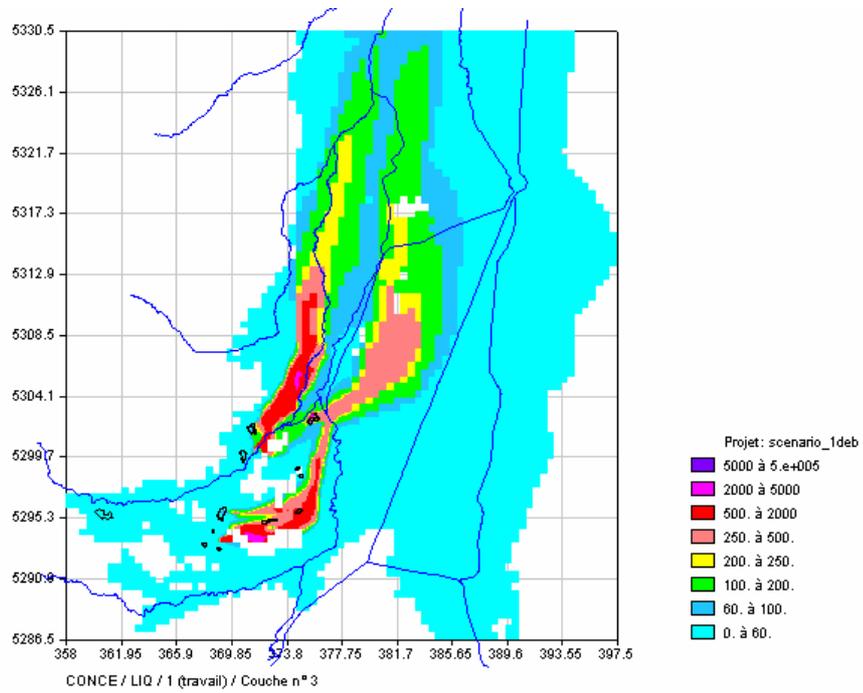


Figure 43 - Scénario 1 – concentrations en 2014 (mg/L) – couche 3

5.2.3. Cartes des écarts entre scénario tendanciel et scénario 1 en 2014

Les figures 44 à 46 sont obtenues en soustrayant les concentrations calculées avec le scénario 1 de celles calculées avec le scénario tendanciel en 2014.

On a dû définir une nouvelle échelle ; à noter que certaines plages de valeur sont négatives ; ce qui signifie qu'il existe des zones (réduites) où le scénario 1 produit une concentration plus élevée que le tendanciel.

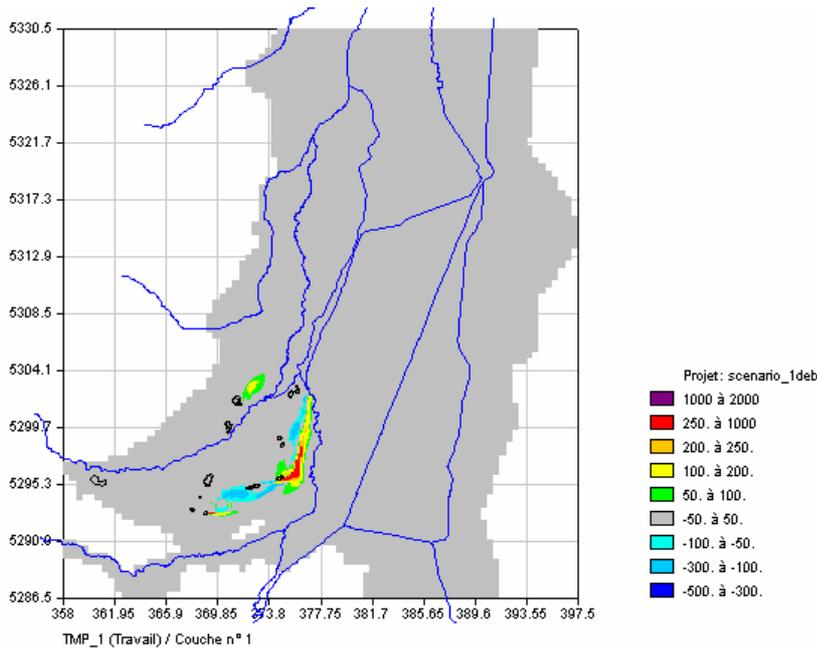


Figure 44 – Ecart en mg/L entre concentrations en 2014 calculées avec le scénario tendanciel et avec le scénario 1 (couche 1)

L'examen des 3 couches montre que des différences importantes (> 50 mg/L en valeur absolue) n'apparaissent que dans le Bassin Potassique, en particulier à l'aval du terriL Fernand où les écarts atteignent de l'ordre de 500 mg/L dans la couche 1, 1000 mg/L dans la couche 2 puis à nouveau 500 mg/L dans la couche 3.

Globalement les très forts écarts (-500 à -300 et 1000 à 2000) sont limités à des zones restreintes à l'aval immédiat de certains terrils, soit Fernand, Joseph Else Est, Amélie Nord et Alex-Rodolphe pour la couche 2 et au voisinage des terrils d'Ensisheim pour la couche 3.

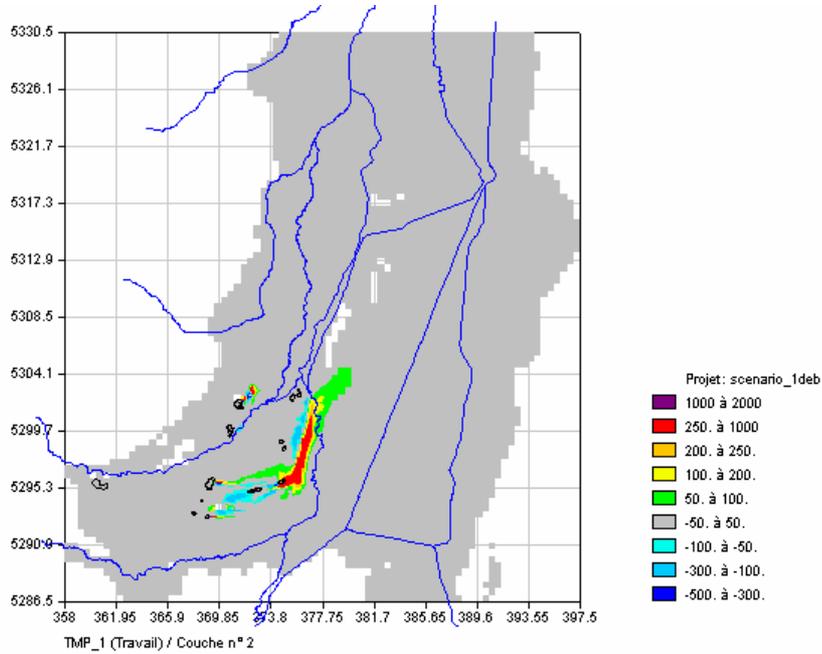


Figure 45 - Ecart en mg/L entre concentrations en 2014 calculées avec le scénario tendanciel et avec le scénario 1 (couche 2)

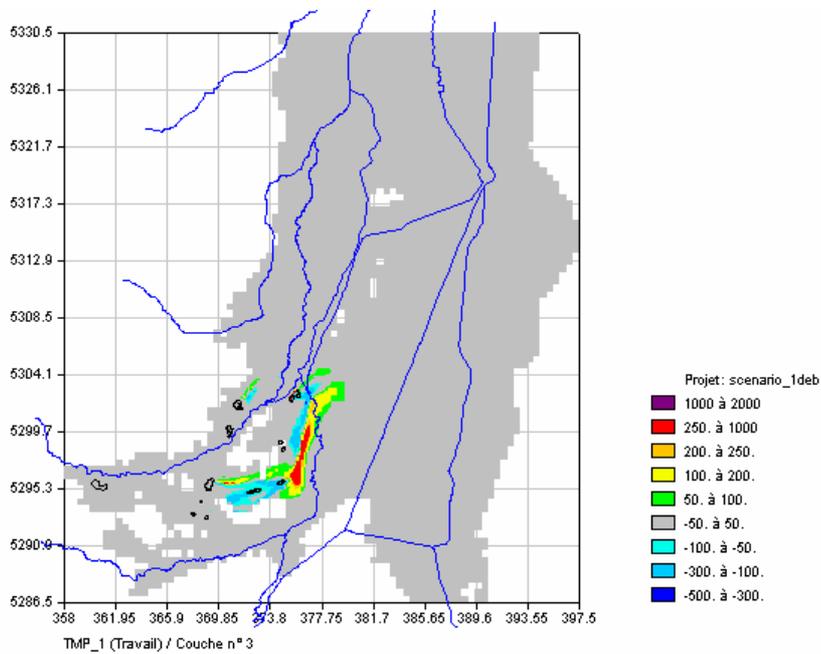


Figure 46 - Ecart en mg/L entre concentrations en 2014 calculées avec le scénario tendanciel et avec le scénario 1 (couche 3)

5.2.4. Suite du scénario 1

En 2014, on arrête les puits de fixation/dépollution dont la teneur est descendue en dessous de 200 mg/L et on reprend la simulation jusqu'en 2027.

Les flux de masse sous les terrils sont tous nuls sur cette période.

a) Pompages non arrêtés

On trouvera ci-après le tableau des pompages qui ne sont pas arrêtés en 2014.

Indice	LIEU_DIT	Nom_MDP	Nature des puits
04131X0409	Ungersheim	PF Ungersheim	Dépollution
04131X0418	AIRE DE STOCKAGE	Piézo 413-1-418 Amélie	Dépollution
04131X0419	AIRE DE STOCKAGE	Piézo 413-1-419 Amélie	Dépollution
04132X0074	CITE SAINTE BARBE (RUELSHEIM)	Ruelisheim	Dépollution
04132X0075	CITE SAINTE BARBE (RUELSHEIM)	Ruelisheim	Dépollution
04132X0230	CITE ENSISHEIM	Ensisheim 1	Dépollution
04132X0383		Ensisheim Sud	Dépollution
04132X0393		Ensisheim Sud	Dépollution
04132X0394		Puits Ungersheim 2	Dépollution
04132X0395		Ensisheim Sud	Dépollution
04132X0397		Ensisheim Sud	Dépollution
04132X0398		Ensisheim Sud	Dépollution
04131X0444		PF Rodolphe	Puits de fixation
04131X0559	VA10	Amélie n° 10	Puits de fixation
04132X0291		PF Fernand	Puits de fixation
04132X0399		Anna 1	Puits de fixation

Tableau 13 – Pompages non arrêtés en 2014 pour le scénario 1

b) Cartes simulées en 2027

Elles sont présentées aux figures 47 à 49. Ces cartes sont très peu différentes de celles obtenues avec le scénario tendanciel en 2027 (fig. 38 à 40).

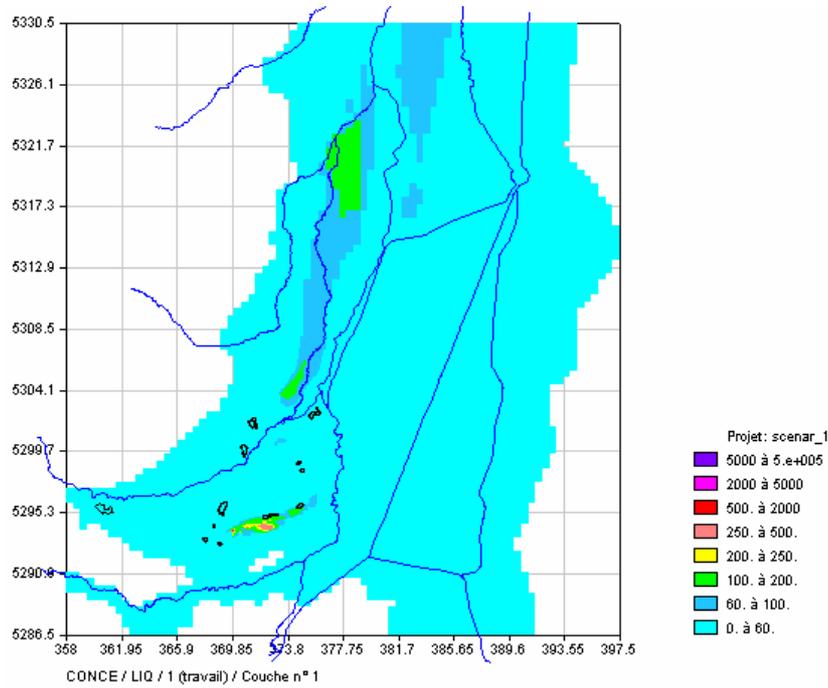


Figure 47 – Scénario 1 – concentrations en 2027 (mg/L) – couche 1

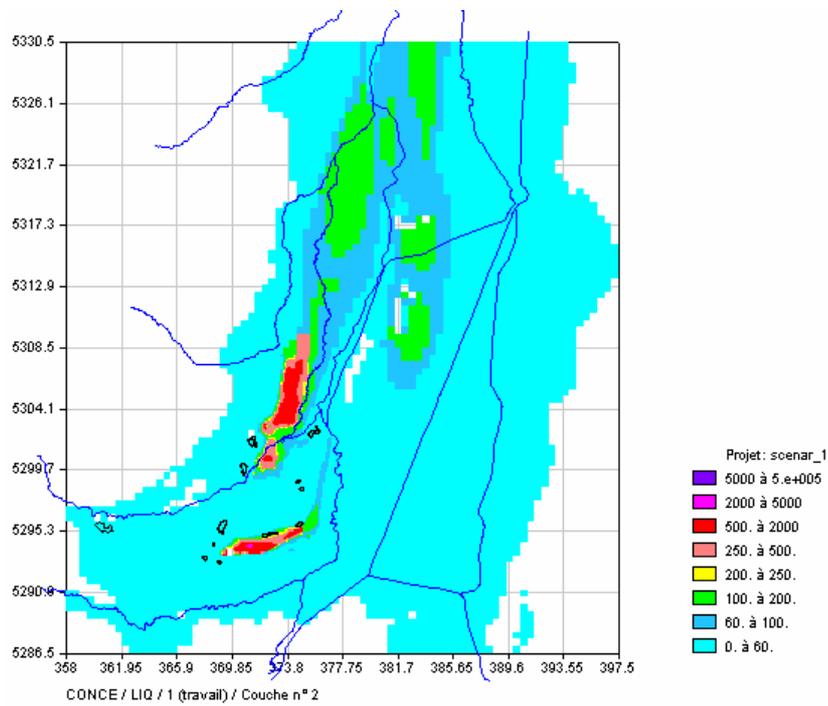


Figure 48 - Scénario 1 – concentrations en 2027 (mg/L) – couche 2

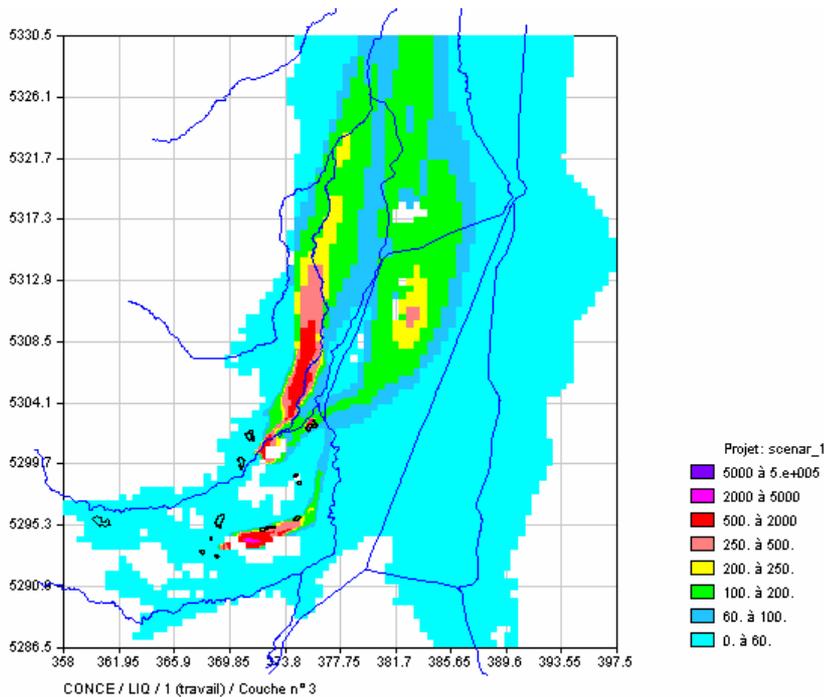


Figure 49 - Scénario 1 – concentrations en 2027 (mg/L) – couche 3

5.2.5. Cartes des écarts entre scénario tendanciel et scénario 1 en 2027

Les figures 50 à 52 sont obtenues en soustrayant les concentrations calculées avec le scénario 1 de celles calculées avec le scénario tendanciel en 2027.

On a repris l'échelle définie pour les écarts en 2014. Les résultats sont les suivants par couche :

- pour la couche 1, les écarts sont limités à une zone atteignant environ 70 mg/L en aval de Fernand
- pour la couche 2, les écarts dans la langue Est montent jusqu'à environ 200 mg/L ; comme en 2014, il apparaît une zone d'écart important (jusqu'à 800 mg/L) mais d'extension réduite à l'aval de Alex-Rodolphe
- pour la couche 3, la zone d'écarts de la langue Est s'élargit avec une pointe autour de 120 mg/L sur la rive droite de l'III ; par ailleurs, une zone d'écart atteignant 1000 mg/L, d'extension très faible, apparaît auprès des terrils d'Ensisheim, comme en 2014.

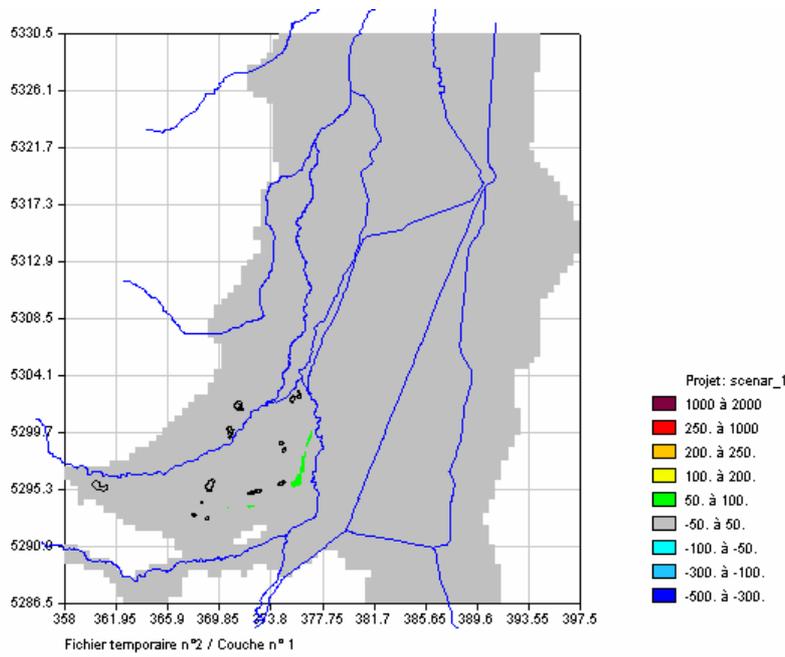


Figure 50 - Ecart en mg/L entre concentrations en 2027 calculées avec le scénario tendanciel et avec le scénario 1 (couche 1)

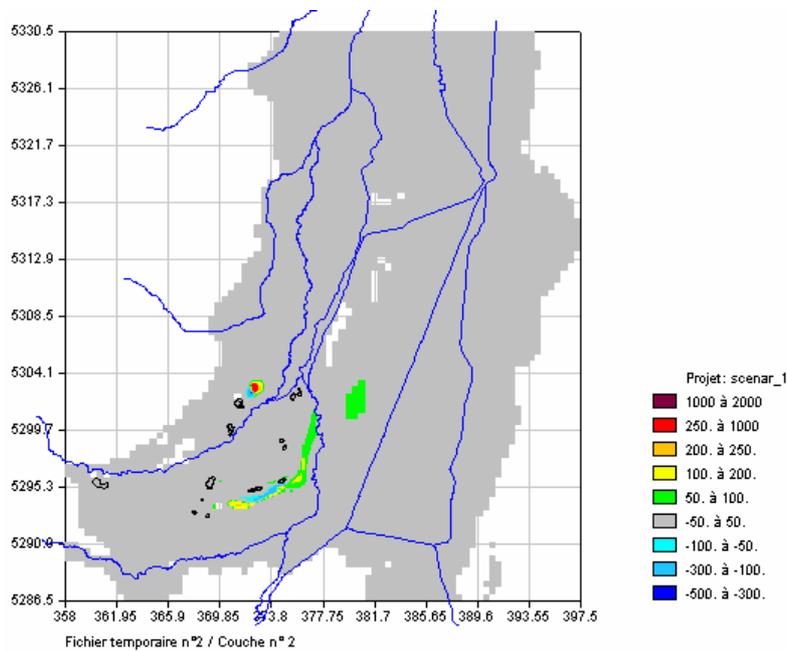


Figure 51 - Ecart en mg/L entre concentrations en 2027 calculées avec le scénario tendanciel et avec le scénario 1 (couche 2)

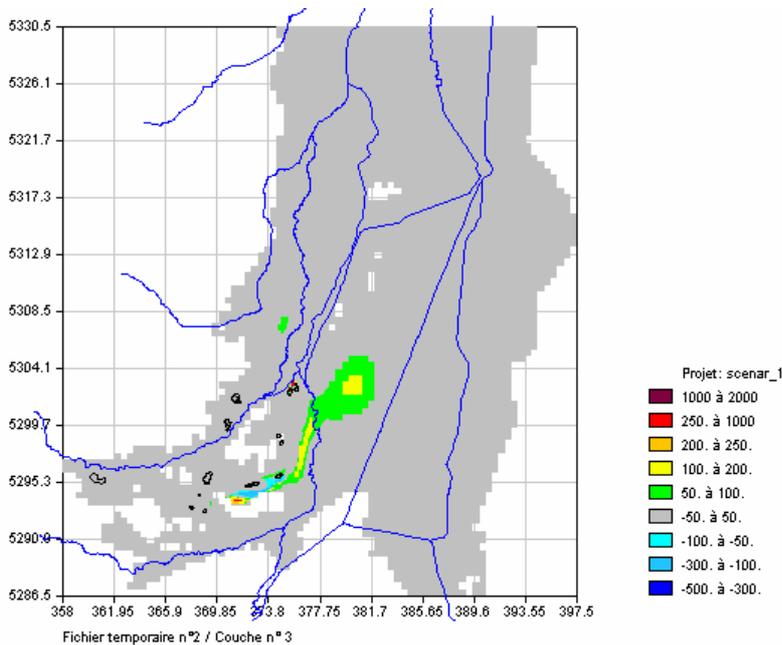


Figure 52 - Ecart en mg/L entre concentrations en 2027 calculées avec le scénario tendanciel et avec le scénario 1 (couche 3)

5.3. SCENARIO 1 TER

Pour mémoire : une première variante du scénario 1 (scénario 1 bis) avait été réalisée dans un premier temps ; cette variante reprenait les conditions du scénario 1 avec arrêt des prélèvements aux puits EBE en 2006.

Les résultats différaient très peu de ceux du scénario 1 du fait de la forte réduction effective des prélèvements EBE à partir de 2004.

Un scénario 1 ter a été proposé lors de la réunion du Comité de Pilotage du 30 Novembre 2005.

5.3.1. Définition du scénario

C'est une variante du scénario 1 pour laquelle, au contraire du scénario 1 bis, on garde les prélèvements de 2003 aux puits EBE jusqu'à la fin de la période de simulation.

En 2014, on arrête les puits de fixation/dépollution dont la teneur est descendue en dessous de 200 mg/L et on reprend la simulation jusqu'en 2027.

On constate que les pompages qui continuent sont les mêmes que pour le scénario 1 (tableau 13) ce qui n'a rien de surprenant.

5.3.2. Cartes des écarts entre scénario 1 et scénario 1 ter en 2027

Les résultats en 2014 et en 2027 étant très voisins d'un scénario à l'autre, on a représenté aux figures 53 à 55 les cartes obtenues en 2027 en soustrayant les concentrations calculées avec le scénario 1 ter de celles calculées avec le scénario 1.

On a dû définir une nouvelle échelle.

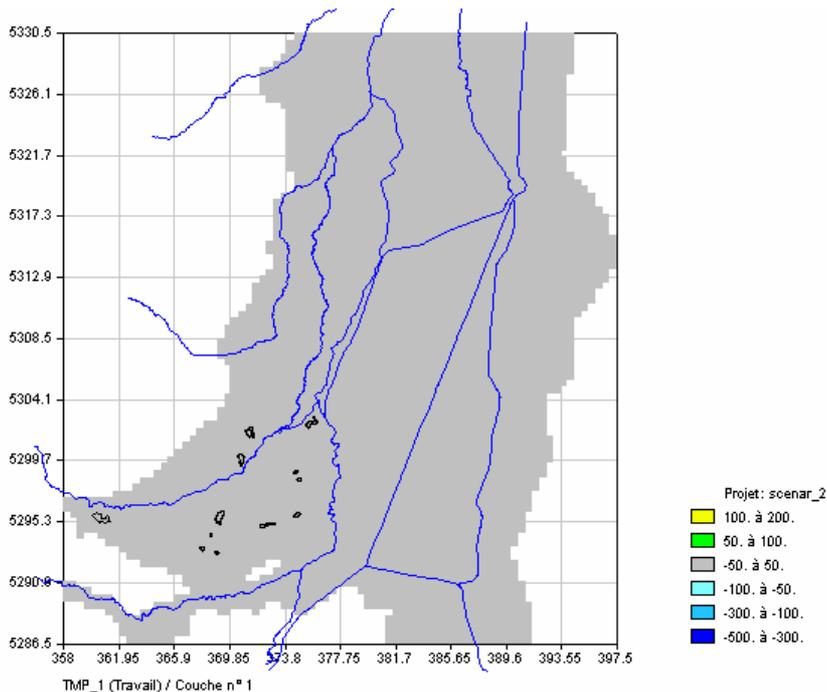


Figure 53 – Ecart en mg/L entre concentrations en 2027 calculées avec scénario 1 et avec scénario 1 ter (couche 1)

On constate que les différences sont faibles et limitées au voisinage des puits EBE.

Il n'y a pas non plus de différence significative sur l'évolution des tonnages (§ suivant).

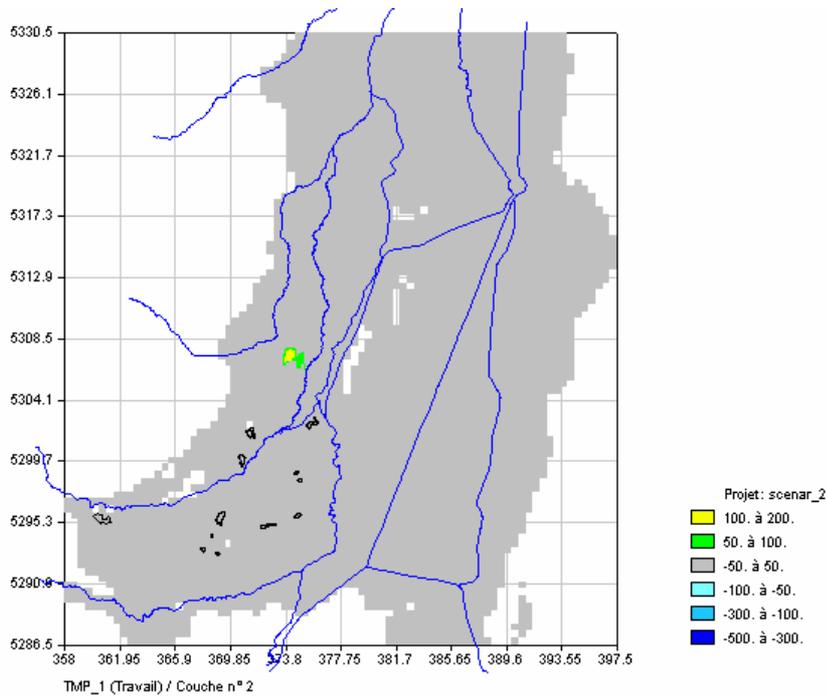


Figure 54 - Ecart en mg/L entre concentrations en 2027 calculées avec scénario 1 et avec scénario 1 ter (couche 2)

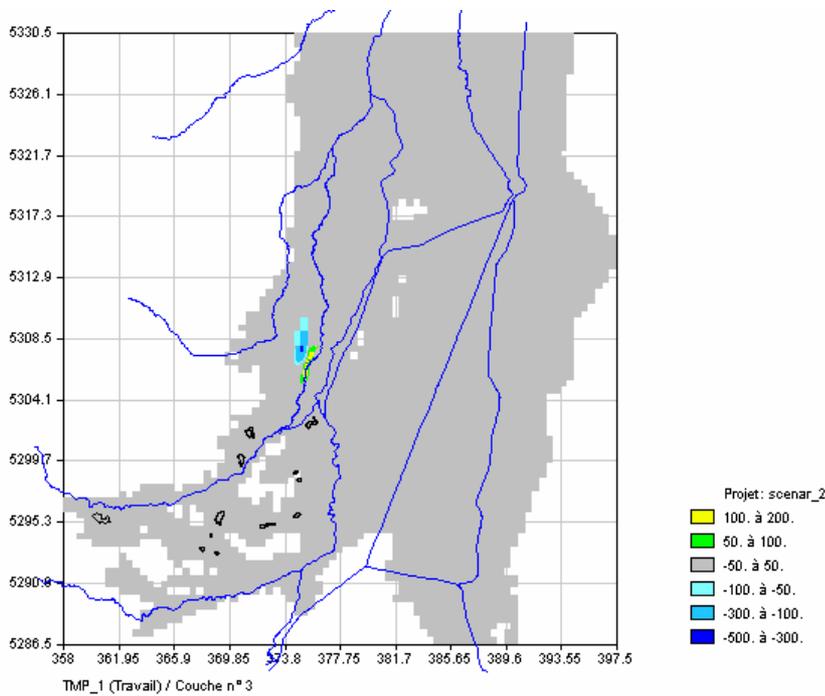


Figure 55 - Ecart en mg/L entre concentrations en 2027 calculées avec scénario 1 et avec scénario 1 ter (couche 3)

5.4. CALCULS DE TONNAGE

Le tonnage de chlorures présents dans la nappe d'après la simulation a été calculé pour les deux premiers scénarios, à la teneur de coupure de 250 mg/L, en prenant en compte la géométrie du modèle (épaisseurs mouillées des alluvions) et les porosités issues du calage du transport. Les surfaces et volumes en jeu sont également fournis ci-après.

