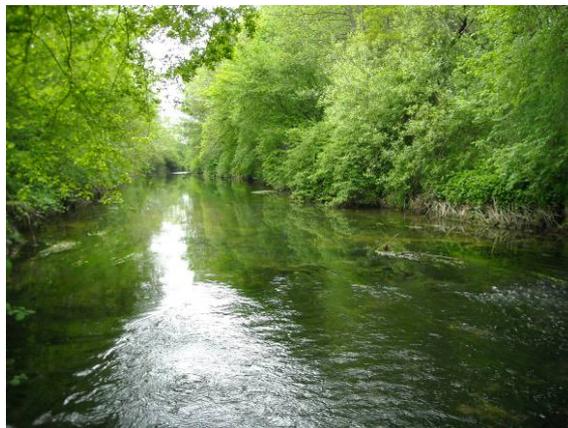


## SYNDICAT DU BASSIN DE LA VOUGE

# ETUDE DES VOLUMES PRELEVABLES ET IDENTIFICATION DES RESSOURCES STRATEGIQUES SUR LA NAPPE DE DIJON SUD

## *Phase 3 : Impact des prélèvements et quantification des ressources existantes (Nappe Dijon Sud)*



*Rapport définitif  
Décembre 2011*



Projet cofinancé par l'Union Européenne.  
L'Europe s'engage avec le Fonds européen de développement régional.





# ÉTUDE DES VOLUMES PRELEVABLES DE LA NAPPE DE DIJON SUD - PHASE 3

<b>PREAMBULE.....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>3</b>
1.1 Contexte de la mission	3
1.2 Contenu du rapport	4
<b>2. STRATEGIE DE MODELISATION.....</b>	<b>5</b>
2.1 Principales orientations	5
2.1.1 Périmètre du modèle	5
2.1.2 Dimensions du maillage	8
2.1.3 Nature et position des conditions aux limites	8
2.2 Apports de la carte piézométrie 2010	10
2.2.1 Principes	10
2.2.2 Résultats	11
2.2.3 Implications pour la stratégie de modélisation	11
<b>3. MODELISATION EN REGIME PERMANENT .....</b>	<b>15</b>
3.1 Données de référence	15
3.1.1 Flux entrants	15
3.1.2 Flux sortants	16
3.1.3 Synthèse	21
3.2 Construction du modèle	22
3.2.1 Maillage	22
3.2.2 Reproduction du modèle hydrogéologique conceptuel	22
3.2.3 Introduction des conditions aux limites	25
3.3 Calage en régime permanent	26
3.3.1 Corrections $\alpha$	26
3.3.2 Analyse de sensibilité	32
3.3.3 Calage	38
3.3.4 Piézométrie non influencée	41
<b>4. MODELISATION EN REGIME TRANSITOIRE.....</b>	<b>45</b>
4.1 Données de référence	45
4.1.1 Infiltrations efficaces sur l'impluvium Dijon Sud	45
4.1.2 Infiltrations efficaces sur l'impluvium de l'aquifère karstique	46
4.1.3 Prélèvements AEP	47
4.1.4 Prélèvements agricoles	49
4.1.5 Prélèvements industriels	50
4.1.6 Débits de la zone de résurgence de la Cent Fonts	51

<b>4.2 Calage en régime transitoire</b>	<b>56</b>
4.2.1 Période de calage	56
4.2.2 Indicateurs de calage	56
4.2.3 Modifications de la structure du modèle	57
4.2.4 Stratégie de calage	59
4.2.5 Résultats	60
<b>4.3 Validation en régime transitoire</b>	<b>63</b>
4.3.1 Période de validation	63
4.3.2 Indicateurs de validation	63
4.3.3 Résultats	63
<b>4.4 Exploitation du modèle</b>	<b>65</b>
4.4.1 Comparaison avec la piézométrie de référence	65
4.4.2 Bilan	67
4.4.3 Piézométrie non influencée	70
<b>5. REFERENCES DOCUMENTAIRES .....</b>	<b>73</b>

## TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Localisation de la nappe de Dijon Sud.....	3
Figure 2 : Domaine modélisé .....	6
Figure 3 : Piézométrie normalisée en regard des volumes pompés.....	7
Figure 4 : Zones supposées des venues sous-alluviales. ....	9
Figure 5 : Influence des pompages à la rente Logerot sur la piézométrie de la nappe profonde (ANTEA, 2010). ....	10
Figure 6 : Carte piézométrique de la nappe superficielle (ANTEA, 2010). ....	12
Figure 7 : Carte piézométrique de la nappe profonde (ANTEA, 2010). ....	13
Figure 8 : Suivi piézométrique de la nappe superficielle de Dijon Sud. ....	17
Figure 9 : Valeurs des débits enregistrées sur la Cent Fonts. ....	18
Figure 10 : Relation provisoire entre les débits de la Cent Fonts et ceux de la rivière à Saulon la Rue (d'après SMAESAD, 1987) .....	19
Figure 11 : Débit fictif de ruissellement à Saulon et pluies efficaces mensuelles.....	20
Figure 12 : Exemple de coupe E-W du modèle numérique (niveau de Chenôve).....	23
Figure 13 : Exemple de vue plan du modèle numérique (entre 220 et 230 m NGF). ....	24
Figure 14 : Distribution du champ de pression $\alpha$ (entre 220 et 230 m NGF). ....	26
Figure 15 : Distribution du champ de pression $\beta$ (entre 220 et 230 m NGF). ....	28
Figure 16 : Schéma simplifié du fonctionnement d'un modèle. ....	33
Figure 17 : Sensibilité du débit de la zone de résurgence de la Cent Fonts aux paramètres numériques testés. ....	36
Figure 18 : Sensibilité de la piézométrie de la nappe superficielle aux paramètres numériques testés. ....	36
Figure 19 : Sensibilité de la piézométrie de la nappe profonde aux paramètres numériques testés. ....	37
Figure 20 : Distribution du champ de pression en régime permanent (entre 220 et 230 m NGF).....	40
Figure 21 : Distribution du champ de pression non influencé par les pompages avec $K=10^{-3}$ m/s (entre 220 et 230 m NGF). ....	43
Figure 22 : Infiltration efficace sur l'impluvium de la nappe Dijon Sud.....	45
Figure 23 : Infiltration efficace sur l'impluvium karstique ( $C_i=70\%$ ) .....	46
Figure 24 : Prélèvements mensuels cumulés AEP .....	48
Figure 25 : Prélèvements mensuels par point de captage AEP .....	48
Figure 26 : Relation entre précipitation efficace et volume ruisselé à Saulon. ....	53
Figure 27 : Débits ruisselés estimés et débits ruisselés reconstitués au droit de la station hydrométrique de Saulon. ....	54
Figure 28 : Débits souterrains estimés et débits souterrains reconstitués au droit de la station hydrométrique de Saulon. ....	55
Figure 29 : Courbe tendancielle des débits supposés de la zone de résurgence de la Cent Fonts.....	56
Figure 30 : Distribution horizontale des perméabilités. ....	58
Figure 31 : Rapport entre pluies efficaces mensuelles mesurées à la station de Détain et pluies efficaces mensuelles mesurées à la station de Dijon Longvic.....	59
Figure 32 : Calage des chroniques piézométriques (1987-1998).....	60
Figure 33 : Calage des chroniques de débit (1987-1998).....	61
Figure 34 : Validation des chroniques piézométriques (1998-2008).....	64
Figure 35 : Validation des chroniques de débit (1998-2008) .....	64
Figure 36 : Comparaison piézométrie simulée (septembre 2008) et piézométrie observée lors de la campagne réalisée par ANTEA (septembre 2010) .....	66
Figure 37 : Chronique de l'infiltration efficace mensuelle simulée (1987-2008) .....	67
Figure 38 : Chronique des débits en provenance des aquifères bordiers : karst et appareil alluvial de l'Ouche (1987-2008).....	68
Figure 39 : Chronique des débits simulés cumulés pour les venues sous alluviales liées au fonctionnement du karst bordier (1987-2008).....	69
Figure 40 : Chronique des pompages d'origine anthropique (1987-2008) .....	70

Figure 41 : Chronique des débits à la zone de résurgence de la Cent Fonts en régime non influencé (1987-2008)..... 71  
Figure 42 : Chroniques piézométriques en régime non influencé (1987-2008) ..... 72

## PREAMBULE

Le syndicat du bassin versant de la Vouge a confié à BRL *Ingénierie* l'étude de détermination des volumes prélevables sur le bassin versant de la Vouge et dans la nappe de Dijon Sud.

Ces études ont plusieurs enjeux :

- ▶ Un enjeu environnemental : La garantie du bon état des cours d'eau du bassin versant en application de la Directive Cadre sur l'Eau.

Pratiquement l'étude doit en effet déterminer, en différents points du bassin, les débits minimums au-dessus desquels il est nécessaire de rester pour garantir le bon état des écosystèmes aquatiques :

- Quels débits minimums sont nécessaires pour garantir le bon état écologique des cours d'eau du bassin de la Vouge ?

La connaissance de ces limites permet d'aborder également le degré de pression des prélèvements actuels. Ce sujet recouvre plusieurs questions :

- La ressource en eau disponible permet-elle de satisfaire les besoins en eau dans le bassin tout en garantissant le respect des débits minimums ?
- S'il y a des déficits, à quoi sont-ils liés ? Au fait qu'il y a trop de surfaces irriguées ? Au fait que les techniques et les modes de gestion employés conduisent à consommer trop d'eau et/ou à court-circuiter des tronçons de cours d'eau ?

Au final, il s'agira de dresser les limites de prélèvements acceptables dans les différents hydro systèmes, et pour les différentes périodes de l'année, au regard des contraintes environnementales qui auront été décidées.

- ▶ Un enjeu pour l'alimentation en eau potable actuelle et future : avec l'identification de ressources stratégiques au niveau de la nappe de Dijon Sud.

Les deux études sont chacune divisée comme suit :

- ▶ Phase 1 : Caractérisation des sous bassins et aquifères et recueil de données complémentaires
- ▶ Phase 2 : Bilan des prélèvements existants, analyse de l'évolution
- ▶ Phase 3 : Impact des prélèvements et quantification des ressources existantes
- ▶ Phase 3 bis (seulement pour la partie Dijon Sud) : Identification et Caractérisation des ressources à préserver pour l'AEP
- ▶ Phase 4 : Détermination des débits minimums biologiques et des objectifs de niveau de nappe
- ▶ Phase 5 : Détermination des volumes prélevables et des Débits d'Objectif d'étiage
- ▶ Phase 6 : Proposition de répartition des volumes entre les usages et proposition de périmètre d'organisme unique

Le présent rapport présente la phase 3 de l'étude des volumes prélevables de la nappe de Dijon Sud.

Son rédacteur principal est l'expert hydrogéologue Pascal Fénart de la société HYDROFIS.



# 1. INTRODUCTION

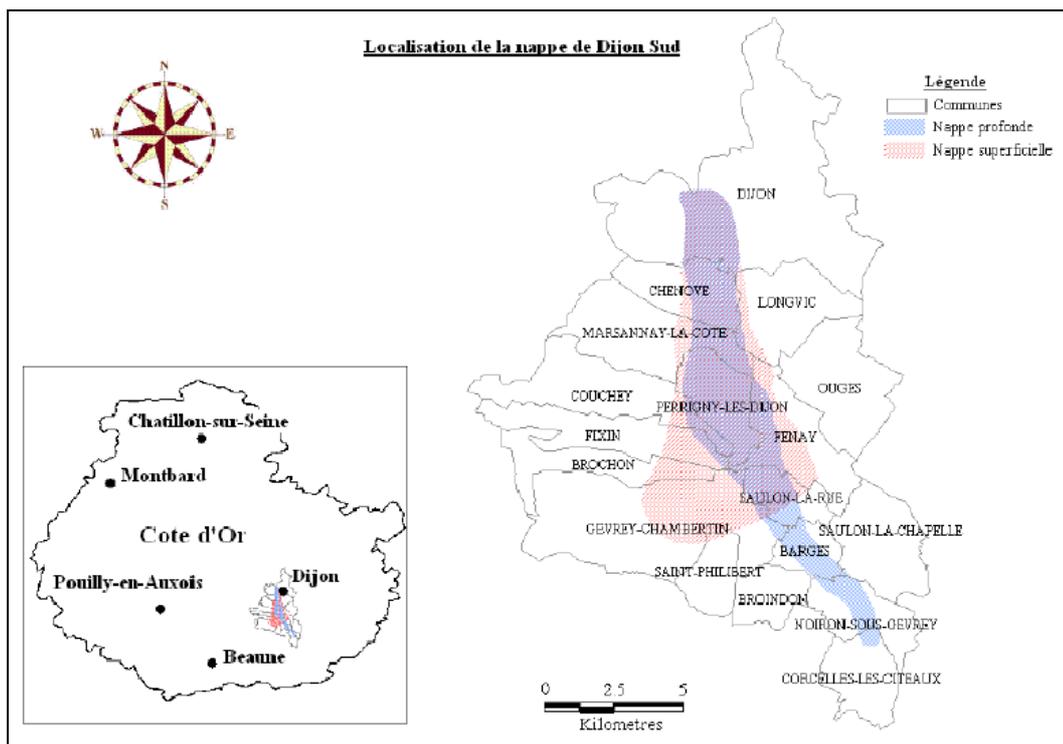
## 1.1 CONTEXTE DE LA MISSION

Le Syndicat du Bassin Versant de la Vouge met en œuvre un appel d'offre pour une étude de détermination des volumes prélevables sur le bassin versant de la Vouge. Cette étude comprend deux volets :

- ▶ Un volet de détermination des volumes prélevables sur le bassin versant proprement dit.
- ▶ Un volet portant sur l'identification et caractérisation des ressources stratégiques sur la nappe de Dijon sud.

Les prélèvements effectués sur la nappe de Dijon Sud sont destinés en grande majorité à l'alimentation en eau potable et l'importance de sa réserve (estimée entre 15 et 20 millions de m<sup>3</sup>) en fait une ressource identifiée comme stratégique dans le SDAGE. Elle approvisionne en eau potable une partie de l'agglomération dijonnaise et les 50 000 habitants des communes situées au Sud de l'agglomération.

Figure 1 : Localisation de la nappe de Dijon Sud.



À ce titre, un travail d'identification et de caractérisation des zones à sauvegarder pour l'usage eau potable doit être réalisé. La désignation de zones stratégiques pour l'alimentation en eau potable vise à mettre en œuvre, dans un second temps, des programmes d'actions spécifiques et à réglementer certaines implantations ou activités. Ceci permettrait de maintenir une qualité de l'eau compatible avec la production d'eau potable sans recourir à des traitements lourds.

De plus, la nappe de Dijon Sud a été désignée dans le SDAGE à la fois comme masse d'eau en déséquilibre quantitatif et comme masse d'eau recelant des ressources stratégiques pour l'AEP.

Elle doit donc faire l'objet d'une étude de détermination des volumes maximums prélevables.

Pour des raisons d'efficacité maximale, il a été décidé de poursuivre ces deux objectifs de manière parallèle et coordonnée (économie d'échelle, de coûts et de moyens en mutualisant le recueil et l'exploitation de données identiques, optimisation de la mobilisation, sollicitation et implication des différents acteurs, ...).

## 1.2 CONTENU DU RAPPORT

Le présent rapport correspond à un rapport technique intermédiaire. Il présente les résultats relatifs à la phase n°3 de l'étude : "Impact des prélèvements et quantification des ressources existantes". Dans cette phase, le travail de quantification des ressources doit être fait sur les eaux superficielles et souterraines, en mettant en œuvre des modèles de type globaux ou couplés permettant de simuler les débits et les niveaux piézométriques et d'établir des corrélations entre les deux.

Le présent rapport est dédié à l'étude de la nappe de Dijon Sud. Il présente les étapes de construction du modèle numérique, le calage en régime permanent et en régime transitoire de la nappe.

Une reconstitution de la piézométrie non influencée est aussi proposée.

La modélisation a été réalisée sous Visual Modflow. C'est un logiciel de calcul scientifique destiné à la modélisation 3D des écoulements souterrains en milieux poreux (transfert de masse et de pression). Ce logiciel est basé sur l'habillage du code numérique Modflow qui a été développé en 1988 par Mac Donald et Harbaugh (*A Modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model / US Geological Survey Open-File Report 83-875*). Il permet la modélisation des circulations en nappe libre ou captives par la simulation des écoulements par les différences finies en blocs centrés. Ce code numérique a subi depuis de nombreuses modifications et améliorations.

Visual Modflow est un logiciel simple d'utilisation qui présente toutes les fonctionnalités et l'apparence des logiciels modernes (interface graphique avec menus déroulants, gestion optimale des fichiers sorties et des données d'entrée des simulations). Il intègre des outils performants de visualisation des simulations : courbes et cartes en couleur, coupes ou plan carte dont l'orientation peut être définie de manière simple par l'utilisateur.

Au vu des capacités du logiciel, il apparaît que ce dernier est adapté aux spécificités et aux objectifs de l'étude :

- ▶ Modflow est conçu pour simuler les écoulements en milieux poreux ce qui est le cas des écoulements dans les nappes alluviales (avec un comportement isotrope ou anisotrope).
- ▶ Modflow permet de représenter correctement la complexité du secteur d'étude : présence de trous d'eau, échanges nappe-rivière, degré de colmatage des cours d'eau, variété des encaissements de la nappe, bonne représentation de la géométrie des limites de la nappe.

## 2. STRATEGIE DE MODELISATION

### 2.1 PRINCIPALES ORIENTATIONS

#### 2.1.1 Périmètre du modèle

Au vu des incertitudes sur la structure et l'extension de la nappe profonde au Sud de Noiron, nous proposons de modéliser le système hydrogéologique sur un domaine de 7 km de large sur 12 km de long (soit 84 km<sup>2</sup>). Le coin Nord-Ouest correspond ainsi à la limite entre la nappe de Dijon Sud et celle de l'Ouche, au Sud du champ captant des Gorgets et le coin Sud-Est à la commune de Barges. La géométrie de l'aquifère plus au Sud est trop incertaine pour pouvoir être modélisée.

Sur un axe vertical, le modèle représente une tranche de terrain allant de 260 m NGF (toit de l'aquifère superficiel dans le secteur au Sud des Gorgets) à 150 m NGF (mur de l'aquifère profond à Barges).

Nous proposons un maillage fin du modèle contraint par la règle de proportionnalité suivante :  $\Delta X=25x$   
 $\Delta Z$  :

- ▶  $\Delta Z = 10$  m.
- ▶  $\Delta X = 250$  m.
- ▶  $\Delta Y = 250$  m.

Au vu des échelles caractéristiques de la problématique posée (échelle spatiale de l'ordre de l'aquifère, comportement moyen à l'échelle mensuelle), il paraît acceptable de reproduire le degré d'idéalisation généralement proposé pour l'aquifère de Dijon Sud : nappe superficielle séparée d'une nappe plus profonde par une couche peu perméable (couche moutarde).

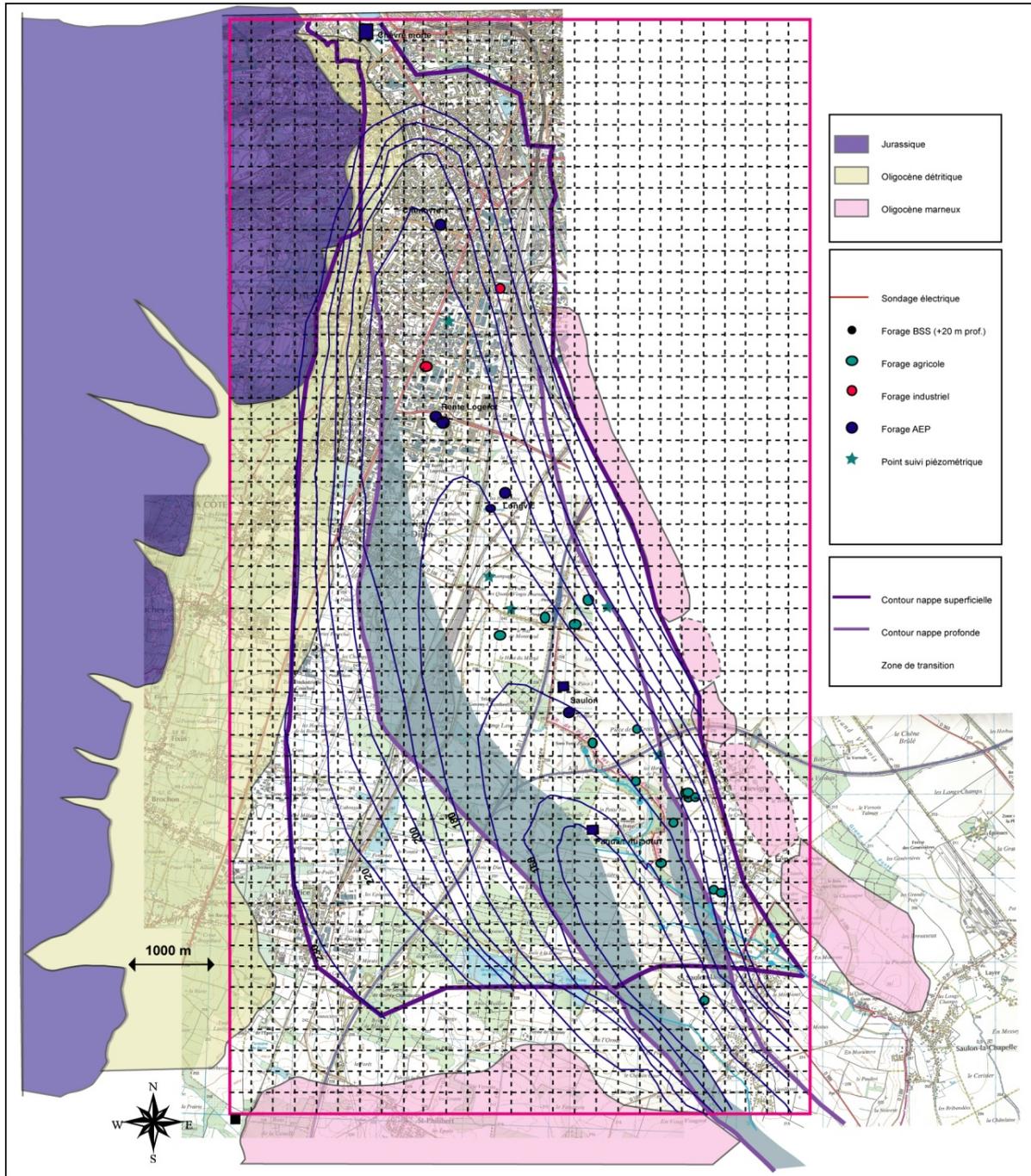
Ainsi, le domaine sera divisé/simplifié en plusieurs catégories de potentiel aquifère :

- ▶ Aquifère superficiel,
- ▶ Couche moutarde,
- ▶ Aquifère profond,
- ▶ Oligocène marneux,
- ▶ Oligocène détritique,
- ▶ Formations carbonatées du Jurassique.

Précisons que cette démarche, basée sur un découpage de l'aquifère en unités élémentaires et sur l'attribution à ces volumes de paramètres hydrodynamiques moyens, est une démarche forcément simplificatrice. Elle permettra de reproduire ou d'explorer des comportements hydrogéologiques relevant d'une certaine échelle. Tous les phénomènes significatifs d'une échelle plus fine ne pourront pas être représentés dans leur détail et leur complexité, en particulier la forme du cône de rabattement induit par un champ captant.

Le domaine modélisé est représenté sur la figure suivante :

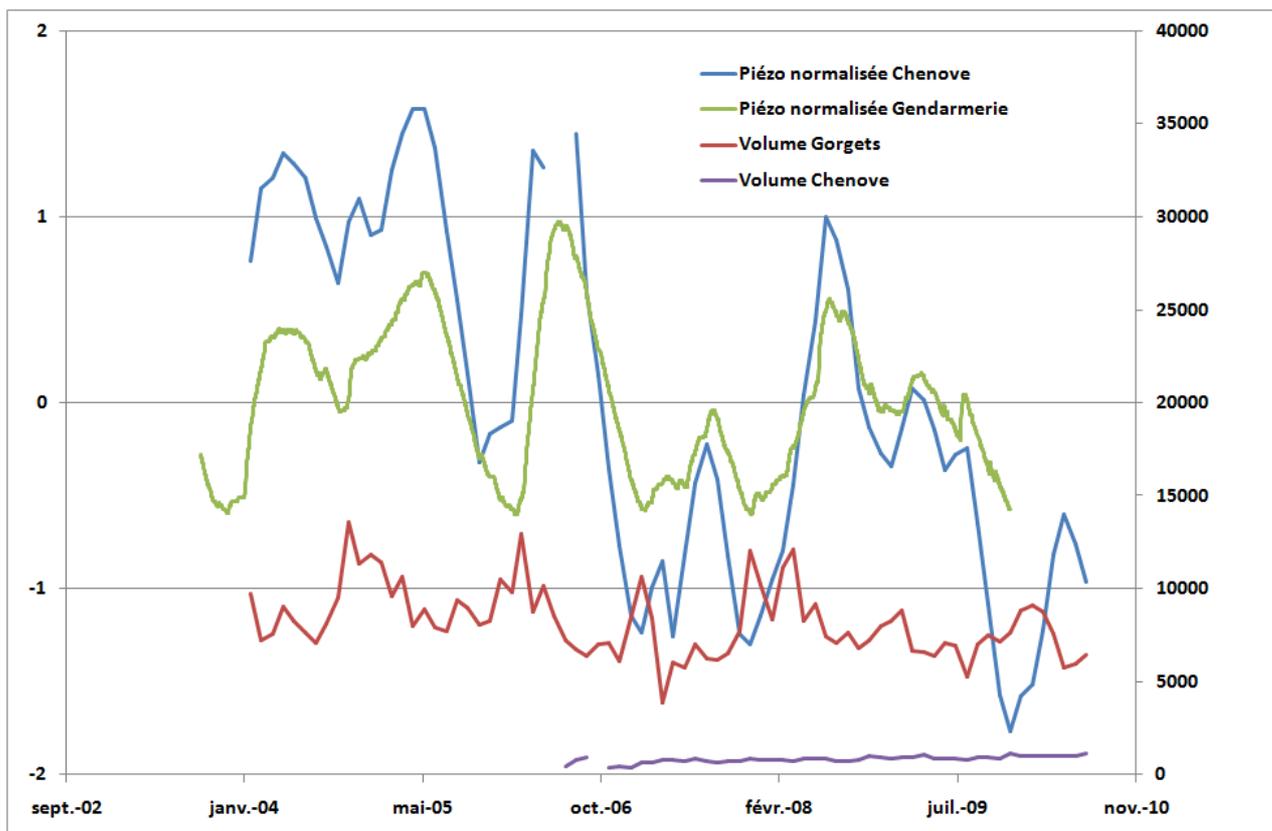
Figure 2 : Domaine modélisé



La limite Nord correspond au Lac Kir. En effet, il a paru nécessaire d'intégrer le champ captant des Gorgets dans le modèle. Les informations données dans les études antérieures mentionnaient une faible influence du champ captant à l'aval. Or, une première analyse des données piézométriques fournies en date du 02 août 2010 par l'exploitant (données de variations du niveau d'eau non ramenée à un référentiel altimétrique commun) permet de mettre en doute cette hypothèse.

Le graphe ci-dessous montre les variations normalisées des niveaux d'eau au droit du piézomètre dit de la Gendarmerie et celles du puits de Chenôve. Les débits de production au droit des champs captant des Gorgets et de Chenôve sont aussi figurés (prélèvements mineurs sur Chenôve avec une production de débit quasi constant ; forts prélèvements aux Gorgets avec une variabilité mensuelle notable d'un facteur 2).

Figure 3 : Piézométrie normalisée en regard des volumes pompés.



On peut faire les observations suivantes :

- ▶ Les variations de niveau piézométrique sont deux fois plus importantes sur le puits de Chenôve que sur le piézomètre Gendarmerie. Cela contredirait l'hypothèse d'une limite à charge constante correspondant à l'Ouche ; en effet, le puits de Chenôve est plus proche de cette limite Nord que le piézomètre de la Gendarmerie. Or, en toute logique, la présence d'une limite à charge constante se traduit par une atténuation des variations du niveau piézométrique.
- ▶ En première approximation, il semble que les évolutions du niveau piézométrique soient inverses à celles des débits prélevés sur le champ captant des Gorgets. Dans le détail, les évolutions comparées sont plus complexes.

Ces observations nous montrent que si l'on veut introduire la rivière Ouche comme limite à charge constante, il faudra nécessairement simuler les prélèvements sur le champ captant des Gorgets pour reproduire les variations observées du niveau piézométrique.

La limite Sud correspond au village de Barges. L'exploitation des données piézométriques disponibles (Raquette, Noiron et Izeure) permet d'estimer un gradient en nappe profonde de l'ordre de 0,2%. On peut faire l'économie d'un domaine de modélisation allant jusqu'à Noiron au Sud en supposant un niveau piézométrique d'environ 212 m NGF sous le village de Barges.

Les limites Est et Ouest correspondent aux extrêmes Est et Ouest de la nappe superficielle, tels qu'ils ont été définis dans le rapport de synthèse ANTEA.

## 2.1.2 Dimensions du maillage

Les mailles ont les dimensions suivantes dans le plan horizontal : 250 m x 250 m.

Afin de bien intégrer les variations du mur de l'aquifère et de bien représenter la couche moutarde, la dimension des mailles selon la verticale est de 10 m. Le domaine modélisé est compris entre 150 et 260 m NGF.

On a ainsi :

- ▶ Selon X, 27 colonnes soit 6 750 m de largeur,
- ▶ Selon Y, 52 lignes soit 13 000 m de longueur,
- ▶ Selon Z, 11 couches soit 110 m d'épaisseur.

Soit un total d'environ 15 000 mailles.

Pour des raisons de stabilité numérique (couches biseautées), la topographie n'a pas été introduite dans le modèle. Cela n'aura aucun impact sur les calculs, car la nappe superficielle est libre.

De la même façon, nous n'avons pas introduit de variations secondaires d'épaisseur des couches, notamment sur la couche moutarde. Cela pourrait laisser croire que ces variations sont suffisamment bien décrites/connues pour pouvoir être représentées, ce qui n'est pas le cas.

