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 prélévements et quantification des ressources existantes (Nappe Dijon Sud)

18 Avril 2011

Ph3_DS_PG.doc

BRL Ingénierie

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

agence de l'eau rhône méditerranée & corse

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 km²). 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 : $\Delta X=25x\ \Delta Z$:

- ΔZ = 10 m.
- ΔX = 250 m.
- ΔY= 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).

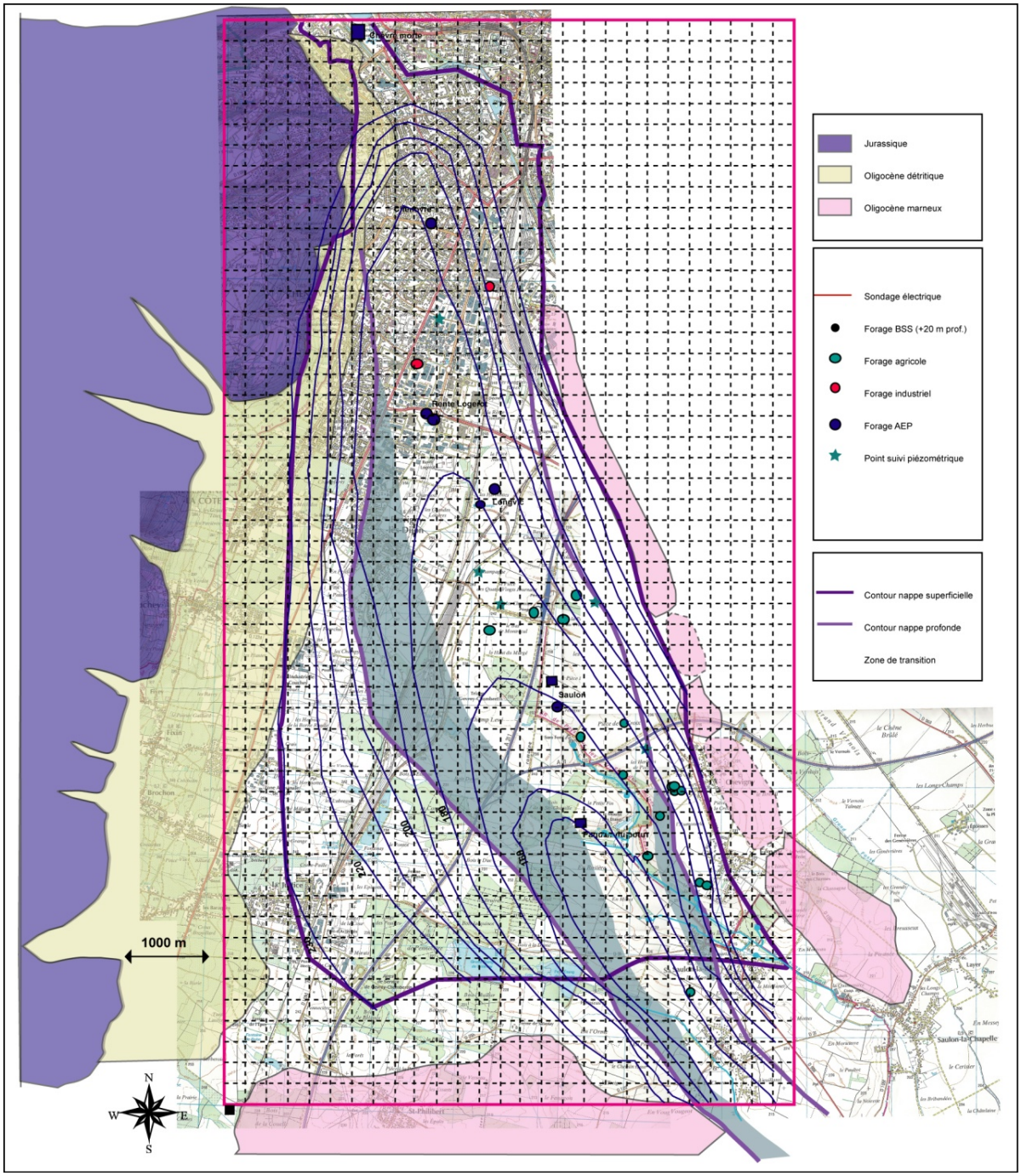
Ainsi, le domaine sera divisé/simplifié en plusieurs catégories de potentiel aquifère :

- 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).

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).

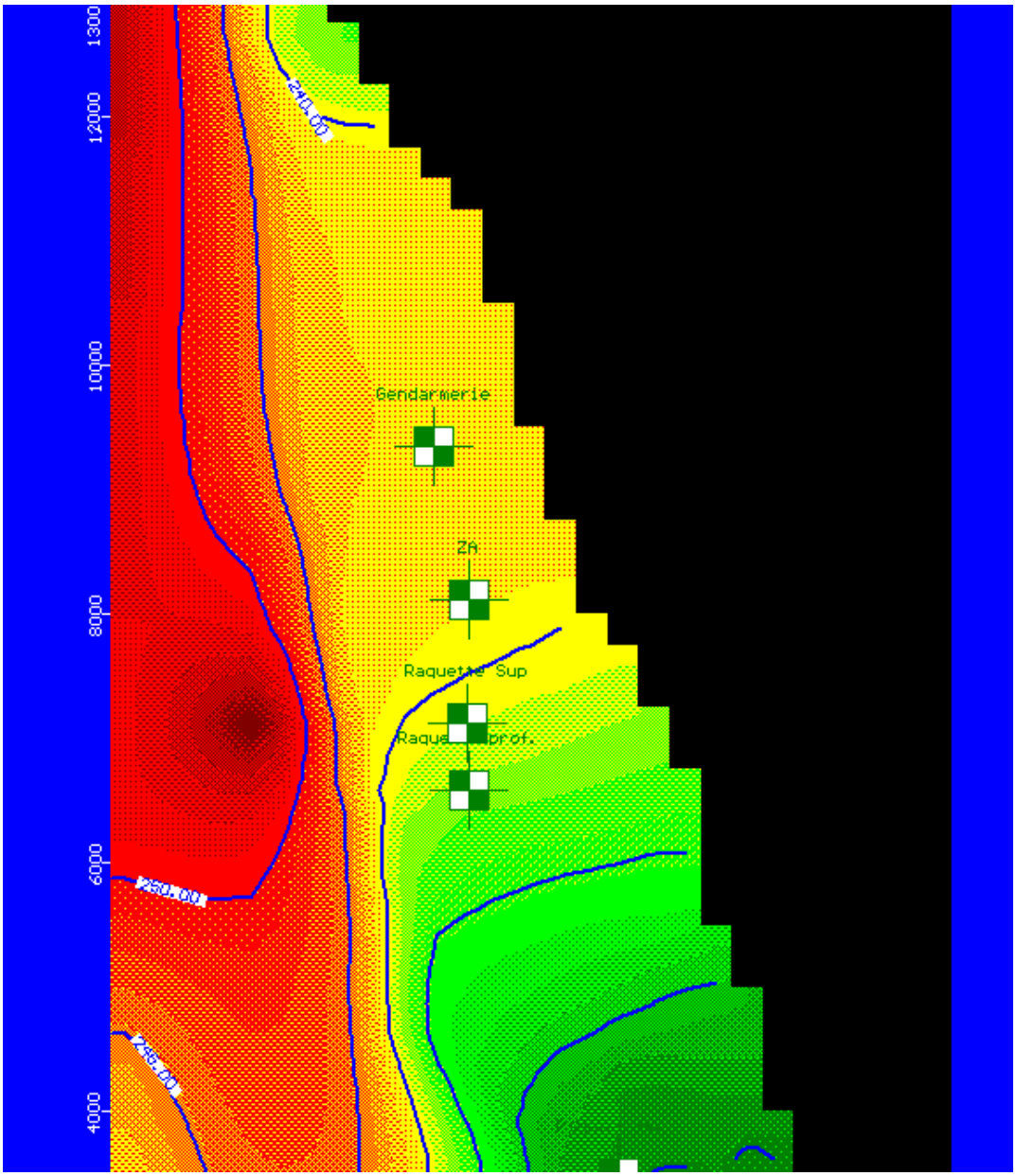
C'est un résultat spectaculaire : dans une telle configuration, les flux d'échange se sont inversés entre les deux masses d'eau.

