



---

*Modélisation de la nappe de la craie  
et schéma de régulation  
des prélèvements en eau*

---

- **Rapport de phase 2** -
- **Modèle de la nappe de la craie** -
- **Construction et calage** -



**hydratec**  
groupe setec

**Tour Gamma D  
58, quai de la Rapée  
75583 PARIS CEDEX 12**

**Tél : 01.40.04.62.42  
Fax : 01.43.42.24.39  
[Hydra@hydra.setec.fr](mailto:Hydra@hydra.setec.fr)**

**Réf : 24537 MCR  
Date : février 2010  
Version 3**

# RESUME

## UN SAGE MIS EN ŒUVRE

Le SAGE Oise-Aronde a été adopté définitivement par la Commission Locale de l'Eau le 2 avril 2009, après consultation des assemblées, et du comité de bassin, la phase d'approbation s'étant clôturée par l'enquête d'utilité publique achevée en décembre 2008. L'arrêté préfectoral de mise en œuvre date du 8 juin 2009.

Dans son **règlement**, le SAGE prévoit :

### 1. Priorités

Article 1<sup>er</sup> – Sécuriser des secteurs d'enjeu fort pour l'alimentation en eau potable

*...D'autre part, compte tenu du mauvais état quantitatif de la nappe de la Craie diagnostiqué par le SDAGE Seine-Normandie et des problèmes d'étiages sévères sur le bassin de l'Aronde, des restrictions de prélèvements **maximums** seront définis par usage et par secteur. L'AEP sera l'usage prioritaire. Ces restrictions seront édictées dans le règlement une fois les études, prévues dans le PAGD, réalisées dont notamment le Schéma de Régulation des Prélèvements en Eau (SRPE).*

### 2. Règles particulières pour assurer la restauration et la préservation de la qualité de l'eau et des milieux aquatiques.

Article 2 – Protéger les zones humides et leurs fonctionnalités

Dans son **Plan d'aménagement et de gestion durable(PAGD) le SAGE** identifie l'objectif général « maîtriser les étiages » qui se décline en axes stratégiques d'actions dont « **se doter d'outils performants de suivi et de gestion des étiages** ».

## ELABORATION DE L'OUTIL DE SUIVI ET DE GESTION

Dans ce contexte, l'étude qui a été confiée à HYDRATEC a pour objet de mettre en place un outil de gestion des prélèvements des différents usages anthropiques, respectant les milieux naturels liés à l'eau, et surtout permettant d'atteindre les objectifs de bon état qualitatif et quantitatif de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE).

Cet outil doit aider à la mise en place de règles de gestion des prélèvements, et aussi orienter la recherche de ressources alternatives. Il s'appuie sur les données existantes, complétées pendant une année hydrologique par des mesures de débits et de niveaux.

**Il vise à la pérennisation des activités consommatrices d'eau : eau potable ; agriculture légumière et industries, qui actuellement sont soumises aux arrêtés « sécheresse » et ne disposent pas d'une vision suffisante pour élaborer une stratégie.**

La cellule d'animation du SAGE sera chargée de faire vivre cet outil.

Dans cette phase 2 de l'étude, à partir de l'information existante un modèle du système global nappe de la craie Oise-Aronde est créé et calé, sur des situations d'observations

choisies pour la qualité de la donnée existante, et pour leur représentativité des situations de crise.

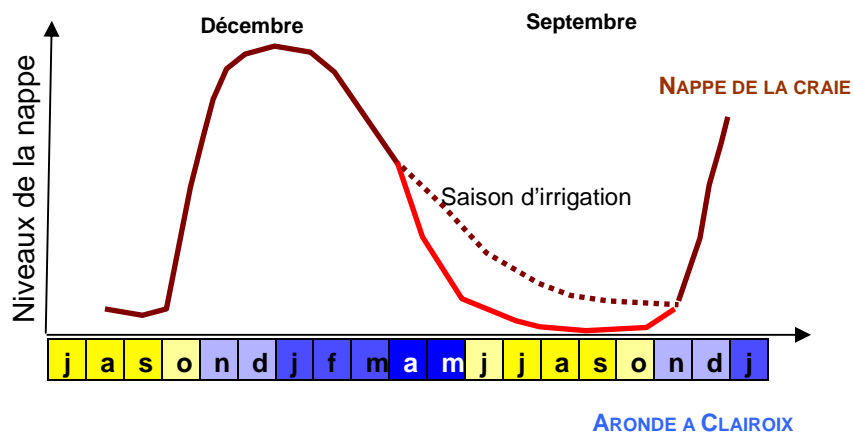
## OUTIL DE SUIVI DES NIVEAUX DE NAPPE ET DES DEBITS DE L'ARONDE

Depuis décembre 2008 un réseau complémentaire d'acquisition de données de niveau d'eau de nappe (HYDRATEC) et de débits de l'Aronde (DREAL Picardie) a été mis en place.

En plus des 2 ouvrages suivis par le BRGM pour le compte de la DIREN de bassin, nous avons pu mettre en place 7 mesures de niveau de la nappe ciblées sur le bassin versant de l'Aronde, et sur la forêt de Compiègne.

Les enseignements de la première année hydrologique du suivi sont illustrés par le graphique ci-dessous. En cartouche sous l'axe des abscisses le régime de l'Aronde, en courbe le régime de la nappe :

- ❑ Sous la forêt de Compiègne, la nappe connaît des variations naturelles, la courbe de variation des niveaux a une allure sinusoïdale, la nappe est en hautes eaux en mai, et la vidange se poursuit jusqu'en décembre.
- ❑ L'amplitude des variations de niveau de la nappe est importante sur le plateau (de l'ordre de 2 m, contre 0.2 à 0.50m en fond de vallée) et très influencée par la proximité des ouvrages de pompage.
- ❑ La mise en fonctionnement des pompes d'irrigation se traduit par une accélération de la vidange de la nappe dès le mois de mai-juin.



- ❑ La station de Clairoix par sa situation en aval a un caractère intégrateur des événements climatiques et du fonctionnement de la nappe. Elle est très utile pour la compréhension du fonctionnement de la nappe : en jaune foncé les basses eaux, en bleu foncé les hautes eaux.
- ❑ La baisse du débit de l'Aronde s'initie dès le mois d'avril sur la station de Moyenneville, soit avant le début des pompes agricoles, la vidange naturelle de la nappe s'étant amorcée. En aval à Clairoix la baisse est retardée à la fin du mois de juin.

- Durant la période d'irrigation, l'hydrogramme de l'Aronde à Moyenneville se creuse (prélèvements+pluie efficace réduite). L'augmentation du débit de l'Aronde correspond à l'arrêt des prélèvements et aussi, à une période un peu plus pluvieuse.

## LA PRECISION DES MESURES ET DES DONNEES

Les données de niveau de la nappe sont entachées d'une erreur de  $\pm 2.5$  m, en raison principalement de l'évaluation de l'altitude de référence faite avec la précision de la carte au 1/25 000.

Les mesures de débit sont précises à 10% près (évaluation DIREN), sur Clairoix la marge serait de  $\pm 25$  l/s sur les basses eaux,  $\pm 75$  l/s sur les hautes eaux. Cependant on sait que cette station surestime les débits d'étiage, les niveaux d'eau mesurés étant rehaussés par la végétation aquatique en période estivale.

Les données de prélèvement sont connues pour partie mois par mois. Pour les captages d'eau potable les exploitants ont communiqué ces valeurs la plupart du temps. Les données des industriels sont connues à l'année et pour la période de 6 mois dite d'étiage. Il en est de même pour les volumes exploités par les agriculteurs.

Les exploitants agricoles de la vallée de l'Aronde ont répondu à un questionnaire ce qui nous a permis de connaître pour une vingtaine d'entre eux le volume mensuel utilisé.

Pour les ouvrages pour lesquelles la donnée mensuelle n'existe pas, nous avons utilisé des courbes caractéristiques issues de ces enquêtes.

Ces données de prélèvement génèrent une incertitude dans le calcul, puisqu'on travaille en débit journalier moyen, calculé à partir d'un débit mensuel. Hors le rythme de pompage peut varier à la journée pour les agriculteurs et à la semaine pour l'eau potable.

Un outil de suivi devra être choisi pour assurer la mise en place des règles de gestion, et le contrôle de leur effet. Il faudra choisir par exemple un piézomètre par bassin de gestion et une station de mesure de débit sur l'Aronde, en plus de Clairoix.

## MODELISATION DU COMPORTEMENT DU SYSTEME OISE-ARONDE

### POURQUOI FAIRE UN MODELE ?

La modélisation permet de représenter le cycle de l'eau depuis la pluie qui tombe sur le sol et s'infiltré ou ruisselle, s'écoule dans la roche aquifère (littéralement : qui porte l'eau) pour rejoindre les cours d'eau (Aronde, Oise, Frette), en fond de vallée, ou bien continuer de s'écouler vers le centre du bassin de Paris.

Elle s'appuie sur les données de pluie et d'évaporation, les données géologiques et hydrogéologiques, les débits pompés connus en particulier aux captages, et sur les mesures de niveaux et de débit (y compris celles qu'hydratec a acquises en 2009) pour reproduire le mieux possible les observations, et expliquer les variations pendant les années successives.

Le modèle comporte :

- Un compartiment superficiel faisant à partir de la météorologie le calcul de la part infiltrée (vers la nappe de la craie) et de la part ruisselée (vers l'Aronde, l'Oise, la Frette, les marécages...)
- Un compartiment en trois dimensions, comprenant au dessus de la craie, l'ensemble des terrains plus ou moins perméables qui tapissent les fonds de vallée et couronnent les collines.

Les ouvrages de prélèvement (eau potable collective, industrielle et d'irrigation) sont intégrés avec des débits de prélèvement mensuels.

Les rivières sont intégrées, leur débit est calculé à partir de la part ruisselée sur le sol et la part d'alimentation de la nappe.

**Le modèle a pour but de reproduire le mieux possible les observations ponctuelles dans le temps, et dans l'espace par le calcul numérique.**

**Ainsi il permet d'avoir une vision rationnelle et argumentée du comportement du système Oise Aronde dans son ensemble.**

**Il comble les lacunes d'observation par le calcul.**

### A QUOI SERT LE CALAGE ?

Pour être utilisable dans l'outil de gestion des prélèvements et des milieux, le modèle doit être calé en deux étapes :

- en régime permanent : on reproduit une situation mesurée à un instant donné, par exemple la carte du niveau de la nappe de la Craie en étiage 2005. Cela permet de déterminer les vitesses de filtration (perméabilité) dans tous les compartiments du modèle,
- en régime transitoire : on reproduit la situation réelle avec le cycle annuel de l'eau depuis la pluie jusqu'aux écoulements dans la nappe et dans les cours d'eau. Nous avons travaillé sur la période 1999-2008.

Ce calcul est comparé aux débits mesurés à Clairoix sur l'Aronde, et aux niveaux de nappe mesurés sur la vingtaine de piézomètres existant sur tout le territoire.

**Le modèle est considéré comme « calé » c'est-à-dire reproduisant bien la situation réelle, lorsque la dynamique du cycle de l'eau telle que calculée, est bien reproduite : recharge et vidange de la nappe, étiage des cours d'eau, et les volumes d'écoulement superficiels et souterrains.**

Le calage du modèle permet d'ajuster les paramètres non connus du système hydrogéologique pour que la réponse du modèle s'ajuste aux observations réalisées.

Le modèle calé simule la période du 01/09/1999 au 31/08/2008, il permet :

- d'assurer une bonne représentation spatiale des écoulements, c'est-à-dire que les dômes piézométriques de Margny en particulier et les vallées drainantes sont correctement reproduites par les calculs,
- d'assurer un bon remplissage et une bonne vidange du système aquifère, c'est-à-dire que la nappe réagit aux phénomènes de recharge par la pluie (paramètre mesuré) et qu'elle se vidange à la bonne vitesse,
- de calculer le débit de l'Aronde en intégrant la part qui ruisselle sur le terrain et la part qui vient de la nappe.

## **QUELLE UTILISATION DE L'OUTIL CALE ?**

**Ce modèle représente très bien la réaction de la nappe aux phénomènes climatiques extérieurs et la dynamique des écoulements sur le bassin versant.**

**Il simule sur 10 ans consécutifs, de 1999 à 2008 les phénomènes de recharge et de vidange de la nappe, et les relations avec les eaux superficielles.**

**Ce calcul est calé sans aucune correction temporelle.**

Il permet maintenant de reproduire à partir de la pluviométrie à Chevières, les volumes disponibles en tout point du territoire, en particulier là où aucune observation n'existe.

Le modèle peut exhiber des différences en cotes de la nappe car la représentation est forcément simplifiée (taille des mailles, incertitudes des données).

Par contre tel qu'il est conçu l'amplitude, la chronologie des variations de la nappe, sont très fidèlement reproduites, et les flux globaux (volumes de vidange et de recharge) sont justes.

Il n'y a pas d'écart systématique, qui pourrait faire craindre une dérive du calcul à l'usage.