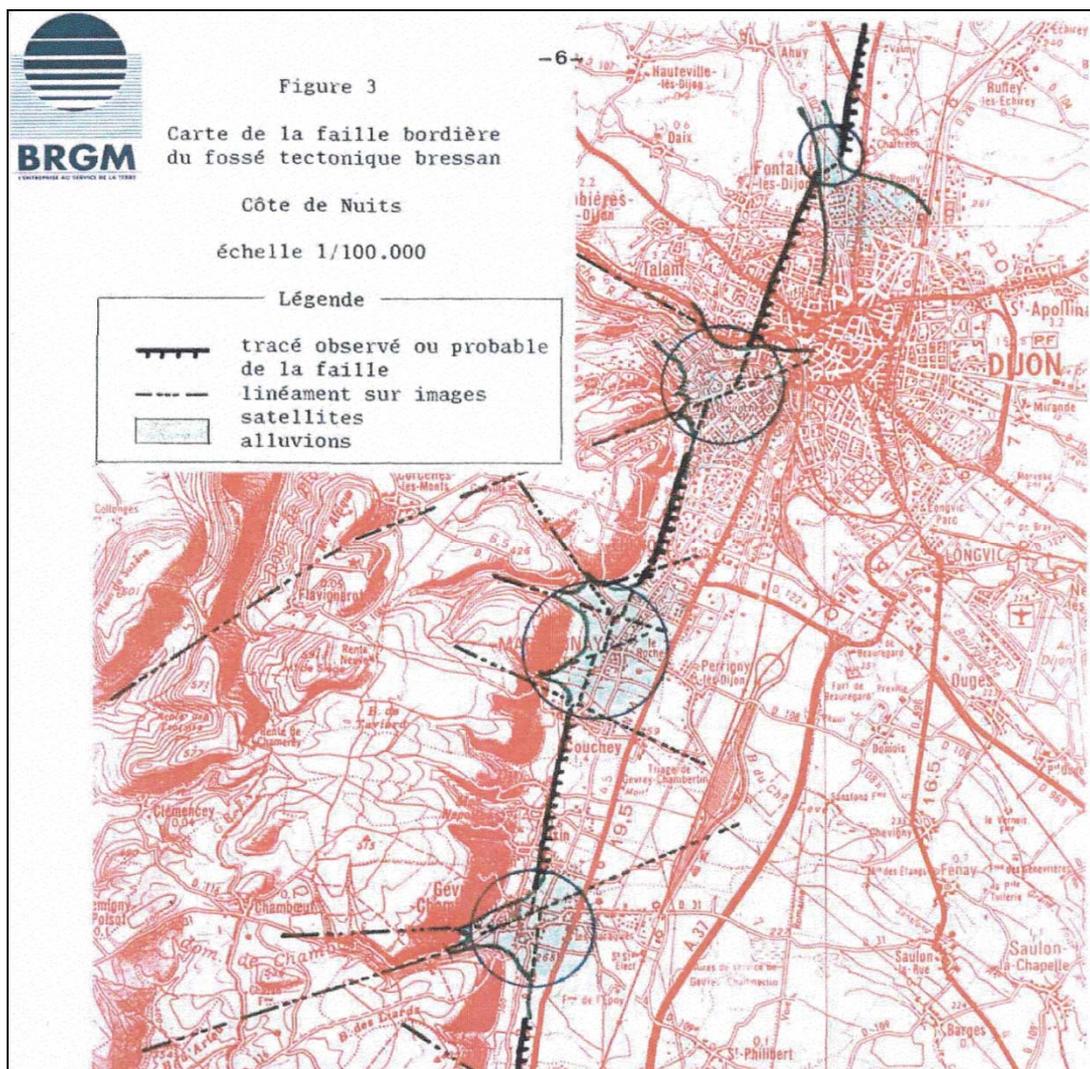
## 2.1.3 Nature et position des conditions aux limites

Les conditions aux limites initialement implantées dans le modèle sont les suivantes :

- (1) Ouche et limite Nord de la nappe au droit du Lac kir : limite à charge constante.
- (2) Oligocène marneux imperméable : cellules inactives (absence d'écoulement).
- (3) La représentation du comportement hydrogéologique du complexe Oligocène/Jurassique est plus difficile. Nous proposons de tester la configuration suivante :
  - ▶ Attribution d'une perméabilité moyenne indifférenciée de  $10^{-4}$  à  $10^{-6}$  m/s (paramètre à caler en fonction de la piézométrie observée) aux conglomérats oligocènes et aux séries carbonatées du Jurassique.
  - ▶ Imposition d'une limite à charge constante sur les cellules de la bordure Ouest.
  - ▶ Introduction sur trois mailles d'injection correspondant aux trois zones supposées de fortes venues sous alluviales : Quartier des Bourroches à Dijon, lieu dit du Rocher à Marsannay, lieu dit les Baraques à Gevrey-Chambertin (cf. figure ci-dessous).

Les débits d'injection devront être corrélés avec les pluies efficaces mensuelles estimées à partir des données Météo-France des stations météorologiques disponibles sur le plateau karstique. Plusieurs scénarios devront être testés en considérant des surfaces d'impluvium variables pour chacune des venues sous-alluviales : de 5 à 10 km<sup>2</sup>. Rappelons que pour 100 mm de pluie efficace annuelle, un impluvium de 1 km<sup>2</sup> implique un débit fictif de l'ordre de 3 l/s.

Figure 4 : Zones supposées des venues sous-alluviales.



- (4) La zone de résurgence de la Cent Fonts (depuis la source elle-même, jusqu'aux résurgences secondaires étalées jusqu'à Saulon la Rue) sera représentée de manière schématique par une zone de plus forte perméabilité (drain) à charge imposée en limite du domaine modélisé. Les charges imposées, cellule par cellule, correspondront aux cotes NGF du cours d'eau. Une telle option permet de s'affranchir de la non-connaissance sur le degré de colmatage des berges du cours d'eau. Elle impliquera une bonne représentativité des débits cumulés collectés au droit de Saulon (en supposant qu'au niveau de Saulon, la totalité du débit de soutien de la nappe a été restituée au cours d'eau) mais induira une représentation approximative, voire tronquée, des isopièzes dans la zone de résurgence.

## 2.2 APPORTS DE LA CARTE PIEZOMETRIE 2010

ANTEA a réalisé à l'automne 2010, sous maîtrise d'ouvrage du SBV, des cartes piézométriques des nappes de Dijon Sud.

### 2.2.1 Principes

Une soixantaine de points ont été retenus pour établir les cartes piézométriques.

Plus précisément :

18 points en zone amont (nappe profonde et nappe superficielle confondues), dont trois points sur l'Ouche.

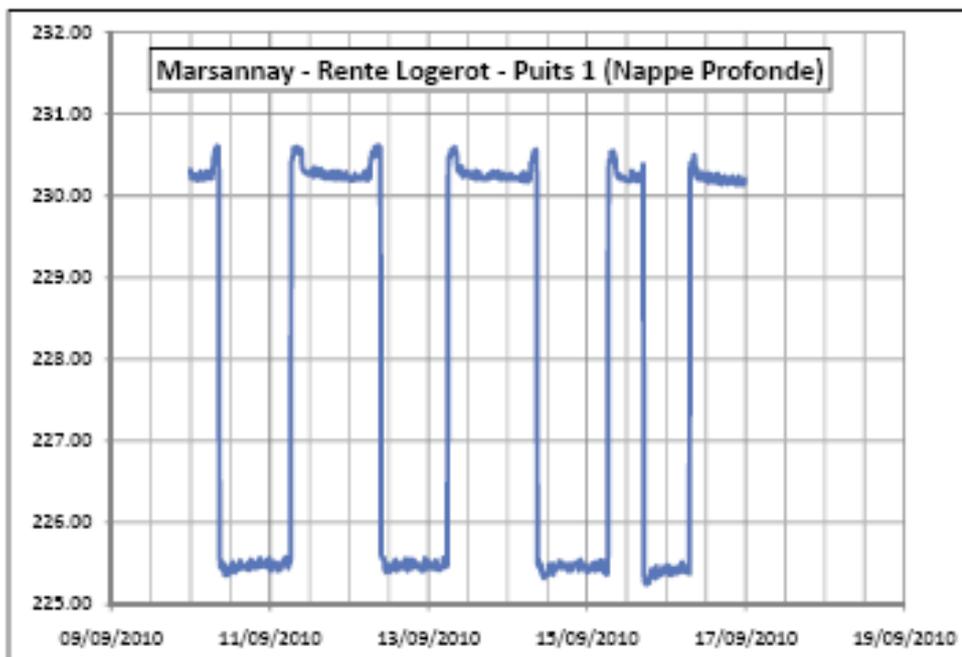
23 points en zone aval pour la nappe superficielle.

15 points en zone aval pour la nappe profonde.

Deux tournées de mesure ont été réalisées : du 19 juillet au 3 août 2010 puis du 10 septembre au 24 septembre 2010. La baisse du niveau entre les deux séries est de 7 à 20 cm.

L'analyse préliminaire des données piézométriques disponibles est très intéressante. Elles permettent de valider le caractère d'étiage des mesures piézométriques. De plus, elles mettent en évidence l'impact des forages en nappe profonde dans le secteur de la Rente Logerot : près de 5 m d'écart entre le niveau statique et le niveau dynamique.

Figure 5 : Influence des pompages à la rente Logerot sur la piézométrie de la nappe profonde (ANTEA, 2010).



## 2.2.2 Résultats

L'interprétation des données piézométriques permet à ANTEA de proposer les cartes piézométriques suivantes pour la nappe superficielle et la nappe profonde (cf. figure ci-dessous).

Les points suivants méritent d'être soulignés :

Les isopièzes indiquent clairement une alimentation de la nappe en provenance de la Côte dans la zone amont.

Le champ captant de Chèvre Morte se traduit par une zone déprimée d'environ 1 mètre par rapport à l'Ouche.

La nappe est clairement alimentée par l'Ouche et la perméabilité des alluvions modernes de l'Ouche serait sensiblement inférieure à celle des graviers de la nappe.

L'auteur insiste sur le caractère aléatoire de la piézométrie en nappe profonde. Les perturbations liées aux forages sont importantes et il est difficile de proposer une piézométrie "moyenne" ou "normale". Cet impact se fait notamment sentir sur les écarts de charge entre nappe profonde et nappe superficielle : la lecture des courbes piézométriques indique un écart de charge maximum de 5 m environ dans le secteur des piézomètres Raquette et BA102. L'écart de charge est inférieur à 0,5 m à la fois à l'amont (secteur de la Rente Logerot) et à l'aval (voisinage de la Cent Fonts).

## 2.2.3 Implications pour la stratégie de modélisation

Concernant les données sur la nappe profonde, les données recueillies et les cartes produites ne remettent pas en question le schéma conceptuel basé sur un exutoire vers le Sud et une nappe caractérisée par un gradient relativement constant. Notons cependant les forts écarts piézométriques entre nappe profonde et nappe superficielle (3 m d'eau de différence de charge au droit de la raquette SNCF pendant la période de mesure).

L'apport majeur de ces travaux concerne la nappe superficielle.

- ▶ La carte piézométrique confirme une alimentation en provenance des coteaux ; il s'agit bien d'une alimentation par les eaux du karst avec les séries oligocènes détritiques en relais.
- ▶ Concernant la structure intime de l'aquifère, on observe que les séries perméables forment un couloir de largeur relativement constant du Nord au Sud. Ce qui implique que si l'aquifère superficiel est plus large que ce couloir, il est majoritairement constitué sur ces bordures de séries moins perméables. Cette hypothèse s'appuie sur l'observation d'isopièzes plus resserrées et d'une alimentation globalement Ouest-est sur la bordure occidentale de l'aquifère.
- ▶ Les données recueillies confirment à l'échelle de description de ces cartes, l'absence de relations hydrauliques avec les séries oligocènes qui bordent l'aquifère à l'Est.

Figure 6 : Carte piézométrique de la nappe superficielle (ANTEA, 2010).

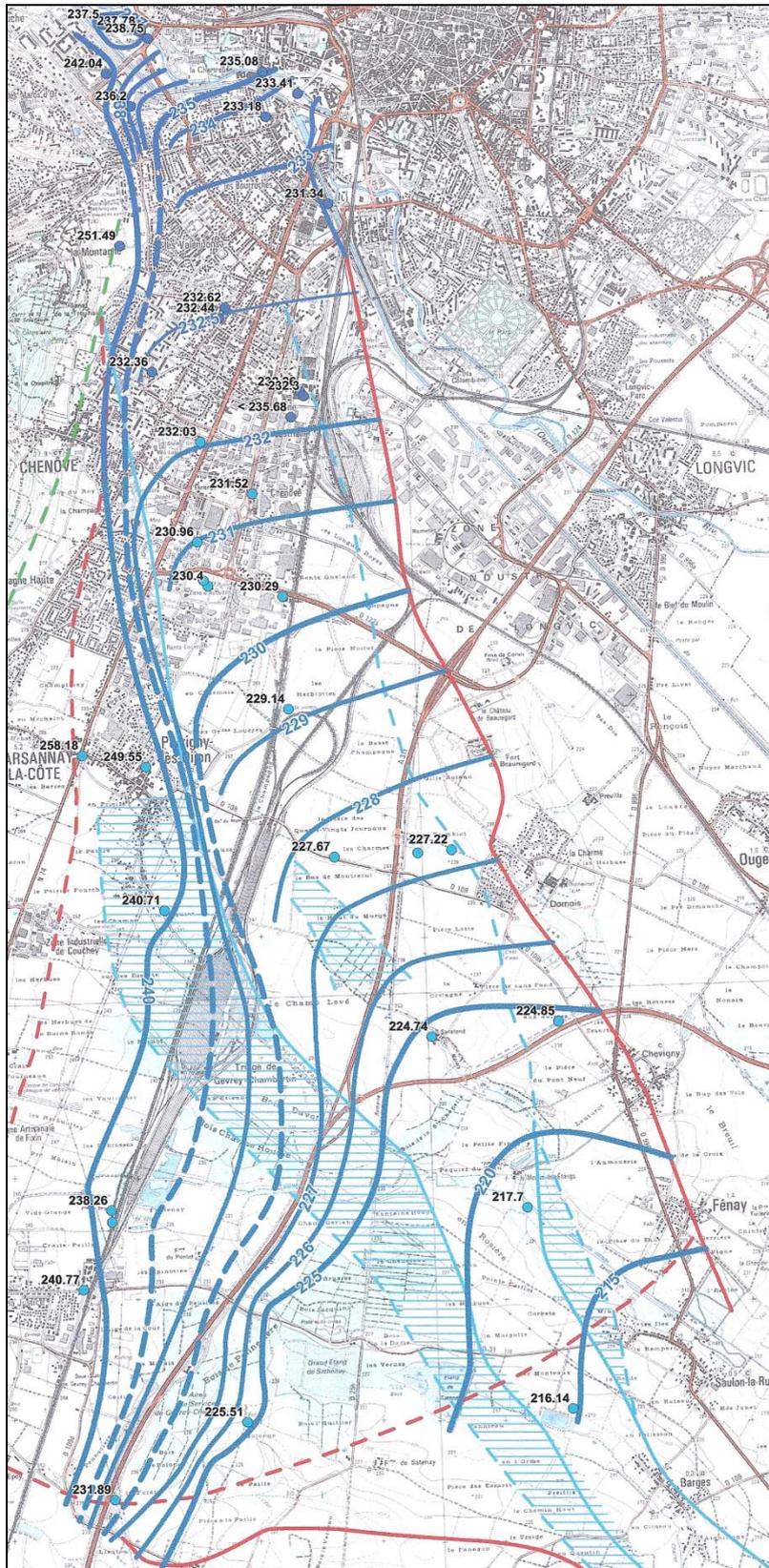
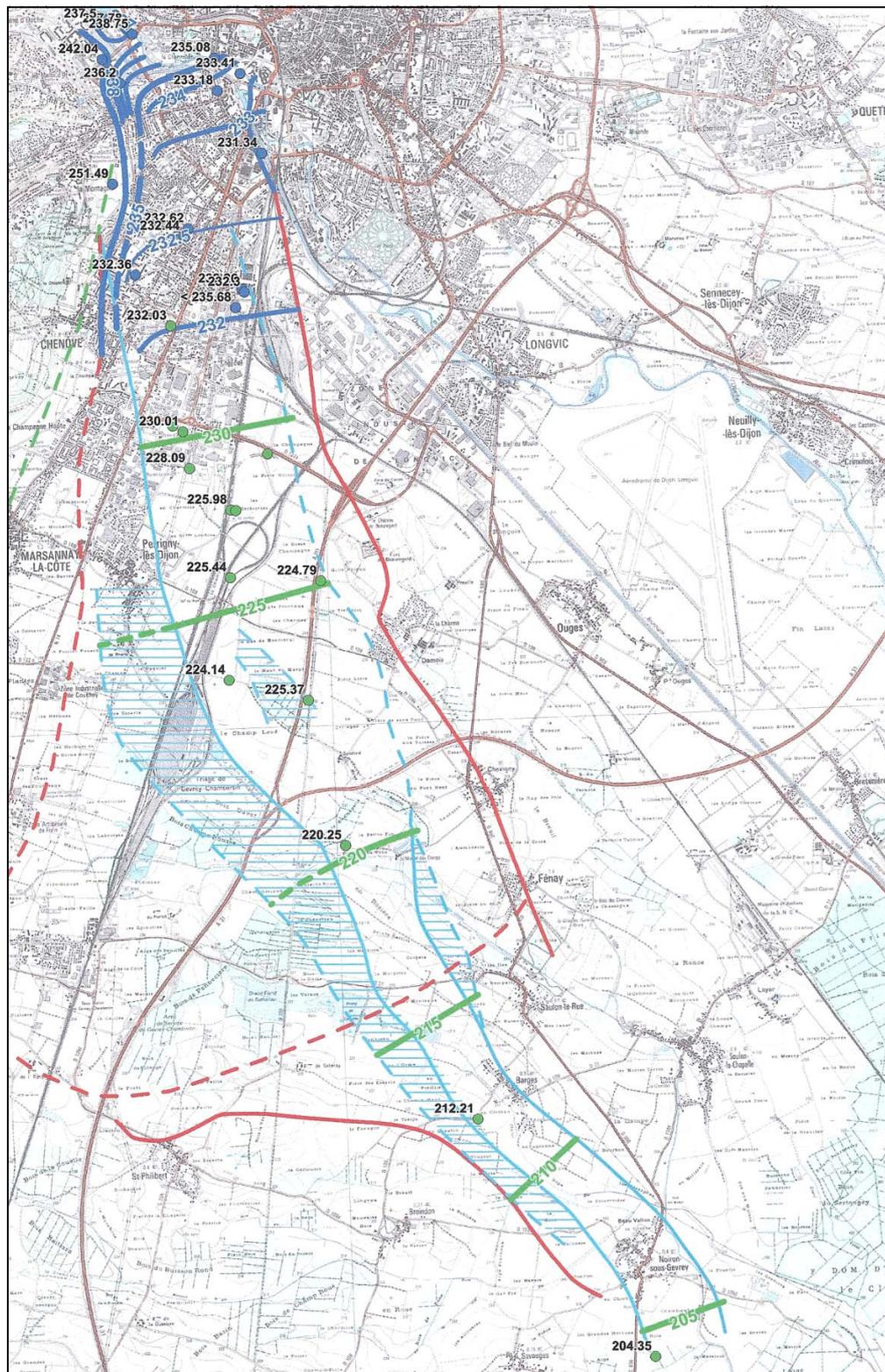


Figure 7 : Carte piézométrique de la nappe profonde (ANTEA, 2010).





## 3. MODELISATION EN REGIME PERMANENT

### 3.1 DONNEES DE REFERENCE

Cette analyse préliminaire a été réalisée pour définir les ordres de grandeur des paramètres physiques modélisés. Elle a pour objectif principal de définir des indicateurs "externes" au processus de modélisation, pour pouvoir en juger la robustesse et la validité.

#### 3.1.1 Flux entrants

##### ESTIMATION DE LA RECHARGE PAR LA PLUIE EFFICACE SUR L'IMPLUVIUM DE LA NAPPE

L'estimation a priori de la recharge annuelle moyenne est nécessairement imprécise.

La pluie efficace peut être estimée à 270 mm/an. Cette valeur a été déduite de la moyenne des différences positives entre les valeurs mensuelles de pluviométrie et les valeurs mensuelles d'évapotranspiration (données de la station météorologique de Dijon-Longvic de 1970 à 2009).

Si on estime un coefficient d'infiltration de 60%, on obtient une lame d'eau infiltrée de 162 mm/an. Pour un coefficient de 30%, on a une valeur de 81 mm. La plupart des auteurs donnent des valeurs de lame infiltrée comprises entre 130 et 150 mm. C'est cet ordre de grandeur que nous retiendrons dans un premier temps (150 mm/an).

##### ESTIMATION DE LA RECHARGE PAR LE KARST BORDIER

Cette estimation repose sur les hypothèses suivantes :

- ▶ L'arrière côte qui forme l'impluvium karstique présente des altitudes comprises entre 400 et 500 m NGF. P. Corbier (1999) propose une analyse fine des précipitations sur le plateau ; elle présente notamment un gradient altimétrique des précipitations qui permet d'estimer une pluviométrie moyenne de l'ordre de 900 mm/an dans le secteur qui nous intéresse. Elle propose aussi une estimation de l'ETR par différentes méthodes (autour de 530 mm/an), ce qui permet d'estimer la pluie efficace autour de 370 mm/an en première approximation
- ▶ Si l'on suppose que 30% seulement de la pluie efficace participe au ruissellement, on obtient un module de débit spécifique d'environ 8 l/s/km<sup>2</sup> (hypothèse moyenne). A titre d'exemple, P. Corbier propose des valeurs de 12 l/s/km<sup>2</sup> (hypothèse haute, qui correspondrait à une part ruisselée nulle). On peut aussi poser comme hypothèse basse  $Q_s=5$  l/s/km<sup>2</sup> (R= 60%).
- ▶ A partir de ces travaux, il est aussi possible de déterminer une zone qui pourrait correspondre à l'impluvium des venues sous-alluviales (zone caractérisée par l'absence de résurgences au contact des imperméables relatifs et par des "anomalies" de traçage). La synthèse des traçages (Corbier, 1999) montre l'absence d'exutoires pour une bande de 4 km de profondeur (en Est-Ouest) et de 15 km de longueur (en Nord-Sud). Ce qui donne une estimation des débits cumulés des "pertes" du karst, comprise entre 300 et 720 l/s.
- ▶ Rappelons que ces pertes se partagent entre les venues ponctuelles sous-alluviales (zones de failles ou exutoires karstiques masqués) et des écoulements plus diffus avec comme relais les conglomérats oligocènes. Si l'on accepte une perméabilité moyenne comprise entre 2 et  $5 \cdot 10^{-5}$  m/s pour ces conglomérats, un gradient hydraulique moyen compris entre 1 et 2 % (déduit des mesures piézométriques) et une surface d'échange de 250 000 m<sup>2</sup> (estimation donnée à partir du "modèle" géologique construit), on obtient selon la Loi de darcy un débit moyen compris entre 50 et 250 l/s pour ces venues diffuses.

Le scénario le plus vraisemblable est celui d'un débit diffus moyen de l'ordre de 200 l/s, pour des alimentations totales de l'ordre de 400 l/s (ce qui implique un cumul de 200 l/s pour les venues localisées). C'est un ordre de grandeur plausible : rappelons que le déficit d'écoulement pour l'ensemble du karst de la Côte et de l'Arrière Côte avait été estimé à 2 500 l/s.

C'est donc l'hypothèse que nous avons retenue dans un premier temps : Q moyen annuel des venues sous-alluviales de l'ordre de 60 l/s pour chacune des trois zones de venues sous alluviales ponctuelles.

Rappelons que ces estimations sont réalisées pour donner des "bornes" à ces débits fictifs. Elles ne doivent en aucun cas être considérées comme des résultats, mais comme des valeurs initiales dans un processus complexe de calage qui devrait permettre de valider ou d'infirmer ces ordres de grandeur.

#### ESTIMATION DE L'ALIMENTATION PAR LA NAPPE DE L'OUCHE

Selon la géométrie connue dans la zone frontière entre nappe alluviale de l'Ouche et nappe de Dijon Sud, on peut poser les hypothèses suivantes :

- ▶ Surface d'échange de l'ordre de  $5 \times 1000 = 5\,000 \text{ m}^2$ .
- ▶ Gradient hydraulique de l'ordre de 0,4% (données piézométriques 2010).
- ▶ Perméabilité supposée de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ .

Avec la Loi de Darcy, on peut estimer un flux d'alimentation de l'ordre de 100 l/s. Insistons sur le caractère très approximatif de cette estimation : la géométrie du corps sédimentaire est mal déterminée, les perméabilités sont probablement variables à l'échelle de la surface d'échange. Et le lit de l'Ouche est probablement colmaté, ce qui implique une complexité supplémentaire des échanges.

Rappelons que cette estimation est réalisée pour donner des "bornes" à ces débits fictifs. Elle ne doit en aucun cas être considérée comme un résultat, mais comme une valeur initiale dans un processus complexe de calage qui devrait permettre de valider ou d'infirmer cet ordre de grandeur.

### 3.1.2 Flux sortants

#### PRELEVEMENTS

Concernant l'AEP, les prélèvements moyens suivants (moyenne sur les données récoltées allant de 2006 à 2009) ont aussi été intégrés au modèle pour le calage en régime permanent :

Id	Nappe sollicitée	Moyenne V m <sup>3</sup> /an	Q fictif (l/s)
Champ captant Chèvre Morte	Superficielle	2 950 000	93
Puits de Chenôve	Superficielle	300 000	9
Puits de la Rente Logerot	Superficielle	815 000	26
	Profonde	450 000	14
Puits de Longvic	Profonde	200 000	6
Puits à Saulon (dit de Perrigny)	Profonde	390 000	12
	Superficielle	170 000	5
Forage du Paquier du Potu	Profonde	390 000	12

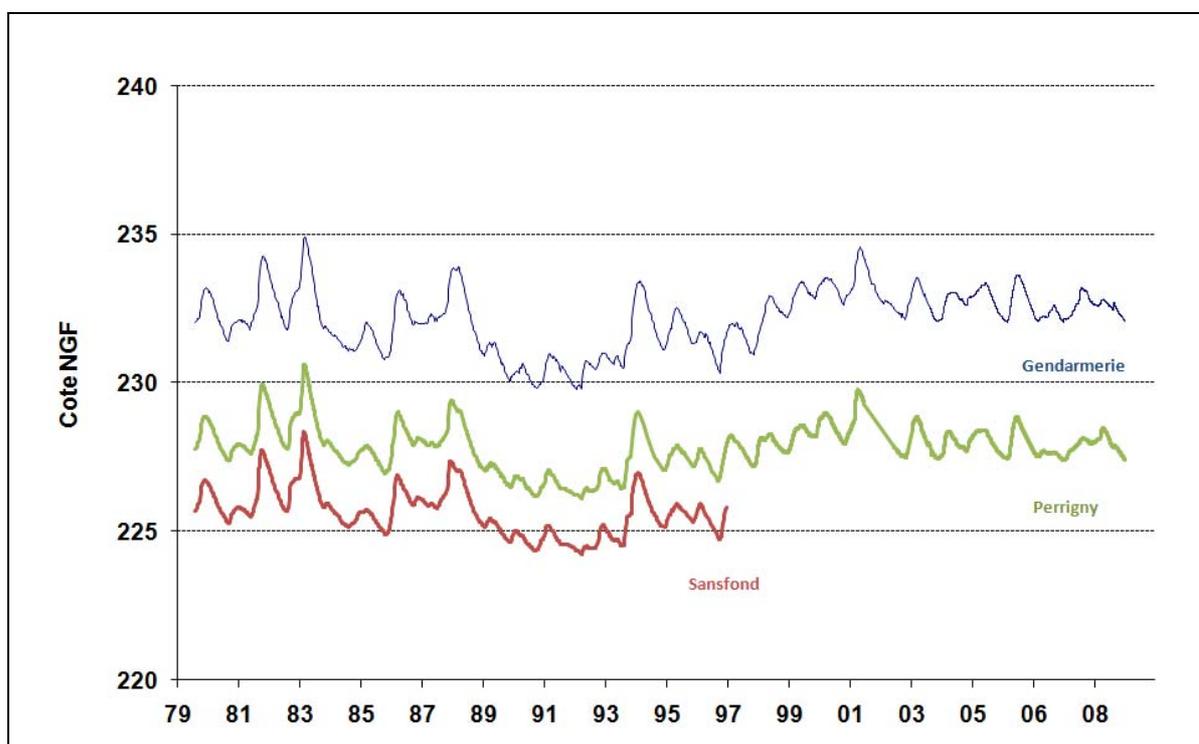
Rappelons que les données différenciées entre nappe profonde et nappe superficielle pour les puits de la rente Logerot concernent uniquement la période 2006-2009.

De 2006 à 2009, les prélèvements industriels sont négligeables : débit fictif de l'ordre de 0,5 l/s soit un volume de 20 000 m<sup>3</sup>/an. Ils n'ont pas été représentés dans le modèle dans le calage en régime permanent.

De 2006 à 2009, les prélèvements pour l'irrigation sont aussi négligeables (volume prélevé inférieur à 100 000 m<sup>3</sup>/an). Ils n'ont pas été représentés dans le modèle dans le calage en régime permanent.

Rappelons que depuis 2003, la piézométrie de la nappe est stabilisée (pas de tendance sur le long terme). On peut donc considérer que les prélèvements actuels n'entament pas la recharge annuelle cumulée.

Figure 8 : Suivi piézométrique de la nappe superficielle de Dijon Sud.



#### EXUTOIRE NAPPE PROFONDE

Le flux naturel vers la nappe profonde peut être estimé à l'aide de la Loi de Darcy.

Si l'on accepte une perméabilité moyenne comprise entre  $2 \cdot 10^{-4}$  m/s pour l'aquifère profond, un gradient hydraulique moyen de l'ordre de 0,3% (dédit des mesures piézométriques) et une surface d'échange de 40 000 m<sup>2</sup> (estimation donnée à partir du "modèle" géologique construit), on obtient selon la Loi de Darcy un débit moyen de l'ordre de 25 l/s.

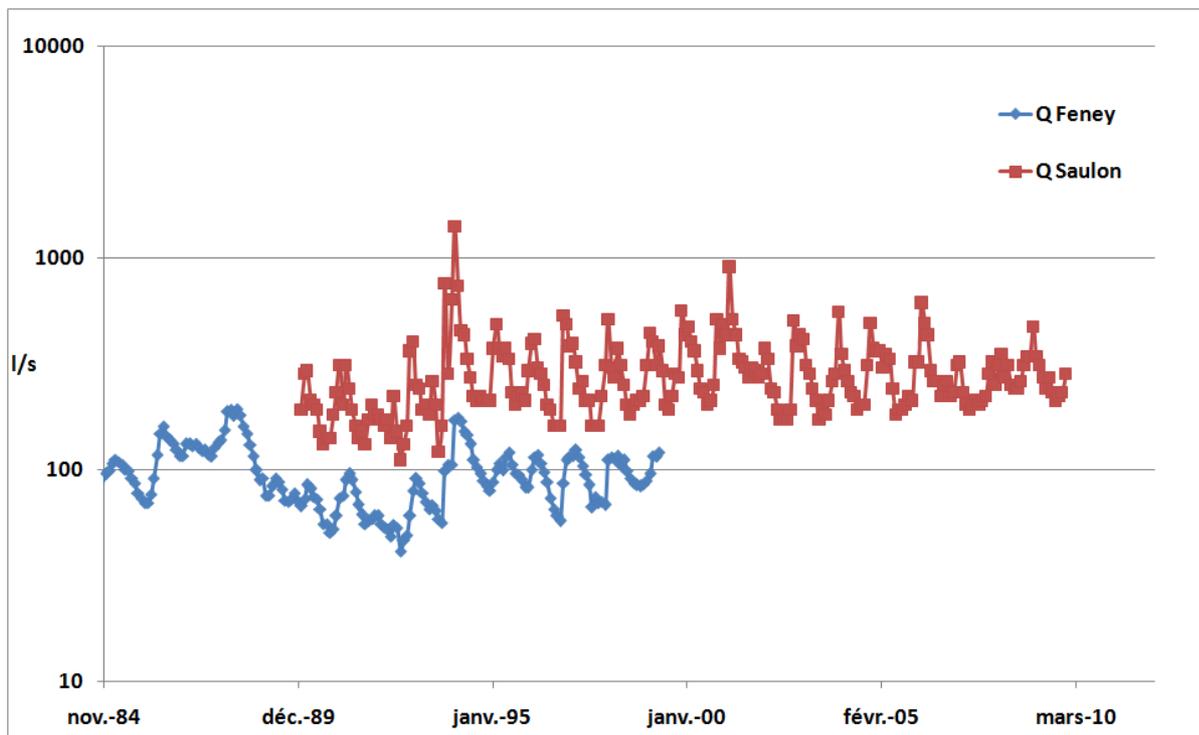
### ZONE D'EXUTOIRE DE LA CENT FONTS

Les données disponibles proviennent de deux stations hydrométriques avec un enregistrement des moyennes mensuelles :

- ▶ Station de Chevigny-Fenay (de 1973 à 1999). On peut considérer que les débits mesurés correspondent totalement à des résurgences d'eau souterraine.
- ▶ Station de Saulon-La Rue (1990 à 2010), qui enregistre le cumul des débits relatifs aux eaux souterraines et ceux liés au ruissellement sur le bassin versant.

