



# Modélisation hydrogéologique de la plaine alluviale de l'Orne à Moyeuvre-Grande (57)

Rapport final

**BRGM/RP-53420-FR**

Décembre 2004

Etude réalisée dans le cadre du projet  
de recherche du BRGM 04EAU08

**V. Hamm**

Avec la collaboration de

**Z. Sanchez (ENSMN)**

**E. Bodin (ENSG)**

Mots clés : bassin ferrifère lorrain, réservoir minier, nappe alluviale de Moyeuvre-Grande, hydrogéologie, modèle maillé, modélisation hydrodynamique, transport de sulfate

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

**Hamm V.** avec la collaboration de Sanchez Z. (ENSMN) et Bodin E. (ENSG) (2004) – Modélisation hydrogéologique de la plaine alluviale de l'Orne à Moyeuvre-Grande (57) – Rapport BRGM/RP-53420-FR, 105p, 20 fig., 2 tab., 10 ann.

© BRGM, 2004, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

La montée du niveau d'eau dans les travaux miniers du bassin ferrifère sud en région lorraine suite à l'arrêt des pompages d'exhaure en 1995, a eu pour conséquence l'envahissement de la nappe alluviale de l'Orne à Moyeuvre-Grande située entre la rive droite de l'Orne et le coteau qui borde la ville au sud.

Cet envahissement par de l'eau de mine provenant de la base des coteaux où affleure la formation ferrifère est contrôlé depuis août 1998 par la mise en place par BRGM et ANTEA d'un réseau de piézomètres destiné à suivre l'évolution du niveau et de la qualité de l'eau de la nappe alluviale.

Par la suite, pour abaisser le niveau d'eau, 8 puits de rabattement ont été réalisés en rive droite de l'Orne fin 1998. La solution définitive a été la construction d'un chenal reliant une ancienne galerie d'exploitation minière sous le coteau jusqu'à l'Orne dans sa partie aval afin de drainer directement les eaux de mine vers l'Orne. Les travaux ont débuté fin 2002 et ce dernier est en fonction depuis fin 2003.

L'objectif de la présente étude est de reproduire l'évolution du niveau de la nappe alluviale et de la concentration en sulfate de cette dernière durant la période d'ennoyage de fin août à mi-décembre 1998, période durant laquelle nous disposons des chroniques les plus complètes de la piézométrie et des concentrations.

Le code de calcul utilisé pour la modélisation hydrodynamique et hydrodispersive est MARTHE (BRGM). C'est un outil développé pour la modélisation des écoulements et le transport de masse en milieu poreux. Les paramètres du modèle numérique sont calés sur les observations des charges et des concentrations, ainsi que sur des essais de pompage effectués en quelques points de la nappe pour fixer la perméabilité et l'emmagasinement libre.

Les résultats de cette modélisation sont en accord avec les observations et indiquent une remontée progressive de 1 à 2 m de la nappe de fin août jusqu'à début novembre 1998 où le niveau maximal de la nappe est atteint suite au débordement le 28 octobre 1998 au tunnel de débordement de Moyeuvre situé en rive gauche de l'Orne. Par ailleurs, la nappe se minéralise progressivement de la base des coteaux vers l'Orne avec une concentration en sulfate supérieure à 1500 mg/l à la fin de l'ennoyage sur la quasi totalité de la plaine.



# Sommaire

<b>1</b>	<b>Introduction et objectif de l'étude.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Contexte géologique et hydrogéologie de la zone d'étude.....</b>	<b>11</b>
2.1	Contexte géologique.....	11
2.2	Hydrogéologie.....	11
<b>3</b>	<b>Construction du modèle.....</b>	<b>13</b>
3.1	Données disponibles.....	13
3.1.1	Suivi du niveau piézométrique et de la minéralisation de la nappe alluviale.....	13
3.1.2	Suivi de l'Orne à Moyeuvre Grande.....	16
3.1.3	Suivi du niveau du réservoir minier et données relatives à la construction du chenal.....	16
3.1.4	Données relatives aux pompes.....	18
3.2	Le modèle conceptuel.....	18
3.2.1	Descriptif de l'outil de modélisation : MARTHE.....	18
3.2.2	Extension, maillage et structure du modèle.....	18
3.2.3	Conditions aux limites du modèle.....	19
<b>4</b>	<b>Calage du modèle en transitoire.....</b>	<b>21</b>
4.1	Période de calage.....	21
4.2	Calage de l'hydrodynamique.....	21
4.2.1	Les paramètres de l'hydrodynamique.....	21

4.2.2	Les résultats du calage de l'hydrodynamique .....	22
4.3	Calage du transport de masse .....	35
4.3.1	Les mécanismes du transport .....	35
4.3.2	Le paramétrage du modèle .....	35
4.3.3	Les résultats de la modélisation du transport.....	36
<b>5</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>43</b>
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>45</b>

## Liste des Illustrations

### Figures

Figure 1 : Comparaison de la piézométrie de la nappe alluviale avec le niveau du réservoir minier sud en fin d'ennoyage .....	15
Figure 2 : Evolution des concentrations en sulfate dans la nappe alluviale .....	15
Figure 3 : Suivi du niveau du réservoir minier et niveau de la nappe à PZ1 .....	17
Figure 4 : Cartes piézométriques simulées de la nappe alluviale à Moyeuve Grande le 9 et 21 septembre 1998 avant ouverture du drain à proximité du puits CR.....	24
Figure 5 : Cartes piézométriques simulées de la nappe alluviale à Moyeuve Grande le 2 et 22 octobre 1998 après ouverture du drain à proximité du puits CR.....	25
Figure 6 : Cartes piézométriques simulées de la nappe alluviale à Moyeuve Grande le 4 novembre et 2 décembre 1998 lorsque le niveau maximum a été atteint après débordement .....	26
Figure 7 : Evolution du niveau piézométrique au puits CR et à PZ1 à l'Ouest du domaine .....	27
Figure 8 : Evolution du niveau piézométrique à PZ2 et PZC au centre du domaine .....	28
Figure 9 : Evolution du niveau piézométrique à PZD et au puits PM au Nord-Est du domaine .....	29
Figure 10 : Evolution du niveau piézométrique aux puits PI et PR à l'Est du domaine .....	30
Figure 11 : Evolution du niveau piézométrique à PZ3 et PZA au Sud-Est du domaine .....	31
Figure 12 : Charges simulées et observées aux différents piézomètres le 9 et 21 septembre 1998 .....	32
Figure 13 : Charges simulées et observées aux différents piézomètres le 2 et 22 octobre 1998 .....	33
Figure 14 : Charges simulées et observées aux différents piézomètres le 4 novembre et le 2 décembre 1998 .....	34
Figure 15 : Concentrations en sulfate (mg/l) de la nappe alluviale modélisées le 28 août, le 22 septembre et le 1 octobre 1998 après l'ouverture du drain à proximité de CR .....	37
Figure 16 : Concentrations en sulfate (mg/l) de la nappe alluviale modélisées le 22 octobre, le 17 novembre et le 16 décembre 1998 .....	38

Figure 17 : Concentrations en sulfate (mg/l) observée et simulée le 28 août et le 10 septembre 1998 .....	39
Figure 18 : Concentrations en sulfate (mg/l) observée et simulée le 22 septembre et le 1 octobre 1998 après l'ouverture du drain à proximité de CR.....	40
Figure 19 : Concentrations en sulfate (mg/l) observée et simulée le 22 octobre et le 4 novembre 1998.....	41
Figure 20 : Concentrations en sulfate (mg/l) observée et simulée le 17 novembre et le 12 décembre 1998.....	42

## Tableaux

Tableau 1 : Comparaison des perméabilités après calage avec celles déduites par essai de pompage.....	22
Tableau 2 : Paramétrage du modèle pour le transport .....	36

## Liste des Annexes

Annexe 1 : Carte du Bassin Ferrifère Lorrain .....	47
Annexe 2 : Coupe Ouest-Est de la plaine alluviale.....	51
Annexe 4 : Carte du maillage et de localisation des piézomètres dans la plaine alluviale .....	61
Annexe 5 : Suivi piézométrique à Moyeuvre-Grande en 1998 .....	65
Annexe 6 : Suivi de la teneur en sulfate à Moyeuvre-Grande en 1998 .....	69
Annexe 7 : Débits de l'Orne à la station hydrométrique de Rosselange.....	73
Annexe 8 : Discrétisation et équations résolues dans le code MARTHE.....	77
Annexe 9 : Données relatives aux sondages dans la plaine alluviale .....	93
Annexe 10 : Documentation sur le couplage Nappe-rivière et Nappe-drain dans MARTHE .....	97

# 1 Introduction et objectif de l'étude

L'arrêt de l'exhaure du bassin sud en février 1995 (mine de fer de Lorraine) a conduit à l'ennoyage des travaux miniers jusqu'au débordement au tunnel de Moyeuve le 28 octobre 1998. A partir du mois de juillet 1998 la montée du niveau d'eau dans le réservoir minier est ralentie suite à l'apparition de fuites en dessous de la cote de débordement au tunnel de Moyeuve.

Une première étude confiée au BRGM (Baubron J-C., 1998) par la DRIRE Lorraine en août 1998 avait pour but de déterminer l'origine de la remontée d'eau de la nappe alluviale qui avait inondé des caves à Moyeuve-Grande (57) en rive droite de l'Orne. Cette première investigation avait conduit à la mise en place de trois piézomètres. Par ailleurs la société Lormines (ancien exploitant des concessions minières) avait chargé ANTEA (Thiery E., 1998) de poursuivre les investigations entreprises par le BRGM par l'installation de nouveaux piézomètres (6 piézomètres complémentaires) pour préciser l'origine et l'évolution du phénomène. Ces études ont montré que la remontée du niveau d'eau de la nappe alluviale provenait essentiellement d'un apport d'eau latéral venant des coteaux au sud de Moyeuve. Cette entrée d'eau est directement liée à la période d'ennoyage du réservoir minier sud de février 1995 à fin octobre 1998 où le niveau d'eau dans la mine a atteint la cote de débordement à la galerie de Moyeuve le 28 octobre. Par ailleurs, les prélèvements d'eau effectués dans les piézomètres à la fin de l'ennoyage indiquent une teneur en sulfate proche de celle observée dans l'eau de mine pour les piézomètres à proximité du coteau et une minéralisation progressive du sud vers le nord.

Ces rapports présentent également les solutions proposées pour abaisser la cote de débordement de 172,43 m au tunnel de Moyeuve à la cote de 169 m qui est inférieure à la cote la plus basse des caves (170 m). Dans un premier temps des pompes individuelles ont été mises en place chez l'habitant pour abaisser le niveau d'eau. Ces pompages ont été complétés puis remplacés par 8 pompes réparties en rive droite de l'Orne asservies sur un niveau haut de la nappe. Par ailleurs à partir de 2002 a débuté les travaux de construction d'un chenal dans la plaine alluviale pour drainer directement l'eau des mines vers la rivière Orne à une cote de débordement plus basse. Le chenal part d'une galerie sous le coteau derrière le concasseur, passe sous la voie ferrée et rejoint l'Orne à la hauteur du pont cassé. Ce dernier est en service depuis fin 2003 (Cf carte annexe 4).

L'objectif de cette étude est de réaliser un modèle hydrodynamique maillé de la plaine alluviale à Moyeuve-Grande en rive droite de l'Orne à partir de l'ensemble des données collectées en 1998 à la fin de l'ennoyage. Ce modèle permettra après calage, de prévoir le comportement à long terme de la nappe alluviale de l'Orne à Moyeuve et de répondre à un certain nombre de questions comme le maintien des pompes suite à la construction du chenal. Le rapport présente les résultats de la modélisation en fin d'ennoyage d'août à décembre 1998, et les perspectives d'utilisation du modèle avec intégration du chenal et des pompages sur les nouvelles mesures acquises d'été 2004 au printemps 2005 dans le cadre du projet de service public.



## 2 Contexte géologique et hydrogéologie de la zone d'étude

### 2.1 Contexte géologique

La commune de Moyeuvre-Grande est localisée dans le bassin ferrifère lorrain constitué de deux sous-bassins, celui de Briey-Longwy-Thionville au nord et celui de Nancy plus petit au sud. Le bassin de Briey-Longwy-Thionville est subdivisé en trois grandes entités : le bassin nord, centre et sud. Moyeuvre-Grande est située au nord du bassin sud dans la vallée de l'Orne à l'amont de son affluent le Conroy (cf. carte de l'annexe 1). La formation ferrifère sous-jacente forme le substrat de la vallée et affleure à flanc de coteau. C'est là que débouchent des galeries d'exploitation minière de l'ancienne mine « Orne » à Moyeuvre-Grande.

La formation ferrifère, d'une puissance de 30 m en moyenne dans cette zone, est constituée de roches détritiques, contenant des oolithes, des bioclastes calcaires, du quartz, des argiles, liés dans un ciment calcitique, chloriteux ou argileux (carte géologique de Briey). Les sédiments se seraient déposés dans un paysage littoral au contact d'eaux fluviales et marines, où alternaient bancs de sables, vasières et chenaux. Ceci expliquerait la minéralisation de certains niveaux détritiques (par précipitation d'oxydes de fer colloïdaux) ainsi que la disposition irrégulière des séquences (Bubenicek.L, 1970).

Les alluvions de l'Orne recouvrant les grès ferrifères qui affleurent à Moyeuvre-Grande sont formés du haut vers le bas par (cf coupe W-E annexe 2) :

- une couche de remblais qui recouvre la quasi totalité de la plaine alluviale sur une épaisseur de 1 à 4 m.
- une couche argileuse de forte épaisseur dans sa partie est (jusqu'à 5 m), cette dernière se transforme en un mince intercalaire argileux ou limoneux dans sa partie ouest,
- une couche de graviers ou sables grossiers qui est puissante à l'ouest du domaine (jusqu'à 4 m) sous l'intercalaire argileux et qui s'affaiblit plus à l'est où les alluvions sont essentiellement argileuses.

### 2.2 Hydrogéologie

L'arrêt de l'exploitation du minerai de fer à la fin du 20<sup>ème</sup> siècle et par la suite des pompages d'exhaure (en 1995 pour le réservoir sud) a entraîné l'ennoyage progressif du réseau de galeries. En effet, l'exploitation par traçage et défilage a conduit au foudroyage des galeries abandonnées et à la fissuration des terrains au dessus des zones exploitées. Les eaux du réservoir aquifère des calcaires du Dogger jus jacent ont ainsi été mises en communication avec la couche exploitée. Pendant la durée

d'exploitation, cette eau était pompée (exhaure) et rejetée en surface. A la fin de l'exploitation et donc l'arrêt des pompages d'exhaure a eu pour effet l'ennoyage des galeries par infiltration de l'eau des calcaires du Dogger avec une modification du régime hydraulique des nappes et la détérioration de leur qualité avec une augmentation de la minéralisation. Celle-ci résulte du phénomène de dissolution du gypse issu de l'oxydation de la pyrite des intercalaires marneux (Collon.P., 2003).

A Moyeuvre, un phénomène imprévu s'est produit, une fois la cote maximale d'ennoyage atteinte (172,43 m), l'eau du réservoir minier sud devait débordé par le tunnel de débordement de Moyeuvre (cf photo 1 annexe 3) débouchant en rive gauche de l'Orne à proximité du barrage de Beth. L'eau devait alors s'écouler par un chenal dans l'Orne. Mais dès août 1998, avant même que la côte de débordement ne fut atteinte, des inondations ont eu lieu dans des caves en rive droite de l'Orne nécessitant l'installation de pompes individuelles pour assécher les caves. Ce phénomène indique des fuites mettant en connexion le réservoir minier et la nappe alluviale par d'anciennes galeries débouchant sous le coteau.

## 3 Construction du modèle

### 3.1 Données disponibles

#### 3.1.1 Suivi du niveau piézométrique et de la minéralisation de la nappe alluviale

La plaine de Moyeuvre a été équipée depuis août 1998 de trois piézomètres (PZ1, PZ2 et PZ3) à la demande de la DRIRE Lorraine, puis de 6 piézomètres complémentaires (PZA, PZB, PZC, PZD, PZE et PZF) dont deux (PZE et PZB) qui captent les grès sous-jacent à la demande de la société LORMINES (ancien exploitant). Par ailleurs on dispose également des mesures piézométriques aux puits chez des particuliers (PM, PI, PR et CR), soit au total le réseau de mesure comprend 9 piézomètres et 4 puits. Ces différents piézomètres et puits sont localisés sur la carte de l'annexe 4.

La campagne de mesure du niveau d'eau de la nappe alluviale réalisée par ANTEA s'échelonne de fin août 1998 à début décembre 1998 avec un point de mesure tous les 3 à 8 jours. Par la suite des mesures plus ponctuelles sont relevées par la compagnie Générale des Eaux en charge de l'exploitation des puits. Seul le piézomètre PZ1 est équipé d'un capteur de pression avec un pas d'acquisition horaire depuis août 1998. Les relevés des niveaux aux piézomètres et aux puits sont récapitulés en annexe 5.

Pour comprendre l'évolution du niveau de la nappe alluviale de l'Orne à Moyeuvre, on a tracé (figure 1) parallèlement aux historiques piézométriques correspondant à la fin de l'ennoyage, l'évolution du niveau d'eau au puits de Droitaumont II qui constitue l'un des puits du bassin sud situé à son extrémité sud-ouest (cf annexe 1). C'est à Droitaumont, zone la plus profonde du réservoir qu'a débuté l'ennoyage à partir de février 1995, date de l'arrêt de l'exhaure. Le niveau est également mesuré dans le puits de Moyeuvre Petite à l'extrémité Nord-Est du réservoir à partir d'octobre 1998. Cependant les niveaux mesurés aux deux puits sont très proches, l'écart entre les mesures reste toujours inférieur à 10 cm et montre qu'il existe un gradient très faible entre ces deux puits.

La dynamique observée aux piézomètres et puits est semblable à l'évolution au puits de Droitaumont. On observe une montée régulière des niveaux de fin août 1998 jusqu'au 24 octobre 1998 suivi d'une accélération de la montée du niveau jusqu'au 4 novembre suite à de fortes précipitations qui se sont succédées fin octobre, et qui ont contribué au débordement du réservoir sud à la cote 172,43 m le 28 octobre 1998 au tunnel de Moyeuvre.

Le piézomètre PZ1 et le puits de particulier CR présentent une évolution un peu particulière : on observe une chute du niveau piézométrique à partir du 30 septembre 1998 correspondant à l'ouverture d'un drain gravitaire dans les alluvions à proximité immédiate du puits CR et en direction de l'Orne (cf carte annexe 4), l'influence du drain est particulièrement visible à ce puits (chute du niveau de 1 m) et s'estompe déjà au

niveau du piézomètre PZ1 (chute de 30 cm) avec un effet très limité sur les autres piézomètres.

Les niveaux d'eau dans les doublets PZB, PZ3 et PZE, PZD captant respectivement les grès et les alluvions sus-jacent sont peu différenciés et confirment la présence d'une connexion hydraulique entre le réservoir minier et la nappe alluviale.

Afin de suivre les variations de la qualité de l'eau de la nappe alluviale, en particulier la quantité de sulfate (teneurs les plus fortes observées), ANTEA a réalisé des mesures de conductivités électriques aux différents piézomètres, à la sortie du drain et dans l'Orne. Par ailleurs, des prélèvements d'eau ont été réalisés par ANTEA afin de faire des analyses plus précises sur les concentrations en sulfate et autres espèces chimiques. L'évolution de la concentration aux piézomètres (figure 2) indique bien une évolution croissante de la minéralisation de la nappe alluviale de l'Orne.

Deux mesures ont été faites par mois et s'échelonnent du 28 août au 16 décembre 1998. L'ensemble des résultats des analyses effectuées sur les piézomètres et dans l'Orne est récapitulé dans le tableau de l'annexe 6.

De ces résultats il apparaît que : les concentrations mesurées dans l'Orne à l'aval et à l'amont du barrage de Beth sont en décroissances depuis le 1<sup>er</sup> octobre 1998 et par conséquent les fortes concentrations mesurées dans la nappe ne peuvent pas provenir uniquement de l'Orne. C'est seulement à l'amont du barrage de Beth que l'Orne alimente en partie la nappe et donc c'est uniquement dans cette zone où il y a une minéralisation provenant de l'Orne. Dans sa partie aval l'Orne est essentiellement drainante et colmatée, par conséquent les fortes concentrations observées dans la nappe ne peuvent provenir de cette dernière.

Par ailleurs, les fortes concentrations observées dès début août aux piézomètres PZ3, PZA et PZB à proximité immédiate du coteau indique une venue d'eau latérale fortement minéralisée provenant de la mine.

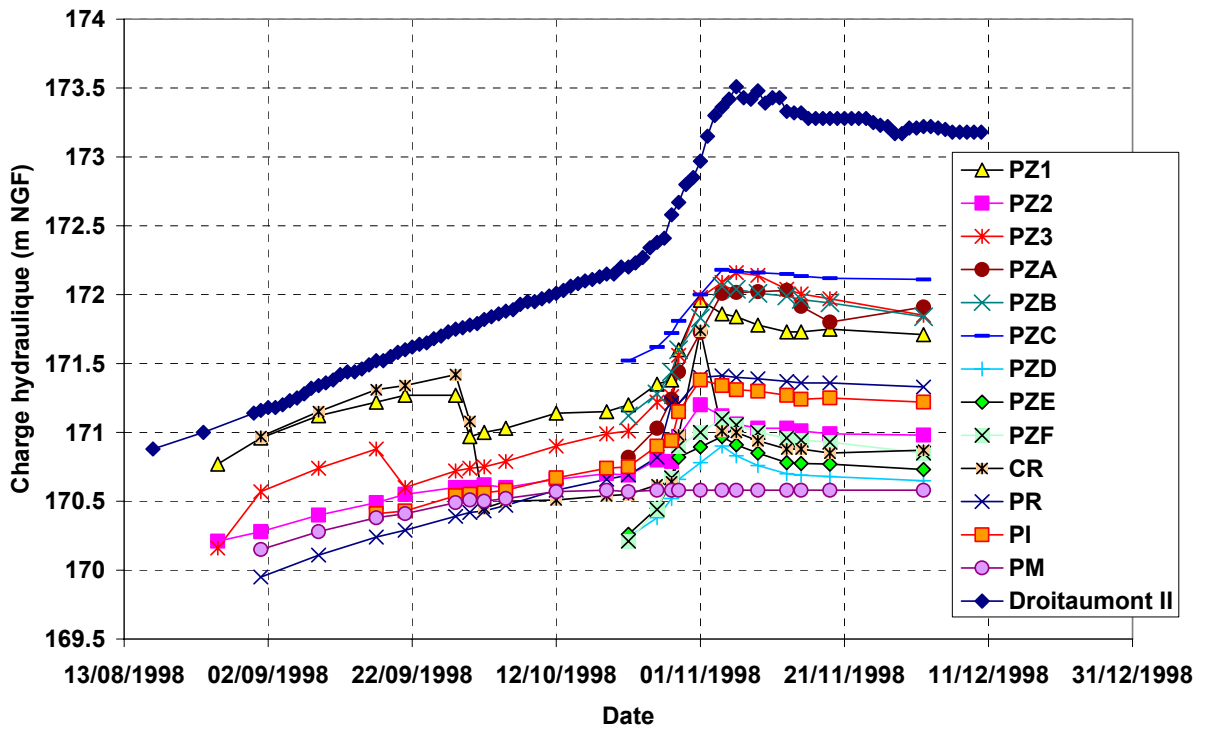


Figure 1 : Comparaison de la piézométrie de la nappe alluviale avec le niveau du réservoir minier sud en fin d'ennoyage

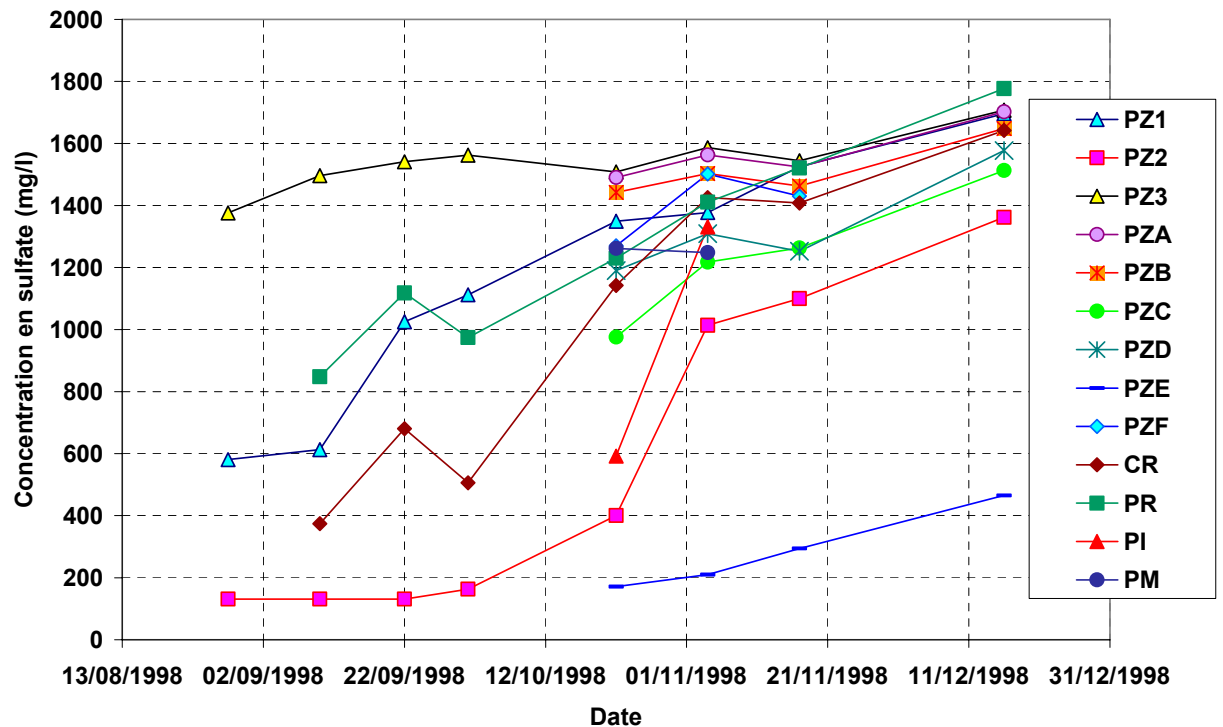


Figure 2 : Evolution des concentrations en sulfate dans la nappe alluviale

### **3.1.2 Suivi de l'Orne à Moyeuvre Grande**

Dans le cadre du projet d'abaissement du seuil de débordement du bassin sud dans l'Orne à Moyeuvre-Grande, un modèle hydraulique de l'Orne a été réalisé par ANTEA en 1999 (Chevalier J., 1999) afin de transposer les débits de l'Orne en moyennes et hautes eaux de la station hydrométrique de Rosselange (aval hydraulique) au nouveau point de débordement situé au lieu dit du « pont cassé » (cf photo 2 annexe 3) à 2050 m en amont de la station, ainsi qu'à l'aval du barrage de Beth (cf photo 3 annexe 3). Les données des débits à Rosselange sont disponibles sur le site de la banque HYDRO (Banque nationale de données pour l'hydrométrie et l'hydrologie) de la DIREN Lorraine (<http://hydro.rnde.tm.fr>).