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

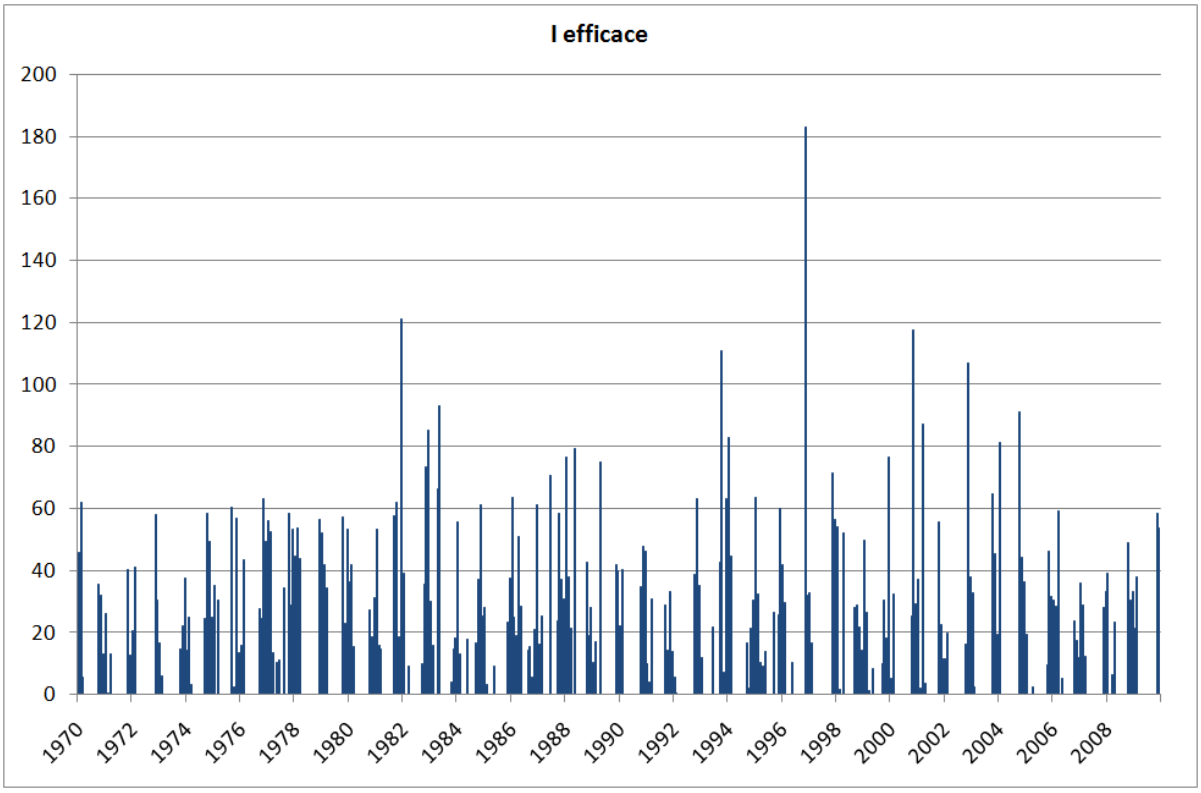
Le calage en régime transitoire nécessite la constitution de séries temporelles à un pas de temps mensuel.

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^3 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 km²).

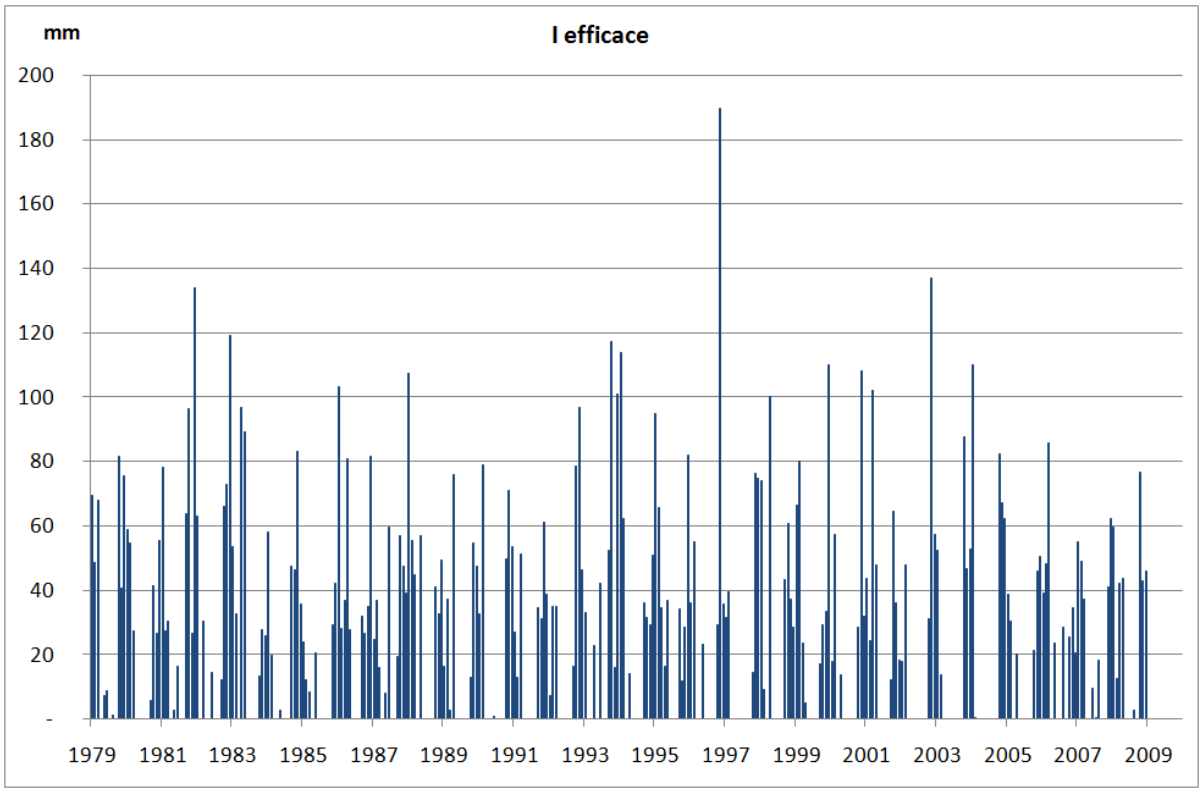
De plus, nous avons intégré sous la zone urbanisée (6 km²) une infiltration constante correspondant aux pertes d'eau des réseaux AEP. Nous avons retenu la valeur de 100 l/m²/an (soit un apport annuel moyen de l'ordre de 600 000 m^3). C'est l'ordre de grandeur qui a été déduit de l'analyse des données 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 supposerons un coefficient d'infiltration de l'ordre de 70%. Cela correspond à un débit spécifique de l'ordre de 10 l/s/km².

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 représentés 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 km² (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 km² pour le puits d'injection sous Dijon. Ce qui traduit la règle suivante :

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

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 :

$$\text{Si } (Pi > 100 \text{ mm}) \text{ alors } Qi = f(Pi = 100 \text{ mm})$$

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 km². Cela correspond à des flux cumulés de l'ordre de 2,3 Mm^3 en moyenne annuelle, avec un minima de 1,1 Mm^3 en 1985 et un maximum de 3,2 Mm^3 en 1986.