La moyenne des moyennes mensuelles est de 105 l/s sur Chevigny-Fenay et de 285 l/s sur Saulon la Rue.

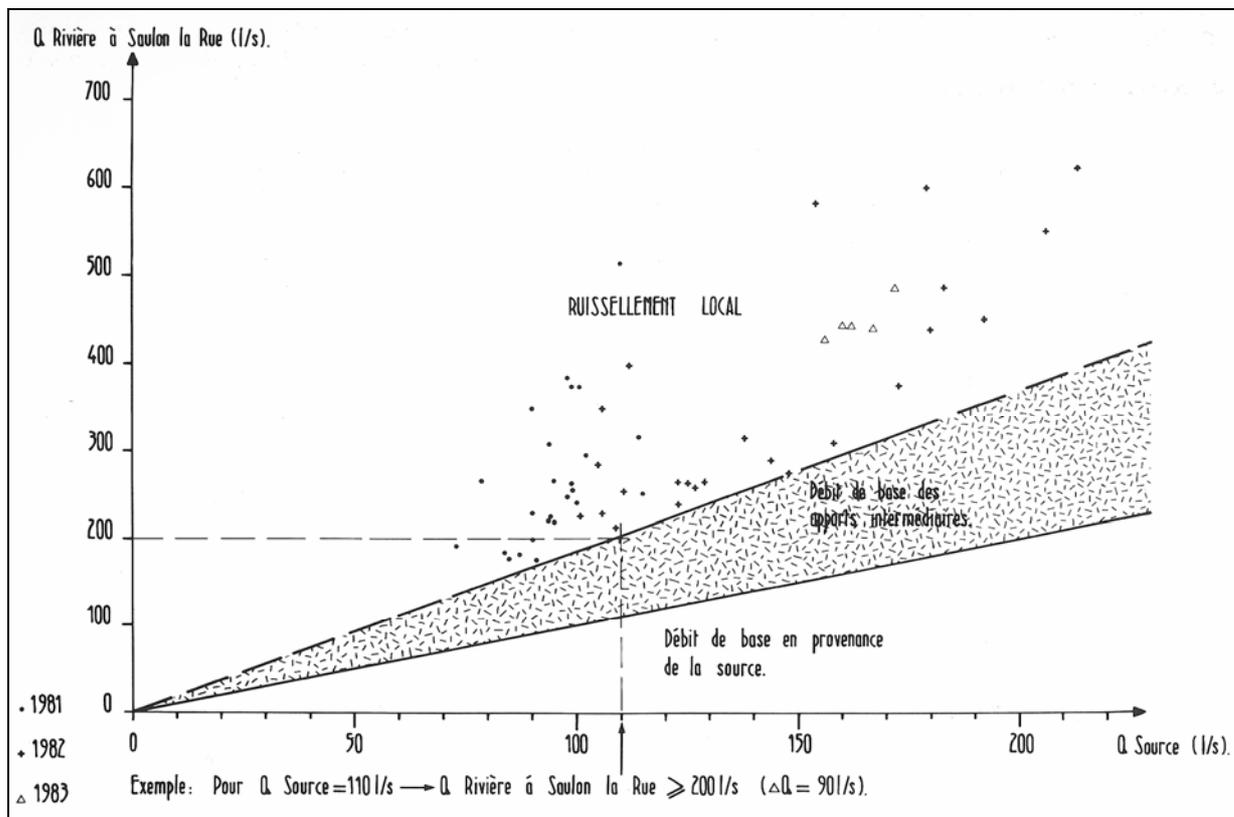
Figure 9 : Valeurs des débits enregistrées sur la Cent Fonts.



L'exutoire de la nappe ne se limite pas à la source Cent Fonts mais il correspond aussi aux zones humides et à des émergences secondaires. Une étude antérieure (SMAESAD, 1987) propose une relation entre le débit mesuré à la Cent Fonts et le débit des apports intermédiaires (cf. figure ci-dessous). En première approximation, le débit cumulé des émergences est égal au double du débit mesuré sur la station de Fenay.

On retiendra donc en première approximation une moyenne de l'ordre de 210 l/s pour la zone d'exutoire de la Cent Fonts.

Figure 10 : Relation provisoire entre les débits de la Cent Fonts et ceux de la rivière à Saulon la Rue (d'après SMAESAD, 1987)



De plus, avec la relation suivante :

$$Q_{\text{Saulon}} = Q_{\text{souterrain}} + Q_{\text{ruissellement}}$$

Si  $Q_{\text{souterrain}} = 2 \times Q_{\text{Fenay}}$ , alors :

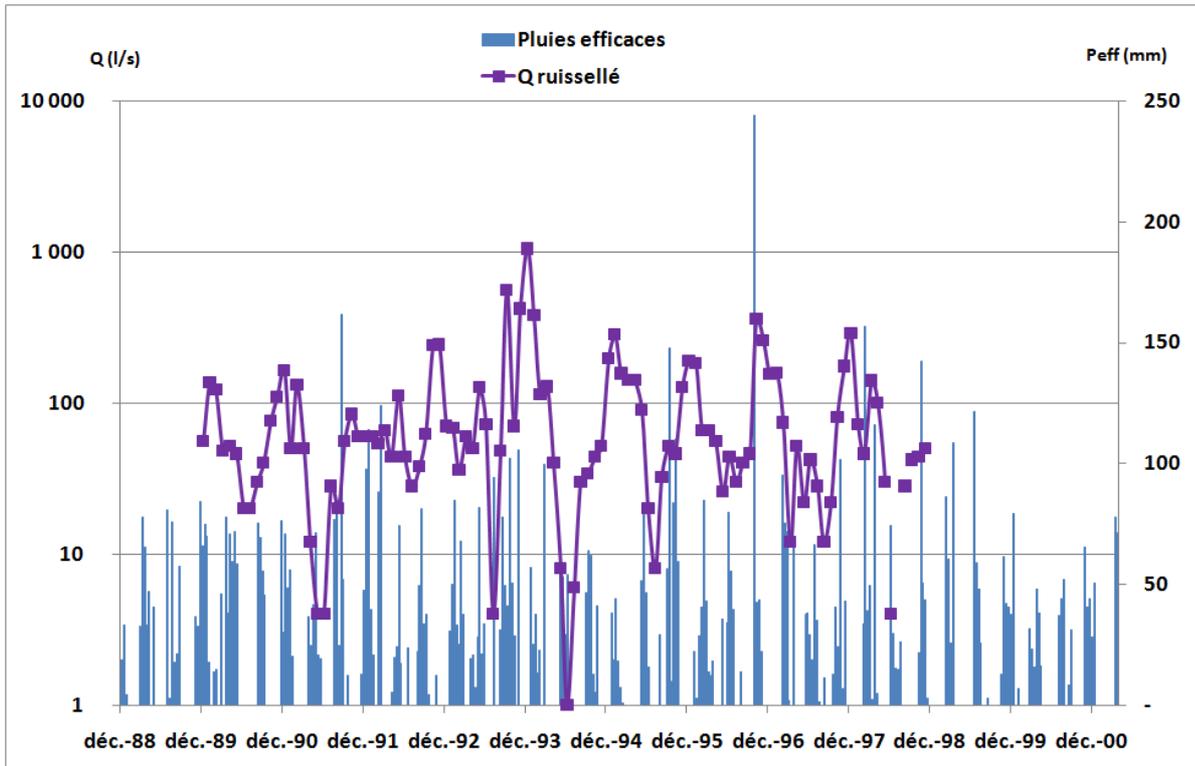
$$Q_{\text{ruissellement}} = Q_{\text{Saulon}} - (2 \times Q_{\text{Fenay}})$$

Cette relation nous intéresse car elle permet d'estimer les volumes ruisselés dans le bassin versant. Connaissant les pluies efficaces mensuelles, on peut ainsi approcher une hypothétique relation entre volumes ruisselés et pluies efficaces.

Sur la base de la relation proposée ci-dessus, la part de ruissellement mesurée à Saulon correspond ainsi à un débit fictif moyen d'environ 100 l/s (pour la période allant de 1988 à 1998). La surface du bassin versant est de l'ordre de 52 km<sup>2</sup>. On peut la décomposer comme suit :

- ▶ 24 km<sup>2</sup> de substrat calcaire. En posant comme hypothèse  $C_i=90\%$ , le débit fictif correspondant au ruissellement est de l'ordre de 20 l/s.
- ▶ 4 km<sup>2</sup> de substrat argileux oligocène. En posant comme hypothèse  $C_i=10\%$ , le débit fictif correspondant au ruissellement est de l'ordre de 30 l/s.
- ▶ 24 km<sup>2</sup> de substrat graveleux correspondant à la nappe de Dijon Sud. Si on accepte que le débit fictif correspondant au ruissellement sur ces surfaces soit de l'ordre de 50 l/s, il faut alors un coefficient d'infiltration de l'ordre de 75% (valeur cohérente), ce qui confirme en première approximation l'ordre de grandeur supposé.

Figure 11 : Débit fictif de ruissellement à Saulon et pluies efficaces mensuelles



#### ÉTANGS ET ZONES HUMIDES

On peut supposer en première approximation que les étangs et zones humides représentent des zones de pertes pour la nappe.

Rappelons que les gravières ont un impact quantitatif sur la ressource par évaporation. Le volume "perdu" pour la recharge de la nappe peut être estimé de la façon suivante :

$$Q = P - E - I(Sr)$$

Dans une gravière, la lame d'eau infiltrée correspond à la différence entre évaporation et pluie (absence d'évapotranspiration et de ruissellement). L'évaporation peut être estimée par des formules empiriques fonction de la température de l'air et de la surface évaporante, du rayonnement net, de la vitesse du vent, de la pression atmosphérique, .....

De plus, selon cette approche, il est nécessaire d'estimer les volumes perdus, suite à la suppression de la recharge de la nappe sur les surfaces occupées par les gravières. En effet, initialement des flux d'eau alimentaient la nappe et ils ont été supprimés. Ils sont calculés classiquement par des formules de type :

$$I(Sr) = P - ETP - R$$

Dans cette formule, on suppose négligeables pour les échelles de temps qui nous intéressent, les phénomènes de stockage d'eau dans le sol...

Dans le cadre de cette étude, nous avons réalisé les démarches suivantes :

- (1) Demande auprès de METEO FRANCE pour obtenir les valeurs d'évaporation estimées sur une décennie au droit du secteur d'étude (Station météorologique de Dijon-Longvic). Moyenne annuelle de 2000 à 2009 : 965 mm
- (2) Estimation de la surface cumulée des gravières/plans d'eau par analyse des cartes IGN au 1 : 25 000. La surface cumulée est estimée à environ 0,4 km<sup>2</sup> (soit environ 40 hectares).

Ce qui permet de proposer une perte pour la nappe de l'ordre de 160 000 m<sup>3</sup> par an. Soit un débit fictif de l'ordre de 5 l/s.

### 3.1.3 Synthèse

Ce travail préliminaire pour définir une moyenne des flux entrants et sortants de l'aquifère sur une période allant de 2006 à 2009 permet de proposer le bilan suivant :

Entrées :

- ▶ Recharge par infiltration des eaux de pluie (150 mm/an) sur l'impluvium : environ 170 l/s
- ▶ Alimentation par la nappe de l'Ouche : environ 100 l/s
- ▶ Alimentation par le karst bordier : environ 400 l/s

Sorties :

- ▶ Prélèvements : environ 170 l/s
- ▶ Exutoire nappe profonde : environ 25 l/s
- ▶ Zone d'exutoire de la Cent Fonts : 200 l/s
- ▶ Pertes par évaporation des étangs : environ 5 l/s

On s'aperçoit que ce bilan est fortement déséquilibré : + 200 l/s en surplus d'alimentation.

On peut considérer que la valeur la plus incertaine concerne la valeur des alimentations par les karsts bordiers. Elle est probablement plus proche de 200 l/s. Ce qui conduit à minorer les débits d'injection initialement proposés à 30 l/s pour les zones de venues sous-alluviales.

Rappelons le caractère exploratoire de la démarche :

- ▶ Il s'agit d'une synthèse basée sur des estimations approximatives. Les erreurs se cumulent donc.
- ▶ Il s'agit d'établir un instantané, avec toutes les limites que cela comporte. Rappelons notamment le fait que les alimentations entre différentes masses d'eau dépendent directement des gradients hydrauliques; ce qui signifie qu'en période de forte baisse piézométrique, les débits d'échange augmenteront nécessairement. Dit autrement, une partie de la surexploitation de l'aquifère peut être temporairement compensée par une augmentation des apports latéraux.

Seule la modélisation en régime transitoire permettra d'affiner la description de ces phénomènes.

## 3.2 CONSTRUCTION DU MODELE

### 3.2.1 Maillage

Le maillage du modèle s'est fait selon les orientations retenues dans la stratégie de modélisation :

Les mailles ont les dimensions suivantes dans le plan horizontal : 250x250 m.

Afin de bien intégrer les variations du mur de l'aquifère et de bien représenter la couche moutarde, la dimension des mailles selon la verticale est de 10 m. Le domaine modélisé est compris entre 150 et 260 m NGF.

On a ainsi :

- ▶ Selon X, 27 colonnes soit 6 750 m de largeur.
- ▶ Selon Y, 52 lignes soit 13 000 m de longueur.
- ▶ Selon Z, 11 couches soit 110 m d'épaisseur.

Soit un total d'environ 15 000 mailles.

### 3.2.2 Reproduction du modèle hydrogéologique conceptuel

Dans un premier temps, afin de représenter correctement le modèle hydrogéologique, nous avons introduit cinq classes de roche dans le modèle. Chaque classe de roche est définie par des paramètres hydrodynamiques spécifiques.

Le tableau ci-dessous montre les valeurs de perméabilité initialement retenues :

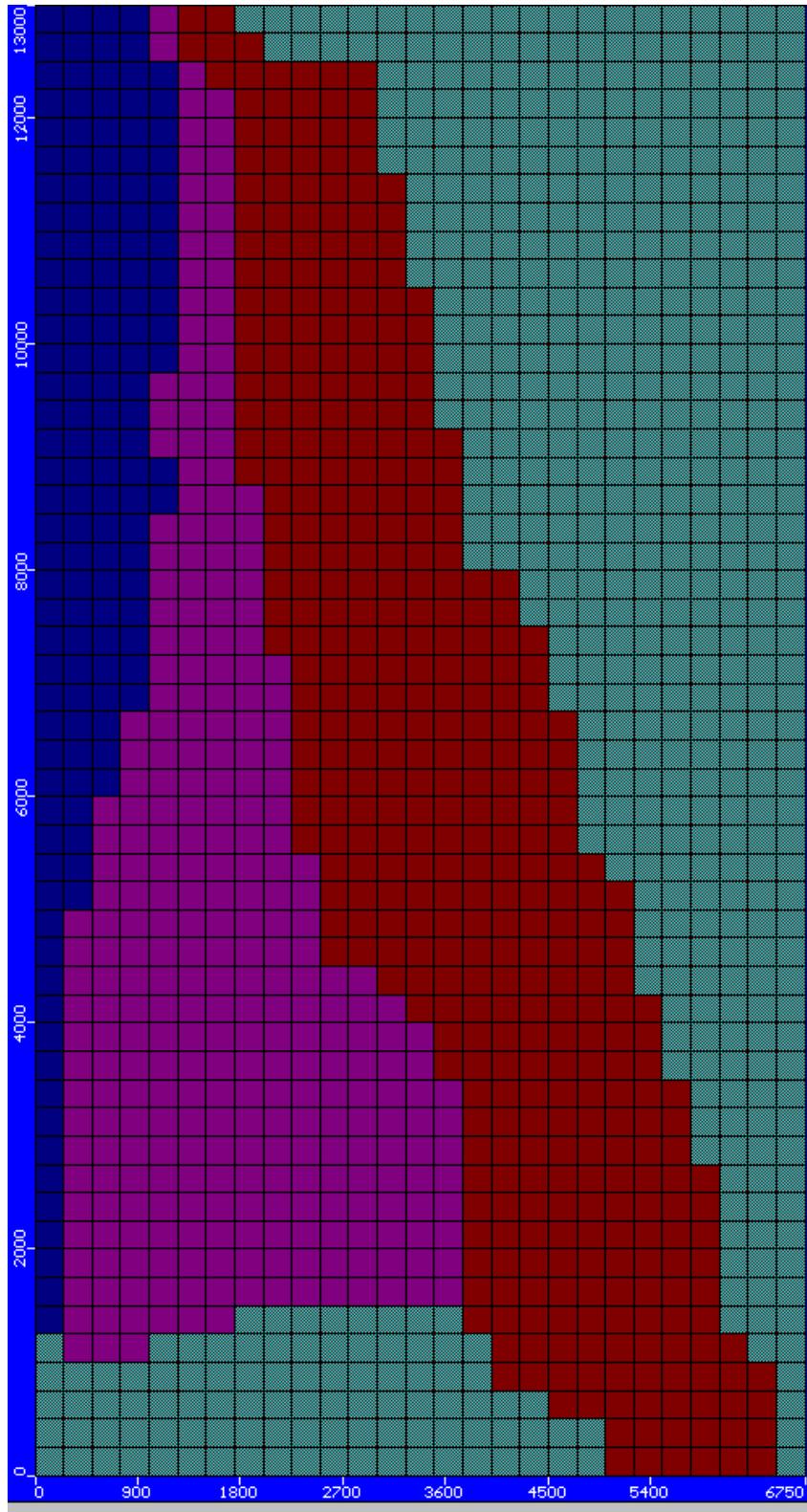
Nature	Code couleur	Kx	Ky	Kz
Calcaires jurassiques		<i>10<sup>-6</sup></i>	<i>10<sup>-6</sup></i>	<i>10<sup>-6</sup></i>
Graviers -Aquifère prof.		2.10 <sup>-4</sup>	2.10 <sup>-4</sup>	2.10 <sup>-4</sup>
Couche moutarde		<i>10<sup>-7</sup></i>	<i>10<sup>-7</sup></i>	<i>10<sup>-7</sup></i>
Graviers - Aquifère sup.		5.10 <sup>-3</sup>	5.10 <sup>-3</sup>	5.10 <sup>-3</sup>
Conglomérats oligocènes		<i>10<sup>-5</sup></i>	<i>10<sup>-5</sup></i>	<i>10<sup>-5</sup></i>

Seules les valeurs moyennes de perméabilité des graviers peuvent être déduites de mesures in situ. Les valeurs en italique correspondent à des hypothèses.



Figure 13 : Exemple de vue plan du modèle numérique (entre 220 et 230 m NGF).

Attention, les cellules figurées en vert-bleu correspondent à des cellules inactives (et non à la couche moutarde).



### 3.2.3 Introduction des conditions aux limites

Conformément aux analyses développées ci-avant, les conditions aux limites implémentées dans le modèle numérique sont les suivantes :

- ▶ Ouche et limite Nord de la nappe au droit du Lac Kir : limite à charge constante comprise entre 238 et 235 m NGF.
- ▶ Oligocène marneux imperméable : cellules inactives (absence d'écoulement).
- ▶ Imposition d'une limite à charge constante de 255 m NGF sur les cellules de la bordure Ouest.
- ▶ Afin de représenter les impacts des prélèvements en nappe profonde, plus au Sud de Barges, nous avons introduit un puits fictif sur la limite Sud du domaine modélisé, dont le débit moyen a été estimé par la Loi de darcy à 25 l/s. Rappelons le caractère fictif du puits : il est introduit uniquement pour pouvoir représenter la piézométrie observée en nappe profonde. La réalité physique de ce flux reste sujette à discussion : flux naturel (exutoire plus au Sud, drainance ascendante,..) ou flux artificiel (prélèvements anthropiques). Ce choix en terme de modélisation a été contraint par la non possibilité de simuler une condition aux limites de type charge variable sur la limite Sud de la nappe profonde ; introduire une limite à charge constante aurait trop "rigidifier" le modèle.
- ▶ Recharge par infiltration des eaux de pluie sur l'impluvium à 150 mm/an (soit 170 l/s) en régime permanent.
- ▶ Introduction de trois forages d'injection avec des débits moyens de 30 l/s pour représenter les venues sous-alluviales en régime permanent.
- ▶ Introduction des forages AEP avec des valeurs de débit correspondant aux moyennes 2006-2009.
- ▶ La zone des étangs est représentée par des mailles de perméabilité très élevée, égale à 0,1 m/s, avec introduction de deux puits fictifs cumulant 5 l/s pour représenter les pertes par évaporation.

La représentation de la zone d'exutoire de la Cent Fonts est nécessairement complexe. Nous avons dans un premier temps choisi la stratégie suivante :

1. Introduction de mailles de perméabilité très élevée, égale à 0,1 m/s, sur le tracé de la rivière Cent Fonts. Cet artifice numérique permet de représenter le rôle joué par une rivière.
2. Introduction de condition de type limites à charge constante (215 m NGF) en bordure du domaine modélisé, là où le ruisseau "quitte" le modèle.
3. fermeture des écoulements vers le Sud au dessus de 200 m NGF par l'affectation de la condition no flow aux mailles situées au delà des limites de la nappe superficielle.

Comme cela avait été annoncé dans la stratégie de modélisation, une telle configuration implique une forte imprécision quant à la représentation du champ de pression dans la zone des résurgences. Mais d'un point de vue quantitatif, elle présente l'avantage de concentrer la totalité des écoulements dans la zone d'exutoire.

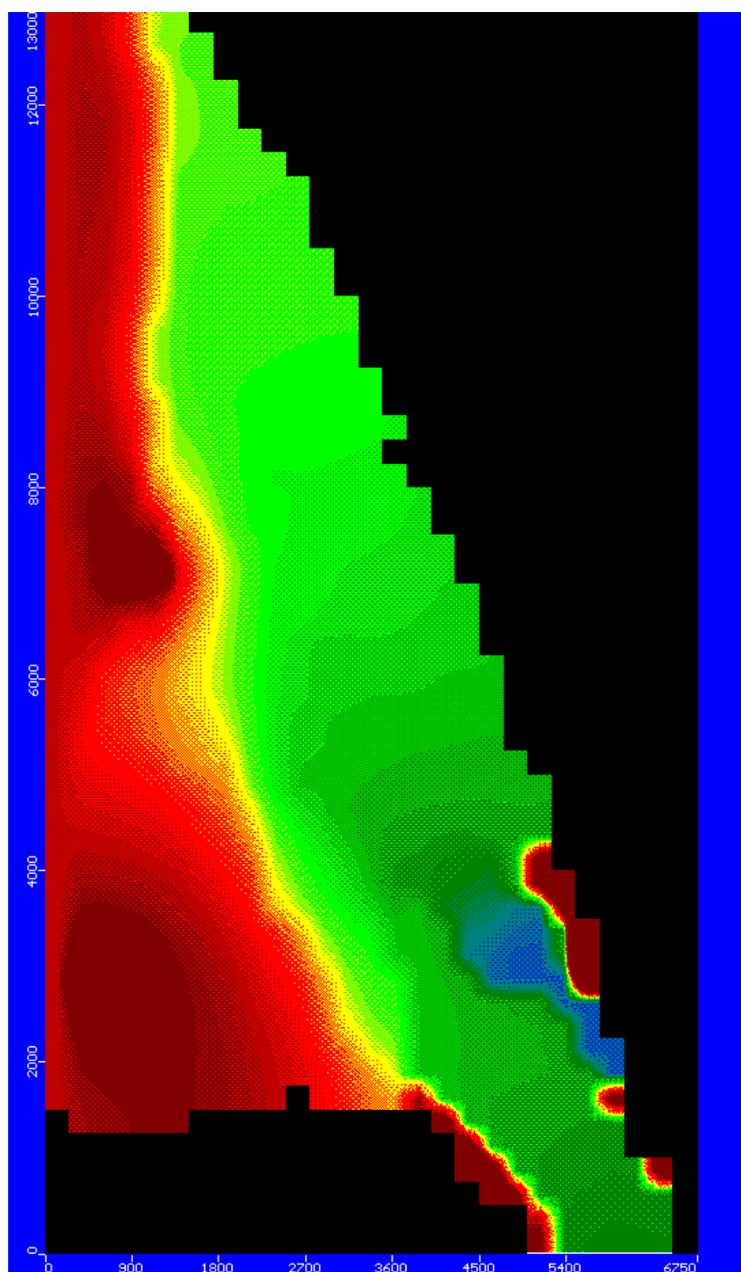
### 3.3 CALAGE EN REGIME PERMANENT

#### 3.3.1 Corrections $\alpha$

L'objectif de cette phase est de travailler sur la première construction du modèle numérique, pour analyser ses forces et ses faiblesses. En fonction de cette première analyse, on peut ainsi être amené à redéfinir certaines hypothèses sur les conditions aux limites, qui avaient initialement guidé sa construction.

Le champ de pression généré par la version 0 du modèle numérique est présenté dans la figure ci-dessous.

Figure 14 : Distribution du champ de pression  $\alpha$  (entre 220 et 230 m NGF).



## PREMIERES MODIFICATIONS

Ce premier calage en régime permanent montre la cohérence des simulations. Globalement, le modèle est stable et le champ de pression simulé correspond en première approximation au champ de pression mesuré. On observe quelques effets de bord (anomalies avec des surpressions locales) mais elles sont sans conséquence sur les flux ; nous avons vérifié qu'il s'agit bien d'artefact numérique (absence d'écoulement).

Ceci étant, pour éviter les instabilités numériques, le modèle hydrogéologique initialement implémenté a été complexifié en introduisant de façon systématique une maille de perméabilité médiocre (égale à la perméabilité des graviers de l'aquifère profond) entre les mailles de conglomérats oligocènes et les mailles des graviers de l'aquifère superficiel.

Dans le détail, la stratégie de modélisation initiale fait apparaître quelques anomalies :

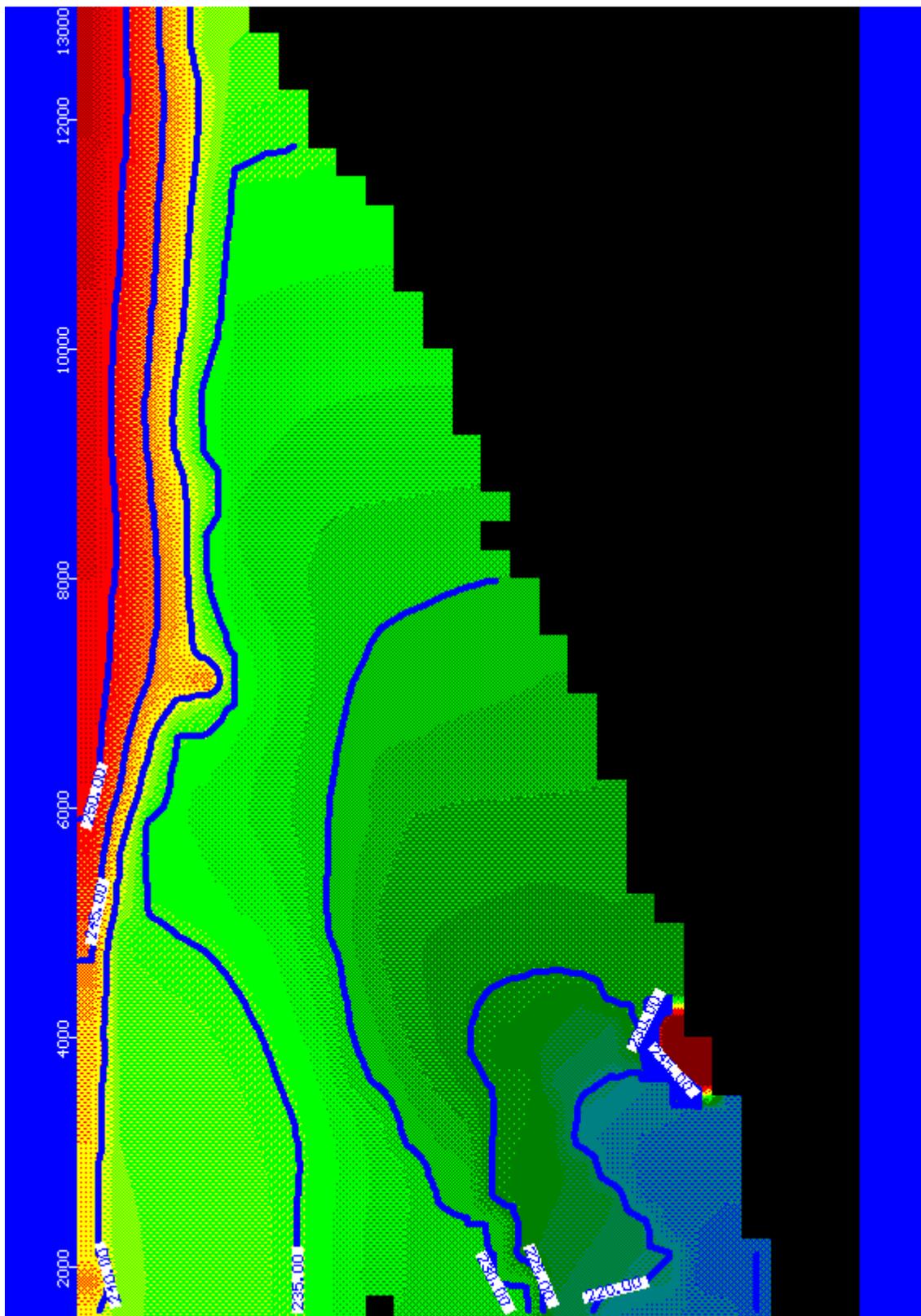
- ▶ La piézométrie est mal représentée sur la bordure Ouest. L'introduction de forage d'injection censés représenter les venues sous alluviales dans les séries oligocènes induit des bulbes de pression allant jusqu'à 270 m NGF, ce qui est totalement irréaliste.
- ▶ L'effet des étangs en matière de rabattement sur la piézométrie est mal représenté. Les observations montrent une piézométrie proche de 225 m NGF au niveau du grand Étang de Satenay. Le modèle propose une piézométrie de l'ordre de 235 m NGF.

La première anomalie a été étudiée en introduisant un gradient linéaire de charge du Nord vers le Sud de 255 à 240 m NGF, sur la bordure Ouest du domaine modélisé. Nous avons de plus supprimer le puits fictif le plus au Sud, censé représenter une venue sous-alluviale ; en effet, implanté dans une zone de faible perméabilité, il créait de manière artificielle un bulbe de surpression sans réalité physique.

Pour représenter correctement la piézométrie autour des étangs, il a été nécessaire de conjuguer deux effets :

1. Augmentation de la perméabilité autour des étangs pour éviter des divergences numériques (création artificielle d'un gradient "lissé" de perméabilités).
2. Augmentation des débits de pompage des puits fictifs jusqu'à 7 l/s. Il n'a pas été possible de majorer les débits au-delà de cette valeur sans créer des effets de bord. Cette majoration des débits initialement estimés à 5 l/s nous semble acceptable. Elle pourrait s'expliquer par une évapotranspiration forte dans les zones humides en sus de la stricte évaporation et par un débit de fuite vers le Chairon.

Au final, cette anomalie n'est donc que partiellement corrigée. Notons cependant que son impact sur la capacité du modèle numérique à représenter correctement les aspects quantitatifs est négligeable.

Figure 15 : Distribution du champ de pression  $\beta$  (entre 220 et 230 m NGF).

Le bilan donné par une simulation  $\beta$  est le suivant :

Entrées :

- ▶ Recharge par infiltration des eaux de pluie sur l'impluvium : environ 170 l/s.
- ▶ Alimentation par la nappe de l'Ouche : environ 150 l/s.
- ▶ Alimentation par le karst bordier
  - Recharge "permanente" : 15 l/s
  - Venues sous-alluviales "temporaires" : 60 l/s.