Le modèle hydraulique a été réalisé sur TALWEG-FLUVIA qui est un logiciel de calcul pour des écoulements permanents à surface libre en régime fluvial développé par le CEMAGREF. Les résultats de la modélisation hydraulique ainsi que les débits de l'Orne mesurés à la station hydrométrique de Rosselange sont donnés dans l'annexe 7.

### **3.1.3 Suivi du niveau du réservoir minier et données relatives à la construction du chenal**

Le niveau du réservoir minier du bassin sud est surveillé depuis la fin de l'exhaure en 1995 au puits Droitaumont II par la société Lormines (ancien exploitant des concessions minières) et depuis fin août 2002 au piézomètre France Déchet dont le suivi est assuré par le BRGM. La figure 3 ci-après indique les fluctuations observées dans le réservoir minier ainsi que celles de la nappe alluviale de l'Orne en PZ1 depuis la fin de l'ennoyage jusqu'à 2004. A la fin de l'ennoyage, le niveau du réservoir s'est stabilisé entre la cote 173 et 174 m NGF. La construction du chenal dont le but essentiel a été d'abaisser la cote de débordement à la cote 169 m a débuté le 23 août 2002 par un pompage pour assécher cette zone du réservoir minier. La mise en fonction du chenal a eu lieu en novembre 2003 avec un niveau du réservoir fluctuant entre la cote 169 et 170 m NGF, soit une chute du niveau de 3 à 4 m.

Le tracé du chenal (cf photo 4 annexe 3) a été finalisé par la société Ingérop qui a réalisé la conception de l'ouvrage. Le chenal comprend une galerie sous le coteau au sud puis rejoint la plaine alluviale en passant sous la voie ferrée pour déboucher à la hauteur du « pont cassé ». Les caractéristiques du chenal (géométrie, dimensions, cotes du radier et des parois moulées) ont été fournies par Ingérop sous forme de plans. Le chenal est contrôlé par des vannes à sa sortie du coteau (cf photo 5 et 6 annexe 3) qui peuvent être fermées en cas de crue de l'Orne et de mise en charge du chenal. Ce dernier est totalement étanche sous le coteau ainsi que sous le passage de la voie ferrée, ailleurs il est ouvert au radier.

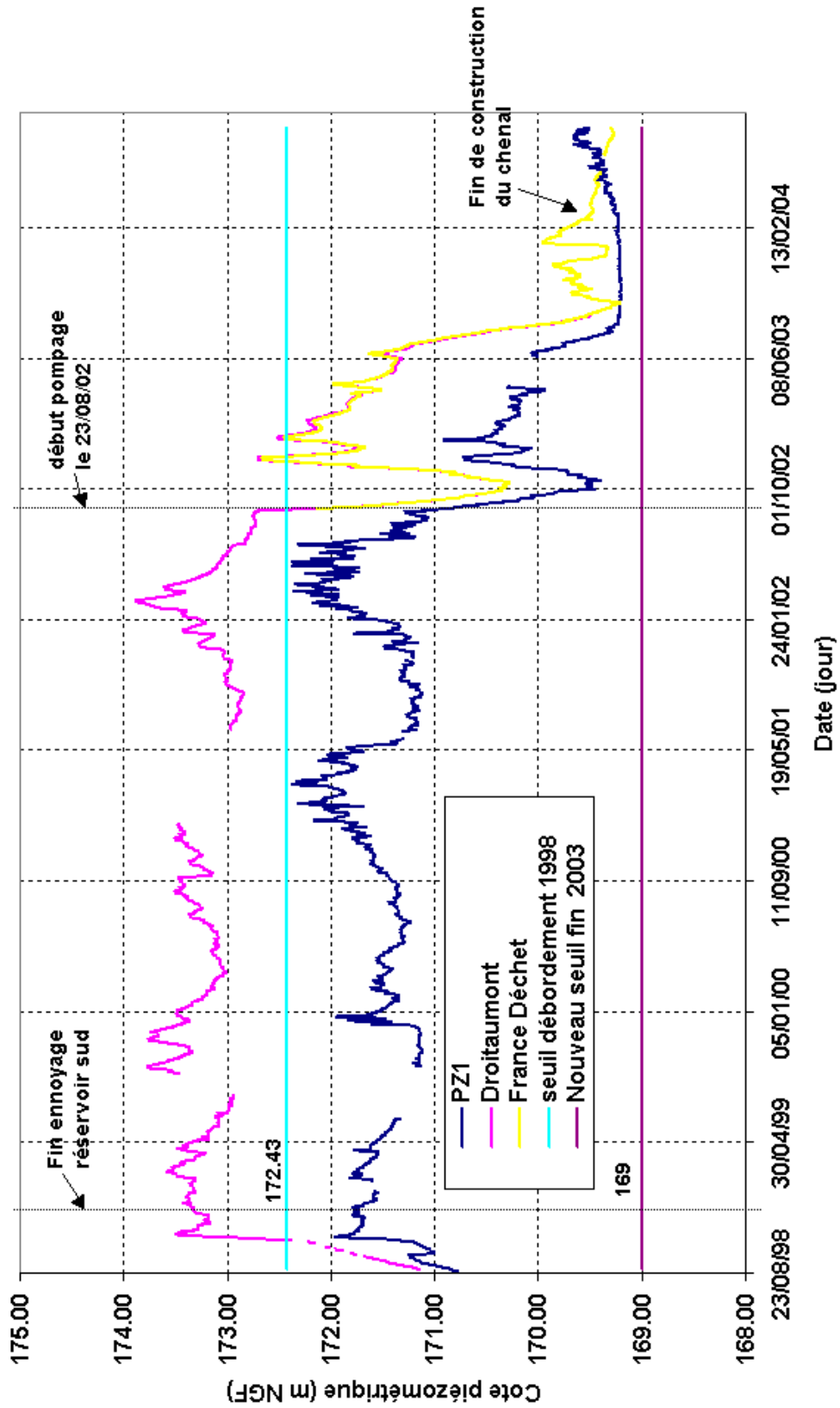


Figure 3 : Suivi du niveau du réservoir minier et niveau de la nappe à PZ1

### **3.1.4 Données relatives aux pompes**

En plus de l'installation de pompes individuelles dans les caves inondées, 8 puits de rabattements ont été réalisés répartis sur la rive droite de l'Orne à Moyeuvre-Grande où ont été observées les inondations majeures (cf annexe 4). Ces puits sont en fonction depuis 1999 et leur exploitation est assurée depuis mai 2000 par la Compagnie Générale des Eaux de Florange. Ces pompes sont asservies sur un niveau haut de la nappe. Nous avons pu obtenir les consommations électriques des pompes (1 relevé par semaine) depuis mai 2000 jusqu'à fin mars 2004 date à laquelle les pompages ont été stoppés. Ces données ne permettent pas à elles seules de remonter aux chroniques des débits car on ne connaît pas les temps de fonctionnement réels des pompes. Par ailleurs il n'a été réalisé que quelques mesures annuelles du niveau de la nappe (excepté en PZ1) pendant la période de pompage. Cependant, ces pompes n'ayant fonctionné qu'à partir de fin 1998, nous n'avons pas eu à les introduire dans le modèle pendant le période d'ennoyage sur laquelle le modèle a été calé.

## **3.2 Le modèle conceptuel**

### **3.2.1 Descriptif de l'outil de modélisation : MARTHE**

Le logiciel utilisé pour la modélisation de la plaine alluviale est MARTHE. Ce logiciel a été développé au BRGM (Thiéry.D, 1990, 1995) pour modéliser les écoulements et le transport en milieu poreux saturé ou non pour des modèles tridimensionnels ou multicouches. La méthode de calcul est basée sur une discrétisation par volumes finis faisant intervenir les bilans de masse d'une maille avec ces voisines immédiates (cf annexe 8). Cette méthode permet de conserver localement la masse.

### **3.2.2 Extension, maillage et structure du modèle**

Le modèle hydrodynamique couvre la plaine alluviale de Moyeuvre-Grande située en rive droite de l'Orne. Il est délimité au Nord par la rivière Orne (affluent de la Moselle) qui constitue une limite hydraulique stable. Au sud, il est délimité par les coteaux où affleure la formation ferrifère.

Le modèle conceptuel tridimensionnel de la nappe alluviale est subdivisé en trois couches aquifères de même extension correspondant chacune à une couche géologique de nature différente. La première couche constitue la couverture des remblais et est majoritairement dénoyée, la seconde couche est formée par les argiles majoritairement présents à l'Est du domaine moins transmissibles, et la troisième couche est formée par les graviers majoritairement présents à l'Ouest.

Le modèle hydrodynamique a été maillé avec des mailles carrées de 10 m de côté homogènes sur tout le domaine : il comprend en tout 12402 mailles soit 4134 mailles par couche. Le maillage est représenté sur la carte de l'annexe 4.

La topographie de la couche affleurante de remblais a été interpolée tous les 10 m (taille d'une maille) à partir des données de la cote du sol aux piézomètres et aux puits mesurées par un géomètre et complétées à partir de la carte IGN de Briey au 1/25000. Les cotes de substratum de chaque couche ont été interpolées à partir des coupes des différents forages (9 piézomètres et 3 sondages). Pour l'interpolation les points sont répartis essentiellement à l'est et au centre du domaine d'étude. Les cotes et les épaisseurs de couche obtenues par interpolation à l'extrémité ouest du domaine sont probablement biaisées mais à cet endroit la plaine alluviale est très rapidement stoppée par les coteaux. Dans les zones où une formation est absente (argiles ou graviers), une épaisseur minimale de 20 cm a été fixée pour faciliter la convergence du modèle. Les données relatives aux forages (substratum des couches) sont rassemblées dans l'annexe 9.

### **3.2.3 Conditions aux limites du modèle**

Les relations hydrauliques entre l'Orne et la nappe alluviale ont été représentées par une limite à charge imposée variable dans le temps. En amont du barrage de Beth l'Orne alimente la nappe et elle draine la nappe à l'aval. On tient compte des fluctuations de l'Orne au pas de temps journalier. Les charges sont imposées au niveau de l'Orne sur la couche affleurante.

Les relations hydrauliques entre la mine et la nappe alluviale sont également représentées par des charges imposées variables dans le temps (pas journalier) égales au niveau de l'eau mesurée à Droitaumont II et au piézomètre France Déchet. Ces charges sont imposées sur la bordure sud de la couche inférieure par où se font les entrées d'eau.

La zone d'étude considérée étant totalement urbanisée, l'infiltration est minime, les excédents d'eau de pluie étant en principe collectés dans le réseau d'eaux pluviales. De plus les entrées d'eau provenant de la mine sont prépondérantes par rapport aux apports d'eau des précipitations. En conséquence le modèle ne prend pas compte la recharge par le toit des remblais (infiltration directe considérée comme nulle mais la fluctuation du niveau d'eau du réservoir minier est directement liée aux précipitations).

Les autres conditions aux limites qui existent dans le modèle sont :

- Des mailles à débordement à la côte du toit des alluvions,
- Un drain dans la couche des graviers à proximité du puits CR et allant vers l'Orne qui fonctionne depuis fin septembre 1998.

Le drain a été modélisé dans le code MARTHE à l'aide de mailles « rivières » et non par un drain classique comme cela se fait habituellement.

En effet, les perspectives sont d'intégrer par la suite dans le modèle le nouveau chenal de drainage de l'eau de mine vers l'Orne qui sera modélisé par un drain-conduit dans MARTHE (voir annexe 10 sur les différents types de drain pouvant être modélisés par MARTHE).

Or le logiciel MARTHE ne permet pas dans sa version actuelle d'avoir à la fois un drain classique (peut uniquement drainer et il n'y a pas de hauteur d'eau dans le drain) et un drain conduit (peut drainer et alimenter, a une charge qui peut varier dans le temps). Par conséquent, le drain est modélisé par une rivière « sèche » dont la cote du fond du lit correspond à la cote de drainage. Cette représentation permettra par la suite de d'ajouter le chenal sous forme d'un drain conduit

## 4 Calage du modèle en transitoire

### 4.1 Période de calage

L'hydrodynamique du modèle a été ajusté sur la fin de l'ennoyage d'août 1998 à mi-décembre 1998 où l'on dispose de mesures régulières sur l'ensemble des piézomètres. Pour le transport de sulfate nous disposons d'analyses effectuées en 1998 lors des études précédentes.

### 4.2 Calage de l'hydrodynamique

#### 4.2.1 Les paramètres de l'hydrodynamique

Les paramètres nécessaires pour le calcul des quantités d'eau transitant dans le modèle sont la transmissivité qui correspond au produit de la perméabilité par l'épaisseur saturée, le coefficient d'emmagasinement qui pour une nappe libre correspond à sa porosité efficace et le coefficient d'emmagasinement captif qui dépend de la compressibilité des terrains. Ces paramètres peuvent être estimés par des pompages d'essai. Ils sont ensuite calés sur les mesures piézométriques et sur des mesures de concentrations en particulier pour fixer la porosité. Le tableau 1 ci-après comprend les perméabilités déduites par pompage d'essai aux 7 piézomètres captant les alluvions et celles obtenues par ajustement aux historiques piézométriques dans le modèle. Dans le cas général, les perméabilités trouvées sont voisines de celles obtenues par interprétation des essais de pompage. Elles indiquent de même une transmissivité plus forte au niveau des piézomètres PZ1 et PZC à l'ouest du domaine où les alluvions sont essentiellement sablo-graveleuses, et une transmissivité plus faible vers l'est du domaine où elles sont essentiellement argileuses avec parfois des intercalaires plus perméables. Les perméabilités sont assez homogène sur l'ensemble du domaine,  $2.10^{-4}$  m/s pour la couche de remblais et d'argile plus ou moins sableuse,  $3.10^{-3}$  m/s pour les graviers dans le centre et à l'ouest du domaine.

Piézomètre	X (km)	Y (km)	Formation captée	T (m <sup>2</sup> /s) par Essai pompage	Epaisseur aquifère b	K (m/s) déduit (T/b)	K (m/s) de la couche par calage
PZA	870,02	178,42	Remblais + Argile	0,001 à 0,003	6	1,66.10 <sup>-4</sup> à 5.10 <sup>-4</sup>	2.10 <sup>-4</sup>
PZC	869,50	178,50	Graviers	0,011	5,5	2.10 <sup>-3</sup>	3.10 <sup>-3</sup>
PZD	869,83	178,64	Argile	0,0006	6	1.10 <sup>-4</sup>	2.10 <sup>-4</sup>
PZF	870,10	178,44	Remblais + argile	0,0015	6	2,5.10 <sup>-4</sup>	2.10 <sup>-4</sup>
PZ1	869,30	178,54	Remblais + Sables grossiers	> 0,01	5,2	> 1,9.10 <sup>-3</sup>	3.10 <sup>-3</sup>
PZ2	869,62	178,61	Remblais + argile + alluvions	0,001 à 0,003	4,2	2,4.10 <sup>-4</sup> à 7,1.10 <sup>-4</sup>	2.10 <sup>-4</sup>
PZ3	869,93	178,43	Argile + sables	< 0,001	6,4	< 1,5.10 <sup>-4</sup>	2.10 <sup>-4</sup>

**Tableau 1 : Comparaison des perméabilités après calage avec celles déduites par essai de pompage**

Il a été défini un emmagasinement libre pour chaque couche du modèle et un emmagasinement captif pour les deux couches inférieures susceptibles d'être captives à certains endroits. L'emmagasinement libre doit être équivalent à la porosité cinématique là où la nappe est libre, c'est un paramètre qui a été mieux ajusté à partir du transport en sulfate et que nous verrons ultérieurement. L'emmagasinement captif traduisant la compressibilité de l'eau et de la matrice poreuse a été fixé à  $1.10^{-4} \text{ m}^{-1}$ .

#### 4.2.2 Les résultats du calage de l'hydrodynamique

La figure 4 représente la carte piézométrique calculée de la nappe alluviale de l'Orne à Moyeuvre-Grande au début de la montée du niveau d'eau le 9 septembre 1998 et le 21 septembre 1998 avant l'ouverture du drain au puits CR. L'écoulement à ce moment là est majoritairement Sud Ouest – Nord Est.

La figure 5 montre la carte piézométrique de la nappe alluviale à Moyeuvre-Grande le 2 octobre 1998 après l'ouverture du drain et le 22 octobre 1998 juste avant le débordement au tunnel de Moyeuvre. La direction de l'écoulement est alors infléchie vers le Nord avec la vidange de la nappe par le drain dans l'Orne.

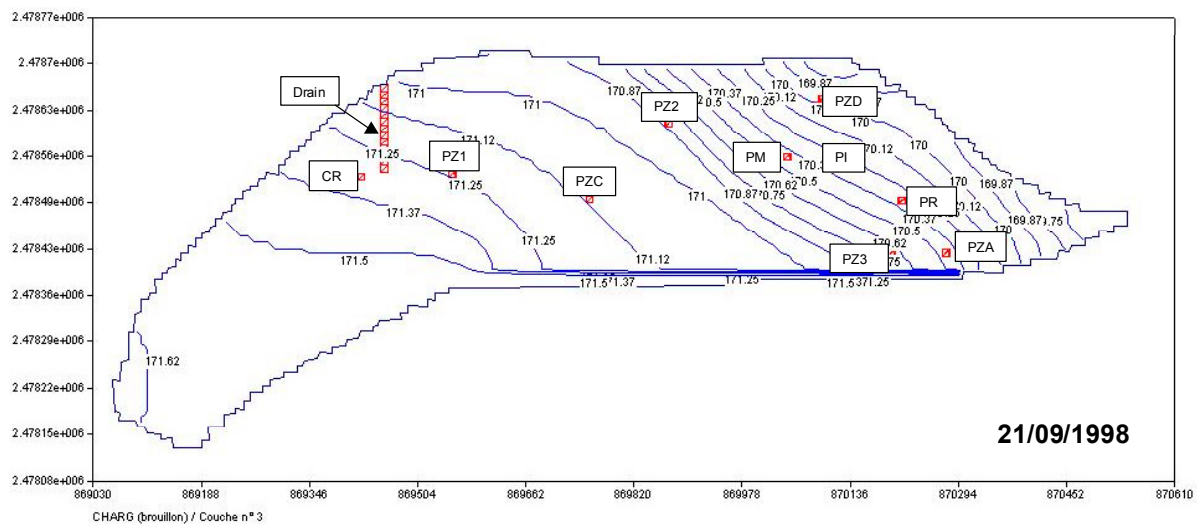
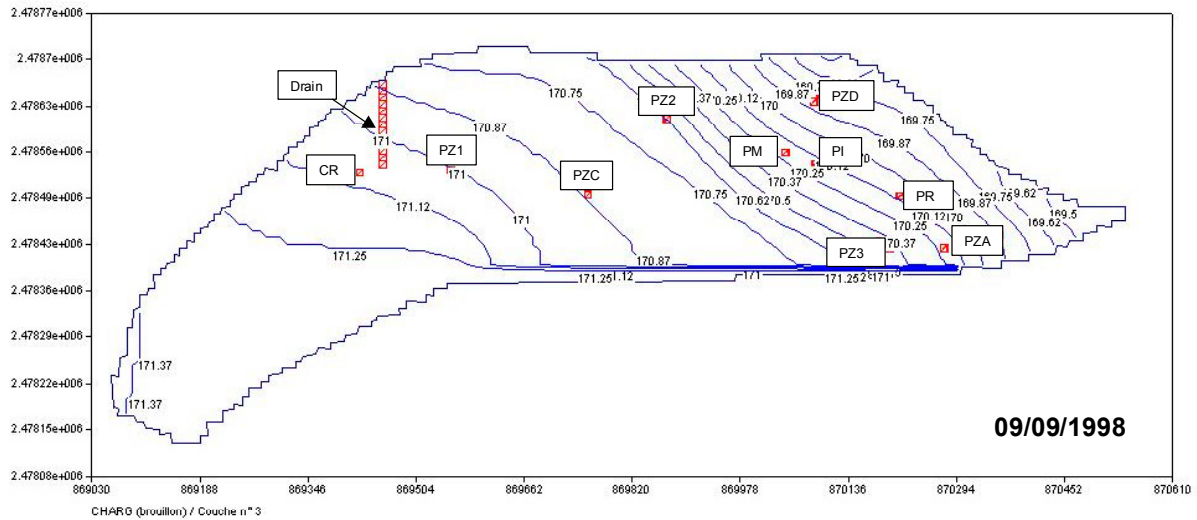
La figure 6 montre la carte piézométrique de la nappe alluviale après débordement à la cote 172,43 m au tunnel de Moyeuvre lorsque le niveau maximal est atteint le 4 novembre 1998 et le 2 décembre 1998.

Les figures 7 à 11 donnent par ailleurs l'évolution temporelle des charges mesurées et calculées par le modèle aux différents piézomètres.