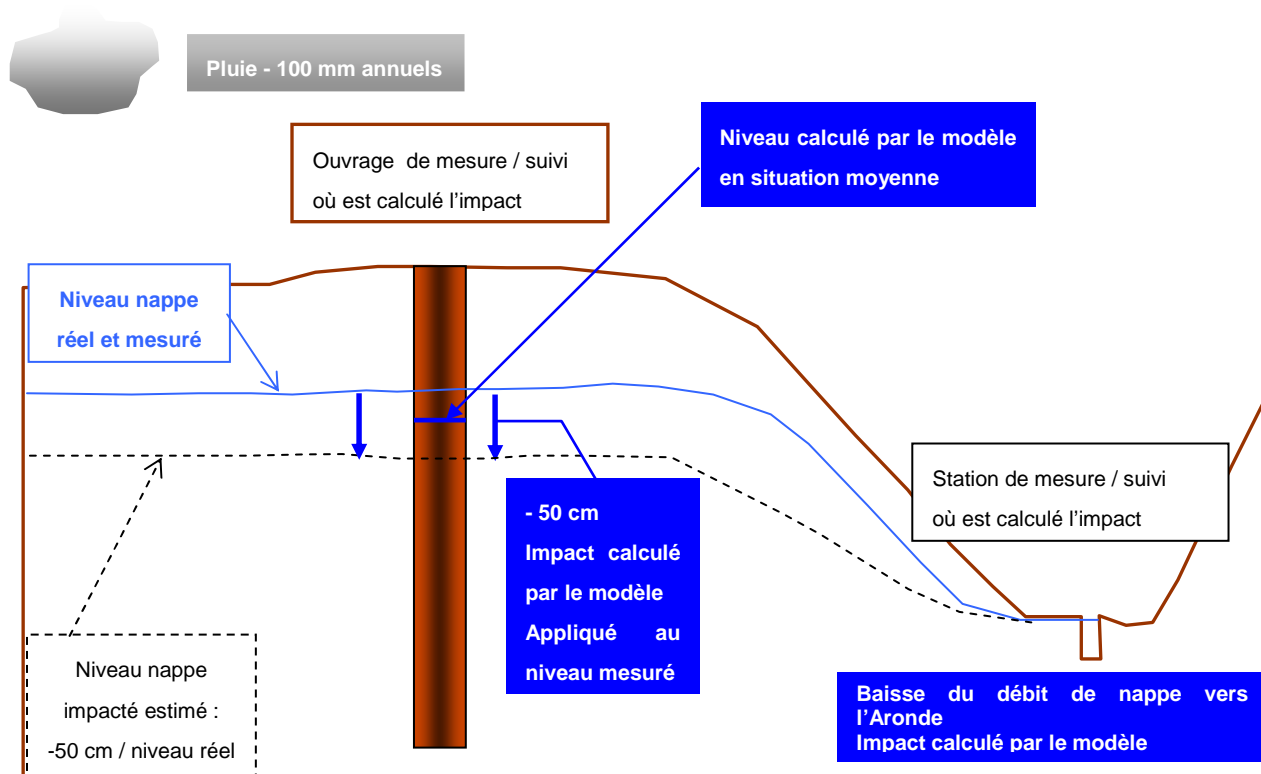
**A partir de maintenant nous utiliserons le modèle en relatif, autrement dit en impact ou variation induite sur les niveaux de nappe, d'une variation de la pluie ou bien des volumes prélevés.**

*Exemple de l'utilisation des résultats d'un calcul d'impact :*

*Pour une pluie annuelle diminuée de -100 mm à Chevrières par rapport à la moyenne, le volume de nappe disponible est diminué de  $Y m^3$ , et on calcule une baisse de  $X l/s$  du débit moyen calculé à la station de mesure de l'Aronde: **les volumes et débits sont calculés en absolu. Il n'y a pas de correction à apporter.***

*Pour les niveaux de la nappe, on calcule que l'on aura sur un piézomètre de suivi une baisse de 50 cm du niveau moyen calculé. Le travail en relatif permet de s'affranchir de l'erreur de calcul liée à la modélisation. **La différence calculée entre l'état simulé initial et l'état simulé impacté est utilisable en absolu.***

On en déduit le niveau impacté au piézomètre, de - 50 cm à partir du niveau réel mesuré.



## VERS UN OUTIL DE GESTION

Le modèle tel qu'il est élaboré doit permettre une double application :

### APPLICATION 1 : DETERMINATION STATISTIQUE DES TAUX DE DEFAILLANCE DE LA RESSOURCE.

Le modèle va dans un premier temps être utilisé pour déterminer les volumes de nappe disponibles selon des situations contrastées d'années hydrologiques moyenne et sèches.

Dans ces situations, les volumes de recharge de la nappe, les débits induits sur l'Aronde, et les niveaux de nappe (marais de Sacy, Vallée de l'Aronde) calculés par le modèle permettront de faire une carte des volumes mobilisables.

**Nous disposerons ainsi d'une série de situations dites de référence, et identifierons pour ces situations les seuils de niveau de nappe (piézométrie) et de débit d'Aronde garantissant le bon fonctionnement des milieux et des masses d'eau en quantité et en qualité.**

**Les ouvrages de suivi seront choisis à cette étape.**

La ressource disponible pour l'ensemble des usages se situe au-dessus de ces seuils.

Cette étape permet à chaque usager de déterminer par niveau de défaillance (occurrence de défaillance tous les 5 ans, 10 ans, 20 ans....), le volume dont il dispose et le cas échéant déterminer les moyens de secours adaptés pour sécuriser sa production.

Cela permet la recherche de solutions optimisées équilibrant investissements et frais de fonctionnement avec la production (eau potable, industrie, et agriculture).

Evidement comme le PAGD le suggère cette gestion n'ira pas sans mesures d'économies d'eau, modification des pratiques d'irrigation, comptage et recherche de fuites, incitation à utiliser des appareils économes....

### APPLICATION 2 : AIDE AU SUIVI DE L'OUTIL DE GESTION DE LA RESSOURCE.

**L'outil de gestion va calculer en début d'année hydrologique, la situation de recharge de la nappe, et la comparer aux situations dites de référence pour donner aux usagers la perspective nécessaire pour planifier l'année de production : faudra-t-il mettre en place un pompage de secours, quel maillage activer,...quelle ressource alternative utiliser.**

**L'efficacité de l'outil de gestion fera l'objet d'un suivi ou évaluation permanente.**

**Les résultats seront comparés avec les niveaux réels enregistrés aux ouvrages de suivi (Aronde et nappe).**



L'outil fait alors l'objet de deux sortes de rectifications, visant à pérenniser sa justesse :

- LE RATTRAPAGE : il intervient dans le cas où une dérive est constatée en début de cycle hydrologique. C'est-à-dire que les débits et volumes calculés s'écartent progressivement de la réalité. Dans ce cas il est créé une fonction dite de rattrapage qui permet de corriger les prévisions en fonction de l'écart constaté en début de cycle.  
Le rattrapage est une simple correction apportée aux prévisions du modèle. Cette correction est immédiate dès lors que la fonction de rattrapage est connue.
  
- LE RECALAGE : il intervient lorsque des données supplémentaires significatives sont acquises. Par exemple résultats de recherche d'eau, nouveaux ouvrages d'exhaure,... Il faut introduire les modifications dans le modèle et procéder à son calage à nouveau.  
Le recalage est une modification structurelle profonde du modèle. Elle demande l'intervention du concepteur du modèle, pour apporter les modifications des données d'entrée du modèle et reprendre le travail de calage.

# SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>OBJET DE LA PHASE 2</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>BILAN SUR L'EVOLUTION DES USAGES</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>LES MESURES REALISEES EN 2009</b>	<b>4</b>
3.1	MESURES PIEZOMETRIQUES	6
3.2	MESURES DES HAUTEURS D'EAU ET DES DEBITS DE L'ARONDE	11
3.3	INCERTITUDE DES MESURES	13
3.3.1	<i>Mesure des niveaux de nappe</i>	13
3.3.2	<i>Incertitude sur les mesures des débits en rivière</i>	14
<b>4</b>	<b>BILAN HYDRIQUE DU BASSIN VERSANT</b>	<b>15</b>
4.1	BASSIN VERSANT DE L'ARONDE	17
4.2	BASSIN VERSANT DE L'OISE	19
4.3	LES MARAIS DE SACY	19
4.4	CALCUL DE LA PART DE LA PLUIE INFILTREE	20
<b>5</b>	<b>PRESENTATION DU MODELE DES ECOULEMENTS HYDRODYNAMIQUES ET DU CALAGE</b>	<b>23</b>
5.1	AIRE MODELISEE	24
5.2	MAILLAGE ET ORIENTATION DU MODELE	24
5.3	TOPOGRAPHIE ET STRUCTURE GEOLOGIQUE DU MODELE	26
5.3.1	<i>Topographie</i>	27
5.3.2	<i>La craie</i>	27
5.3.3	<i>Les sables de Bracheux</i>	27
5.3.4	<i>Les argiles Yprésiennes</i>	27
5.3.5	<i>Les terrains supérieurs : sables de Cuise, calcaire du Lutétien</i>	28
5.3.6	<i>Les alluvions de l'Oise</i>	28
5.3.7	<i>Les alluvions de l'Aronde</i>	28
5.4	REPARTITION DES POINTS DE PRELEVEMENTS	28
5.5	REPARTITION DE LA PLUIE INFILTREE	28
5.6	REPRESENTATION DES RIVIERES	29
5.7	REPARTITION DES PERMEABILITES CALEES	32
5.8	REPARTITION DES COEFFICIENTS D'EMMAGASINEMENT CALES	34
5.9	CALAGE DU MODELE	35
5.9.1	<i>Calage de la piézométrie</i>	35
5.9.2	<i>Calage des échanges nappe rivière</i>	49
5.10	ANALYSE DE SENSIBILITE DU MODELE HYDROGEOLOGIQUE	52
<b>6</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>62</b>

<b>7</b>	<b>ANNEXES.....</b>	<b>63</b>
7.1	CARACTERISTIQUES DES SOUS BASSINS VERSANTS UTILISES POUR LE CALCUL DE LA PLUIE INFILTREE	64
7.2	MORPHOLOGIE DES COUCHES DU MODELE : ISOHYPSES .....	65
7.3	REPRESENTATION DES RIVIERES DANS LE MODELE VISUAL MODFLOW.....	74
7.4	RESULTATS DU CALAGE POUR 3 SITUATIONS.....	78
7.5	CALCUL DES INTERVALLES DE CONFIANCE, METHODOLOGIE .....	85

## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 :	CAPTAGES AGRICOLES DISPOSANT D'UNE CHRONIQUE MENSUELLE DE PRELEVEMENTS .....	2
FIGURE 2 :	CAPTAGE AEP DISPOSANT D'UNE CHRONIQUE MENSUELLE DE PRELEVEMENTS .....	3
FIGURE 3 :	LOCALISATION DES POINTS D'INSTRUMENTATION SPECIFIQUES A L'ETUDE.....	5
FIGURE 4 :	ENREGISTREMENTS PIEZOMETRIQUES DE NAPPE DE LA CRAIE AU P2.....	6
FIGURE 5 :	INFLUENCE PIEZOMETRIQUE DES POMPAGES DANS UN PUIT .....	6
FIGURE 6 :	ENREGISTREMENTS PIEZOMETRIQUES AU P1 .....	7
FIGURE 7 :	ENREGISTREMENTS PIEZOMETRIQUES AU P3.....	8
FIGURE 8 :	ENREGISTREMENTS PIEZOMETRIQUES AU P4.....	9
FIGURE 9 :	ENREGISTREMENTS PIEZOMETRIQUES AU P5.....	9
FIGURE 10 :	ENREGISTREMENTS PIEZOMETRIQUES AU PT6.....	10
FIGURE 11 :	ENREGISTREMENTS PIEZOMETRIQUES AU PT7 .....	10
FIGURE 12 :	LIMNIGRAPHE ENREGISTRES PAR LA DIREN SUR L'ARONDE .....	11
FIGURE 13 :	DEBITS DE L'ARONDE AUX STATIONS DE MESURE.....	12
FIGURE 14 :	INCERTITUDES LIEES AUX MESURES PIEZOMETRIQUES UTILISEES POUR LE CALAGE DU MODELE.....	13
FIGURE 15 :	DECOUPAGE DU BASSIN VERSANT DU SAGE EN SOUS BASSINS VERSANT HYDROLOGIQUES .....	16
FIGURE 16 :	FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DE L'ARONDE.....	17
FIGURE 17 :	DEBITS CALCULES PAR LE MODULE HYDROLOGIQUE .....	18
FIGURE 18 :	RESULTATS DES JAUGEAGES REALISES SUR LA FRETTE ET LE CANAL MAURE A SAINT MARTIN LONGUEAU ENTRE JUILLET 1998 ET JUILLET 1999.....	19
FIGURE 19 :	DEBIT RUISSELE ET DEBIT DRAINE POUR LA FRETTE.....	20
FIGURE 20 :	COMPARAISON DE LA PLUIE BRUTE ANNUELLE, LA PLUIE EFFICACE ANNUELLE ET LA PLUIE INFILTREE ANNUELLE.....	21
FIGURE 21 :	COMPARAISON DE LA PLUIE BRUTE, LA PLUIE EFFICACE ET LA PLUIE INFILTREE .....	22
FIGURE 22 :	PRESENTATION DE LA CHAINE DE CALCUL DU MODELE DE LA NAPPE DE LA CRAIE OISE ARONDE.....	23
FIGURE 23 :	PRESENTATION DU MAILLAGE ET DES POINTS DE PRELEVEMENT INTRODUIIS DANS LE MODELE .....	25
FIGURE 24 :	DESCRIPTION DE LA CONCEPTUALISATION DU MODELE .....	26
FIGURE 25 :	PROFIL EN LONG DE L'ARONDE.....	29
FIGURE 26 :	REPRESENTATION DES RIVIERES SOUS VISUAL MODFLOW .....	31
FIGURE 27 :	REPARTITION DES PERMEABILITES RETENUES POUR LA CRAIE.....	33
FIGURE 28 :	PERMEABILITES RETENUES POUR LES COUCHES AUTRES QUE LA CRAIE.....	34
FIGURE 29 :	REPARTITION SPATIALE DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT.....	34
FIGURE 30 :	CARTE DE CALAGE DU REGIME PERMANENT.....	36
FIGURE 31 :	CALAGE PIEZOMETRIQUE EN PLAN DU REGIME TRANSITOIRE – SITUATION DE L'ETIAGE 2005 .....	38
FIGURE 32 :	LOCALISATION DES POINTS DE CALAGE.....	41
FIGURE 33 :	CALAGE DU DEBIT DE L'ARONDE A CLAIROIX.....	49
FIGURE 34 :	DEBIT CALCULE DES SOURCES DE L'ARONDE .....	50
FIGURE 35 :	DEBIT CALCULE DES ECHANGES ENTRE LA FRETTE ET LA NAPPE ALLUVIALE.....	51