Sorties :

- ▶ Prélèvements : environ 175 l/s.
- ▶ Exutoire nappe profonde : environ 25 l/s.
- ▶ Zone d'exutoire de la Cent Fonts : 190 l/s.
- ▶ Pertes par évaporation des étangs : environ 7 l/s.

En première approximation, ce bilan est équilibré dans les grandes masses. Nous avons cependant réalisé des tests complémentaires afin de mieux comprendre les dynamiques des flux entrants et sortants du domaine modélisé.

#### TESTS COMPLEMENTAIRES SUR LES FLUX ENTRANTS

Notons une interrogation forte par rapport au modèle hydrogéologique conceptuel : une minoration des alimentations "permanentes" en provenance du karst qui semble être compensée par une suralimentation des eaux en provenance de l'appareil alluvial de l'Ouche.

Des tests complémentaires ont été réalisés pour comprendre ce processus :

#### (1) Minoration de la lame d'eau météorique infiltrée à 100 mm/an.

On obtient le bilan suivant, à comparer avec la simulation de référence  $\beta$  :

		$\beta$	le = 100 mm/an
Entrées	Recharge par infiltration des eaux de pluie	170 l/s	115 l/s
	Alimentation par la nappe de l'Ouche	Environ 150 l/s	Environ 165 l/s
	Alimentation diffuse du karst	15 l/s	15 l/s
	Alimentations localisées du karst	60 l/s	60 l/s
Sorties	Prélèvements	Environ 175 l/s	Environ 175 l/s
	Q nappe profonde	Environ 25 l/s	Environ 25 l/s
	Zone exutoire Cent Fonts	190 l/s	150 l/s
	Q étangs	Environ 7 l/s	Environ 7 l/s

On s'aperçoit que le déficit de recharge se traduit par une baisse de débit dans la zone d'exutoire de la Cent Fonts. La relation n'est pas totale : le déficit de recharge a été partiellement compensé par des venues d'eau supérieures des masses d'eau en interaction et principalement de l'Ouche.

En effet, une diminution de l'apport d'eaux météoriques se traduit par une baisse relative du niveau piézométrique dans l'aquifère superficiel. Or, cette baisse va augmenter significativement le gradient hydraulique entre la nappe superficielle et la masse d'eau Ouche ( $\Delta H = -1$  m implique une variation de 30% pour un gradient de 0.2% dans la zone d'échange entre les deux nappes). C'est moins le cas pour le gradient entre la nappe et la masse d'eau karstique qui est normalement très élevé, de par la faible perméabilité des séries oligocènes positionnées en relais ( $\Delta H = -1$  m implique une variation de 3% pour un gradient de 2% dans la zone d'échange entre les deux nappes).

### (2) Augmentation de la perméabilité des calcaires.

On peut juger que les apports "réguliers" en provenance du karst sont relativement faibles. Nous avons donc testé l'impact de l'introduction d'une perméabilité égale à  $10^{-5}$  m/s. Le bilan donné par cette simulation est le suivant :

		$\beta$	$le = 100$ mm/an	$Kj=10^{-5}$ m/s
Entrées	Recharge par infiltration des eaux de pluie	170 l/s	115 l/s	170 l/s
	Alimentation par la nappe de l'Ouche	Environ 150 l/s	Environ 165 l/s	Environ 130 l/s
	Alimentation diffuse du karst	15 l/s	15 l/s	70 l/s
	Alimentations localisées du karst	60 l/s	60 l/s	60 l/s
Sorties	Prélèvements	Environ 175 l/s	Environ 175 l/s	Environ 175 l/s
	Q nappe profonde	Environ 25 l/s	Environ 25 l/s	Environ 25 l/s
	Zone exutoire Cent Fonts	190 l/s	150 l/s	220 l/s
	Q étangs	Environ 7 l/s	Environ 7 l/s	Environ 7 l/s

Ce test montre la cohérence du modèle. Augmenter la perméabilité des karsts bordiers contribue à augmenter leur alimentation, ce qui conduit à une majoration des débits de la Cent Fonts. Cette option n'implique pas de modification importante de la piézométrie dans l'aquifère cible.

(3) Les apports en provenance de la nappe alluviale de l'Ouche sont importants car ils traduisent les hypothèses de construction du modèle : introduction d'une perméabilité égale à celle de l'aquifère superficiel, imposition d'un gradient de charge (campagne ANTEA 2010) et d'une épaisseur mouillée (dans le secteur des Gorgets), conformes aux observations de terrain. Il est probable que la perméabilité de la nappe alluviale moderne de l'Ouche soit inférieure à celle des dépôts de la paléo-Ouche.

Nous avons donc testé l'introduction de perméabilité égale à  $1.10^{-4}$  m/s pour les mailles correspondantes. Cette hypothèse conduit à "assécher" de manière artificielle le champ captant des Gorgets.

L'introduction d'une perméabilité réduite d'un facteur 10 donne le bilan suivant ( $5.10^{-4}$  m/s) :

		$\beta$	le = 100 mm/an	KJ= $10^{-5}$ m/s	KQ= $5.10^{-4}$ m/s
Entrées	Recharge par infiltration des eaux de pluie	170 l/s	115 l/s	170 l/s	170 l/s
	Alimentation par la nappe de l'Ouche	Environ 150 l/s	Environ 165 l/s	Environ 130 l/s	Environ 130 l/s
	Alimentation diffuse du karst	15 l/s	15 l/s	70 l/s	20 l/s
	Alimentations localisées du karst	60 l/s	60 l/s	60 l/s	60 l/s
Sorties	Prélèvements	Environ 175 l/s	Environ 175 l/s	Environ 175 l/s	Environ 175 l/s
	Q nappe profonde	Environ 25 l/s	Environ 25 l/s	Environ 25 l/s	Environ 25 l/s
	Zone exutoire Cent Fonts	190 l/s	150 l/s	220 l/s	175 l/s
	Q étangs	Environ 7 l/s	Environ 7 l/s	Environ 7 l/s	Environ 7 l/s

Le bilan est peu modifié par cette hypothèse.

Pourtant, réduire la perméabilité d'un facteur 10 devrait théoriquement réduire d'un facteur 10 les flux entrants dans le domaine modélisé. Or la baisse observé des flux entrants par cette limite est de seulement 15%. Si l'on analyse dans le détail, on s'aperçoit en fait que cette baisse de perméabilité a été compensée par une accentuation du gradient hydraulique entre la limite et la maille de pompage correspond au champ captant des Gorgets (forte baisse du niveau piézométrique sur cette maille). Ce qui montre que la majorité des entrées d'eau sur la limite Ouche du modèle vont alimenter le champ captant des Gorgets (débit fictif de 93 l/s pour mémoire). L'excédent va alimenter le réservoir de Dijon Sud qui est donc secondairement impacté par une baisse de perméabilité des alluvions modernes de l'Ouche.

Synthèse :

Au vu des résultats apportés par cette série de tests préliminaires, les hypothèses suivantes ont été conservées pour les modélisations en régime permanent :

- ▶ Infiltration efficace à 150 mm/an (soit 170 l/s en débit fictif).
- ▶ Introduction d'une perméabilité de l'ordre de  $5.10^{-4}$  m/s au droit de l'appareil alluvial moderne de l'Ouche. C'est un choix guidé non par les résultats des tests préliminaires mais par un souci de cohérence géologique.

#### TESTS COMPLEMENTAIRES SUR LES FLUX SORTANTS

Nous avons réalisé des tests complémentaires pour valider la représentativité de la zone de résurgence de la Cent Fonts :

- ▶ L'introduction de perméabilité différente (facteur 10) pour les mailles de "rivière" modifie peu le volume exporté hors du modèle. Avec  $K=0,5$  m/s, le débit fictif est de 195 l/s. Avec  $K=0.05$  m/s, il est de 180 l/s. Ce volume est donc principalement déduit de la mise en équilibre des conditions aux limites qui vont permettre l'importation d'un certain volume d'eau dans le modèle (et non des perméabilités des mailles drainantes).
- ▶ L'introduction de conditions aux limites de type "drains" ou "rivière" n'apporte pas de gain supplémentaire en terme de représentation des phénomènes. Au contraire, on complexifie leur simulation par l'introduction de deux nouveaux paramètres de calage : la conductance qui est un paramètre censé arbitrer les échanges nappe-rivière (paramètre sans réalité physique mesurable) et le fil de l'eau qui est susceptible de varier dans le temps.

Nous avons donc fait le choix de garder les conditions aux limites initiales pour la zone de résurgence de la Cent Fonts.

### 3.3.2 Analyse de sensibilité

#### PRINCIPES

Une fois le modèle construit, nous avons réalisé une série de tests paramétriques pour appréhender la sensibilité du modèle aux principales inconnues identifiées susceptibles d'impacter le bilan :

- ▶ Perméabilité de la couche moutarde.
- ▶ Perméabilité des séries détritiques de l'Oligocène.
- ▶ Perméabilité des séries carbonatées du Jurassique

La perméabilité de l'aquifère profond n'a pas été étudiée dans cette phase-ci, car elle fera nécessairement l'objet d'investigations lors de la phase de calage.

Chaque inconnue a été étudiée en prenant deux ou trois valeurs hypothèses dans la limite des valeurs probables.

Les analyses de sensibilité utilisent un formalisme classique typique des plans d'expériences. D'une manière schématique, un modèle peut être décrit comme une boîte noire qui va produire un nombre  $n$  de paramètres de sortie (output) en fonction des  $m$  paramètres d'entrée (input) qui lui seront soumis. Dans cette étude, les input et les output seront respectivement désignés comme paramètres numériques et grandeurs physiques.

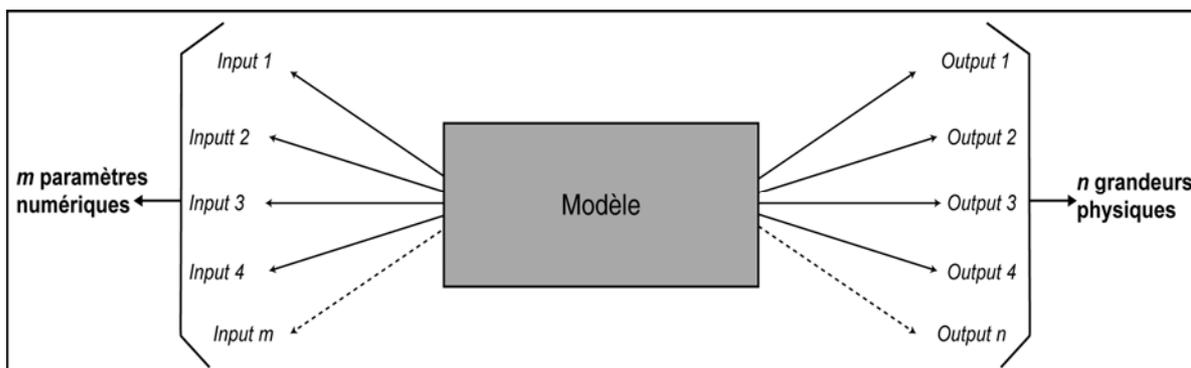
La démarche d'analyse de la sensibilité des grandeurs physiques simulées par les modèles aux paramètres numériques peut être décomposée en quatre étapes :

- ▶ *Définition des ordres de grandeur des paramètres numériques.* Le modèle analysé est un modèle déterministe. Les paramètres numériques sur lesquels il est basé ont donc une signification physique, ce qui autorise une détermination a priori des valeurs minimales et maximales qu'ils sont susceptibles de prendre.

- ▶ *La définition de niveaux d'intensité.* La comparaison des effets des différents paramètres numériques sur les grandeurs physiques simulées, nécessite le recours à une notation basée sur la notion d'intensité de paramètre. Cette dernière repose arbitrairement sur les conventions suivantes : un paramètre présente une intensité de 1 lorsqu'il est égal à sa valeur minimale potentielle, une intensité de 2 lorsqu'il est égal à une valeur intermédiaire de l'intervalle, une intensité de 3 lorsqu'il est égal à sa valeur potentielle maximale.
- ▶ *Les simulations proprement dites.* Les simulations sont réalisées pour chacune des combinaisons possibles des intensités de paramètres. Par exemple, l'analyse de sensibilité d'un modèle utilisant 5 paramètres numériques définis par 2 niveaux d'intensité, nécessitera la réalisation d'un nombre de simulation de  $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 32$  simulations.
- ▶ *La détermination des effets.* Afin d'analyser quantitativement le degré d'influence de chacun des paramètres numériques, une analyse globale de la variance doit être réalisée. Il s'agira alors de définir les outputs significatifs et d'étudier leur sensibilité aux combinaisons testées.

Ce type d'approche permet de statuer sur la sensibilité du modèle aux paramètres inconnus et sur leurs éventuelles interactions. C'est une phase indispensable pour contraindre la phase de calage de façon rationnelle.

Figure 16 : Schéma simplifié du fonctionnement d'un modèle.



L'influence des paramètres incertains a donc été étudiée en prenant deux ou trois valeurs hypothèses dans la limite des valeurs potentielles :

	I=1	I=2	I=3
Perméabilité de la couche moutarde.	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$
Perméabilité des séries détritiques de l'Oligocène.	$5.10^{-4}$	$5.10^{-5}$	$5.10^{-6}$
K des séries carbonatées du Jurassique	$10^{-5}$	$5.10^{-6}$	$10^{-6}$

Les variables de sortie étudiées sont les suivantes :

- ▶ Débit de la zone de résurgence de la Cent Fonts.
- ▶ Cote au piézomètre Gendarmerie.
- ▶ Cote piézométrique de la nappe profonde à Barges.

## CALCUL DES EFFETS

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Id	Paramètres entrée			Paramètres de sortie			
	K moutarde	K oligocène	K Jurassique	Q Cent Fonts		NP Gend.	NP Prof.
	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m <sup>3</sup> /j)	(l/s)	(m NGF)	(m NGF)
1	1.E-06	5E-04	1.E-05	24500	284	233.9	210.4
2	1.E-06	5E-04	5E-06	21000	243	233.1	209.6
3	1.E-06	5E-04	1E-06	17500	203	232.2	209
4	1.E-06	5E-05	1.E-05	19100	221	233.1	208.9
5	1.E-06	5E-05	5E-06	17500	203	232.8	208.8
6	1.E-06	5E-05	1E-06	15700	182	232.1	208.7
7	1.E-06	5E-06	1.E-05	16500	191	232.4	208.5
8	1.E-06	5E-06	5E-06	15900	184	232.2	208.5
9	1.E-06	5E-06	1E-06	15400	178	232	208.5
10	1.E-07	5E-04	1.E-05	23100	267	234.1	213.6
11	1.E-07	5E-04	5E-06	20100	233	233.3	212.7
12	1.E-07	5E-04	1E-06	16700	193	232.2	211
13	1.E-07	5E-05	1.E-05	18600	215	233.4	210.9
14	1.E-07	5E-05	5E-06	16900	196	233	210.6
15	1.E-07	5E-05	1E-06	15200	176	232.5	210.4
16	1.E-07	5E-06	1.E-05	16300	189	232.6	209.9
17	1.E-07	5E-06	5E-06	15800	183	232.4	209.9
18	1.E-07	5E-06	1E-06	15200	176	232.1	209.9
19	1.E-08	5E-04	1.E-05	22100	256	234.1	211.4
20	1.E-08	5E-04	5E-06	19400	225	233.5	210.6
21	1.E-08	5E-04	1E-06	16300	189	232.6	209.1
22	1.E-08	5E-05	1.E-05	17800	206	233.6	211.1
23	1.E-08	5E-05	5E-06	16200	188	233	210.6
24	1.E-08	5E-05	1E-06	14800	171	232.6	210.6
25	1.E-08	5E-06	1.E-05	16100	186	232.7	212.5
26	1.E-08	5E-06	5E-06	15600	181	232.5	212.5
27	1.E-08	5E-06	1E-06	15000	174	232.3	212.5

Notons que les simulations pour lesquelles K oligocène =  $5 \cdot 10^{-6}$  ont toutes montré des problèmes de convergence.

En première lecture, ces résultats illustrent la cohérence du modèle numérique :

- ▶ Selon le modèle hydrogéologique construit, on observe une drainance ascendante (alimentation de la nappe superficielle par la nappe profonde). Cette observation est contraire aux dernières mesures piézométriques qui montrent une drainance descendante. Ceci étant, à ce stade de la modélisation, plus la couche moutarde est imperméable, moins le débit de drainance de l'aquifère profond vers l'aquifère superficiel est élevé. Ce qui se traduit et par une diminution des écoulements au droit de la zone de résurgence de la Cent Fonts et par une augmentation de la pression dans la nappe profonde.
- ▶ Le débit de la zone de résurgence de la Cent Fonts est fortement contrôlé et par la perméabilité affecté aux formations carbonatées du Jurassique et par la perméabilité affectée aux séries détritiques de l'Oligocène. Notons l'effet de "filtre" joué par la perméabilité de l'Oligocène sur l'influence de la perméabilité du Jurassique. Si l'on attribue une faible perméabilité aux séries de l'Oligocène, le gain de majoration des perméabilités du Jurassique est amorti, voire dissipé.

Afin de réaliser une analyse plus approfondie de ces résultats, nous avons réalisé une analyse de variance.

L'analyse des effets des paramètres permet d'approcher la proportion de la variabilité d'une grandeur physique expliquée par chacun des paramètres numériques, toutes choses étant égales par ailleurs. Dans cette étude, la variabilité explicative  $Ve$  (exprimée en %) d'un paramètre  $A$  à l'intensité  $i$ , vis à vis d'une grandeur physique  $\alpha$ , a été calculée à l'aide de la formule suivante :

$$Ve = \frac{\frac{\sum_{k=1}^n \alpha_{Eki}}{n} - M}{M}$$

Avec  $n$  le nombre de simulations pour lesquelles  $A$  présente une intensité  $i$ , et  $M$  la moyenne des  $\alpha$  pour l'ensemble des simulations réalisées.

Les effets sont présentés dans les figures ci-dessous.

Le débit de la Cent Fonts est relativement sensible à tous les paramètres numériques testés (+/- 15%). On observe que la variabilité explicative du débit de la Cent Fonts dans le cadre de ces investigations, est d'abord liée à la valeur de perméabilité attribuée aux séries oligocènes détritiques.

Le niveau piézométrique de la nappe superficielle est en première approximation peu sensible aux variations des paramètres numériques testés ( $Ve < 1\%$ ). Les influences des paramètres numériques testés sur cette grandeur physique sont du même ordre de grandeur. Ce résultat ne doit pas être considéré comme surprenant : en régime permanent, le niveau piézométrique d'un chenal de perméabilité uniforme (comme cela a été représenté pour la nappe superficielle) se traduit nécessairement par un contrôle du niveau piézométrique par les conditions imposées aux limites du chenal.

Figure 17 : Sensibilité du débit de la zone de résurgence de la Cent Fonts aux paramètres numériques testés.

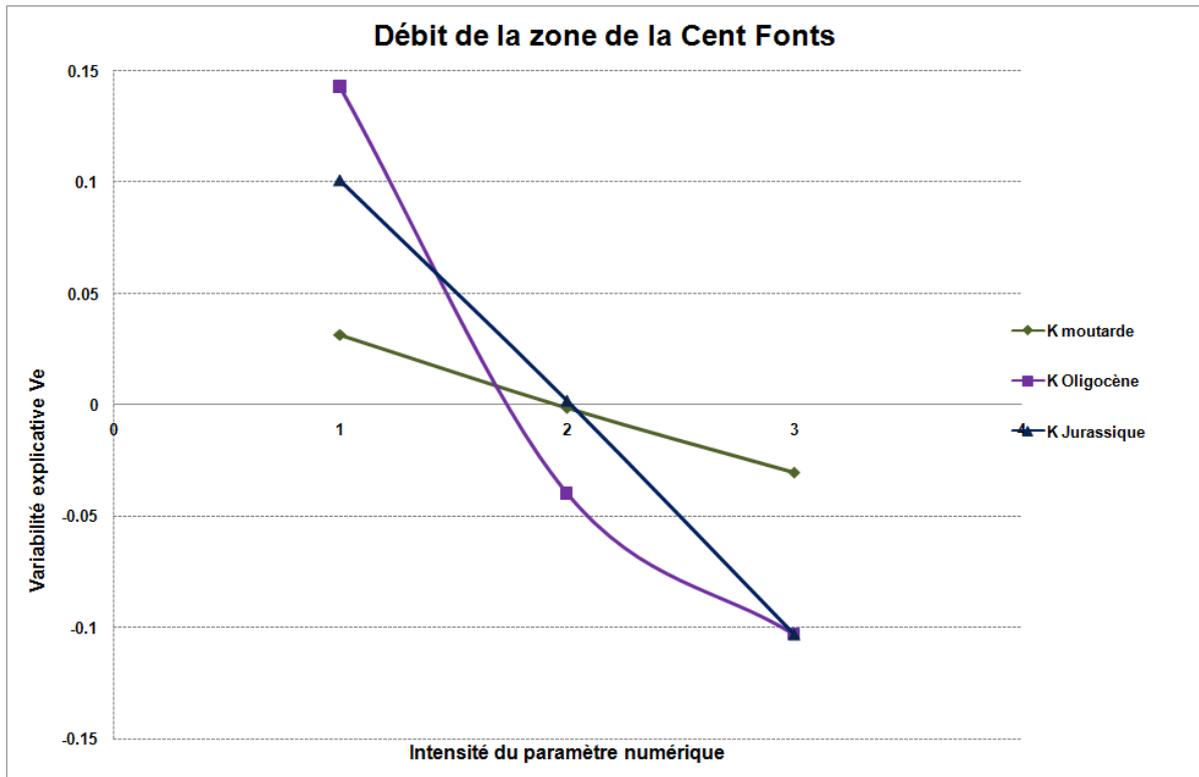


Figure 18 : Sensibilité de la piézométrie de la nappe superficielle aux paramètres numériques testés.

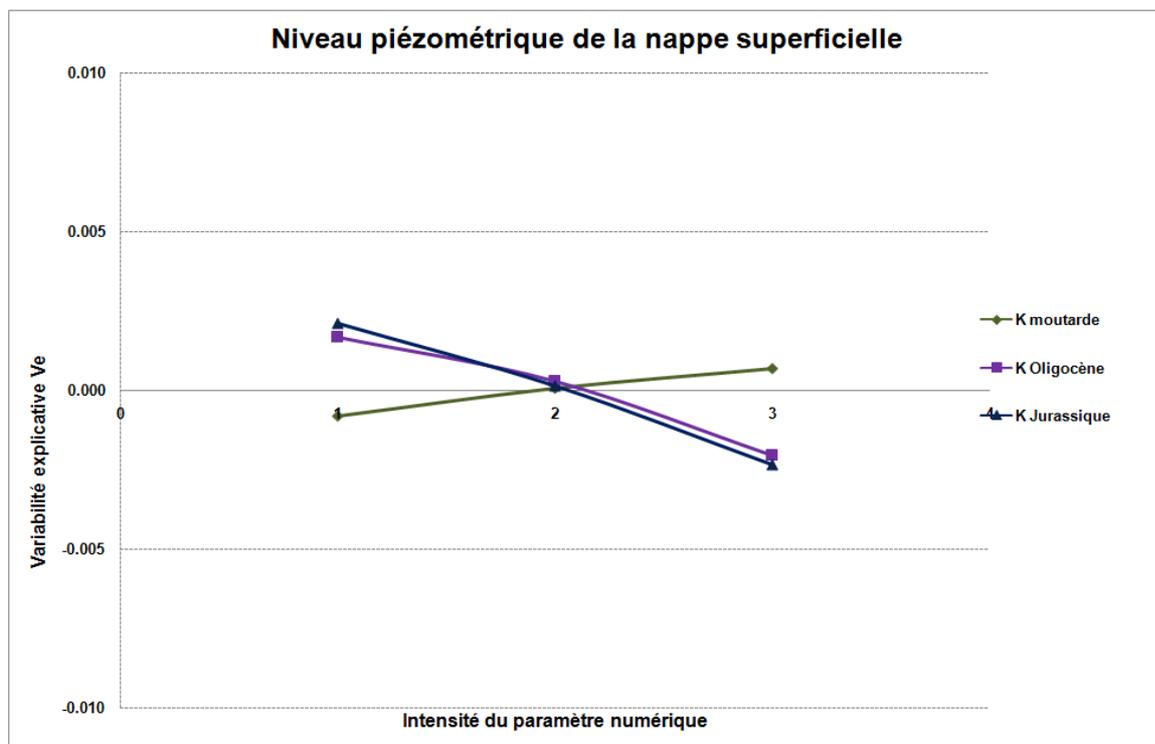
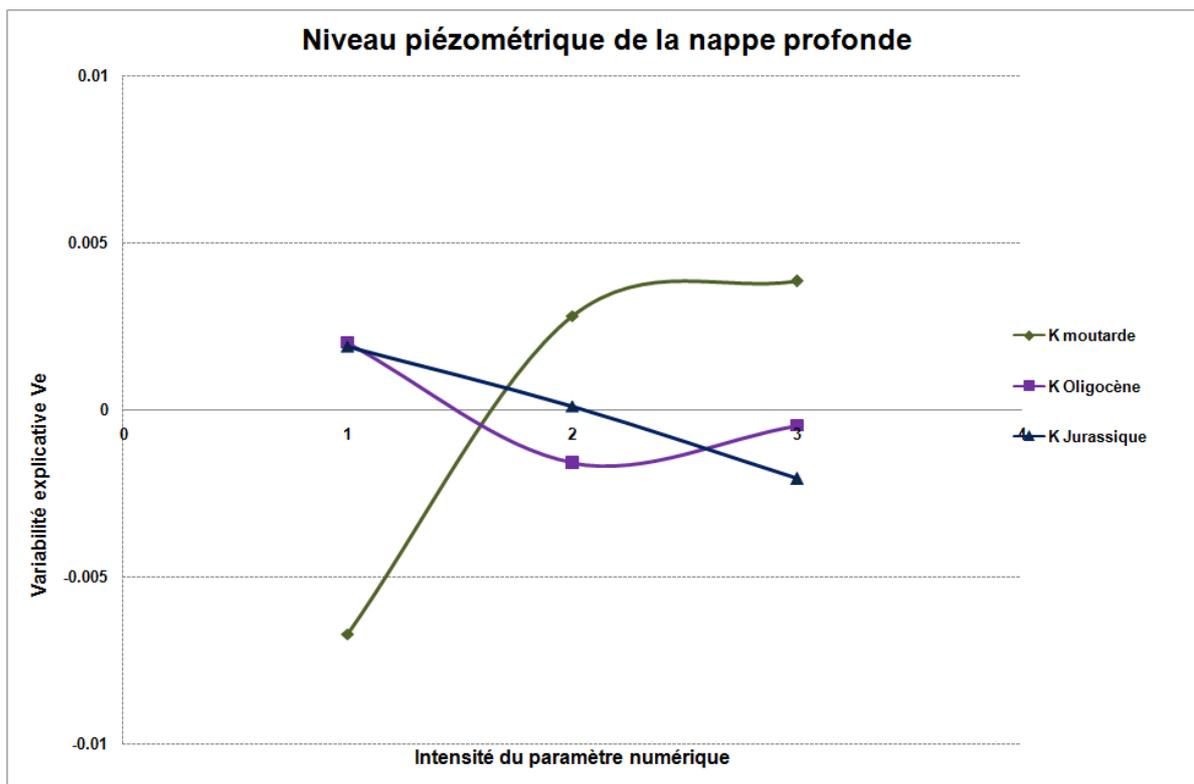


Figure 19 : Sensibilité de la piézométrie de la nappe profonde aux paramètres numériques testés.



Le niveau piézométrique de la nappe profonde est en première approximation peu sensible aux variations des paramètres numériques testés ( $V_e < 1\%$ ). Notons cependant l'influence majeure de la perméabilité de la couche moutarde sur ce paramètre physique.

#### SYNTHESE

Cette analyse de sensibilité permet de proposer quelques orientations méthodologiques pour le calage en régime permanent :

- ▶ Le calage du débit de la zone de résurgence de la Cent Fonts doit se faire principalement en ajustant la valeur de perméabilité des séries détritiques de l'Oligocène.
- ▶ Si le calage de la piézométrie de la nappe superficielle n'est pas satisfaisant en première approche, il sera nécessaire de modifier soit la valeur de pluie efficace annuelle, soit la perméabilité des séries graveleuses de l'aquifère superficiel.
- ▶ Le calage de la piézométrie de la nappe profonde s'appuiera principalement sur une modification de la valeur de la perméabilité de la couche moutarde.

### 3.3.3 Calage

Le calage en régime permanent se fait principalement en ajustant la distribution du champ de perméabilité de façon à reproduire le champ de pression observé. Rappelons que les paramètres de stockage n'ont aucune influence sur les simulations en régime permanent.

#### INDICATEURS

Pour caler le modèle numérique, il faut se donner des repères piézométriques. Nous avons retenu les points suivants, issus de la campagne piézométrique 2010 réalisée par ANTEA :

- ▶ Nappe superficielle :
  - Gendarmerie : 232.5 m NGF.
  - Piézomètre MARSADIS : 230.29 m NGF.
  - Puits superficiel des Herbiottes : 229.1 m NGF.
- ▶ Nappe profonde :
  - Raquette SNCF : 225.44 m NGF.
  - Paquier du Potu : 220,25 m NGF.
  - Barges : 212,21 m NGF.

Rappelons que ces valeurs piézométriques forment un instantané piézométrique. Si la nappe ne présente pas d'évolution entre 2006 et 2009, les cotes piézométriques varient en fonction des saisons (variation de l'ordre de +/- 0,50 m). Nous retiendrons comme critère de validité une cote piézométrique simulée inférieure à moins de 50 cm par rapport aux valeurs mesurées.

Le débit de la zone de résurgence de la Cent Fonts retenu pour le calage est de 210 l/s.

#### REGLES DE CALAGE

En sus des orientations déduites de l'analyse de sensibilité, il est nécessaire de contraindre le calage en régime permanent par des relations qui traduisent les logiques inhérentes au modèle hydrogéologique conceptuel.

Il s'agit des relations suivantes :

$$K_{\text{moutarde}} < K_{\text{Jurassique}} < K_{\text{Oligocène détritique}} < K_{\text{aquifère inf.}} < K_{\text{aquifère sup}}$$

#### RESULTAT

Les manipulations pour atteindre le calage du modèle sont trop nombreuses pour être détaillées. Notons toutefois les enseignements suivants, utiles pour la compréhension de l'hydro système :

- ▶ Il n'a pas été possible de caler la nappe profonde en gardant la géométrie du modèle proposé initialement. En effet, pour reproduire la distribution de pression observée (net découplage des pressions de la nappe profonde et de la nappe superficielle à partir de la Rente Logerot), il est nécessaire de "couper" toute alimentation en provenance de la limite Ouest. Toutes les autres manipulations échouent à caler la piézométrie de la nappe profonde. Nous avons donc introduit une nouvelle classe de perméabilité ( $10^{-8}$  m/s) correspondant à des dépôts marneux oligocènes. À partir de la Rente Logerot, la bordure Ouest de l'aquifère profond est constituée de ces dépôts.

- ▶ La perméabilité de la couche moutarde doit nécessairement être égale à  $1.10^{-8}$  m/s pour caler la piézométrie de la nappe profonde au droit de la Raquette SNCF. C'est en effet le paramètre prépondérant pour expliquer la distribution de pression dans ce secteur.
- ▶ La piézométrie dans la masse d'eau est relativement stable. Des modifications mineures des paramètres induisent des variations mineures de la distribution de pression. Inversement, le débit de la zone de résurgence de la Cent Fonts est très sensible à la totalité des paramètres. La moindre modification mineure impacte fortement le débit simulé.