4.1.3 Prélèvements AEP

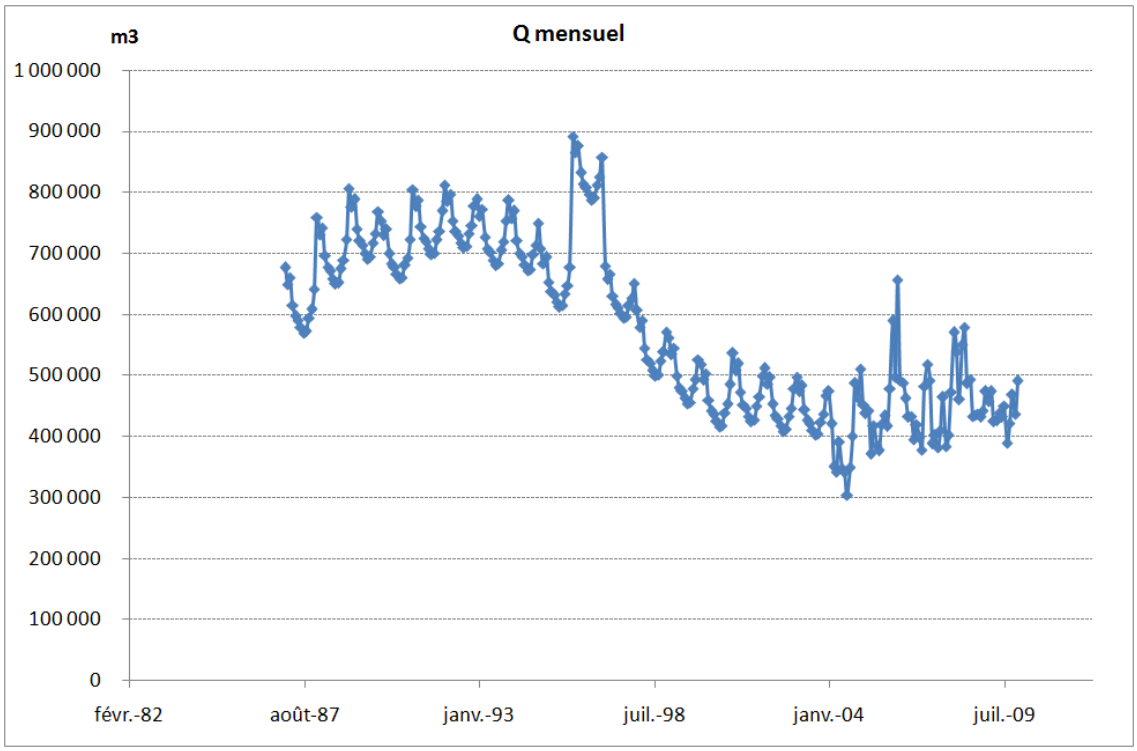
Les données de prélèvements sont celles récoltées en phase 1 de l'étude :

- 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 (Pm=Pa/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%

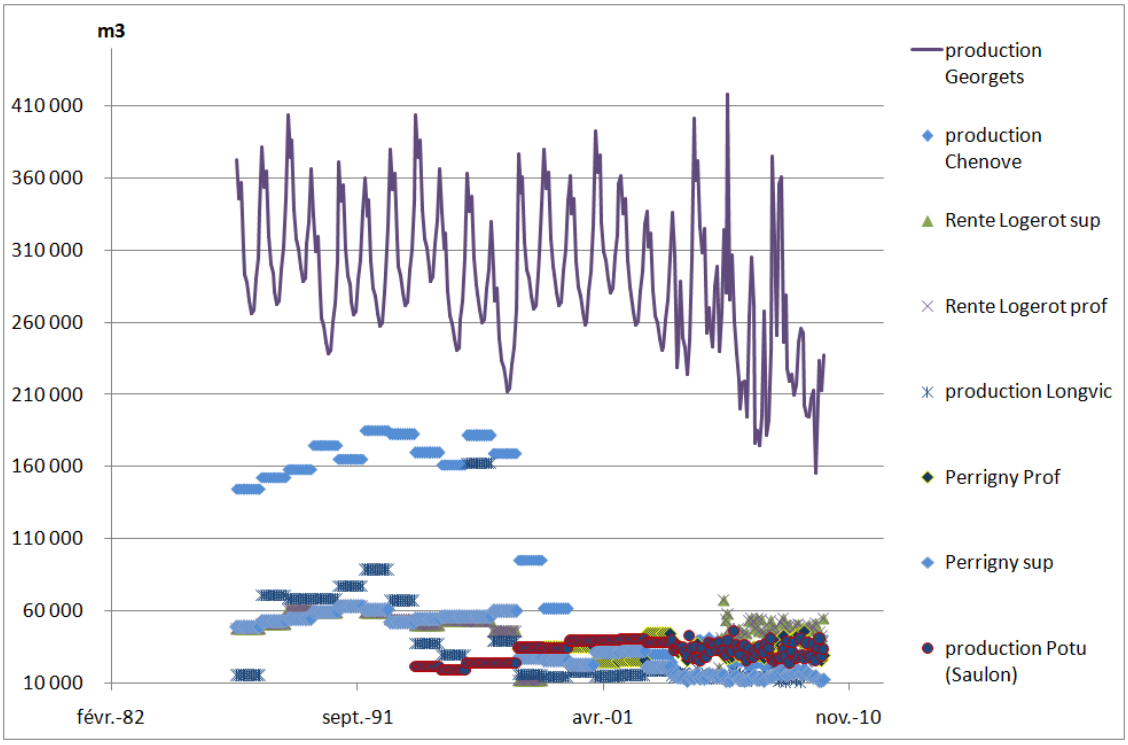
Ce filtre a une importance capitale sur la distribution des prélèvements au global : les prélèvements AEP sont maximaux en période hivernale.

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^3
1997	239
1998	149
1999	198
2000	124
2001	136
2002	137
2003	260
2004	90
2005	261
2006	118
2007	15
2009	24

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

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

V mai = V annuel x 10%

V juin = V annuel x 30%

V juillet = V annuel x 40%

V août = V annuel x 15%

V septembre = V annuel x 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

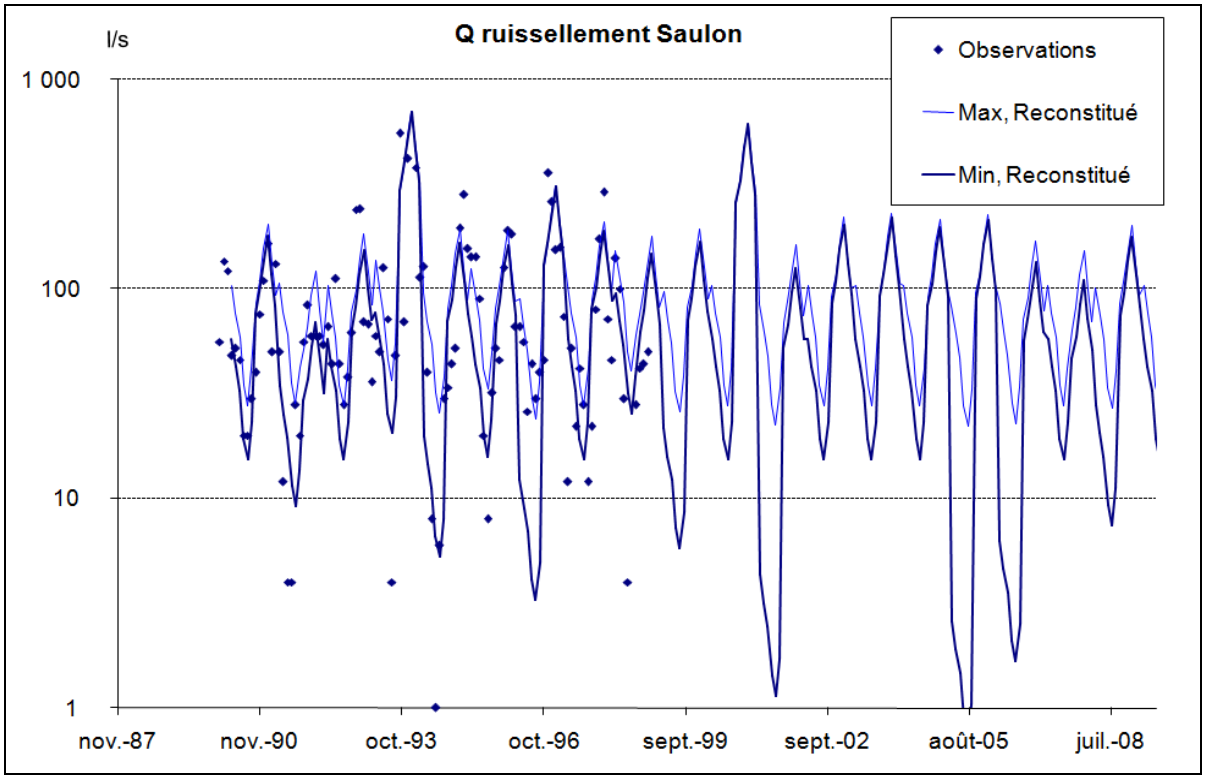
Nous disposons de données annuelles pour les prélèvements industriels (rapport de phase 1).

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

Les valeurs annuelles ont été transformées en données mensuelles en faisant l'hypothèse de prélèvements constants (Pm=Pa/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).

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^3 cumulé sur la période des mesures (10 ans), à comparer au flux mesuré de 26 Mm^3 sur la même période. L'erreur spécifique sur l'estimation des ruissellements est donc de l'ordre de 40%.