Résultats des simulations à la coupure de 250 mg/L					
	Année	Couche 1	Couche 2	Couche 3	Total
	1991	133827	299894	183954	617674
	2004	21848	202127	109340	333316
Scénario 1	2014	4115	78611	49723	132449
Scénario 1	2027	77	51688	22890	74655

	Année	Couche 1	Couche 2	Couche 3	Total
	1991	133827	299894	183954	617674
	2004	21848	202127	109340	333316
Tendanciel	2014	6704	87364	51855	145923
Tendanciel	2027	176	52530	23427	76133

Tableau 14 – Calcul du tonnage de chlorures dans la nappe pour le scénario tendanciel et le scénario 1

Malgré les incertitudes en jeu, l'évolution de ces tonnages est significative ainsi que la comparaison entre deux scénarios. On peut ainsi conforter l'analyse faite plus haut de la faible différence entre le scénario tendanciel et le scénario 1, qui aboutissent à des tonnages très proches en 2027. Le scénario 1, en conservant en fonctionnement tous les puits de fixation/dépollution jusqu'en 2014 puis en les arrêtant seulement lorsque leur concentration tombe en dessous de 200 mg/L, permet d'accélérer la dépollution à l'horizon 2014. La conclusion que l'on peut en tirer est que le scénario tendanciel est déjà bien optimisé et ne nécessite que quelques ajustements pour en maximiser l'efficacité.

	Année	Surface > 200 mg/L	Volume total > 200 mg/L	Surface > 250 mg/L	Volume total > 250 mg/L
Etat initial	2004	62 km ²	609 Mm ³	45.75 km ²	407 Mm ³
Scénario tendanciel	2014	32.0 km ²	399 Mm ³	25.5 km ²	275 Mm ³
Scénario tendanciel	2027	13.0 km ²	219 Mm ³	10.0 km ²	146 Mm ³
Scénario 1	2014	28.75 km ²	372 Mm ³	23.75 km ²	248 Mm ³
Scénario 1	2027	12.5 km ²	207 Mm ³	9.75 km ²	144 Mm ³

Tableau 15 – Surfaces et volumes de nappe

Afin de pouvoir se rapporter à d'autres indicateurs dans le cadre de la DCE notamment, le tableau 15 présente aussi les surfaces et volumes d'eau de la nappe au-dessus de 200 et 250 mg/L pour les deux principaux scénarios. Les surfaces ont été calculées de façon à être comparables à celles des cartographies annuelles de la salure qui représentent une moyenne de la salinité jusqu'à une profondeur de 40 m : ce sont celles des couches 1 et 2 du modèle dans le bassin potassique (partie gigogne du modèle), et de la couche 1 seule dans la partie rhénane.

5.5. SCENARIO 2

5.5.1. Définition du scénario

Ce dernier scénario contrairement aux précédents n'est pas un scénario prévisionnel. Il a pour objectif de tenter d'expliquer les évolutions observées aux puits de Colmar qui montrent des teneurs en augmentation que le modèle ne reproduit pas (annexe 4 et fig. 57).

On observe sur le puits Neuland une teneur qui augmente depuis 1991 alors que sur le puits Dornig, situé plus en aval, la teneur n'augmente que depuis 1995 : ceci pourrait être l'indice d'une arrivée de salure non prise en compte dans le modèle.

Il a donc été décidé de reprendre la simulation de 1991 à 2004 en ajoutant une source de chlorures supplémentaire à l'Ouest d'Ungersheim et d'examiner l'impact de cette source sur les puits de la langue Ouest, en particulier ceux de Colmar.

L'hypothèse d'une source de saumure profonde localisée à l'Ouest d'Ungersheim a été obtenue par des campagnes géophysiques. L'impact probable de cette source apparaît aux puits EBE à partir de 1975 (fig. 56).

La simulation du transport des chlorures de 1991 à 2004 doit permettre de vérifier que c'est bien la même source qui provoque une augmentation des chlorures aux puits de Colmar à partir de 1994 (fig. 57).

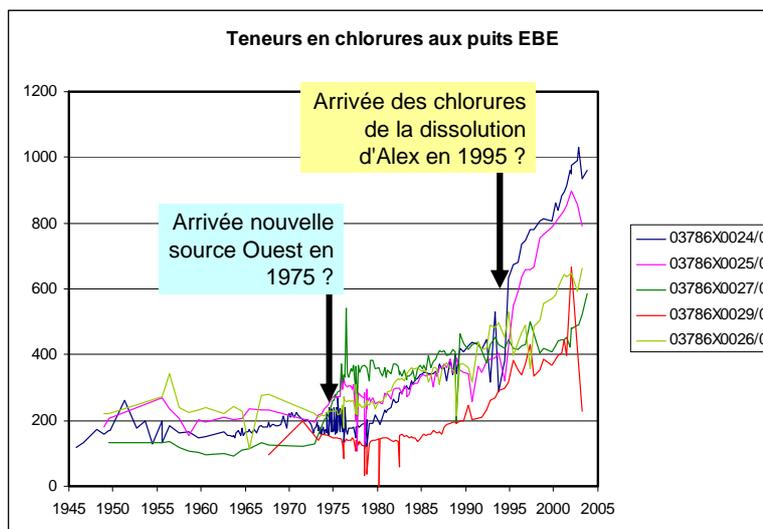


Figure 56 - Historique des teneurs en chlorures aux puits EBE

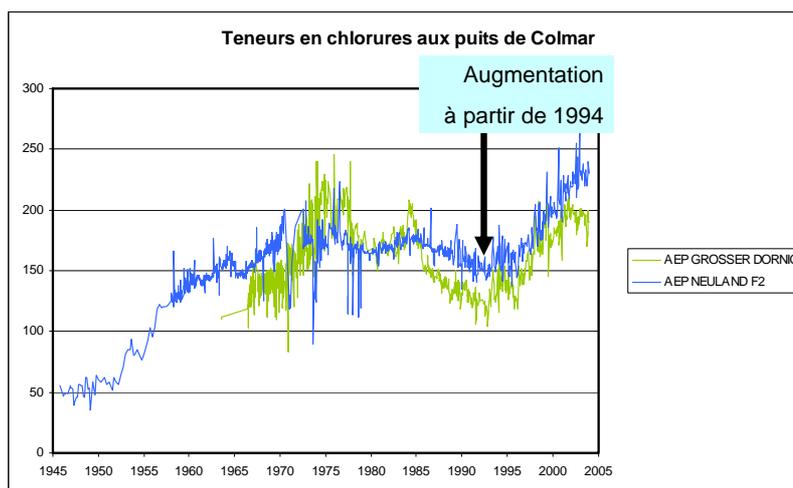


Figure 57 - Historique des teneurs en chlorures aux puits de Colmar

Cette simulation nécessite de retravailler la carte de salure initiale en 1991 en fonction de cette hypothèse. Pour cela les trajectoires issues de la source supposée et des terrils Alex-Rodolphe et Marie-Louise ont été tracées. On constate qu'il faut déjà une dizaine d'années pour que la salure issue de la source arrive à EBE, puis 14 ans pour faire le trajet depuis EBE jusqu'à rejoindre la Vieille Thur à la hauteur du dôme de Hettenschlag.

Ce travail amène à dessiner 2 panaches distincts dans la langue Ouest en 1991. Le premier panache issu des terrils longe la Vieille Thur et la croise un peu au Nord de Munwiller. Le deuxième panache issu de la source supposée suit une trajectoire plus à l'Ouest pour rejoindre la Vieille Thur au niveau du dôme de Hettenschlag. Les

concentrations en chlorures de ces panaches ont été ajustées sur les valeurs effectivement mesurées en 1991

5.5.2. Nouvelles données

a) Concentrations initiales

Les cartes de la salure initiale en 1991 sont donc modifiées comme indiqué ci-dessus. On présente les résultats pour les couches 2 et 3 aux figures 58 et 59 (à comparer aux cartes initiales des figures 8 et 9). La salure de la couche 1, peu modifiée, n'est pas dessinée.

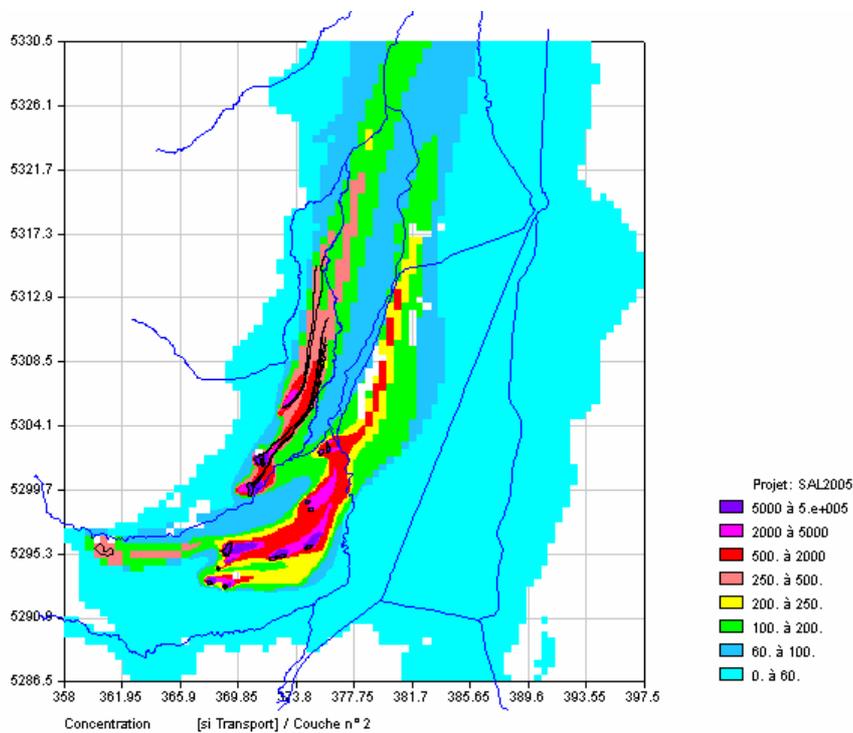


Figure 58 – Carte modifiée des concentrations en chlorures en 1991 – couche 2

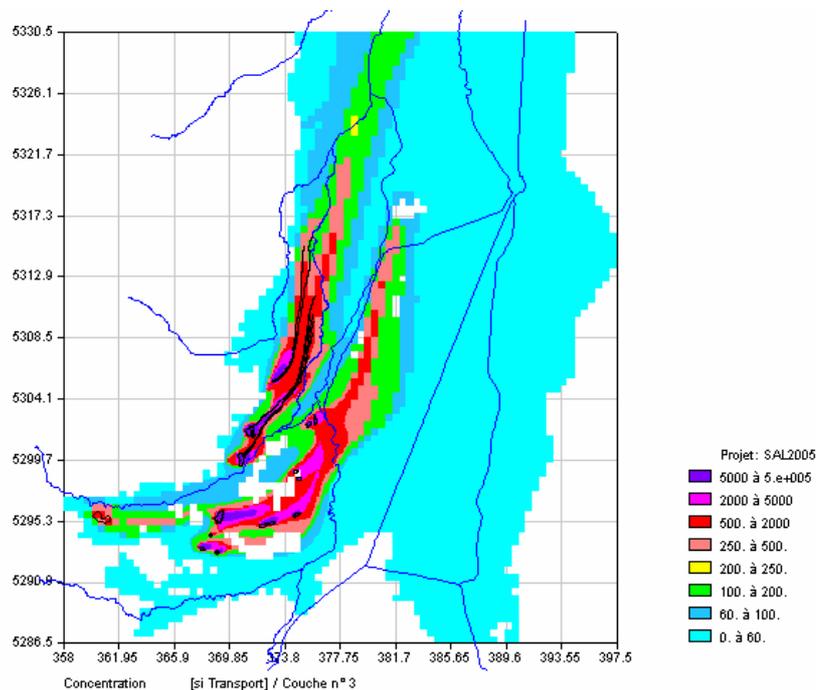


Figure 59 - Carte modifiée des concentrations en chlorures en 1991 – couche 3

Sur ces cartes on a également reporté les trajectoires sur 14 ans depuis la source supposée et les terrils Alex-Rodolphe et Marie-Louise.

b) Tonnage imposé sur la nouvelle source de salure

Un flux de masse est imposé sur la superficie de la nouvelle source qui a été délimitée à l'aide de la géophysique. Ce flux est imposé sur la couche 3 seulement.

Différents essais dont on observe l'impact sur les cartes de salure en 2004 et les évolutions aux piézomètres de la langue Ouest amènent à prendre en compte un flux de masse correspondant à 300 T de Cl- par an émanant de cette source.

5.5.3. Résultats

a) Cartes de concentration en 2004

On les présente aux figures 60 et 61 comme au § 4.3.7 en comparaison avec les cartes observées. Les résultats pour la couche 1 qui sont peu différents des précédents ne sont pas présentés.

Si on compare aux résultats du calage (fig. 33 – 34), on constate que :

- pour la couche 2, la nouvelle carte simulée est en bon accord avec la carte observée et même mieux qu'avant pour la langue Ouest grâce à la présence de la nouvelle source ;
- pour la couche 3, l'impact sur la langue Ouest est un peu plus fort qu'auparavant (mais c'est peut-être la carte observée qui est imprécise).

Globalement, la restitution est satisfaisante au niveau des cartes 2004.

b) Impact sur les historiques de la langue Ouest

Pour mettre en évidence l'impact de la nouvelle source sur les historiques, on a représenté aux figures 62 à 65 les nouvelles évolutions aux piézomètres impactés en les comparant aux évolutions précédemment calculées lors du calage (présentées en totalité en annexe 4).

On observe un impact net et positif (améliorant le calage pour au moins une des couches) sur 3 piézomètres : Mattenmuhl, Rouffach, Munwiller. Par contre, sur le puits EBE F6, l'impact est trop fort.

La figure 66 présente l'évolution au puits EBE F3 (non simulé au cours du calage) ; l'évolution est bien simulée.

Par contre, les piézomètres de Colmar (fig. 67 et 68) ne sont pas impactés de façon visible par cette nouvelle source de salure. La simulation par le modèle ne permet donc pas de reproduire l'impact supposé d'une source de salure supplémentaire sur les puits de Colmar.

Ce résultat n'est pas vraiment satisfaisant car pour l'instant aucune des simulations ne permet de reproduire l'augmentation des concentrations en chlorures aux puits de Colmar à partir de 1994. La source de chlorures entre Ungersheim et Raedersheim est peut-être sous-estimée dans la simulation, car elle a été calée en fonction des concentrations observées dans les puits proches sans tenir compte de l'effet densitaire éventuel d'une saumure très concentrée. La concentration initiale du panache en provenance de cette source utilisée dans la simulation (état 1991) a peut-être également été sous-estimée en l'absence de données sur la salure profonde à cette époque.

Il serait évidemment très utile d'avoir une idée plus précise de la dimension, de la concentration en chlorures et de la composition de cette source.

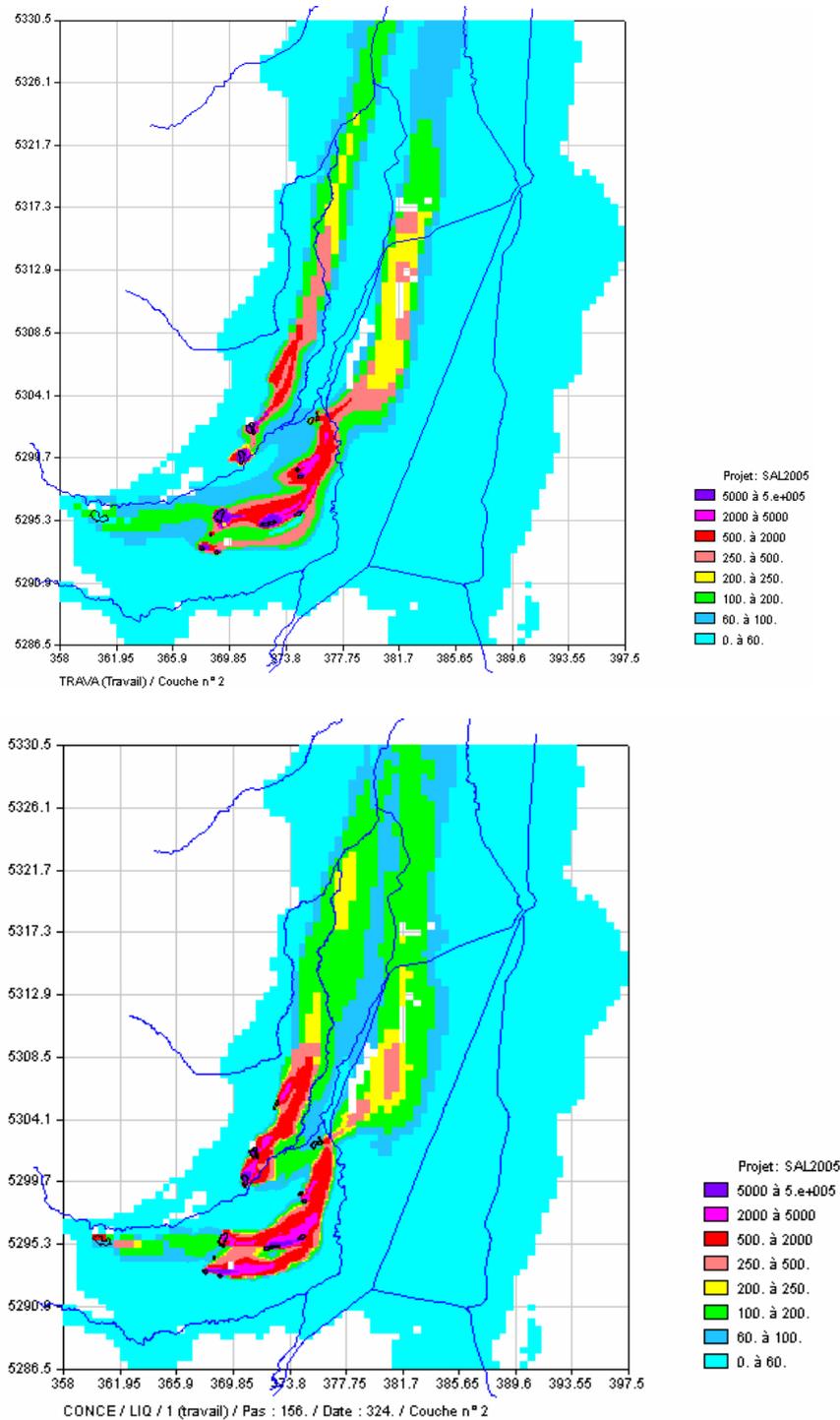


Figure 60 – Scénario 2 : concentrations observées (en haut) et simulées (en bas) en 2004 (mg/L) - couche 2

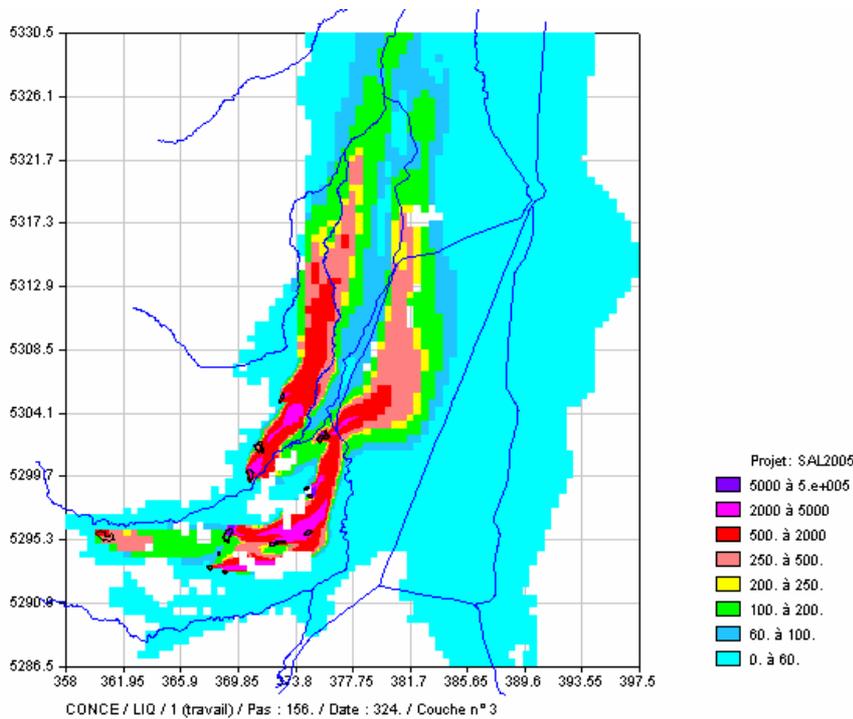
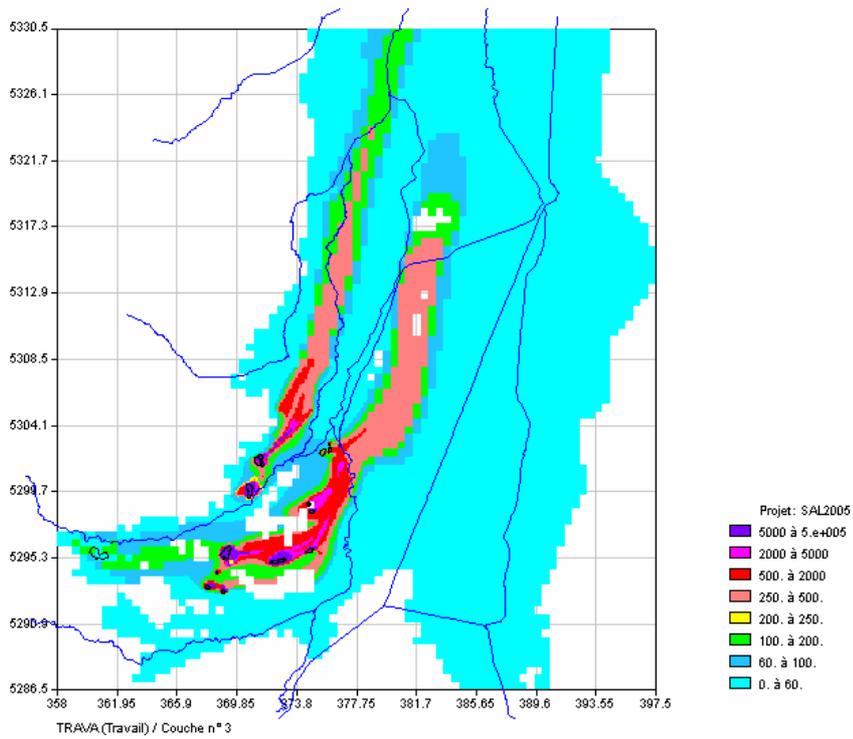


Figure 61 - Scénario 2 : concentrations observées (en haut) et simulées (en bas) en 2004 (mg/L) - couche 3

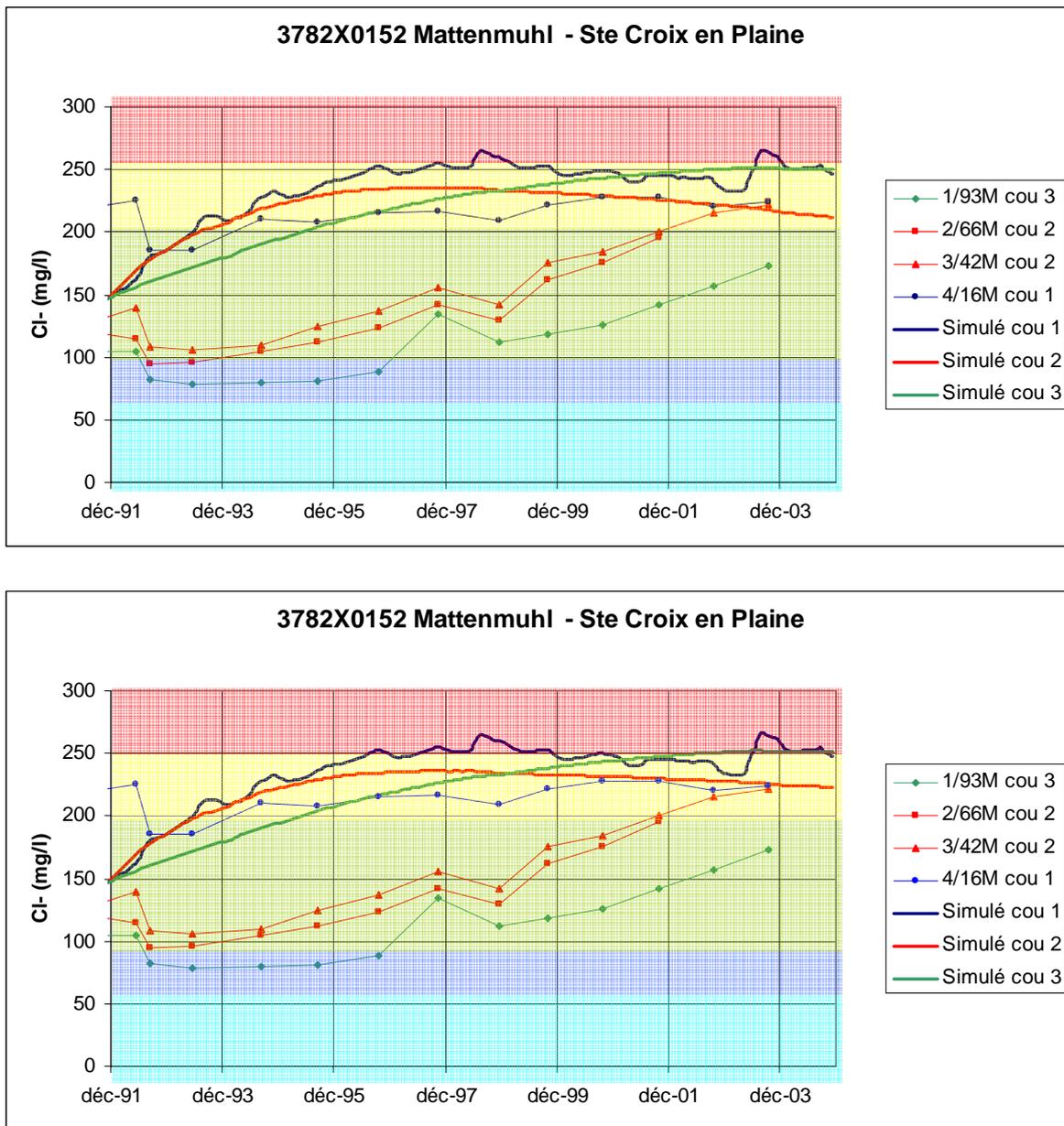


Figure 62 – Evolutions comparées au piézo 3782X0152

En haut : au cours du calage

En bas : avec le scénario 2

Note : le fond coloré des graphiques correspond à l'échelle de couleur adoptée pour les tranches de concentrations en chlorures des cartographies. Cette présentation permet de relativiser les différences entre les courbes simulée et observée lorsqu'elles sont toutes deux dans la même tranche de concentrations.