Le calage en régime permanent a été réalisé avec les indicateurs suivants :

- ▶ Nappe superficielle :
  - Gendarmerie : 232,7 m NGF (mesuré : 232.5 m NGF).
  - Piézomètre MARSADIS: 230,7 m NGF (mesuré : 230.29 m NGF).
  - Puits superficiel des Herbiottes : 229.15 m NGF (mesuré :229.15 m NGF).
- ▶ Nappe profonde :
  - Raquette SNCF : 225,50 m NGF (mesuré : 225.44 m NGF).
  - Paquier du Potu : 221,50 (mesuré : 220,25 m NGF).
  - Barges : 212 m NGF (mesuré :212,21 m NGF).
- ▶ Le débit de la zone de résurgence de la Cent Fonts : 215 l/s (mesuré : 210 l/s).

On peut donc considérer que c'est un calage de qualité. Notons que les conditions aux limites introduites initialement dans le modèle numérique n'ont pas été modifiées. Le calage en régime permanent a été réalisé avec les perméabilités suivantes :

$$K_{\text{moutarde}} = 1.10^{-8} \text{ m/s}$$

$$K_{\text{Jurassique}} = 2.10^{-5} \text{ m/s}$$

$$K_{\text{Oligocène détritique}} = 3.10^{-5} \text{ m/s}$$

$$K_{\text{aquifère inf.}} = 3.10^{-4} \text{ m/s}$$

$$K_{\text{aquifère sup}} = 6.10^{-3} \text{ m/s}$$

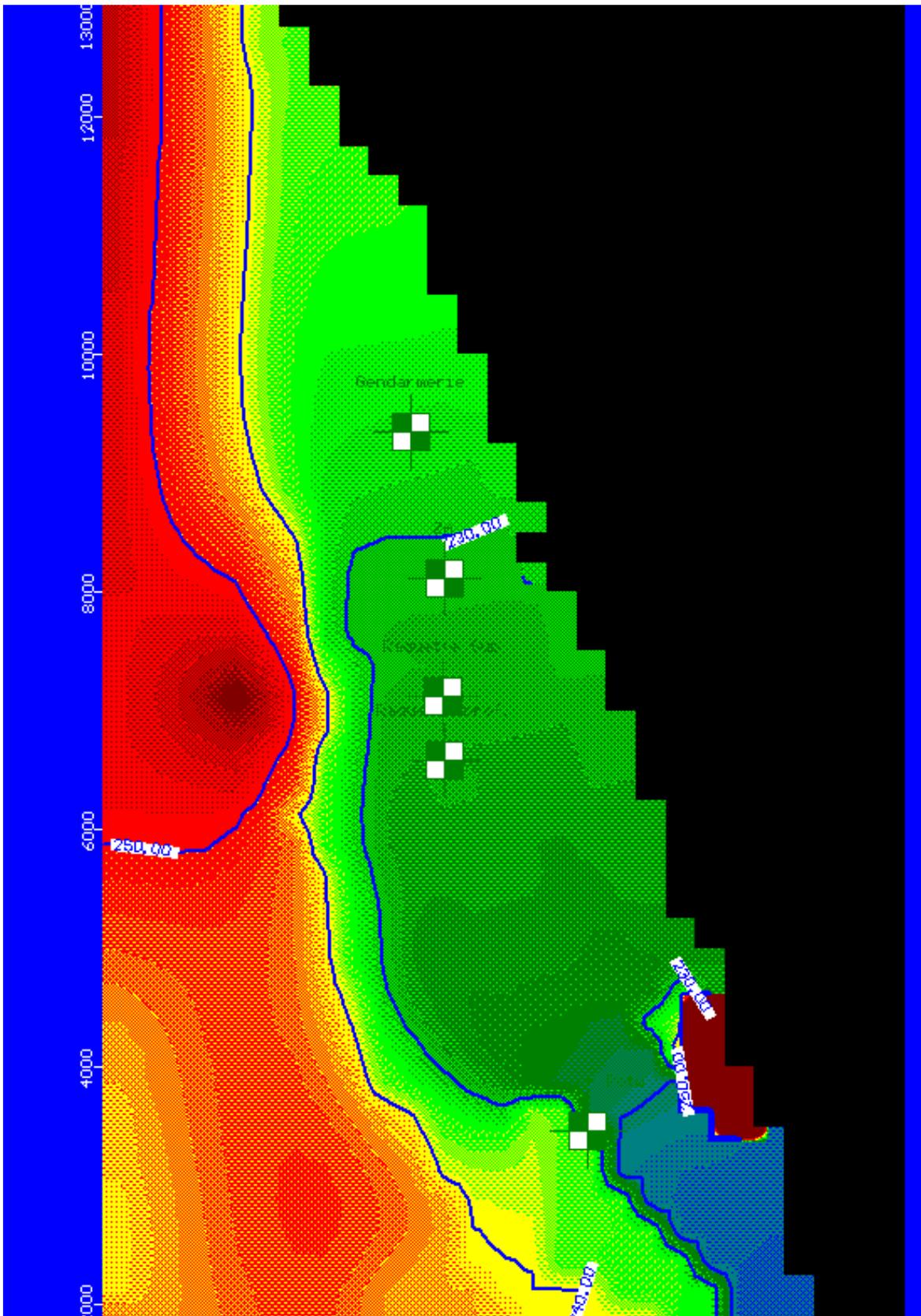
$$K_{\text{Oligocène marneux}} = 1.10^{-8} \text{ m/s}$$

$$K_{\text{Alluvions récentes Ouche}} = 5.10^{-4} \text{ m/s}$$

La figure ci-dessous présente le champ de pression simulé. On peut voir que les anomalies numériques sont toujours présentes. Répétons que nous avons vérifié leur absence d'incidence sur les grandeurs physiques simulées (notamment le débit récolté dans la zone d'exutoire de la Cent Fonts).

Notons aussi une dégradation dans la représentation du champ de pression dans la zone des étangs de Satenay. Cela est dû à l'augmentation de la perméabilité des séries détritiques de l'Oligocène. Une telle option implique que trop d'eau rentre dans cette zone dans le modèle. Or, pour des raisons d'effets numériques liés à la proximité des bordures, il n'est pas possible de compenser ces apports en augmentant les débits prélevés dans la zone des étangs. Cette "lacune" du modèle numérique est sans importance par rapport aux objectifs de l'étude : les débits non représentés sont de l'ordre de 10 l/s en débit fictif, donc négligeable à l'échelle du domaine modélisé.

Figure 20 : Distribution du champ de pression en régime permanent (entre 220 et 230 m NGF).



Le bilan donné par le régime permanent est le suivant :

		RP
Entrées	Recharge par infiltration des eaux de pluie	170 l/s
	Alimentation par la nappe de l'Ouche	Environ 120 l/s
	Alimentation diffuse du karst	70 l/s
	Alimentations localisées du karst	60 l/s
Sorties	Prélèvements	Environ 175 l/s
	Q nappe profonde	Environ 25 l/s
	Zone exutoire Cent Fonts	215 l/s
	Q étangs	Environ 5 l/s

Ce calage en régime permanent doit être considéré avec prudence et ce bilan doit être jugé comme temporaire. La très forte sensibilité du débit simulé à la Cent Fonts à la majorité des paramètres d'entrée du modèle numérique implique nécessairement une non unicité des solutions dans cet exercice de calage en régime permanent. Le calage en régime transitoire, plus intégrateur de phénomènes complexes, est nécessaire pour réduire le nombre de solutions possibles.

### 3.3.4 Piézométrie non influencée

La piézométrie non influencée par les prélèvements est déduite d'une simulation en régime permanent, dans laquelle tous les prélèvements (dont ceux du champ captant des Gorgets), sont considérés comme nuls. En gardant les paramètres obtenus lors du calage en régime permanent, on obtient le bilan suivant :

		RP	Piézo NI (Hypo n°1)
Entrées	Recharge par infiltration des eaux de pluie	170 l/s	170 l/s
	Alimentation par la nappe de l'Ouche	Environ 120 l/s	40 l/s
	Alimentation diffuse du karst	70 l/s	70 l/s
	Alimentations localisées du karst	60 l/s	60 l/s
Sorties	Prélèvements	Environ 175 l/s	0 l/s
	Q nappe profonde	Environ 25 l/s	0 l/s
	Zone exutoire Cent Fonts	215 l/s	335 l/s
	Q étangs	Environ 5 l/s	Environ 5 l/s

Le choix d'imposer un débit nul sur le puits fictif qui draine la nappe profonde traduit l'hypothèse d'un flux actuel observé autour de 25 l/s, causé principalement par l'existence de prélèvements plus au Sud dans cette nappe. C'est une hypothèse de travail, non étayé par des observations répétées; une autre hypothèse, plus probable, celle d'un flux "naturel" de 25 l/s est discutée plus avant.

Le principal enseignement de cette simulation est que l'arrêt des pompages conduirait et à une augmentation des débits de la zone de résurgence de la Cent Fonts et à une diminution du débit d'alimentation en provenance de l'Ouche.

Cette simulation produit les valeurs piézométriques de référence suivantes :

- ▶ Nappe superficielle :
  - Gendarmerie : 234.45 m NGF (mesuré : 232.5 m NGF).
  - Piézomètre MARSADIS : 232.57 m NGF (mesuré : 230.29 m NGF).
  - Puits superficiel des Herbiottes : 230.66 m NGF (mesuré : 229.15 m NGF).

On observe que l'arrêt des pompages conduirait à une augmentation du niveau de la nappe superficielle d'environ 2 mètres. Cette augmentation est atténuée par la proximité de limites à charge constante (Ouche et Cent Fonts).

La piézométrie de la nappe superficielle n'est donc pas fondamentalement modifiée. On observe toujours un écoulement du Nord vers le Sud, avec des apports latéraux en provenance des bordures Ouest (cf. figure 18). C'est un point qui mérite d'être discuté. En réduisant la perméabilité de l'aquifère superficiel à  $1.10^{-3}$  m/s, on observe une configuration piézométrique différente : apparition d'une limite d'écoulement située sous Chenove avec deux sous-unité, une sous-unité Nord drainée par l'appareil alluvial de l'Ouche et une sous-unité Sud drainée par la zone d'exutoire de la Cent Fonts (cf. figure ci-dessous).

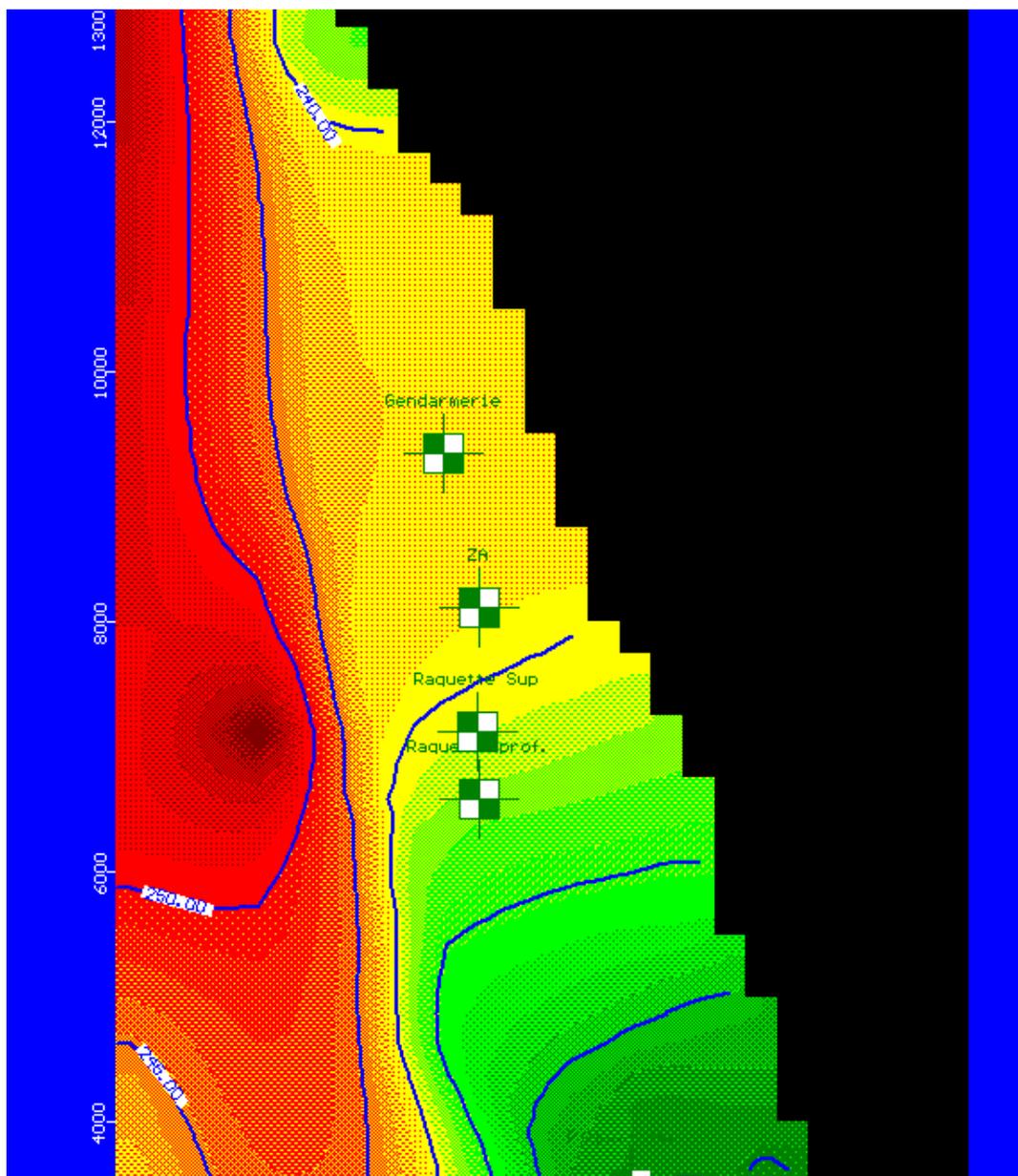
C'est un résultat spectaculaire : dans une telle configuration, les flux d'échange se sont inversés entre les deux masses d'eau.

Dans cette configuration, le bilan est nécessairement différent :

		RP	Piézo NI (Hypo n°1)	Piézo NI (Hypo n°2)
Entrées	Recharge par infiltration des eaux de pluie	170 l/s	170 l/s	170 l/s
	Alimentation par la nappe de l'Ouche	Environ 120 l/s	40 l/s	0 l/s
	Alimentation diffuse du karst	70 l/s	70 l/s	60 l/s
	Alimentations localisées du karst	60 l/s	60 l/s	60 l/s
Sorties	Prélèvements	Environ 175 l/s	0 l/s	0 l/s
	Q nappe profonde	Environ 25 l/s	0 l/s	0 l/s
	Zone exutoire Cent Fonts	215 l/s	335 l/s	200 l/s
	Q étangs	Environ 5 l/s	Environ 5 l/s	Environ 5 l/s
	Q vers nappe alluviale de l'Ouche	-	-	Environ 85 l/s

Notons que les deux bilans proposés montrent qu'un arrêt des pompages se traduirait principalement par une restitution de débit vers la nappe alluviale de l'Ouche de 80 l/s (cas n°1) à 200 l/s (dans le cas n°2, on alimente l'appareil de l'Ouche de 80 l/s, alors que les simulations en régime permanent montrent un drainage de la nappe alluviale de l'Ouche par la nappe de Dijon sud de l'ordre de 120 l/s).

Figure 21 : Distribution du champ de pression non influencé par les pompages avec  $K=10^{-3}$  m/s (entre 220 et 230 m NGF).



Ces observations contradictoires soulignent la difficulté de l'exercice. Le bilan proposé à partir des paramètres utilisés pour le calage en régime permanent doit être considéré avec prudence. La réalisation de simulations en régime transitoire est nécessaire pour intégrer toute la complexité de l'hydro système et arbitrer entre les différentes configurations piézométriques possibles.

Le comportement de la nappe profonde est plus simple à appréhender en régime non influencé par les prélèvements :

► Nappe profonde :

- Raquette SNCF : 232.52 m NGF (mesuré : 225.44 m NGF).
- Paquier du Potu : 233.42 (mesuré : 220,25 m NGF).
- Barges : 231.17 m NGF (mesuré : 212,21 m NGF).

Dans le modèle numérique construit, l'arrêt des prélèvements conduit à recharger la nappe profonde à hauteur des charges observées dans la nappe superficielle. Le seul processus de vidange de la nappe profonde est alors une drainance de l'aquifère profond vers l'aquifère superficiel. Nous attirons l'attention sur le fait que ce comportement résulte de l'hypothèse d'absence de flux "naturels" vers le Sud.

Nous avons donc testé une autre hypothèse, a priori plus réaliste, avec l'introduction d'un pompage fictif de 25 l/s.

La réintroduction d'un pompage fictif de 25 l/s dans la nappe profonde ne ramène pas la piézométrie à 212 m NGF à hauteur de Barges comme elle est observée actuellement, mais à seulement 220 m NGF. Ceci montre que le fait de diminuer la piézométrie de la nappe superficielle (- 2 m en piézométrie de référence) réduit considérablement les apports vers la nappe profonde (ainsi que les flux de drainance de l'aquifère superficiel vers l'aquifère profond) et conduit à une aggravation de la diminution de la piézométrie (-8 m en piézométrie de référence) dans la nappe profonde.

## 4. MODELISATION EN REGIME TRANSITOIRE

### 4.1 DONNEES DE REFERENCE

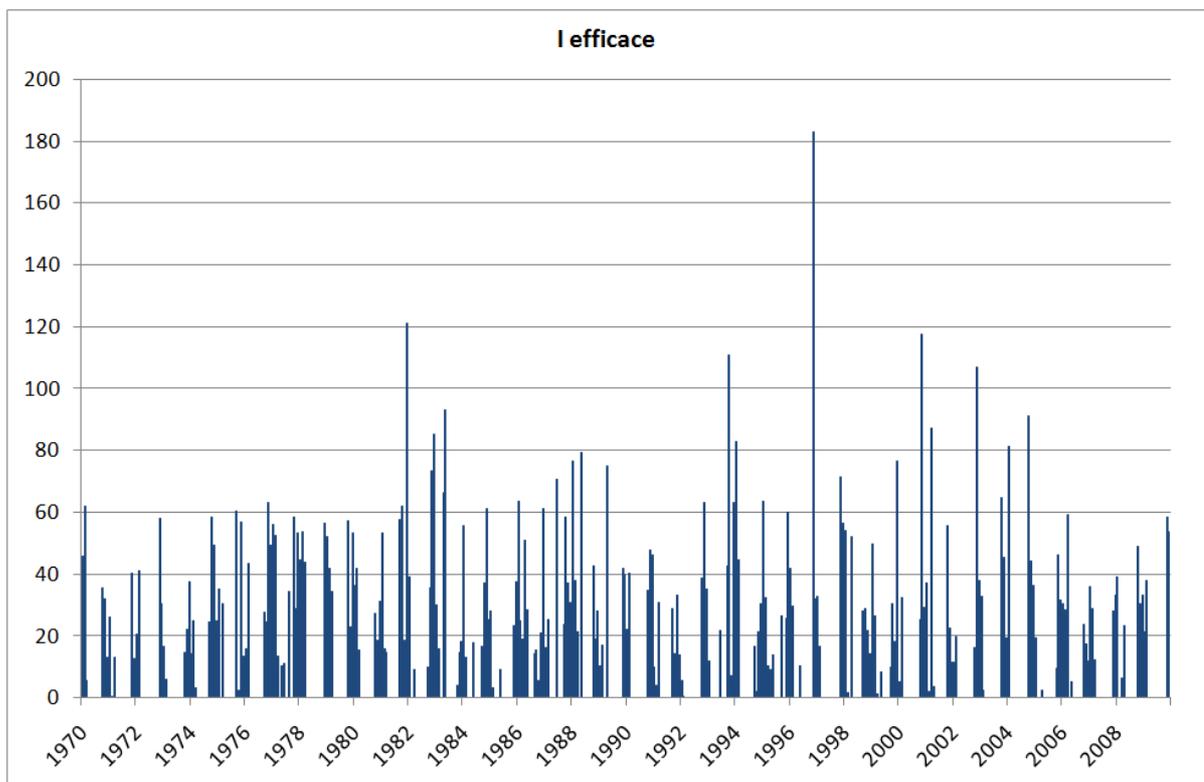
Le calage en régime transitoire nécessite la constitution de séries temporelles à un pas de temps mensuel.

#### 4.1.1 Infiltrations efficaces sur l'impluvium Dijon Sud

Les valeurs mensuelles de pluie efficace correspondent aux différences positives entre les moyennes mensuelles de pluviométrie et d'ETP, enregistrées sur la station météorologique de Dijon Longvic.

Au regard de toutes les analyses développées durant la phase de calage en régime permanent, nous avons retenu une valeur de 75% pour déterminer la part d'infiltration relative aux précipitations efficaces sur l'impluvium. L'impluvium correspond de façon stricte aux surfaces affleurantes de graviers (corps sédimentaire principal). Ce coefficient doit être considéré comme une donnée de calage ; il est donc susceptible de varier entre des valeurs plausibles comprises entre 60 et 80%. Rappelons que pour un cumul d'environ 250 mm de pluie efficace en moyenne interannuelle, cette imprécision sur le coefficient d'infiltration implique une variation de 4,5 à 6 Mm<sup>3</sup> en terme de volume d'eau infiltré sur l'impluvium.

Figure 22 : Infiltration efficace sur l'impluvium de la nappe Dijon Sud



Les coteaux Ouest ont été introduits dans les simulations avec un coefficient d'infiltration égal à 25%.

Les valeurs d'infiltration efficaces seront différentes sous les zones urbanisées. Et elles devront être considérées comme une donnée de calage.

Cet arbitrage technique s'explique par la forte complexité des phénomènes en jeu et la difficulté conséquente à les modéliser : présence de bassins d'infiltrations, de nombreux puisards, des rejets dans le réseau hydrographique,.... Certains de ces processus vont renforcer l'infiltration, d'autres vont la diminuer. Rappelons de plus que la zone urbanisée correspond seulement à 25-30% de l'impluvium (environ 6 km<sup>2</sup>).

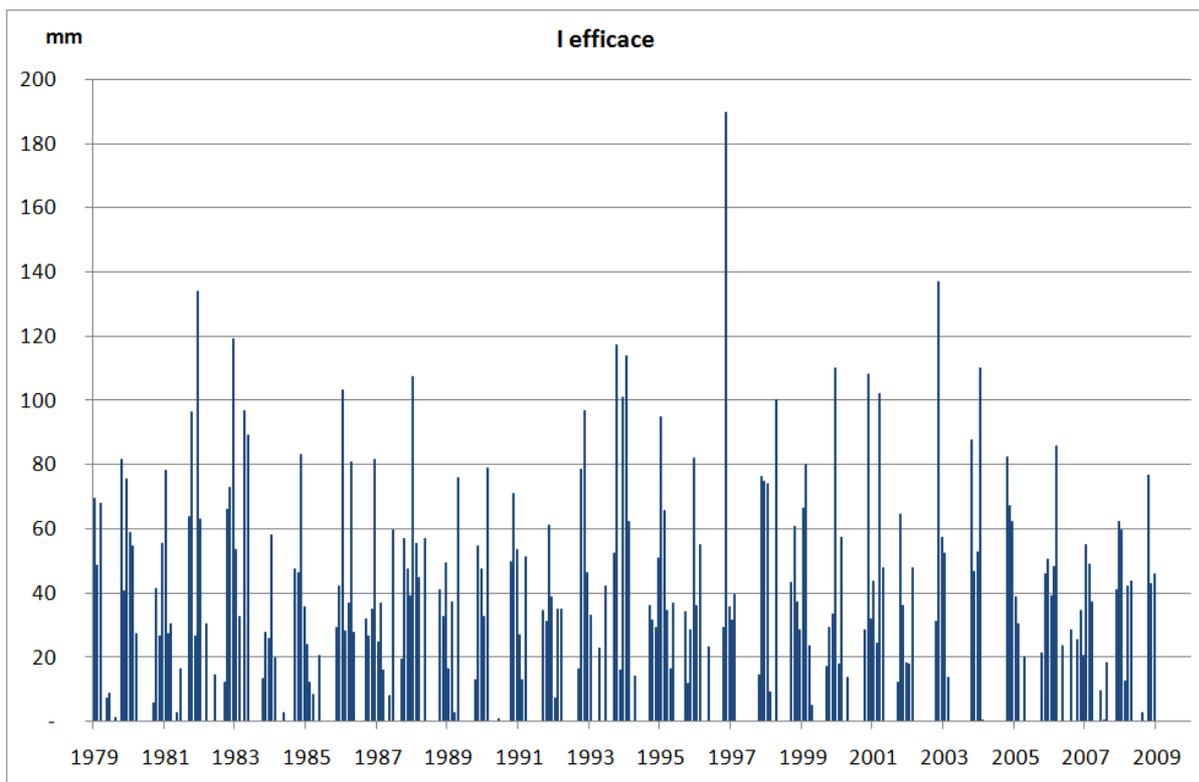
De plus, nous avons intégré sous la zone urbanisée (6 km<sup>2</sup>) une infiltration constante correspondant aux pertes d'eau des réseaux AEP. Nous avons retenu la valeur de 100 l/m<sup>2</sup>/an (soit un apport annuel moyen de l'ordre de 600 000 m<sup>3</sup>). C'est l'ordre de grandeur qui a été déduit de l'analyse des données de rendement des réseaux en phase 1 de l'étude.

#### 4.1.2 Infiltrations efficaces sur l'impluvium de l'aquifère karstique

Nous avons choisi les moyennes mensuelles de pluviométrie sur Détain et Bruant comme valeurs de référence pour les pluies affectant l'impluvium karstique.

Sur cet impluvium, les valeurs mensuelles de pluie efficace correspondent aux différences positives entre les moyennes mensuelles de pluviométrie enregistrées à Détain et Bruant, et celles d'ETP, enregistrées sur la station météorologique de Dijon Longvic. En première approximation, nous supposons un coefficient d'infiltration de l'ordre de 70%. Cela correspond à un débit spécifique de l'ordre de 10 l/s/km<sup>2</sup>.

Figure 23 : Infiltration efficace sur l'impluvium karstique (Ci=70%)



On note les différences suivantes par rapport à l'infiltration efficace sur Dijon Sud :

- ▶ Cumul annuel de précipitation efficace plus élevé : 350 mm (Détain) contre 270 mm (DS).
- ▶ Présence de précipitations efficaces significatives en période estivale à Détain, ce qui n'est jamais le cas sur l'impluvium de Dijon Sud.

Notons toutefois que l'on observe les mêmes tendances annuelles entre les deux séries.

La conversion de la lame d'eau d'infiltration efficace en un débit mensuel à appliquer aux puits fictifs censés représenter les venues sous-alluviales, nécessite la définition d'une surface d'impluvium à affecter à ces venues sous-alluviales.

C'est une question complexe. En effet, cette détermination est forcément aléatoire (absence de connaissances certaines) ; de plus, une partie des eaux collectées dans l'impluvium ira alimenter le débit diffus qui transite via les séries oligocènes.

Au vu des résultats apportés par la phase de calage en régime permanent, il est logique de définir une surface d'impluvium a priori cumulée de l'ordre de 9 km<sup>2</sup> (soit 90 l/s en cumulé en moyenne annuelle). De plus, au vu de la configuration paléo-géographique, il semble logique de considérer la venue sous alluviale sous Dijon comme plus importante que celle sous Perrigny.

Nous avons donc choisi d'affecter en première approche une superficie de 3 km pour le puits d'injection sous Marsannay et de 6 km<sup>2</sup> pour le puits d'injection sous Dijon. Ce qui traduit la règle suivante :

$$S_{VE \text{ Dijon}} = 2 \times S_{VE \text{ Marsannay}}$$

De plus, pour plus de réalisme, pour les pluies efficaces supérieures à 100 mm/mois, nous avons limité les apports aux venues sous alluviales à cette valeur seuil ; on peut en effet considérer que pour des précipitations exceptionnelles, la notion de coefficient d'infiltration perd de sa signification et qu'une partie de plus en plus importante de la lame d'eau participe au ruissellement. Ce qui se traduit par la règle suivante :

$$\text{Si } (P_i > 100 \text{ mm}) \text{ alors } Q_i = f(P_i = 100 \text{ mm})$$

Si ces règles nous semblent plausibles, rappelons que les valeurs proposées pour les bassins d'alimentation sont provisoires : les superficies de ces bassins doivent être considérées comme des données de calage.

A titre d'illustration, on obtient des débits variant entre 0 et 230 l/s (moyennes mensuelles) pour le puits d'injection sous Dijon avec un impluvium de 6 km<sup>2</sup>. Cela correspond à des flux cumulés de l'ordre de 2,3 Mm<sup>3</sup> en moyenne annuelle, avec un minima de 1,1 Mm<sup>3</sup> en 1985 et un maximum de 3,2 Mm<sup>3</sup> en 1986.