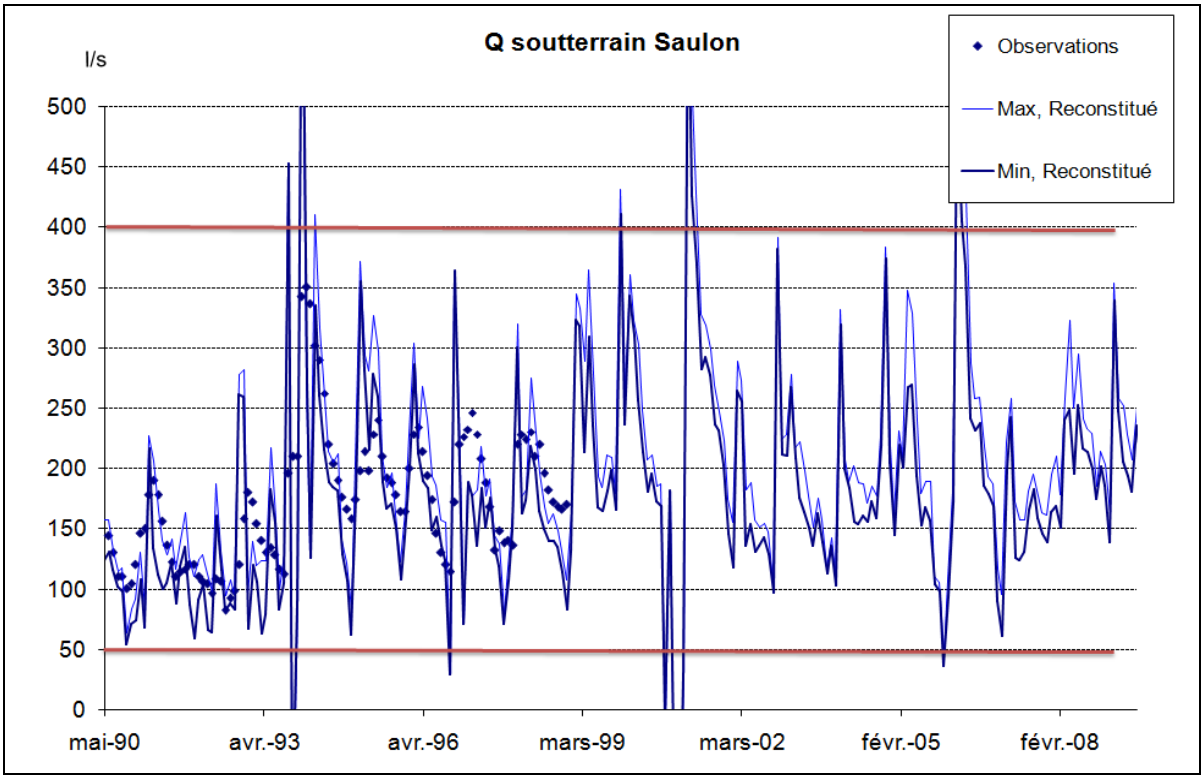
Ceci étant, rappelons que la part de ruissellement est estimée à environ 40% des débits enregistrés à la station hydrométrique de Saulon. Si l'on rappelle la somme des écarts en volume au volume global mesuré à la station, l'erreur relative est alors de seulement 15% ; et elle est portée majoritairement 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 :

Qs reconstitué= Q mesuré Saulon - Qr 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).

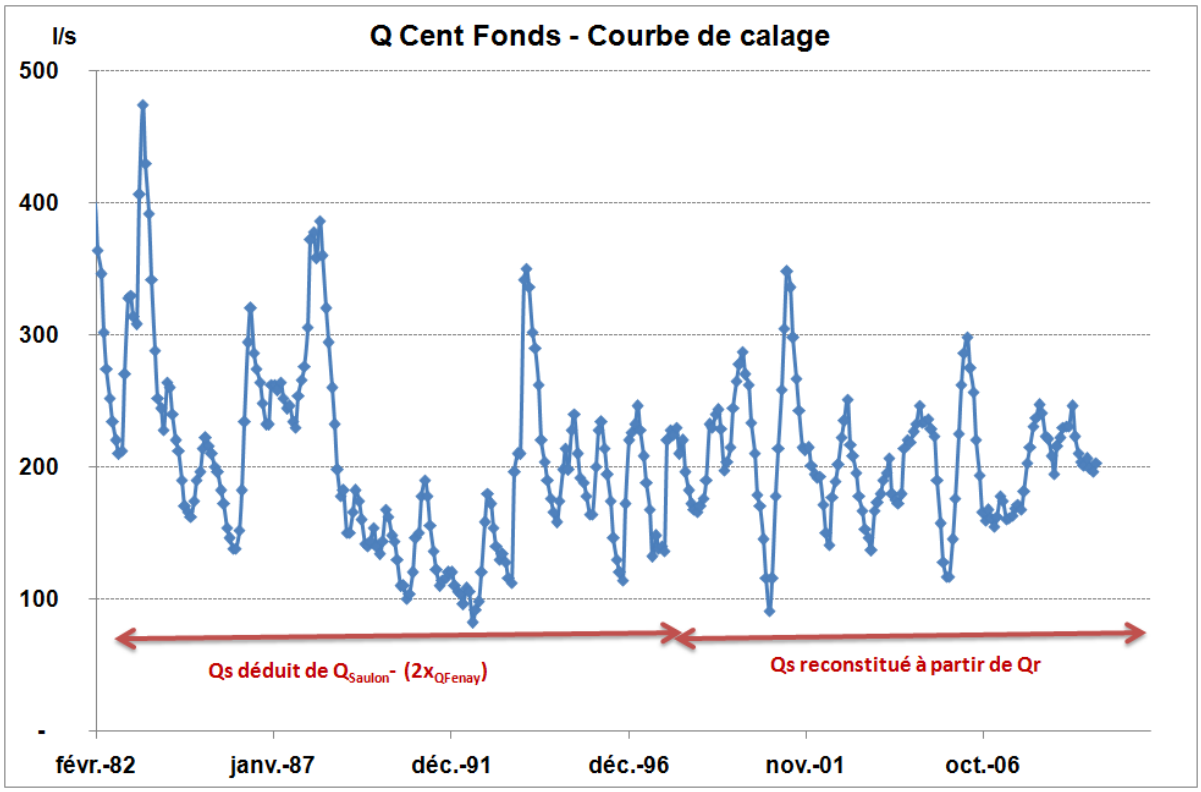
Figure 28 : Débits souterrains estimés et débits souterrains reconstitués au droit de la station hydrométrique de Saulon.



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).

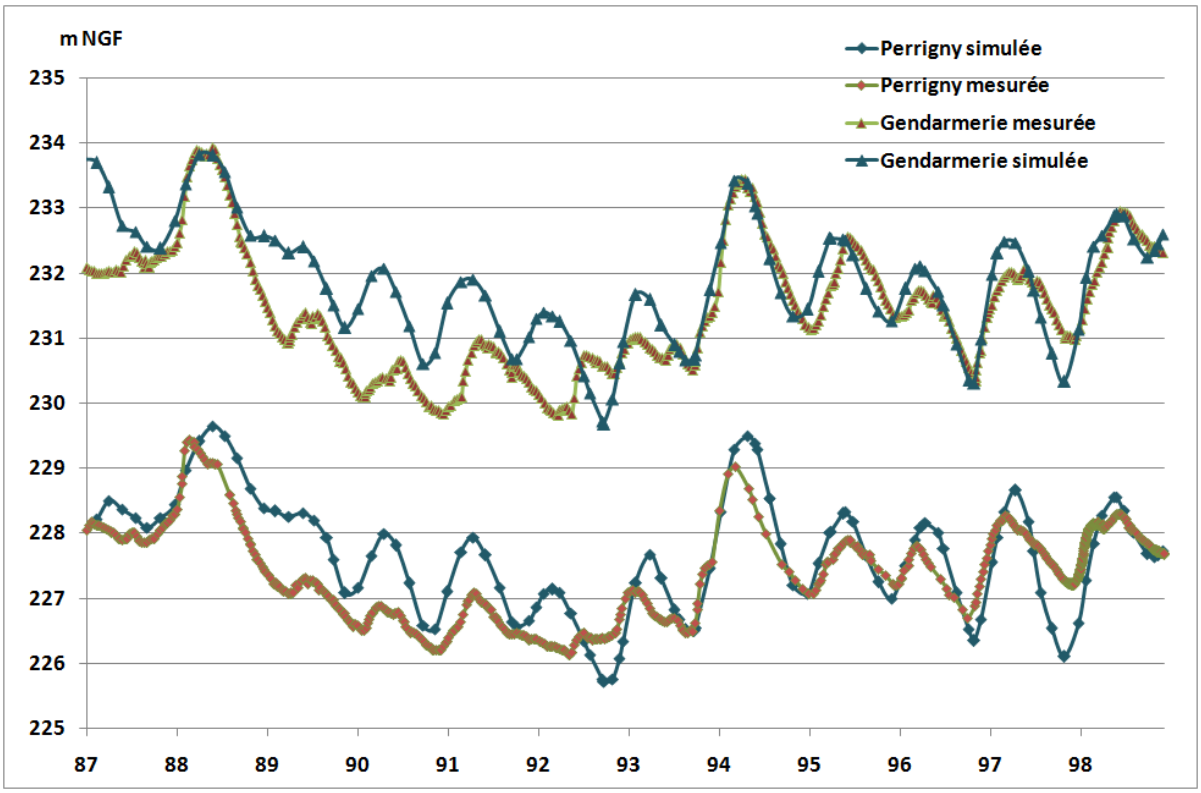
Piézométrie mesurée de la nappe superficielle sur le piézomètre dit de Perrigny (partie aval de la nappe).