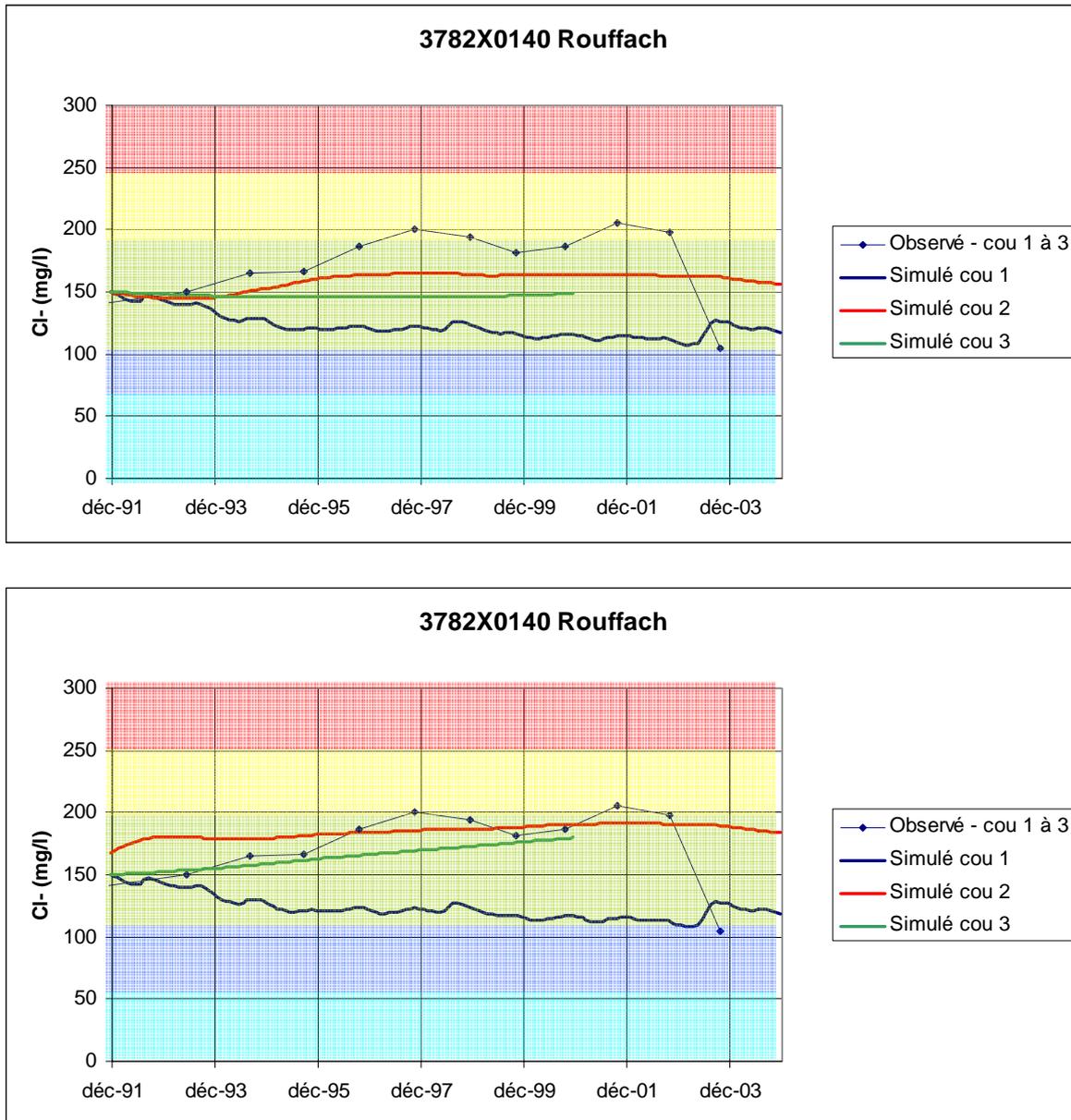


Figure 63 - Evolutions comparées au piézo 3782X0140

En haut : au cours du calage

En bas : avec le scénario 2

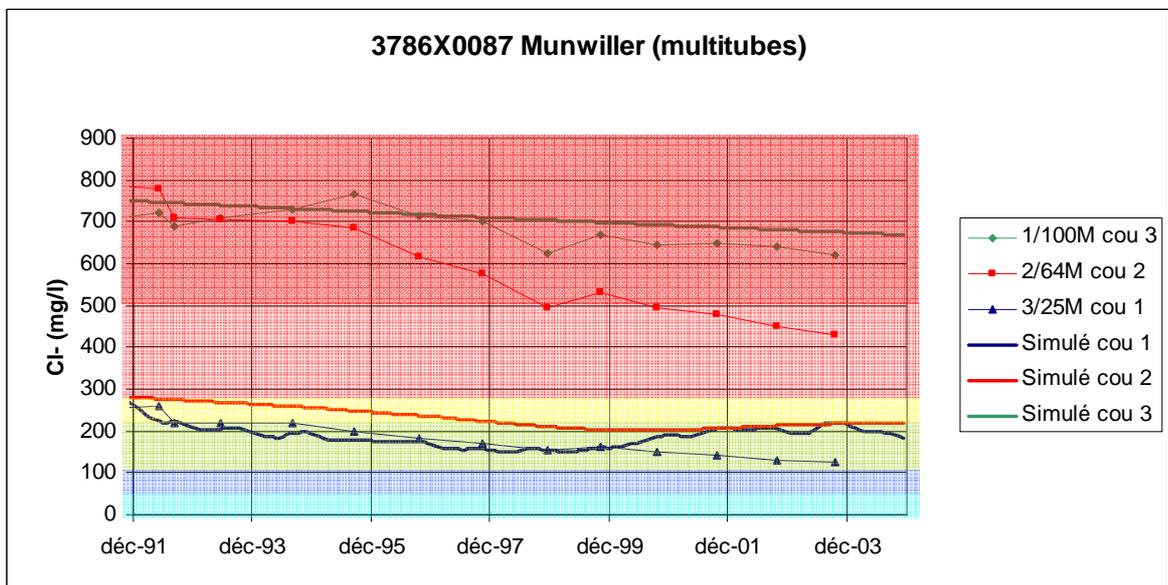
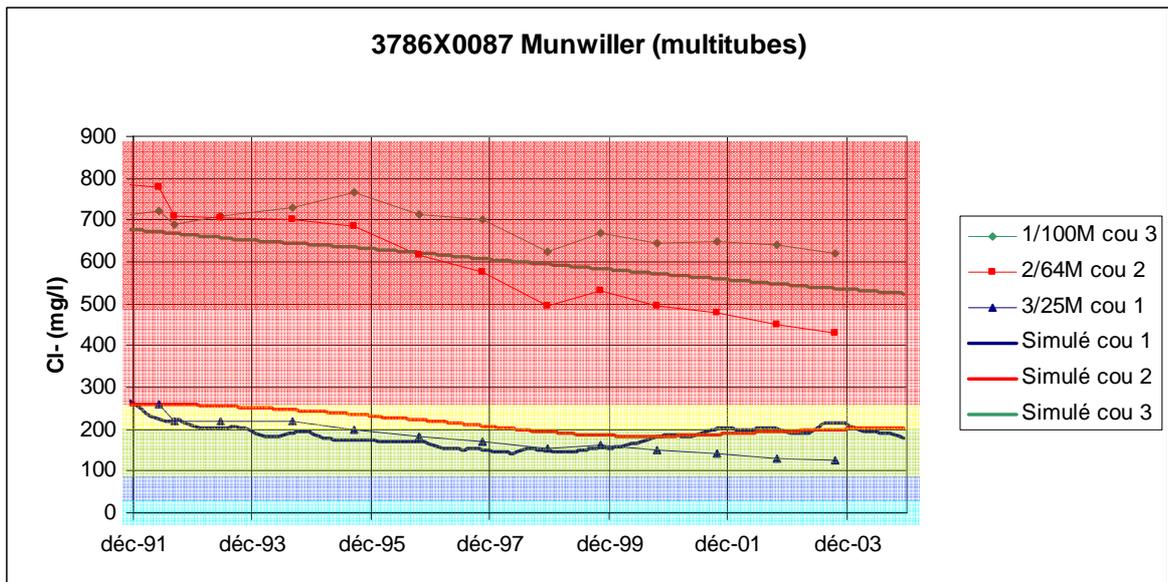


Figure 64 - Evolutions comparées au piézo 3786X0087

En haut : au cours du calage

En bas : avec le scénario 2

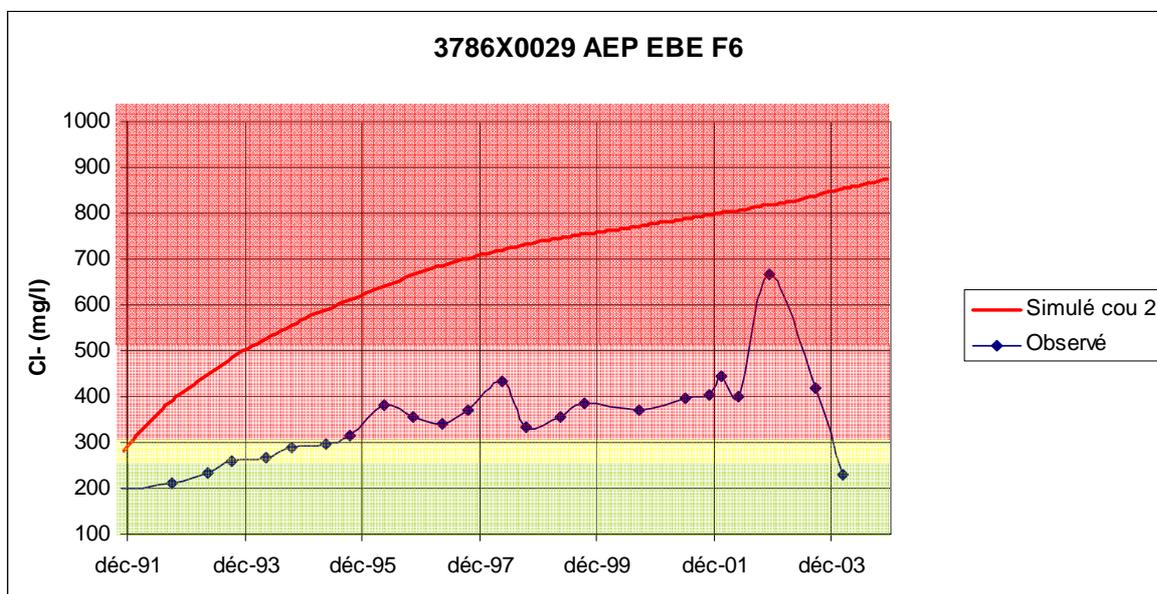
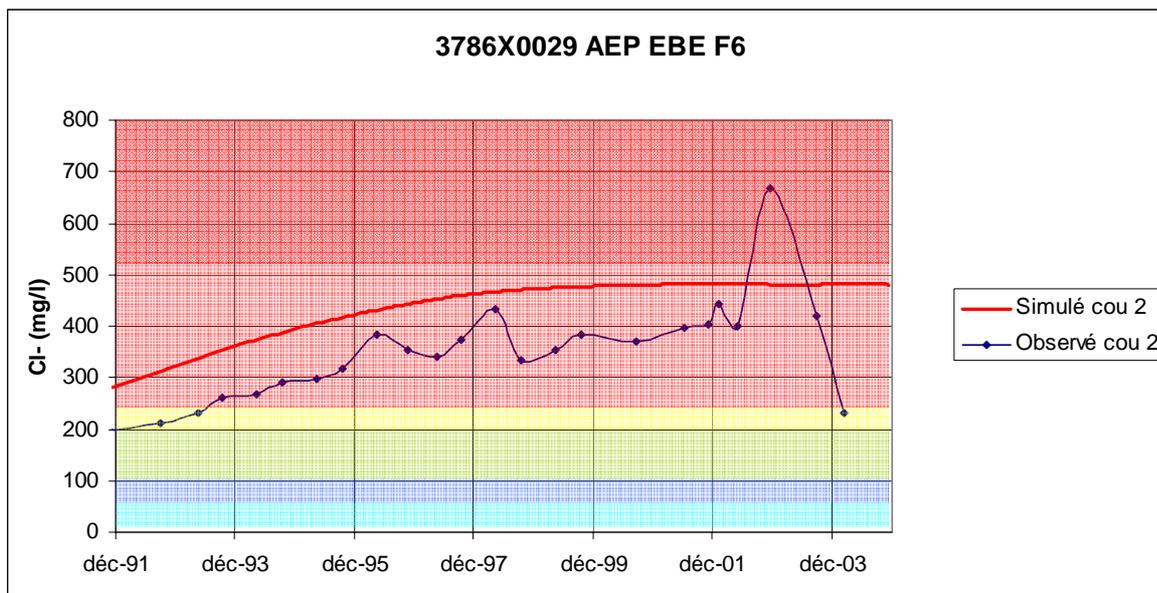


Figure 65 - Evolutions comparées au puits EBE F6

En haut : au cours du calage

En bas : avec le scénario 2

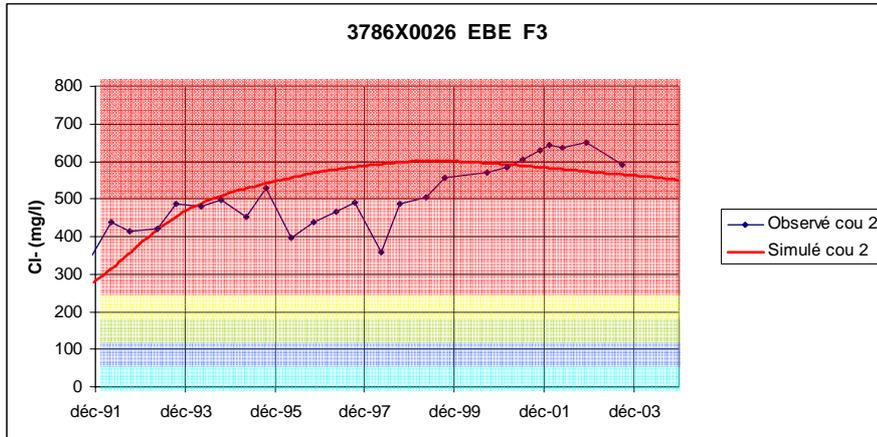


Figure 66 – Evolution au puits EBE F3 – scénario 2 (non simulé au cours du calage)

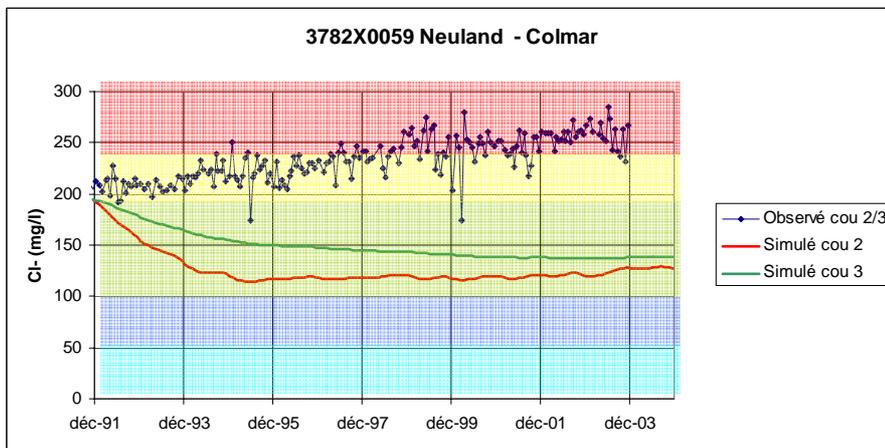


Figure 67 – Evolution au puits Neuland – scénario 2

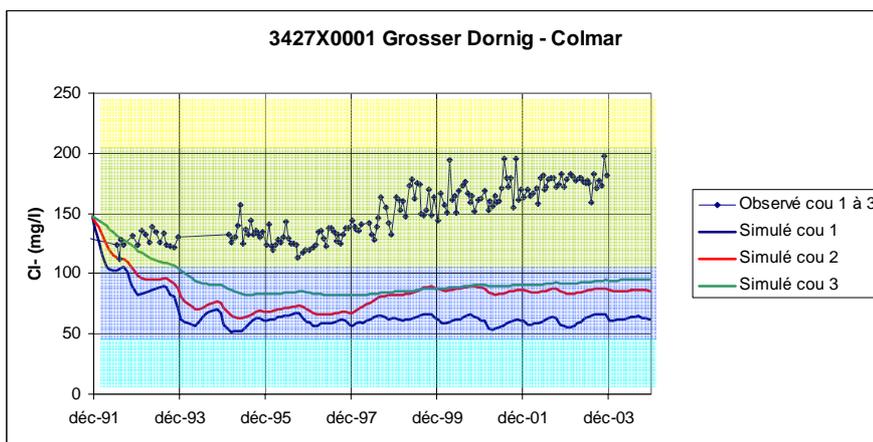


Figure 68 – Evolution au puits Dornig – scénario 2

6. Conclusions

L'objectif de cette étude était la mise au point d'un modèle hydrodynamique de gestion de la pollution saline de la nappe d'Alsace au droit et en aval du Bassin Potassique. Ce modèle devait permettre de suivre l'évolution de la salure dans le temps et d'évaluer l'impact de différents scénarios d'arrêt des pompages de fixation ou de dépollution des MDPA, pour apporter une aide à la décision.

Malgré des imprécisions au voisinage immédiat des terrils où les effets densitaires sont très importants et où l'impact des opérations de dissolution accélérée n'a pu être pris en compte, la restitution en fin de calage du modèle des cartes historiques des chlorures et des chroniques de concentration observées est globalement satisfaisante.

Certaines différences entre les prévisions du modèle et les cartes de salure tracées dans des secteurs où il existe peu de piézomètres mériteraient des investigations géophysiques de contrôle, notamment à l'aval des terrils Joseph Else où le modèle montre un écoulement de salure vers le NE dont l'existence ne peut être confirmée ou infirmée en l'absence de piézomètres.



Scénario	Période 1991-2004	Période 2004-2014	Période 2014-2027
Scénario tendanciel		<i>Prévisions d'arrêt successif des pompages par les MDPA</i>	<i>Tous les pompages de fixation/dépollution sont à l'arrêt</i>
Scénario 1		<i>Les pompages de fixation/dépollution sont maintenus au régime 2005-2006</i>	<i>Les pompages de fixation/dépollution à moins de 200 mg/L en 2014 sont à l'arrêt</i>
Scénario 2	<i>Source supplémentaire entre Ungersheim et Raedersheim</i>		

Tableau 16 – Principaux scénarios d'exploitation du modèle

Après finalisation du calage du modèle, différents scénarios d'exploitation ont été mis en œuvre pour la prévision de l'évolution future de la salure dans la zone d'étude. Le scénario dit tendanciel est bâti d'après les prévisions actuelles des MDPA sur le traitement des terrils et l'abandon progressif des pompages de dépollution et de fixation. La simulation indique que les langues aval devraient être nettoyées en surface mais pas en profondeur en 2014.

Le scénario tendanciel est comparé au scénario 1, scénario où l'on maintiendrait tous les pompages existant en 2006 en fonctionnement jusqu'en 2014. Les résultats de la simulation jusqu'en 2014 montrent peu de différences entre le scénario tendanciel et le scénario 1.

La différence la plus significative apparaît dans l'extrémité aval de la langue salée issue du bassin potassique jusqu'à Ensisheim. On en conclut qu'il serait probablement utile de conserver les puits des barrages hydrauliques au Sud d'Ensisheim en fonctionnement plus longtemps que prévu actuellement par les MDPA dans le scénario tendanciel.

Le scénario tendanciel est ensuite simulé jusqu'en 2027 après l'arrêt de tous les pompages de dépollution en 2014. Le scénario 1 est également prolongé jusqu'en 2027 en arrêtant en 2014 les pompages où la teneur en chlorures est descendue en dessous de 200 mg/L. La simulation montre que dans les deux cas le bon état (teneurs en dessous de 250 mg/L) est atteint dans la couche superficielle, mais qu'il reste des concentrations élevées en profondeur à l'aval d'Alex-Rodolphe (au début de la langue Ouest) et dans le bassin potassique.

Cela signifie qu'il faudra probablement maintenir des pompages en service dans certains secteurs de salure profonde après l'échéance de 2014. Le modèle n'est cependant pas encore assez fiable à si long terme pour pouvoir être plus précis sur ce point : l'optimisation de ces derniers pompages sera à faire au fur et à mesure en fonction des résultats effectivement acquis.

Le scénario 1 est comparé à un scénario 1 ter, dans lequel on maintient en pompage les puits du champ captant d'EBE au rythme des années antérieures à 2003 (les volumes pompés à EBE ont en effet été très fortement réduits à partir de 2004). On constate que la différence entre les deux scénarios est négligeable en 2027.

Un scénario 2 a également été réalisé pour examiner l'impact possible d'une source de chlorures naturels dont on suppose l'existence entre Raedersheim et Ungersheim. La prise en compte de cette source permet d'améliorer la simulation de l'évolution de la langue Ouest de 1991 à 2004, mais ne montre pas l'impact que l'on supposait sur les puits AEP de la Ville de Colmar.



Parmi les développements envisageables dans l'avenir pour tenter d'améliorer les performances du modèle, il conviendrait d'étudier comment prendre en compte la dissolution accélérée, d'utiliser une méthode de calcul du transport adaptée aux forts contrastes de concentration, ainsi que d'introduire le calcul des effets densitaires au voisinage immédiat des terrils.

En effet les modélisations prenant en compte l'effet densitaire montrent que lorsqu'on atteint 100 g/L de chlorures l'écoulement hydrodynamique devient négligeable devant l'effet gravitaire dû à la densité du fluide (Regierungspräsidium Freiburg 2002). Or les eaux d'infiltration sous un terril en dissolution accélérée atteignent couramment 200 g/L (analyses des eaux de relevage). Il se développe ainsi une lentille de saumure dense sous le terril, qui peut rester piégée dans les dépressions du substratum.

On peut donc penser qu'une prise en compte des dissolutions accélérées et de l'effet densitaire des infiltrations sous les terrils permettraient de mieux simuler l'évolution des concentrations en chlorures dans les puits de fixation, de mieux prendre en compte la fixation des saumures denses au voisinage des terrils et d'améliorer la simulation de l'impact aval des terrils, notamment de Marie-Louise et Joseph Else (après contrôle de la réalité de l'impact vers le NE prédit par le modèle pour ce dernier terril).

On attendrait également de ces développements une meilleure simulation des tonnages de chlorures, apparemment sous-estimés par le modèle si on les compare aux estimations faites par d'autres méthodes et une plus grande fiabilité de la prédiction de l'état de la nappe aux échéances fixées par la DCE.

7. Bibliographie

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.

Elsass P., Rau S. (1995) - Coupes hydrogéologiques Strasbourg-Offenburg. Notice. Initiative communautaire INTERREG, Cartographie hydrogéologique du Rhin supérieur. Région Alsace, Strasbourg, avril 1995.

Graillat A., Brunck R. (1980) – Direction interdépartementale de l'industrie région Alsace. Les terrils du bassin potassique. Etude en vue de leur neutralisation vis à vis de la pollution saline des eaux phréatiques et de leur insertion dans le paysage. Novembre 1980.

GLA (1977) - Hydrogeologische Karte von Baden-Württemberg. Oberrheingebiet, Bereich Kaiserstuhl-Markgräflerland. 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.

LfU (1996) – Projet de démonstration pour la protection et la gestion de la nappe franco-germano-suisse du Rhin supérieur. Demonstrationsvorhaben zum Schutz und zur Bewirtschaftung des Grundwassers des deutsch-französisch-schweizerischen Oberrheingrabens. LIFE Abschlussbericht, Karlsruhe.

Martin J.C., Elsass P., Noyer M.L. (1997) – Modèle de la nappe d'Alsace. Projet de développement 312 – Rapport d'avancement n°1. Rap. BRGM R 39661.

MDPA (1991) – Sol et sous-sol. Les affaissements miniers. Potasse magazine N°101, novembre 1991, p. 4-6.

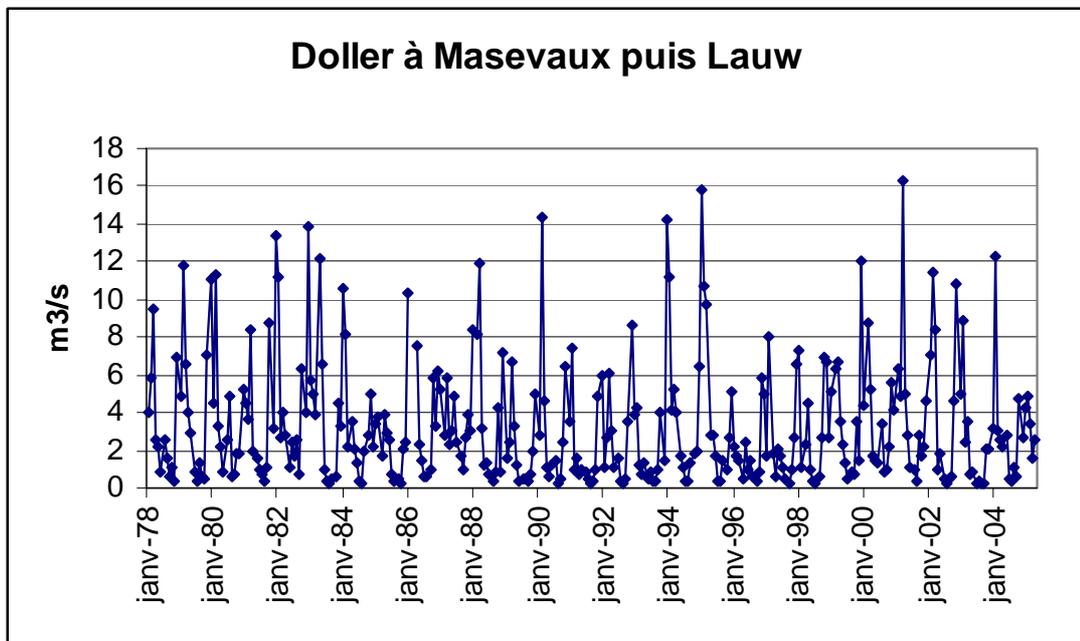
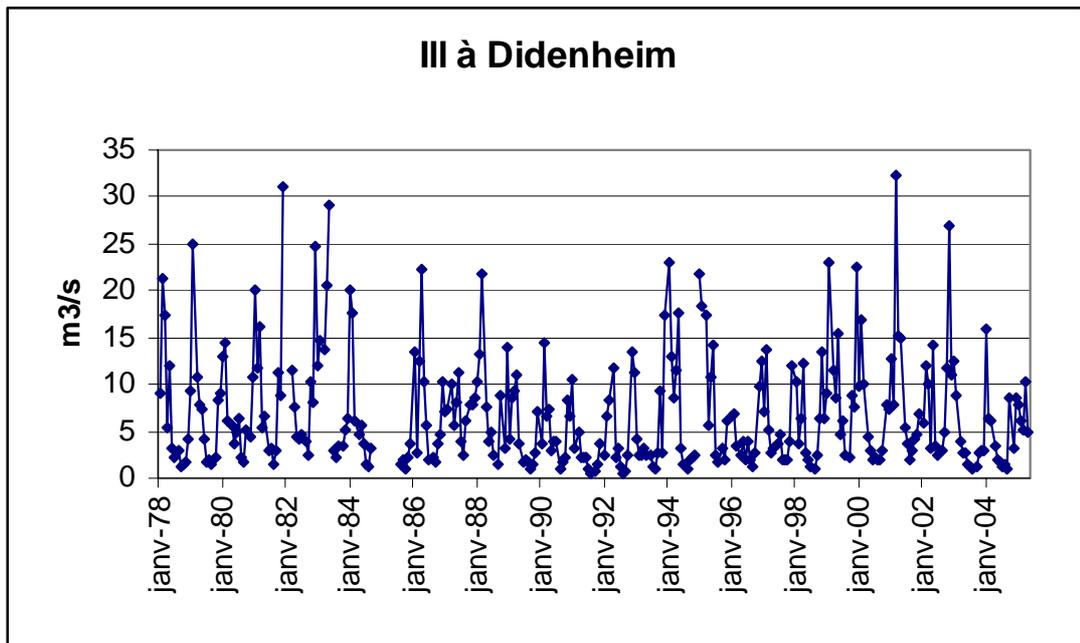
Noyer M.L., Menjoz A., Elsass P., Thiéry D., Martin J.C. (1998) – Modèle de la nappe d'Alsace. Projet de développement 312. Rapport final. Rapport BRGM R 40335.

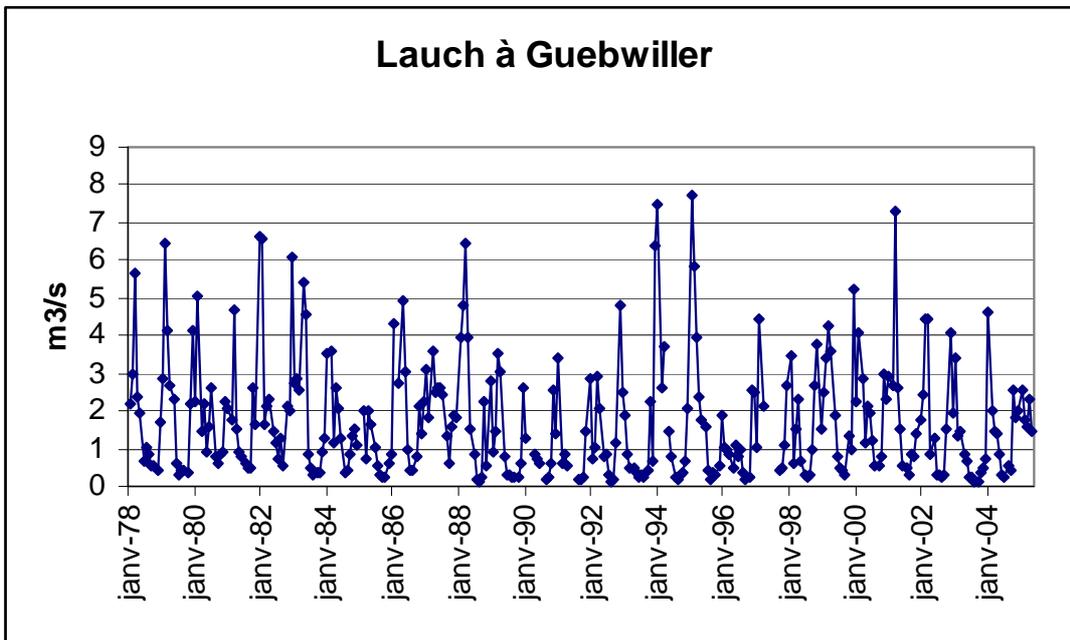
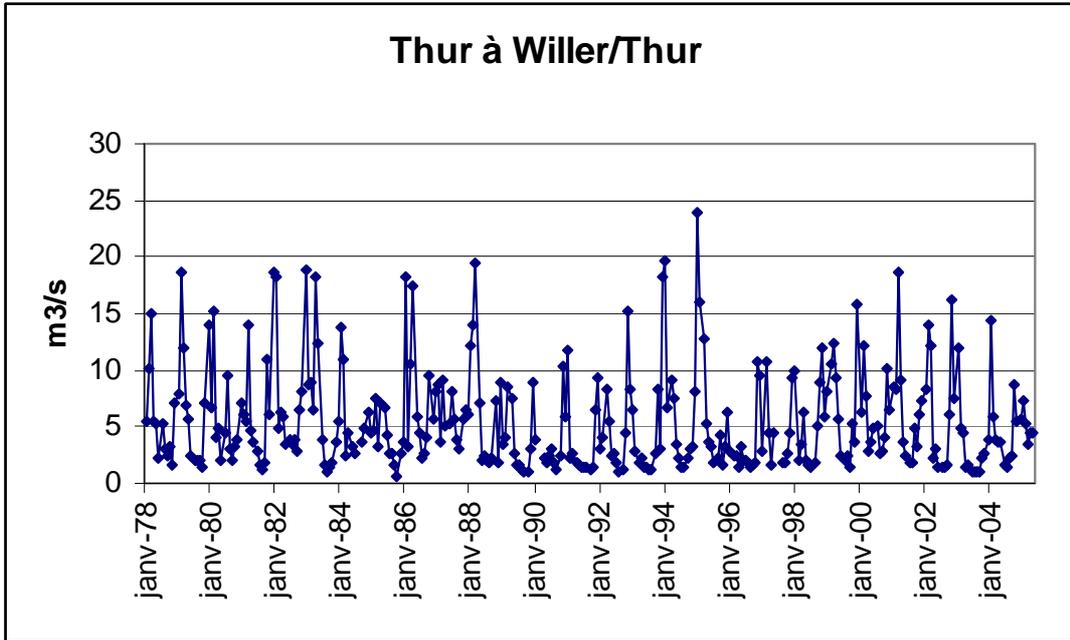
REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG (2002) – Reconnaissance transfrontalière de l'aquifère profond dans la bande rhénane entre Fessenheim et Breisach. Rapport final projet Interreg II.