FIGURE 36 : DEBIT CALCULE DES ECHANGES DE L'OISE AVEC LA NAPPE ALLUVIALE .....	51
FIGURE 37 : SENSIBILITE DE LA PERMEABILITE TESTEE .....	52
FIGURE 38 : SENSIBILITE DES COTES PIEZOMETRIQUES CALCULEES POUR UNE VARIATION DE LA PERMEABILITE ..	53
FIGURE 39 : SENSIBILITE DES DEBITS D'ALIMENTATION DE L'ARONDE PAR LA NAPPE CALCULES A LA PERMEABILITE.....	53
FIGURE 40 : COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT TESTE POUR LE TEST DE SENSIBILITE .....	54
FIGURE 41 : SENSIBILITE DES COTES PIEZOMETRIQUES CALCULEES POUR UNE VARIATION DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT.....	55
FIGURE 42 : SENSIBILITE DES DEBITS D'ALIMENTATION DE L'ARONDE PAR LA NAPPE A UNE VARIATION DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT .....	55
FIGURE 43 : SENSIBILITE DES DEBITS D'ALIMENTATION DE L'ARONDE PAR LA NAPPE A UNE VARIATION DE LA CONDUCTANCE DE LA RIVIERE .....	56
FIGURE 44 : SENSIBILITE DES DEBITS D'ALIMENTATION DE L'ARONDE PAR LA NAPPE A UNE MODIFICATION DE LA LIGNE D'EAU DE L'ARONDE .....	57
FIGURE 45 : SENSIBILITE DES COTES PIEZOMETRIQUES CALCULEES A UNE VARIATION DE LA PLUIE INFILTREE.....	58
FIGURE 46 : SENSIBILITE DES DEBITS D'ALIMENTATION DE L'ARONDE PAR LA NAPPE A UNE VARIATION DE LA PLUIE INFILTREE.....	59
FIGURE 47 : INTERVALLES DE CONFIANCE SUR LE CALCUL DU DEBIT D'ALIMENTATION DE L'ARONDE PAR LA NAPPE .....	60
FIGURE 48 : INTERVALLES DE CONFIANCE SUR LE CALCUL DU DEBIT DE L'ARONDE A CLAIROIX .....	61

## 1 OBJET DE LA PHASE 2

Le présent rapport concerne la phase 2 de la modélisation de la nappe de la craie et schéma de régulation des prélèvements en eau, au cours de laquelle le modèle de la nappe de la craie est construit et calé.

La première partie fait la synthèse des mesures réalisées en continu sur la nappe et sur l'Aronde de décembre 2008 à décembre 2009.

Une synthèse sur les volumes mensuels prélevés disponibles est présentée dans la deuxième partie.

Dans une troisième partie, consacrée à l'analyse du bilan hydrique, la construction du modèle hydrologique sous hydra-BV a permis la compréhension des phénomènes de ruissellement et la part du drainage de la nappe.

La quatrième partie, assez technique, présente la construction et le calage du modèle de la nappe de la craie.

Chacune des parties est précédée d'un résumé non technique adressé aux lecteurs non techniciens.

## 2 BILAN SUR L'EVOLUTION DES USAGES

### En résumé

Les chroniques mensuelles de prélèvement ont été collectées auprès des exploitants de la ressource en eau potable, et des irrigants de la vallée de l'Aronde.

A partir des données collectées, les chroniques annuelles ont été traduites en chroniques mensuelles par comparaison entre les usages et les volumes prélevés.

Les chroniques mensuelles sont une donnée d'entrée du modèle hydrogéologique.

Des enquêtes ont été réalisées auprès des producteurs d'eau et des irrigants afin de connaître les volumes mensuels prélevés sur un maximum d'ouvrage de captage.

Les cartes des figures suivantes présentent les points de prélèvements sur lesquels les volumes mensuels sont connus.

Figure 1 : Captages agricoles disposant d'une chronique mensuelle de prélèvements

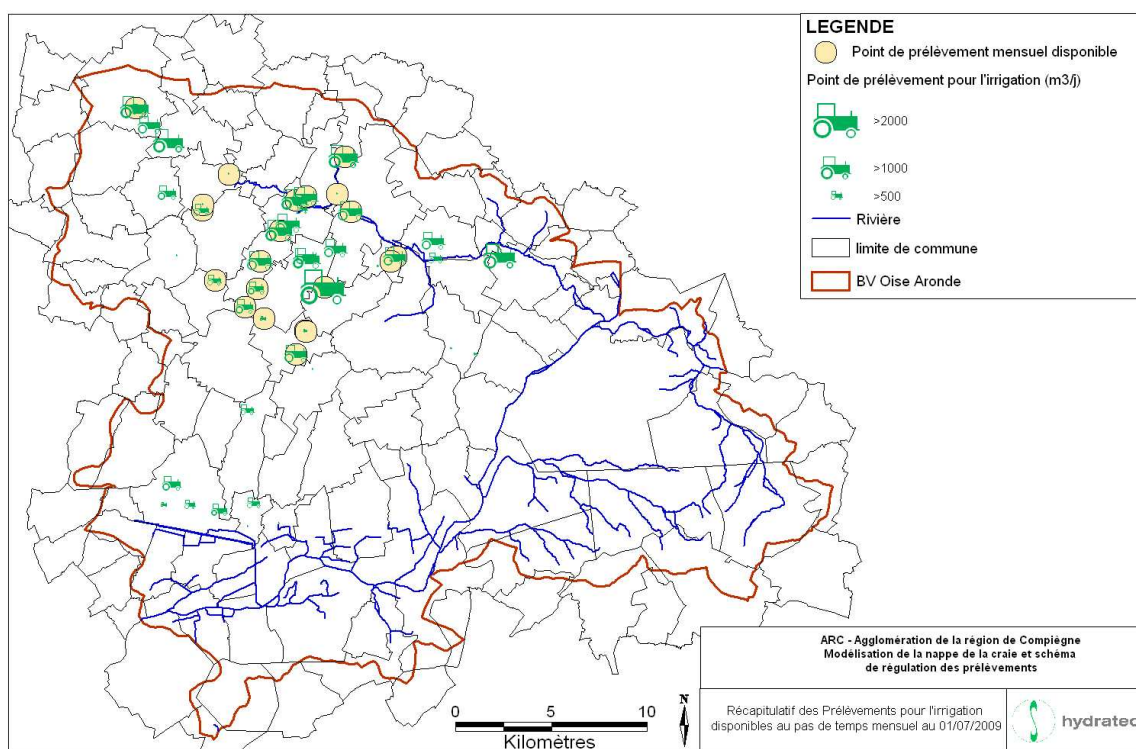
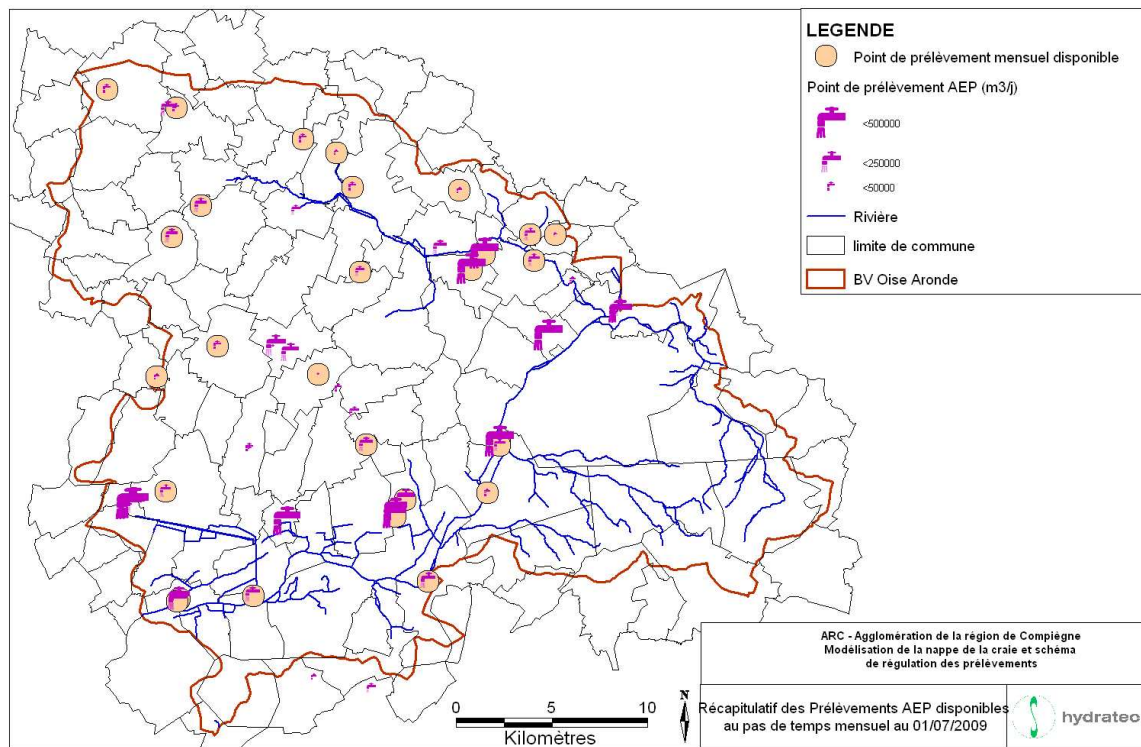


Figure 2 : Captage AEP disposant d'une chronique mensuelle de prélèvements



Pour les points ne disposant pas de chroniques mensuelles de prélèvement, une répartition mensuelle du volume annuel a été réalisée en fonction :

- du type d'usage (industriel, irrigant ou collectivité)
- du volume annuel prélevé

Des ratios mensuels ont donc été appliqués, pour reconstituer l'historique mensuel des prélèvements. Notons que pour les industriels, les volumes annuels et à l'étiage ont été répartis de façon homogène sur les 12 mois de l'année.

Cette méthode basée sur la similitude locale permet de minimiser les erreurs introduites par une répartition inappropriée dans l'année des prélèvements du modèle. Cependant, il faut garder un œil critique lors du calage du modèle notamment dans les secteurs où les chroniques mensuelles ont été reconstituées.

### 3 LES MESURES REALISEES EN 2009

#### En résumé

Des mesures ont été réalisées sur les niveaux piézométriques par hydratec et sur l'Aronde par la DIREN. Les mesures sur la nappe permettent de déterminer la période de prélèvement sur la vallée de l'Aronde grâce au puits suivi à Moyenneville. Les mesures montrent que le niveau de la nappe dans la partie amont de la vallée de l'Aronde varie d'une dizaine de centimètres. Les points de mesure montrent une rupture de pente dès que les prélèvements agricoles démarrent. La piézométrie est influencée par les prélèvements.

Deux points de mesure permettent de découvrir le fonctionnement du dôme de Margny les Compiègne (PT6) et de la forêt de Compiègne (PT7). Ces derniers montrent un remplissage de la nappe jusqu'en mai 2009 environ puis une vidange qui continue jusqu'en novembre 2009. Globalement la piézométrie observée a une forme de cloche.