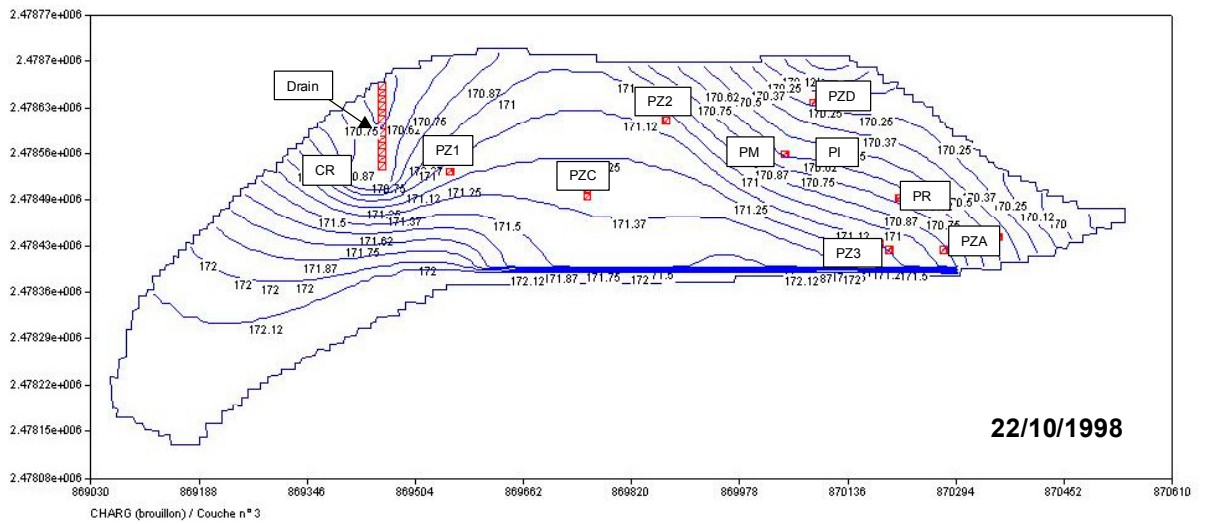
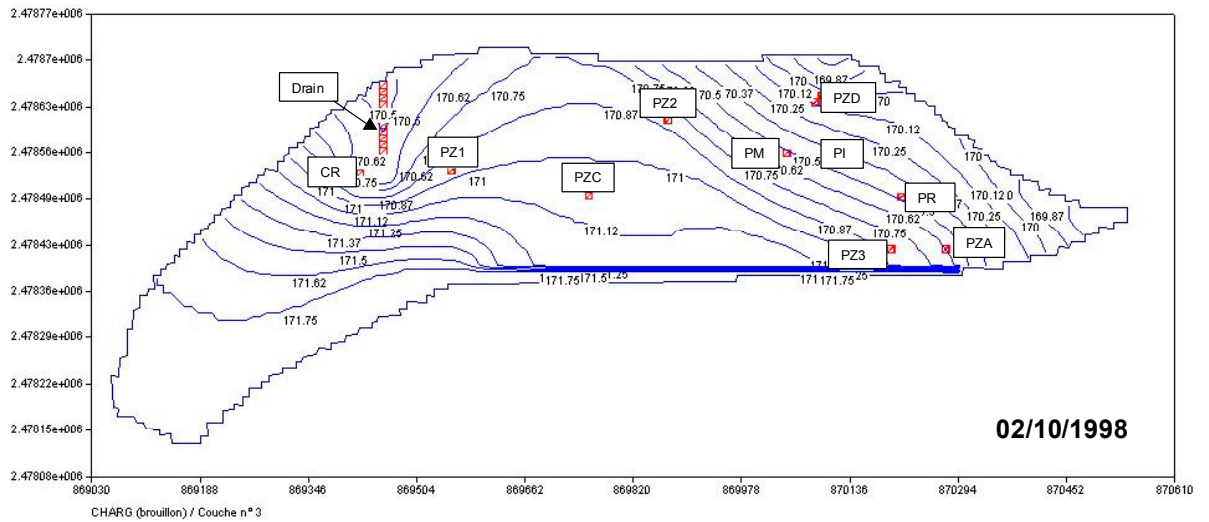
Les figures 12 à 14 représentent la charge simulée en fonction de la charge observée pour différentes dates afin d'avoir une visualisation globale de la qualité du calage.

De l'ensemble des résultats il apparaît une bonne adéquation entre le modèle et les observations. Le modèle est représentatif du comportement de la nappe alluviale à la fin de l'envoyage du réservoir sud. Le gradient de charge est plus fort dans sa partie

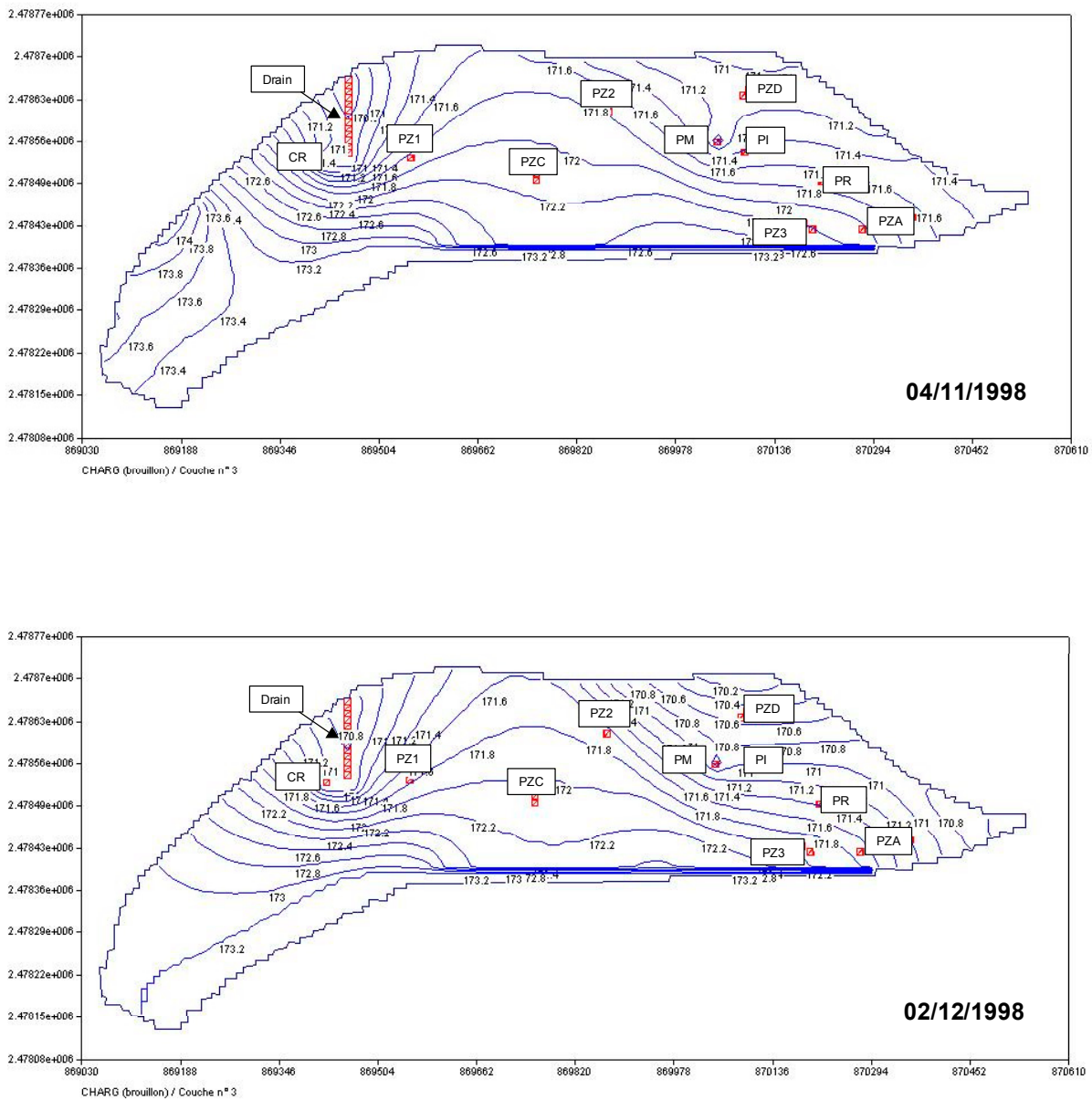
est et traduit une plus faible transmissivité de la nappe essentiellement argileuse dans cette zone. Plus à l'ouest du domaine, le gradient de charge diminue et correspond à des alluvions essentiellement sablo-graveleuses. L'ouverture d'un drain gravitaire au puits CR accélère la vidange de la nappe dans la rivière Orne. Son effet se fait ressentir jusqu'au centre du domaine. Néanmoins, le niveau d'eau est surestimé en PZ2 avec une charge calculée supérieure à la charge réelle de 60 cm. Le calage en ce point n'a pu être amélioré sans détériorer le calage aux autres piézomètres pour des paramètres homogènes sur les différentes couches.



**Figure 4 : Cartes piézométriques simulées de la nappe alluviale à Moyeuvre Grande le 9 et 21 septembre 1998 avant ouverture du drain à proximité du puits CR**



**Figure 5 : Cartes piézométriques simulées de la nappe alluviale à Moyeuve Grande le 2 et 22 octobre 1998 après ouverture du drain à proximité du puits CR**



**Figure 6 : Cartes piézométriques simulées de la nappe alluviale à Moyeuvre Grande le 4 novembre et 2 décembre 1998 lorsque le niveau maximum a été atteint après débordement**

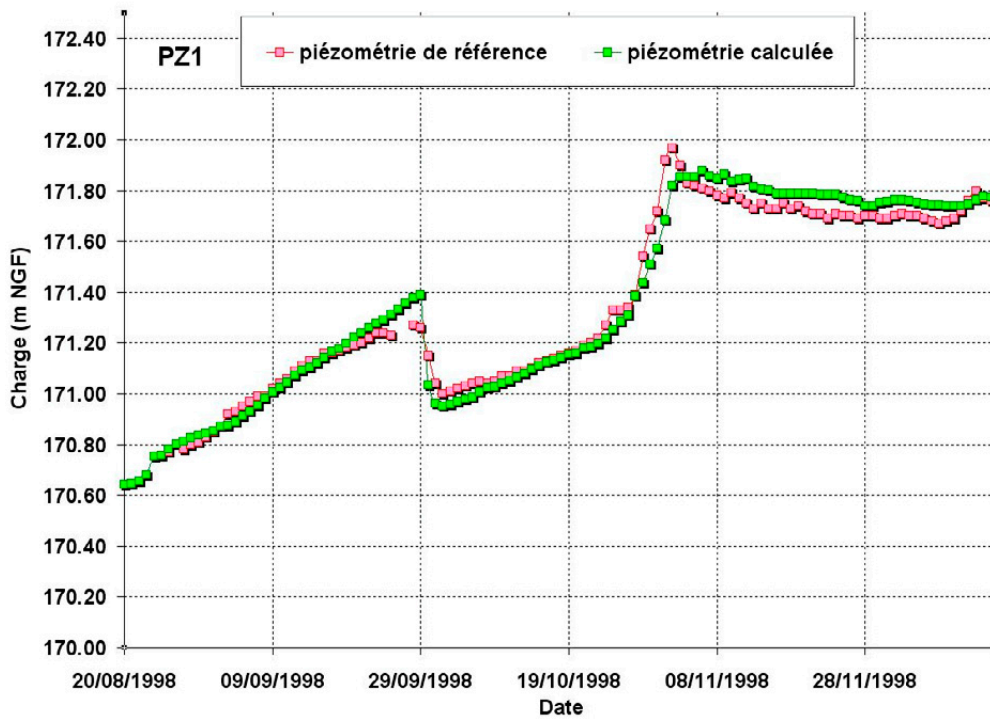
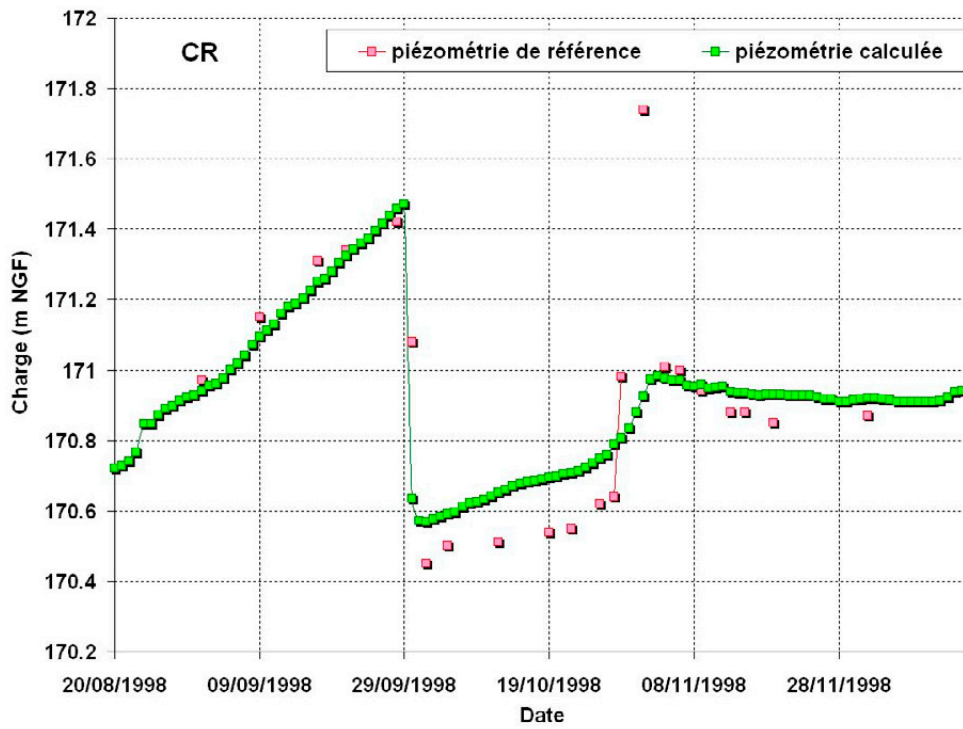


Figure 7 : Evolution du niveau piézométrique au puits CR et à PZ1 à l'Ouest du domaine

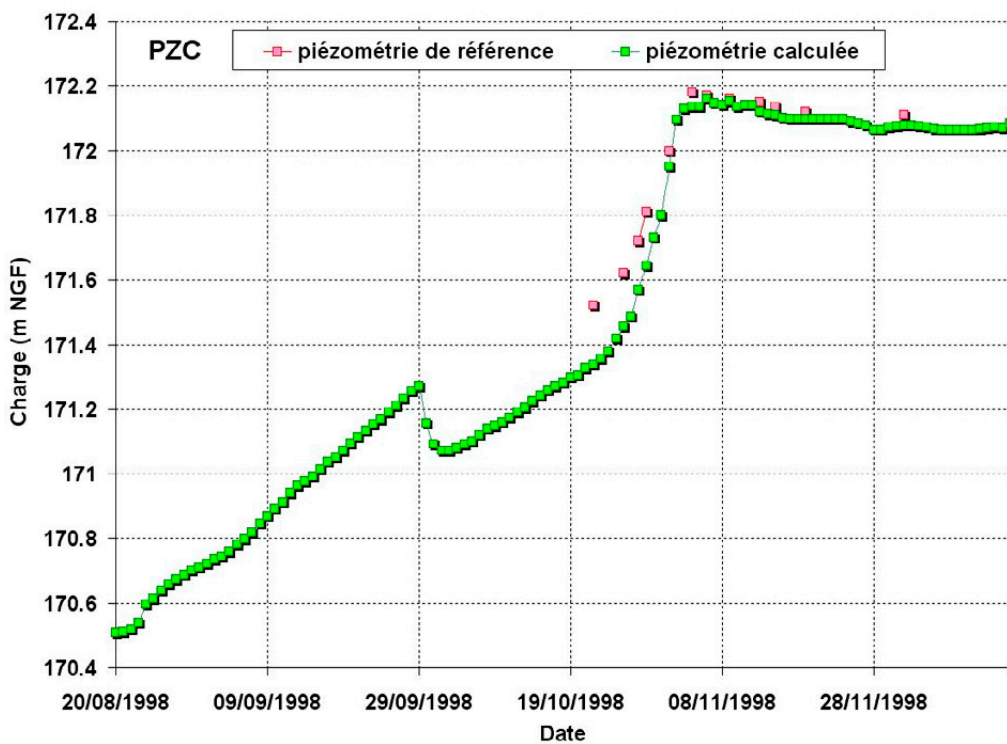
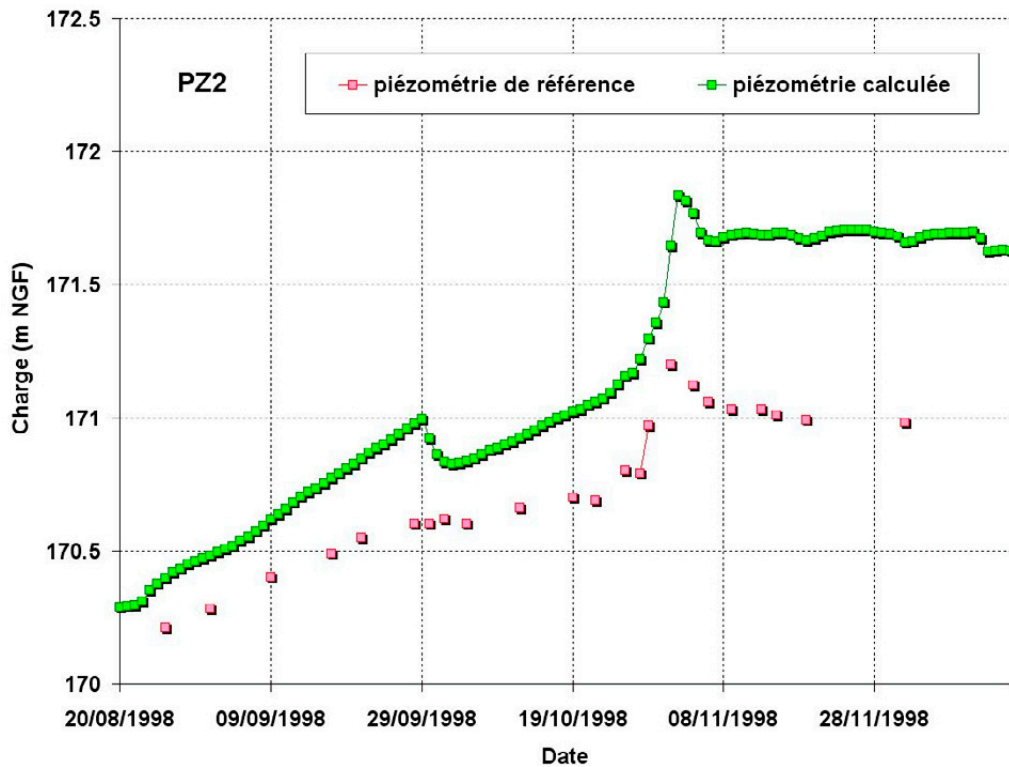
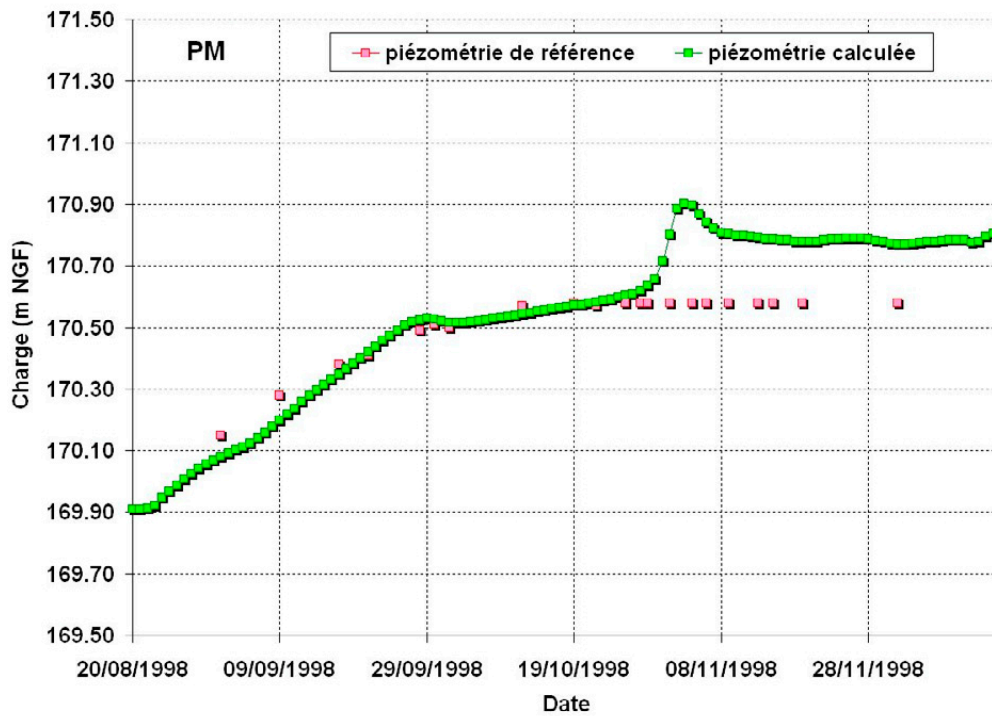
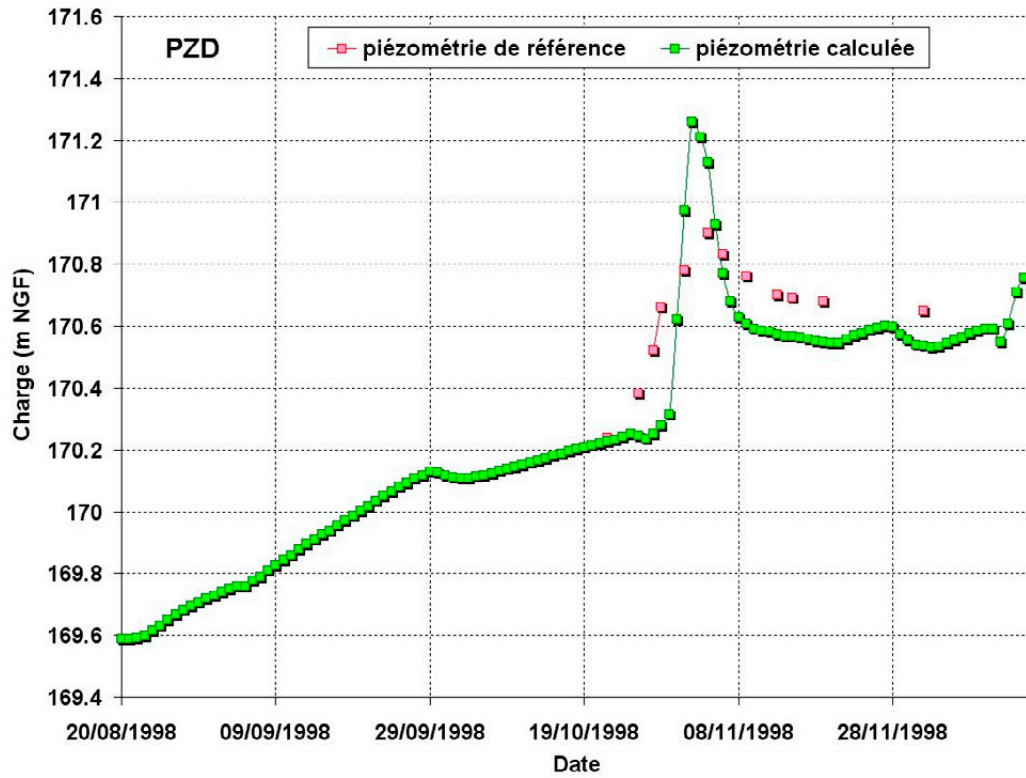