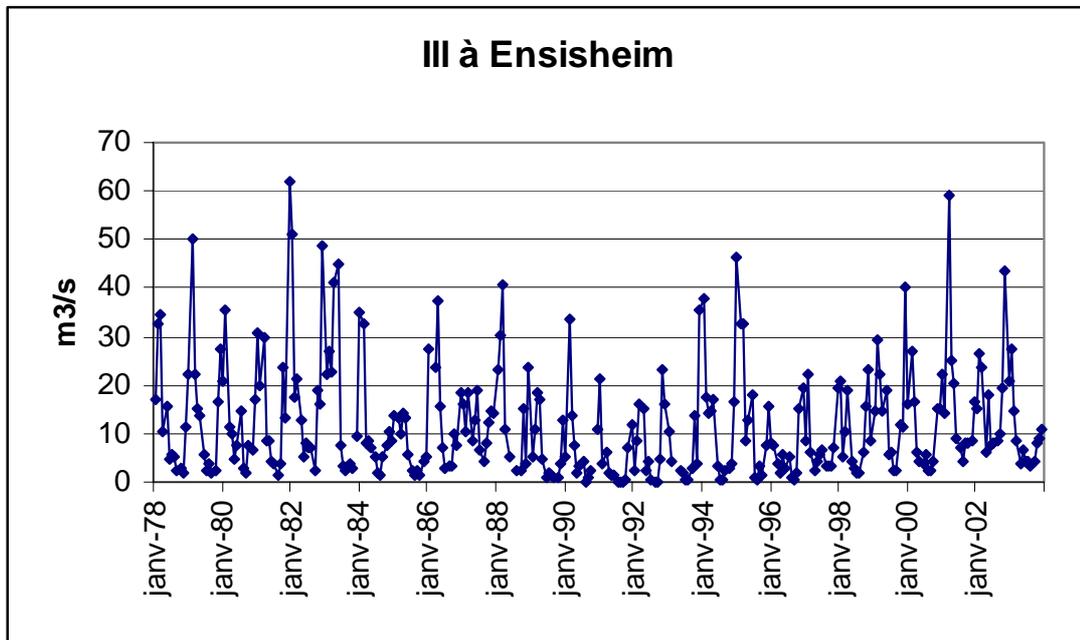
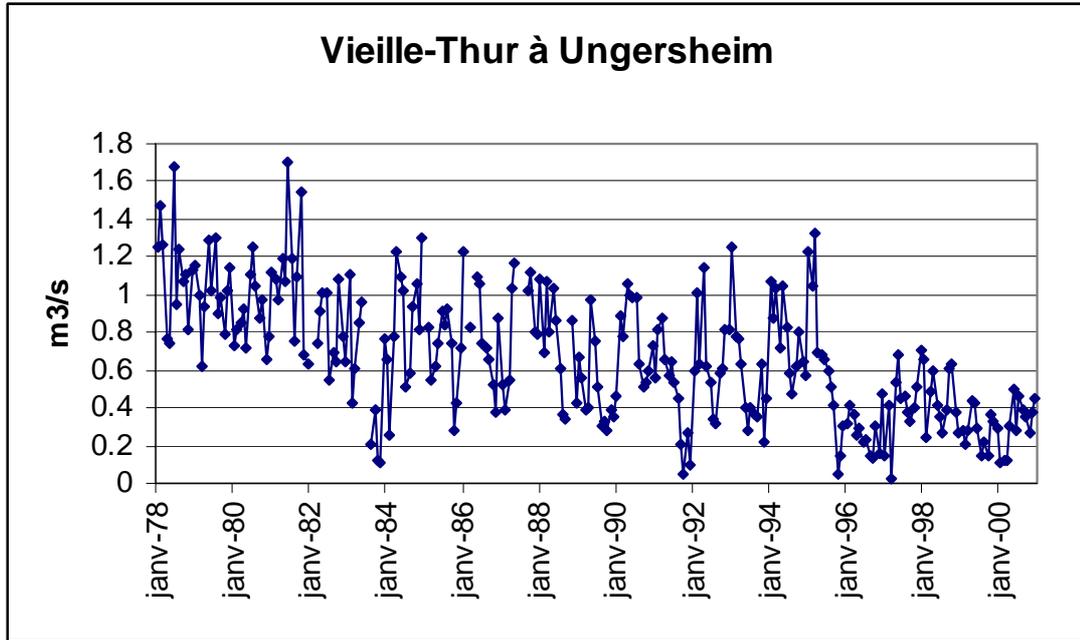
Thiéry D. (1995) Modélisation 3D du transport de masse avec le logiciel MARTHE version 5.4. Rapport BRGM R 38149 DR/HYT 95.

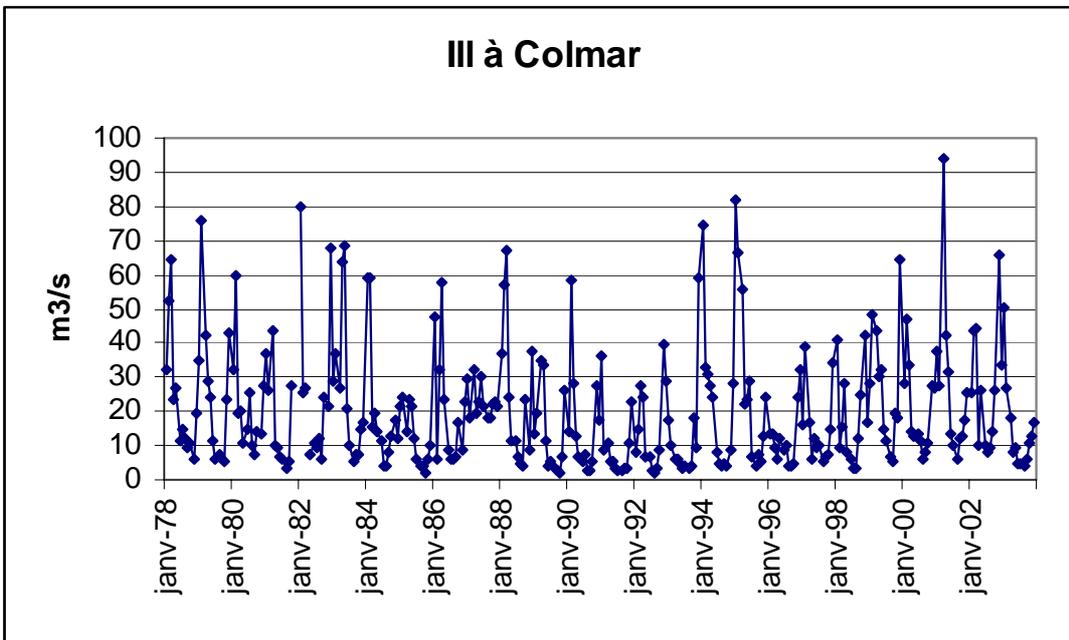
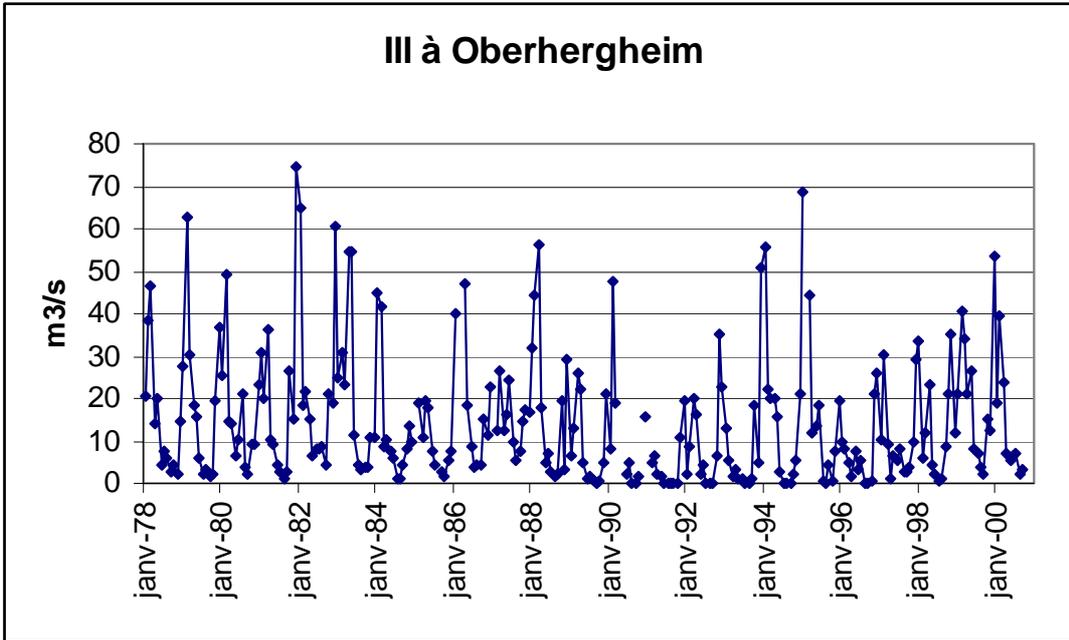
Thiéry D. (2003) Logiciel GARDÉNIA version 6.0. Guide d'utilisation. Rapport BRGM RP52832-FR

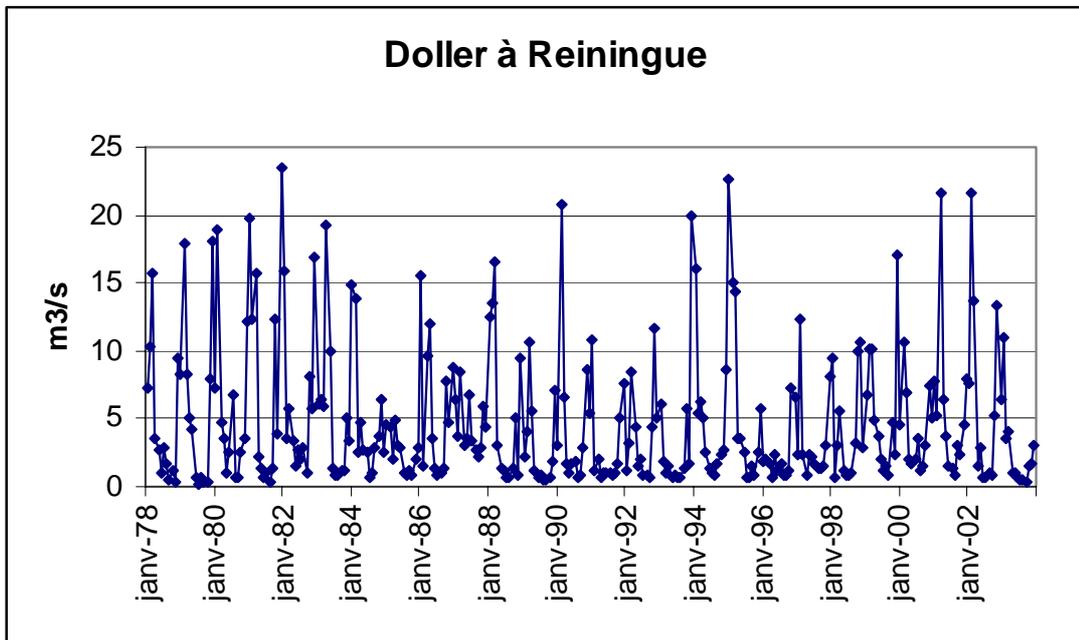
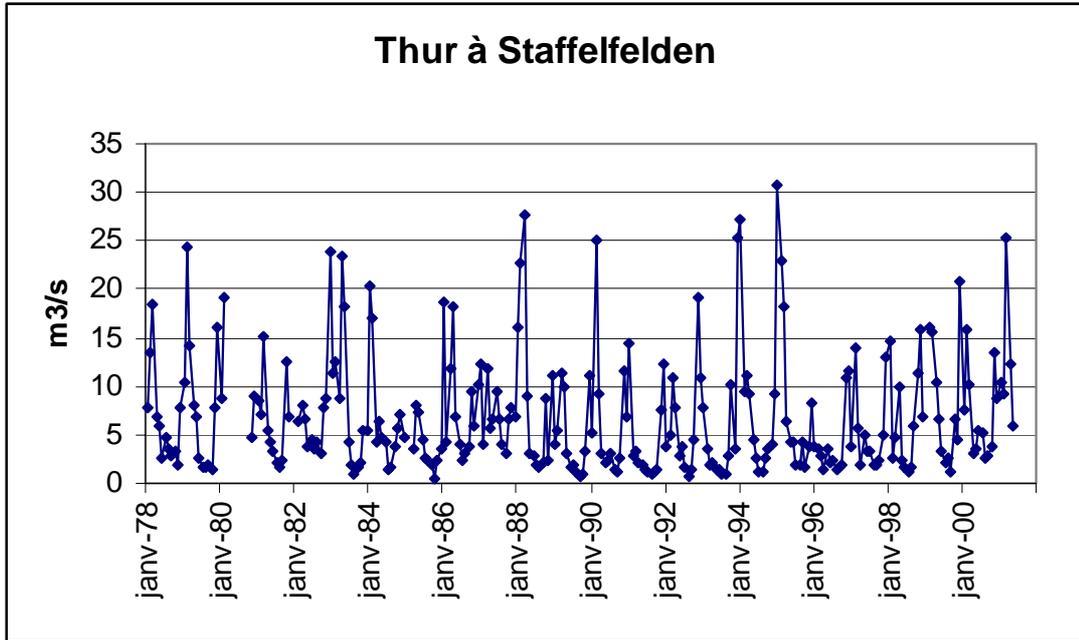
Annexe 1 Débits mensuels aux stations de jaugeage







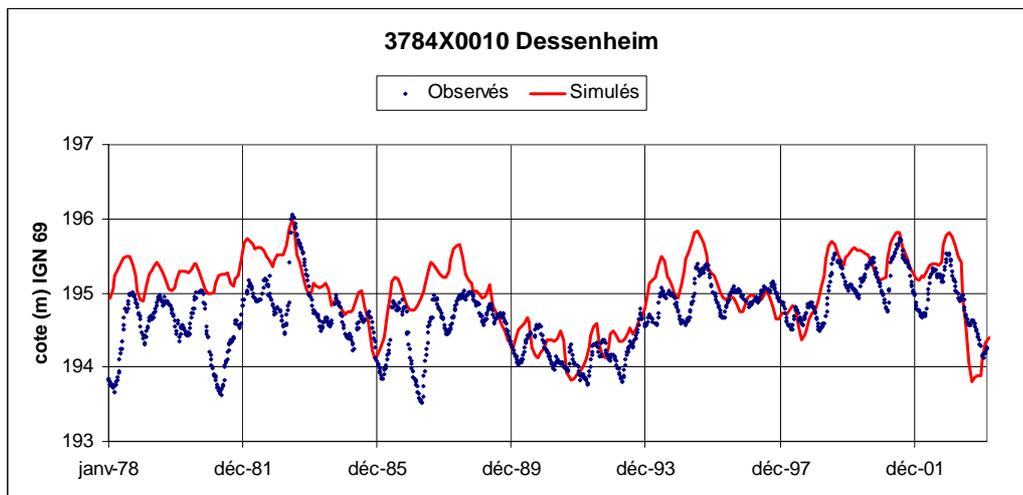
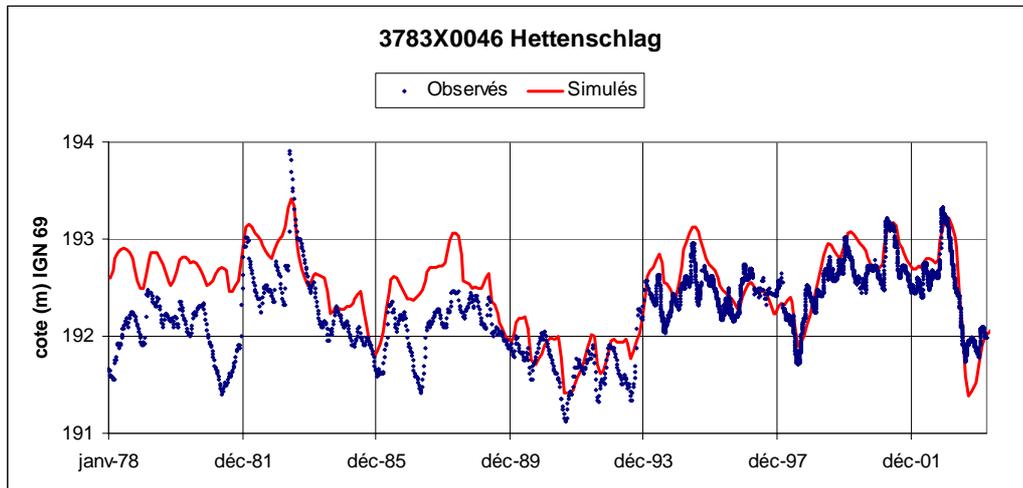


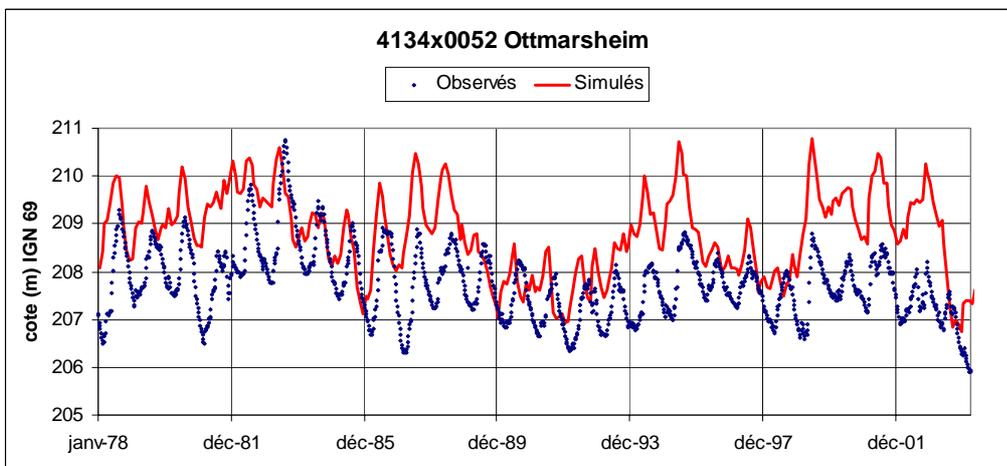
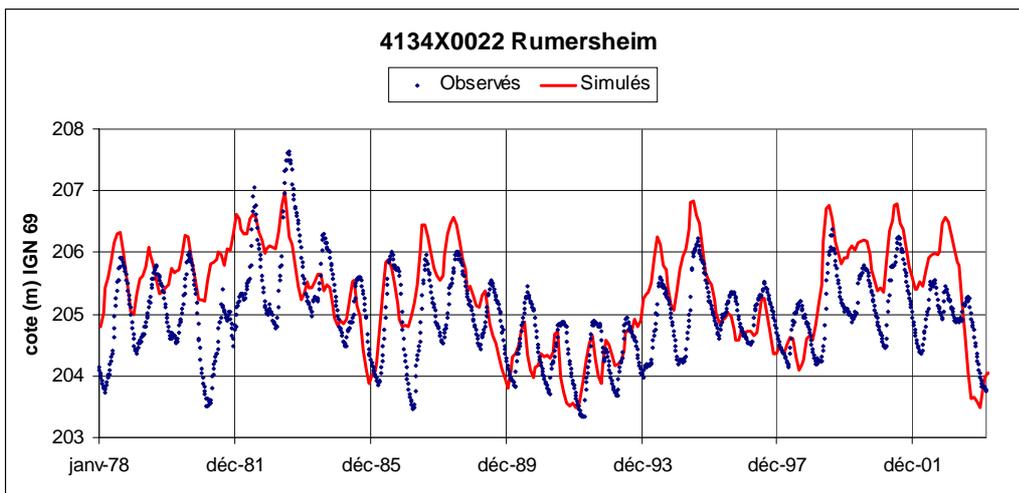
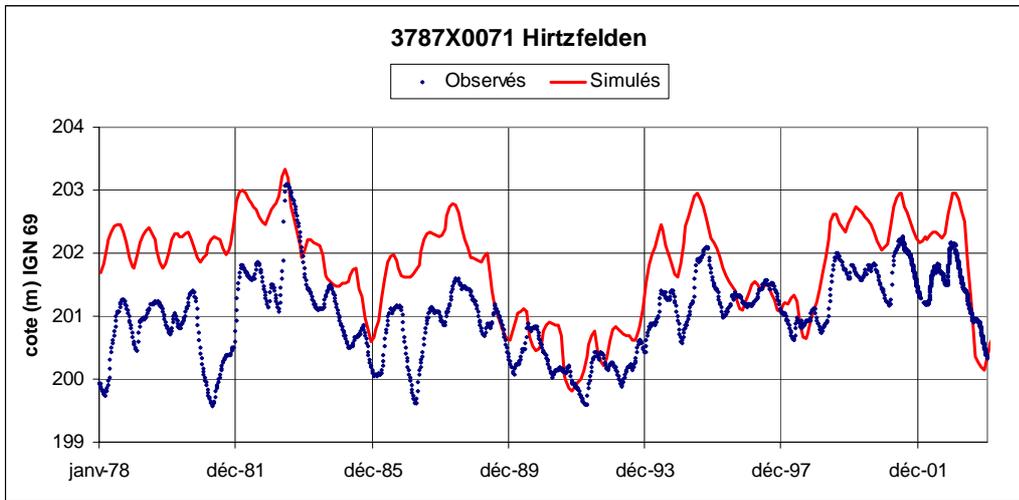


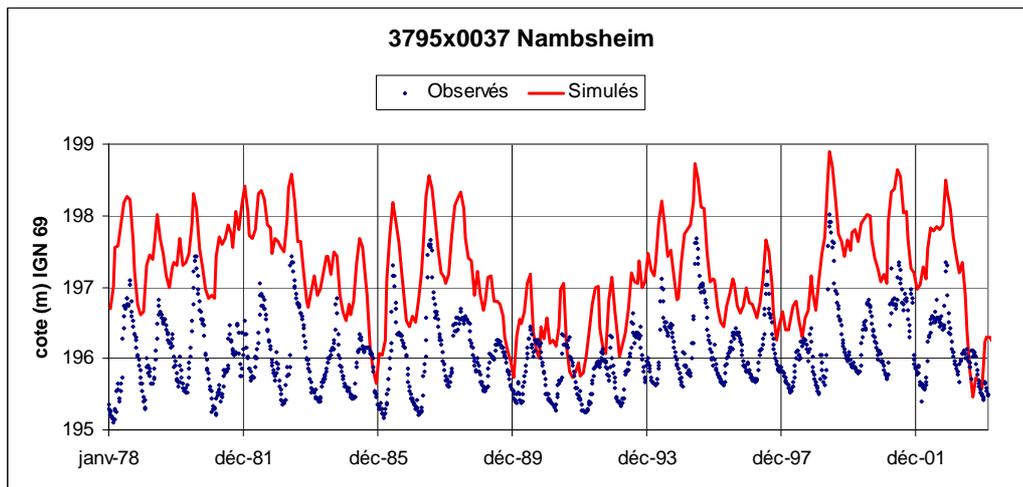
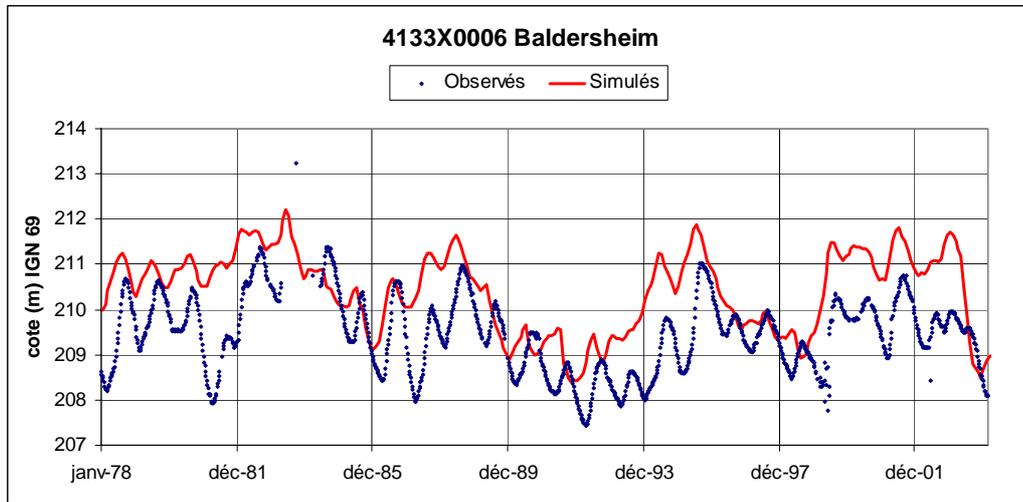
Annexe 2

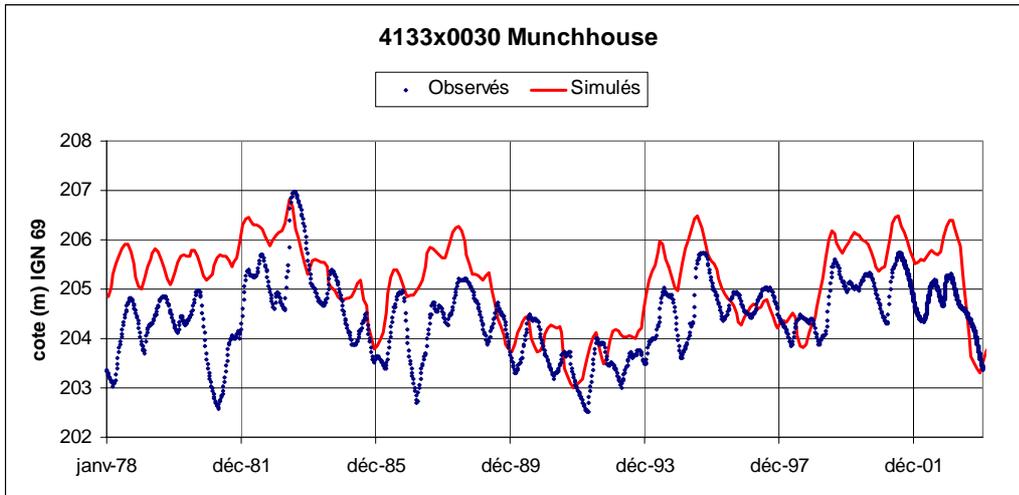
Calage de l'hydrodynamique : historiques de charge

a) Partie est du modèle

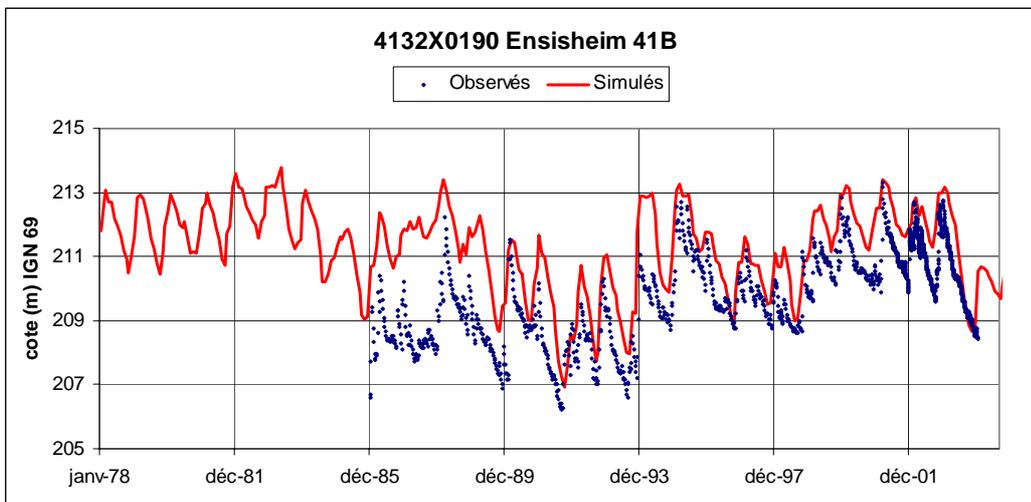


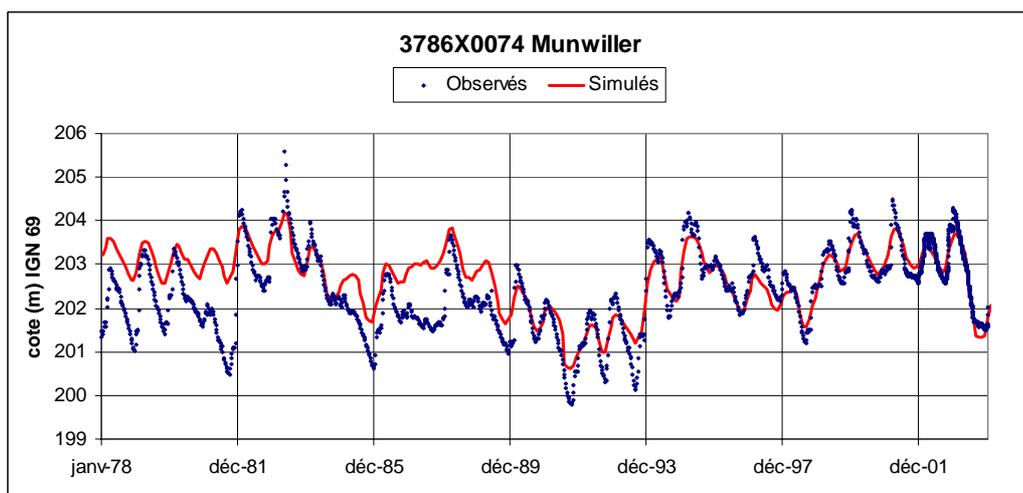
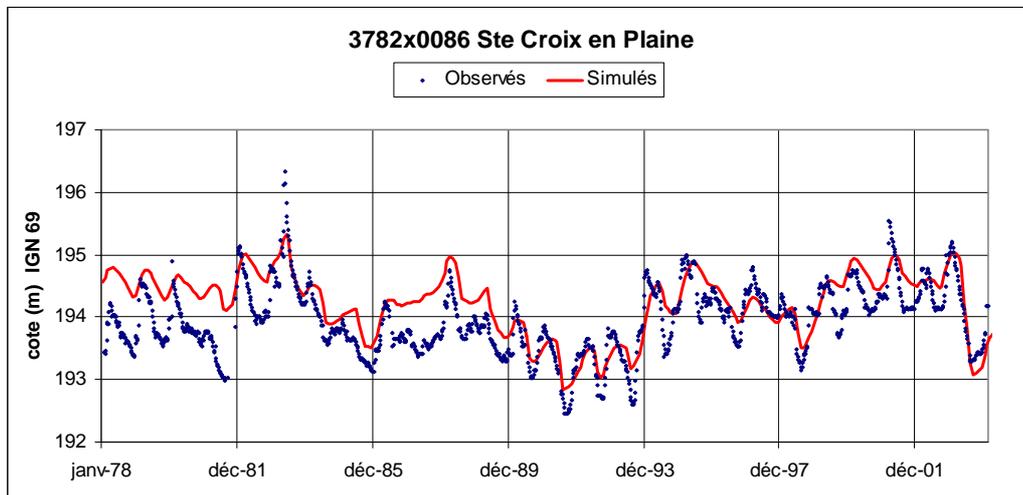
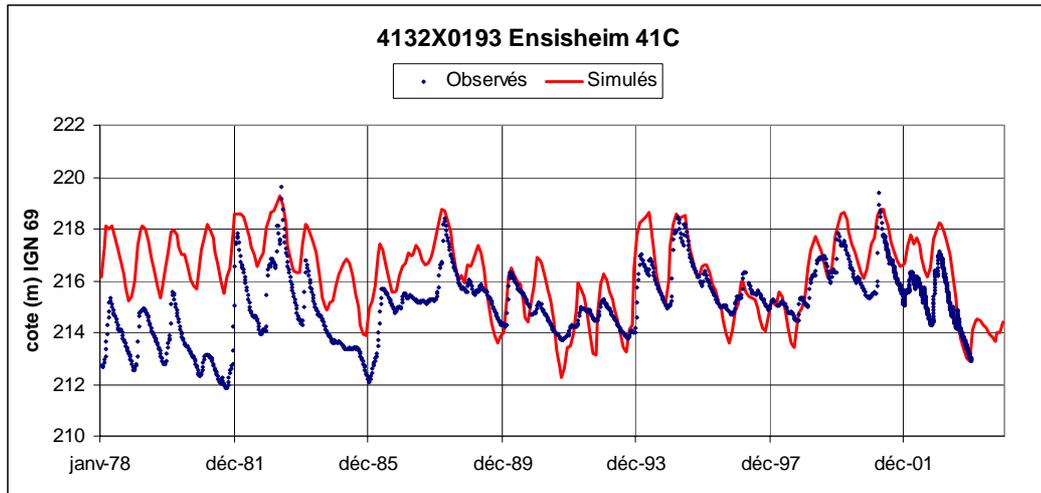