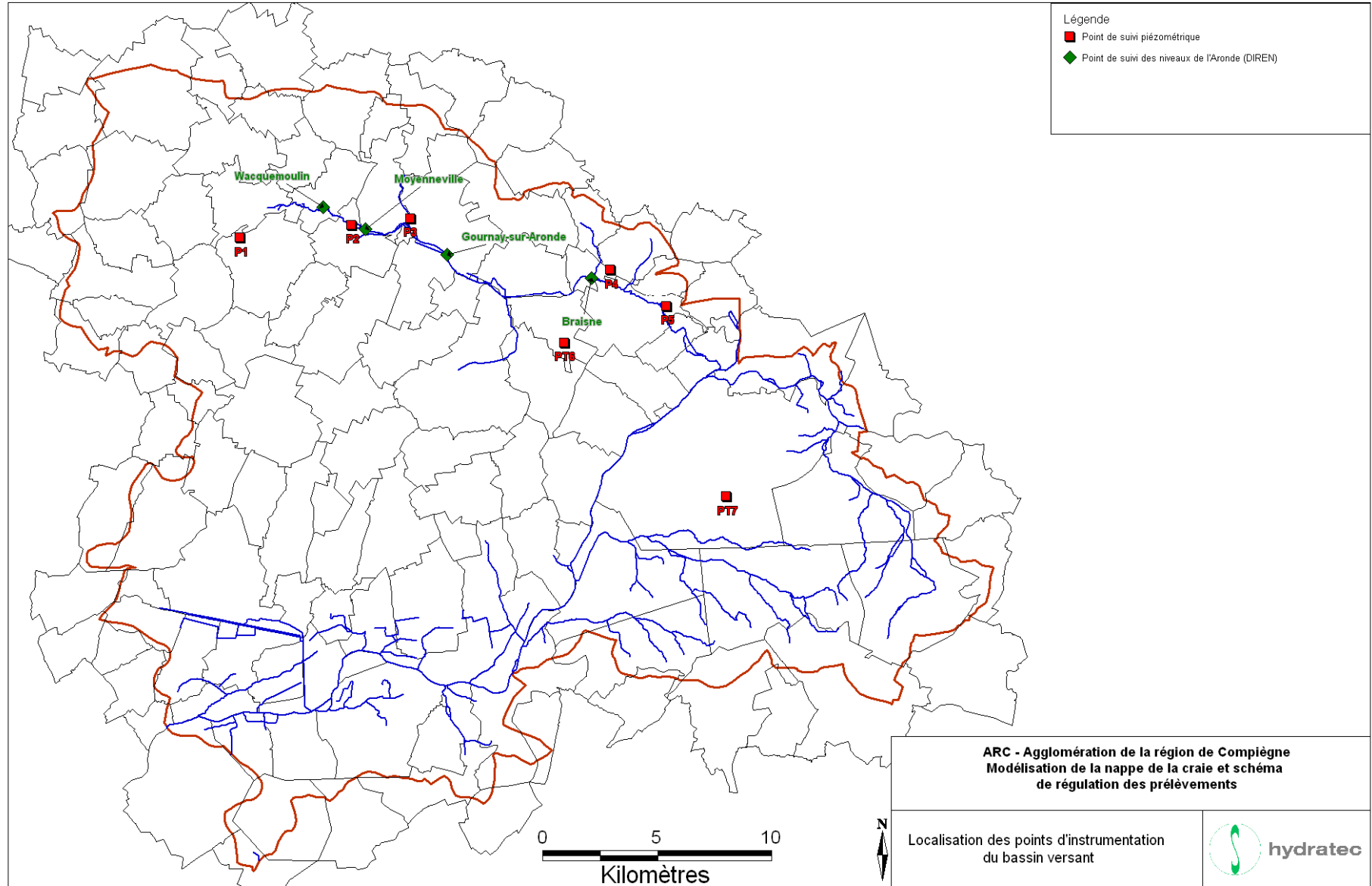
Les mesures de ligne d'eau sur l'Aronde, réalisées par la DIREN Picardie, nous permettent d'avancer l'hypothèse que la ligne d'eau reste relativement stable au cours du temps, avec des variations de l'ordre de 20 cm sur les stations observées.

Les mesures piézométriques utilisées pour le calage intègrent une incertitude de 2.5 m liées à la connaissance altimétrique du point de mesures. Les incertitudes liées aux mesures de débit sont de l'ordre de 10 %, d'après les données de la DIREN.

En 2009, le réseau de surveillance des niveaux piézométriques et des débits de l'Aronde a été densifié dans le cadre de la présente étude par hydratec et la DIREN Picardie. Les points de mesure complémentaires sont présentés sur la carte ci-dessous. Les chroniques enregistrées sont présentées dans les paragraphes suivants.



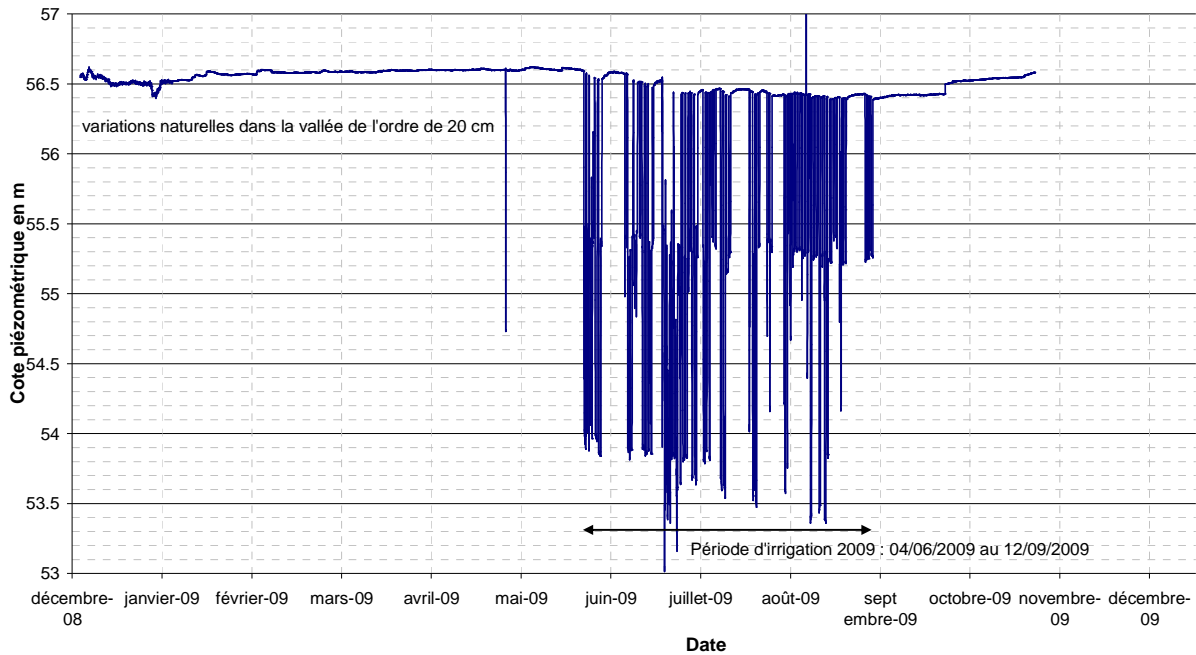
Figure 3 : Localisation des points d'instrumentation spécifiques à l'étude



### 3.1 MESURES PIEZOMETRIQUES

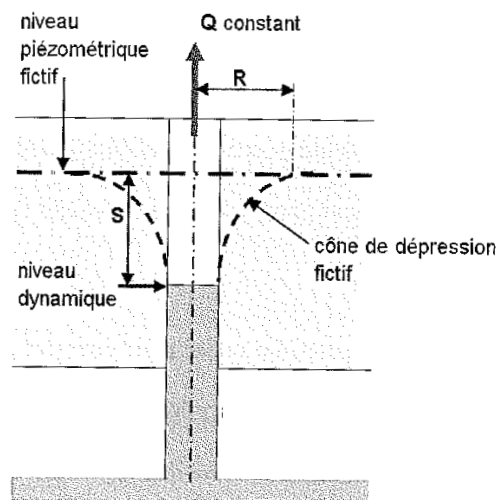
Le P2 est situé dans la vallée, sur un forage d'irrigation, les variations naturelles mesurées s'élèvent à 20 cm. Ce limnigraphe<sup>1</sup> permet de connaître la période d'irrigation sur la vallée de l'Aronde puisque les pompages dans le puits se traduisent par des variations mesurées de l'ordre de 3 m. Ainsi en 2009, la période d'irrigation a duré du 04 juin au 12 septembre.

Figure 4 : Enregistrements piézométriques de nappe de la craie au P2



La mesure piézométrique étant réalisée dans le puits qui fait l'objet des prélèvements, le niveau piézométrique est fortement influencé. Au droit du puits, le niveau piézométrique est moins influencé que dans le puits en lui-même., comme l'explique le schéma ci-dessous.

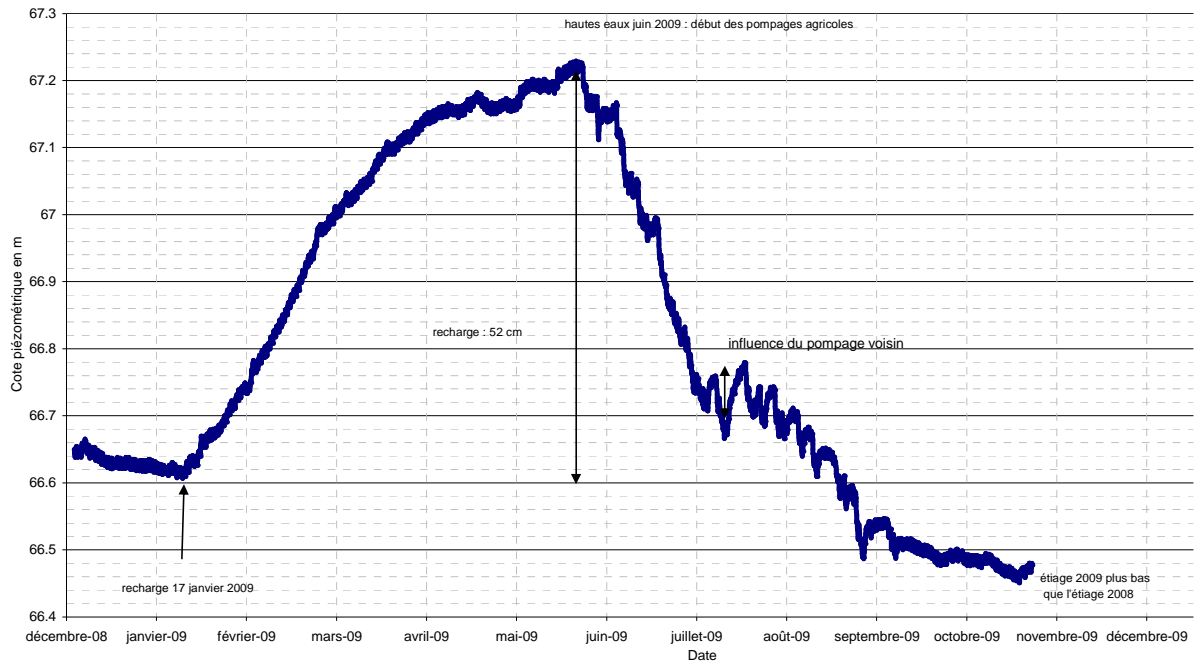
Figure 5 : influence piézométrique des pompages dans un puits



<sup>1</sup> Limnigraphe : Appareil permettant de mesurer les hauteurs d'eau, et de les enregistrer soit dans un piézomètre soit sur un plan d'eau ou un cours d'eau.