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.

4.2.5 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.

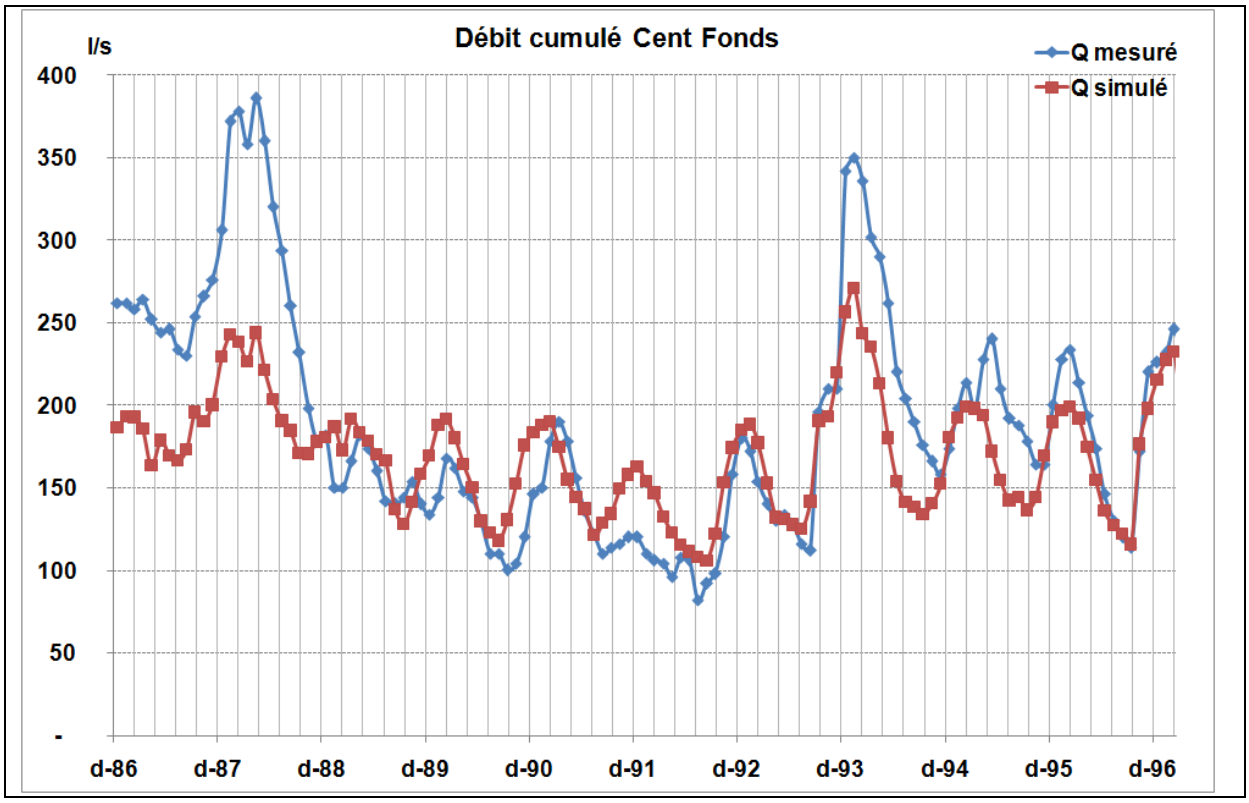
Le calage a été concentré sur les tendances et les écarts entre minima et maxima. En effet, ce sont ces éléments qui importent le plus pour satisfaire l'objectif de l'étude : déterminer des volumes prélevables et définir des règles de gestion.

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

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

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

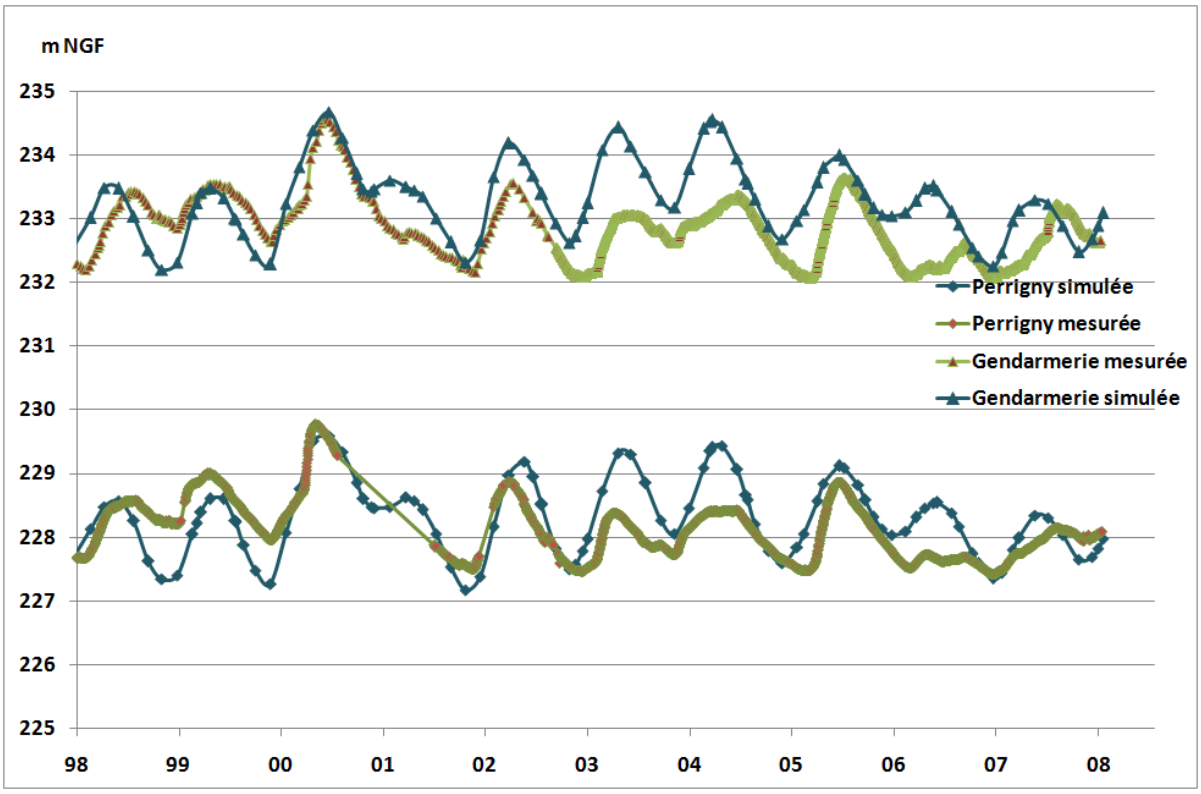
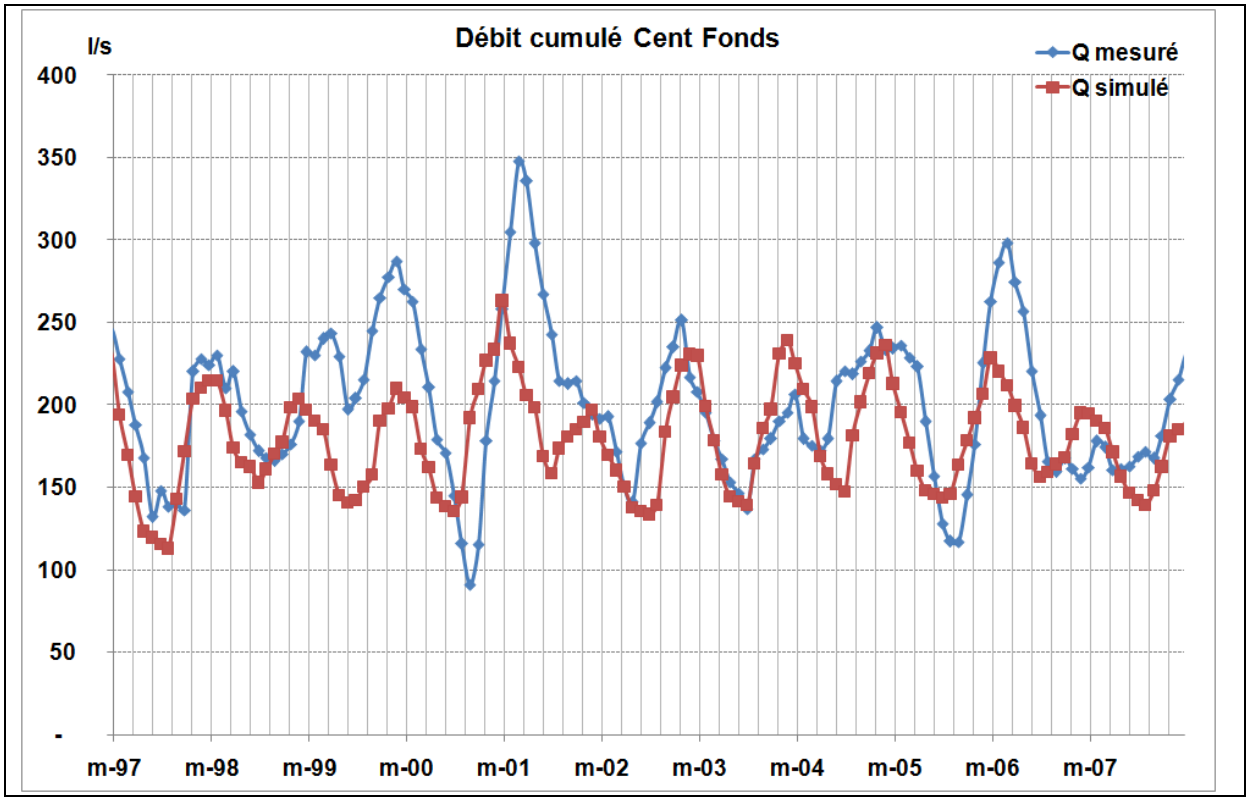