Figure 8 : Evolution du niveau piézométrique à PZ2 et PZC au centre du domaine



**Figure 9 : Evolution du niveau piézométrique à PZD et au puits PM au Nord-Est du domaine**

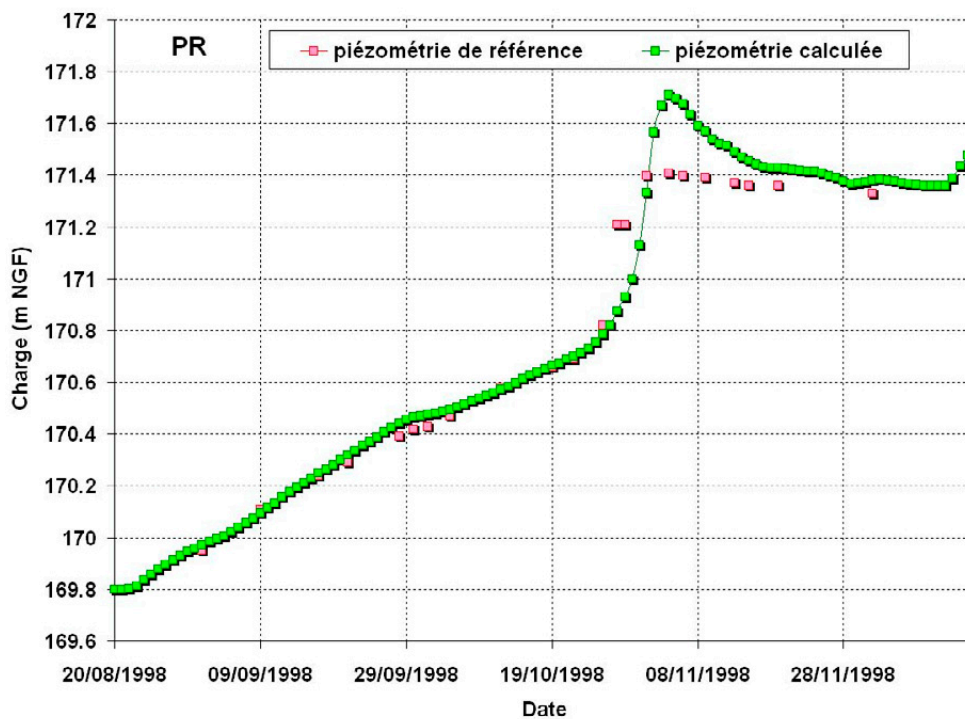
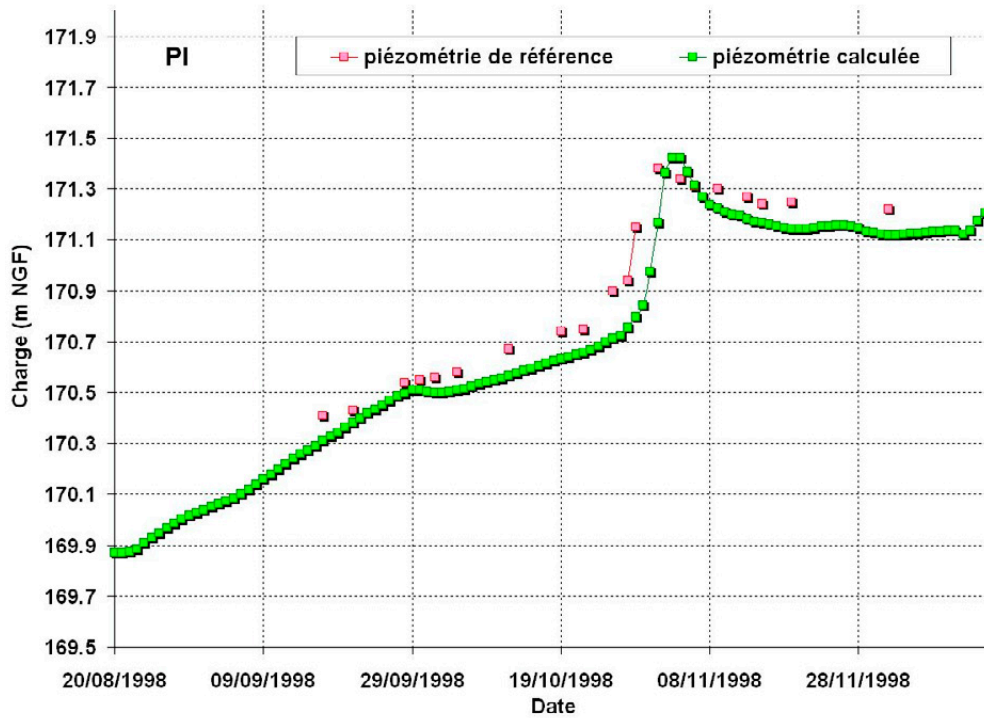


Figure 10 : Evolution du niveau piézométrique aux puits PI et PR à l'Est du domaine

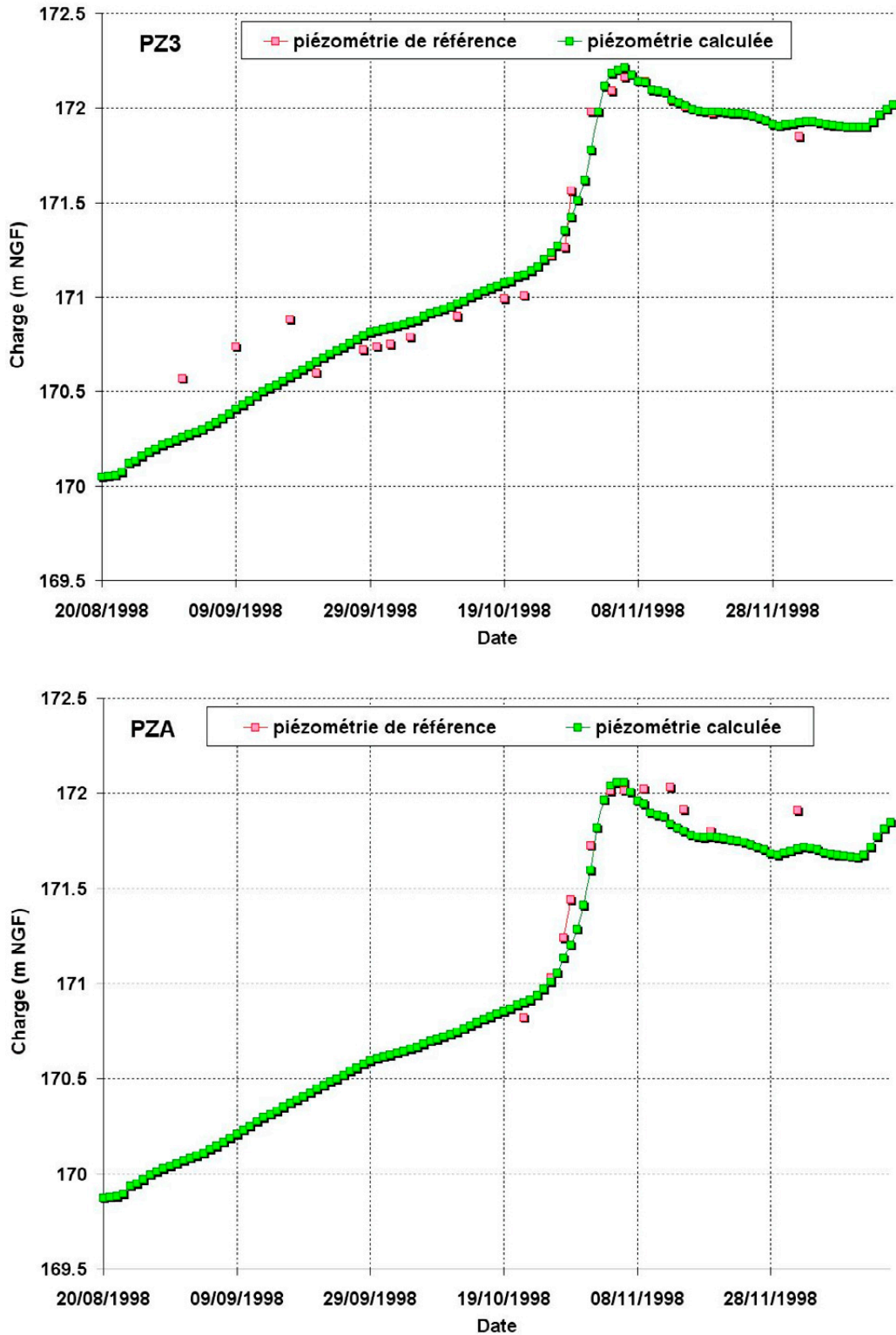


Figure 11 : Evolution du niveau piézométrique à PZ3 et PZA au Sud-Est du domaine

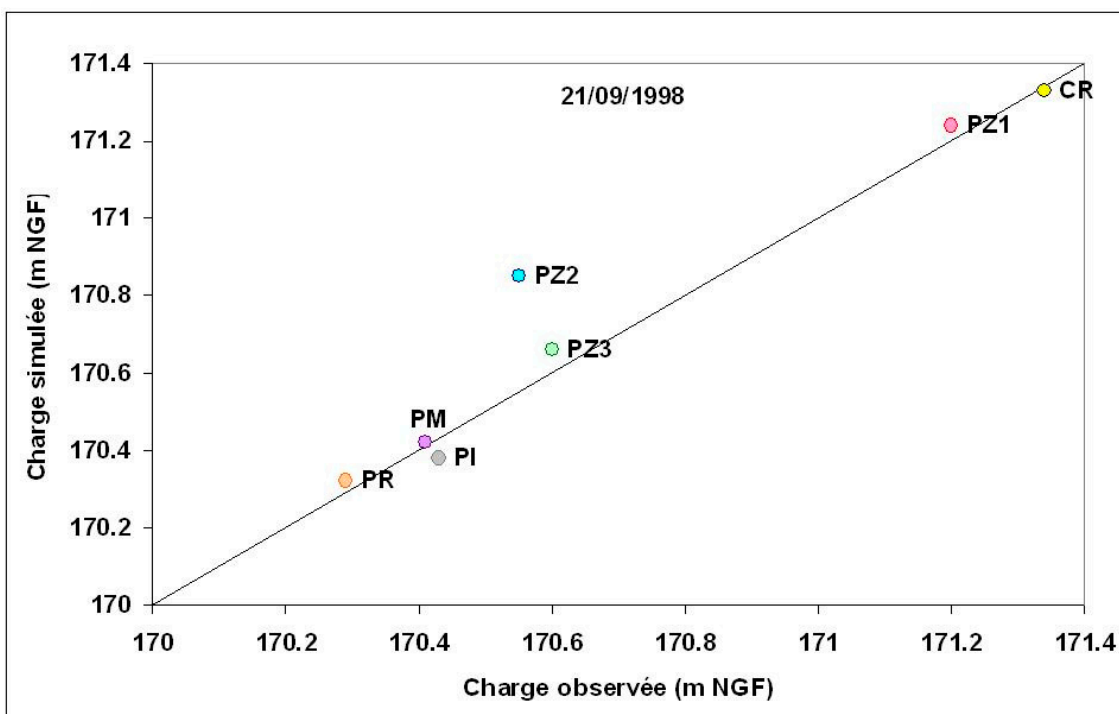
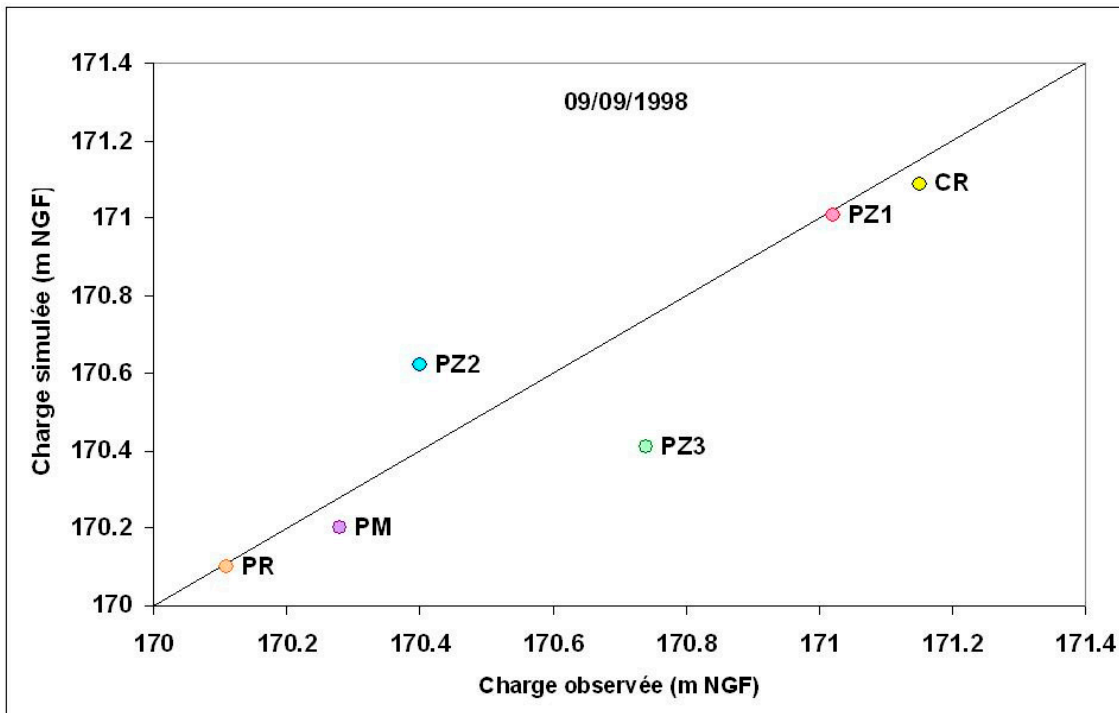


Figure 12 : Charges simulées et observées aux différents piézomètres le 9 et 21 septembre 1998

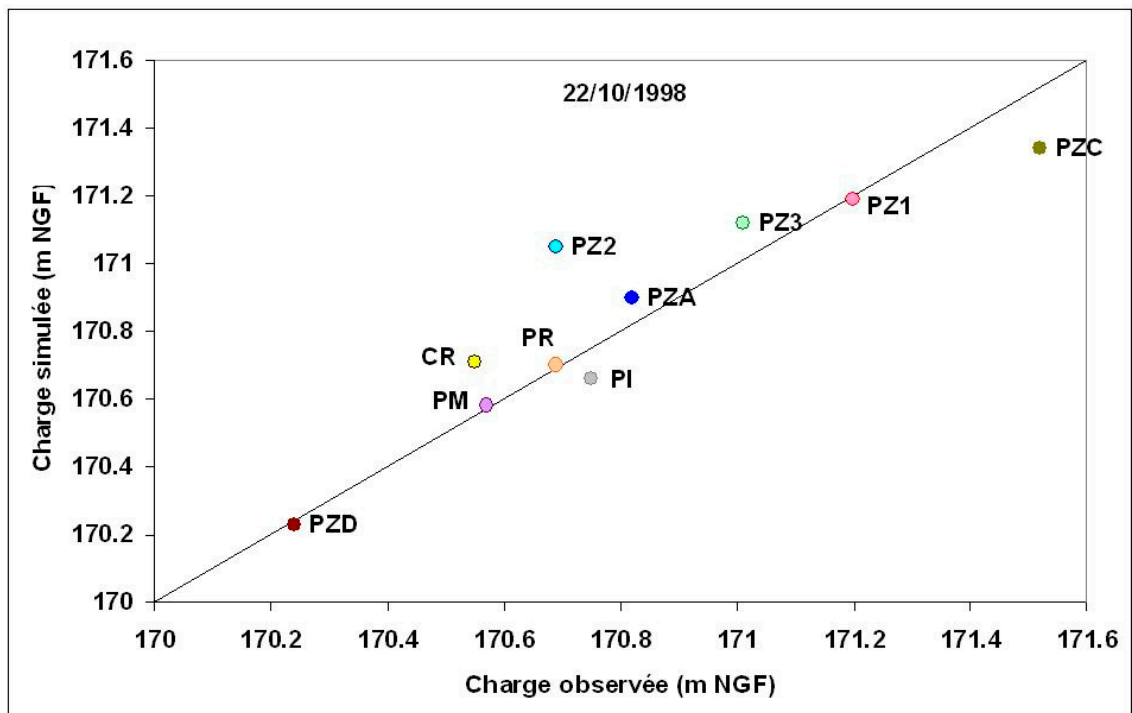
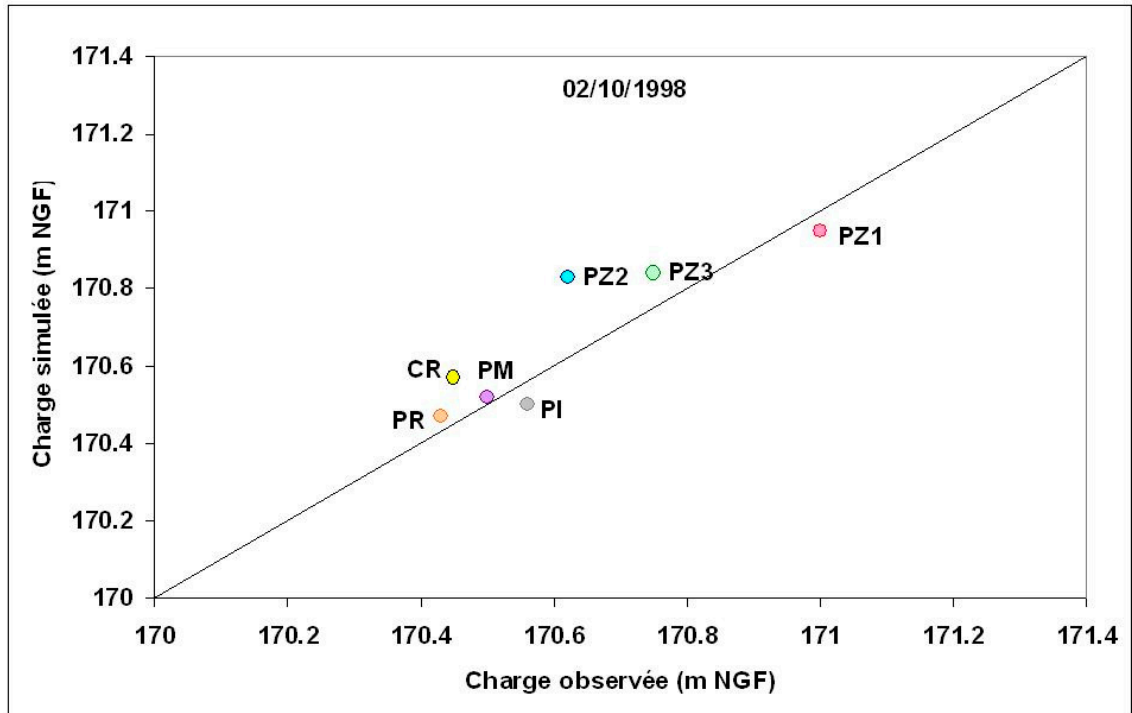


Figure 13 : Charges simulées et observées aux différents piézomètres le 2 et 22 octobre 1998

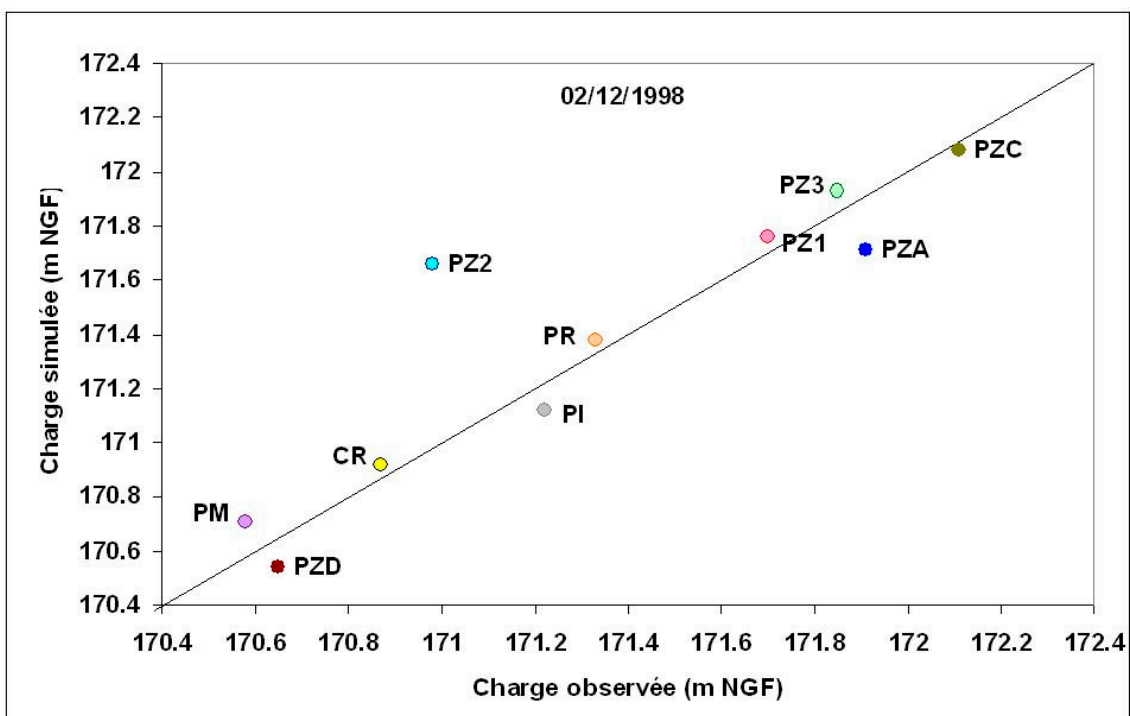
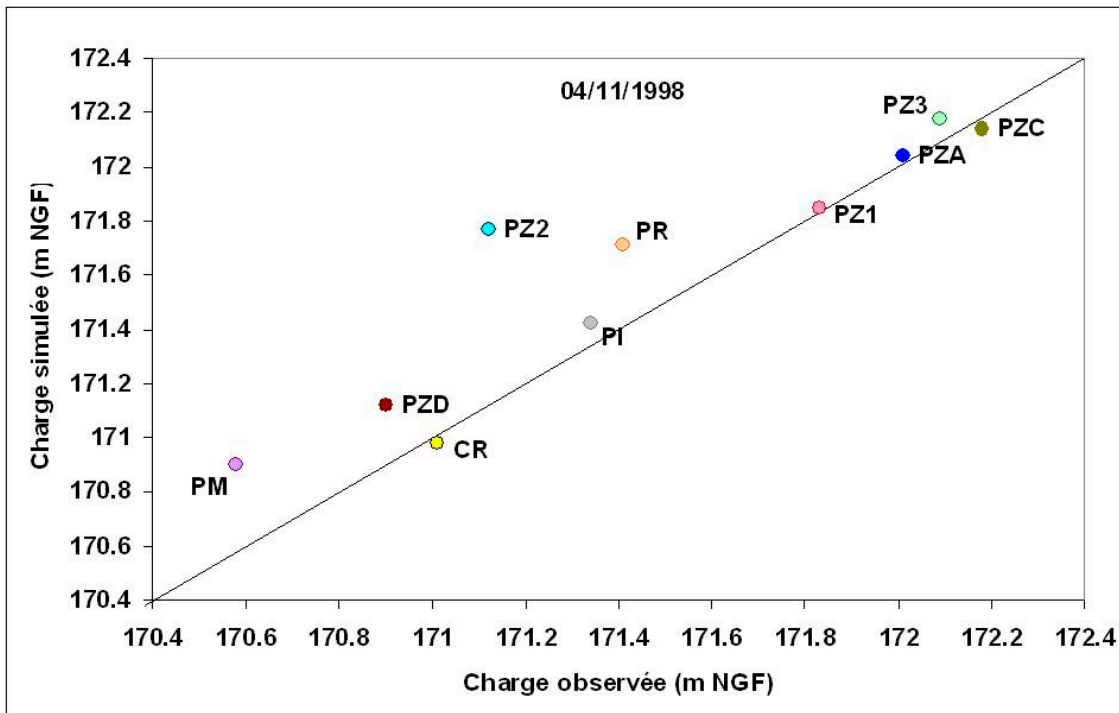


Figure 14 : Charges simulées et observées aux différents piézomètres le 4 novembre et le 2 décembre 1998

### 4.3 Calage du transport de masse

#### 4.3.1 Les mécanismes du transport

La propagation d'une pollution en phase dissoute dans un milieu poreux est le résultat de deux phénomènes : la convection et la diffusion-dispersion.

La convection est le terme de transport lié à l'écoulement de l'eau libre qui est effectif pour une fraction de la porosité totale du milieu, appelée porosité cinématique. En effet, il faut tenir compte de la vitesse réelle de l'écoulement dans les pores qui est le quotient de la vitesse de filtration ou de Darcy sur la porosité cinématique. Dans le modèle on définit la porosité à saturation du milieu (on s'intéresse uniquement au transport dans la zone saturée). La porosité à saturation du milieu est la somme de deux termes, la teneur en eau liée et la teneur en eau mobile. Dans notre cas on considère que toute l'eau du milieu poreux participe à l'écoulement et donc la porosité est équivalente à la porosité cinématique ou teneur en eau mobile.