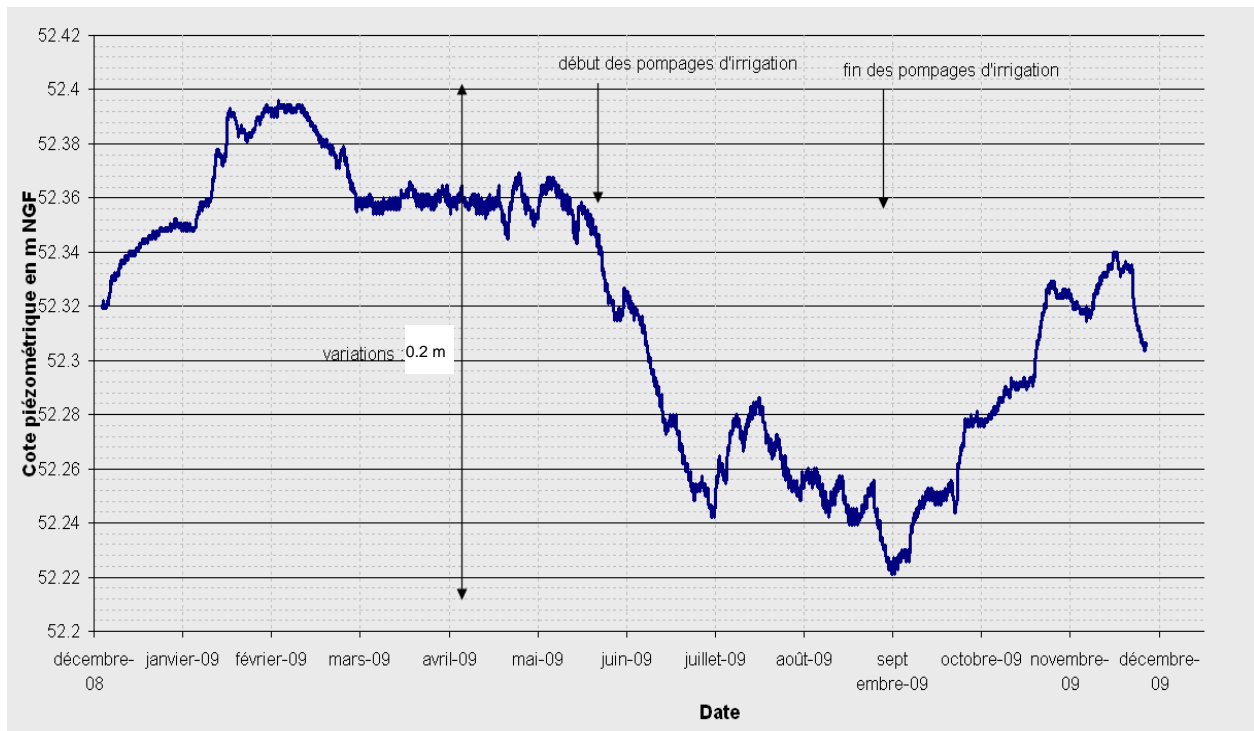
Le P1 situé dans un forage d'irrigation à Laneuvilleroy a subi une période de recharge du 17 janvier 2009 au 3 juin 2009, la recharge s'est élevée à 52 cm dans ce puits. Le début de l'irrigation sur le forage de Moyenneville marque le début de la vidange sur la chronique mesurée. L'été de 2009 est plus bas que celui de 2008.

**Figure 6 : Enregistrements piézométriques au P1**



Le P3 est situé sur un ancien puits de l'astasciculture<sup>2</sup> de Gournay-sur-Aronde, à l'extrémité de la vallée de la Somme d'Or. Les variations mesurées sur ce puits s'élèvent à 0.2 m. La période d'irrigation observée sur le PT 2 correspond à la période de vidange de la nappe observée sur ce point de mesure. La période de remplissage de la nappe a duré du 12 janvier 2009 au 18 février 2009. Une première période de vidange s'est établie du 18 février 2009 au 12 mars 2009 puis les niveaux piézométriques se sont stabilisés jusqu'au démarrage de la période d'irrigation. Ce point de mesure est situé dans une zone marécageuse, le marais permet de tamponner les variations piézométriques ce qui peut expliquer la stabilisation du niveau piézométrique de mars à juin. Partant de cette hypothèse, le démarrage des pompages d'irrigation perturberait l'équilibre du marais en provoquant un décrochage piézométrique.

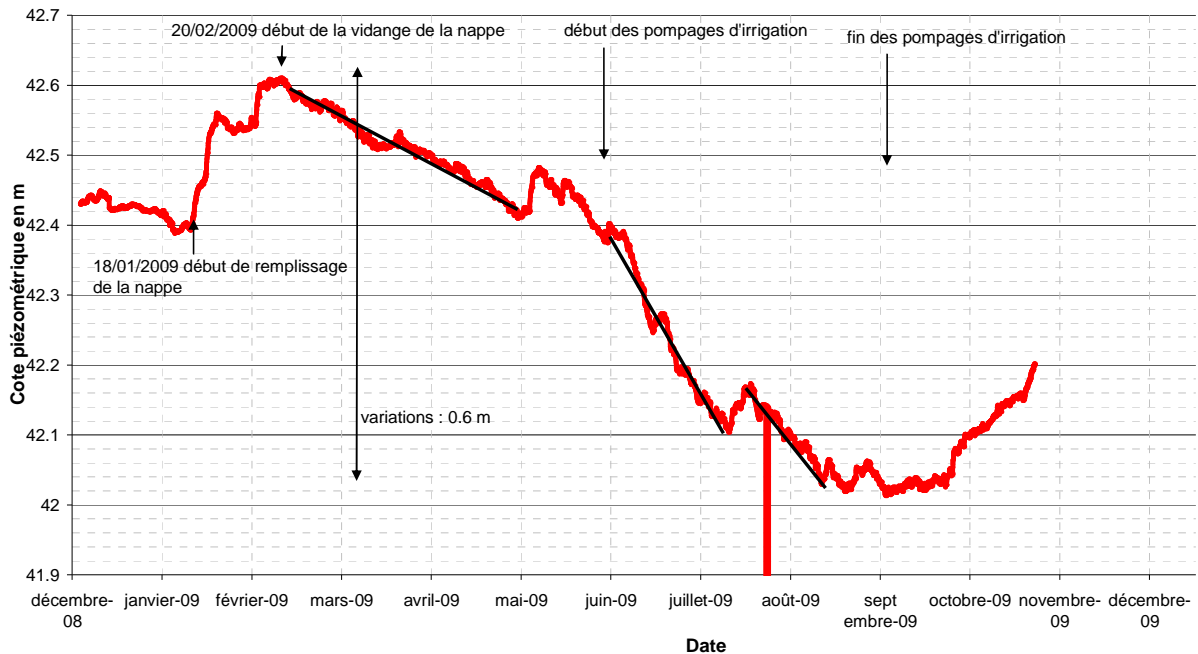
**Figure 7 : Enregistrements piézométriques au P3**



<sup>2</sup> Elevage d'écrevisses

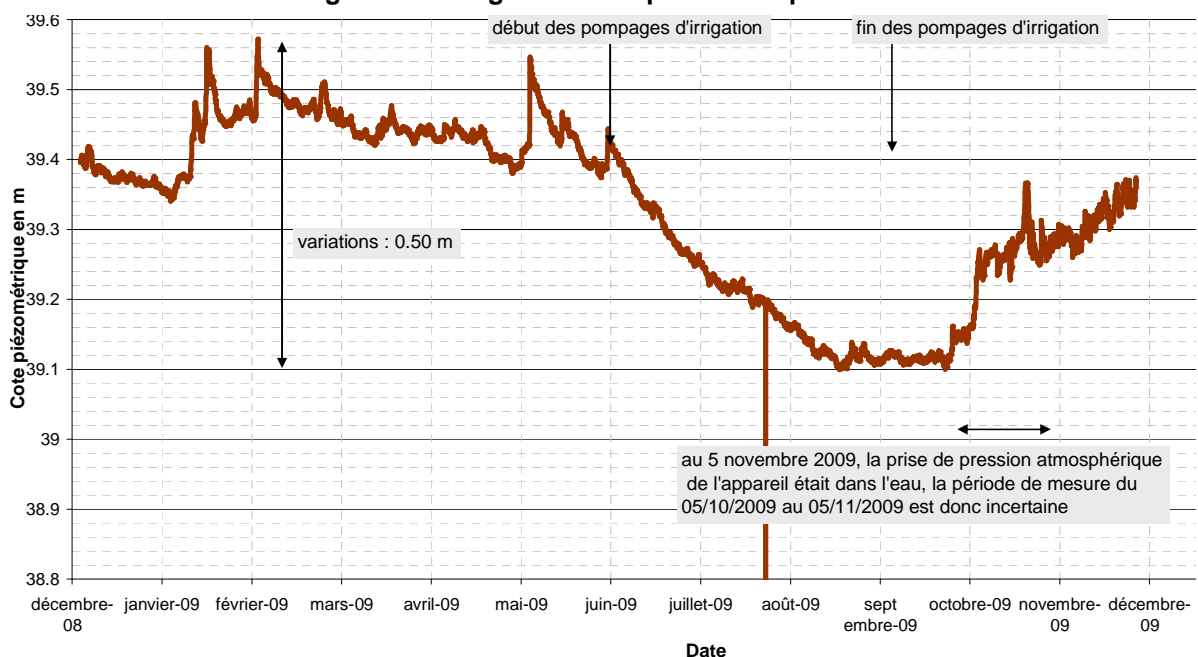
Le P4 est situé dans un piézomètre anciennement réalisé pour le compte de la société Méta-Méca de Villers-sur-Coudun. Il est situé sur l'extrémité basse du coteau. Ce limnigraphe montre que la période de recharge s'est déroulée du 18/01/2009 au 20/02/2009, ensuite la vidange de la nappe débute tout d'abord avec une pente douce qui augmente dès la période de démarrage des forages d'irrigation.

**Figure 8 : Enregistrements piézométriques au P4**



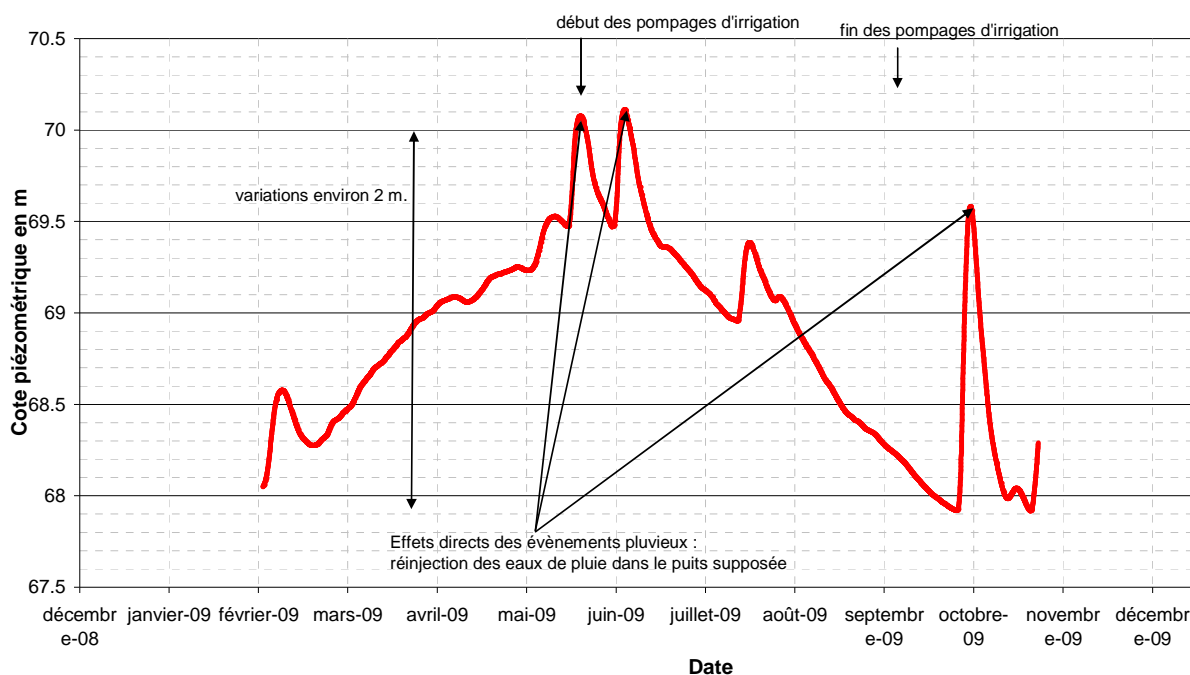
Le PT5 est également situé dans un piézomètre de la société Méta-Méca, il est localisé plus dans le marais. A noter que les enregistrements du 5/10/2009 au 5/11/2009 ont fait l'objet d'un recalage suite à une montée des eaux trop importantes qui a noyé une partie du matériel. Ce limnigraphe est très similaire à celui du PT4 les variations sont plus faibles en fond de vallée (0.50 cm pour le PT5 et 0.60 cm pour le PT4). La période d'irrigation augmente également la vitesse de vidange de la nappe.