Figure 35 : Validation des chroniques de débit (1998-2008)



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 isopiézes 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",...

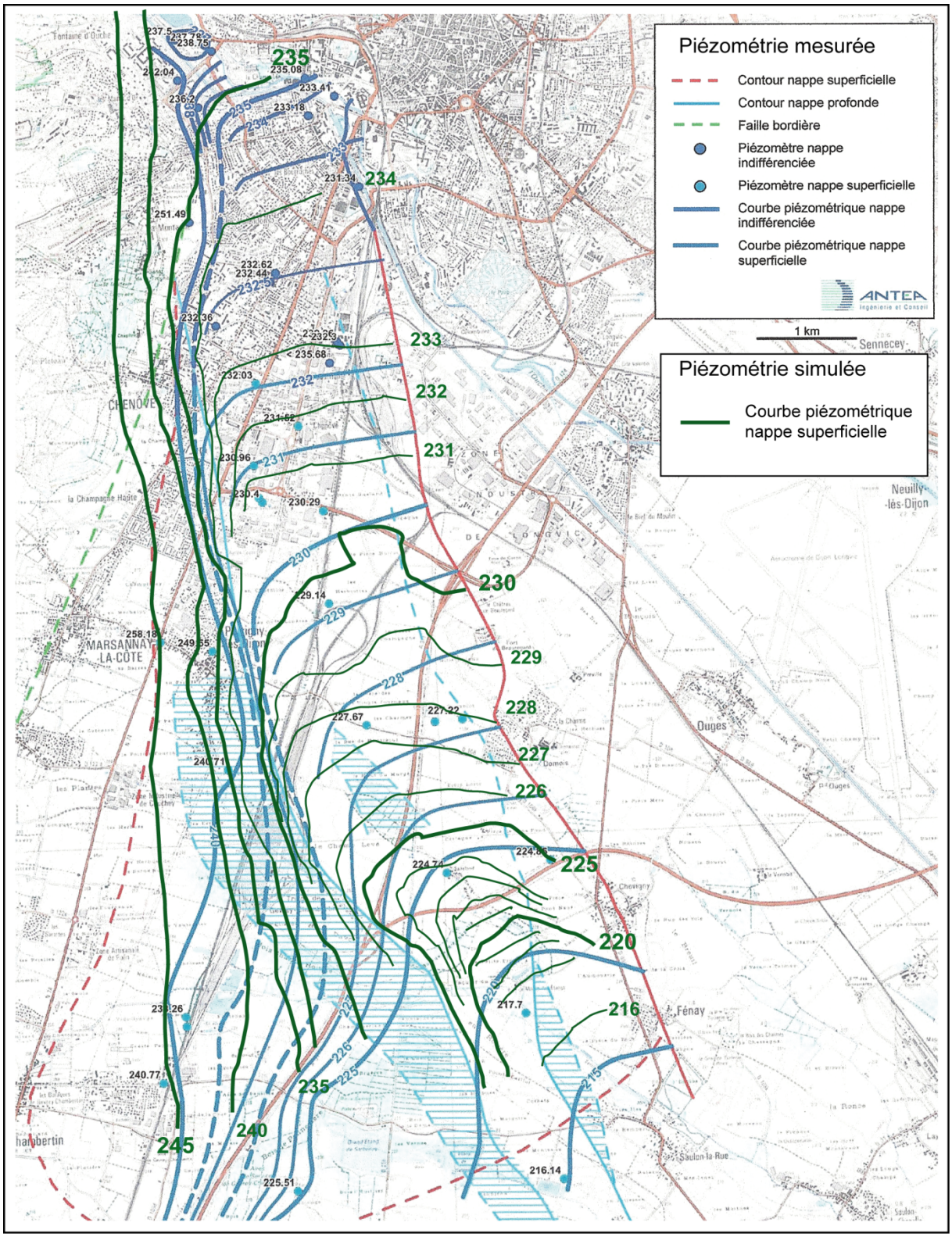
Dans le détail, on note plusieurs divergences mineures :

- 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)

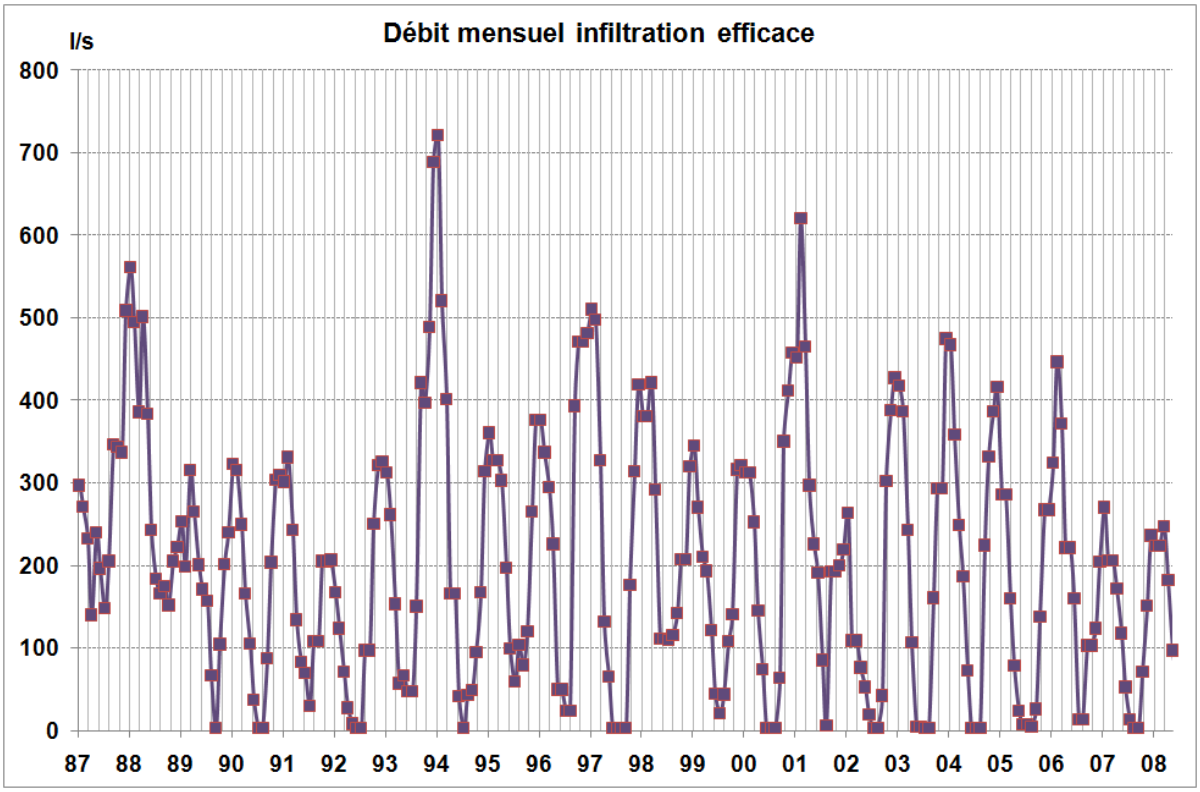


4.4.2 Bilan

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.