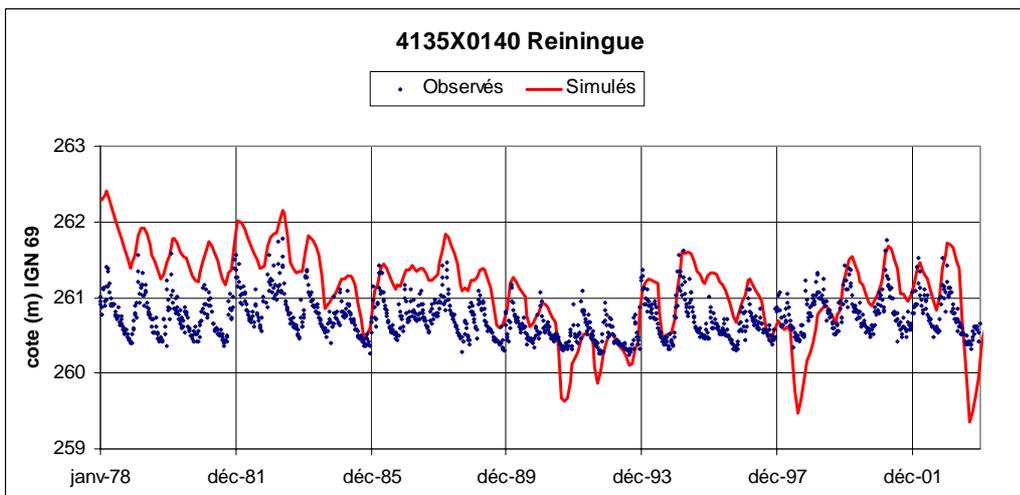
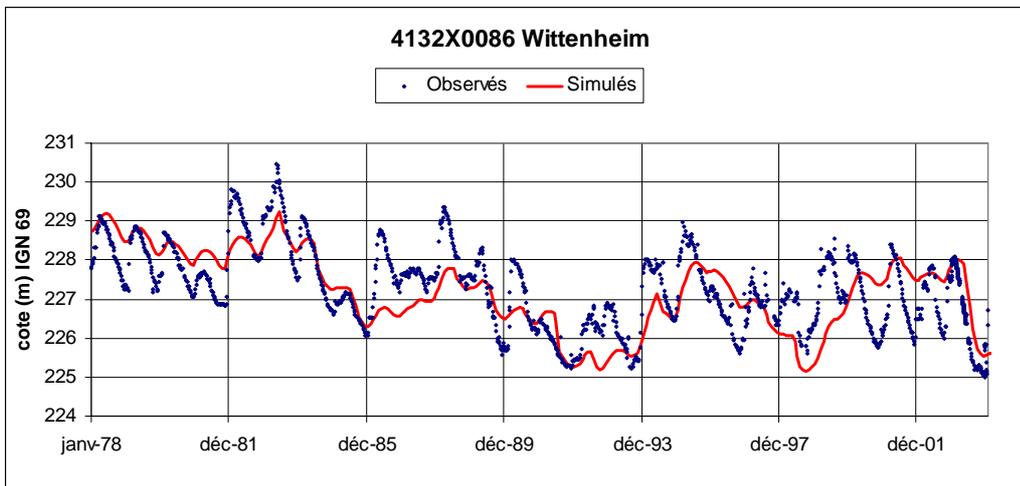
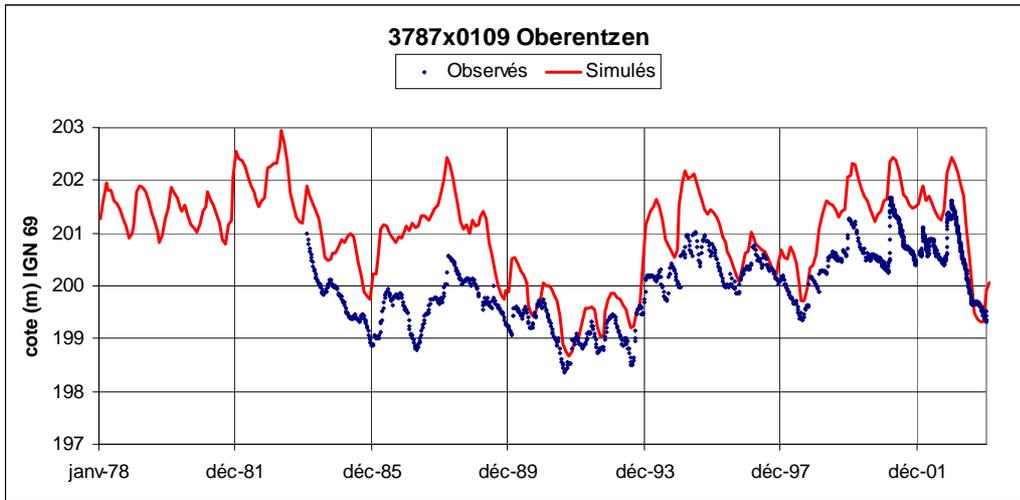


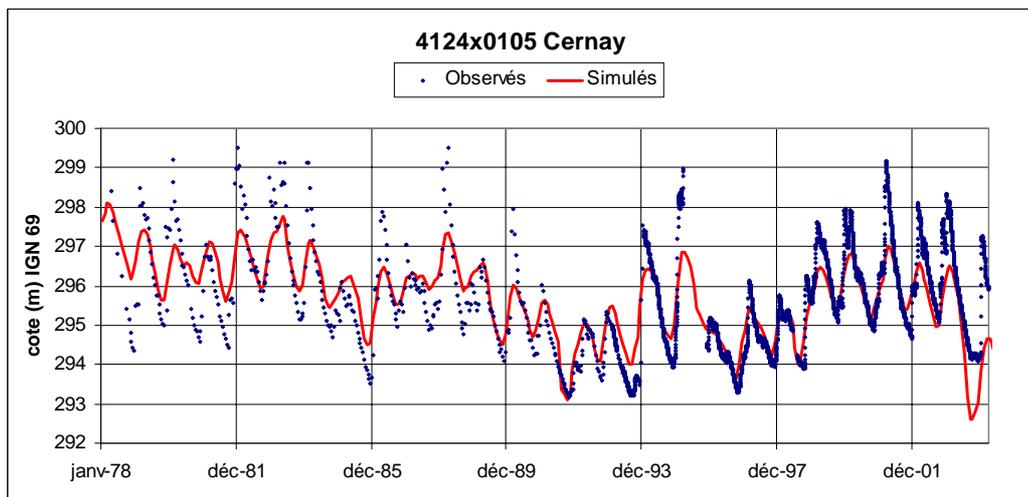
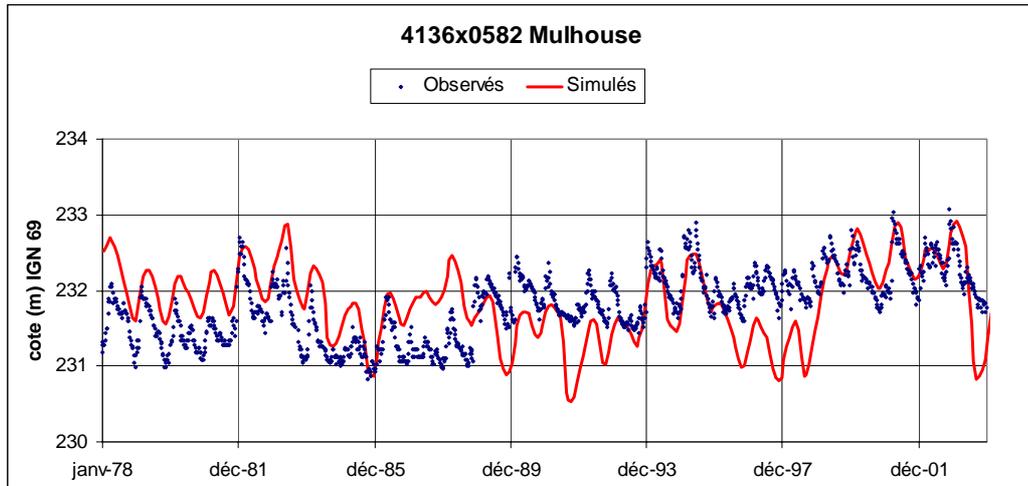


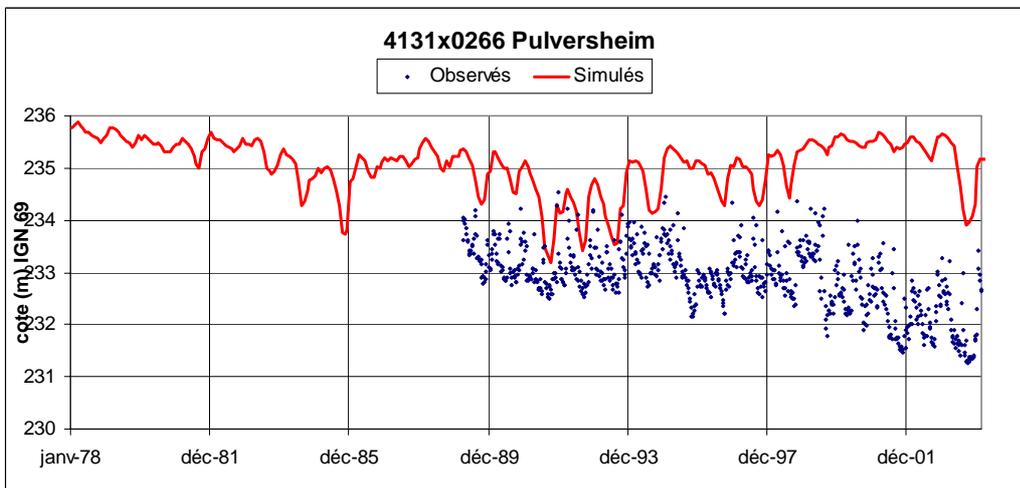
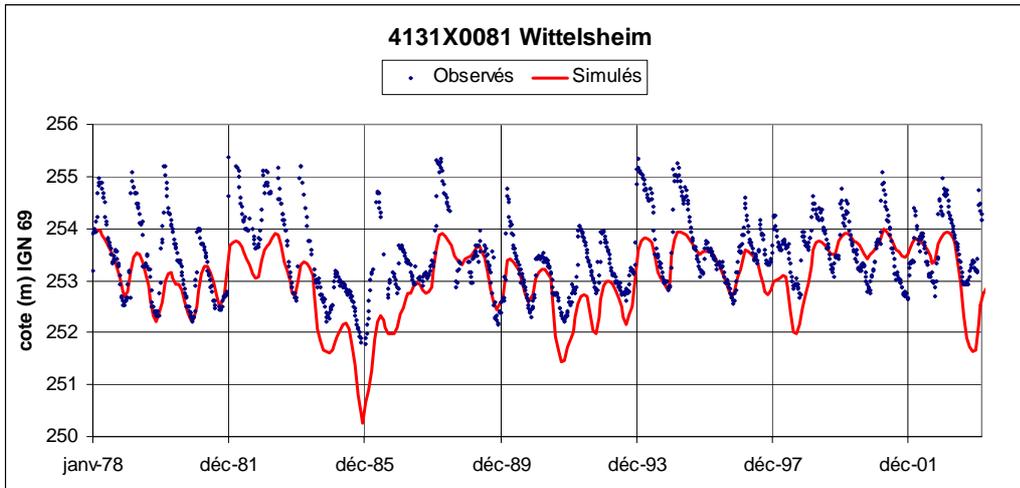
b) Partie ouest du modèle





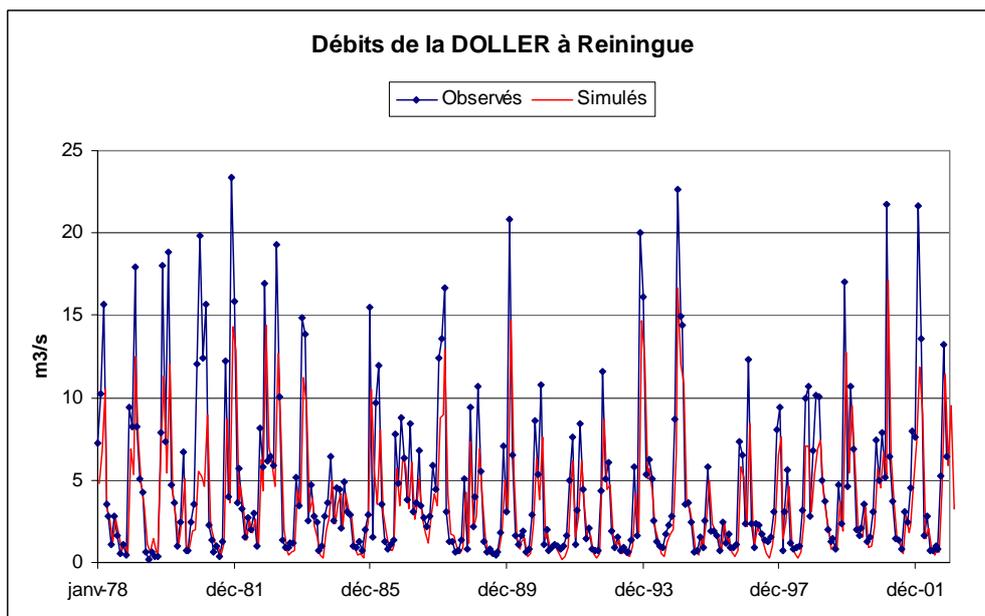
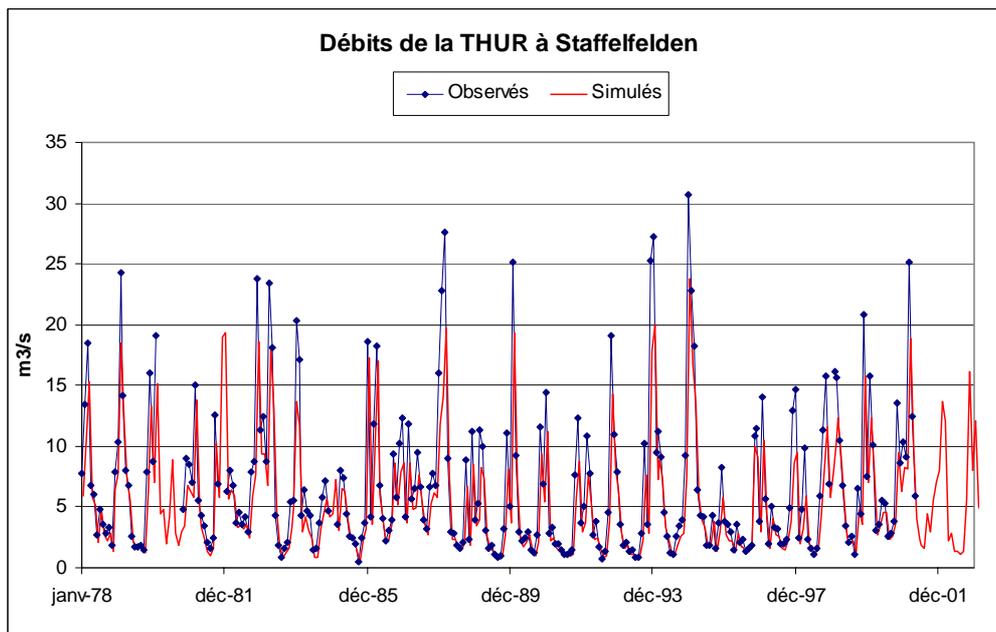


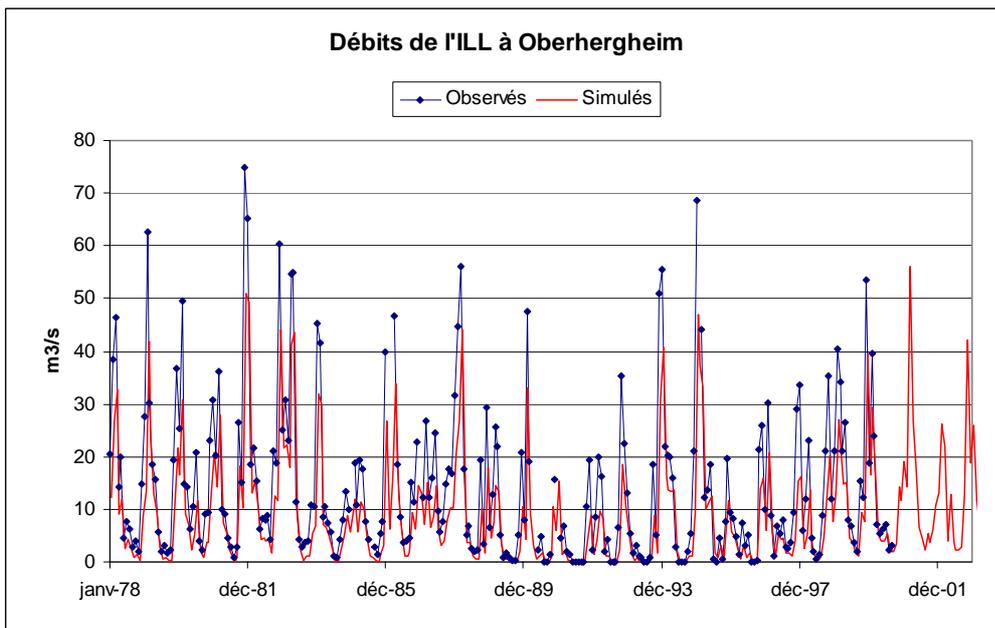
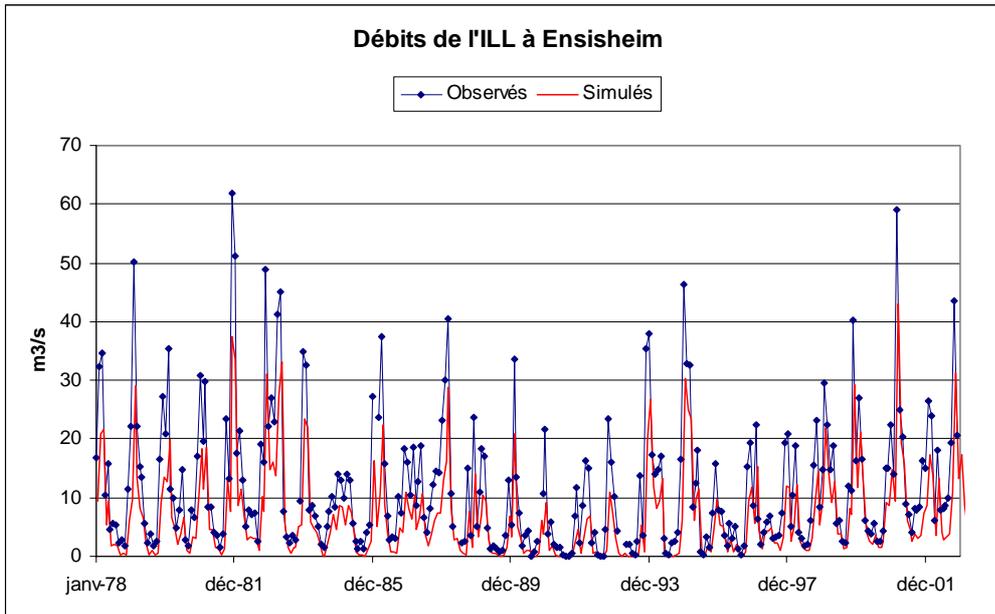


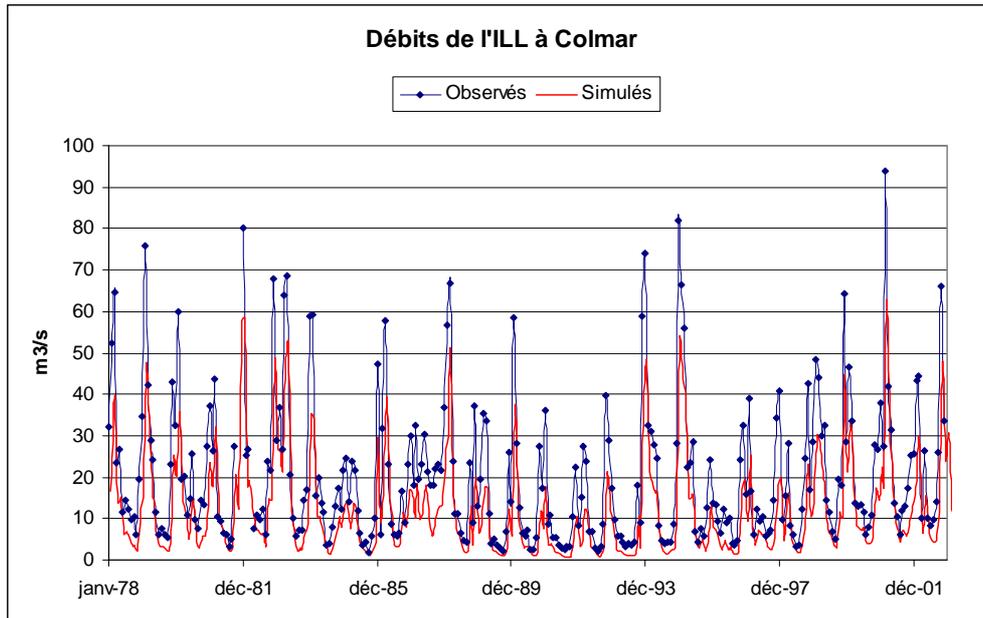


Annexe 3

Calage de l'hydrodynamique : historiques de débit aux stations de jaugeage



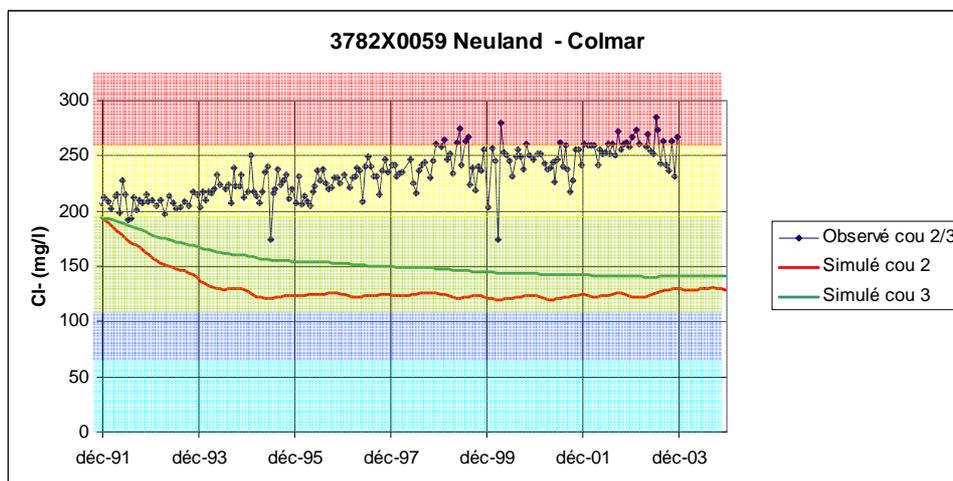
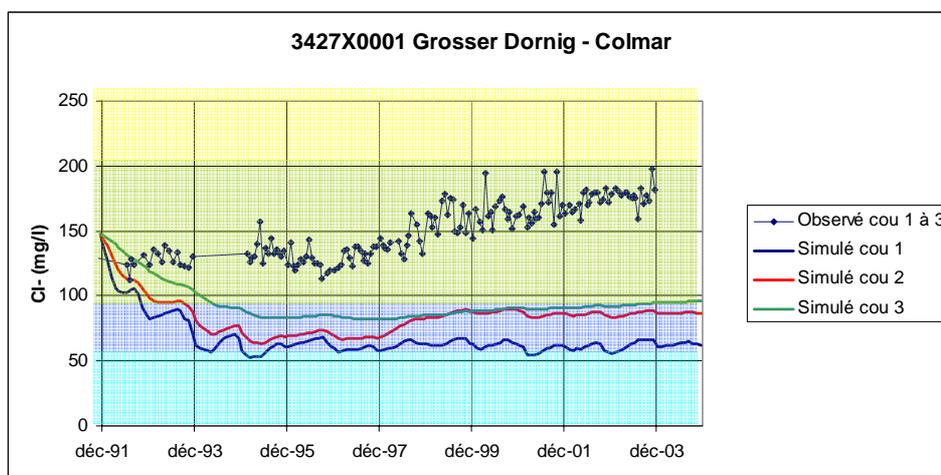




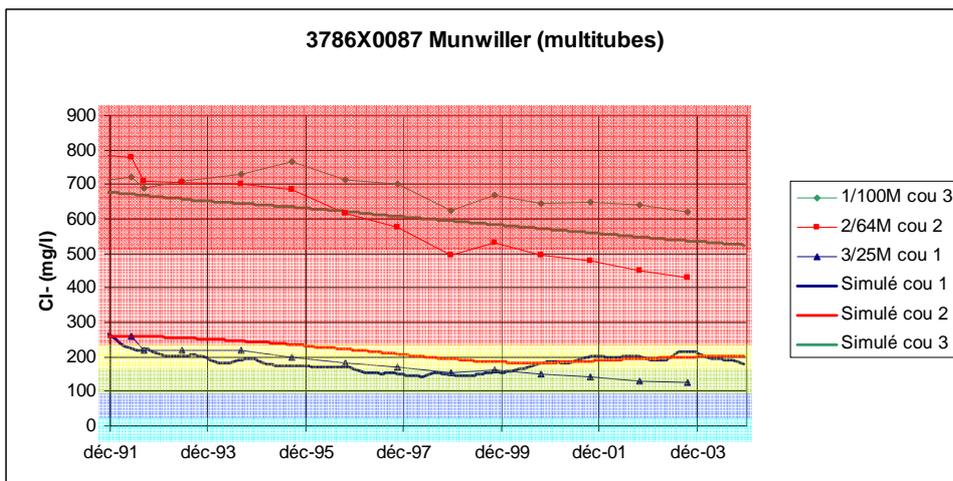
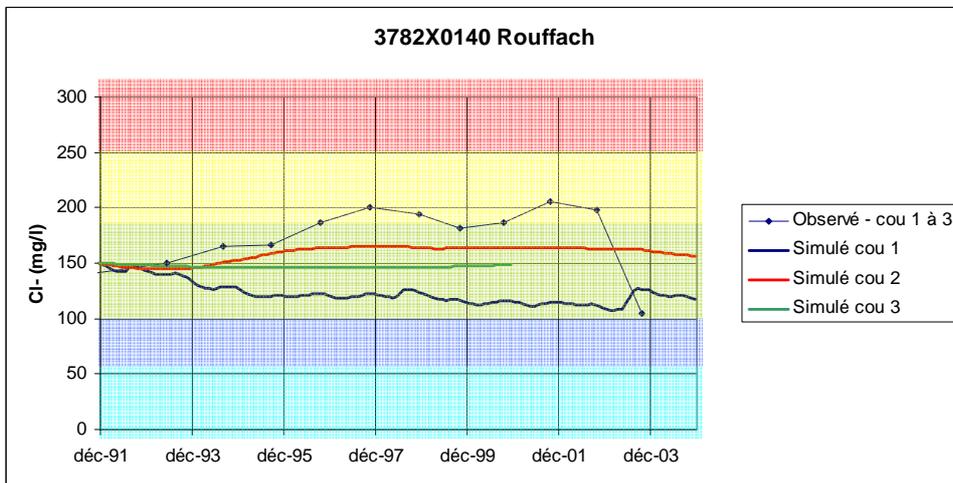
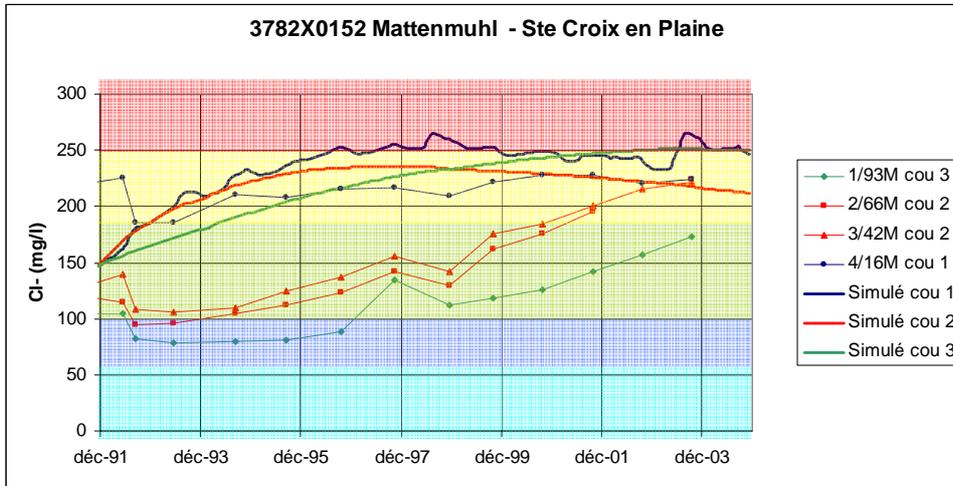
Annexe 4