### 4.1.3 Prélèvements AEP

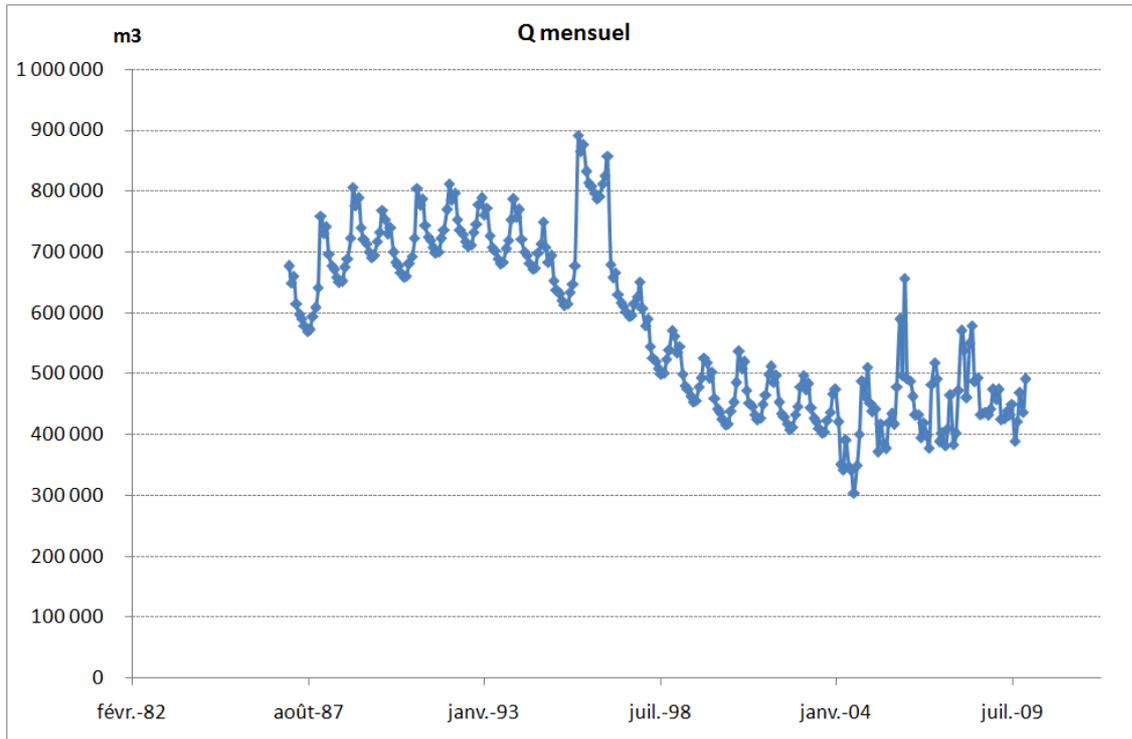
Les données de prélèvements sont celles récoltées en phase 1 de l'étude :

- ▶ Données de prélèvements au pas de temps mensuel de 2003 à 2009.
- ▶ Données de prélèvements au pas de temps annuel de 1987 à 2003. Pour tous les champs captant excepté les Gorgets, les données ont été transformées en données mensuelles en respectant l'observation de prélèvements mensuels pseudo constants ( $P_m = P_a/12$ ). Pour le champ captant des Gorgets, nous avons appliqué le filtre suivant sur les données annuelles, déduit de l'analyse statistique des données mensuelles de 2003 à 2009 :

Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.
10.0%	9.3%	9.6%	8.4%	7.9%	7.7%	7.4%	7.2%	7.2%	7.8%	8.2%	9.1%

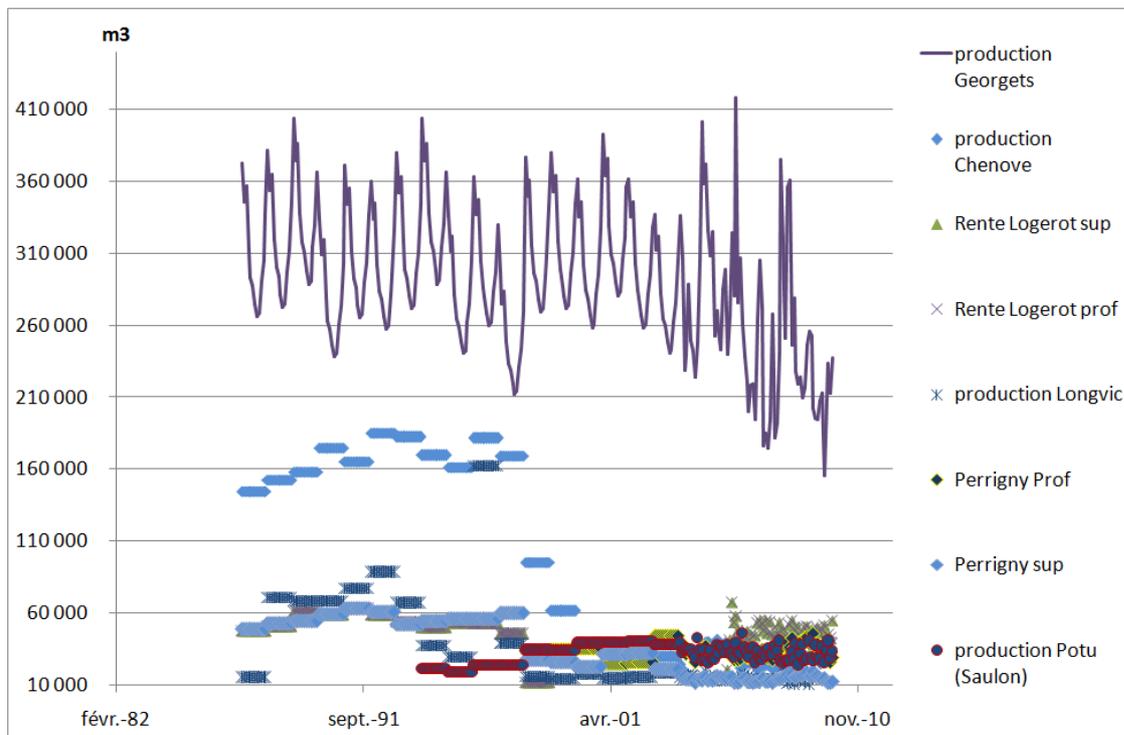
Ce filtre a une importance capitale sur la distribution des prélèvements au global : les prélèvements AEP sont maximaux en période hivernale.

Figure 24 : Prélèvements mensuels cumulés AEP



En effet, rappelons que les prélèvements des Gorgets représentent entre 40 et 70% des prélèvements au global :

Figure 25 : Prélèvements mensuels par point de captage AEP



#### 4.1.4 Prélèvements agricoles

Les prélèvements agricoles deviennent non négligeables à partir de 1997. Nous disposons des données de prélèvements au pas de temps annuels de 1997 à 2009 (rapport de phase 1).

	milliers de m <sup>3</sup>
<b>1997</b>	239
<b>1998</b>	149
<b>1999</b>	198
<b>2000</b>	124
<b>2001</b>	136
<b>2002</b>	137
<b>2003</b>	260
<b>2004</b>	90
<b>2005</b>	261
<b>2006</b>	118
<b>2007</b>	15
<b>2009</b>	24

Pour respecter la continuité des séries, nous avons supposé un volume prélevé de l'ordre de 20 000 m<sup>3</sup> pour l'année 2008.

Les données annuelles ont été transformées en données mensuelles à l'aide du filtre suivant :

$$V \text{ mai} = V \text{ annuel} \times 10\%$$

$$V \text{ juin} = V \text{ annuel} \times 30\%$$

$$V \text{ juillet} = V \text{ annuel} \times 40\%$$

$$V \text{ août} = V \text{ annuel} \times 15\%$$

$$V \text{ septembre} = V \text{ annuel} \times 5\%$$

Au vu des faibles volumes en jeu, nous avons introduit ces prélèvements sous la forme d'un seul puits intéressant la nappe superficielle. Nous l'avons localisé de façon arbitraire à l'Ouest de Domois (zone de forte concentration des forages agricoles).

### 4.1.5 Prélèvements industriels

Nous disposons de données annuelles pour les prélèvements industriels (rapport de phase 1).

	<b>Q m<sup>3</sup></b>
<b>1987</b>	134600
<b>1988</b>	149900
<b>1989</b>	140000
<b>1990</b>	144000
<b>1991</b>	156600
<b>1992</b>	155400
<b>1993</b>	116300
<b>1994</b>	122700
<b>1995</b>	98700
<b>1996</b>	127900
<b>1997</b>	144400
<b>1998</b>	104200
<b>1999</b>	69400
<b>2000</b>	72500
<b>2001</b>	56900
<b>2002</b>	65700
<b>2003</b>	46600
<b>2004</b>	42700
<b>2005</b>	51500
<b>2006</b>	32300
<b>2007</b>	34100
<b>2008</b>	20700

Les valeurs annuelles ont été transformées en données mensuelles en faisant l'hypothèse de prélèvements constants ( $P_m = P_a / 12$ ).

Au vu des faibles volumes en jeu, nous avons introduit ces prélèvements sous la forme d'un seul puits intéressant la nappe superficielle. Nous l'avons localisé de façon arbitraire au droit de l'usine plasto SA (proximité du captage SNCF).

### 4.1.6 Débits de la zone de résurgence de la Cent Fonts

Rappelons que les données disponibles proviennent de deux stations hydrométriques avec un enregistrement des moyennes mensuelles :

- ▶ Station de Chevigny-Fenay (de 1973 à 1999). On peut considérer que les débits mesurés correspondent totalement à des résurgences d'eau souterraine.
- ▶ Station de Saulon-La Rue (1990 à 2010), qui enregistre le cumul des débits relatifs aux eaux souterraines et ceux liés au ruissellement sur le bassin versant.

La moyenne des moyennes mensuelles est de 105 l/s sur Chevigny-Fenay et de 285 l/s sur Saulon la Rue.

Les données de débit de la zone de résurgence constituent des données de calage essentielles dans le processus de modélisation. Il est nécessaire de les reconstituer sur la période allant de 2000 à 2010.

Pour ce faire, il est nécessaire de raisonner sur les valeurs de ruissellement car les données relatives aux flux souterrains sont influencées par les prélèvements. Nous avons repris l'étude des données mises en place dans le chapitre 2.4.2. Elle est basée sur les considérations suivantes :

$$Q_{\text{Saulon}} = Q_{\text{souterrain}} + Q_{\text{ruissellement}}$$

Si  $Q_{\text{souterrain}} = 2 \times Q_{\text{Fenay}}$ , alors :

$$Q_{\text{ruissellement}} = Q_{\text{Saulon}} - (2 \times Q_{\text{Fenay}})$$

Avec une surface du bassin versant de l'ordre de 52 km<sup>2</sup>, qui peut être décomposée de la manière suivante :

- ▶ 24 km<sup>2</sup> de substrat calcaire (Ci=70%).
- ▶ 4 km<sup>2</sup> de substrat argileux oligocène (Ci=10%).
- ▶ 24 km<sup>2</sup> (Ci=70%).

Connaissant la lame d'eau correspondant à la pluie efficace, nous sommes capables d'estimer une lame d'eau théorique ruisselée en l/s :

$$Q_r = (P_{\text{efficace}}/1000) \times (24 \times 1000 \times 1000) \times 0,3 + (P_{\text{efficace}}/1000) \times (4 \times 1000 \times 1000) \times 0,9 + (P_{\text{efficace}}/1000) \times (24 \times 1000 \times 1000) \times 0,3$$

Ce qui correspond à un coefficient de ruissellement moyen estimé de 35% pour l'ensemble du bassin versant associé.

Cette approche théorique est insatisfaisante. En effet, l'étude détaillée des données météorologiques disponibles de 1990 à 2000 montre le caractère simpliste de cette approche.

L'alternance de périodes de basses et hautes eaux peut être étudiée sur la base des données suivantes :

- ▶ Volume cumulé sur 6 mois relatif aux venues d'eaux souterraines ( $Q_{\text{Fenay}} \times 2$ ).
- ▶ Volume cumulé sur 6 mois relatif au ruissellement ( $Q_{\text{Saulon}} - (2 \times Q_{\text{Fenay}})$ ).
- ▶ Pluie totale et pluie efficace cumulées sur 6 mois.

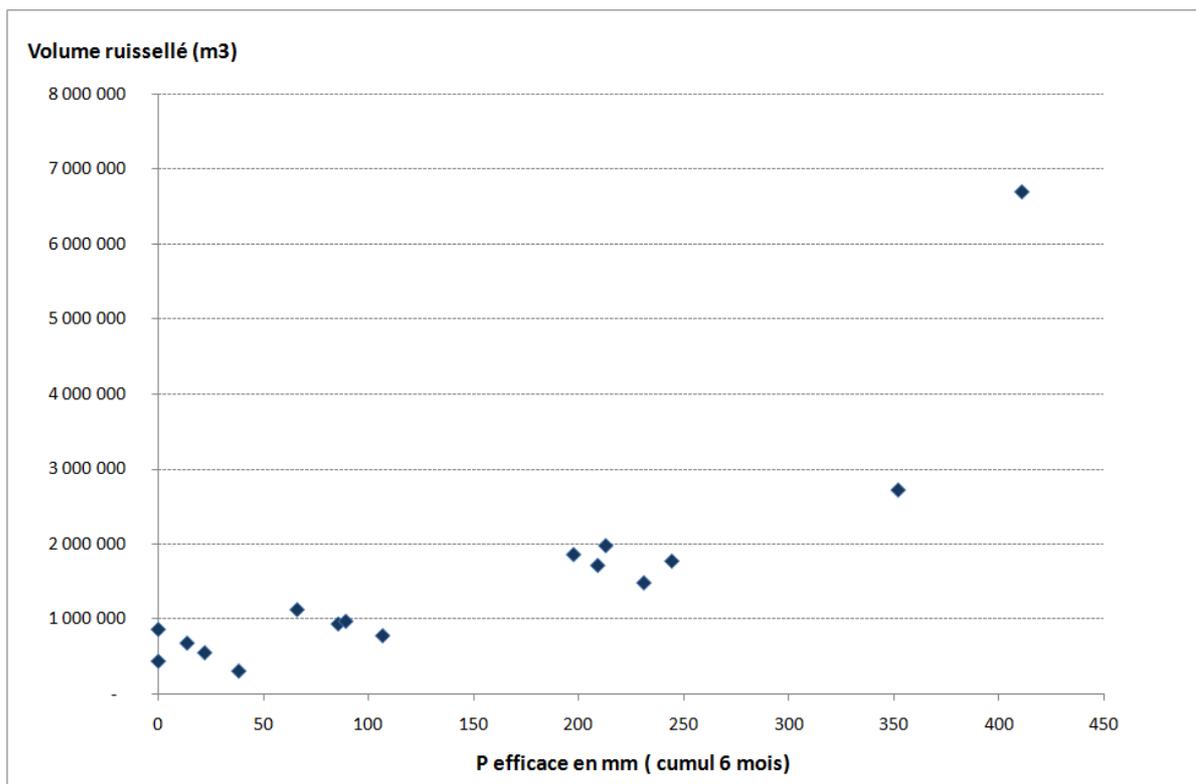
Vc6m Qs	Vc6m de R	Va (R+Qs)	P (mm)	P eff (mm)	(Vr/Va)	Vr pour 100 mm/Peff
1 524 096	860 544	2 384 640	423.4	0	36%	
2 778 624	435 456	3 214 080	385.8	0	14%	
2 534 976	679 104	3 214 080	326.5	13.7	21%	4 956 964
3 805 056	549 504	4 354 560	403.8	22.1	13%	2 486 443
2 312 064	305 856	2 617 920	352.2	38.3	12%	798 580
3 255 552	1 124 928	4 380 480	497.4	66.1	26%	1 701 858
1 969 920	933 120	2 903 040	484.6	85.6	32%	1 090 093
1 778 112	969 408	2 747 520	207.4	89.3	35%	1 085 563
3 136 320	777 600	3 913 920	396.6	106.8	20%	728 090
2 286 144	1 861 056	4 147 200	260	197.7	45%	941 354
3 027 456	1 715 904	4 743 360	305	209.2	36%	820 222
2 814 912	1 980 288	4 795 200	358.6	213	41%	929 713
2 068 416	1 482 624	3 551 040	380.5	231.2	42%	641 273
2 814 912	1 772 928	4 587 840	344.2	244.5	39%	725 124
3 136 320	2 721 600	5 857 920	443.8	352.2	46%	772 743
4 261 248	6 702 912	10 964 160	520.1	411.1	61%	1 630 482

L'étude comparative de ces données montre que le coefficient de ruissellement n'est pas constant. Il varie de 12 % (pour des situations de sécheresse) à 60% (pour des situations de crue), avec une moyenne de l'ordre de 30%.

De même; on observe que le volume ruisselé par tranche de 100 mm de pluie efficace n'est pas constant mais varie de 700 000 à 5 000 000 de m<sup>3</sup>.

On ne peut donc pas raisonner avec une relation linéaire entre pluie efficace cumulé sur 6 mois et ruissellement cumulé sur 6 mois. La figure ci-dessous illustre la complexité des phénomènes :

Figure 26 : Relation entre précipitation efficace et volume ruisselé à Saulon.



La distribution de ces couples de données peut être réduite aux relations linéaires suivantes, déduites de la distribution des points dans le graphe ci-dessus :

Pour Peff. c6M=0 mm :

$$V_{max} = 900\ 000$$

$$V_{min} = 500\ 000$$

Pour Peff. c6M < 350 mm :

$$V_{max} = 5\ 700 \times P_{eff} + 700\ 000$$

$$V_{min} = 7\ 750 \times P_{eff}$$

Pour Peff. c6M > 350 mm :

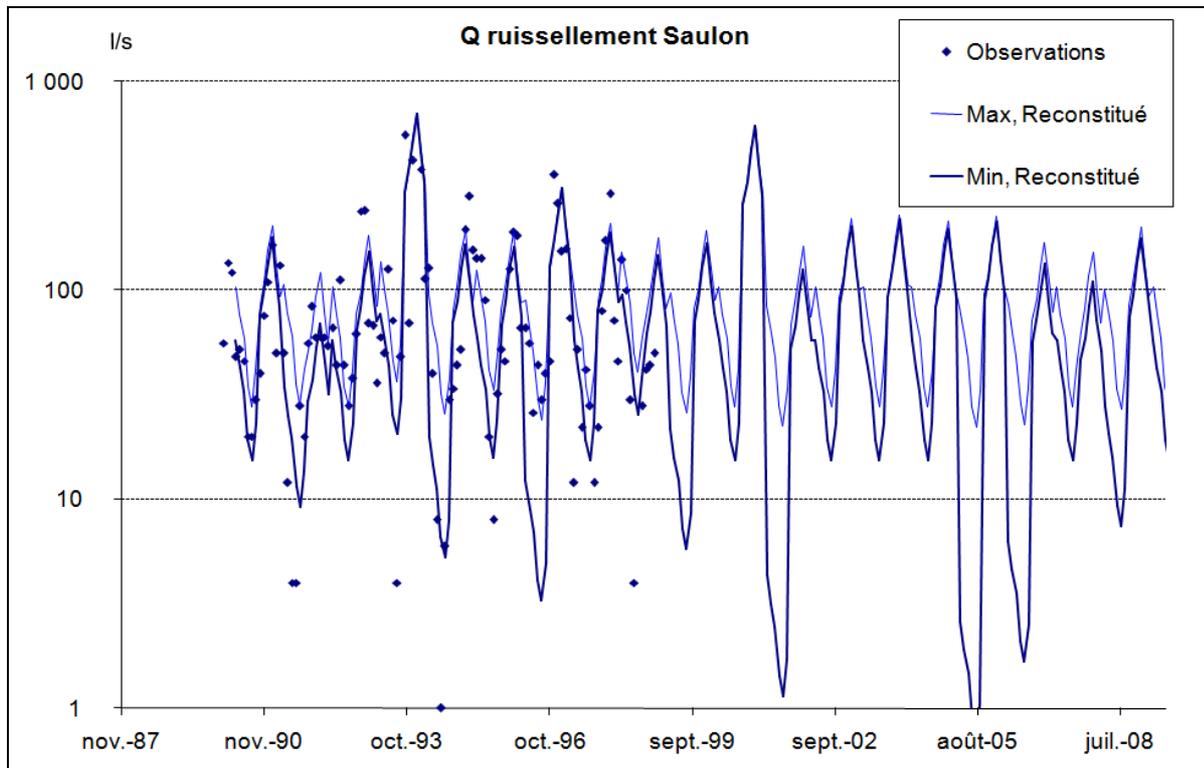
$$V_{max} = 66\ 660 \times P_{eff} - 20\ 400$$

De plus, il est nécessaire de réduire les cumuls semestriels à des valeurs mensuelles. Pour ce faire nous avons estimé un filtre mensuel basé sur un % du cumul semestriel, calculé à partir des données existantes. Nous obtenons le filtre suivant :

Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
26%	17%	12%	30%	22%	17%	10%	8%	12%	11%	14%	20%

Il est alors possible de reconstituer les séries en terme de tendances hautes et basses.

Figure 27 : Débits ruisselés estimés et débits ruisselés reconstitués au droit de la station hydrométrique de Saulon.



La comparaison entre valeurs déduites des mesures et les données mesurées est partiellement satisfaisante. Les écarts les plus forts s'observent soit pour des périodes de crue, soit pour des périodes d'étiage. Au global, sur 105 valeurs, seulement 30 sont comprises entre les valeurs minimales et maximales reconstituées. La moyenne des écarts est de 35 l/s. Ce qui correspond à une somme des écarts de 10 Mm<sup>3</sup> cumulé sur la période des mesures (10 ans), à comparer au flux mesuré de 26 Mm<sup>3</sup> sur la même période. L'erreur spécifique sur l'estimation des ruissellements est donc de l'ordre de 40%.

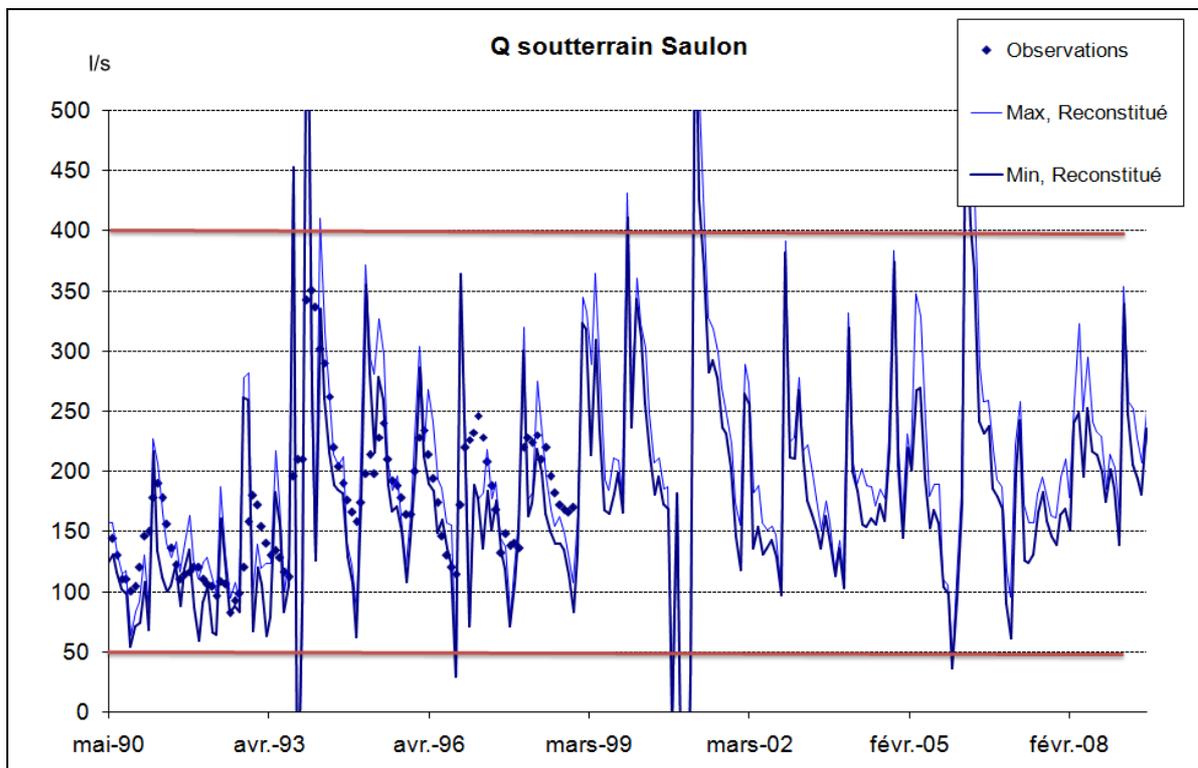
Ceci étant, rappelons que la part de ruissellement est estimée à environ 40% des débits enregistrés à la station hydrométrique de Saulon. Si l'on rappelle la somme des écarts en volume au volume global mesuré à la station, l'erreur relative est alors de seulement 15% ; et elle est portée majoritairement par les valeurs en période d'extrêmes climatologiques (sécheresse ou crue).

Il nous semble acceptable de retenir la courbe enveloppe déduite de la relation suivante :

$$Q_s \text{ reconstitué} = Q \text{ mesuré Saulon} - Q_r \text{ reconstitué}$$

Cependant, au vu du constat de la mauvaise reconstitution des débits ruisselés en période d'extrême climatique, il ne faudra pas intégrer ces périodes dans le processus de calage des débits simulés par le modèle (cf. figure ci-dessous).

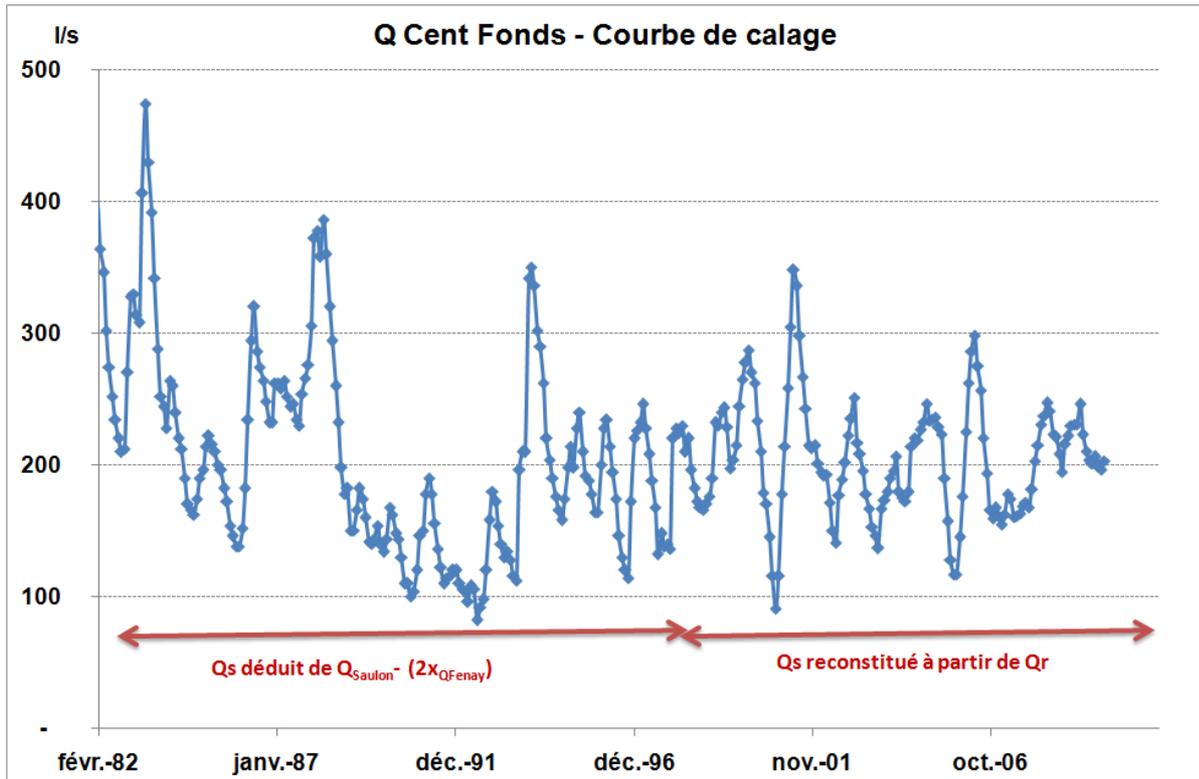
Figure 28 : Débits souterrains estimés et débits souterrains reconstitués au droit de la station hydrométrique de Saulon.



En synthèse, les données de débit à la Cent Fonts devront être considérées comme des données de calage faibles. Les valeurs disponibles résultent soit d'une relation approximative, soit d'une reconstitution qui ne réussit pas à intégrer toute la complexité des processus hydrologiques. Ces données pourront servir au calage du modèle en considérant et les tendances sur le long terme, et les variations inter ou intra annuelles.

Au vu de ces considérations, nous proposons donc la courbe de référence suivante ci-dessous. Les données après 1999 résultent du calcul d'une moyenne mobile sur 6 mois appliquée sur les moyennes entre minimum et maximum de débit selon la méthode de reconstitution exposée ci-dessus.

Figure 29 : Courbe tendancielle des débits supposés de la zone de résurgence de la Cent Fonts.



## 4.2 CALAGE EN REGIME TRANSITOIRE

### 4.2.1 Période de calage

Le calage a été effectué sur des séries temporelles allant de janvier 1987 à décembre 1997.

### 4.2.2 Indicateurs de calage

Le calage a été effectué sur les chroniques suivantes :

Débit estimé pour la zone d'exutoire de la Cent Fonts.

Piézométrie mesurée de la nappe superficielle sur le piézomètre dit de Gendarmerie (partie médiane de la nappe).

Piézométrie mesurée de la nappe superficielle sur le piézomètre dit de Perrigny (partie aval de la nappe).

Le choix de restreindre le calage à deux chroniques piézométriques s'explique par l'observation d'une bonne synchronisation des variations piézométriques à l'échelle de l'aquifère.

### 4.2.3 Modifications de la structure du modèle

Le calage en régime transitoire a nécessité de réviser certaines conceptions sur le modèle hydrogéologique et donc d'introduire des modifications soit des données d'entrée, soit du modèle numérique lui-même.

#### 4.2.3.1 Structure des fichiers d'infiltration efficace

Les premières simulations montrent une variabilité de la piézométrie et des débits à la zone d'exutoire trop importante. Ceci s'explique par le fait que le modèle numérique n'intègre pas de fonction de transfert pour les eaux de pluies infiltrées. Pour un mois donné, une lame d'eau donnée se traduit instantanément par un volume d'eau apportée à la nappe, ce qui ne peut pas représenter correctement les phénomènes physiques en jeu.

En effet, la zone non saturée peut jouer deux rôles : elle peut provoquer une inertie des transferts vers la nappe et donc un étalement de l'effet d'une pluie sur la piézométrie (fonction dilatation) et elle peut entraîner des retards entre le moment de la pluie et l'augmentation du niveau piézométrique (fonction retard).

Afin de mieux représenter les phénomènes inertiels, nous avons modifié les chroniques de lame d'eau infiltrée de la façon suivante :

- ▶ Application d'un coefficient d'infiltration variable selon la hauteur de pluie efficace mensuelle. Nous avons introduit arbitrairement 3 paliers : Ci100 pour  $Pe_{eff} < 100$  mm, Ci200 pour  $100 < Pe_{eff} < 200$  mm et Ci300 pour  $Pe_{eff} > 200$  mm. Ceci afin de représenter la variabilité de l'infiltration versus le ruissellement, en fonction de l'intensité des pluies.
- ▶ Les valeurs mensuelles sont calculées à l'aide de moyennes flottantes qui prennent en compte les cumuls d'infiltration efficace sur X mois (facteur D).
- ▶ Les valeurs mensuelles calculées à partir des moyennes flottantes appliquées aux précipitations efficaces affectées des Ci, sont décalés dans le temps de X mois pour faire correspondre les pics de décrues et de crues entre valeurs simulées et valeurs calculées (facteur R).

Rappelons que cette démarche est appliquée sur trois impluviums :

- ▶ Les coteaux.
- ▶ La nappe hors zone urbaine.
- ▶ La nappe en zone urbaine. Dans cette zone, pour intégrer les phénomènes de pertes de réseaux, l'infiltration efficace est majorée de 10 mm/mois (soit environ 120 mm/an).

#### 4.2.3.2 Conditions aux limites

Nous avons constaté que pour les périodes de forte pluviométrie, il pouvait y avoir localement inversion de gradient sur le coin Sud-Ouest du modèle et autour du puits fictif de Marsannay. Ces inversions entraînaient des « pertes » d'eau pour le modèle. Afin de corriger ces effets secondaires, nous avons introduit des charges minimales de 245 m NGF sur la limite Ouest et nous avons créé un corridor « artificiel » de plus forte perméabilité autour du puits fictif de manière à limiter son impact sur la piézométrie (suppression de l'effet de dôme).

De plus, il a été observé que la concentration des apports du karst sur deux puits fictifs d'injection, censés représenter des venues sous-alluviales très localisées, pouvait créer temporairement des augmentations significatives pouvant notamment conduire à des inversions de gradient vis-à-vis de la nappe alluviale de l'Ouche.

Afin de minorer ces phénomènes, nous avons ré-introduit un puits fictif supplémentaire au droit de Chenôve. Nous avons appliqué de façon arbitraire les mêmes débits sur les trois puits fictifs.

### 4.2.3.3 Champ de perméabilités

Pour finir, afin de caler le modèle, il a été nécessaire d'introduire 3 classes de perméabilité pour l'aquifère supérieur. Selon la bibliographie, plusieurs auteurs posent l'hypothèse d'une augmentation de la fraction argileuse de l'amont vers l'aval.