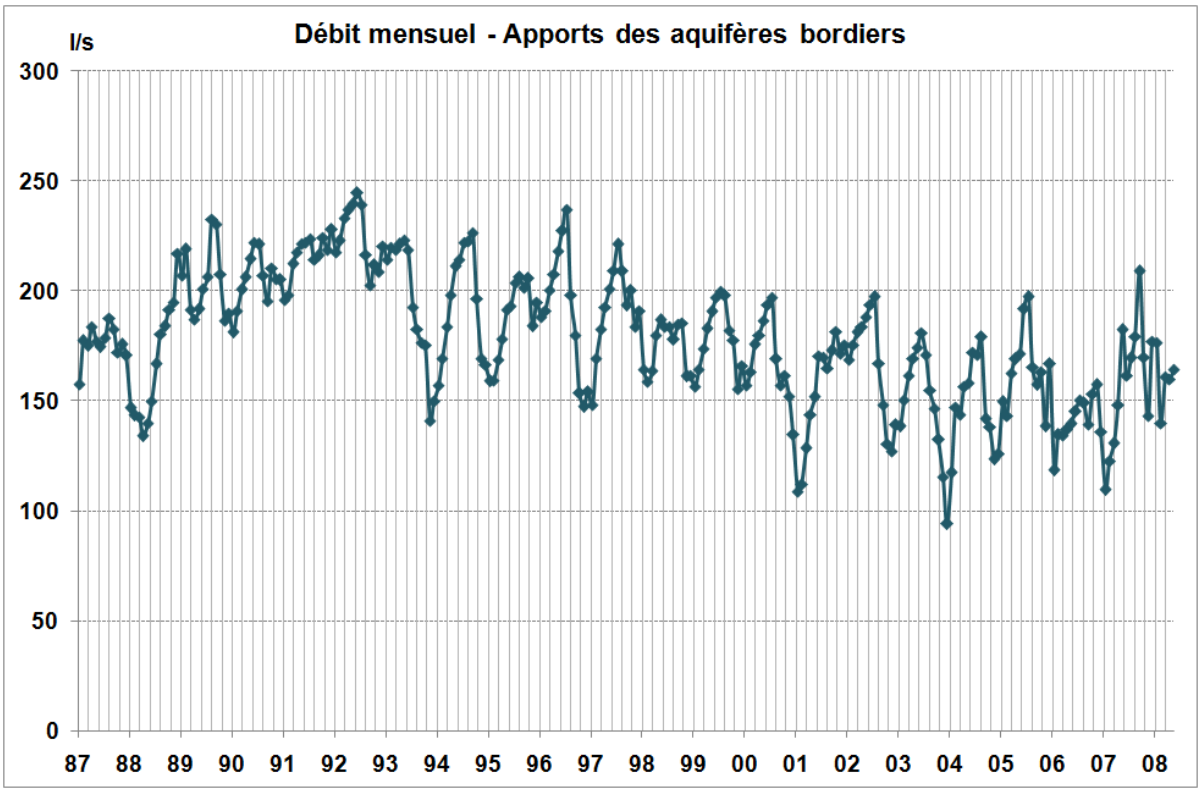
Le paramètre d'entrée prépondérant est l'infiltration efficace. Les apports sont très variables d'un mois à l'autre avec des débits moyens mensuels qui varient entre 0 et 730 l/s (moyenne de 200 l/s) :

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.

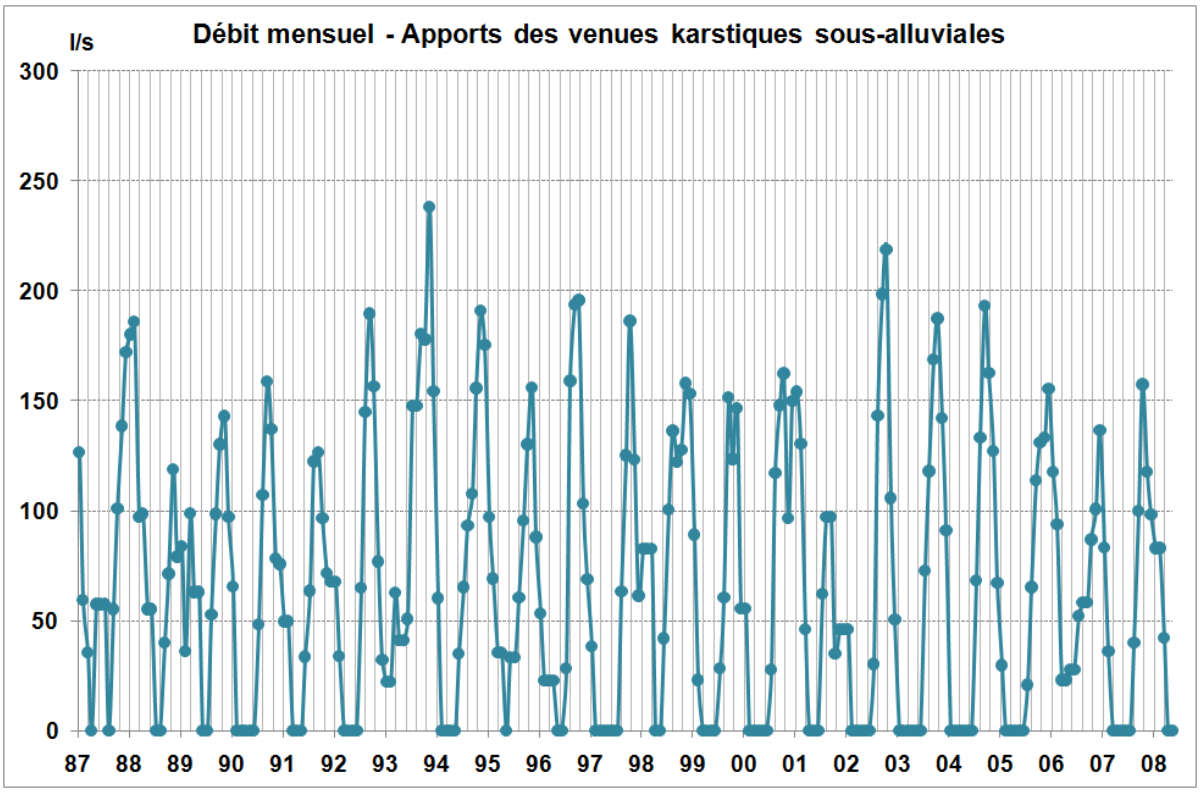
Figure 38 : Chronique des débits en provenance des aquifères bordiers : karst et appareil alluvial de l'Ouche (1987-2008)



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.