La diffusion-dispersion rend compte de deux phénomènes distincts mais qui se manifestent sur l'évolution de concentration du polluant de façon similaire :

- La dispersion mécanique qui est un mécanisme résultant essentiellement de l'hétérogénéité du milieu qui tend à écarter le polluant des lignes de courant. Elle est caractérisée par un tenseur de dispersivité pour lequel on distingue la composante longitudinale ( $\alpha_L$ ) et la composante transversale ( $\alpha_T$ ). La valeur de ces coefficients dépend de l'échelle d'observation à laquelle les phénomènes sont étudiés ;
- La diffusion moléculaire qui résulte de l'agitation moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration (loi de Fick) et qui impose une migration des particules depuis les zones à forte concentration vers les zones à faible concentration. Le coefficient de diffusion moléculaire ( $D_0$ ) caractérisant ce transfert est intrinsèque à une espèce chimique donnée mais dépend également pour un milieu poreux de la tortuosité du milieu.

#### 4.3.2 Le paramétrage du modèle

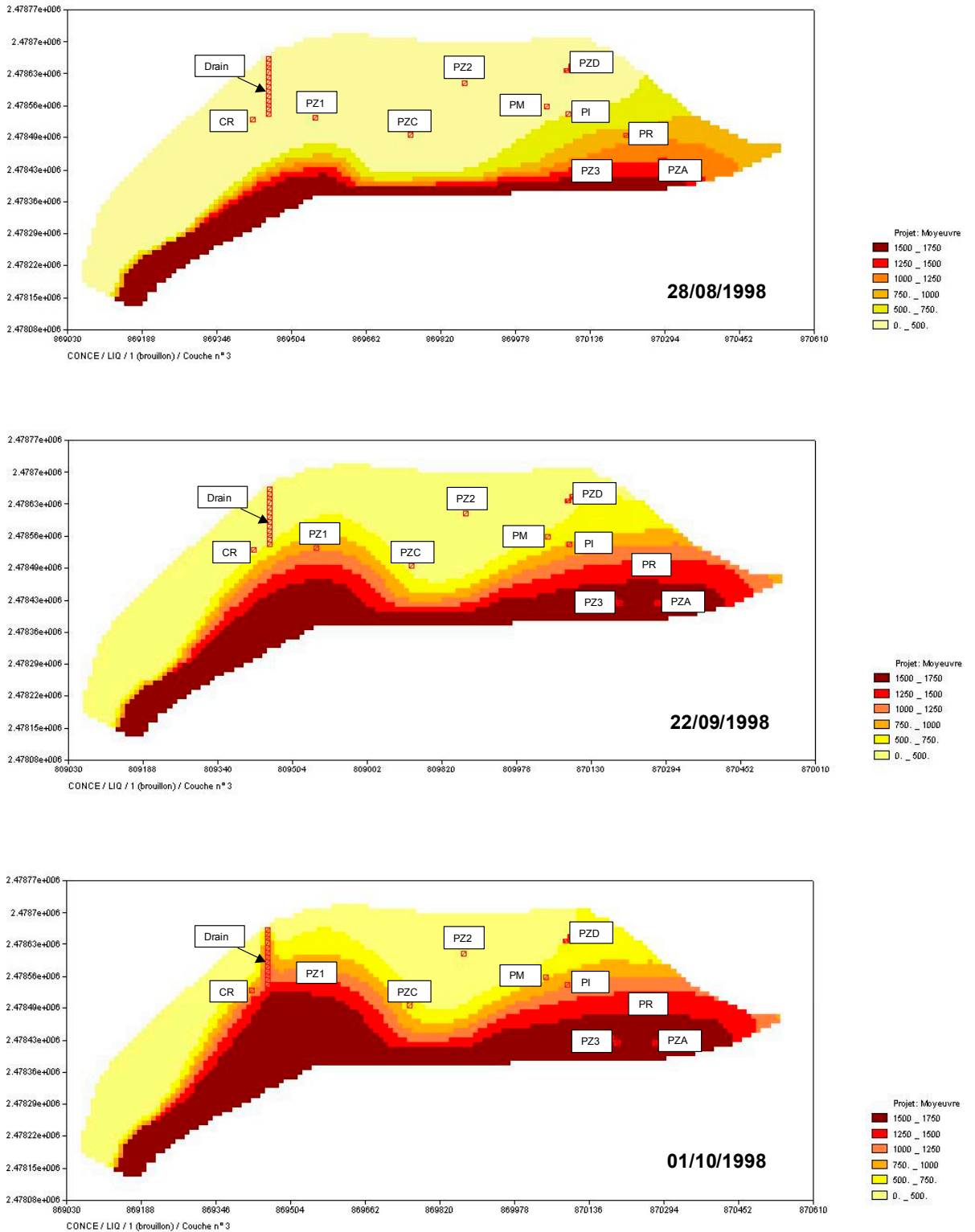
Nous rappelons que les paramètres classiques du transport sont la porosité à saturation  $\theta$  (équivalente à la porosité cinématique dans notre cas), la dispersivité longitudinale  $\alpha_L$ , la dispersivité transversale  $\alpha_T$ , et la diffusion moléculaire  $D_0$ . Ces paramètres sont récapitulés dans le tableau 2 ci-après dans le cas de transport de sulfate (espèce dont nous disposons de l'analyse chimique sur la plus longue période) et pour les différentes couches du modèle (remblais, argile et graviers).

	Remblais	Argile	Graviers
$\theta$	0.03	0.03	0.1
$\alpha_L$ (m)	10	10	10
$\alpha_T$ (m)	2	2	2
$D_0$ (m <sup>2</sup> /s)	1.07E-9	1.07E-9	1.07E-9

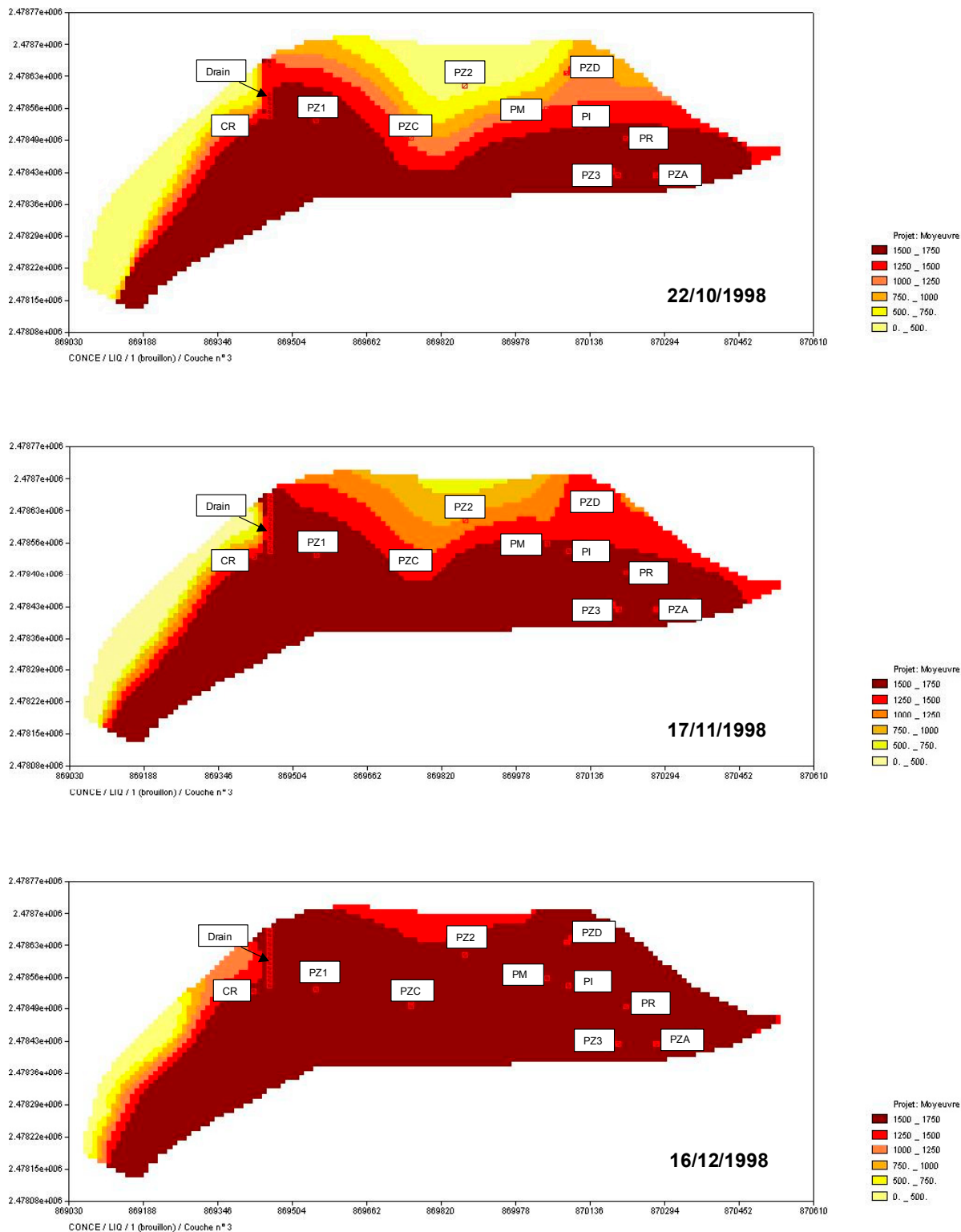
*Tableau 2 : Paramétrage du modèle pour le transport*

### 4.3.3 Les résultats de la modélisation du transport

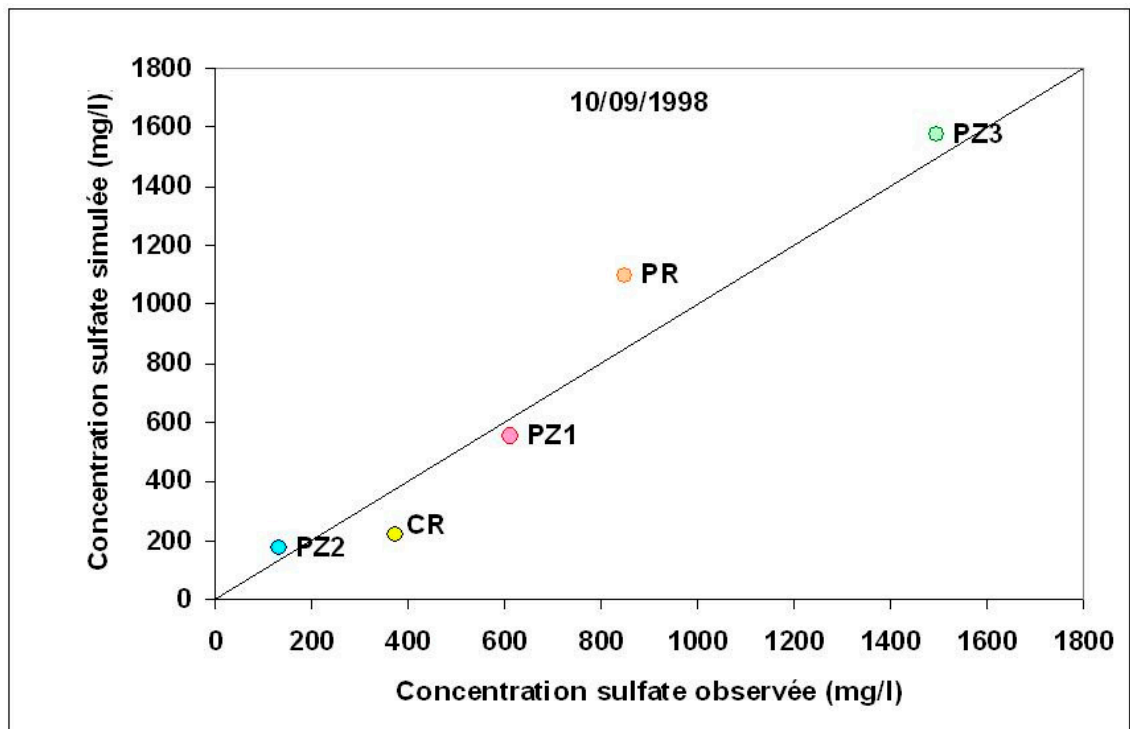
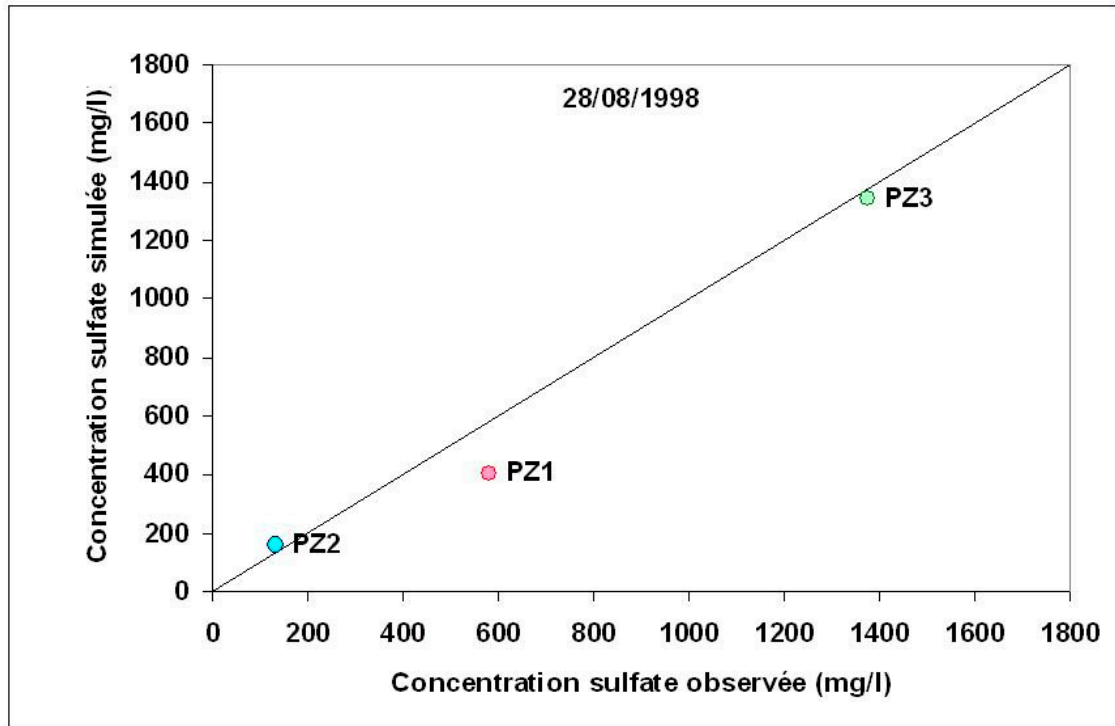
Les résultats sont présentés sous forme de cartes d'isoconcentrations de l'eau de la nappe alluviale (figures 15 à 16) et de graphiques représentant les concentrations calculées en mg/l en fonction des concentrations analysées de fin août à mi-décembre 1998 (figures 17 à 20). Ces résultats montrent clairement une progression de la minéralisation de l'eau de la nappe du sud vers le nord avec une concentration s'approchant de celle de l'eau de mine. L'ouverture du drain à proximité du puits CR fin septembre 1998 accentue ce phénomène. A partir de décembre 1998, la quasi totalité de la nappe alluviale a une concentration en sulfate supérieure à 1500 mg/l excepté autour de la partie amont de l'Orne qui alimente la nappe et dont la concentration est inférieure à 500 mg/l. Ces valeurs sont largement supérieures à la concentration maximale admissible pour l'alimentation en eau potable (CMA de 250 mg/l pour le sulfate). Néanmoins, aucun puits AEP ne se trouve dans cette zone. Globalement les concentrations estimées par le modèle correspondent à celles mesurées aux différentes dates avec une erreur moyenne absolue de 125 mg/l. On peut donc considérer cette première approche comme représentative du phénomène.



**Figure 15 : Concentrations en sulfate (mg/l) de la nappe alluviale modélisées le 28 août, le 22 septembre et le 1 octobre 1998 après l'ouverture du drain à proximité de CR**



**Figure 16 : Concentrations en sulfate (mg/l) de la nappe alluviale modélisées le 22 octobre, le 17 novembre et le 16 décembre 1998**



**Figure 17 : Concentrations en sulfate (mg/l) observée et simulée le 28 août et le 10 septembre 1998**

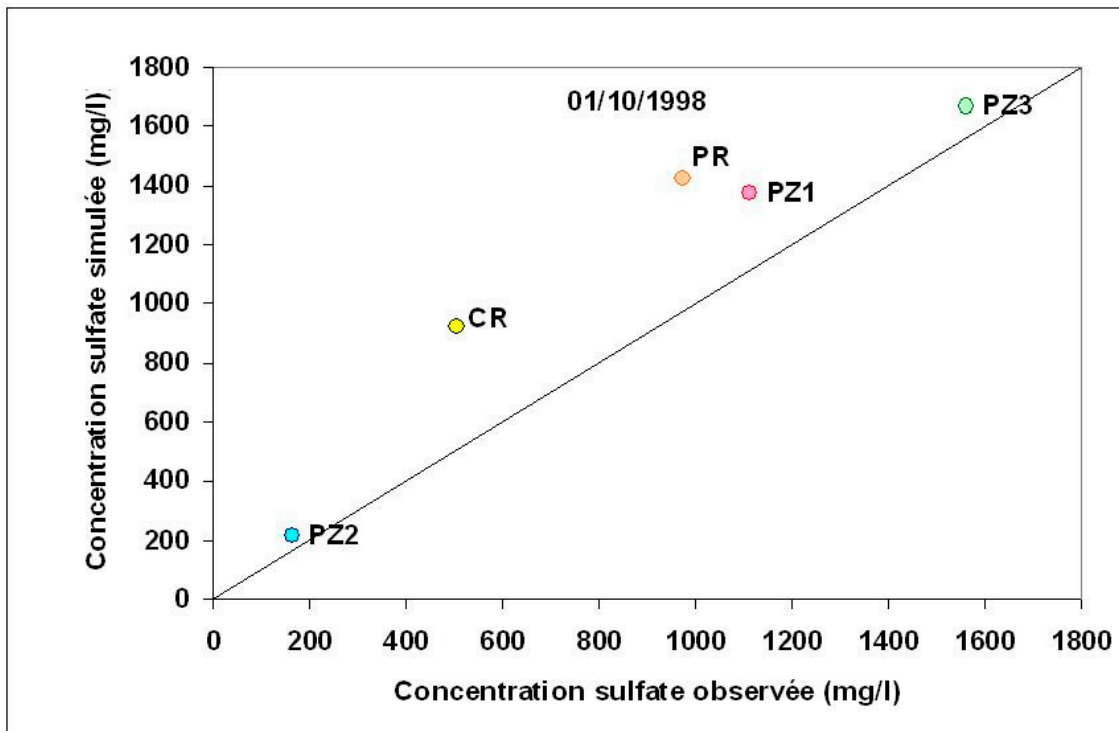
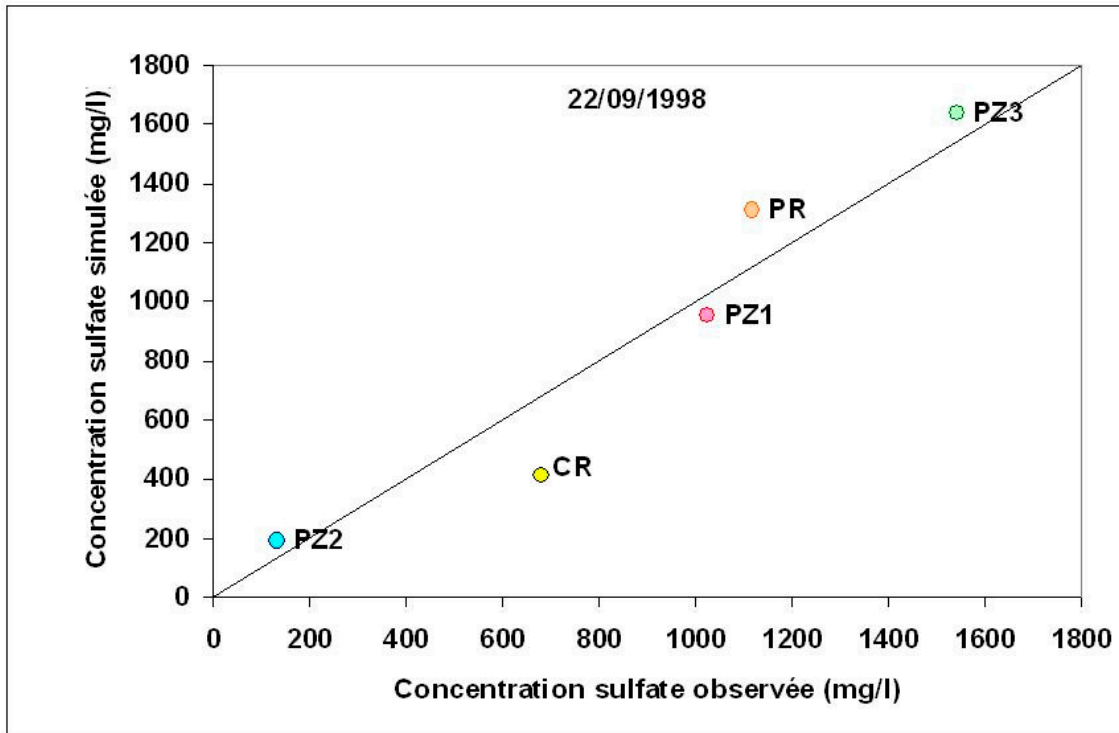


Figure 18 : Concentrations en sulfate (mg/l) observée et simulée le 22 septembre et le 1 octobre 1998 après l'ouverture du drain à proximité de CR.