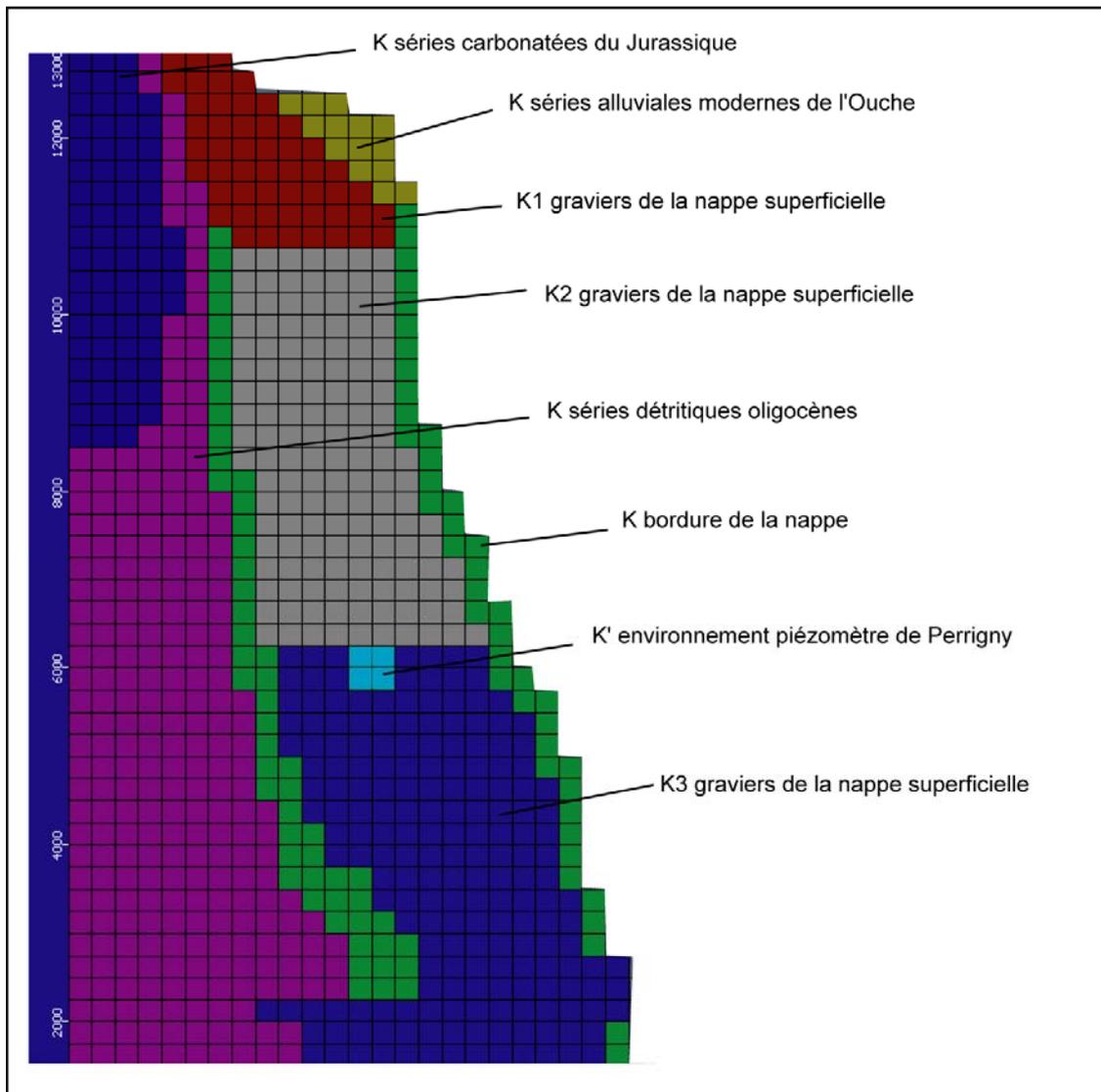
Nous avons respecté la règle suivante :

$$K_{sup1} > K_{sup2} > K_{sup3}$$

De plus, nous avons constaté une difficulté à caler simultanément les chroniques piézométriques enregistrées sur les piézomètres dit de Perrigny et de Gendarmerie. Cette observation n'est pas surprenante : tout piézomètre porte une empreinte locale (environnement proche du piézomètre) qui influe plus ou moins sur l'empreinte globale (variations relatives au battement de la nappe à l'échelle de l'aquifère). Nous avons donc introduit de manière artificielle une nouvelle classe de perméabilité et de porosité qui a été attribué aux cellules dans un rayon de 500 mètres autour du piézomètre de Perrigny.

La figure ci-dessous permet de visualiser la complexité finale du champ de perméabilité.

Figure 30 : Distribution horizontale des perméabilités.



#### 4.2.4 Stratégie de calage

Le calage a été principalement réalisé par un ajustement visuel entre courbes mesurées et courbes simulées sur les trois chroniques de référence. Cette démarche a été renforcée par l'utilisation d'outils statistiques semi-automatiques intégrés au progiciel MODFLOW (calcul de moyenne d'écart, d'écart-types entre séries mesurées et séries simulées).

Schématiquement, le calage a été contraint par les considérations suivantes :

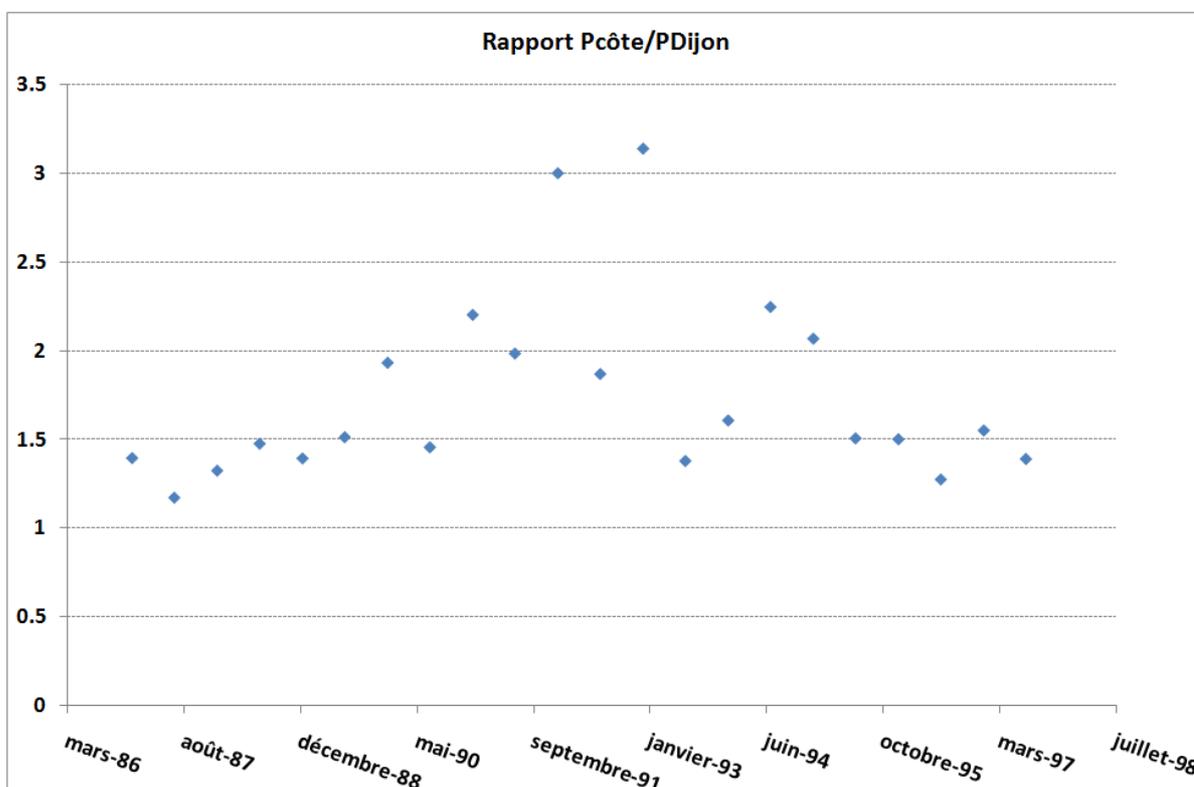
Le calage des paramètres correctifs des séries mensuelles d'infiltration efficace a été principalement guidé par la comparaison visuelle entre débit simulé et débit mesuré dans la zone d'exutoire de la Cent Fonts. En effet, leur impact premier est de contrôler le volume d'eau apporté à la nappe ce qui va nécessairement déterminer le débit à l'exutoire principal.

Le calage du champ de perméabilité et de porosité des séries aquifères s'est d'abord appuyé sur le calage des chroniques piézométriques. C'est en effet la perméabilité locale qui permet de caler un niveau piézométrique moyen puis la porosité efficace qui va jouer sur l'amplitude des variations piézométriques en fonction de la pluie efficace (battement de la nappe).

Le calage des perméabilités des séries détritiques oligocènes et des séries carbonatées jurassiques s'est fait en essayant de caler les débits dans la zone d'exutoire de la Cent Fonts en période de sécheresse. En effet, ce sont deux paramètres explicatifs majeurs de cette grandeur physique en période d'assec (contrôle des flux en provenance des aquifères bordiers pour des différences de charge marquées).

L'impluvium et donc les débits alloués aux venues karstiques ponctuelles ont pu être ajustés grâce à l'observation suivante : le déphasage entre les pluies de l'arrière côte (station de Détain) et les pluies de la plaine (station de Dijon Longvic) est maximal entre 1990 et 1995. La modification des apports karstiques influent donc principalement sur une partie de la courbe.

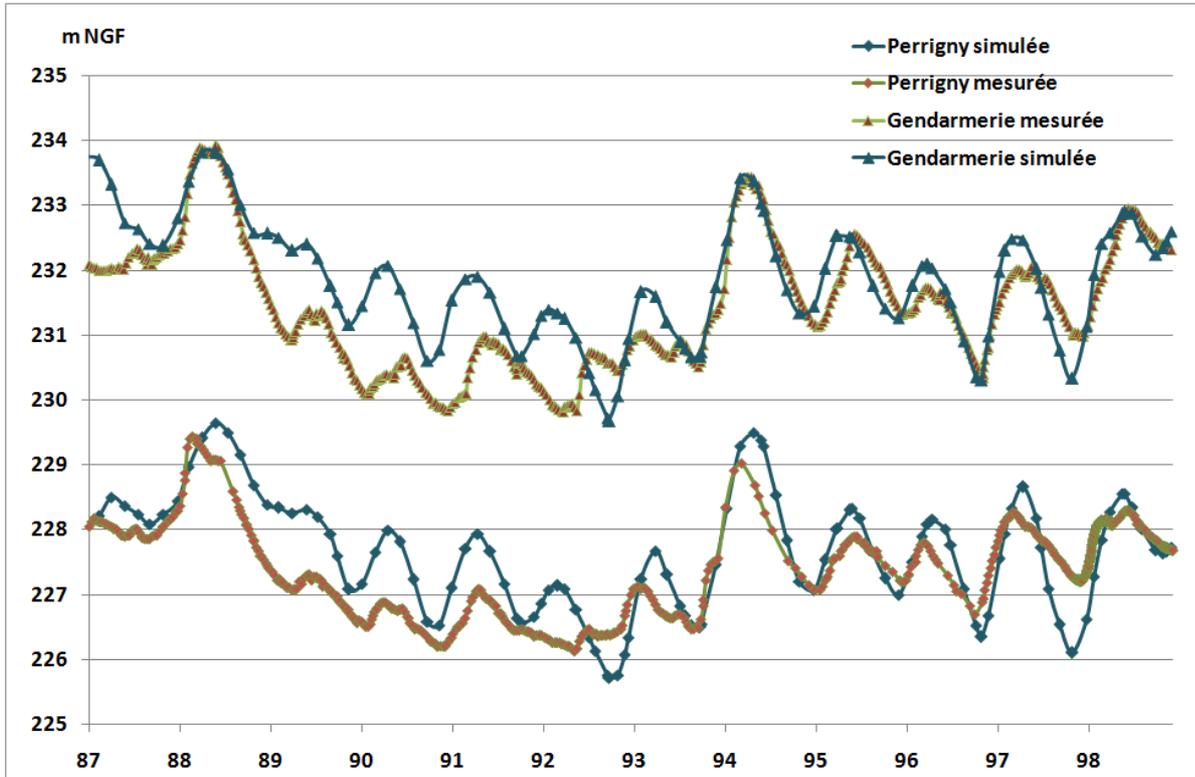
Figure 31 : Rapport entre pluies efficaces mensuelles mesurées à la station de Détain et pluies efficaces mensuelles mesurées à la station de Dijon Longvic.



### 4.2.5 Résultats

Les figures ci-dessous permettent de visualiser la qualité du calage :

Figure 32 : Calage des chroniques piézométriques (1987-1998)



Concernant les chroniques piézométriques, le choix a été de privilégier le calage de la chronique du piézomètre Gendarmerie au détriment du piézomètre Perrigny. En effet, nous avons considéré que ce dernier était plus influencé et par des hétérogénéités sédimentaires probables (partie aval de la nappe) et par la proximité de la zone d'exutoire.

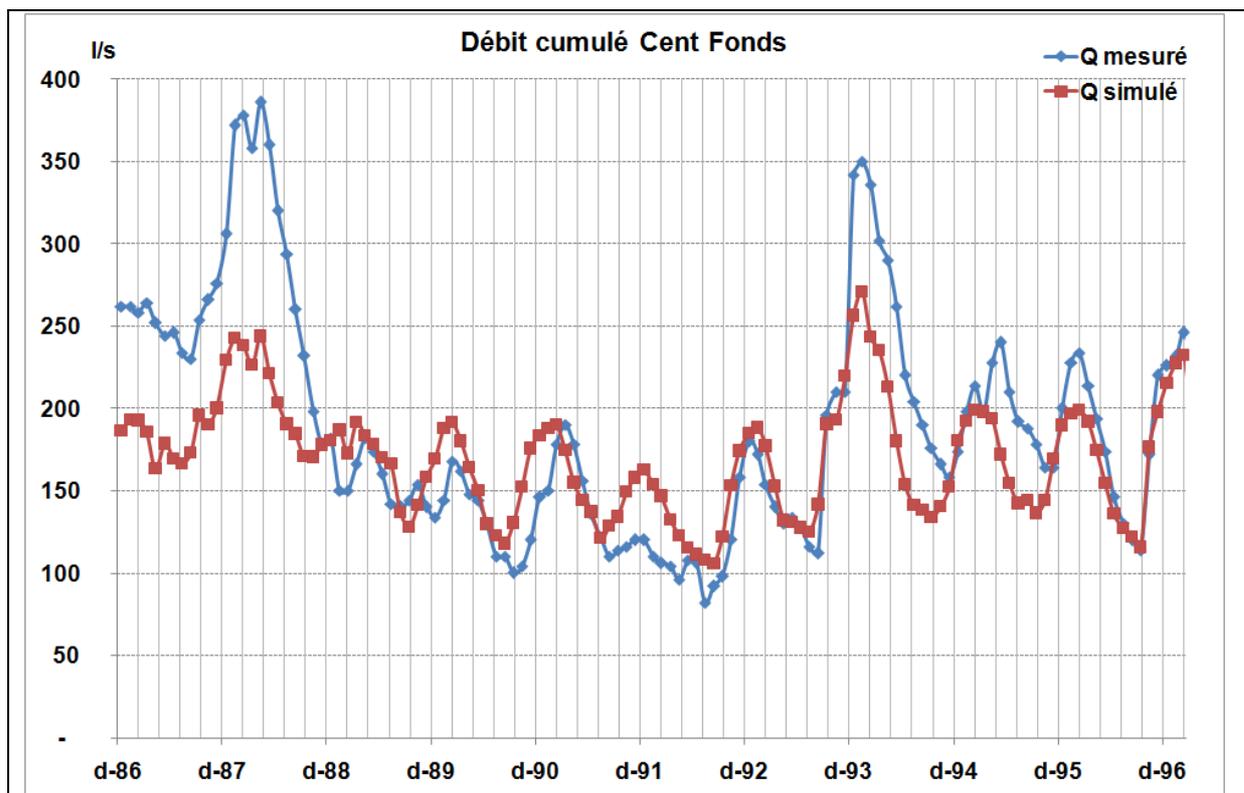
Le calage a été concentré sur les tendances et les écarts entre minima et maxima. En effet, ce sont ces éléments qui importent le plus pour satisfaire l'objectif de l'étude : déterminer des volumes prélevables et définir des règles de gestion.

On remarquera que les variations secondaires de piézométrie (liées à des périodes pluvieuses moyennes) sont mal représentées par le modèle numérique, et ce pour les deux séries. Cela peut être expliqué de deux façons :

- ▶ Mauvaise représentativité des pluies enregistrées sur la station de Dijon-Longvic vis-à-vis des pluies réelles sur l'impluvium. On peut ainsi avoir minoration ou majoration de la pluie réelle par rapport à la pluie introduite dans le modèle.
- ▶ Phénomène physique non représenté dans le modèle. Il est remarquable que les périodes de forte pluie s'accompagnent de variations piézométriques de forte amplitude, alors que les pluies « moyenne » provoquent des variations relativement plus faibles. Ceci pourrait être expliqué par des phénomènes complexes de sub surface liés à la gestion des eaux de pluie en zones urbanisées. C'est une direction de recherche à explorer.

Pour le calage des débits, nous avons privilégié le calage des valeurs en période d'étiage plutôt qu'en période de crues. Cela est plus cohérent avec les objectifs de l'étude. Rappelons de plus que les valeurs estimées de débit souterrain en période de crue sont très approximatives.

Figure 33 : Calage des chroniques de débit (1987-1998)



Le calage des débits à la zone d'exutoire de la Cent Fonds peut être jugé satisfaisant. Il reproduit bien les tendances :

- ▶ Diminution constante du débit de 1987 à 1994.
- ▶ Augmentation de 1996 à 2003.
- ▶ Stabilisation de 2003 à 2009.

Cet avis sur la qualité du calage exclut les deux premières années de simulation (de 0 à 700 jours environ). On observe une nette différence entre données mesurées et données simulées. Ceci s'explique par un effet numérique de convergence entre un état moyen introduit comme point de départ des simulations, et un état simulé ajusté qui nécessite plusieurs itérations avant d'obtenir une piézométrie "cohérente" avec les variations des conditions aux limites. Cette origine numérique (et donc artificielle) du mauvais calage initial a été vérifiée par différentes procédures.

Notons de plus que les proportions des variations de débit sont dans l'ensemble bien représentées.

Le calage a été réalisé avec les paramètres d'entrée suivants :

- (1) Pour les paramètres de modification de la pluie efficace pour obtenir des valeurs d'infiltration efficace, on peut noter qu'il n'a pas été nécessaire d'introduire un facteur de retard sur les impluviums. On notera aussi que seuls les coefficients d'infiltration affectant l'impluvium de la nappe stricto sensu présentent des valeurs différentes en fonction des intensités de pluie mensuelle. Nous avons en effet considéré que l'infiltration en zones urbaines était peu sensible à cette grandeur (les dispositifs d'infiltration présentent la même efficacité quelle que soit l'intensité de la pluie) et que l'infiltration sur les coteaux était elle aussi d'abord contrôlée par la faible perméabilité des matériaux ce qui limite l'influence de l'intensité des pluies.

Paramètres de forme	Impluvium nappe Ci (%)	Impluvium zones urbaines Ci (%)	Impluvium coteaux Ci (%)
Peff <100 mm	0,8	0,2	0,4
100 < Peff < 200 MM	0,8	0,2	0,4
Peff > 200 mm	0,6	0,2	0,4
Retard	0	0	0
Dilatation/Etalement du signal	5 mois	2 mois	6 mois

(2) Au final, le calcul des débits affectés à chacune des venues d'eau sous alluviales liés au karst a été estimé avec les paramètres suivants :

Ci pour Peff < 100 mm = 0,7  
 Ci pour 100 < Peff < 200 = 0,6  
 Ci pour Peff > 200 mm = 0,5  
 Facteur Retard = 0  
 Facteur Dilatation = 3 mois.

(3) Les perméabilités introduites dans le modèle sont représentées dans le tableau ci-dessous :

	Kx	Ky	Kz
<b>Drain zone exutoire</b>	0.1	0.1	0.1
<b>Karst</b>	$1.10^{-5}$	$1.10^{-5}$	$1.10^{-5}$
<b>Nappe profonde</b>	$3.10^{-4}$	$3.10^{-4}$	$3.10^{-4}$
<b>Couche moutarde</b>	$1.10^{-8}$	$1.10^{-8}$	$1.10^{-8}$
<b>Nappe sup 1</b>	$8.10^{-3}$	$8.10^{-3}$	$8.10^{-3}$
<b>Oligocène détritique</b>	$2.10^{-5}$	$2.10^{-5}$	$2.10^{-5}$
<b>Alluvions modernes Ouche</b>	$1.10^{-4}$	$1.10^{-4}$	$1.10^{-4}$
<b>Oligocène marneux</b>	$1.10^{-8}$	$1.10^{-8}$	$1.10^{-8}$
<b>Nappe sup 2</b>	$6.10^{-3}$	$6.10^{-3}$	$6.10^{-3}$
<b>Nappe sup 3</b>	$3,5.10^{-3}$	$3,5.10^{-3}$	$3,5.10^{-3}$
<b>Nappe sup. Perrigny</b>	$1.10^{-4}$	$1.10^{-4}$	$1.10^{-4}$

(4) Les paramètres de stockage implémentés dans le modèle sont détaillés dans le tableau ci-dessous :

	<b>Ss</b>	<b>Sy</b>	<b>ne</b>	<b>n</b>
<b>Drain zone exutoire</b>	0.0001	0.0001	1%	1%
<b>Karst</b>	0.0001	0.0001	1%	1%
<b>Nappe profonde</b>	0.0001	0.0001	1%	1%
<b>Couche moutarde</b>	0.03	0.03	3%	30%
<b>Nappe sup 1</b>	0.014	0.014	14%	14%
<b>Oligocène détritique</b>	0.001	0.001	1%	1%
<b>Alluvions modernes Ouche</b>	0.01	0.01	10%	10%
<b>Oligocène marneux</b>	0.03	0.03	3%	30%
<b>Nappe sup 2</b>	0.012	0.012	12%	12%
<b>Nappe sup 3</b>	0.001	0.001	1%	1%
<b>Nappe sup. Perrigny</b>	0.03	0.03	30%	30%

## 4.3 VALIDATION EN REGIME TRANSITOIRE

### 4.3.1 Période de validation

Le calage a été effectué sur des séries temporelles allant de janvier 1998 à décembre 2008.

### 4.3.2 Indicateurs de validation

La validation a été effectuée sur les chroniques suivantes :

Débit estimé pour la zone d'exutoire de la Cent Fonts.

Piézométrie de la nappe superficielle sur le piézomètre dit de Gendarmerie (partie médiane de la nappe).

Piézométrie de la nappe superficielle sur le piézomètre dit de Perrigny (partie aval de la nappe).

### 4.3.3 Résultats

Les résultats sont jugés satisfaisants (cf. figures ci-dessous) :

Figure 34 : Validation des chroniques piézométriques (1998-2008)

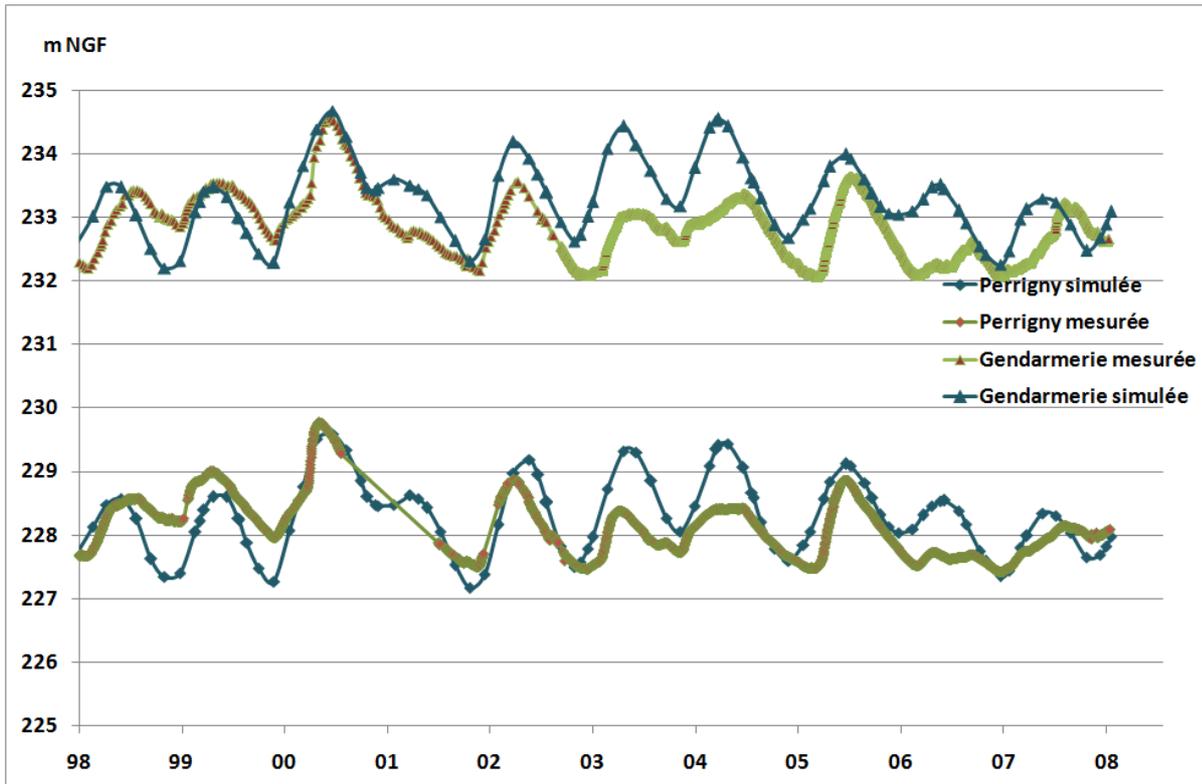
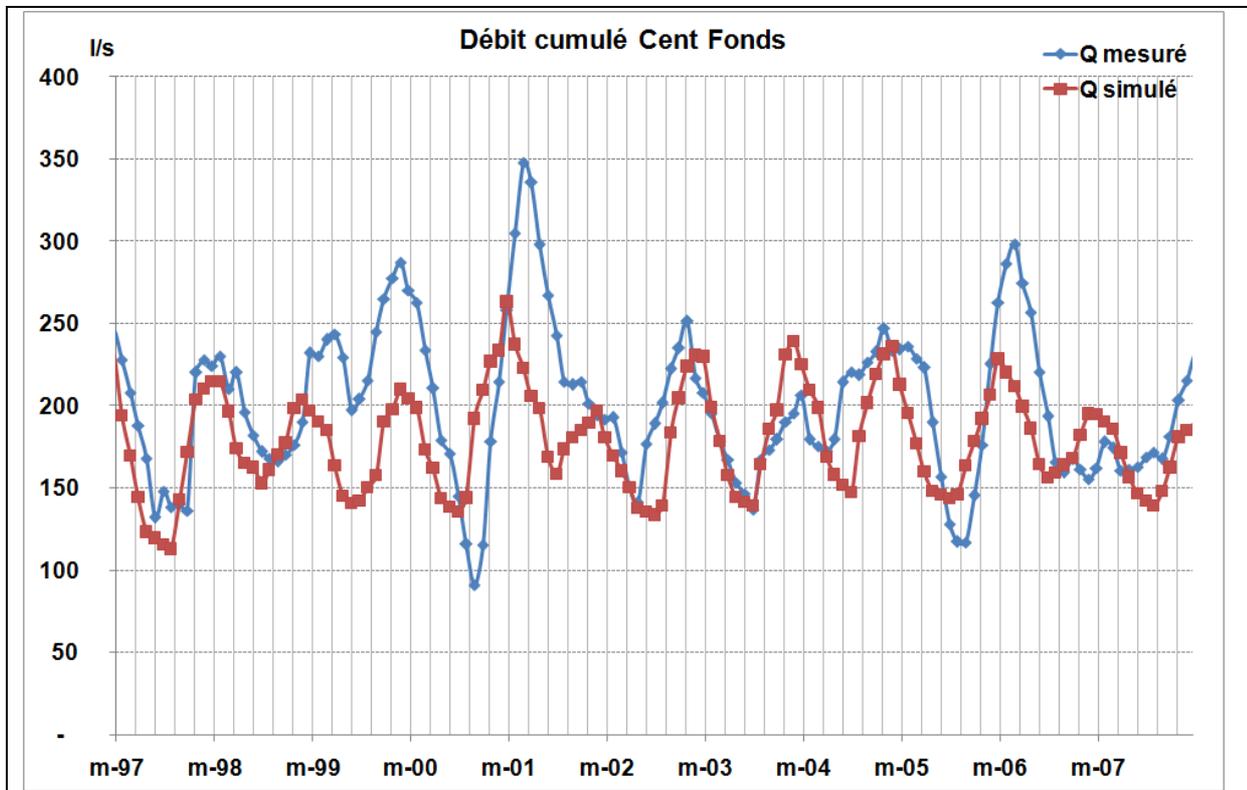


Figure 35 : Validation des chroniques de débit (1998-2008)



Les courbes simulées, tant pour les chroniques de piézométrie que les chroniques de débit, présentent la même qualité que celles générées durant la phase de calage.

Nous avons donc conclu à une validation formelle de la capacité du modèle numérique à simuler le complexe hydrogéologique pour d'autres conditions aux limites. On peut donc en première approximation et sous la réserve de l'étendue de la validation, considérer que le modèle a un certain potentiel prédictif vis-à-vis des grandeurs physiques ayant servi d'indicateurs de calage et de validation : piézométrie du piézomètre Gendarmerie et débit cumulé de la zone d'exutoire de la Cent Fonts.

En conséquence, nous n'avons précédé à aucune modification du modèle en phase de validation.

## 4.4 EXPLOITATION DU MODELE

### 4.4.1 Comparaison avec la piézométrie de référence

Il a paru intéressant de comparer la piézométrie simulée avec la piézométrie de référence donnée par la campagne de mesures réalisée par ANTEA en 2010. Cependant, nous ne possédons pas les données nécessaires pour étendre les simulations jusqu'en 2010.

Au vu des données climatologiques et des chroniques piézométriques disponibles, nous pouvons considérer que le comportement hydrogéologique de la nappe superficielle est quasi stable depuis près de 6 ans. Nous avons donc reporté sur une même figure les mesures piézométriques de l'été 2010 et les isopièzes issues d'une simulation de référence pour l'été 2008 (cf. figure ci-dessous).

Globalement, la piézométrie simulée correspond à la piézométrie observée/mesurée : on retrouve le sens global d'écoulement Nord-Sud délimité dans un "tube" sédimentaire bien délimité, l'apport des bordures vers le "tube" central",...