**Figure 9 : Enregistrements piézométriques au P5**



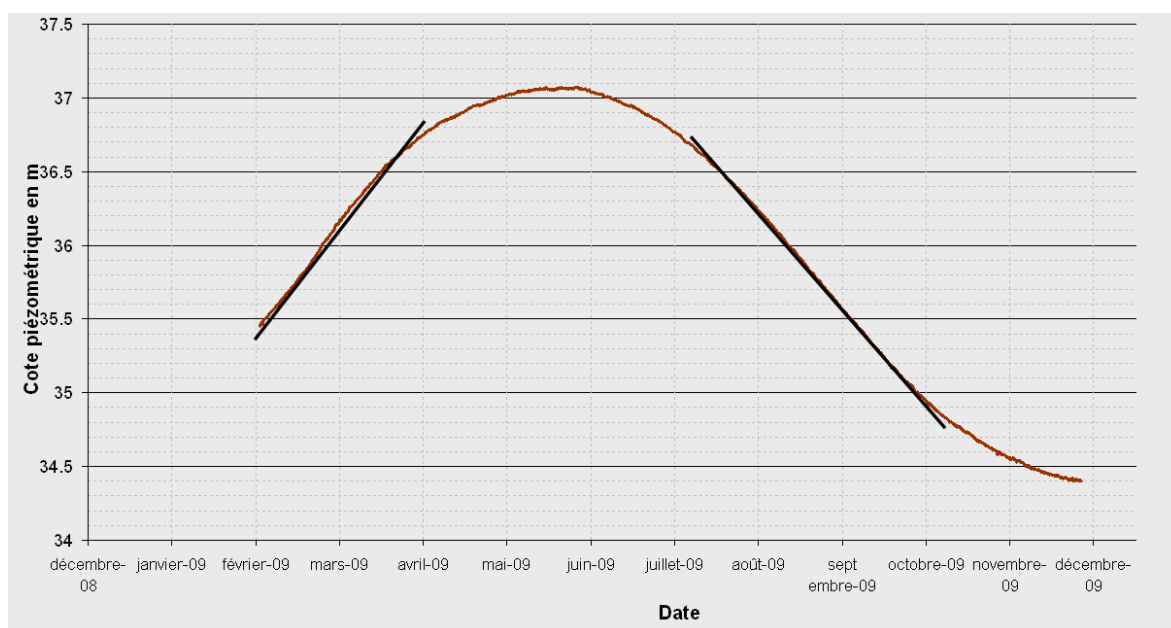
Le PT6 est situé à la Ferme des 7 Voies dans un puits désormais inutilisé. Par contre les enregistrements montrent que ce puits réagit fortement aux évènements pluvieux. Une inspection visuelle de ce puits a mis en évidence la présence de tuyaux dans le puits, sans que le propriétaire ne puisse expliquer leur présence. Nous supposons que ce puits est utilisé pour l'injection d'eau de pluie par réinfiltration ce qui explique les pics soudains de la chronique. Cela étant, la chronique enregistrée montre tout de même que la vidange de la nappe coïncide avec la période d'irrigation, jusqu'en juin 2009, l'aquifère se recharge.

**Figure 10 : enregistrements piézométriques au PT6**



Le PT7 est situé dans un puits particulier dans la forêt de Compiègne. La période de recharge s'étend du 10 février (date du début des observations) au 10 juin 2009. La chronique a une forme de cloche symétrique : la vitesse de vidange est similaire à la vitesse de remplissage de l'aquifère crayeux.

**Figure 11 : Enregistrements piézométriques au PT7**



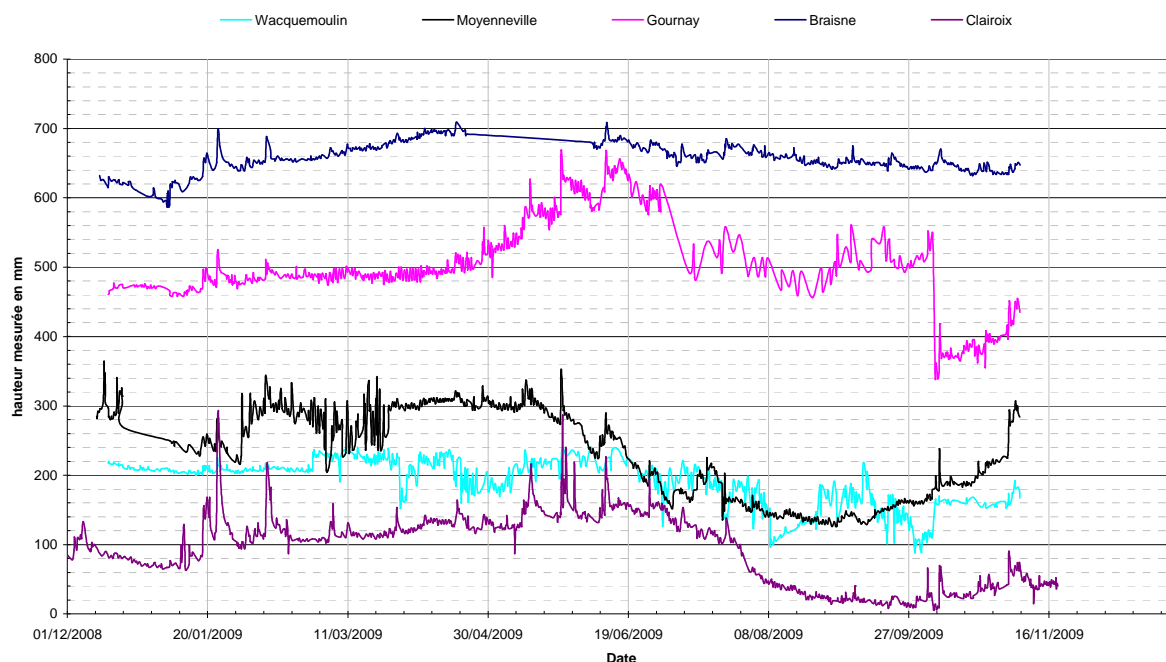
### 3.2 MESURES DES HAUTEURS D'EAU ET DES DEBITS DE L'ARONDE

En complément des enregistrements réalisés sur la station de Clairoix, 4 stations limnimétriques ont été installées par la DIREN sur l'Aronde. Elles sont localisées sur la carte présentée en début de ce chapitre.

Les enregistrements limnimétriques montrent que sur l'année 2009, la ligne d'eau a varié de l'ordre de 15 à 20 cm au maximum. Certains points de mesure, proches d'un point de contrôle aval ont une variation annuelle de la ligne d'eau inférieure.

Les enregistrements limnimétriques sur la station de Gournay semblent perturbés à partir d'avril 2009, cela correspond certainement à la réalisation d'un seuil sur l'Aronde à l'aval immédiat de la station de mesure. Ce seuil a été démonté en juin 2009. Une discontinuité, certainement due à un déplacement de la sonde est observée début octobre 2009, elle correspond au jour de passage des techniciens sur le terrain. Ces données ont été corrigées par la DIREN Picardie pour créer le graphe sur les débits en figure 13.

Figure 12 : Limnigraphes enregistrés par la DIREN sur l'Aronde

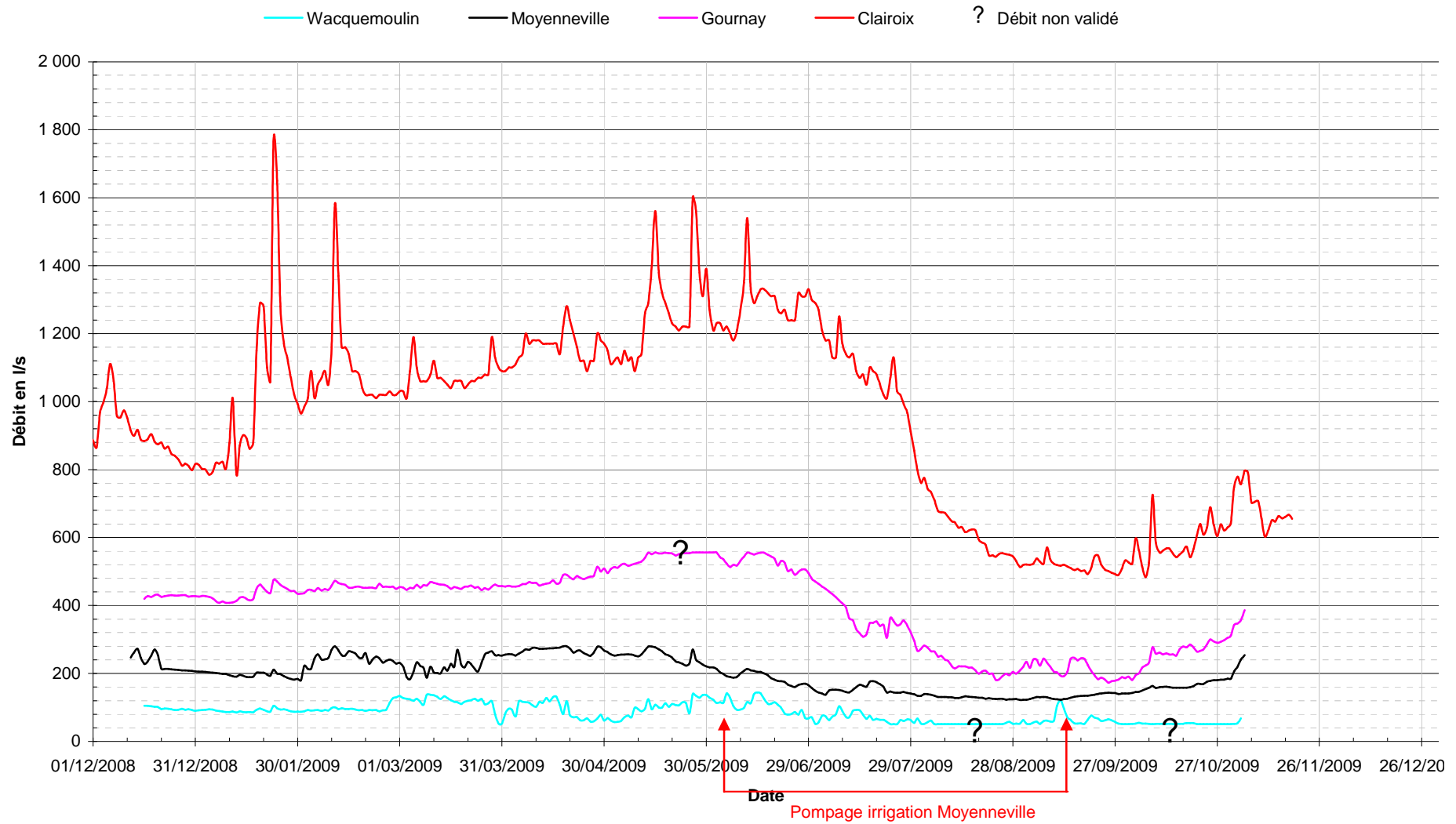


Les courbes de tarage ont été établies par la DIREN aux stations de Wacquemoulin, Moyenneville et Gournay-sur-Aronde. La courbe de tarage de la station de mesure de Braisnes n'est pas disponible à la date de la rédaction de ce rapport.

L'analyse des hydrogrammes en résultant montre que la baisse du débit de l'Aronde s'initie dès le mois d'avril sur la station de Moyenneville, soit avant le début des pompages agricoles. Durant la période d'irrigation, l'hydrogramme de l'Aronde à Moyenneville se creuse sans que l'on puisse statuer sur le rôle des prélèvements ou de l'absence de pluie efficace sur ce phénomène. L'augmentation du débit de l'Aronde correspond à l'arrêt des prélèvements et aussi, à une période un peu plus pluvieuse.

Sur le graphique suivant, les points d'interrogation correspondent à des périodes de lacune des mesures ou à des discontinuités.

Figure 13 : Débits de l'Aronde aux stations de mesure





### 3.3 INCERTITUDE DES MESURES

#### 3.3.1 Mesure des niveaux de nappe

Les mesures ponctuelles sont réalisées par un technicien à l'aide d'une sonde manuelle. L'erreur de mesure induite par l'utilisation d'une sonde manuelle est de l'ordre de +/- 0.5 cm (donnée constructeur). Lorsque la mesure est automatisée, l'erreur de mesure d'un limnigraphe est de +/- 0.06% (donnée constructeur).

Les piézomètres utilisés dans la modélisation ne sont pas tous connus en altimétrie. De plus le point de repère de cette mesure n'est pas toujours spécifié. Si l'altimétrie n'est pas connue, l'erreur de mesure est essentiellement due à l'erreur d'altimétrie qui peut être prise égale à +/- 2.5 m lorsque l'altimétrie est précisée à partir d'une carte IGN.

**Figure 14 : Incertitudes liées aux mesures piézométriques utilisées pour le calage du modèle**

Source	Indice BRGM	Nom	Precision de la mesure en m	Précision	Remarques
CA60	01041X0028	LANEUVILLEROY	2.5	EPD	
CA60	01043X0018	BAUGY	2.5	EPD	
CA60	?1042X0099	MOYENNEVILLE	2.5	EPD	
CA60	DOS16X0005	WACQUEMOULIN	2.5	EPD	
CA60	01041X0051	GRANDVILLERS-AUX-BOIS	2.5	EPD	
CA60	01042X0026	HEMEVILLERS	2.5	EPD	
CA60	00815X0047	ST-MARTIN-AUX-BOIS	2.5	EPD	
Lafarge		PB1	0.1	nivellement	
Lafarge		PB2	0.1	nivellement	
Lafarge		PB3	0.1	nivellement	
Lafarge		BM2	0.1	nivellement	
Lafarge		BM1	0.1	nivellement	
DSM	01044X0266	C	2.5	EPD	
DSM	01044X0267	F	2.5	EPD	
DSM	01044X0268	G	2.5	EPD	
affimet	01044X0260	PZ1	0.1	nivellement	
affimet	01044X0261	PZ2	0.1	nivellement	
affimet	01044X0262	PZ3	0.1	nivellement	
affimet	01044X0263	PZ4	0.1	nivellement	
meta-meca	01044X0179	P2	2.5	EPD	
meta-meca	01044X0258	PZ-4	2.5	EPD	
meta-meca	01044X0184	P7	2.5	EPD	
meta-meca	01044X0257	PZ-20	2.5	EPD	
meta-meca	01044X0160	P19	2.5	EPD	
meta-meca	01044X0185	P18	2.5	EPD	
meta-meca	01044X0158	P15	2.5	EPD	
meta-meca	01044X0216	P10	2.5	EPD	
meta-meca	01044X0255	PZ-11	2.5	EPD	
meta-meca	01044X0256	PZ-12	2.5	EPD	
huttenes	01281X0215	Pz3	2.5	EPD	
Chemtura	01038X0259	PZ11	0.1	nivellement	
Chemtura	01038X0260	PZ20	0.1	nivellement	
Producteur AEP	01041X0031	"Pronleroy"	2.5	EPD	niveau susceptible d'être influencé par le pompage
Producteur AEP	00816X0044	"Mery-la-bataille"	2.5	EPD	niveau susceptible d'être influencé par le pompage
Producteur AEP	01046X0067	"Grandfresnoy"	2.5	EPD	niveau susceptible d'être influencé par le pompage
Producteur AEP	01043X0065	"BaugyF1"	0.1	nivellement	niveau susceptible d'être influencé par le pompage
Producteur AEP	01041X0002	"BaillueilleSoc"	2.5	EPD	niveau susceptible d'être influencé par le pompage
SIEE	01046X0010S1	"Blincourt"	2.5	EPD	
SIEE	01042X0049S1	"Estrées St Denis"	2.5	EPD	
SIEE	01045X0015S1	"SacyLegrand"	2.5	EPD	

EPD : estimé d'après plan directeur (en général carte IGN au 1/25 000)

### **3.3.2 Incertitude sur les mesures des débits en rivière.**

La DIREN Picardie réalise régulièrement des mesures de débit en rivière. Les incertitudes habituellement prises sur ces mesures sont de l'ordre de 10%. Ainsi, sur le débit de l'Aronde à Clairoix qui varie entre 500 et 1500 l/s sur l'année 2009, les incertitudes sont de l'ordre de 50 à 150 l/s.