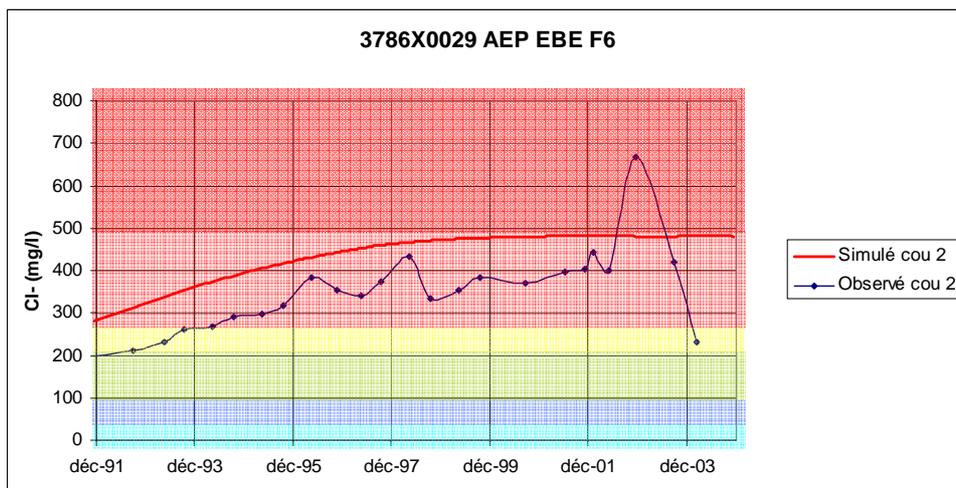
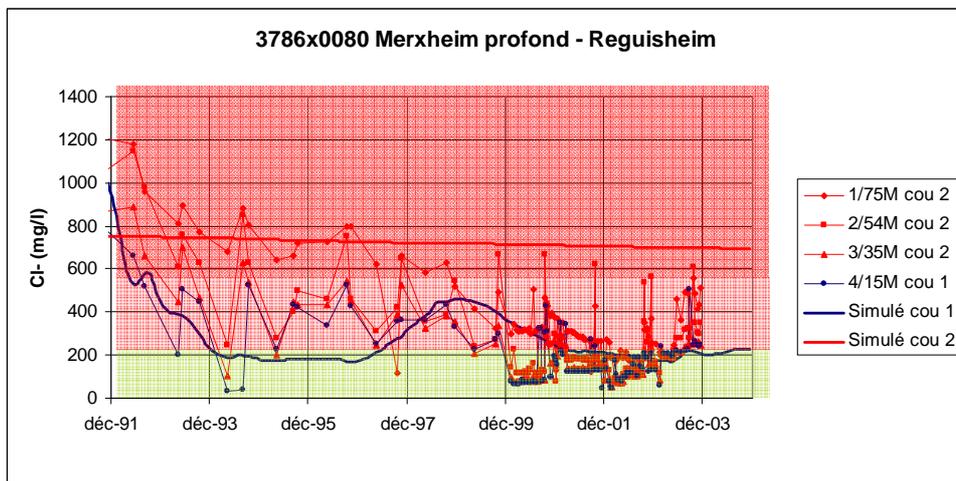
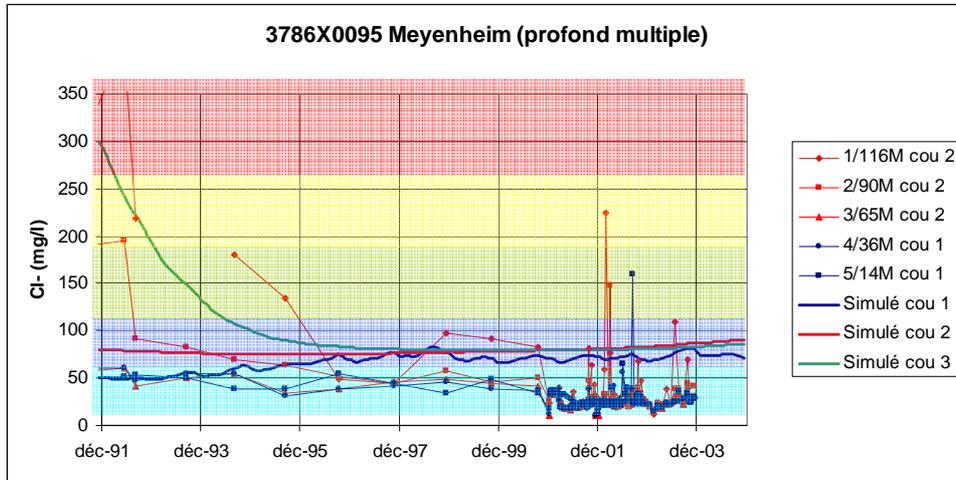
Calage du transport : historiques de salure aux piézomètres et puits de fixation

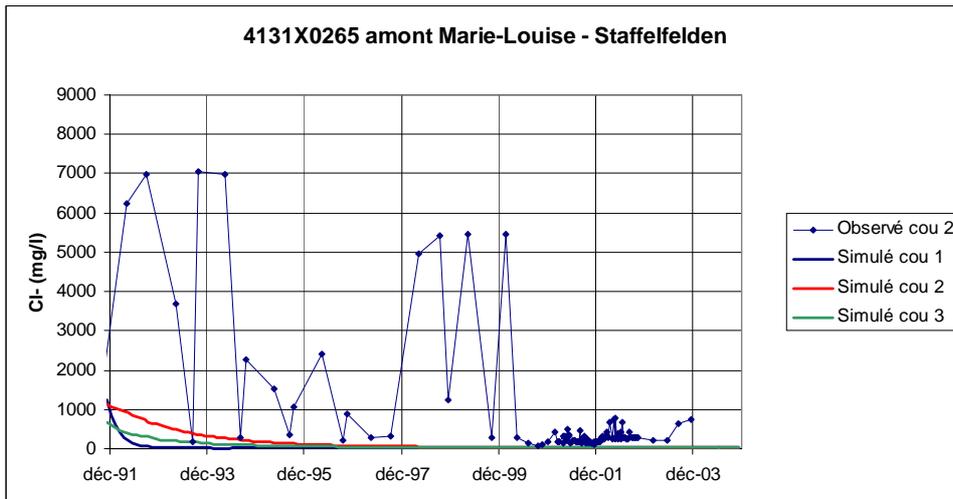
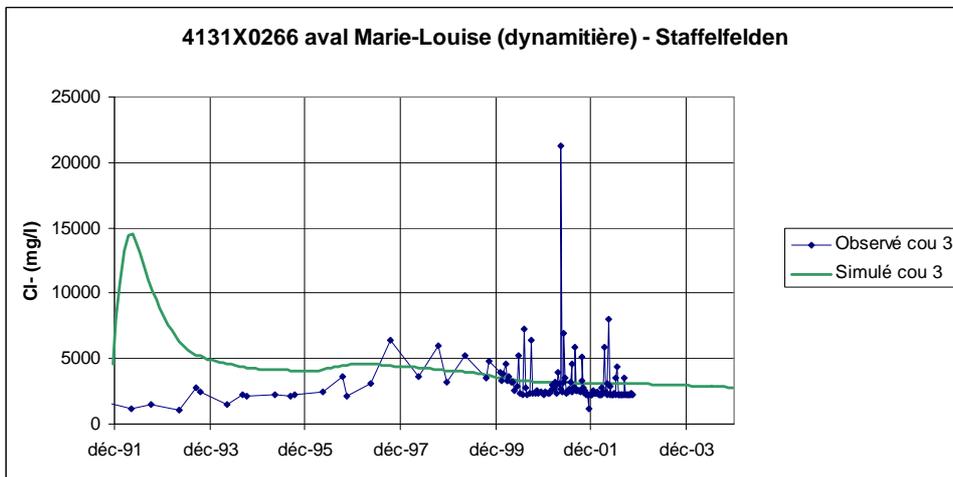
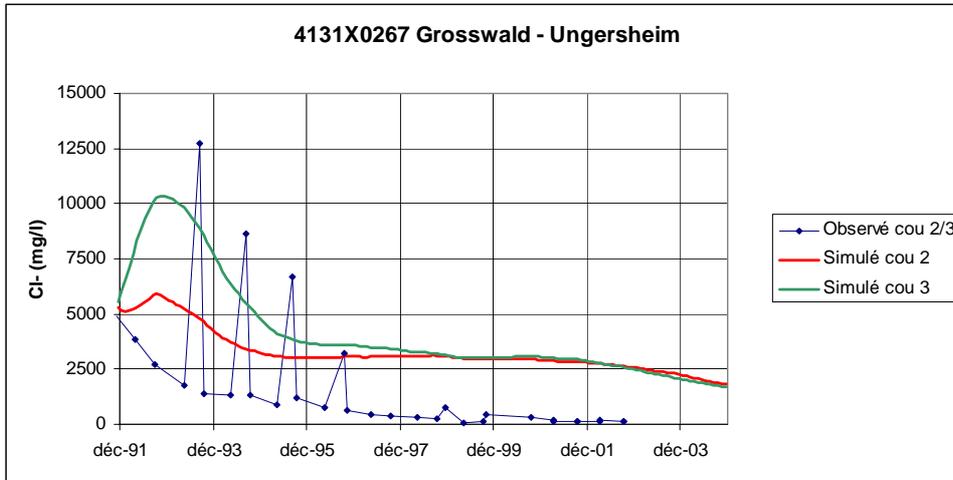
a) Piézomètres – langue Ouest du Nord au Sud



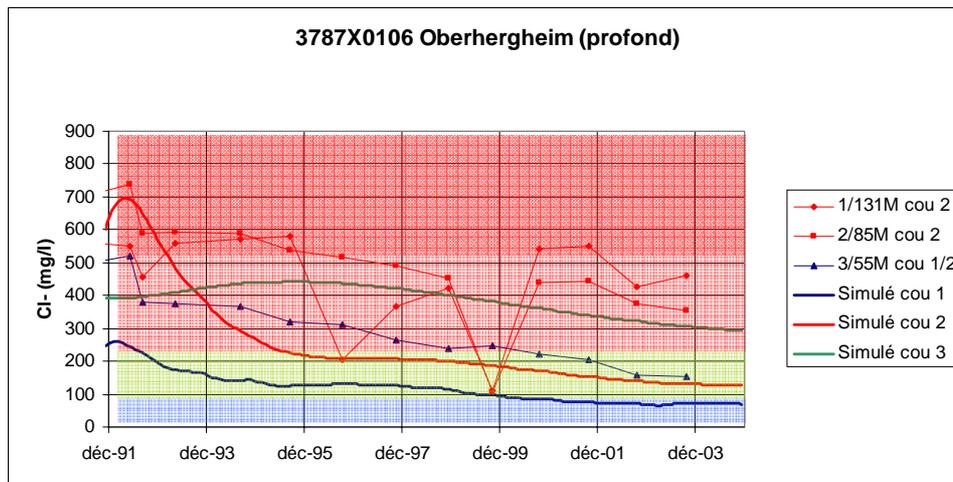
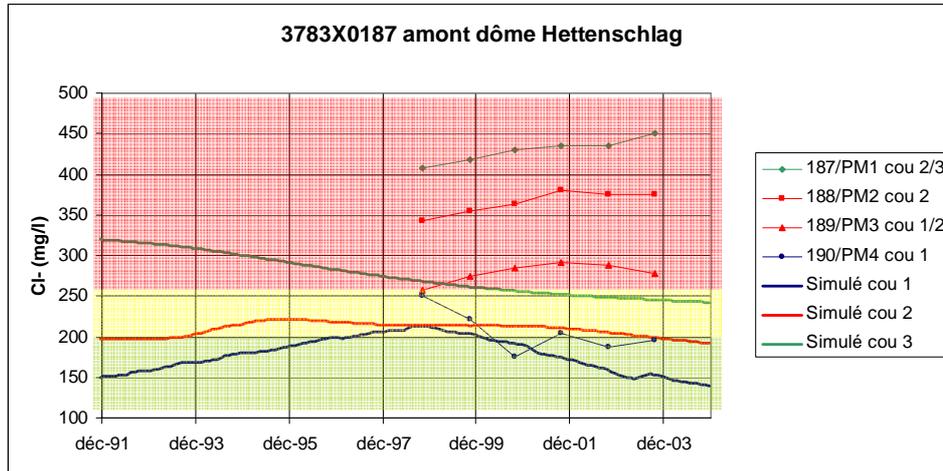
Note : le fond coloré des graphiques correspond à l'échelle de couleur adoptée pour les tranches de concentrations en chlorures des cartographies.

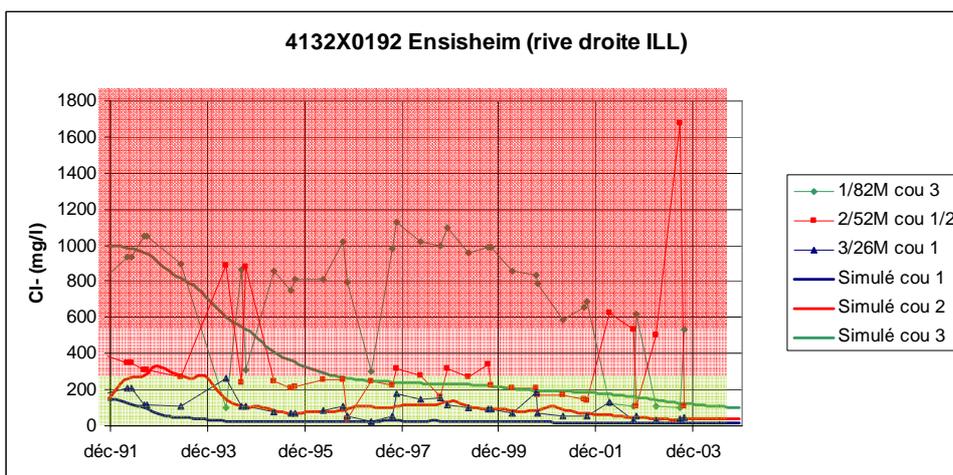
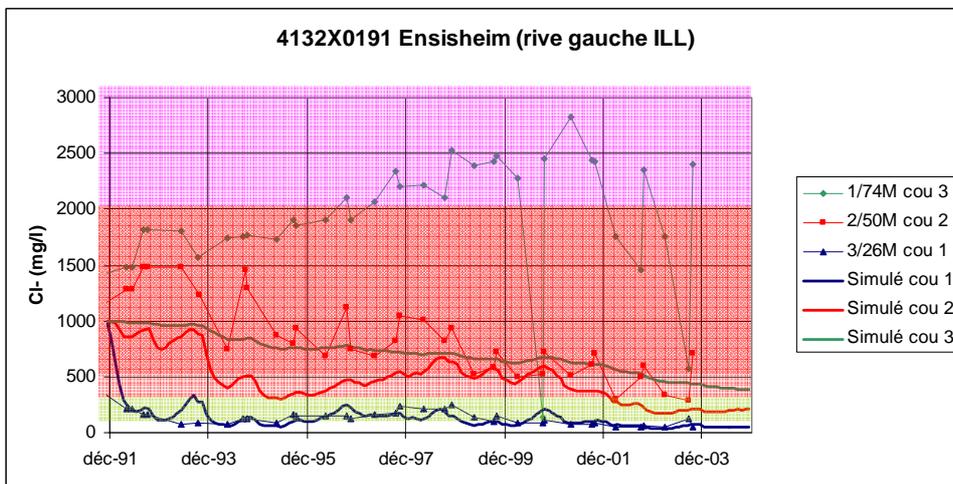
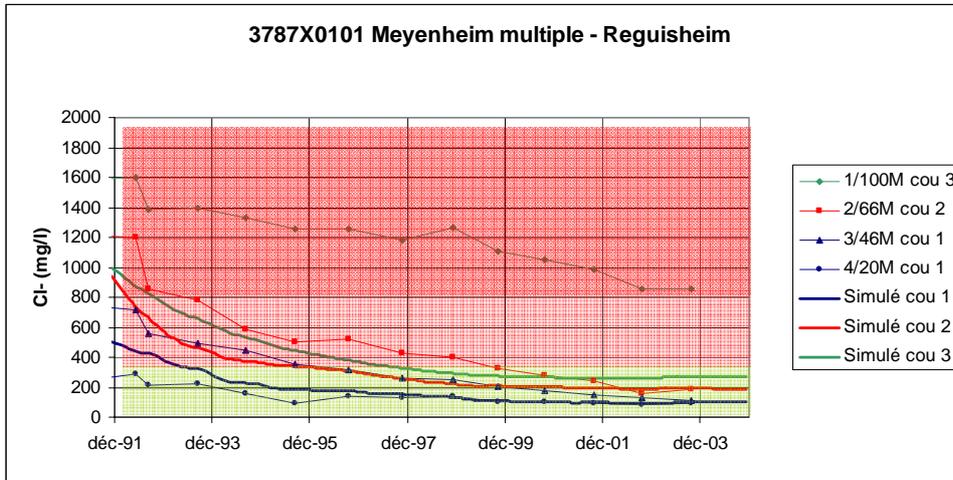


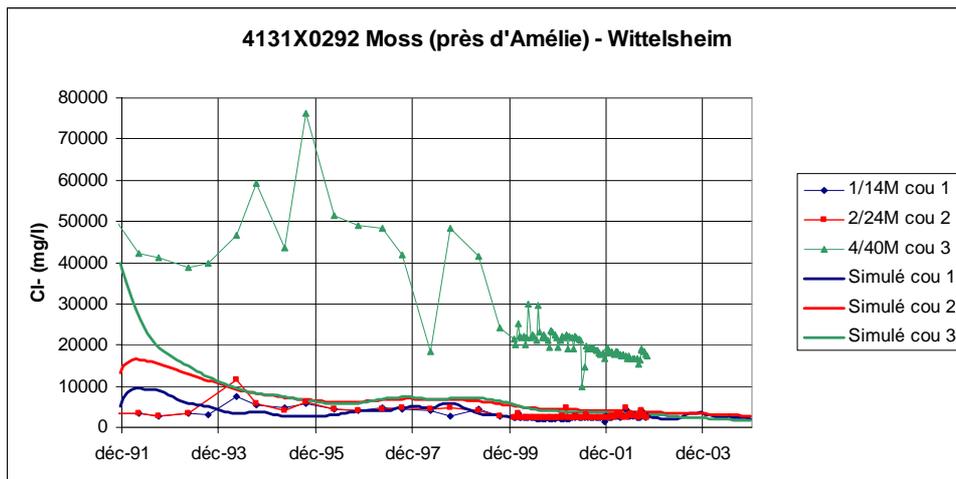
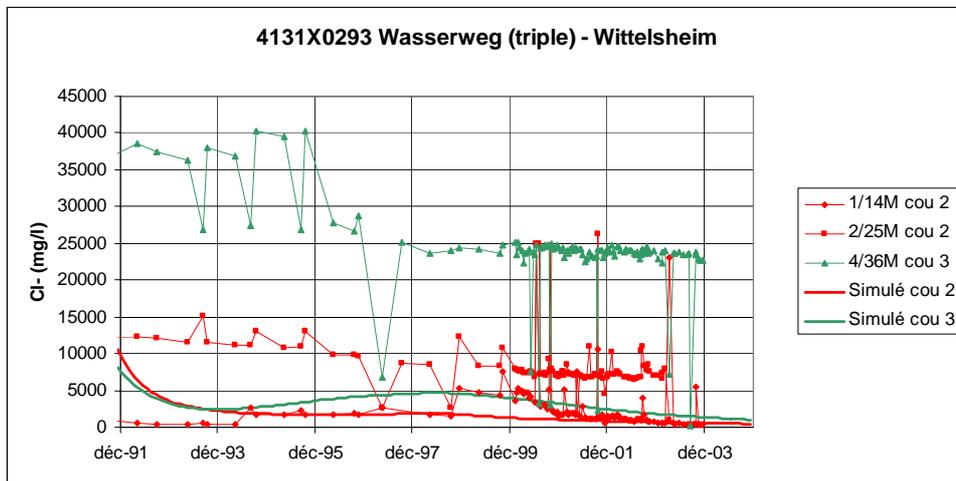
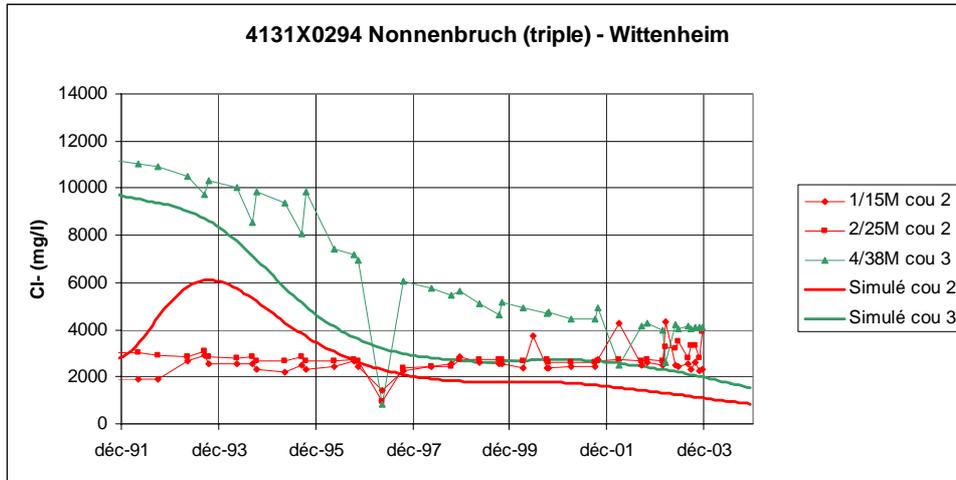




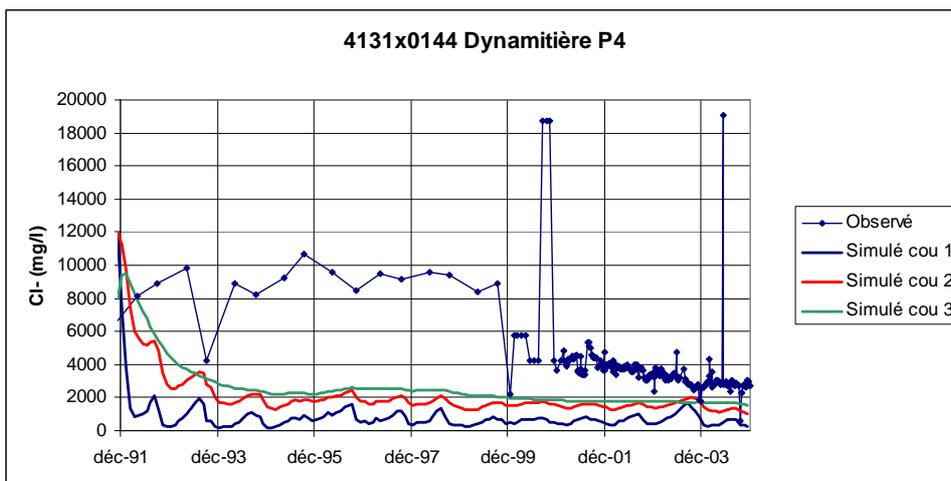
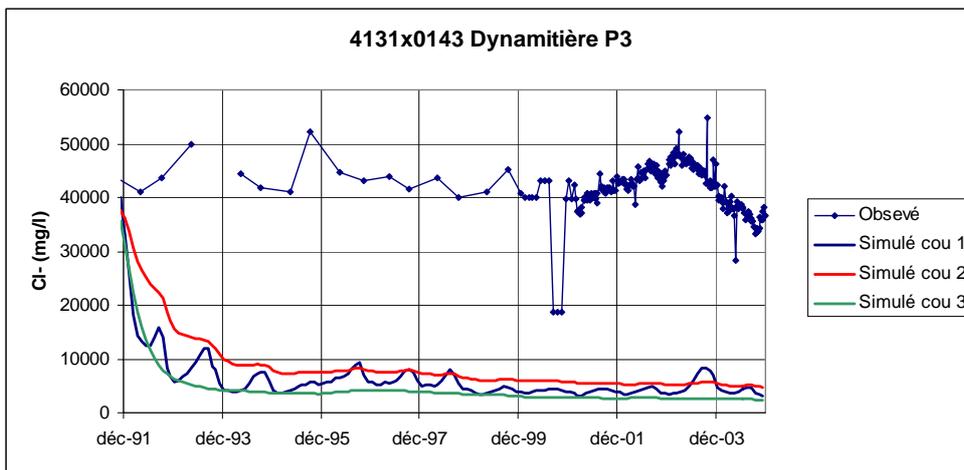
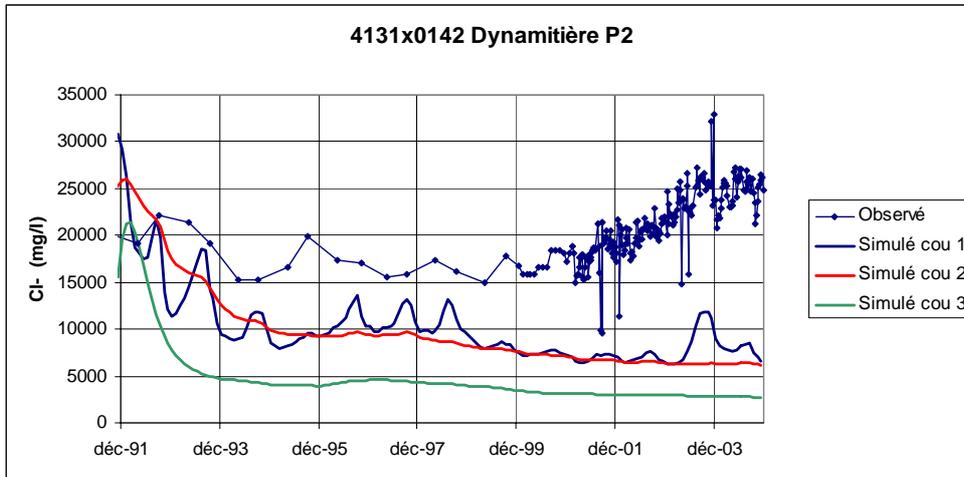
b) Piézomètres – langue Est du Nord au Sud

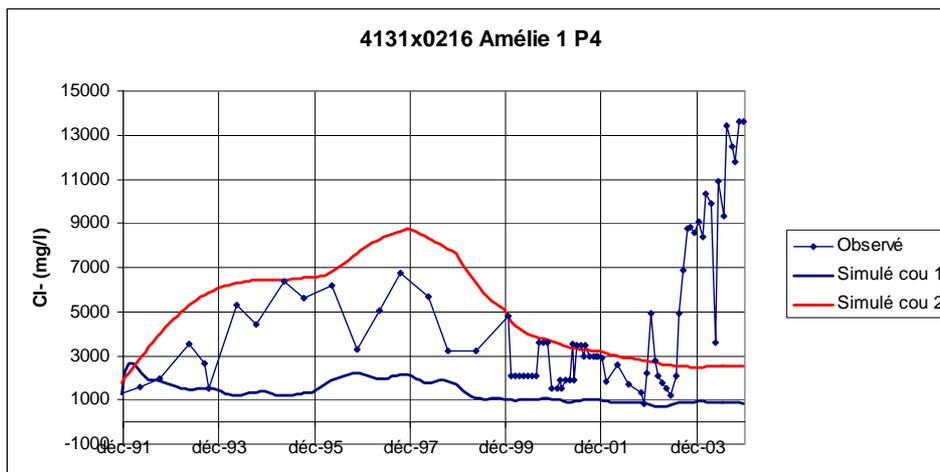
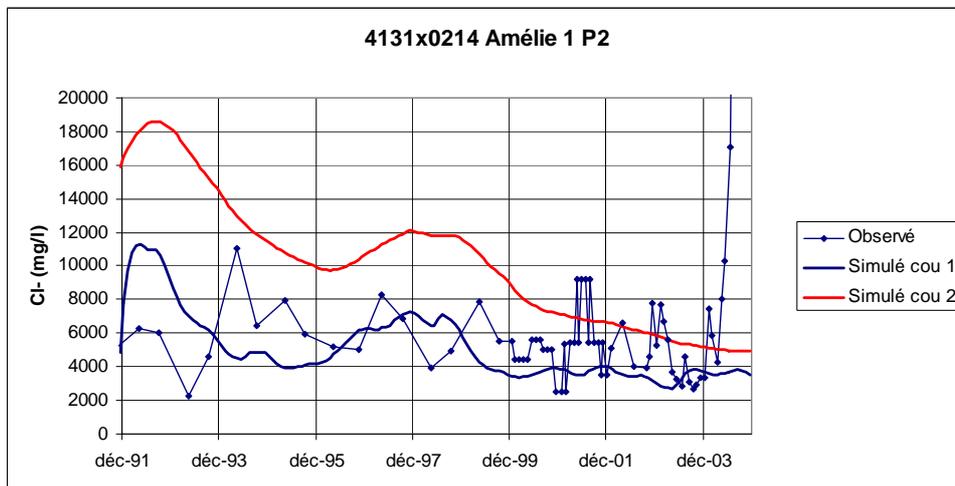
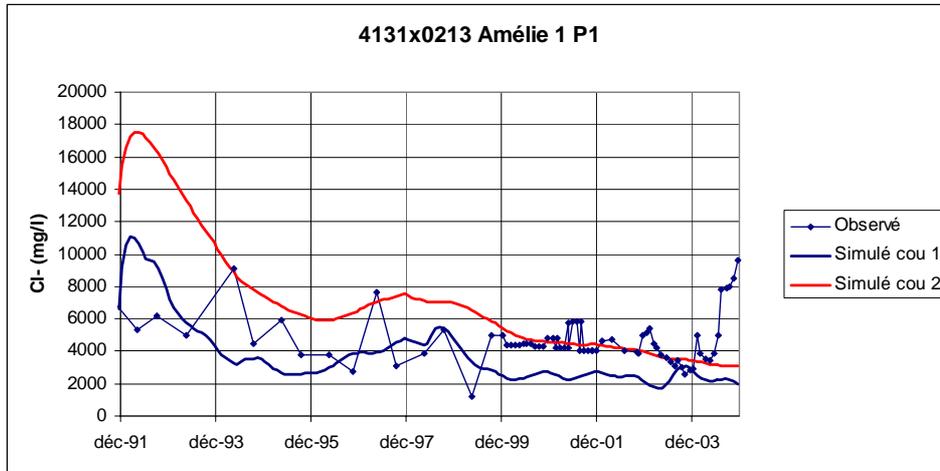