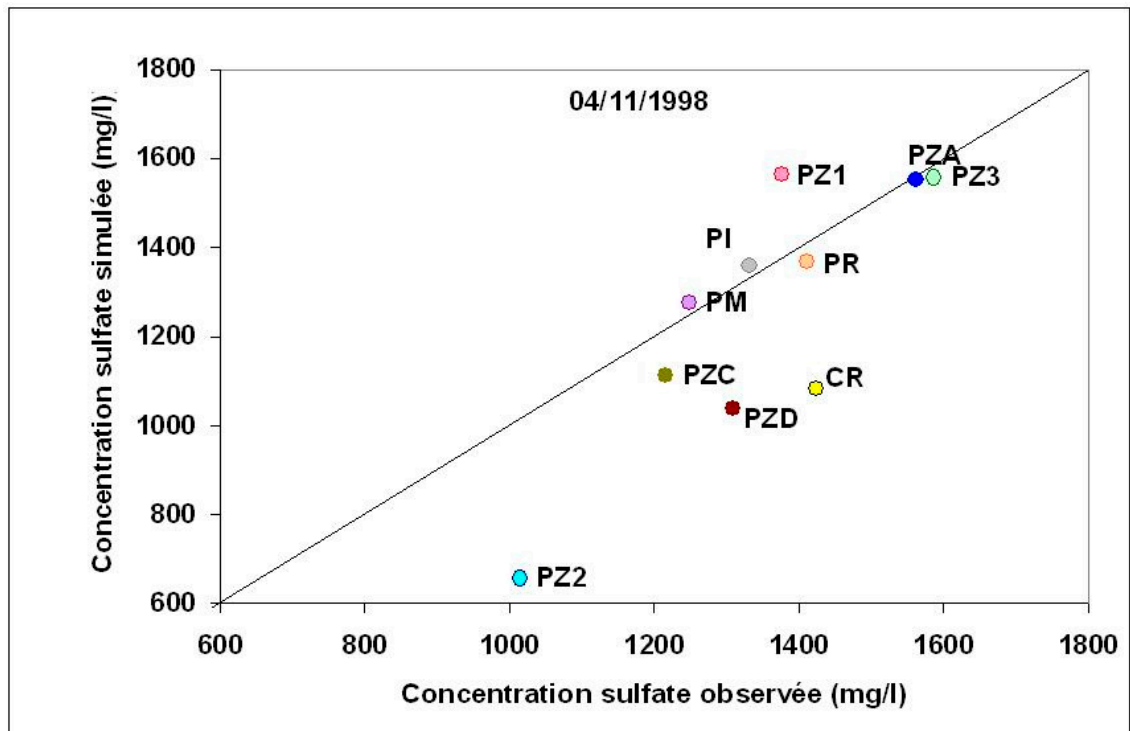
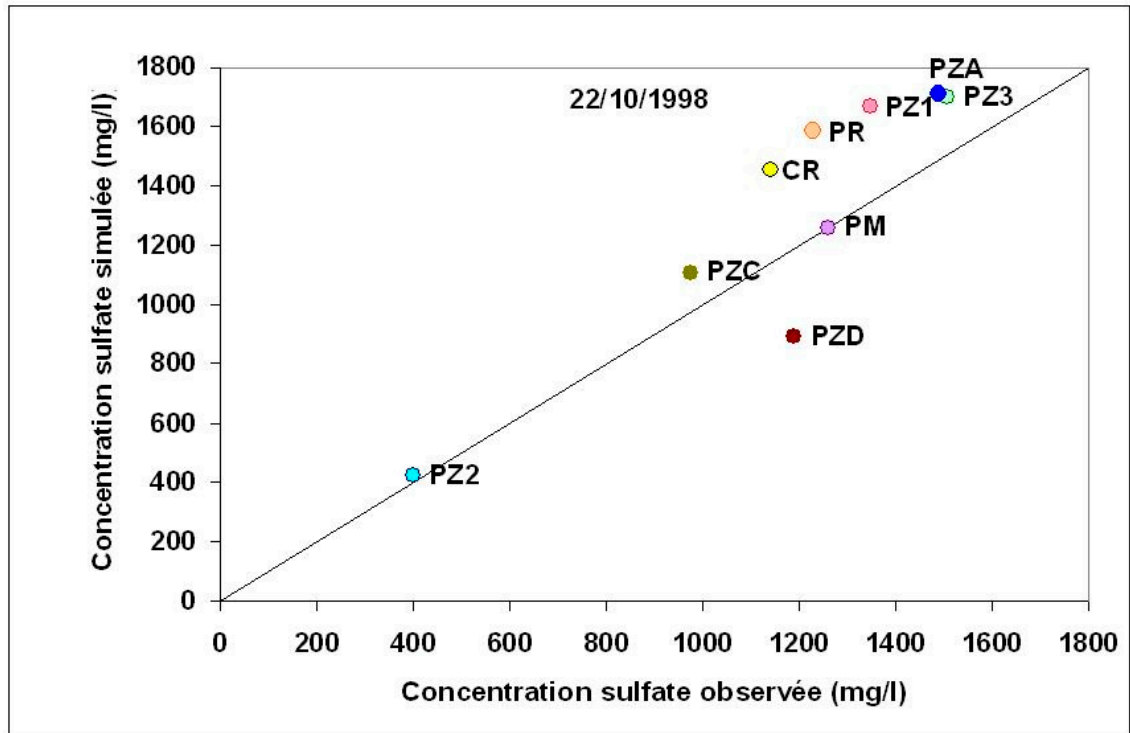


Figure 19 : Concentrations en sulfate (mg/l) observée et simulée le 22 octobre et le 4 novembre 1998

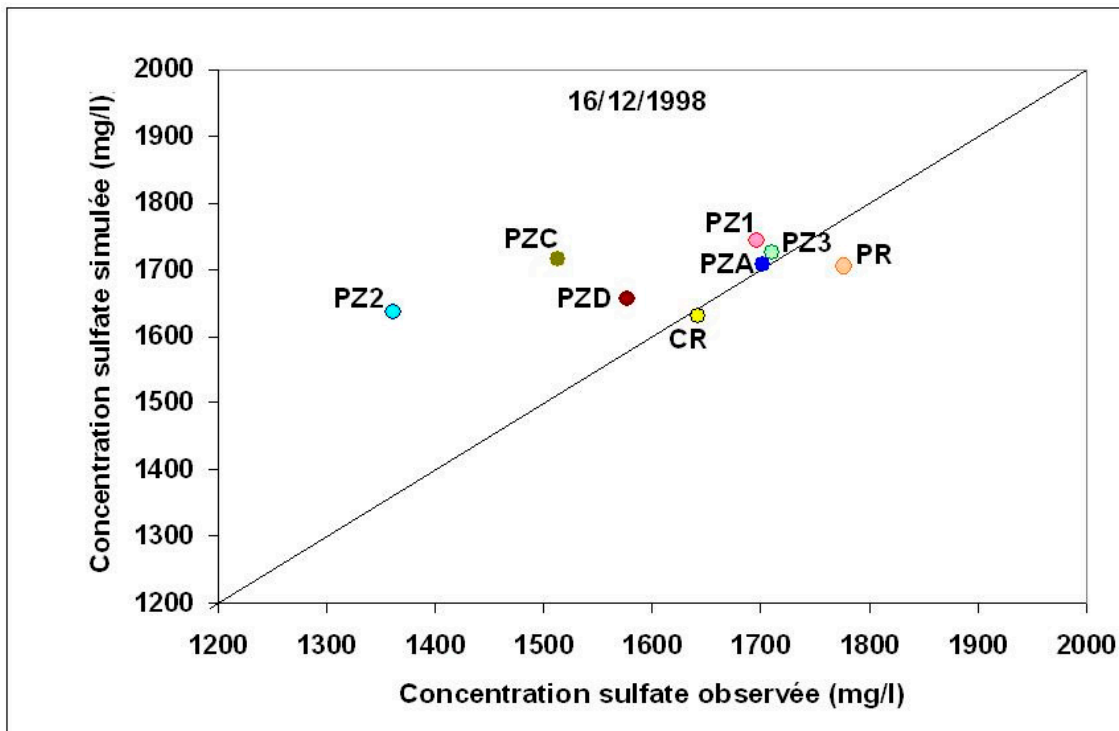
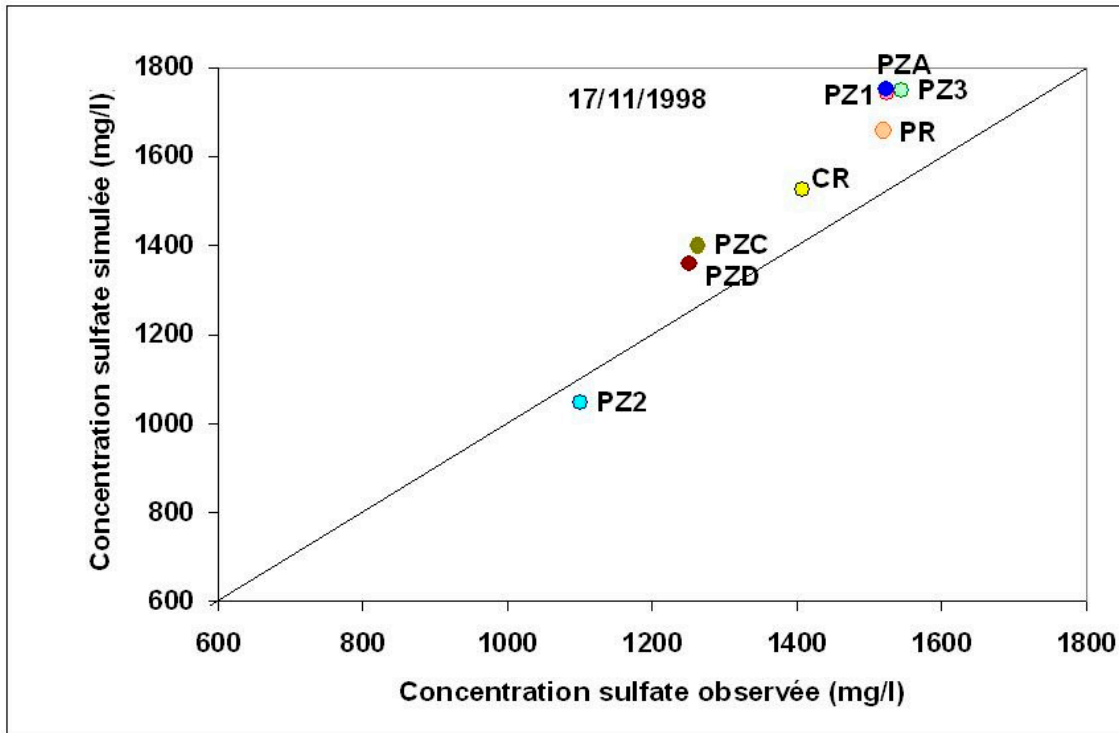


Figure 20 : Concentrations en sulfate (mg/l) observée et simulée le 17 novembre et le 12 décembre 1998

## 5 Conclusion

La partie basse de la ville de Moyeuvre-Grande (Moselle) située en rive droite de l'Orne a subi des inondations des caves des habitations par remontée du niveau de la nappe. La mise en place d'un réseau de piézomètres et d'un suivi de la qualité de l'eau de la nappe alluviale a permis d'établir que la remontée de l'eau et l'augmentation de sa minéralisation étaient dues à une alimentation par les eaux d'ennoyage des travaux miniers du bassin ferrifère sud.

Un modèle numérique a été construit à l'aide du logiciel MARTHE afin de reproduire le phénomène. Le modèle a été calé sur les données acquises durant 1998 lors de la fin de l'ennoyage du réservoir sud. Les résultats des charges et des concentrations calculées pendant la période d'ennoyage sont cohérents avec les observations.

Les perspectives sont d'utiliser le modèle pour intégrer le chenal de drainage des eaux de mine vers l'Orne et les puits de rabattement installés. De nouvelles mesures (niveau d'eau et conductivité) acquises au pas horaire depuis l'installation de nouvelles sondes à l'été 2004 en 5 points de la nappe, dans l'Orne et le réservoir minier permettront de mieux comprendre les échanges eau de mine – nappe – rivière depuis la mise en fonction du chenal fin 2003. Par ailleurs les pompages stoppés début 2004 ont été repris individuellement en novembre 2004 et jusqu'au printemps 2005 afin de connaître le rayon d'action de chaque puits sur la nappe et de savoir quels puits devront être maintenus en cas de crue de l'Orne.



## Bibliographie

**CHEVALIER J.** (1999) – Projet d'abaissement du seuil de débordement du bassin Sud dans l'Orne à Moyeuve-Grande (57) – Étude hydraulique et statistique des périodes d'arrêt du dispositif. Rapport ANTEA n° A16996/A, 15p, 4 tab., 9 ann.

**BAUBRON J-C.** (1998) – Avis sur les infiltrations d'eau observées dans la partie basse de la ville de Moyeuve-Grande (Moselle). Rapport BRGM R40271, 14p, 12 fig., 1 tab., 3 ann.

**BODIN E.** (2004) – Modélisation hydrogéologique de la plaine alluviale de l'Orne à Moyeuve-Grande (57). Projet de 3<sup>ème</sup> année de l'ENSG réalisé au BRGM, 26p, 22 fig., 10 ann.

**BUBENICEK L.** (1970) – Géologie du gisement de fer en Lorraine – Thèse de Sciences Naturelles, Nancy.

**COLLON P.** (2003) - Evolution de la qualité de l'eau des mines abandonnées du bassin ferrifère lorrain. De l'expérimentation en laboratoire à la modélisation in situ. Thèse INPL, Octobre 2003, 247 p.

**COUMOUL A., FOURNIGUET G., VAIRON J. et BAUBRON J-C.** (2000) – Projet d'abaissement du niveau d'envoyage du bassin sud – Modélisation 3D du débouché de l'ancienne mine de fer « Orne » au carreau de Moyeuve-Grande. Rapport BRGM/RP-50149-FR, 73p, 12 fig., 6 tab., 12 ann.

**SANCHEZ Z.** (2003) – Comportement hydrogéologique du réservoir du bassin sud (bassin ferrifère de Briey-Longwy, Lorraine) – Modélisation de la plaine alluviale de Moyeuve. Rapport de stage de fin de cycle CESTEMIN réalisé au BRGM d'avril à septembre 2003, 75p, 48 fig., 9 tab.

**THIERY D.** (1990) MARTHE. Modélisation d'Aquifères par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour calcul Hydrodynamique des Ecoulements. Version 4.3. Rapport BRGM 4S/EAU No. R32210.

**THIERY D.** (1995) Modélisation 3D du Transport de masse avec le logiciel MARTHE version 5.4. Rapport BRGM No. R38149 HYT DR 95.

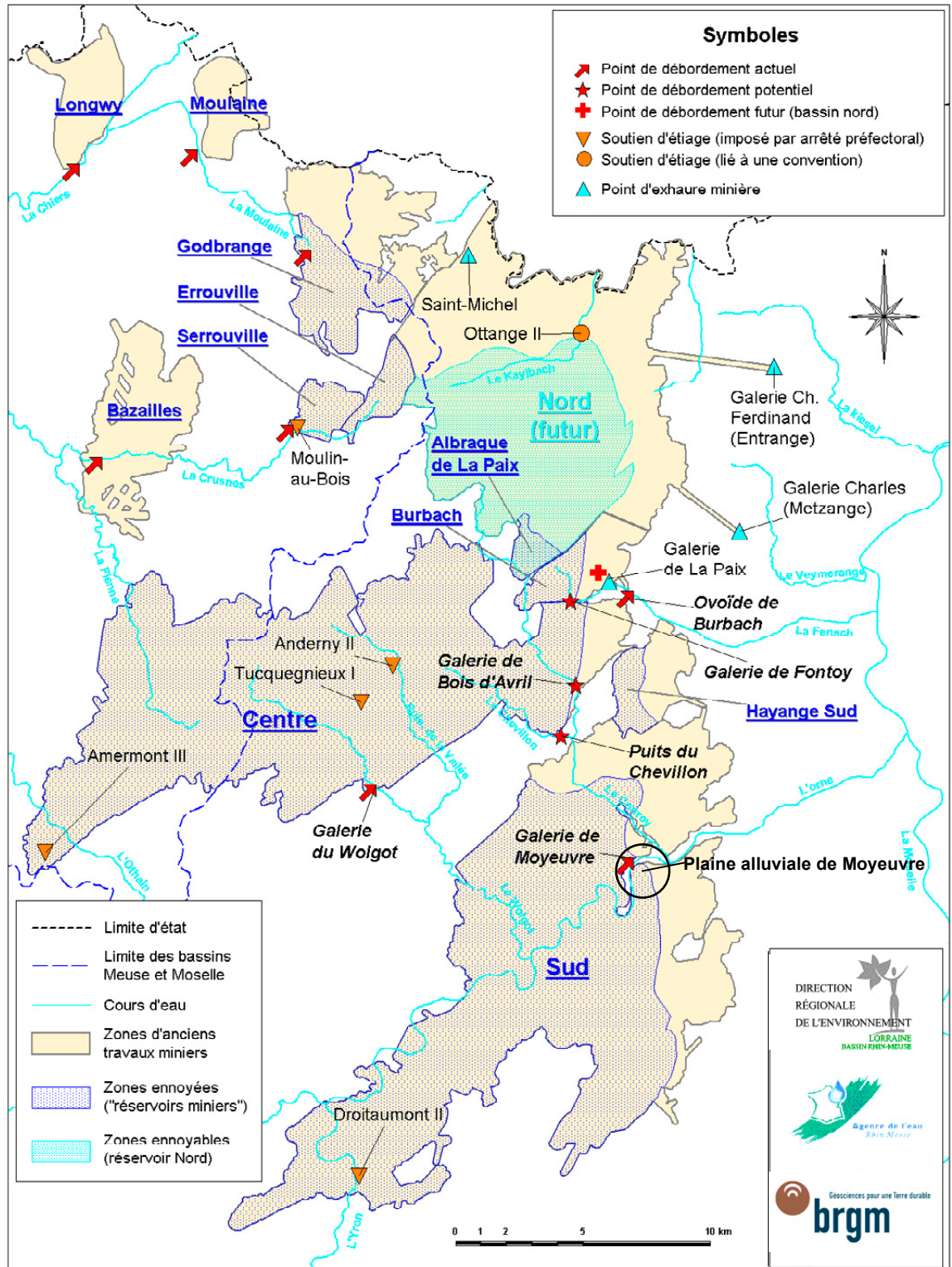
**THIERY E.** (1998) – Origine des remontées d'eau dans la ville de Moyeuve-Grande (Moselle). Rapport ANTEA n° A14877/A, 21p, 2 tab., 22 fig., 10 ann.

**THIERY E.** (1998) – Réalisation de trois piézomètres d'observation des eaux souterraines dans la ville de Moyeuve-Grande (57). Rapport ANTEA n° A14006/A, 14p, 10 tab., 3 fig., 2 ann.

**VAUTE L.** (2000) – Surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain en 1999. Rapport BRGM/RP-50215-FR, 79p., 31 fig., 4 ann.

## **Annexe 1 : Carte du Bassin Ferrifère Lorrain**

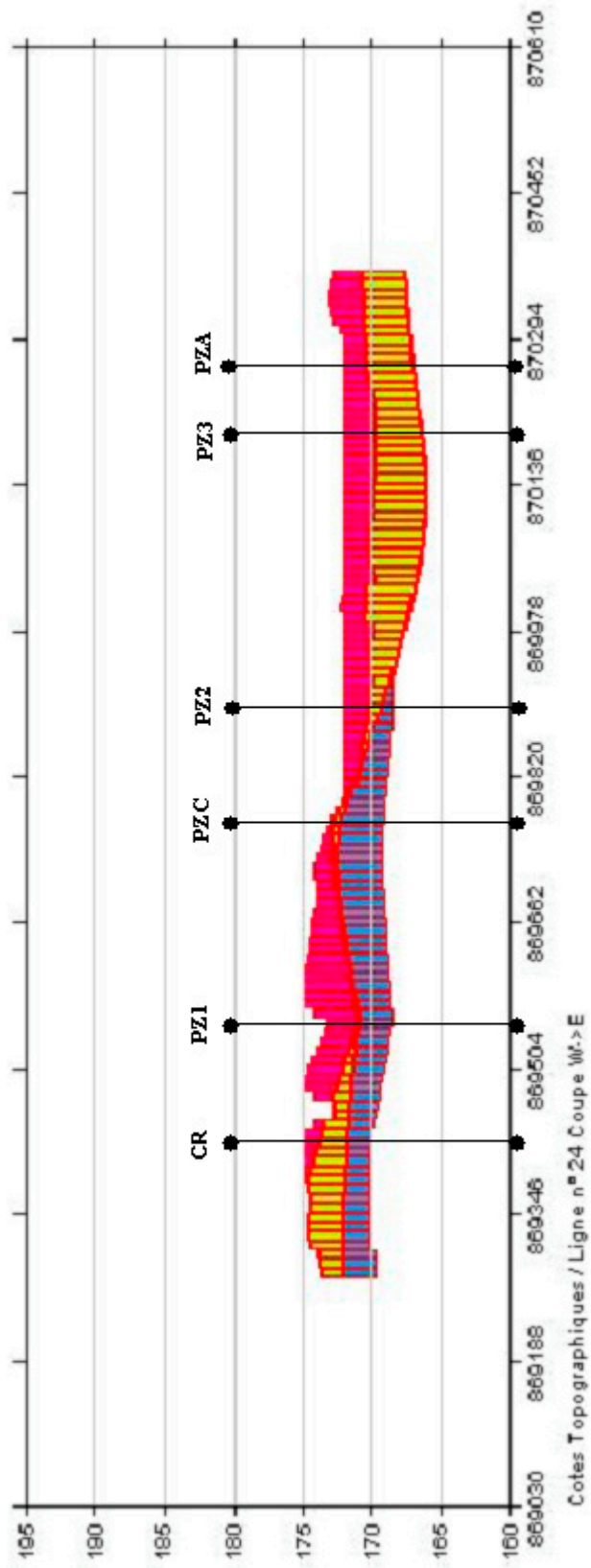






## **Annexe 2 : Coupe Ouest-Est de la plaine alluviale**







## **Annexe 3 : Photos du site à Moyeuve-Grande**





*Photo 1 : Tunnel de débordement de Moyeuvre*



*Photo 2 : Nouveau point de débordement à la sortie du chenal en fonction depuis fin 2003*



Photo 3 : Barrage de Beth

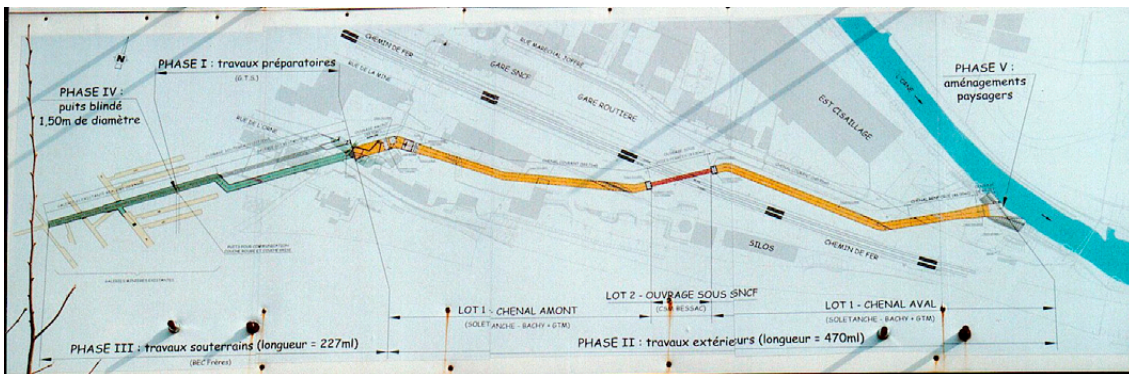


Photo 4 : Tracé du chenal



*Photo 5 : Poste de contrôle*

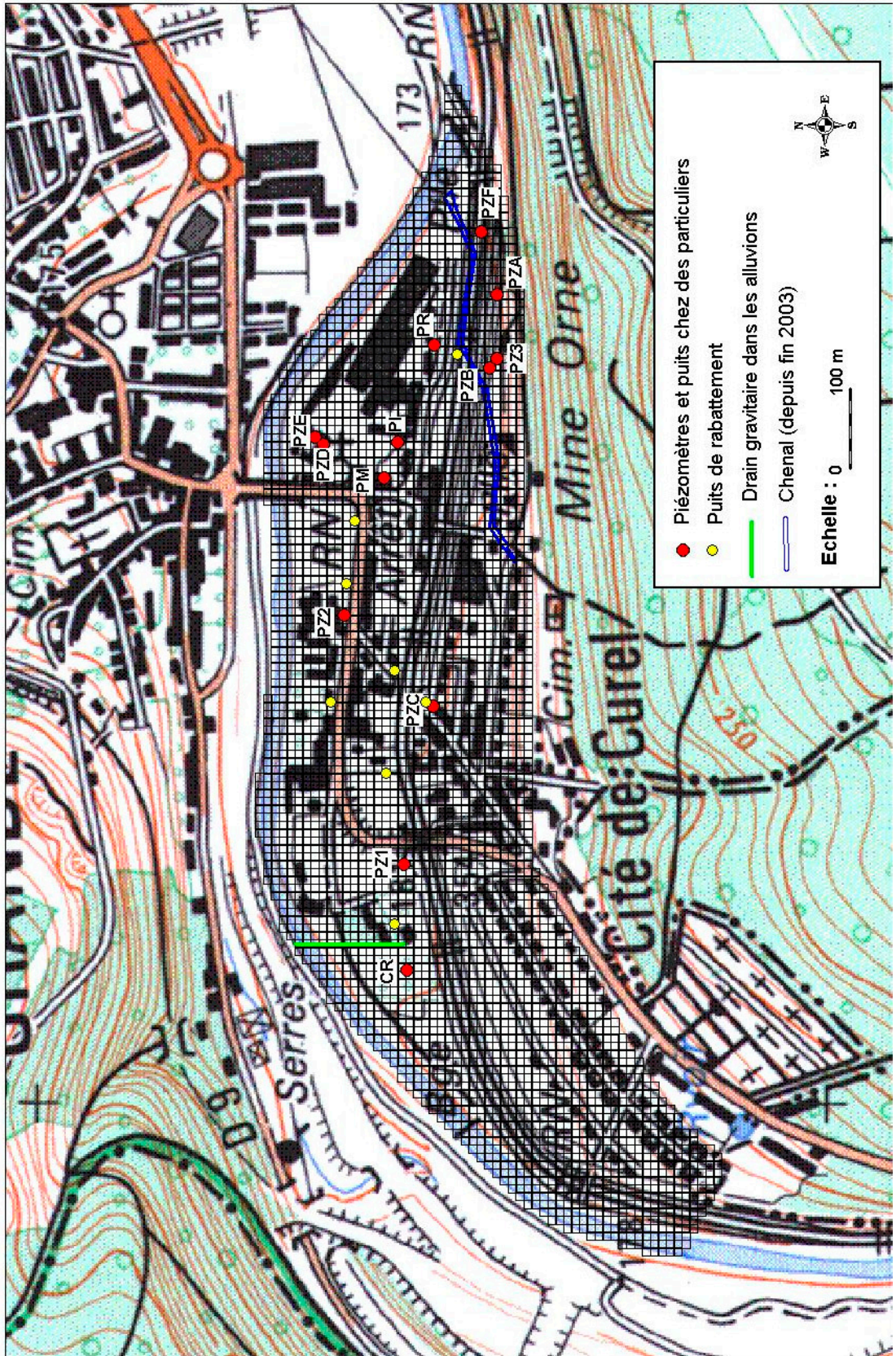


*Photo 6 : Système d'ouverture et de fermeture des vannes*



## **Annexe 4 : Carte du maillage et de localisation des piézomètres dans la plaine alluviale**







## **Annexe 5 : Suivi piézométrique à Moyeuvre-Grande en 1998**



Modélisation hydrogéologique de la plaine alluviale de l'Orne à Moyeuve-Grande (57)