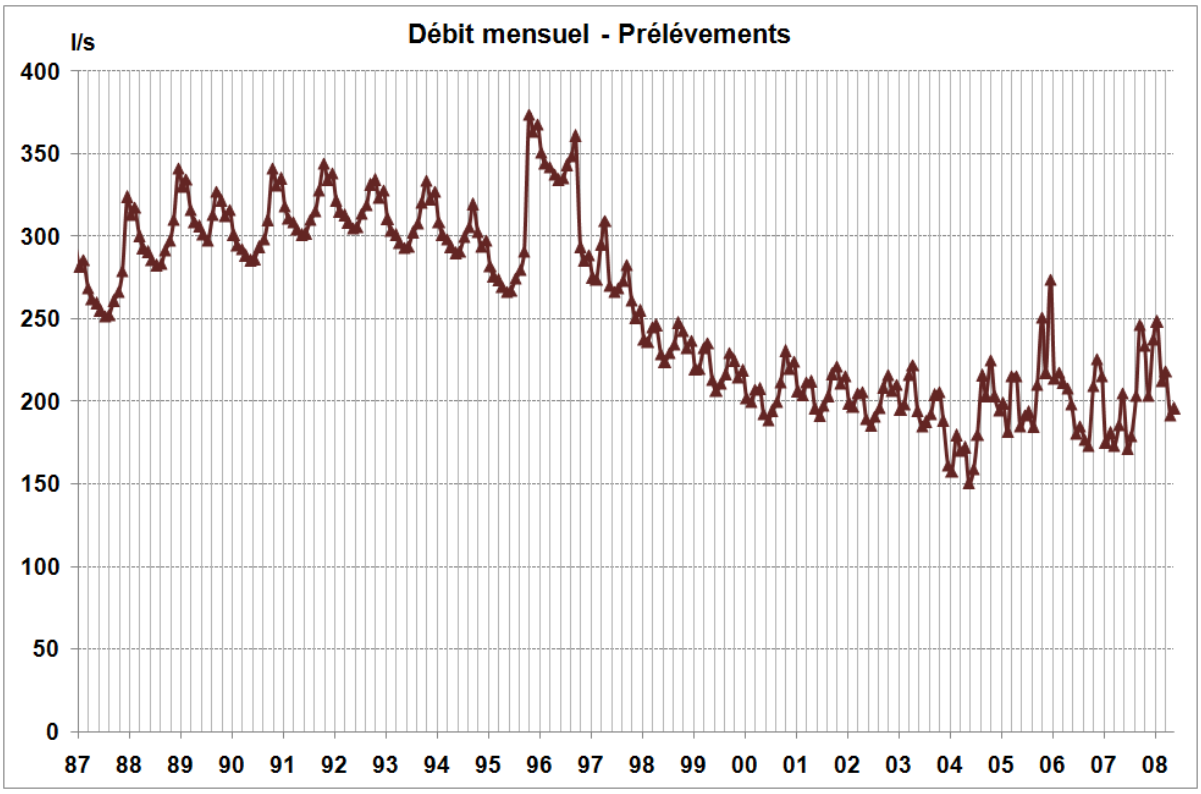
Figure 39 : Chronique des débits simulés cumulés pour les venues sous alluviales liées au fonctionnement du karst bordier (1987-2008)



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.

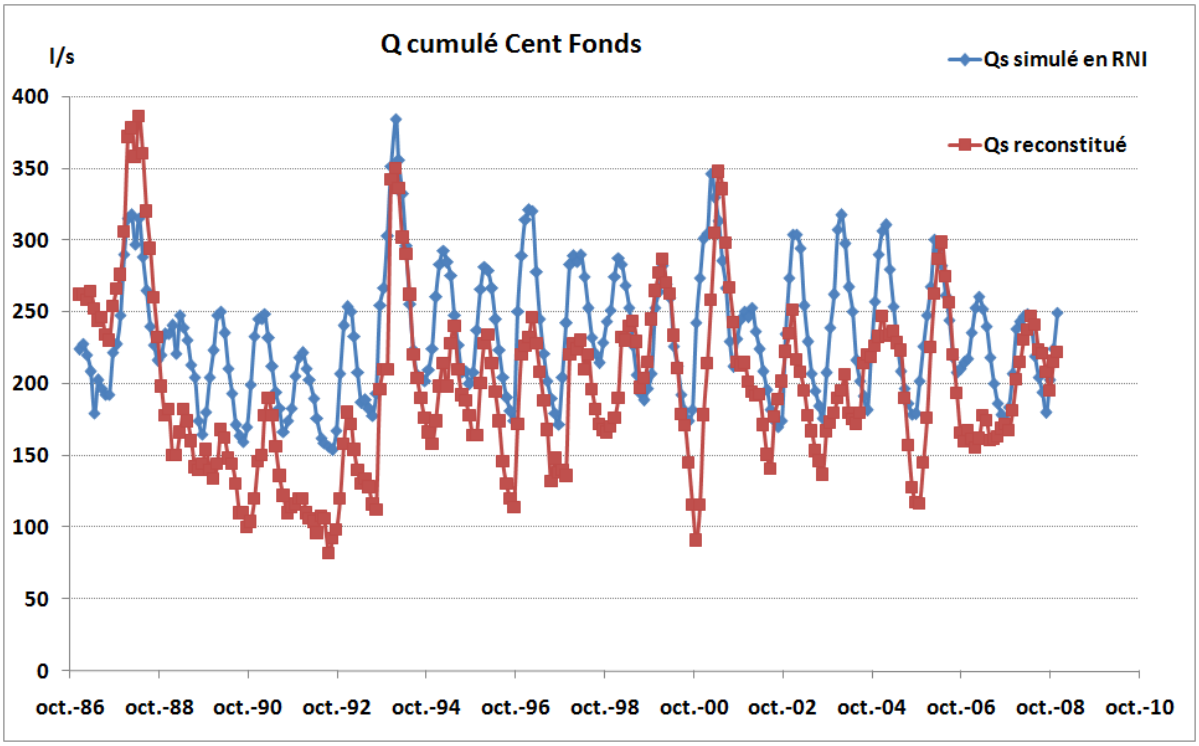
La courbe ci-dessous présente les variations de débit simulé de la zone de résurgence de la Cent Fonts en régime non influencé.

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 bassine 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.

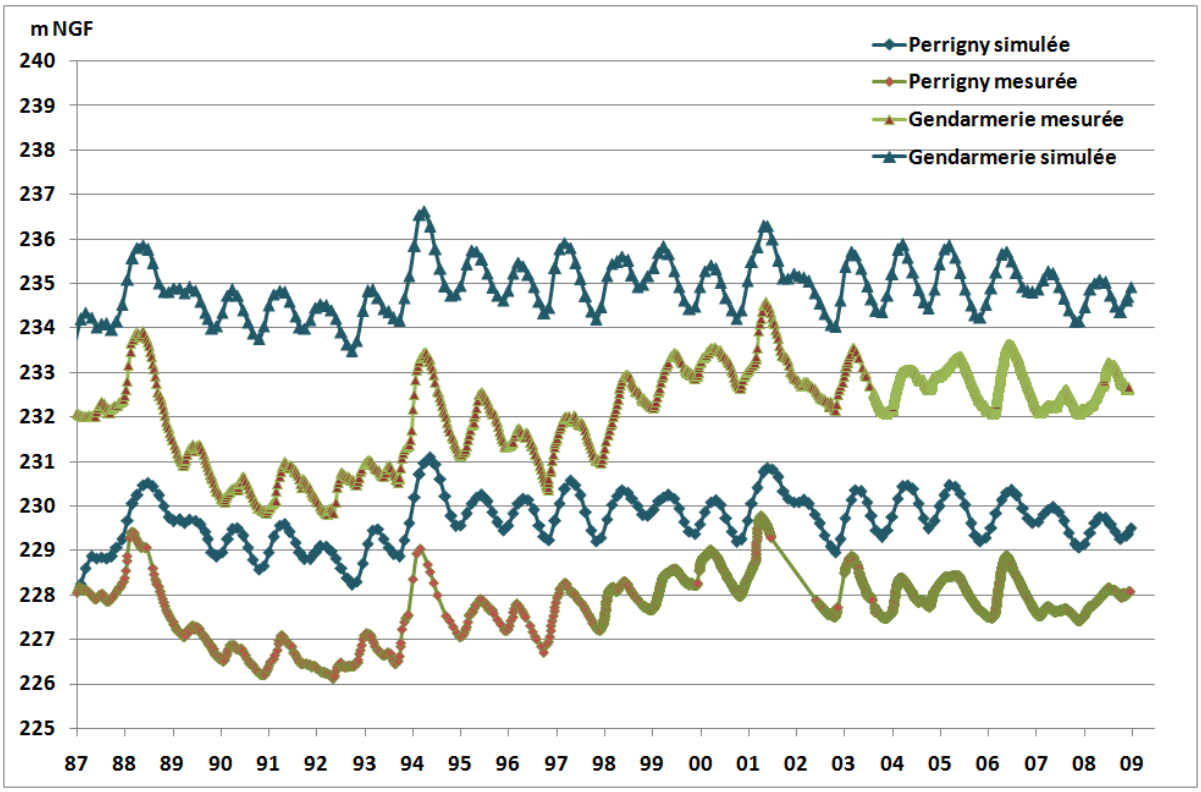



Figure 42 : Chroniques piézométriques en régime non influencé (1987-2008)