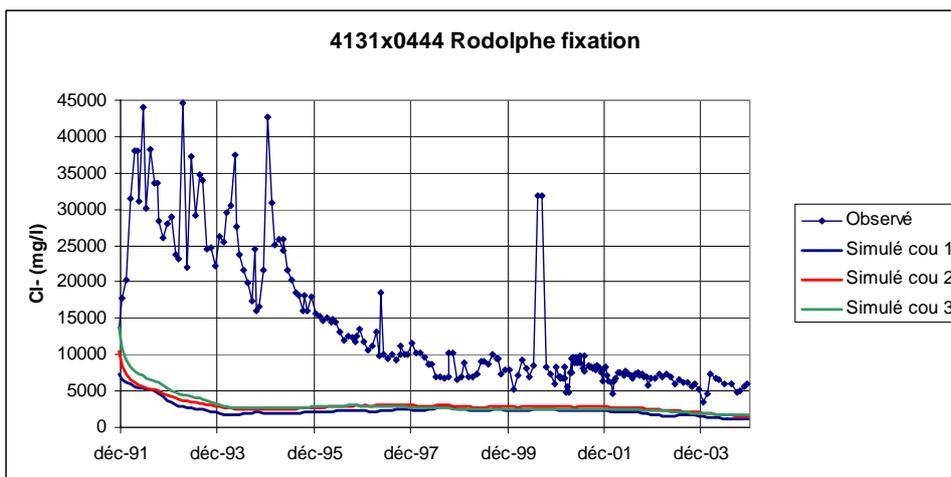
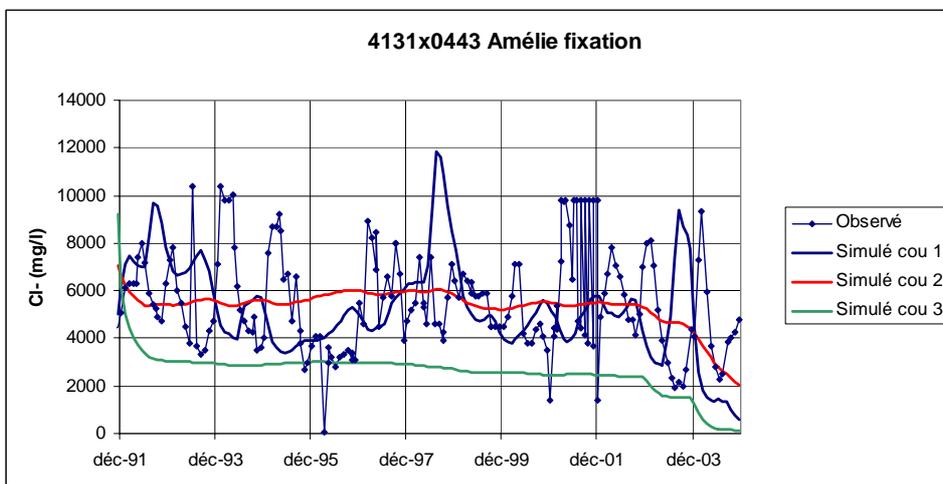
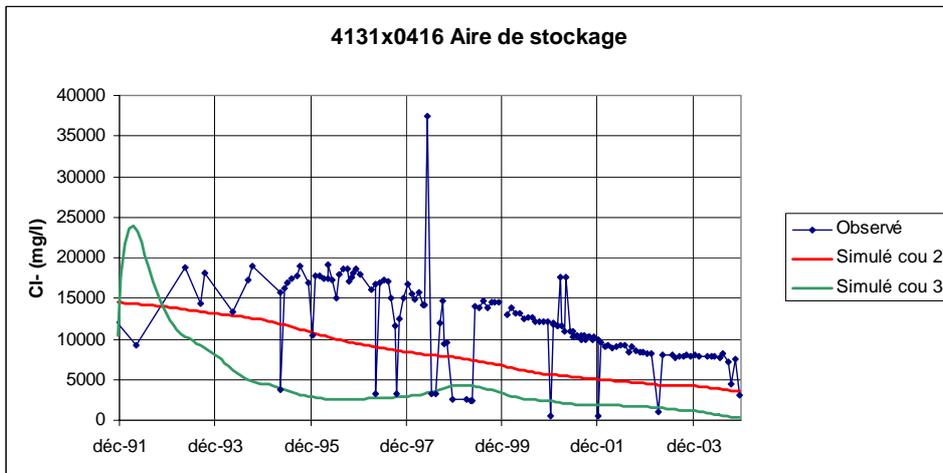


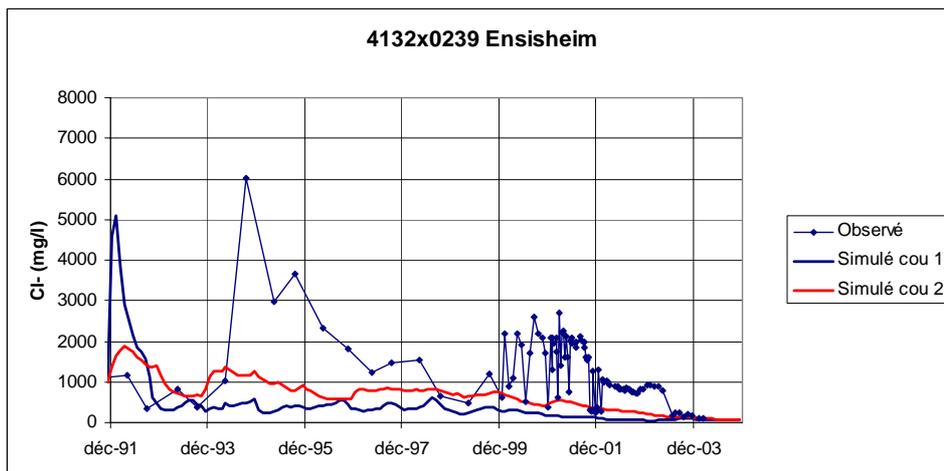
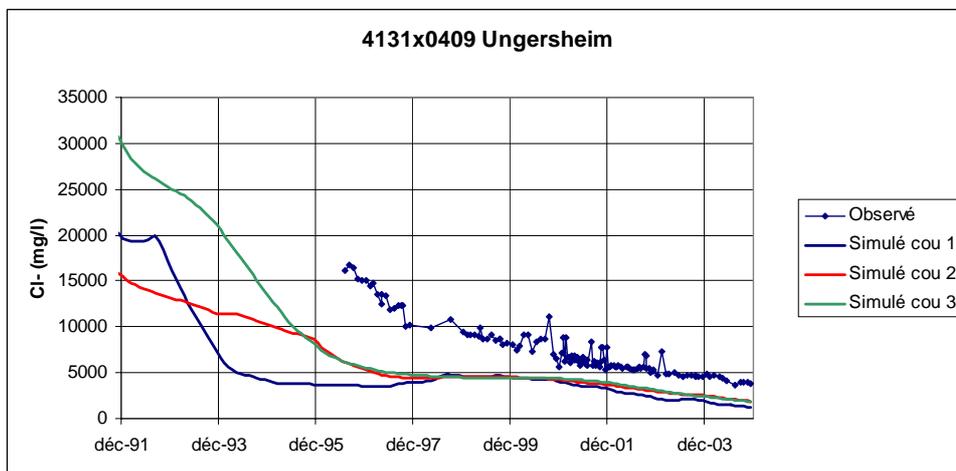
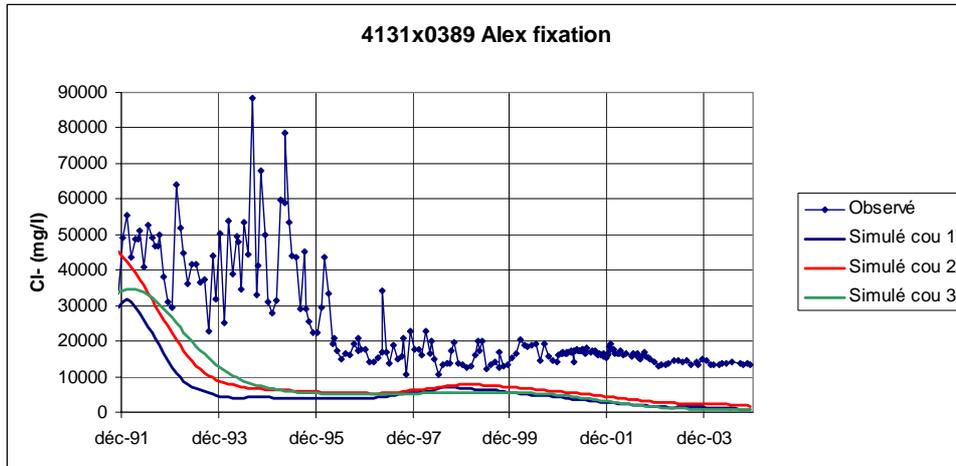


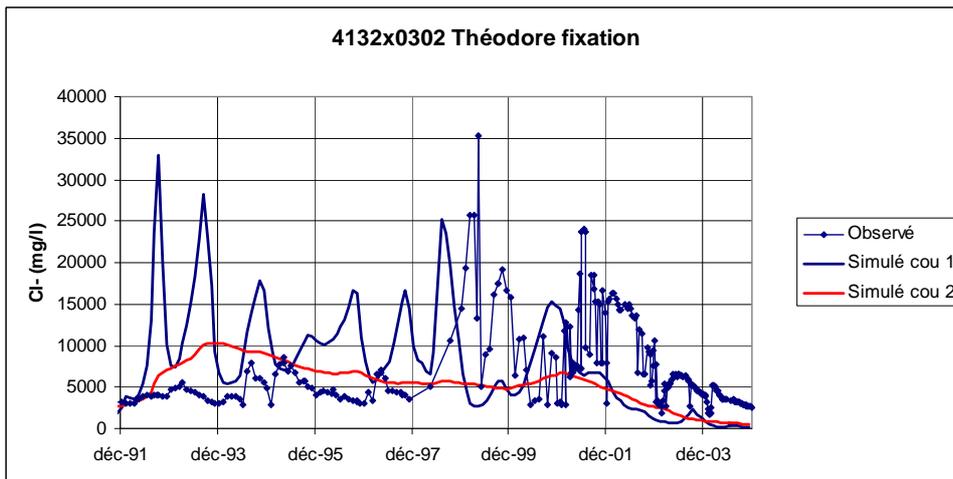
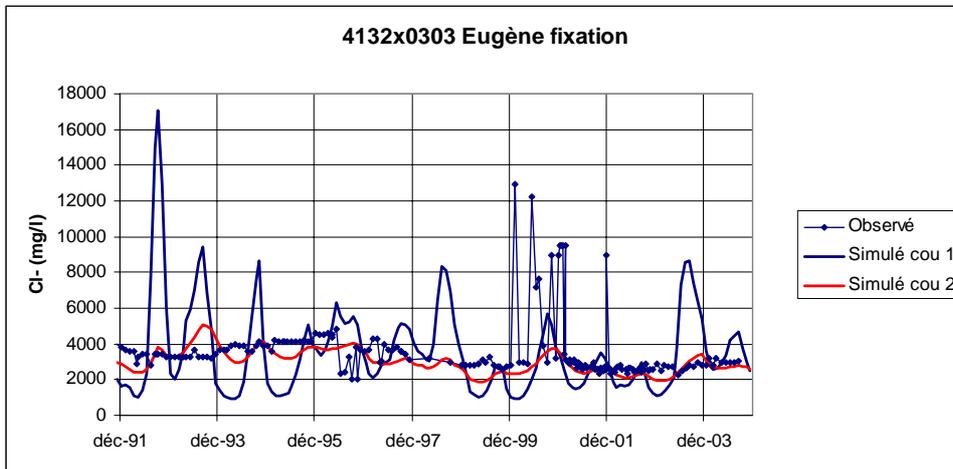
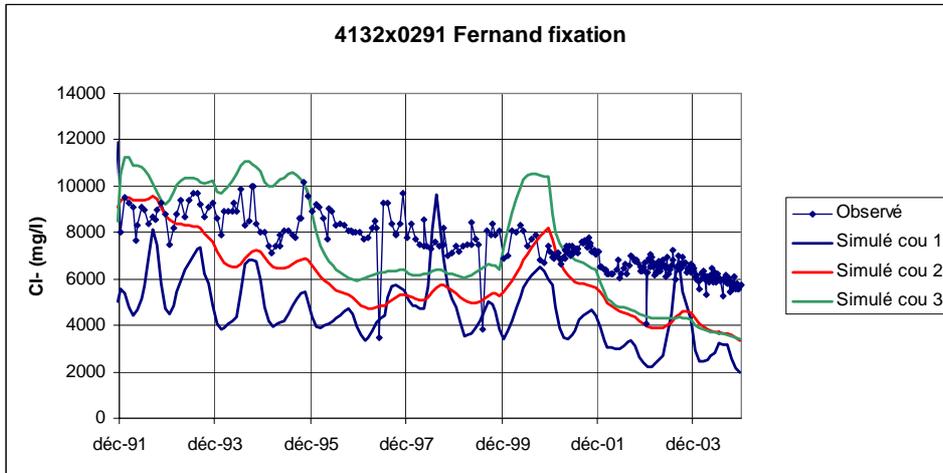
c) Puits de fixation

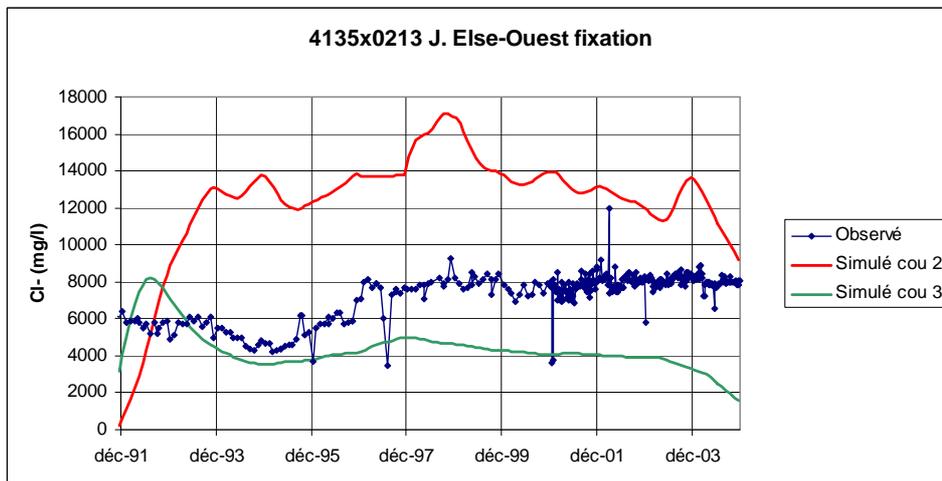
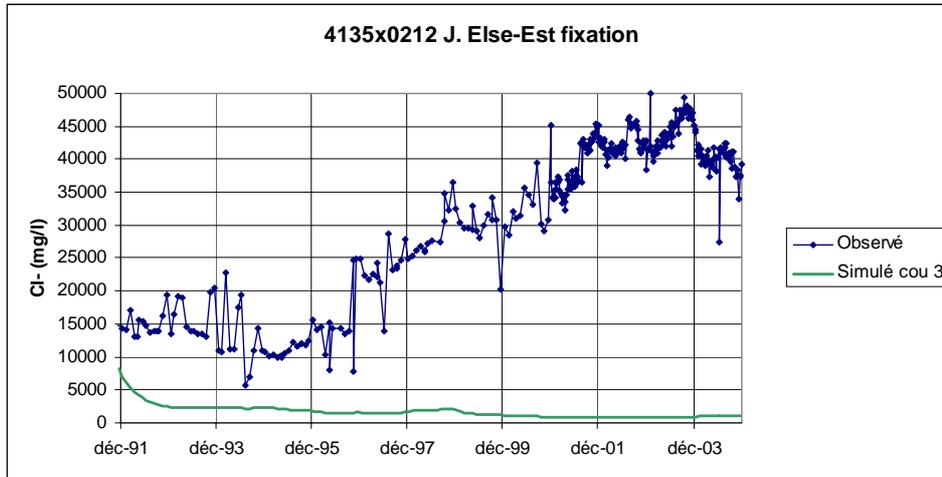












Annexe 5

Evolution des pompages et définition du scénario tendanciel

On trouvera ci-après le document émanant des MDPA et présentant les hypothèses actuelles d'évolution des pompages aux puits de dépollution et fixation.

Ces hypothèses correspondent au scénario dit « tendanciel ».



Wittelsheim, le 18 janvier 2006

Direction de l'Environnement

Evolution pompages Scénario tendanciel

Les pompages des MDPA ne sont pas immuables. Ils ont évolué ces dernières années et évolueront encore progressivement jusqu'à la fin du programme de dessalage de la nappe phréatique.

Au niveau quantitatif, les pompages et donc les rejets au saumoduc, qui dépassaient 100 000 m³/jour il y a trois ans, ont été réduits à 80 000 m³/j. La réduction continuera progressivement.

1. GENERALITES

Il faut distinguer plusieurs types d'ouvrages :

- les puits de dépollution,
- les puits de fixation.

Les puits de fixation sont des puits de dépollution situés à l'aval immédiat des terrils et captant le sel infiltré des terrils avant qu'il ne se propage plus en aval dans la nappe. Les puits de dépollution complètent le dispositif pour réhabiliter la nappe en interceptant, à l'aval des langues salées, le sel se propageant depuis souvent de nombreuses années.

Depuis la signature de la Stratégie Globale par le préfet du Haut Rhin en 1998, 20 nouveaux ouvrages de fixation et de dépollution, la plupart profonds, ont été mis en

place. Ils ont complété ou remplacé en partie les 48 ouvrages en service avant 1998.

L'efficacité des ouvrages profonds, l'optimisation de la marche des pompages, et le traitement des terrils ont permis de quadrupler rapidement l'extraction nette de sel de la nappe.

La quantité de sel contenue dans la nappe, qui a atteint près de 3 millions de tonnes sur une superficie dépassant la potabilité d'environ 150 km² il y a 20 ans, est descendue à moins de 0,6 Mt sur environ 50 km² à fin 2005, grâce à une extraction nette de près de 0,2 Mt/an ces dernières années.

Pendant la dernière décennie, les infiltrations de sel des terrils ont alimenté la nappe chaque année de 4,5 à 5,5 % du stock annuel ; l'extraction de sel par les pompages est passée de 7- 8 % à plus de 30 % du stock annuel (cf. graphique joint).

Depuis sept ans, dix sept ouvrages ont été arrêtés dès que leur contribution à la dépollution ne se justifiait plus: 2 puits de fixation et 4 puits de dépollution à Ensisheim, 4 à Max, 1 à Théodore, 2 à Alex et 4 à Bollwiller-Rodolphe.

Le nombre d'ouvrages en service, qui a atteint 60 au maximum en 2003, est descendu à 51 en 2005. Il comprend 31 puits de fixation et 20 de dépollution.

2.ECHEANCIER

L'échéancier du fonctionnement de ces ouvrages est le suivant :

2.1. Puits de dépollution

2.1.1. Langue ouest

- **2** puits de dépollution à l'aval des terrils Alex-Rodolphe constituant la barrière hydraulique de cette langue. Ils interceptent bien la langue salée. Les teneurs sont en diminution sensible ces deux dernières années, indiquant une dilution sur les bordures de la langue. La dépollution, liée en partie à la fixation des terrils, devrait continuer efficacement environ 5 ans. Débit : 65 m³/h.
- Les 4 puits de dépollution Rodolphe-aire de la Thur ont été arrêtés récemment. Le dispositif de fixation étant très performant pour le terril Marie Louise en amont, ces puits ne présentaient plus beaucoup d'intérêt pour la dépollution, d'autant plus qu'ils sont en amont du puits de fixation Rodolphe.

2.1.2. Langue est

- **3** puits de dépollution Ensisheim cité, situés à l'est du captage cité (7 puits) fournissant dans le passé l'eau industrielle à la fabrique Marie Louise ; ils alimentent la dissolution accélérée du terril Marie Louise dont la fin est programmée pour 2007.

Les autres puits d'Ensisheim (carreau et cité) étant arrêtés, ils constituent la dernière barrière de dépollution de la langue est. Situés à l'aval de la barrière hydraulique de dépollution

Ensisheim sud - Ruelisheim, ces puits, de capacité actuelle 850m³/h, devraient pouvoir être arrêtés entre 2008 et 2009, le front entre 700 et 200 mg/l se déplaçant d'ouest en est.

- **7** puits de dépollution constituant la barrière hydraulique de la langue est à Ensisheim sud (5 puits profonds) et Ruelisheim (2 puits non profonds); ces puits sont raccordés directement au pipe avant son débouché dans la rigole bétonnée du saumoduc. D'un débit total de 720 m³/h, la plupart seront maintenus en service jusqu'à la fin des opérations de dépollution (2013). Le puits profond situé à l'ouest et les 2 puits non profonds à l'est pourraient être arrêtés entre 2010 et 2011.
- **3** puits Gravière Max (30 m³/h) et **2** puits Ateliers Centraux (60 m³/h), interceptant l'aval d'Amélie 2 et Bonn au sud est d'Amélie, ainsi que **3** pompages (30 m³/h) dans les piézos 316, 318 et 319 (aires stockage). Ces pompages devraient fonctionner jusqu'en 2008 (liés à la fin du déstockage Bonn).

2.1.3. Conclusion

En conclusion, l'échéancier devrait être le suivant :

- A partir de 2008, 9 puits de dépollution (2 à l'ouest, 7 à l'est) pour 1300 m³/h, soit une réduction à venir de 500 m³/h.
- A partir de 2011, 5 puits de dépollution à l'est pour 550 m³/h.
- Arrêt vers 2013.

2.2. Puits de fixation

2.2.1. Langue ouest

Terrils Alex et Rodolphe.

- **1** puits de fixation à Alex (70 m³/h). La teneur, qui a diminué depuis la fin du traitement du terril, est actuellement d'environ 12gCl/l. Cette teneur, qui

évolue selon une exponentielle décroissante de constante de temps proche de 2,5 ans, devrait être inférieure à 0,3g/l dans 10 ans maximum.

- 1 puits de fixation à Rodolphe (60 m³/h). La teneur est passée de 8 à 4,5 g/l en 2 ans depuis l'étanchement du terril. Pour diviser la teneur par 20, avec une constante de temps comprise entre 2 et 2,5, il faudra entre 6 et 7 ans; l'arrêt est prévu pour 2012.

Terril Marie Louise.

- 7 puits de fixation dont 3 profonds. Le dispositif est très efficace pour ce terril; avec un débit de 140 m³/h au total, les fuites vers l'aval sont insignifiantes malgré la dissolution accélérée du terril en cours. Etant donné que la constante de temps est inférieure à 2 ans et que le stock de sel sous le terril aura fortement diminué d'ici 2007, ce dispositif devra fonctionner environ 4 ans après la fin du traitement du terril, soit jusqu'en 2011.

2.2.2. Langue est

Terrils Amélie

- 11 puits de fixation (550 m³/h), dont 5 profonds (100m³/h) et 1 complet. Après la fin du traitement du terril nord (environ 2009), il faudra compter 4 à 5 ans pour atteindre la potabilité, étant donné que la constante de temps est faible en raison des pompages et que le stock en profondeur diminue régulièrement. Arrêt prévisionnel en 2013-2014, les 2 puits profonds situés à l'aval s'arrêtant en dernier.

Terrils Joseph Else

- 2 puits et 2 drains (80 m³/h plus 40 équivalents). Le terril ouest est étanché depuis deux ans. Le terril est vient d'être terminé en 2005. L'arrêt des drains peut être envisagé pour 2007. Les puits, selon une décroissance exponentielle de constante de temps 1 an, devraient atteindre la potabilité dans 5 à 6 ans (2011).

Terrils Anna Fernand

- 3 puits de fixation : 2 pour Anna (140 m³/h) et 1 pour Fernand (280 m³/h). Le traitement du terril Fernand par dissolution est quasiment terminé; il reste à terminer le remodelage et à le végétaliser pour éviter des infiltrations résiduelles provenant de la dalle de sel résiduelle. Le puits, qui sert à arroser Anna, devrait évoluer rapidement après l'arrêt de la dissolution Anna (2007), terril pour lequel il a également servi de fixation. En effet, la vitesse de la nappe est importante sous le terril Fernand (4m/j) et le nettoyage devrait être rapide d'ici 2010. Pour les puits d'Anna, il faut compter 5 ans après l'arrêt de la dissolution, en raison d'une vitesse moins rapide de la nappe et d'un stock de sel plus important, soit jusqu'en 2012.

Terrils Eugène Théodore.

- 4 puits de fixation : 2 pour Eugène (165 m³/h) 2 pour Théodore (55 m³/h). Un des puits de fixation (VT3 : 120 m³/h) fournit de l'eau industrielle pour CCW. Le terril Théodore a été traité par dissolution. Depuis la fin du traitement en 2002, la teneur des puits de fixation de ce terril a été divisée par cinq (2 g/l fin 2005). Deux piézomètres ont été mis en place sur le terril : un de surface et un profond. Ils évoluent de façon semblable : de près de 9 g/l, ils ont chuté à 2,5 g/l en moins de 2 ans, anticipant la diminution sur les puits. Selon cette évolution, les puits descendront à moins de 1 g/l dans deux ans et pourront être arrêtés en 2008, d'autant plus que la barrière de dépollution est juste en aval. Le terril Eugène a été étanché en 2004. La teneur des puits varie peu autour de 3 g/l ; l'effet du traitement du terril n'apparaît pas encore. La teneur devrait évoluer comme à Théodore : le puits de fixation VT1 pourrait être arrêté en 2008 (avant si l'on admet que la dépollution en aval suffit), le puits VT3 serait laissé à disposition de CCW.

Terrils Ensisheim

- Les 2 puits de fixation sur le carreau d'Ensisheim (capacité 500 m³/h) ont été arrêtés en 2003. En effet, le traitement des terrils étant terminé depuis 2001, et la nappe se nettoyant rapidement à Ensisheim, la teneur des puits qui n'a jamais été très élevée (maximum 3g/l) est revenue rapidement au dessous de 250 mg/l d'abord au puits nord, le front nettement marqué entre 700 et 200 mg/l se déplaçant du nord au sud.

2.2.3. Conclusion

En conclusion, l'échéancier est le suivant :

- 31 puits de fixation jusqu'en 2007 (1560 m³/h).
- 26 puits jusqu'en 2009 (1400 m³/h).
- 22 puits à partir de 2010 (890 m³/h).
- 7 puits en 2012 (440 m³/h).
- Arrêt en 2014.

2.3. Echéancier global

Sur le planning de marche des puits joint, on constate une évolution en faveur des puits de fixation. Ce rééquilibrage des pompages est un objectif poursuivi depuis quelques années avec l'implantation de nouveaux puits.

En effet, les puits de fixation sont beaucoup plus efficaces pour l'extraction de sel : avec un débit total inférieur de 20% aux puits de dépollution, ils extraient plus de quatre fois plus de sel.

Au niveau du coût de la dépollution, les puits de fixation permettent de tenir une teneur moyenne des pompages de l'ordre de 8g NaCl /L, donc un coût moyen de 6 €/t. NaCl extraite. Il est donc économiquement intéressant de réaliser une fixation la plus complète des terrils pour ne pas ensuite aller rechercher le sel non fixé, dans les puits de dépollution à l'aval où il sera dilué.

C'est ce que nous avons fait sur les 3 derniers terrils en traitement : Anna, Amélie et surtout Marie Louise pour lequel on va pouvoir s'affranchir de la dépollution à l'aval (cf. Rodolphe).

Les objectifs sont donc les suivants :

- Garder le minimum d'ouvrages de dépollution à coût élevé après 2007, soit les 2 barrières ouest (2 puits) et est (6 à 7 puits), puis les arrêter dès que possible ou économiquement raisonnable en acceptant un nettoyage final naturel par dilution.
- Arrêter les puits de fixation devenus peu efficace quand on est obligé de conserver une dépollution à l'aval comme à Théodore et Eugène en 2008.
- Préparer la réflexion sur l'arrêt des ouvrages après 2012 (pour certains avant) en raison d'une teneur extraite très faible (< 1 g/l), de coûts disproportionnés pour le NaCl extrait (> 50 €/t), et de tonnages résiduels négligeables par rapport à ce que la nappe est capable d'accepter et de diluer.

Cette évaluation du fonctionnement des pompages est basée sur le retour d'expérience de ces dernières années pendant lesquelles les pompages ont beaucoup évolué. Elle est sensible à la précision sur les constantes de temps des ouvrages, difficile à appréhender quand ils interceptent un flux de sel provenant de l'aval éloigné ; c'est le cas des puits de dépollution. Elle est également sensible à l'avancement du programme de traitement des terrils.

En admettant qu'on ne prenne aucun retard sur le programme de dépollution mais plutôt de l'avance comme actuellement, il est certain que les pompages de dépollution et de fixation pourront être arrêtés avant 2015 et peut être dès 2013.

Annexes :

Echéancier des pompages.

Evolution des quantités et des teneurs extraites.

Evolution pompages et infiltrations par rapport au stock sel.

Adéquation Terrils – Nappe – Puits

Planning des ouvrages démarrés et arrêtés de 1998 à 2005.