	X-Lambert I	Y-Lambert I	X-Lambert II	Y-Lambert II	Z (NGF)	26/08/1998	01/09/1998	09/09/1998	17/09/1998	21/09/1998	28/09/1998
<b>Piézomètres</b>											
PZ1	869299.5	178536.5	869554.695	2478537.118	173.64	170.77	170.96	171.12	171.22	171.27	171.27
PZ2	869615	178613	869870.639	2478613.047	172.4	170.21	170.28	170.4	170.49	170.55	170.6
PZ3	869927	178429.5	870182.55	2478428.744	173.6	170.16	170.57	170.74	170.88	170.6	170.72
PZA	870020	178420	870275.616	2478419.046	175						
PZB (*)	869940	178420	870195.543	2478419.209	174						
PZC	869500	178500	869755.304	2478500.177	175						
PZD	869830	178640	870085.891	2478639.634	171						
PZE (*)	869840	178650	870095.92	2478649.622	171						
PZF	870100	178440	870355.729	2478438.901	175						
<b>Puits</b>											
CR	869166	178533	869421.066	2478533.886	172.05		170.97	171.15	171.31	171.34	171.42
PR	899966.25	178499.28	870211.978	2478498.508	171.67		169.95	170.11	170.24	170.29	170.39
PI	869833	178546.5	870088.703	2478546.042	171.67				170.41	170.43	170.54
PM	869788	178563	870043.695	2478562.649	171.23		170.15	170.28	170.38	170.41	170.49
	X-Lambert I	Y-Lambert I	X-Lambert II	Y-Lambert II	Z (NGF)	30/09/1998	02/10/1998	05/10/1998	12/10/1998	19/10/1998	22/10/1998
<b>Piézomètres</b>											
PZ1	869299.5	178536.5	869554.695	2478537.118	173.64	170.97	171	171.03	171.14	171.15	171.2
PZ2	869615	178613	869870.639	2478613.047	172.4	170.6	170.62	170.6	170.66	170.7	170.69
PZ3	869927	178429.5	870182.55	2478428.744	173.6	170.74	170.75	170.79	170.9	170.99	171.01
PZA	870020	178420	870275.616	2478419.046	175						170.82
PZB (*)	869940	178420	870195.543	2478419.209	174						171.12
PZC	869500	178500	869755.304	2478500.177	175						171.52
PZD	869830	178640	870085.891	2478639.634	171						170.24
PZE (*)	869840	178650	870095.92	2478649.622	171						170.26
PZF	870100	178440	870355.729	2478438.901	175						170.21
<b>Puits</b>											
CR	869166	178533	869421.066	2478533.886	172.05	171.08	170.45	170.5	170.51	170.54	170.55
PR	899966.25	178499.28	870211.978	2478498.508	171.67	170.42	170.43	170.47	170.58	170.66	170.69
PI	869833	178546.5	870088.703	2478546.042	171.67	170.55	170.56	170.58	170.67	170.74	170.75
PM	869788	178563	870043.695	2478562.649	171.23	170.51	170.5	170.52	170.57	170.58	170.57
	X-Lambert I	Y-Lambert I	X-Lambert II	Y-Lambert II	Z (NGF)	26/10/1998	28/10/1998	29/10/1998	01/11/1998	04/11/1998	06/11/1998
<b>Piézomètres</b>											
PZ1	869299.5	178536.5	869554.695	2478537.118	173.64	171.35	171.38	171.6	171.96	171.86	171.84
PZ2	869615	178613	869870.639	2478613.047	172.4	170.8	170.79	170.97	171.2	171.12	171.06
PZ3	869927	178429.5	870182.55	2478428.744	173.6	171.22	171.26	171.56	171.98	172.09	172.16
PZA	870020	178420	870275.616	2478419.046	175			171.44			172.01
PZB (*)	869940	178420	870195.543	2478419.209	174			171.6			172.06
PZC	869500	178500	869755.304	2478500.177	175			171.81			172.18
PZD	869830	178640	870085.891	2478639.634	171			170.66			170.9
PZE (*)	869840	178650	870095.92	2478649.622	171			170.82			170.97
PZF	870100	178440	870355.729	2478438.901	175			170.9			171.1
<b>Puits</b>											
CR	869166	178533	869421.066	2478533.886	172.05	170.62	170.64	170.98	171.74	171.01	171
PR	899966.25	178499.28	870211.978	2478498.508	171.67	170.82	171.21	171.21	171.4	171.41	171.4
PI	869833	178546.5	870088.703	2478546.042	171.67	170.9	170.94	171.15	171.38	171.34	171.31
PM	869788	178563	870043.695	2478562.649	171.23	170.58	170.58	170.58	170.58	170.58	170.58
	X-Lambert I	Y-Lambert I	X-Lambert II	Y-Lambert II	Z (NGF)	09/11/1998	13/11/1998	15/11/1998	19/11/1998	02/12/1998	
<b>Piézomètres</b>											
PZ1	869299.5	178536.5	869554.695	2478537.118	173.14	171.78	171.73	171.73	171.75	171.71	
PZ2	869615	178613	869870.639	2478613.047	171.92	171.03	171.03		170.99	170.98	
PZ3	869927	178429.5	870182.55	2478428.744	173.54	172.14	172.04		171.97	171.85	
PZA	870020	178420	870275.616	2478419.046	175		172.03		171.8	171.91	
PZB (*)	869940	178420	870195.543	2478419.209	175		171.99		171.94	171.84	
PZC	869500	178500	869755.304	2478500.177	175		172.15		172.12	172.11	
PZD	869830	178640	870085.891	2478639.634	170		170.7		170.68	170.65	
PZE (*)	869840	178650	870095.92	2478649.622	170		170.78		170.77	170.73	
PZF	870100	178440	870355.729	2478438.901	175		170.96		170.93	170.85	
<b>Puits</b>											
CR	869166	178533	869421.066	2478533.886	172.05	170.94	170.88	170.88	170.85	170.87	
PR	899966.25	178499.28	870211.978	2478498.508	171.66	171.39	171.37	171.36	171.36	171.33	
PI	869833	178546.5	870088.703	2478546.042	171.66	171.3	171.27	171.24	171.25	171.22	
PM	869788	178563	870043.695	2478562.649	171.23	170.58	170.58	170.58	170.58	170.58	

(\*) = piézomètres crépinés dans les grés



## **Annexe 6 : Suivi de la teneur en sulfate à Moyeuve-Grande en 1998**



	X-Lambert II	Y-Lambert II	28/08/98 (mg SO4/l)	10/09/98 (mg SO4/l)	22/09/98 (mg SO4/l)	01/10/98 (mg SO4/l)
<b>Piézomètres</b>						
PZ1	869554.695	2478537.118	580.48	613	1024.86	1112
PZ2	869870.639	2478613.047	131	131	131	163
PZ3	870182.55	2478428.744	1376.06	1496	1540.91	1562.41
PZA	870275.616	2478419.046				
PZB (*)	870195.543	2478419.209				
PZC	869755.304	2478500.177				
PZD	870085.891	2478639.634				
PZE (*)	870095.92	2478649.622				
PZF	870355.729	2478438.901				
<b>Puits</b>						
CR	869421.066	2478533.886		374	680	506
PR	870211.978	2478498.508		848	1118	974
PI	870088.703	2478546.042				
PM	870043.695	2478562.649				
<b>Orne</b>						
Orne amont				699	853	703
Orne aval				697	860	771
	X-Lambert II	Y-Lambert II	22/10/98 (mg SO4/l)	04/11/98 (mg SO4/l)	17/11/98 (mg SO4/l)	16/12/98 (mg SO4/l)
<b>Piézomètres</b>						
PZ1	869554.695	2478537.118	1349	1376.9	1525	1696
PZ2	869870.639	2478613.047	400	1013.9	1100	1362
PZ3	870182.55	2478428.744	1508	1586.6	1544	1707
PZA	870275.616	2478419.046	1490	1563.1	1524	1702
PZB (*)	870195.543	2478419.209	1442	1503	1463	1648
PZC	869755.304	2478500.177	975.9	1217.4	1263	1513
PZD	870085.891	2478639.634	1190.2	1309	1252	1577
PZE (*)	870095.92	2478649.622	171.3	209.5	294	465
PZF	870355.729	2478438.901	1269.4	1501.4	1430	
<b>Puits</b>						
CR	869421.066	2478533.886	1142	1425.3	1408	1642
PR	870211.978	2478498.508	1230	1410.9	1521	1777
PI	870088.703	2478546.042	592.3	1331.1		
PM	870043.695	2478562.649	1261.9	1248.4		
<b>Orne</b>						
Orne amont			242		62.4	49.8
Orne aval			314		293	180

(\*) = piézomètres crépinés dans les grès



## **Annexe 7 : Débits de l'Orne à la station hydrométrique de Rosselange**



Débits observés de l'Orne à la station hydrométrique de Rosselange (m <sup>3</sup> /s)	Orne à Rosselange  (m NGF)	Orne au barrage de Beth (ancien seuil de débordement)  (m NGF)	Orne au pont cassé (futur seuil de débordement)  (m NGF)
6.4	164.93	169.85	167.75
10.3	165.03	169.99	167.99
14.5	165.13	170.11	168.19
23.2	165.33	170.32	168.52
36.5	165.53	170.61	168.91
40	165.57	170.67	169
40.9	165.58	170.69	169.03
45.4	165.63	170.78	169.13
54.2	165.73	170.94	169.33
62.2	165.82	171.09	169.49
63.1	165.83	171.1	169.51
72	165.93	171.26	169.68
81.3	166.03	171.41	169.84
89.7	166.12	171.55	170
90.7	166.13	171.57	170.02
100	166.23	171.71	170.17
109	166.33	171.84	170.3
119	166.43	171.98	170.44
123	166.48	172.03	170.49
124	166.49	172.05	170.5
128	166.53	172.1	170.55
137	166.63	172.22	170.67
156	166.83	172.45	170.9
165	166.92	172.56	171
166	166.93	172.57	171.01
170	166.98	172.61	171.06
175	167.03	172.67	171.11
204	167.33	172.99	171.43
214	167.43	173.09	171.53
318	168.41	174.19	172.6



## **Annexe 8 : Discrétisation et équations résolues dans le code MARTHE**



Dominique THIERY 30 novembre 2003

# 1. Hydrodynamique

## Hydrodynamique : Extrait du rapport :

Thiéry, D., 1990 - MARTHE. Modélisation d'Aquifères par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Écoulements. Version 4.3. *Rapport BRGM 4S/EAU n° R32210.*

### 1.1 PRINCIPE DES CALCULS

Le calcul des charges se fait avec un schéma à volumes finis (différences finies dans les cas simples) avec une discrétisation implicite, en établissant l'équation d'équilibre des débits entre la maille de calcul (C) et les six mailles voisines (Nord, Sud, Est, Ouest, Haut et Bas).

Cette équation s'écrit globalement dans le cas général :

$$\sum_{i=1}^6 T_i \cdot [H_i - H(t)] + Q + RECH \cdot SURF = S \cdot SURF \cdot [H(t) - H(t - dt)] / dt$$

$T_i$	coefficient d'échange global ("transmissivité") entre la maille de calcul et une maille voisine i,
$H_i$	charge d'une maille voisine à la date t,
$H(t)$	charge de la maille de calcul à la date t,
$Q$	débit prélevé ou injecté,
$RECH$	flux de recharge et de surplus d'irrigation,
$SURF$	surface horizontale de la maille = $DX \cdot DY$ ,
$S$	coefficient d'emmagasinement

A la fin des calculs, la charge au centre de la maille de calcul est donc obtenue par la relation :

$$H(t) = \frac{\sum_{i=1}^6 T_i \cdot H_i + Q + \text{RECH.SURF} + \text{S.SURF} \cdot H(t-dt) / dt}{\sum_{i=1}^6 T_i + \text{S.SURF} / dt}$$

## 1.2 RESOLUTION

La résolution se fait par la méthode des gradients conjugués avec la possibilité d'utiliser un coefficient de sous-relaxation selon l'équation :

$$H_k = H_{k-1} + \text{RELAX} \cdot (H - H_{k-1})$$

<b>H</b>	charge calculée par résolution de l'équation d'équilibre,
<b>Hk - 1</b>	charge à l'itération k - 1,
<b>Hk</b>	charge affectée à l'itération k,
<b>RELAX</b>	coefficient de relaxation (1 par défaut).

Si la convergence est délicate à cause de débordements ou d'assèchements par exemple, ou présente des oscillations, il peut être nécessaire d'utiliser pour RELAX une valeur inférieure à 1 (0.7 par exemple).

Le schéma de résolution est inconditionnellement stable. Il ne dépend d'aucun pas de temps critique. L'ordre de grandeur de temps d'inertie de la nappe est  $\text{SURNAP} \cdot S/4 \cdot T$ , SURNAP étant la surface totale modélisée.

## 2. Transport de masse ou d'énergie

**Transport :**  
**Extrait du rapport :**

Thiéry, D., 1995 - Modélisation 3D du Transport de masse avec le logiciel MARTHE - Version 5.4. *Rapport BRGM n° R38149 HYT DR 95.*

### 2.1. EQUATION DU TRANSPORT RESOLUE PAR LE MODELE MARTHE

Dans le cas monodimensionnel, l'équation du transport s'écrit :

$$\frac{\partial(\theta_m \cdot C)}{\partial t} = \frac{\partial^2(D \cdot \theta_m \cdot C)}{\partial x^2} - \frac{\partial(q \cdot C)}{\partial x} - (\theta_f + KD) \cdot \frac{\partial S_v}{\partial t}$$

$\uparrow$   
 Dispersion

$\uparrow$   
 Convection

$\uparrow$   
 Echanges

avec :

- C = concentration dans l'eau mobile (kg de soluté/m<sup>3</sup> d'eau mobile)
- S<sub>v</sub> = concentration volumique dans la phase immobile (identique dans l'eau liée et dans le solide) (kg de soluté/m<sup>3</sup> d'eau liée) et (kg de soluté/m<sup>3</sup> de terrain)
- θ<sub>m</sub> = teneur en eau mobile [-]
- θ<sub>f</sub> = teneur en eau liée [-]
- KD = Coefficient de partage volumique = teneur en eau équivalente du solide [-]
- q = vitesse de Darcy [LT<sup>-1</sup>]
- D = coefficient de dispersion [L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>]

Comme les échanges sont instantanés, on a S<sub>v</sub> = C ; d'où l'équation résultante :

$$\frac{\partial[(\theta_m + \theta_f + K_D) \cdot C]}{\partial t} = \frac{\partial^2(D \cdot \theta_m \cdot C)}{\partial x^2} - \frac{\partial(q \cdot C)}{\partial x}$$

Le premier membre peut s'écrire :

$$\frac{\partial(\mathbf{R} \cdot \theta_m \cdot C)}{\partial t}$$

ou bien

$$\frac{\partial(\theta_m \cdot C)}{\partial(t / \mathbf{R})}$$

avec  $R = 1 + (\theta_f + KD)/\theta_m$

R est un coefficient de retard qui n'est pas constant si  $\theta_m$  varie au cours du temps.

## 2.2. METHODES DE CALCUL DU TRANSPORT

Dans le modèle MARTHE 5.4 il existe trois méthodes de calcul du transport :

- la méthode des différences finies ;
- la méthode des particules par « déplacements aléatoires » ou « Random Walk » notée : RW.
- la méthode des caractéristiques notée MOC (Method Of Characteristics) ou ELM (Eulerian Lagrangian Method).
- la méthode TVD (Total Variation Diminishing)

### 2.2.1. Principes des méthodes

#### Différences finies

La méthode des différences finies consiste à discrétiser l'équation du transport d'une manière un peu similaire à l'équation de l'hydrodynamique. On obtient un système d'équations (une par maille) qui est résolu par méthode itérative ou par gradients conjugués (méthode ORTHOMIN).

#### Méthode Random Walk

La méthode Random Walk (RW) consiste à déplacer un grand nombre de particules en suivant la vitesse réelle de l'écoulement en chaque point. La dispersion est modélisée par ajout d'un terme aléatoire sur la durée (ou la vitesse) de déplacement. Chaque particule représente une masse élémentaire identique. On obtient la concentration d'une maille en comptant le nombre de particules, donc la masse de soluté dans la maille, et en la divisant par le volume d'eau dans la maille (variable si la nappe n'est pas captive).

### Méthode des caractéristiques

La méthode des caractéristiques du modèle MARTHE 5.4 consiste à associer les deux méthodes précédentes : la convection et la dispersion sont modélisées successivement en deux étapes. Dans un premier temps, on génère les particules correspondant aux apports et on déplace toutes les particules, sans tenir compte de la dispersion ; on calcule les concentrations dans les mailles par comptage. Dans un deuxième temps, on calcule la dispersion pure par différences finies, sans tenir compte de la convection. On réajuste alors les nombres de particules dans les mailles du modèle.

### Méthode TVD

Cette méthode utilise un schéma explicite pour la convection, associé à un limiteur de flux.

### 2.2.2. Nombres de Péclet et de Courant généralisés

Quand on discrétise l'équation du transport en 1D en différences finies, on fait apparaître deux nombres adimensionnels :

- le nombre de Courant, noté  $C_r$ , qui est égal à la distance parcourue pendant un pas de temps, divisée par la dimension d'une maille :

$$\text{en 1D : } C_r = u \cdot dt / dx$$

- le nombre de Péclet, noté  $P_e$ , qui est égal au flux massique par convection divisé par le flux massique par dispersion :

$$\text{en 1D : } P_e = (q \cdot C) / (D \cdot \phi \cdot dC / dx)$$

soit, en divisant par  $C$  au numérateur et  $dC$  au dénominateur :

$$\text{en 1D : } P_e = u \cdot dx / d$$

ou encore, si on admet que  $D = \alpha \cdot u$  :

$$\text{en 1D : } P_e = dx / \alpha$$

en notant  $\alpha$  la dispersivité [L].

Ces nombres de Péclet et de Courant peuvent se généraliser à trois dimensions de la manière suivante :

On définit trois grandeurs la capacitance, la conductance et l'advectance :

capacitance = volume en eau équivalent d'une maille ;

conductance = débit massique s'écoulant par dispersion (conduction) ;

advectance = débit massique s'écoulant par convection (advection en anglais) ;

d'où les expressions mathématiques suivantes :

$$\text{Capacitance} : R \cdot \omega \cdot dx \cdot dy \cdot dz$$

$$\text{Conductance} : \sum_v \omega \cdot D \cdot A / dx$$

$$\text{Advectance} : \sum_a q \cdot A$$

avec:

R = coefficient de retard

$\omega$  = porosité cinématique

D = coefficient de dispersion mécanique

q = vitesse de Darcy

A = aire de la maille dans la direction perpendiculaire à l'écoulement

a = indice des mailles amont

v = indice des mailles voisines.

On peut alors définir des nombres de Peclet ( $P_e$ ) et de Courant ( $C_r$ ) équivalents par :

$$P_e = 2 \cdot \text{Advectance} / \text{Conductance}$$

$$C_r = (\text{Advectance} \cdot dt / N_a) / \text{Capacitance}$$

avec :

dt = durée du pas de temps de calcul

$N_a$  = nombre de mailles amont

On vérifie qu'en 1D on retrouve bien les expressions classiques :

$$\begin{cases} P_e = 2 \cdot (q \cdot A) / (2 \cdot \omega \cdot D \cdot A / dx) = u \cdot dx / D \\ C_r = (q \cdot A \cdot dt / 1) / (R \cdot \omega \cdot A \cdot dx) = u \cdot dt / (R \cdot dx) \end{cases}$$

En 3D, avec un coefficient D isotrope et des mailles carrées on obtient également :

$$\begin{cases} P_e = 2 \cdot (3 \cdot q \cdot A) / (6 \cdot \omega \cdot D \cdot A / dx) = u \cdot dx / D \\ C_r = (3 \cdot q \cdot A \cdot dt / 3) / (R \cdot \omega \cdot A \cdot dx) = u \cdot dt / (R \cdot dx) \end{cases}$$

En 3D, pour un écoulement mono dimensionnel, on obtient :

$$\begin{cases} P_e = 2.(q.A)/[2.\omega.q/\omega(\alpha_L + 2\alpha_T).A/dx] = dx/(\alpha_L + 2\alpha_T) \\ C_T = (q.A.dt/1)/(R.\omega.A.dx) = u.dt/(R.dx) \end{cases}$$

Dans le modèle MARTHE, on définit également le « Nombre de dispersions » noté  $N_d$  : par le rapport  $N_d = C_r/P_e$ .

En 1D on a :  $N_d = C_r/P_e = D.dt/dx^2$  ; c'est le rapport de la durée du pas de temps  $dt$  aux temps caractéristiques de la dispersion dans la maille :  $dx^2/D$ .

### 2.2.3. Avantages et inconvénients des différentes méthodes

#### a) Différences finies (DF)

Avantages : pas d'aléas statistiques ; pas de problème pour traiter les hétérogénéités ; prise en compte facile des concentrations imposées ; durées de calcul très courtes ; facilité pour un calcul de transport en régime permanent.

Inconvénients : si les gradients de concentration sont grands, on obtient de la dispersion numérique :

- si on ne respecte pas approximativement la condition suivante :  $P_e < 1$

En négligeant la diffusion moléculaire et en notant  $D = \alpha.u$  (avec  $\alpha$  = dispersivité), on obtient:  $dx < \alpha$ .

Il faut donc un maillage fin, de dimension inférieure à la dispersivité.

- en régime transitoire, si on ne respecte pas approximativement la condition :

$$C_r < 1, \text{ d'où } dt < R.dx/u$$

Il faut donc utiliser de petits pas de temps.

#### b) Méthode Random Walk (RW)

Avantages : pas de dispersion numérique (pas besoin de respecter un nombre de Péclet). Si le milieu est homogène, il est possible de violer très largement la condition de Courant ( $C_r > 1$ ) et d'utiliser de très grands pas de temps. Les calculs sont précis si on utilise beaucoup de particules.

Inconvénients : aléas statistiques ; difficulté de fixer des concentrations imposées, surtout près des limites du maillage ; calculs imprécis s'il y a de fortes hétérogénéités de vitesse, de porosité ou d'épaisseur de mailles (par exemple en écoulement cylindrique) ; difficulté de simuler des

prélèvements de masse par pompage ou par les limites (aval), sauf si on respecte la condition de Courant ; transport en régime permanent peu pratique.

### c) Méthode des caractéristiques (MOC)

Avantages : cette méthode combine les avantages des différences finies (peu d'aléas statistiques, facilité de traitement des concentrations imposées et des hétérogénéités) et les avantages des particules R.W. (quasiment pas de dispersion numérique, sans nécessité de respecter une condition sur le nombre de Péclet. Si le milieu poreux est homogène, il est possible de violer la condition de Courant et d'utiliser de grands pas de temps. Si le milieu est hétérogène, il faut respecter approximativement la condition de Courant puisque la dispersion s'effectue après la convection par particules ; pendant un sous-pas de temps de calcul, les particules ne doivent pas traverser plusieurs mailles ayant des propriétés différentes.