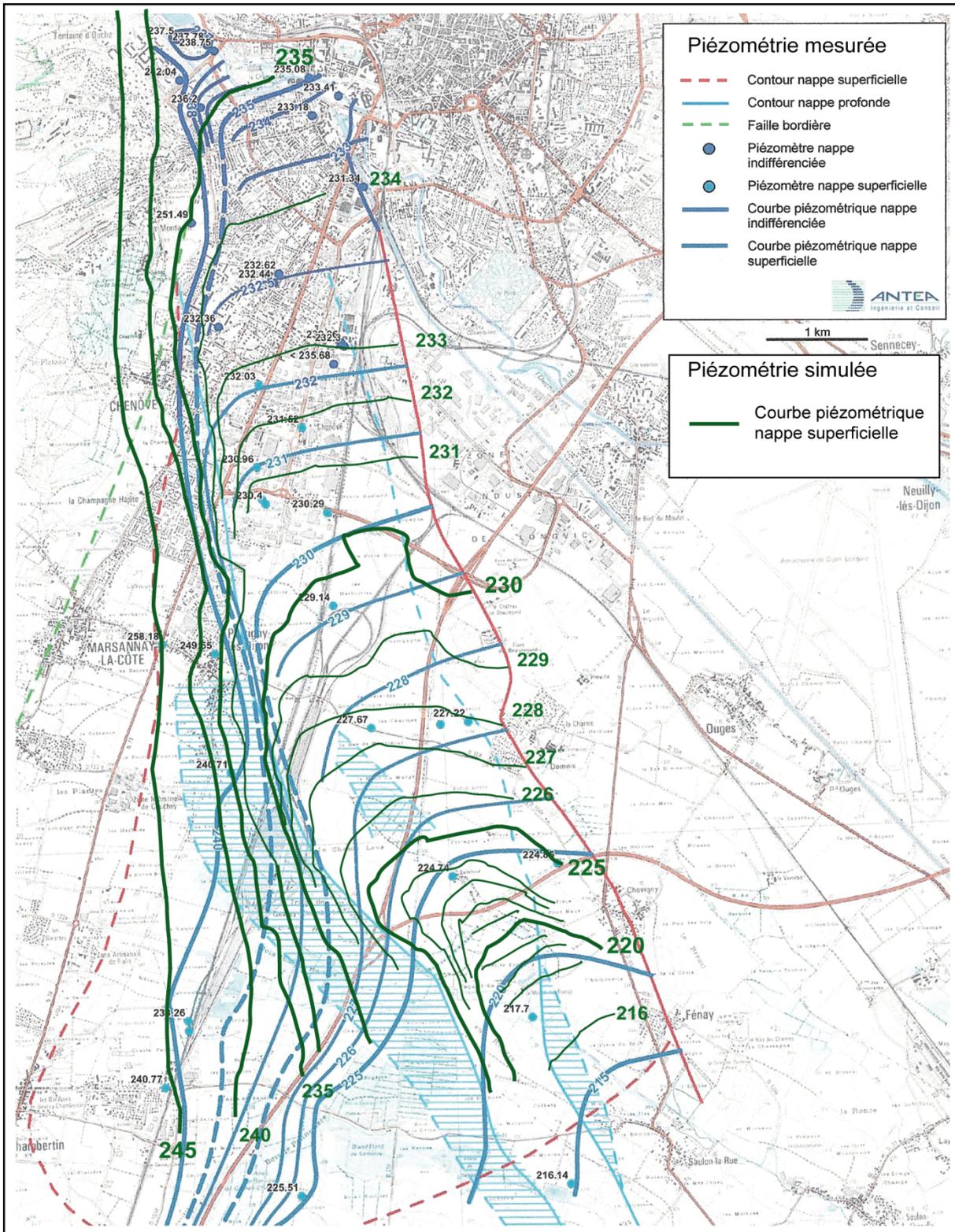
Dans le détail, on note plusieurs divergences mineures :

- ▶ Sous la zone urbaine Dijon-Chenove, on observe une piézométrie simulée plus forte d'au moins un mètre par rapport aux mesures.
- ▶ Sur les coteaux de bordure, on observe une piézométrie simulée non concordante avec les rares mesures piézométriques disponibles dont la représentativité est délicate à définir (séries hétérogènes).
- ▶ Dans la zone d'exutoire de la Cent Fonts, le modèle simule des courbes piézométriques en forme de U inversé de par sa construction géométrique, alors que les courbes piézométriques interprétées à partir des mesures sont plus concaves.

Ces divergences sont attendues : rappelons que les périodes de comparaison ne sont pas les mêmes. De plus, il s'agit de secteurs du modèle très influencés par le choix des conditions aux limites : zone complexe d'échanges entre les trois unités aquifères karst-Ouche-Dijon Sud marqué par la proximité de limites à charge constante (avec un effet potentiel du Canal de Bourgogne sur la piézométrie), structures complexes Karst-Oligocène hétérogène avec de nouveau une limite à charge constante, zones d'exutoires de la Cent Fonts de géométrie réelle complexe mais traduite de façon simpliste dans le modèle.

Ces divergences ne remettent pas en cause la capacité du modèle numérique à simuler les débits en sortie du système hydrogéologique mais montrent ses limites quant à une bonne représentation de la piézométrie.

Figure 36 : Comparaison piézométrie simulée (septembre 2008) et piézométrie observée lors de la campagne réalisée par ANTEA (septembre 2010)

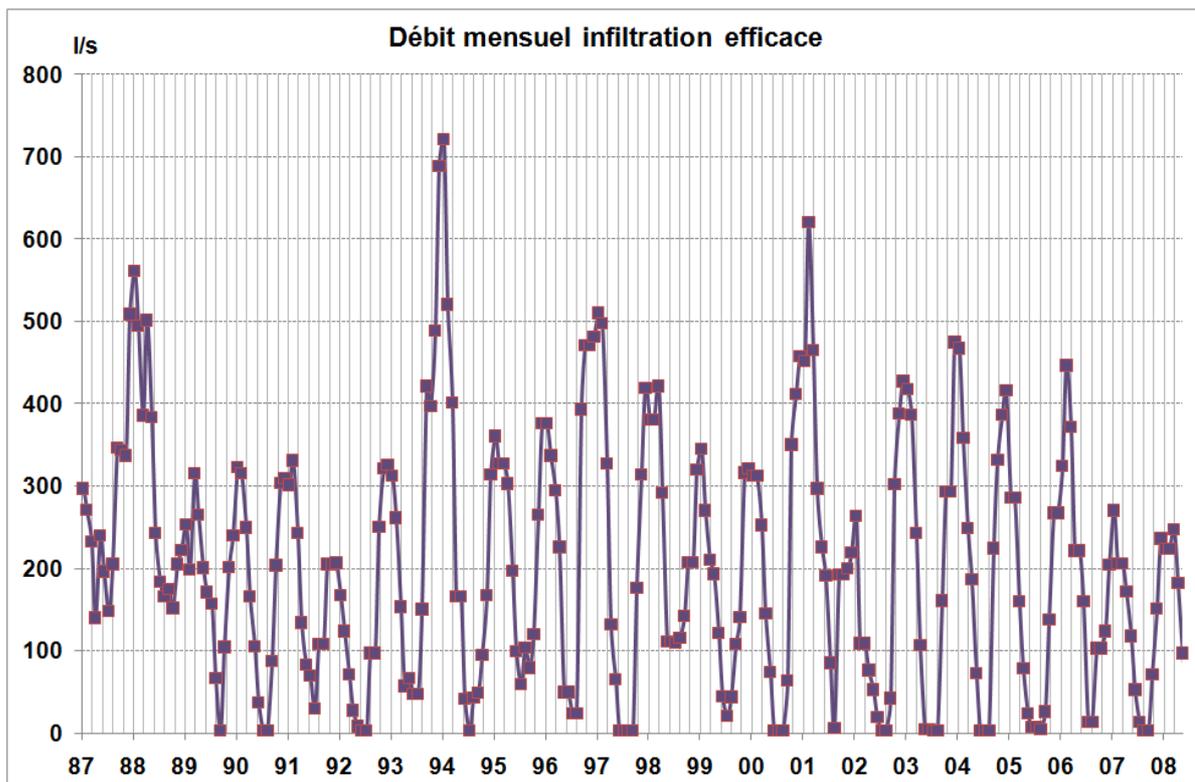


#### 4.4.2 Bilan

L'exploitation du modèle calé permet d'obtenir une définition plus fine du comportement hydrogéologique la nappe. Au-delà des débits de la zone de résurgence de la Cent Fonts, on obtient aussi de nombreuses chroniques sur les entrées et les sorties de l'hydro système.

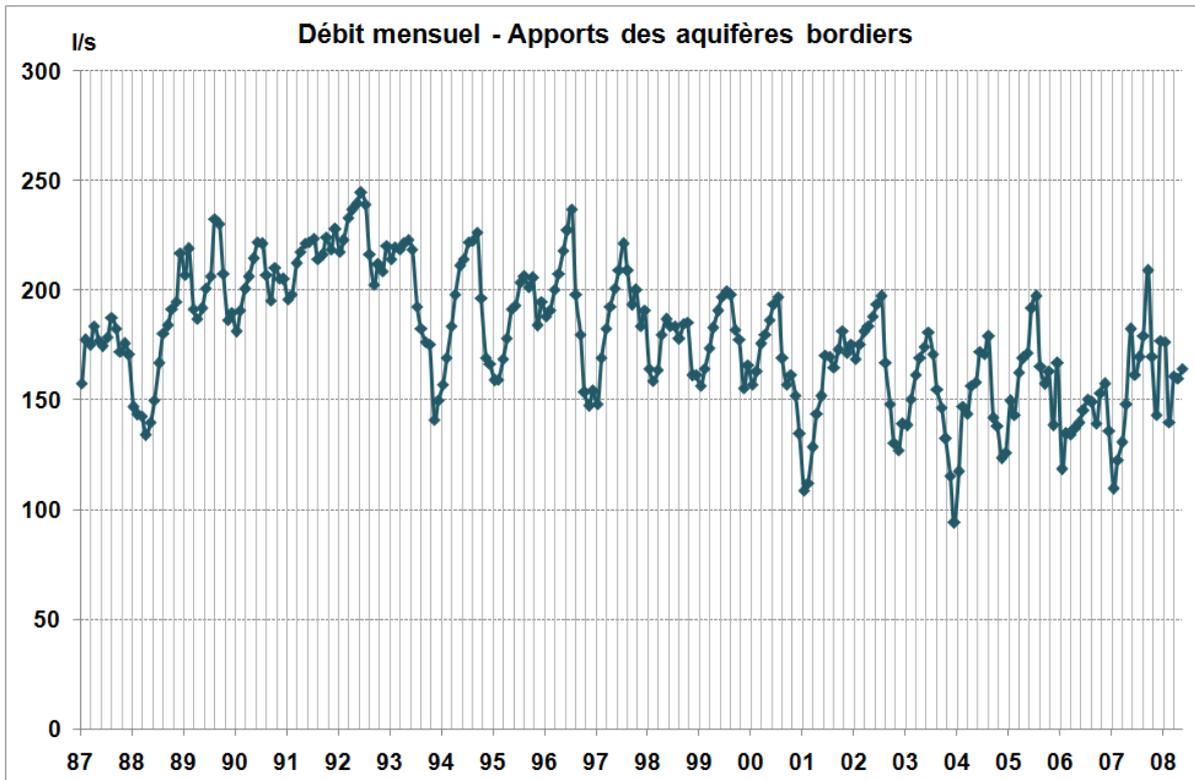
Le paramètre d'entrée prépondérant est l'infiltration efficace. Les apports sont très variables d'un mois à l'autre avec des débits moyens mensuels qui varient entre 0 et 730 l/s (moyenne de 200 l/s) :

Figure 37 : Chronique de l'infiltration efficace mensuelle simulée (1987-2008)



Le paramètre d'entrée secondaire est le débit fourni soit en continu par le karst avec les séries oligocènes en relais, soit par la nappe alluviale moderne de l'Ouche.

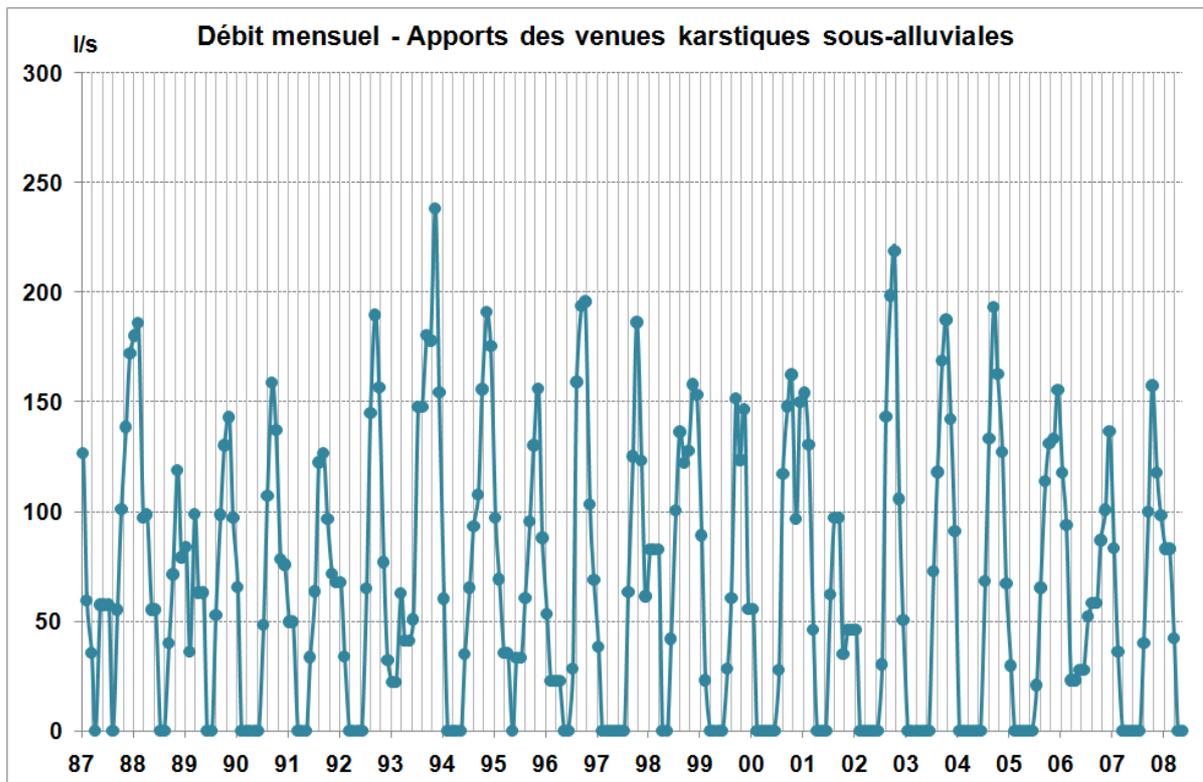
Figure 38 : Chronique des débits en provenance des aquifères bordiers : karst et appareil alluvial de l'Ouche (1987-2008)



Ces apports cumulés varient entre 100 et 250 l/s en fonction de la piézométrie de la nappe superficielle. En période de dépression piézométrique, ils augmentent consécutivement à l'augmentation des gradients hydrauliques entre les masses d'eau.

Précisons qu'il n'est pas possible de discrétiser les apports du karst vis à vis des apports de l'Ouche sur la base de critères certains. La balance donnée par le modèle résulte des paramètres hydrodynamiques introduits dans le modèle et nous ne disposons pas de données piézométriques assez précises pour valider les apports soit du karst, soit de l'appareil alluvial de l'Ouche. Il est donc plus juste de considérer les apports cumulés des aquifères bordiers.

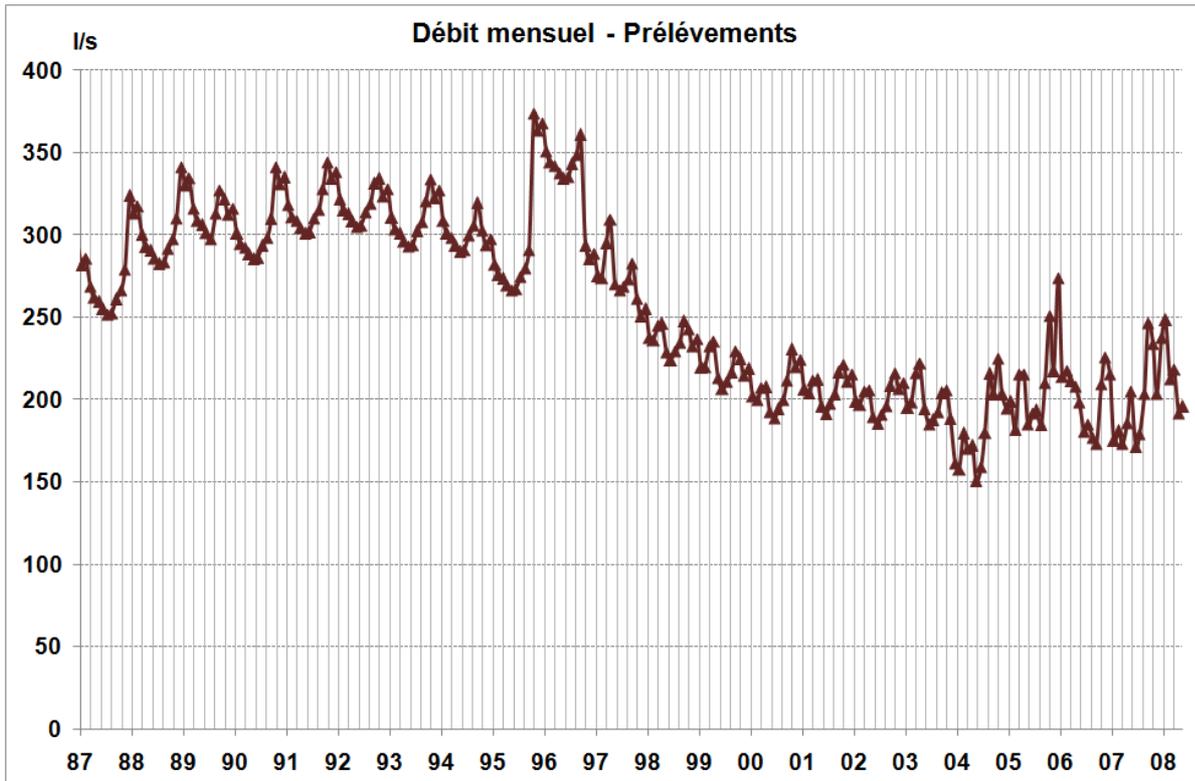
Figure 39 : Chronique des débits simulés cumulés pour les venues sous alluviales liées au fonctionnement du karst bordier (1987-2008)



L'apport des venues sous alluviales du karst est plus réduit. Les apports sont très temporaires et peuvent varier entre 10 et 250 l/s en cumulé sur les trois puits d'injection (moyenne autour de 60 l/s)

Les sorties du modèle correspondent principalement soit à la zone d'exutoire des sources de la Cent Fonts (cf. figure 35), soit aux pompages AEP, industriels et agricoles.

Figure 40 : Chronique des pompages d'origine anthropique (1987-2008)



Rappelons toutefois des sorties secondaires suivantes :

- ▶ Débit de fuite naturelle de la nappe profonde : environ 25 l/s.
- ▶ Débit par évaporation dans la zone des étangs : environ 5 l/s.

#### 4.4.3 Piézométrie non influencée

A partir du modèle calé et validé, il a été possible de définir une simulation de référence allant de 1987 à fin 2008 pour laquelle tous les pompages ont été éliminés (AEP, industriel et agricole). On obtient alors le comportement hydrogéologique de nappe en régime non influencé.

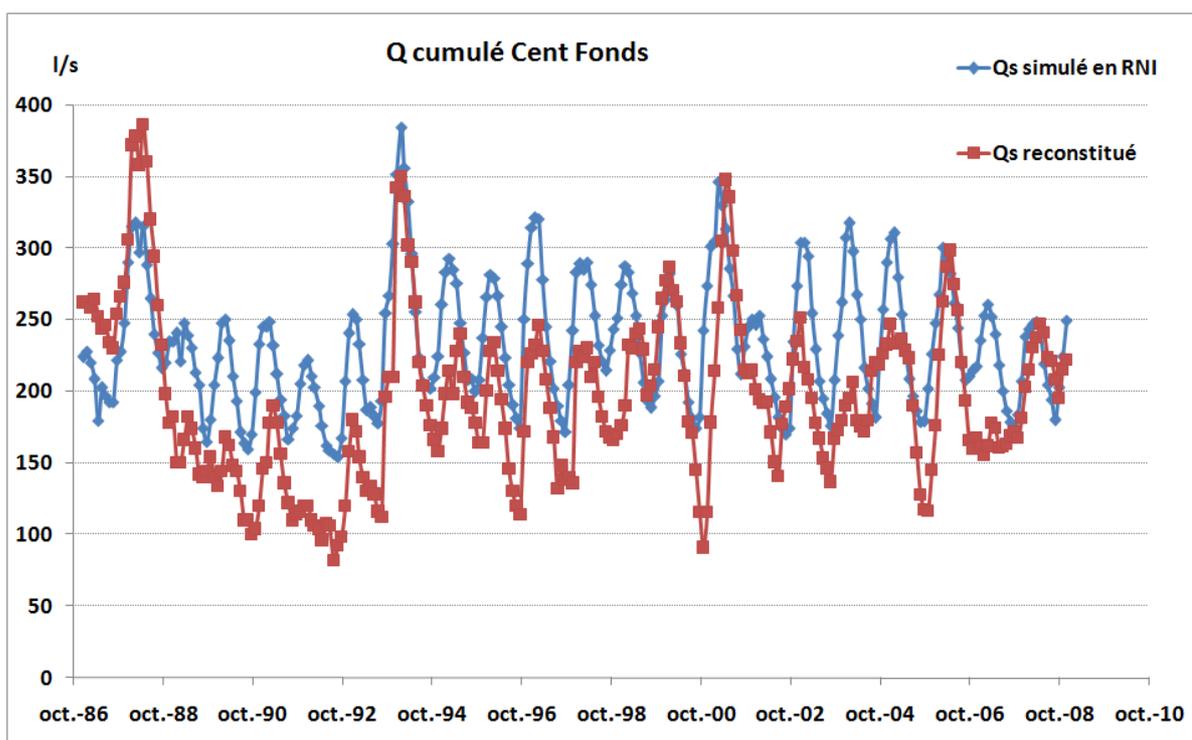
La courbe ci-dessous présente les variations de débit simulé de la zone de résurgence de la Cent Fonts en régime non influencé.

En moyenne, on observe un gain de l'ordre de 60-70 l/s sur le débit cumulé de la zone d'exutoire de la Cent Fonts en cas d'arrêt des prélèvements (estimé à environ 200 l/s en moyenne). Cette valeur moyenne doit être considérée avec prudence : une observation de la courbe ci-dessous montre que les écarts sont plus forts entre 1987 et 1995 quand les prélèvements étaient maximum.

Le fait que les prélèvements ne soient pas intégralement compensés par la zone d'exutoire de la Cent Fonts s'explique par les dynamiques d'échange avec les aquifères bordiers. On passe ainsi de 180 l/s en moyenne en régime influencé pour les alimentations cumulées des aquifères bordiers, à environ 50 l/s en régime non influencé pour ces mêmes alimentations. Cette diminution est liée à l'augmentation de la piézométrie dans notre bassin et donc à une diminution des gradients hydrauliques qui régissent les échanges entre masses d'eau.

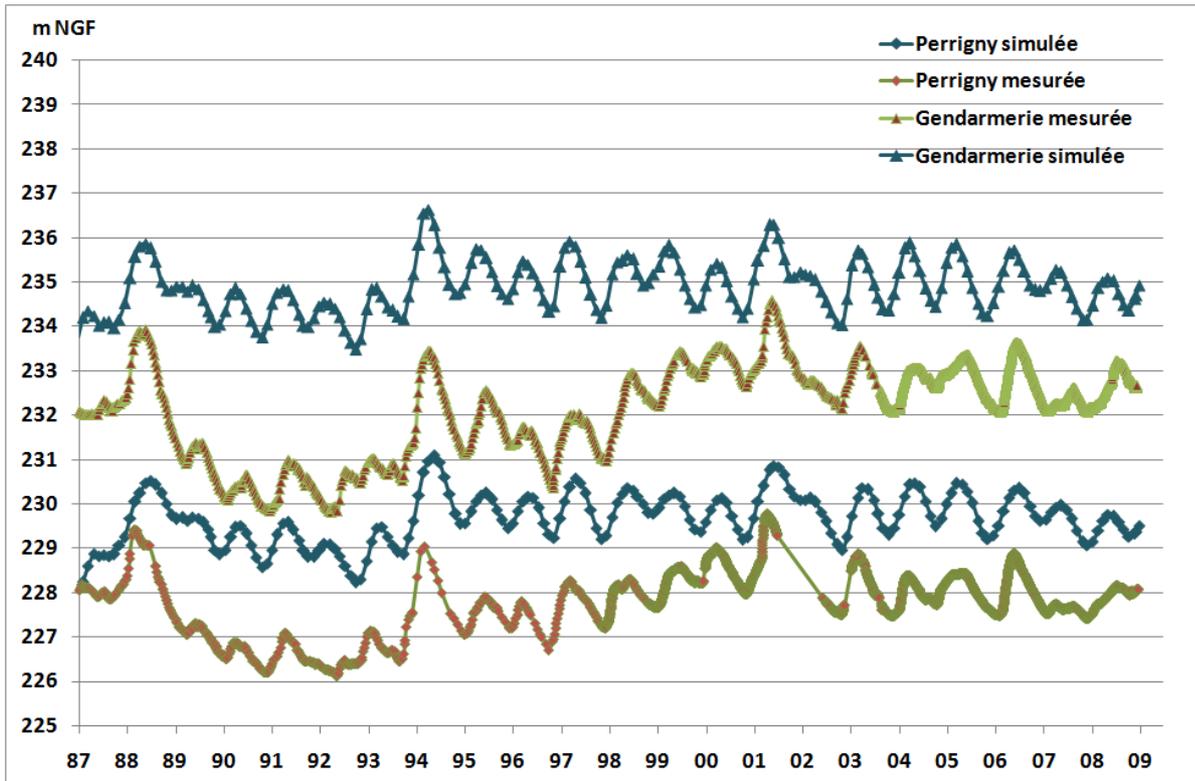
De plus, il est important que les premiers tests numériques réalisés en régime permanent comme en régime transitoire montrent que les prélèvements au champ captant des Gorgets ne sont que partiellement soutirés à la nappe de Dijon Sud (environ 20% ?) ; une partie des eaux pompées provient ainsi directement du karst ou de l'appareil alluvial de l'Ouche. La réalisation de simulations conditionnelles dans les phases ultérieures de l'étude devrait permettre de mieux comprendre ces inter relations.

Figure 41 : Chronique des débits à la zone de résurgence de la Cent Fonts en régime non influencé (1987-2008)



La courbe ci-dessous présente les variations de piézométrie en régime non influencé. On observe un gain moyen de l'ordre de 2 m. Cette observation est à nuancer : le gain est plus fort dans la zone amont de la nappe et il est plus fort pour la période 1987-1995.

Figure 42 : Chroniques piézométriques en régime non influencé (1987-2008)



## 5. REFERENCES DOCUMENTAIRES

- Amiot M., 1999** - Détermination des périmètres de protection du champ captant des Gorgets (Dijon). Avis de l'hydrogéologue agréé. Rapport 26 p. + annexes.
- Bouchet C., 1989** - Avis sur la baisse des débits de la rivière Cent Fonts observée entre janvier et mars 1989. Rapport BRGM 8 p.
- Combes P., 1985** - Etude quantitative sur modèle mathématique de la nappe de Dijon Sud. Situation au 20.04.85. Rapport ENSMP et CPGF. 20 p.
- Combes P., 1985** - Etude quantitative sur modèle mathématique de la nappe de Dijon Sud. Rapport ENSMP. 18 p. + annexes.
- Corbier Pauline, 2000** - Mise en évidence d'une alimentation des aquifères poreux plio-quaternaires par les massifs karstiques de bordure, Etude des relations entre la côte et l'arrière-côte dijonnaises et la plaine de Bresse, Thèse Université de Bourgogne, 187 pages + annexes.
- CPFG, 1978** - Nappe de Dijon Sud. Etude hydrogéologique. 1ère phase. Rapport d'étude 28 p. + annexes.
- CPFG, 1980** - Nappe de Dijon Sud. Etude hydrogéologique. Rapport d'étude 60 p. + annexes.
- CPFG, 1984** - Etude de la contamination par les nitrates de la nappe de Dijon Sud. Rapport d'étude, 18 p. + annexes.
- CPFG, 1986** - Etude géophysique. Nappe de Dijon Sud. rapport d'étude, 49 p. + annexes.
- CPFG, 1986** - Etude de vulnérabilité de la nappe de Dijon-Sud. Rapport d'étude, 18 p.
- CPFG HORIZON, 1992** - Vulnérabilité de la nappe de Dijon Sud. Mise en place d'un réseau de surveillance et d'alerte. réalisation de traçages longue durée et single pulse. calage du modèle de transfert de polluant. Rapport d'étude. 12 p. + annexes.
- Direction Régionale de l'Environnement Bourgogne, 1999** - Inventaire des forages profonds de la nappe de Dijon Sud.
- Jauffret D., 2003** - ressources patrimoniales en eau souterraine dans le département de la Côte d'Or. Rapport BRGM RP 52 156, 60 p.
- Jauffret D., Legrand C., Coueffe R., Tourlière B., 2009** - Etude des ressources en eau profonde du fossé de la Saône en Bourgogne et en Franche-Comté. Rapport final. Rapport d'étude BRGM/RP-56538-FR.
- Lienhardt M.J., Rémond C., 1972** - Synthèse des connaissances acquises sur le système aquifère de la région sud de Dijon en vue de la protection de la nappe phréatique. rapport n°1. Document BRGM. 43 p. + annexes et cartes.
- Marguet T., 1990** - Résultats du programme de surveillance de la nappe de Dijon Sud au droit de l'autoroute A31 de janvier à mars 1990. Rapport BRGM. 6 p. + annexes.
- Mesnier Geoffrey, 2000** - Etude du bassin versant de la source karstique de la Bornue (Vosne-Romanée), Rapport de Maîtrise Université de Franche-Comté, 25 pages.
- Petit Christophe, 1993** - Un bassin d'avant-pays de type pelliculaire : la Bresse au Plio-pléistocène, Thèse Université de Bourgogne, 348 pages.

- Pointet T., 1975** - Synthèse des connaissances acquises sur le système aquifère de la région sud de Dijon en vue de la protection de la nappe phréatique. rapport n°2 : zone de Chenove. Document BRGM. 43 p. + annexes et cartes.
- Rémond et Levêque, 1991** - Sources, système aquifère et thermalisme de la Côte d'or, de Dijon à Chagny. Possibilités de venues sous-alluviales. 9 p. + annexes.
- Service Régional de l'Aménagement des Eaux, 1989** - Nappe de Dijon Sud. Impact des travaux autoroutiers sur la source de la Cent Fonts. Première estimation des débits dérivés aux dépens de la source. Rapport technique, 7 p. + annexes.
- Syndicat Mixte d'Alimentation en Eau du Sud de l'Agglomération Dijonnaise (SMAESAD), 1987 - La nappe de Dijon Sud, 24 pages.
- Syndicat Mixte d'Alimentation en Eau du Sud de l'Agglomération Dijonnaise (SMAESAD), 1993** - Nappe de Dijon Sud (21), Etude de risques liés au projet de plate-forme de transport combiné, 49 pages.
- Syndicat Mixte d'Alimentation en Eau du Sud de l'Agglomération Dijonnaise (SMAESAD), 1993** - Vulnérabilité de la nappe de Dijon Sud. Modélisation en régime transitoire 1986-1992. rapport CPGF Horizon. 23 p.
- Syndicat Mixte d'Alimentation en Eau du Sud de l'Agglomération Dijonnaise (SMAESAD), 2001 - La nappe phréatique de Dijon Sud, 12 pages + annexes.
- Syndicat Mixte d'Alimentation en Eau du Sud de l'Agglomération Dijonnaise (SMAESAD), 2002** - Etude stratégique préalable à l'élaboration d'un contrat pour la nappe de Dijon Sud, Synthèse des phases 1 et 2, 12 pages.
- Syndicat Mixte d'Alimentation en Eau du Sud de l'Agglomération Dijonnaise (SMAESAD), 2002** - Etude relative aux orientations stratégiques à l'horizon 2010. Phase 1 : synthèse des connaissances sur la nappe. Rapport ANTEA, 35 pages + annexes.
- Syndicat Mixte d'Alimentation en Eau du Sud de l'Agglomération Dijonnaise (SMAESAD), 2002** - Etude relative aux orientations stratégiques à l'horizon 2010. Phase 2 : diagnostic technique, juridique et institutionnel. Rapport ANTEA, 42 pages + annexes.
- Syndicat Mixte d'Alimentation en Eau du Sud de l'Agglomération Dijonnaise (SMAESAD), 2002** - Etude relative aux orientations stratégiques à l'horizon 2010. Phase 3 : Plan d'action pluriannuel. Rapport ANTEA, 11 pages + annexes.
- Syndicat Mixte d'Alimentation en Eau du Sud de l'Agglomération Dijonnaise - (SMAESAD), 2003** - Nappe de Dijon Sud : Ensemble, préservons notre ressource, Plaque d'information, 8 pages.
- Syndicat Mixte Dijonnais, 2003** - Nappe de Dijon Sud : exploitation des captages. Elaboration d'un outil d'aide à la décision. Rapport SOGREAH. 17 p. + annexes.
- Syndicat Mixte d'Alimentation en Eau du Sud de l'Agglomération Dijonnaise (SMAESAD), 2003 - Contrat de nappe 2003-2010, 75 pages.