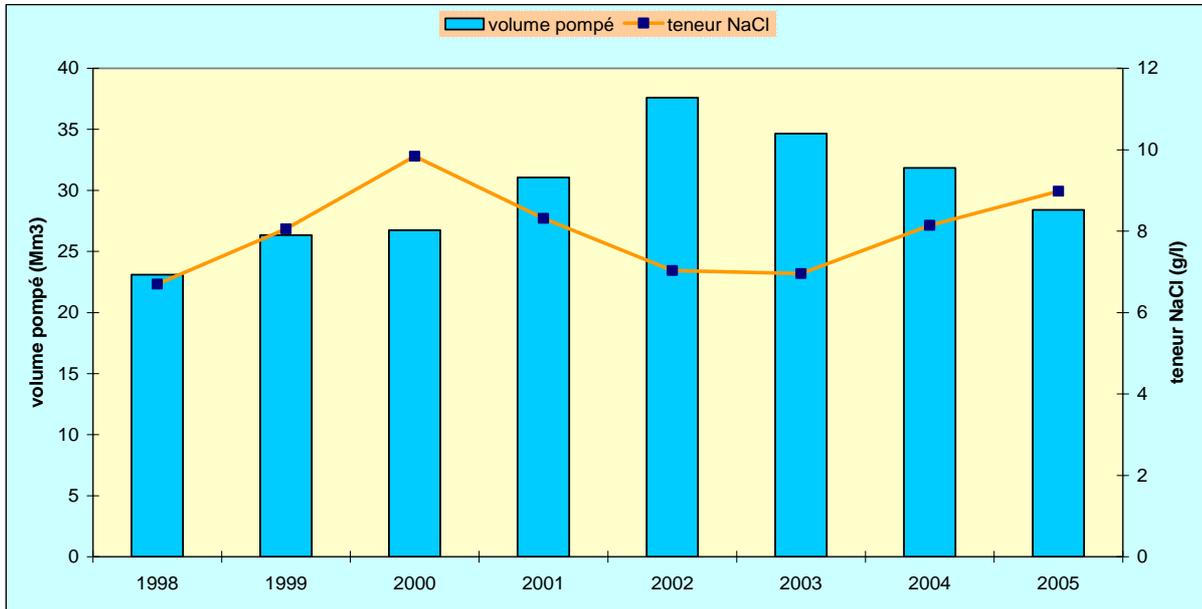
Graphiques sur l'évolution du sel extrait par secteurs

Modélisation de la salure profonde au droit et en aval du Bassin Potassique

ECHEANCIER DES POMPAGES

Puits		m3/h	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Dépollution												
1	Ungersheim n°1	40	1800	1500	1200	800	400	100				
2	Ungersheim n°2	36	2100	1500	1200	800	400	100				
3	Ensisheim cité n°1	350	5500	5200	4000	2000						
4	Ensisheim cité n°2	180	2600	2400	1500	500						
5	Ensisheim cité n°3	320	2700	1900	600							
6	Ensisheim sud n°1	106	2200	2000	1800	1400	1100	800	500	300	200	
7	Ensisheim sud n°2	105	5200	4500	3500	3000	2200	1700	1300	900	500	
8	Ensisheim sud n°3	45	1200	800	300							
9	Ensisheim sud n°4	180	4300	3700	3000	2500	2000	1500	1000	600	200	
10	Ensisheim sud n°5	45	1700	1500	1400	1100	800	600	500	200	100	
11	Ruelisheim n°1	160	2100	1800	1200	900	600	400				
12	Ruelisheim n°2	115	2800	2200	1600	1300	1000	800	500			
13	Gravière Max n°1	10	700	500	200							
14	Gravière Max n°2	7	1200	1000	800	200						
15	Gravière Max n°3	8	700	500	200							
16	Ateliers centraux 1	25	1400	1000	600							
17	Ateliers centraux 2	35	500	300	100							
18	Piézo 416	11	1100	1000	600							
19	Piézo 418	6	1100	1000	600							
20	Piézo 419	6	500	200	100							
Débit total m3/h		1 790	1790	1790	1790	1324	787	787	551	436	436	
t NaCl extraites			41600	34500	24500	14500	8500	6000	3800	2000	1000	
Fixation												
1	Alex	70	11200	9000	7000	6000	5000	3500	2000	1200	800	400
2	Rodolphe	70	4300	3500	2500	1800	1000	500	300			
3	Dynamitière n°1	20	3700	3500	2800	2500	2000	1200	500			
4	Dynamitière n°2	20	7000	7000	6000	5000	3000	2000	800			
5	Dynamitière n°3	18	9700	9500	8500	6000	4000	2500	1200			
6	Dynamitière n°4	36	1900	1700	1500	1000	800	500	200			
7	Marie Louise n°1	16	4100	3500	2500	2000	1500	800	400			
8	Marie Louise n°2	18	9200	9000	6000	4500	3000	1500	500			
9	Marie Louise n°3	14	1000	800	700	500	400	200				
10	Eugène n°1	65	2400	1800	800							
11	Eugène n°2	75	2900	2200	1200	200 CCW						
12	Théodore n°1	15	600	400	200							
13	Théodore n°2	35	1300	800	300							
14	Fernand	280	21000	16000	12000	10000	2000					
15	Anna n°1	80	11500	11000	10000	8000	5000	3000	1500			
16	Anna n°2	60	26500	23000	21000	16000	12000	7500	3500			
17	Joseph Else est	37	17800	15000	8000	4000	1200	200				
18	drain JEE	35	2800	1200								
19	joseph Else ouest	45	6600	6000	3500	2000	900					
20	surface JEO	6	200	100								
21	Amélie n°1	25	3700	3200	2000	1600	1200	1000	800	500	200	
22	Amélie n°2	40	14900	14000	11000	10000	8000	5000	3000	1200	700	300
23	Amélie n°3	100	17500	16000	14000	12000	10000	6200	3700	1500	1000	400
24	Amélie n°4	110	14900	14000	13000	11000	9000	5000	3000	1200	700	300
25	Amélie n°5	55	1600	800	500	400	200	100				
26	Amélie n°6	10	1200	800	500	400	300	200	200			
27	Amélie n°7	15	2000	1600	1200	1000	800	500	200			
28	Amélie n°8	15	2600	2200	2000	1500	1000	600	200			
29	Amélie n°9	115	1300	1200	1000	800	400					
30	Amélie n°10	30	4200	3500	3000	2700	2400	2000	1600	1200	800	300
31	Amélie n°11	30	3800	3200	2800	2600	2400	2000	1600	1200	800	300
Débit total m3/h		1 560	1560	1560	1519	1404	1404	964	783	405	405	380
t NaCl extraites			213400	185500	145500	113500	77500	46000	25200	8000	5000	2000
Dépollution et fixation												
Débit total m3/h			3 350	3 350	3 309	2 728	2 191	1 751	1 334	841	841	380
t NaCl extraites			255 000	220 000	170 000	128 000	86 000	52 000	29 000	10 000	6 000	2 000
kt NaCl dans la nappe			550-600	360-410	220-270	110-160	40-90	<40	<10	0		
Teneur moyenne: g/l NaCl			9,5	8,2	6,4	5,9	4,9	3,7	2,7	1,5	0,9	0,7
€ t NaCl extraite			5,3	6,1	7,8	8,5	10,2	13,5	18,4	33,6	56,1	76,0
Coût ANNUEL K€			1340	1340	1324	1091	876	700	534	336	336	152

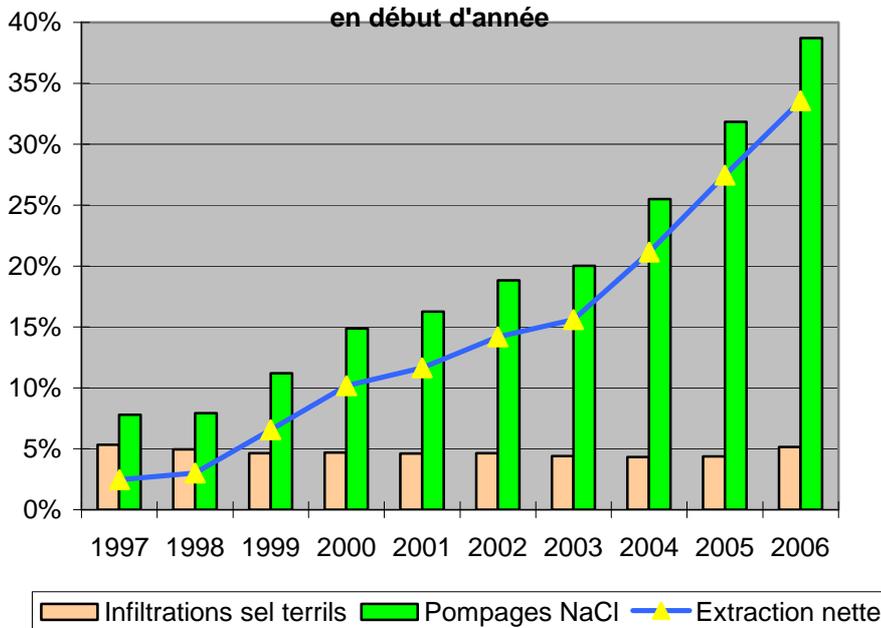
EVOLUTION DES POMPAGES: VOLUMES POMPES ET TENEURS NaCl



A partir de 1999, l'impact des nouveaux puits de fixation est net sur la teneur.
 A partir de 2001, les nouveaux puits de dépollution (barrière est) ont un effet inverse sur la teneur.
 L'augmentation des volumes pompés sur la période est essentiellement due aux taux de marche, les débits des ouvrages arrêtés et démarrés se compensant.

EVOLUTION SEL NAPPE

Pompages et infiltrations en % du stock de sel nappe en début d'année



ADEQUATION TERRILS - NAPPE - PUIITS								
Secteur	Flux d'eau susceptible d'être contaminé 10 ³ m ³ /an	Volume d'eau extrait par les puits 10 ³ m ³ /an	Infiltration saline tNaCl/an	Extraction de sel tNaCl/an	Destockage sel tNaCl/an	Stock NaCl selon bilan matière (kt)	Stock NaCl selon BRGM (estimation) (kt)	Rapport stock/destockage
ALEX	620	1 000	0	12 000	12 000	150	} 150	8 à 9
RODOLPHE	180	500	0	4 000	4 000	33		3 à 5
MARIE-LOUISE	900	1 000	12 000	36 000	24 000	67		
LANGUE Ouest	1 700	2 500	12 000	52 000	40 000	250	210	5 à 7
ENSISHEIM	1 500	8 200	0	9 000	9 000	20	} 100 } 200 } 40	(NS pour langue Est) 2 à 3 2 à 3
EUGENE	1 125	7 100	0	17 000	} 18 000	} 150		
THEODORE	225	400	0	1 000				
FERNAND / ANNA	1 600	3 500	6 000	50 000	44 000	} 70		
AMELIE 2	200	800		2 000				
AMELIE Est	400	500	0	1 000	} 46 000			
AMELIE Nord	1 900	4 400	12 000	55 000				
JOSEPH-ELSE-Ouest	150	400	0	5 000	} 23 000			
JOSEPH-ELSE-Est	100	700	0	18 000				
LANGUE Est	7 200	26 000	18 000	158 000	140 000	300	340	2 à 3
TOTAL	8 900	28 500	30 000	210 000	180 000	550	550	3

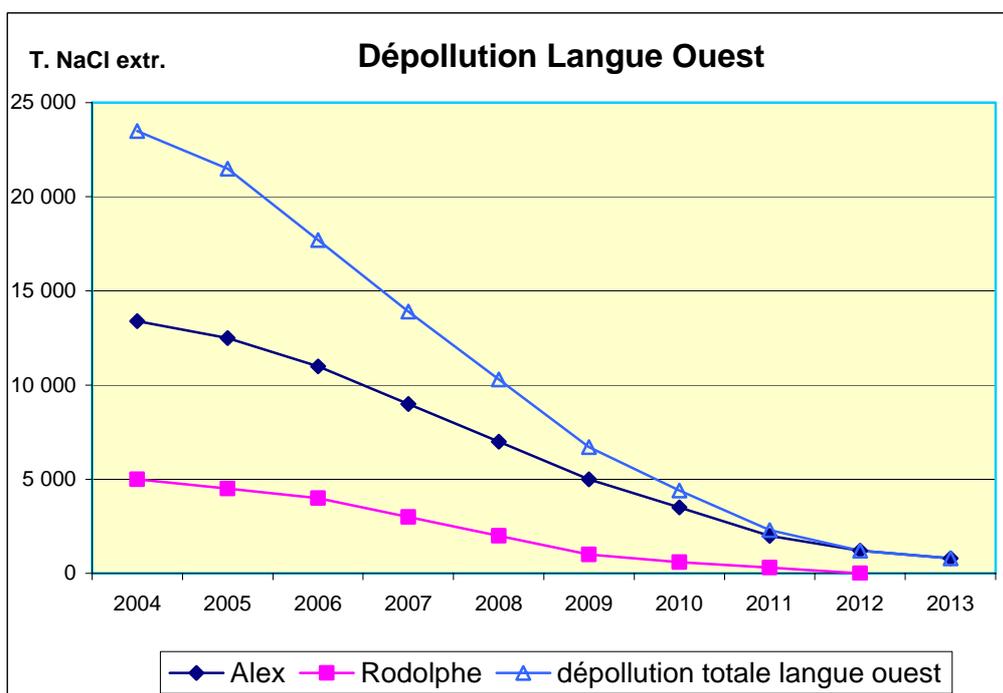
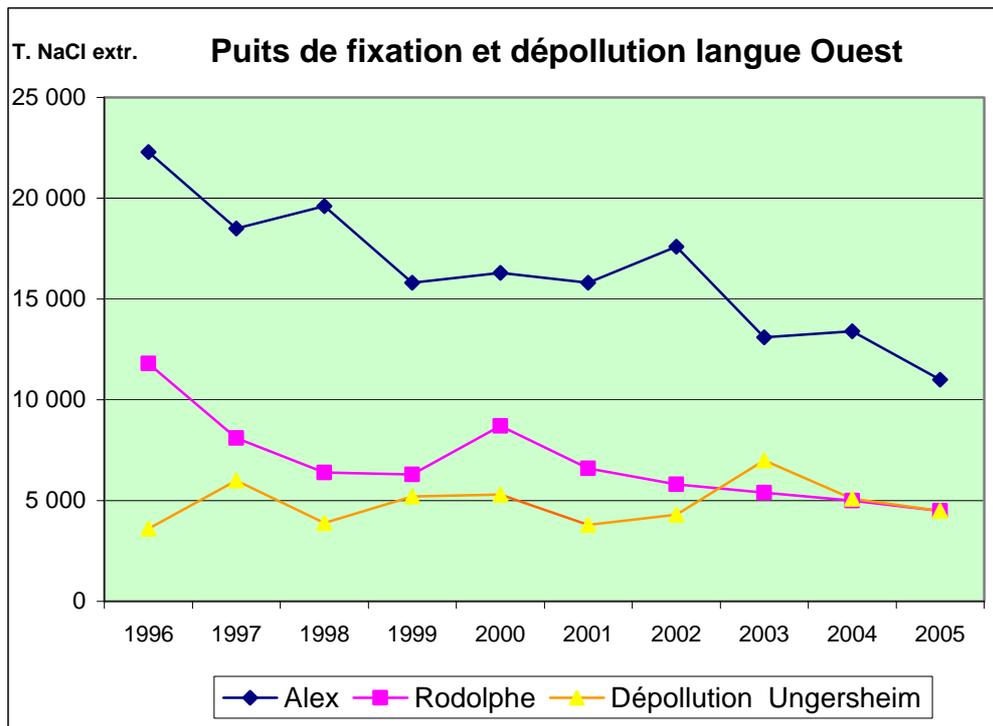
PLANNING DES NOUVEAUX PUIXS DE FIXATION ET DE DEPOLLUTION

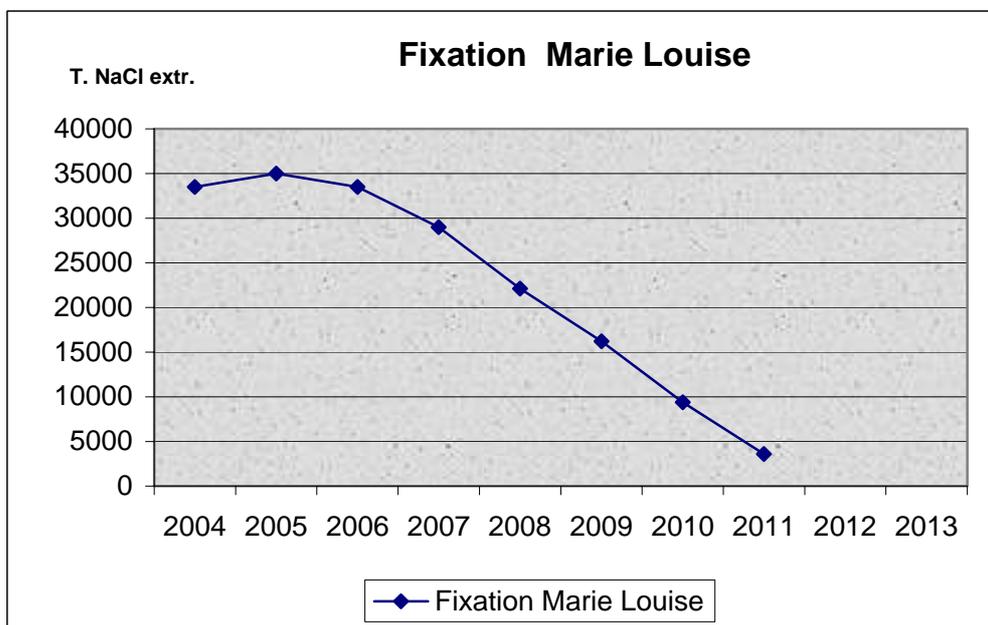
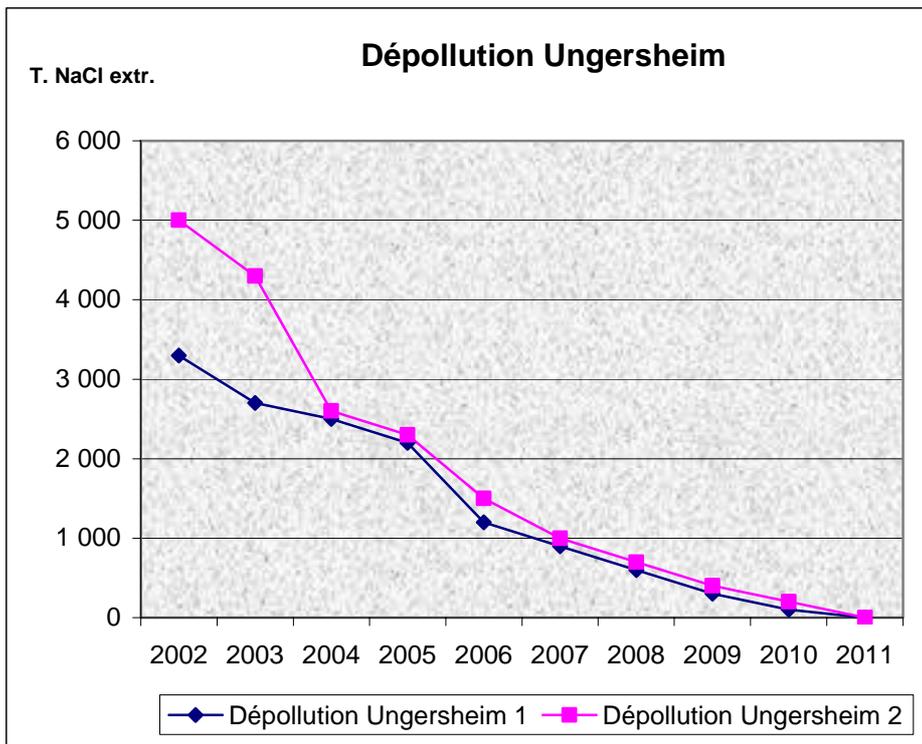
STRATEGIE GLOBALE POUR LE BASSIN POTASSIQUE

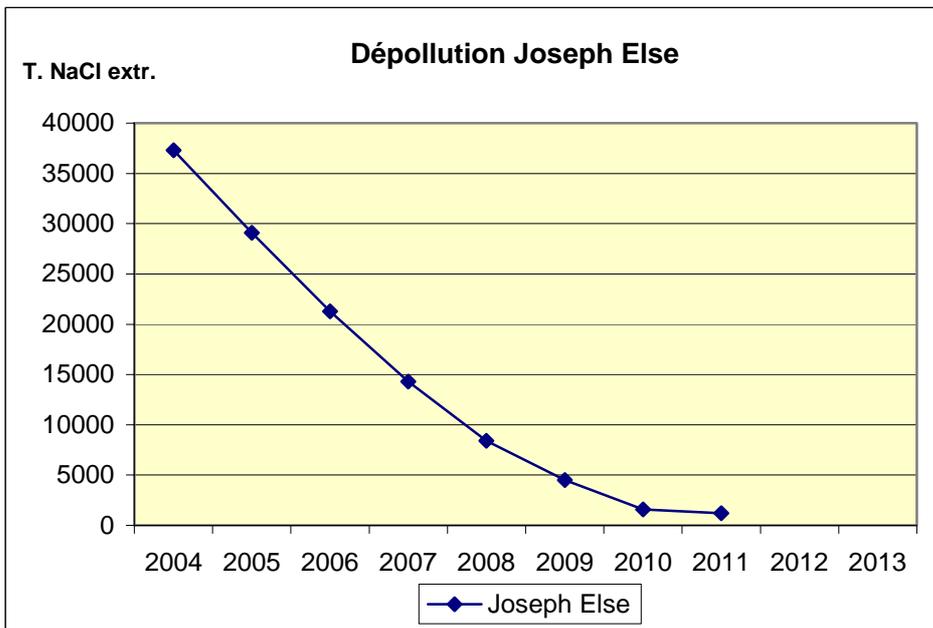
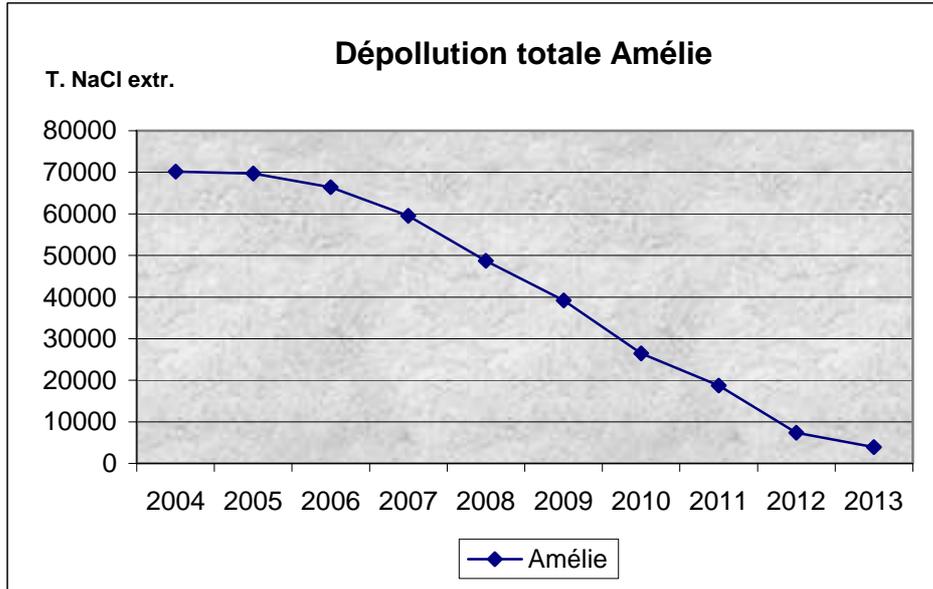
	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	TOTAL
MARIE LOUISE								
prevu	4		2	2				8
réalisé			3			1		4
AMELIE								
prevu		2		2				4
réalisé			3			2	3	8
MAX								
prevu		1						1
réalisé								
JOSEPH ELSE								
prevu			1					1
réalisé			1					1
ENSISHEIM								
prevu		1			2	2		5
réalisé				1	3	1		5
ANNA								
prevu			1					1
réalisé					1	1		2
TOTAL								
prevu	4	4	4	4	2	2		20
réalisé			7	1	4	5	3	20

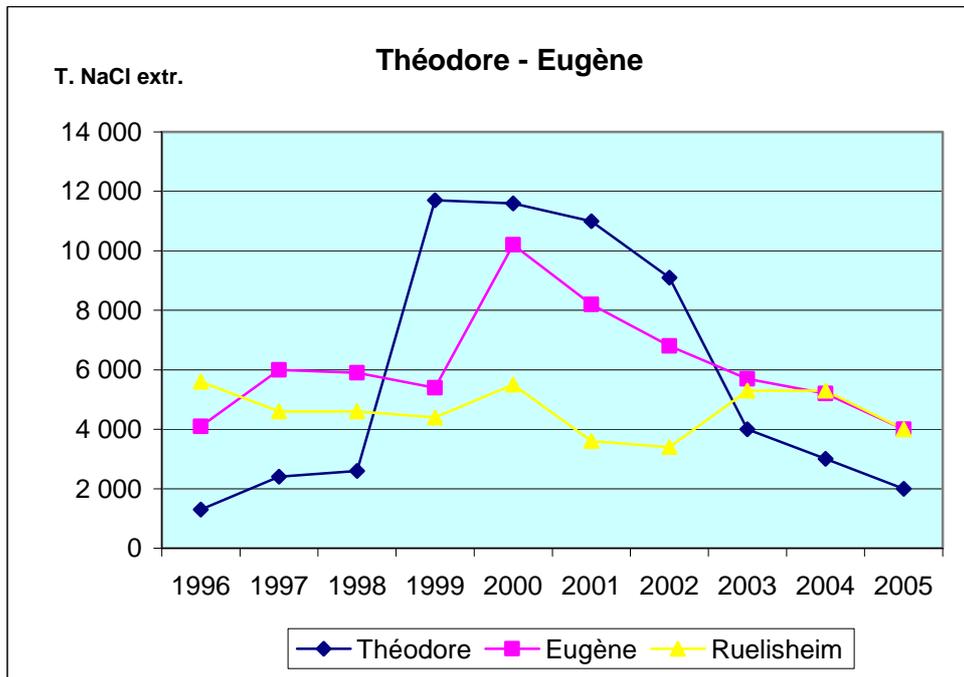
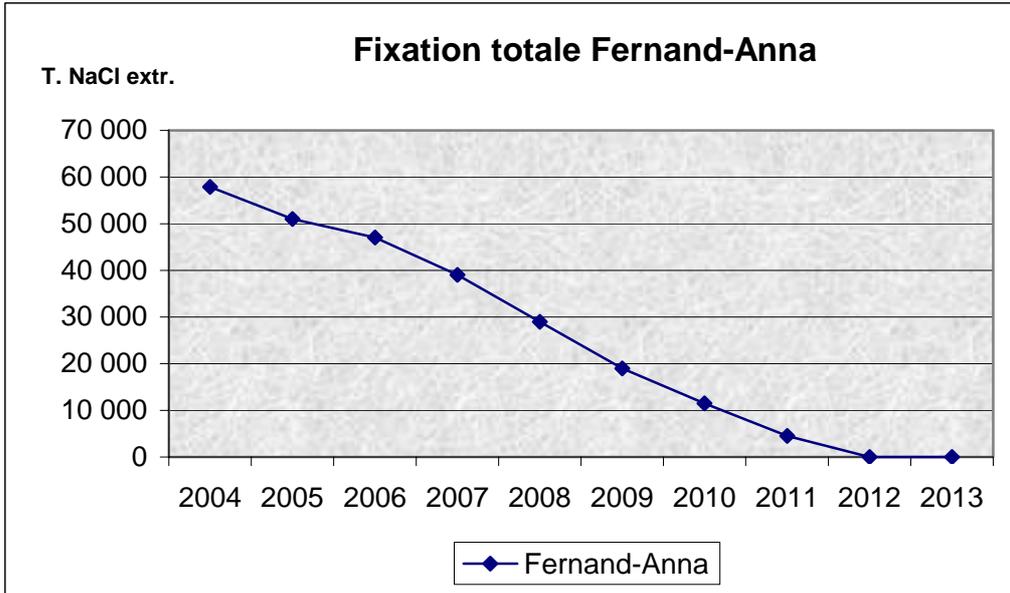
PUIXS DE FIXATION ET DE DEPOLLUTION ARRETES

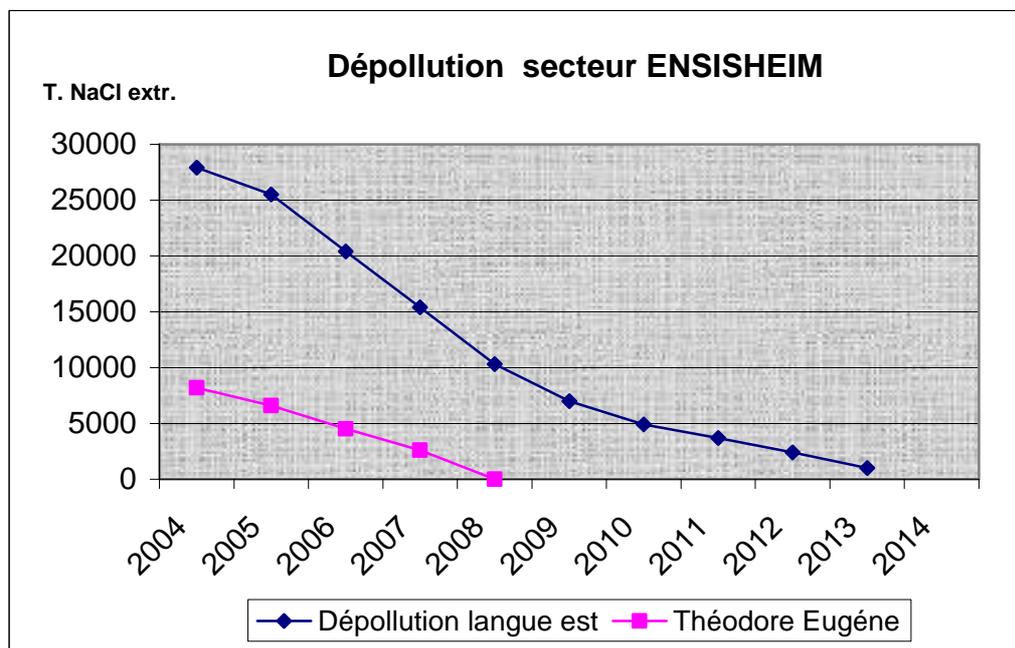
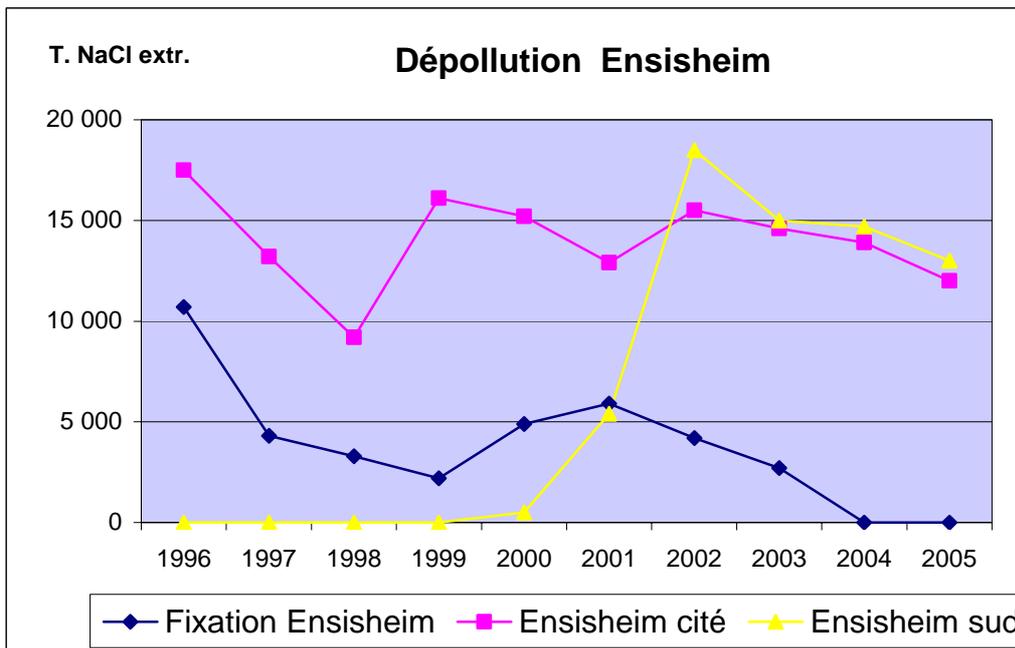
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	TOTAL
ALEX									
Fixation						2			2
MARIE LOUISE									
Dépollution							1	3	4
ENSISHEIM									
Dépollution	2					1	1		4
Fixation						2			2
THEODORE									
Fixation						1			1
Gravière MAX									
Dépollution					3	1			4
Langue ouest									
Langue est					3	5	1	3	11
TOTAL									
	2				3	7	3	3	17













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

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