Inconvénients : peu d'inconvénients ; pour un même nombre de particules les temps de calcul seraient comparables au schéma RW, mais le peu d'aléas statistiques permet d'utiliser nettement moins de particules et donc d'obtenir des durées de calcul plus courtes ; le transport en régime permanent nécessite de définir une « durée » équivalente au permanent, c'est-à-dire une durée au bout de laquelle on considère que le régime est quasi-permanent.

## 2.3. SCHEMAS DE CALCULS NUMERIQUES UTILISES POUR LE TRANSPORT DANS LE MODELE MARTHE 5.4

### 2.3.1. Différences finies

Le schéma utilisé pour la discrétisation du temps est un schéma totalement implicite. La pondération spatiale est choisie de sorte que les débits entrants arrivent avec la concentration de la maille d'où ils proviennent ; les débits sortent avec la concentration de la maille courante.

Un tel schéma, parfois appelé « donor cell », est inconditionnellement stable quelles que soient les dimensions des pas de temps et d'espace. Il respecte toujours le 2<sup>e</sup> principe de la thermodynamique, c'est-à-dire que, en l'absence de terme source, la concentration d'une maille de calcul est toujours comprise entre les concentrations finales des six mailles voisines et la concentration de la maille de calcul en début de pas de temps. Le schéma de calcul de la convection et de la dispersion conduit à une matrice creuse non symétrique avec neuf diagonales en 2D et dix-neuf diagonales en

3D. La résolution du système d'équations peut se faire par une méthode de gradients conjugués pour matrices non symétriques : la méthode ORTHOMIN.

### **2.3.2. Schéma TVD**

Cette méthode TVD pour Total Variation Diminishing traite la convection suivant un schéma explicite stabilisée par un limiteur de flux, et la dispersion par différences finies. Son grand intérêt est de produire extrêmement peu de dispersion numérique.

### **2.3.3. Méthode des caractéristiques**

Cette méthode fait intervenir des particules qui portent des masses et non des concentrations comme c'est le cas dans les méthodes classiques des caractéristiques. Le déplacement des particules s'effectue en premier, en utilisant la méthode de Pollock (1988) (sans dispersion). La dispersion se fait ensuite avec le même schéma que celui utilisé par différences finies. La matrice obtenue est cependant symétrique puisque les termes de convection étaient responsables de l'asymétrie.

### **2.3.4. Particules Random Walk (pour mémoire)**

Le schéma de déplacement utilisé est un schéma continu. Le calcul des vitesses locales se fait suivant la méthode continue de Pollock (1988) par interpolation linéaire des vitesses normales aux faces de chaque maille. Le calcul de la convection, de la dispersion longitudinale et des deux dispersions transversales se fait simultanément suivant un schéma original qui permet d'utiliser de grands pas de temps de calcul en milieu relativement homogène. L'utilisation de grands pas de temps (ne respectant pas la condition de Courant) peut poser cependant des problèmes dans un certain nombre de cas.

Dans chacun des 4 schémas, les résultats obtenus sont d'autant plus précis que la discrétisation de l'espace et du temps est fine. Mais les schémas utilisés sont stables. Le schéma TVD qui nécessite un nombre de Courant égal au maximum à 1, fait intervenir des sous-pas de temps de calcul.

## **2.4. CONDITIONS AUX LIMITES DU TRANSPORT**

Les conditions aux limites pour le transport sont indépendantes des conditions aux limites pour les calculs des charges.

Il y a deux types de conditions aux limites et on peut de plus introduire des termes source dans n'importe quelle maille du modèle.

### **2.4.1. Concentration imposée**

Il est possible d'imposer la concentration dans n'importe quelle maille du modèle. L'imposition d'une concentration dans une maille revient à introduire le flux massique (qui sera calculé par le modèle) nécessaire au maintien de cette concentration compte tenu des concentrations voisines. Pour imposer la concentration dans une maille, il suffit, après avoir défini une concentration dans cette maille, de définir une « concentration extérieure » égale à la valeur code : 9999.

N.B. : Cette démarche est analogue à celle utilisée par le modèle MARTHE pour imposer une charge en fixant un « débit extérieur » égal à la valeur code : 9999.

### **2.4.2. Limite étanche en concentration**

Une telle condition à la limite correspond à une limite à travers laquelle il ne peut y avoir aucun échange de masse. Par exemple, en bordure d'un aquifère limité par un milieu imperméable ou sur les parois latérales d'un lysimètre. Une telle limite est automatique dans le modèle MARTHE (c'est la limite par défaut).

## **2.5. TERMES SOURCE**

### **2.5.1. Flux massique**

En toute maille du modèle il est possible d'imposer un flux massique : variable QMASC.

Ce flux massique est une masse par unité de temps et par unité de surface de maille ( $M.T^{-1}.L^{-2}$ ). Il est exprimé en unité utilisateur de masse par unité utilisateur de temps et par mètre carré de surface de maille perpendiculaire à la pesanteur. Ce flux massique peut être imposé au choix :

- par semis ;
- par couche ;
- par zone géométrique ;
- par zone d'infiltration ;

- par zone d'irrigation ;
- par maille.

### **Remarque 1**

Il n'est pas possible d'imposer un flux massique sur une maille dont on a imposé la concentration (ce serait une contradiction).

### **Remarque 2**

En différences finies, il est possible d'appliquer un flux massique négatif qui correspondrait par exemple à une dégradation de soluté à taux constant ou bien à un pompage de calories. Dans la version 5.4, ceci n'est pas possible directement dans les schémas à particules (RW et MOC).

## **2.5.2. Injection instantanée de masse (Dirac)**

En toute maille du modèle, il est possible d'imposer un apport instantané de masse (sous forme d'un Dirac) : variable MCONC. Cette injection de masse est définie sous forme d'une masse par unité de surface de maille ( $M.L^2$ ). Elle est exprimée en unité utilisateur de masse par mètre carré de surface de maille perpendiculaire à la pesanteur. Cette injection de masse peut se faire par semis, par zone, par couche ou par maille.

Comme pour les flux massiques, il n'est pas possible d'imposer une injection instantanée de masse dans une maille à concentration imposée ; en différences finies l'injection de masse peut être négative, alors qu'elle doit être positive dans les schémas à particules.

Dans les schémas de transport à particules (RW ou MOC) une injection instantanée de masse correspond à l'ajout instantané, en début de pas de temps, du nombre de particules correspondant à la masse injectée. Ceci est indépendant de la durée du pas de temps. Dans le schéma à différences finies, une injection instantanée correspond à un débit massique réparti sur la durée du pas de calcul.

## **2.5.3. Concentration extérieure**

En toute maille du domaine on peut définir la concentration du fluide extérieur, appelée « concentration extérieure ». C'est la concentration à laquelle se trouve l'eau qui rentre dans le modèle (concentration zéro par défaut). Cette eau peut rentrer :

- par un débit injecté (dans un forage par exemple) ;

- par importation du débit dans une maille à charge imposée (maille à potentiel hydrodynamique imposé).

Si une maille ne reçoit aucun débit fluide de l'extérieur, ou bien si elle est soumise à un débit sortant (pompage, exportation par une limite), le débit extérieur n'est pas utilisé. Il convient de remarquer qu'un débit extérieur entrant à une concentration extérieure fixée ne correspond pas à une concentration imposée dans la maille (sauf en régime permanent et en l'absence de dispersion).

L'intérêt de ce type de terme source est d'être physique et d'éviter d'imposer une concentration ou un flux massique si on ne sait pas *a priori* si les débits échangés avec l'extérieur seront entrants ou sortants. Le sens des débits d'échange n'est en effet pas toujours évident, par exemple en zone non saturée ou bien à proximité de la mer ou encore en régime hydrodynamique transitoire.

#### **2.5.4. Concentration de l'infiltration**

C'est la concentration de l'infiltration (ou de la recharge) dans les zones où elle est positive. Cette concentration ne s'applique qu'à l'infiltration. Elle ne s'applique pas à l'excès d'irrigation. En cas de besoin, il faudrait donc définir l'excès d'irrigation comme une recharge. La concentration de l'infiltration peut être définie uniquement par zone d'infiltration.

##### **Remarque 1**

Il est possible de définir simultanément dans une même maille :

- un flux massique ;
- une injection instantanée de masse ;
- une concentration du fluide extérieure ;
- une concentration de l'infiltration.

##### **Remarque 2**

Soit SURF la surface de la maille et dt la durée du pas de temps, QI le débit injecté dans une maille, INF l'infiltration. On a les équivalences suivantes (sans tenir compte des unités) :

$$Q_{MASC} \cdot SURF = QI \cdot CONEX$$

$$QI \cdot CONEX = INF \cdot SURF \cdot CONPL$$

$$Q_{MASC} \cdot DT = MCONC$$

Autres Références bibliographiques :

Thiéry, D., 1993 - Modélisation des aquifères complexes - Prise en compte de la zone non saturée et de la salinité. Calcul des intervalles de confiance. *Revue Hydrogéologie*, 1993, n° 4 pp. 325-336.

Thiéry, D., 1994 - Modélisation 3D des écoulements en Zone Non Saturée avec le logiciel MARTHE - Version 5.4. *Rapport BRGM n° R38108 HYT DR 94*.



## **Annexe 9 : Données relatives aux sondages dans la plaine alluviale**



Sondage	Substratum	X-Lambert II (m)	Y-Lambert II (m)	Z (m NGF)
PZA	Remblais	870275.616	2478419.046	172.3
PZB	Remblais	870195.543	2478419.209	171.7
PZC	Remblais	869755.304	2478500.177	173.9
PZD	Remblais	870085.891	2478639.634	170
PZE	Remblais	870095.92	2478649.622	168.5
PZF	Remblais	870355.729	2478438.901	171.8
PZ1	Remblais	869554.695	2478537.118	171.44
PZ2	Remblais	869870.639	2478613.047	170.2
PZ3	Remblais	870182.55	2478428.744	171
PZA	Argile	870275.616	2478419.046	169
PZB	Argile	870195.543	2478419.209	169.2
PZC	Argile	869755.304	2478500.177	173.5
PZD	Argile	870085.891	2478639.634	165
PZE	Argile	870095.92	2478649.622	165
PZF	Argile	870355.729	2478438.901	169
PZ1	Argile	869554.695	2478537.118	171.04
PZ2	Argile	869870.639	2478613.047	168.8
PZ3	Argile	870182.55	2478428.744	167.7
PZA	Graviers	870275.616	2478419.046	169
PZB	Alluvions	870195.543	2478419.209	167.8
PZC	Graviers	869755.304	2478500.177	169.6
PZD	Graviers	870085.891	2478639.634	165
PZE	Graviers	870095.92	2478649.622	165
PZF	Graviers	870355.729	2478438.901	169
PZ1	Graviers	869554.695	2478537.118	168.84
PZ2	Alluvions	869870.639	2478613.047	168.2
PZ3	Graviers	870182.55	2478428.744	167.2
NB : cote identique = couche inexistante				



## **Annexe 10 : Documentation sur le couplage Nappe-rivière et Nappe-drain dans MARTHE**



Version Février 2004

Dominique THIERY  
BRGM Service EAU / M2H

## 1 Réseau Hydrographique

### 1.1 Organisation du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est organisé en affluents eux même découpés en tronçons.

Un affluent est un ensemble linéaire de tronçons (sans confluences).

Chaque affluent peut avoir jusqu'à 3 affluents amonts et se jette dans 1 affluent aval au maximum.

Si un affluent n'a pas d'affluent aval, son extrémité aval est un exutoire.

Si un affluent n'a pas d'affluent amont, son extrémité amont est une source.

Il peut y avoir autant d'exutoires et autant de sources qu'on le souhaite.

Chaque maille du modèle peut contenir au maximum un tronçon du réseau hydrographique.

Le modèle hydrodynamique peut être monocouche ou multicouche.

Dans le plan, les tronçons ou affluents voisins peuvent se situer dans les 8 directions voisines (N, S, E, O, NE, NO, SE, SO) donc incluant les obliques. Les voisins peuvent être dans les couches voisines à condition d'être sur la couche affleurante.

Les voisins possibles dans des différentes couches sont donc dans les directions suivantes : H, HN, HS, HE, HO pour le haut et B, BN, BS, BE, BO pour le bas. (N Nord ; S = Sud ; E = Est ; O = Ouest ; H = Haut ; B = Bas). Il y a donc au total 18 directions possibles.

### 1.2 Numérotation des éléments du réseau hydrographique

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

### 1.3 Données nécessaires : dans chaque maille

- Longueur du tronçon de cours d'eau (unité de longueur du modèle)
- Largeur du tronçon de cours d'eau (unité de longueur du modèle)
- Cote (absolue) du fond de la rivière (fond de l'eau) (unité de charge)
- Epaisseur du lit de la rivière (en dessous du fond de l'eau) (unité de charge)
- Perméabilité du lit de la rivière (unité de perméabilité)
- Cote (absolue) de l'eau dans la rivière (unité de charge)
- Débit injecté (ou pompé) dans la rivière (unité de débit ; >0 si injecté)
- Débit amont (sources) dans la rivière (dans les tronçons sources)

Si les calculs sont en régime transitoire :

- Débit (écoulement) initial dans la Rivière
- Si on connaît une relation Hauteur-Débit Manning :
- Rugosité du lit de la rivière (adimensionnel ; de l'ordre de 0.02)
  - Pente du lit de la rivière (adimensionnel ; de l'ordre de 1/100 à 1/1000)

#### 1.4 Données nécessaires : une seule fois :

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

#### 1.5 Affectation ou modification des données :

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

#### 1.6 Options de calcul

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

#### 1.7 Initialisation

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

#### 1.8 Schémas numériques pour la résolution

Il faut définir les paramètres suivants :

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

Si on a une relation Hauteur + Routing :

- Schéma de résolution : résolution en débit ou résolution en

hauteur

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

#### 1.9 Résultats du calcul

1.9.1 Historiques dans des mailles sélectionnées

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

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

#### 1.9.2 Semis

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

## 2.0 Couplage avec le calcul Hydrodynamique de la nappe

Les calculs des débits des cours d'eau sont réalisés à chaque pas de temps. Par contre, il est possible, dans un but d'efficacité en temps de calcul, de ne pas réactualiser les calculs hydrodynamiques de l'aquifère à chaque pas de temps.

Pendant les pas de temps intermédiaires, sans calculs hydrodynamiques de nappe, on considère que les niveaux de nappe ne changent pas et que les éventuels débits de débordement de la nappe vers les rivières restent constants. Si les niveaux des rivières ne changent pas les échanges nappe-rivière sont eux aussi constants. La somme de ces échanges sera donc appliquée à la nappe lors du prochain pas de calcul hydrodynamique (qui aura une durée égale au temps écoulé depuis le dernier calcul hydrodynamique).

Pour cela il y a 2 possibilités :

Calculs hydrodynamiques périodiques. On définit dans le fichier des paramètres généraux une périodicité à laquelle sont réalisés les calculs hydrodynamiques de nappe :

```
*** Controle de la Resolution Hydrodynamique ***
5=PERIODICITE DES CALCULS HYDRODYNAMIQUES [Def=Tous les pas]
```

Dans cet exemple les calculs de nappe seront réalisés tous les 5 pas de temps. Pendant les 4 pas de temps intermédiaires on considère que les niveaux de nappe ne changent pas. La somme des échanges sera appliquée à la nappe lors du 5<sup>ème</sup> pas d'une durée égale à la durée totale.

Calculs hydrodynamiques à certaines dates choisies.

Avec cette deuxième possibilité, les calculs hydrodynamiques sont activés, à certaines dates dans le fichier des pas de temps par l'objet "HDYNA/ACTIO" :

```
ACTIO :      1 = Active les calculs d'hydrodynamique à partir de cette date
            -1 = Désactive les calculs hydrodynamiques
            2 = Active les calculs hydrodynamiques uniquement pour la date
courante (puis désactivation automatique)
```

```
*** Le pas : 3: se termine a la date :      45; ***
/HDYNA/ACTIO I= 1
/INFIL/ZONEP Z= 1V= 7;
/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 4: se termine a la date :      60; ***
/INFIL/ZONEP Z= 1V= 12;
/***** Fin de ce pas
```

```

*** Le pas : 5: se termine a la date : 75; ***
/HDYNA/ACTIO I= -1
/INFIL/ZONEP Z= 1V= 15;
/*****/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 6: se termine a la date : 90; ***
/HDYNA/ACTIO I= 2
/INFIL/ZONEP Z= 1V= 16;
/*****/***** Fin de ce pas
*** Le pas : 7: se termine a la date : 105; ***
/INFIL/ZONEP Z= 1V= 18;
/*****/***** Fin de ce pas
    
```

Dans l'exemple ci-dessus, l'hydrodynamique est activée au pas de temps n°3, se poursuit au pas de temps 4. L'hydrodynamique est désactivée au pas de temps n°5 (HYDNA = -1). Puis l'hydrodynamique est activée au pas n°6 (HYDNA = 2) pour un pas uniquement. Au total les calculs hydrodynamiques de la nappe sont réalisés aux pas de temps 3, 4 et 6. Il n'y en a pas aux pas n°5 et n°7

## 2 Réseau de Drains ou de "Conduits"

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

Possibilité aussi, dans le cas d'un réseau hiérarchisé, d'avoir un réseau de drains qui sont des "conduits" qui peuvent se mettre en charge (comme des conduits karstiques). Le débit interne dans un tronçon de "conduits" ne dépend pas de relations amont-aval, comme dans le cas de drains classiques, mais de la différence de charge entre les tronçons voisins. A la différence d'un réseau de drains classiques, un réseau de conduits présente les fonctionnalités suivantes :

Prise en compte de la hauteur d'eau dans le drain

Possibilité de mises en charge

Possibilité de dénoyages

Prise en compte du stockage dans les drains.

Possibilité de prélèvements ou injections dans les drains.

Possibilité d'imposer la charge localement dans le drain.

### 2.1 Organisation du réseau de drains

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

Comme pour les rivières, dans le plan, les tronçons ou affluents voisins peuvent se situer dans les 8 directions voisines (N , S , E , O , NE , NO , SE , SO) donc incluant les obliques. Les voisins peuvent être dans les couches voisines dans les directions suivantes : H , HN , HS , HE , HO pour le haut et B , BN , BS , BE , BO pour le bas. (Donc au total il y a 18 directions possibles). Un "conduit" peut bien évidemment être situé dans une couche qui n'affleure pas (conduit karstique par exemple).

## 2.2 Numérotation des éléments de drain

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

## 2.3 Données nécessaires : dans chaque maille contenant un drain

### *Drain classique :*

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

$Q_{\text{échang}} = \text{Coef\_Perm} * \text{Long\_dra} * (H_{\text{nappe}} - H_{\text{drain}})$  [si  $H_{\text{nappe}} > H_{\text{drain}}$ ]

### *Drain "Conduit" :*

- Longueur du tronçon de drain (unité de longueur du modèle)
- Largeur du tronçon de drain (section rectangulaire équiv.) (en unité de longueur)
- Hauteur (verticale) du tronçon de drain (section rectangulaire équiv.) (unité de charge et d'altitude). Par défaut cette Hauteur verticale est égale à la largeur.
- Altitude du fond du drain (unité de charge et d'altitude)
- Coefficient de Perméabilité du drain (sans dimension) : c'est un facteur multiplicatif sur la perméabilité nappe pour calculer le débit d'échange nappe\_drain :  
 $Q_{\text{échang}} = \text{Coef\_Perm} * \text{Perm\_nap} * \text{Satur\_dra} * \text{Long\_dra} * (H_{\text{nappe}} - H_{\text{drain}})$
- Cote initiale de l'eau (charge initiale) dans le drain
- Conductivité (perméabilité) du drain pour l'écoulement dans le drain (unité de perméabilité).
- Débit\_dans\_drain = Section \* Conductiv \* Diff\_Charge\_drain\_vois / Long  
 $\Rightarrow 1/\text{Conductiv.} = \text{Diff\_Charge} / (\text{Longueur} * \text{Vitesse})$
- Débit extérieur injecté ou prélevé dans le drain.

## 2.4 Données nécessaires : une seule fois :

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

## 2.5 Affectation ou modification des données :

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

## 2.6 Options de calcul

On peut choisir entre :

Un réseau de drains hiérarchisés en tronçons et affluents.

Ou un ensemble de drains non hiérarchisés.

Ou un réseau de conduits (débit interne fonction des différences de charges dans le drain). Un réseau de conduits doit (a priori) être hiérarchisé.

## 2.7 Initialisation

*Drain classique :* Pas d'initialisation.

*Drain "Conduit"* : Charges initiales dans les tronçons de drain

## 2.8 Conditions aux limites

**Drain classique** : Pas de conditions aux limites.

**Drain "Conduit"** : Imposition de charges possible (par exemple en un exutoire, ou bien à l'amont) en fixant classiquement un débit\_extérieur\_drain égal à la valeur code 9999.

## 2.9 Schémas numériques pour la résolution

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

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

## 2.10. Résultats du calcul

### 2.10.1 Historiques dans des mailles sélectionnées

- Débit dans les drains
- Débit échangé avec la nappe ( >0 si alimente la nappe)
- *Drain "Conduit"* : Egalement charges dans les tronçons de drain

### 2.10.2 Semis

- Débit dans les drains
- Débit échangé avec la nappe ( >0 si alimente la nappe)
- *Drain "Conduit"* : Egalement charges dans les tronçons de drain

## 2.11. Schémas d'échange Drain-Nappe ou Conduit\_Nappe

**Drain classique** :

Un drain classique ne peut que drainer une nappe ; il ne peut pas l'alimenter. Si la charge de la nappe est inférieure à l'altitude du drain, il n'y a pas de débit échangé. Un tronçon de drain n'a pas de capacité (comme un tuyau de drainage) : il n'y a pas de hauteur d'eau dans le drain mais seulement une altitude. Le débit échangé  $Q_{\text{échang}}$  - de la nappe vers le drain - est calculé comme suit :

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

**Drain "Conduit"** :

Un drain "conduit" peut drainer ou alimenter une nappe. Il peut même s'assécher et avoir une "charge équivalente" inférieure à son altitude. Un tronçon de conduit est caractérisé par une charge qui peut varier en régime transitoire, par un débit circulant dans le drain et par un débit d'échange positif ou négatif avec la nappe. Il a une capacité égale à son volume (égal à largeur\*hauteur\*longueur puisqu'on le suppose rectangulaire pour simplifier). Le débit échangé  $Q_{\text{échang}}$  est calculé comme suit :

$$Q_{\text{échang}} = \text{Coef\_K\_drain} \cdot K_{\text{nappe}} \cdot \text{'Satur\_drain'} \cdot L \cdot (H_{\text{nappe}} - H_{\text{drain}})$$

Coef\_K\_drain = coefficient *sans dimension* fourni par l'utilisateur qui dépend de l'état du conduit (Coef\_K\_drain = 0 => pas d'échanges sur une portion non perforée)

Satur\_drain = fonction du périmètre mouillé calculée automatiquement par le code

## 2.12. Débit dans un tronçon de drain

### **Drain classique :**

Le débit dans un tronçon d'un réseau hiérarchisé de drains classiques est égal au débit du ou des tronçons amonts auquel s'ajoute l'éventuel débit d'échange provenant de la nappe.

### **Drain "Conduit" :**

Le débit à l'intérieur d'un tronçon de drain\_conduit dépend des différences de charge avec les 1 à 4 tronçons voisins (3 "amonts" max. et 1 aval max.), et de la charge en début de pas de temps. En fait la relation amont aval n'a aucune importance et sert uniquement à définir les branchements entre les tronçons (dans le futur on pourrait même considérer un réseau maillé et non pas palmé) : le débit échangé entre 2 tronçons adjacents dépend linéairement de la différence de charge entre ces 2 tronçons (débit laminaire ...) :

$$Q_{1\_2} = \text{Section} \cdot \text{Conductiv} \cdot (H1 - H2) / \text{Long}$$

La conductivité est directement liée à la perte de charge linéaire du conduit. En effet :

$$(H1 - H2) = \text{PdC\_U} \cdot \text{Long} \cdot \text{Vitesse}$$

$$\text{avec PdC\_U} = \text{Perte de Charge Unitaire [1/ (m/s)]}$$

$$\Rightarrow \text{d'où Conductiv} = 1 / \text{PdC\_U}$$