La banque hydro, qui fournit les données de débit sur la station de Clairoix, précise que cette station souffre d'un développement de végétation en été et spécialement en 2007-2008-2009 qui induit une hausse intempestive des débits et donc des débits apparents. Les débits fournis par la banque hydro s'en trouvent sur évalués pendant la période estivale de prolifération végétale.

## 4 BILAN HYDRIQUE DU BASSIN VERSANT

### En résumé

Un module hydrologique est construit afin de calculer les débits infiltrés, données d'entrée du modèle hydrogéologique et les débits ruisselés. Ce module a permis de comprendre le rôle tampon joué par les marais de la vallée de l'Aronde. C'est ce qui explique qu'il n'y a pas de pointes de crue sur l'Aronde et que les phénomènes de crue ou d'étiage sont longs. Le module hydrologique est calé sur la vallée de l'Aronde, les résultats de ce calage sont transposés au calcul de la pluie infiltrée sur la vallée de l'Oise.

La pluie infiltrée calculée est ensuite injectée dans le modèle hydrogéologique, décrit au chapitre 5.

Le bilan hydrique est réalisé grâce au logiciel HYDRA-BV sur le bassin de l'Aronde et sur le bassin de l'Oise.

Le logiciel HYDRA-BV développé par hydratec est un utilitaire général de simulation hydrologique appliqué au domaine fluvial et adapté pour la présente étude au calcul de la pluie infiltrée. Les calculs mis en œuvre consistent en une succession de générations d'hydrogrammes à partir de données pluviométriques et de transformations de ces hydrogrammes suivant un ordre et des modalités définies par une table d'opération.

Nous avons travaillé à adapter les lois de transfert de cet outil à la réalité de la physique des écoulements sur le territoire.

En particulier, nous avons repris la fonction d'évaporation pour permettre une reprise évaporatoire modulée, nous avons rajouté un élément de calcul « marais » qui permet de tenir compte des zones humides de fond de vallée sur l'Aronde et du marais de Sacy sur l'Oise. Sur les bassins versants étudiés, nous avons 2 types de fonctionnement distincts selon que le sol est perméable ou imperméable.

Le calage fin du débit des cours d'eau n'est pas possible avec cet outil qui n'utilise pas les lois de l'hydraulique classique mais des lois simplifiées travaillant sur la déformation des hydrogrammes dans leur propagation vers l'aval. Il ne peut pas bien reproduire les phénomènes d'inondation et de pointes de débit, par contre il est très fiable en volume, et reproduit très bien les échanges eaux superficielles - eaux souterraines.

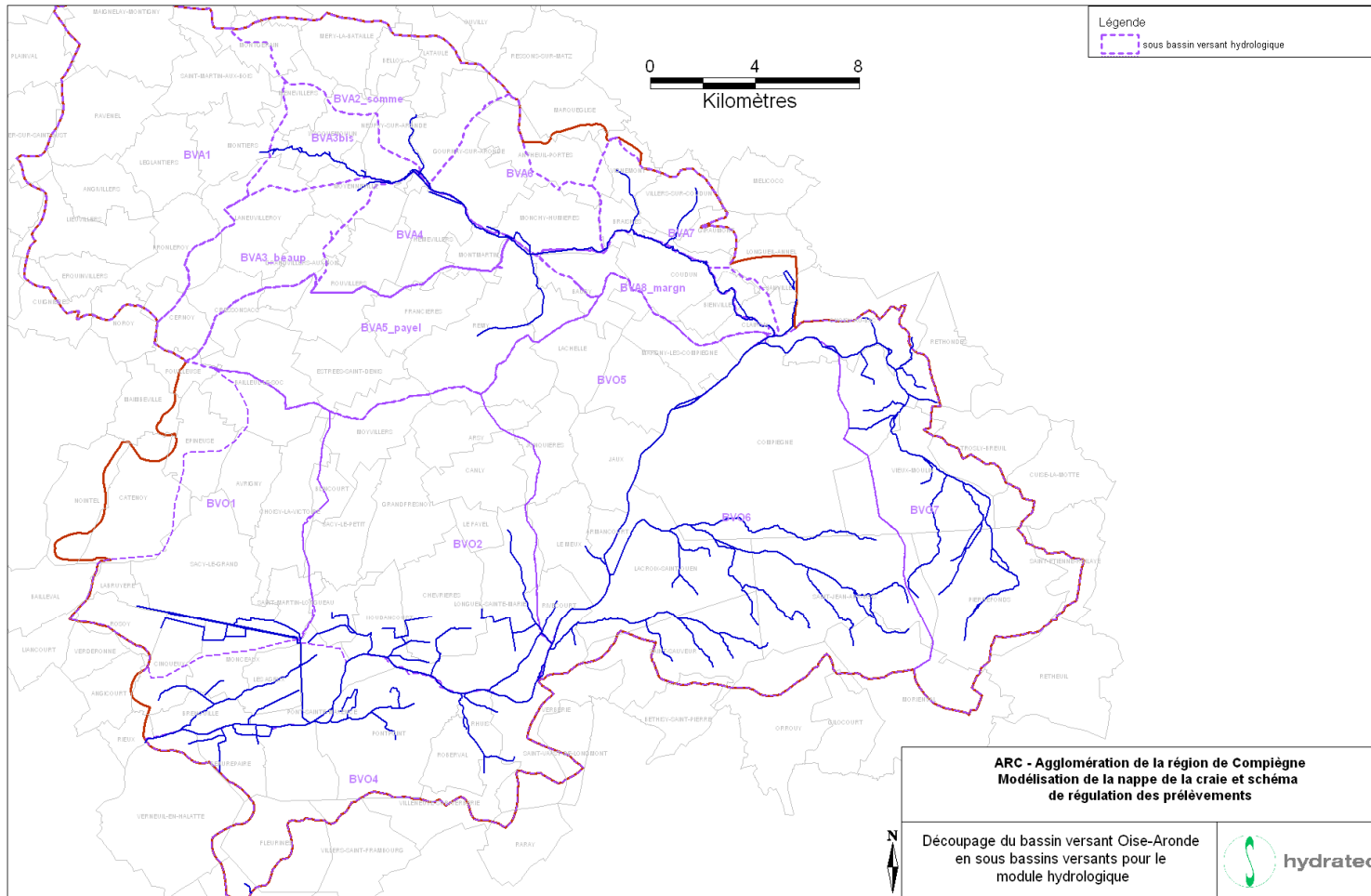
De plus, les prélèvements de surface et souterrains ne sont pas pris en compte dans ce module.

In fine cet outil a dans la chaîne de calcul du cycle de l'eau, **la fonction de calculer la pluie infiltrée vers la zone saturée de la nappe**, qui est introduite en entrée du modèle hydrogéologique.

Le calage de ce module hydrologique est réalisé par itération avec le calage du module hydrogéologique que nous présentons au chapitre 4.

Le bassin versant est découpé en sous bassins versants, unités de production hydrologique, en fonction de la topographie et de la structure géologique du sol. Le bassin de l'Aronde est ainsi découpé en 9 sous bassins versant, le bassin de l'Oise en 5 sous bassins.

Figure 15 : Découpage du bassin versant du SAGE en sous bassins versant hydrologiques



#### 4.1 BASSIN VERSANT DE L'ARONDE

Concernant le bassin versant de l'Aronde, l'analyse des chroniques enregistrées et les différents tests réalisés montrent que les **marais jouent un rôle primordial dans les débits de restitution à l'Aronde**. Le bassin versant de 288 km<sup>2</sup> produit des volumes de ruissellement importants qui se trouvent écrêtés dans le marais et restitués avec une vitesse plus faible.

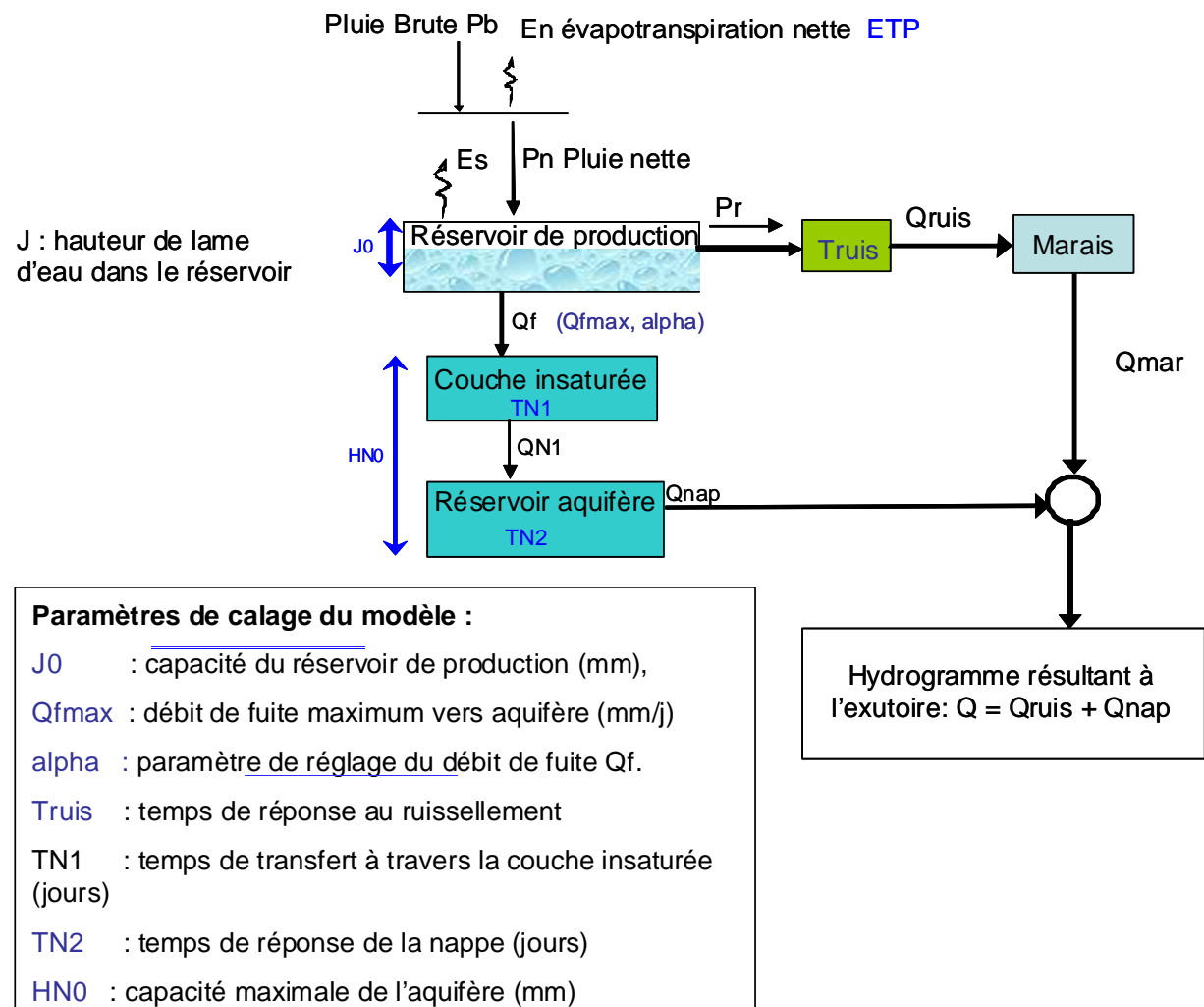
Le fonctionnement hydrologique retenu est présenté sur la figure suivante.

Il est constitué de 3 réservoirs en série. Le réservoir sol est le réservoir alimenté par la pluie brute, sur lequel agit l'évapotranspiration. Ce réservoir permet de générer le ruissellement et l'infiltration à la nappe. Le second réservoir constitue la zone non saturée de la nappe qui effectue un retard à l'alimentation de la nappe en fonction de la perméabilité des sols non saturés et de l'épaisseur de la zone non saturée.

Le troisième réservoir constitue l'aquifère de la craie. Il se vidange vers la rivière en fonction du taux de remplissage.

Un quatrième réservoir en parallèle est ajouté afin de simuler le fonctionnement des marais.

Figure 16 : Fonctionnement hydrologique de l'Aronde

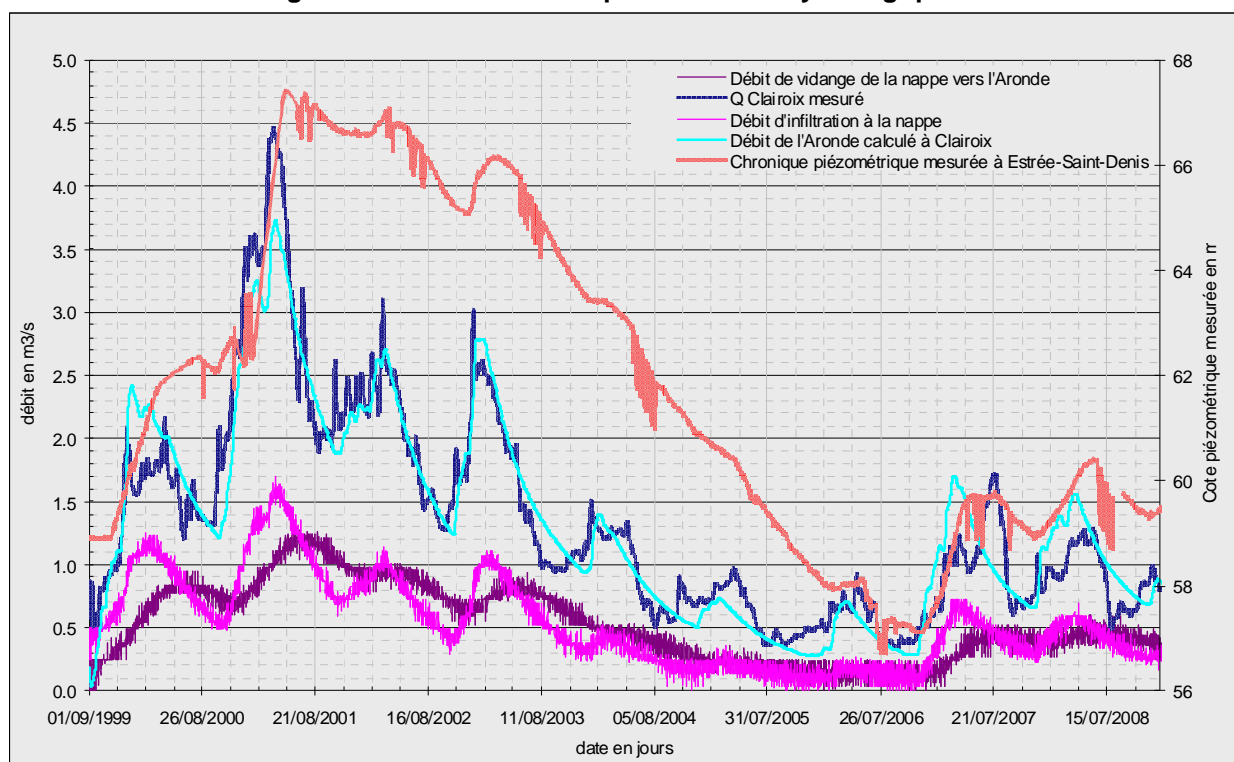


Le calage est réalisé sur la période du 01/09/1999 au 31/08/2008. Les débits calculés par le modèle sont comparés aux débits de l'Aronde mesurés à Clairoux. Le remplissage de la nappe de la craie est comparé aux variations piézométriques enregistrées au piézomètre 01042X0049 à Estrées-Saint-Denis.

Les données d'entrée du module hydrologique sont la pluie journalière du 01/09/1999 au 31/08/2008 sur les stations de Chevières et de Godenvilliers et les valeurs moyennes de l'évapotranspiration de Météo France à la station de Margny-lès-Compiègne.

Les résultats sont présentés sur le graphique suivant.

**Figure 17 : débits calculés par le module hydrologique**



Ce graphique montre le calage, qui a consisté à faire coïncider le rythme **d'alimentation de la nappe** (courbe rose) avec les périodes de recharge et de vidange de la nappe (**piézométrie** ascendante ou descendante, courbe orange) en introduisant des temps de retard à l'infiltration, en fonction des caractéristiques des sols et de l'épaisseur de la zone non saturée.

Ce calage permet aussi d'évaluer le **débit d'alimentation de la rivière par la nappe** (courbe violette) ou débit de base de l'Aronde sur lequel viennent se rajouter les ruissellements et les phénomènes de stockage restitution des marécages pour constituer le **débit calculé de l'Aronde** (courbe bleu ciel). Ce débit calculé est comparé au **débit mesuré à Clairoux** (courbe bleu).

Le calage du module hydrologique a fait l'objet d'itérations entre le module hydrologique et le module hydrogéologique, décrit par la suite de ce rapport.

## 4.2 BASSIN VERSANT DE L'OISE

L'objet du module hydrologique est de calculer la part infiltrée de la pluie. Sur le bassin versant de l'Oise, des secteurs imperméables isolent la nappe de la craie des apports directs de la pluie. Ces secteurs sont purement ruisselants. Nous ne cherchons pas à calculer la part ruisselante. Seuls les secteurs perméables sont abordés ici.

En l'absence de stations de calage sur le tronçon concerné par le modèle, le calcul de la pluie infiltrée sur le bassin versant de l'Oise est basé sur ce qui a été calé sur le bassin versant de l'Aronde.

## 4.3 LES MARAIS DE SACY

Les marais de Sacy ont été étudiés par le groupement Stucky – Armines avec notamment la réalisation d'un modèle hydrogéologique des écoulements souterrains sur Modcou. Les seules mesures de débit sur la Frette collectés datent de 1998 – 1999 et proviennent des études précédentes. Elles sont présentées sur le tableau ci-après.

Le débit drainé par les marais de Sacy est en moyenne annuelle de l'ordre de 220 l/s, la chronique étudiée est représentative d'une année de basses eaux, constituées essentiellement du débit de base de la nappe.

**Figure 18 : Résultats des jaugeages réalisés sur la Frette et le Canal Maure à Saint Martin Longueau entre juillet 1998 et juillet 1999.**

Source : *Etude Hydraulique des Marais de Sacy en hautes eaux – Stucky Armines*

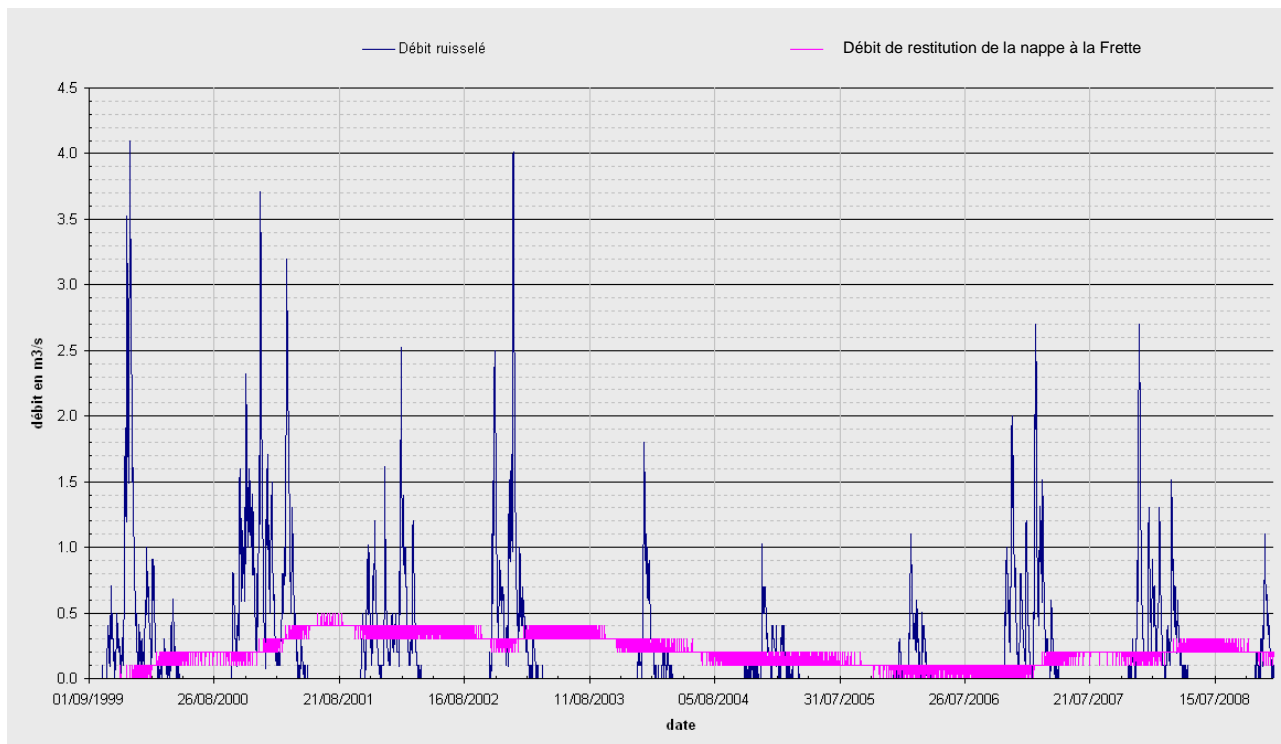
Date	Canal de la Frette (l/s)	Canal Maure (l/s)	Débit total (l/s)
21/07/98	72	17	89
06/08/98	90	22	112
23/09/98	64	6	70
23/10/98	27	6	33
04/11/98	167	19	186
04/12/98	191	19	210
18/01/99	239	57	296
24/02/99	220	109	329
25/03/99	226	64	290
29/04/99	176	41	217
30/06/99	123	22	145

La Frette est alimentée par le drainage de la nappe de la craie, mais également par la vidange des plans d'eau et par le ruissellement sur els terrains tertiaires du sud des marais.

Les débits calculés par le module hydrologique sont présentés sur la figure suivante.

Le débit d'alimentation de la Frette par la nappe de la craie calculé varie de 100 l/s à 450 l/s sur la période observée. Etant donnée l'incertitude sur les mesures, ces ordres de grandeur sont validés.

Figure 19 : Débit ruisselé et débit drainé pour la Frette.



#### 4.4 CALCUL DE LA PART DE LA PLUIE INFILTREE

Dans ce paragraphe nous détaillons les différents termes du bilan hydrologique du bassin versant de l'Aronde. Cela est plus parlant que ce même bilan sur le bassin versant de l'Oise dont le fonctionnement est tributaire de son grand bassin versant.

Dans le tableau ci-dessous nous indiquons pour les années hydrologiques (septembre année n – octobre année n+1) simulées sur le BVA1, bassin versant à l'amont de l'Aronde :

- ♦ La pluie brute **Pbrute** en mm/an mesurée à la station pluviométrique
- ♦ La pluie efficace **Peff** en mm/an qui est la part de la pluie brute qui peut ruisseler ou s'infiltrer, une fois l'évapotranspiration prélevée,
- ♦ La pluie infiltrée **Pinf** en mm/an

Il permet de comparer les valeurs annuelles (somme des valeurs journalières sur une année) et la répartition dans le temps des apports sur la période simulée.



**Figure 20 : Comparaison de la pluie brute annuelle, la pluie efficace annuelle et la pluie infiltrée annuelle**

Année hydrologique	Pbrute		Peff		Pinf	
	mm/an	mm/an	en % Pbrute	mm/an	en % Peff	
1999-2000	909	426	47%	121	29%	
2000-2001	1197	590	49%	135	23%	
2001-2002	763	285	37%	82	29%	
2002-2003	744	298	40%	75	25%	
2003-2004	619	85	14%	28	33%	
2004-2005	525	36	7%	10	29%	
2005-2006	651	62	10%	9	15%	
2006-2007	772	230	30%	46	20%	
2007-2008	690	154	22%	39	25%	

Ce tableau enseigne que plus de 50% de la pluie brute est sollicitée pour l'évapotranspiration quelque soit l'année d'observation.

Bien plus, du 01/09/2003 au 31/08/2006 c'est plus de 85% de la pluie brute qui est soustraite au système par évapotranspiration.

La part de la pluie efficace disponible pour la nappe est de 15 à 33%, ce qui est cohérent avec la bibliographie, qui indique une part de la pluie infiltrée en général égale à 30 % de la pluie efficace sur des sols perméables.

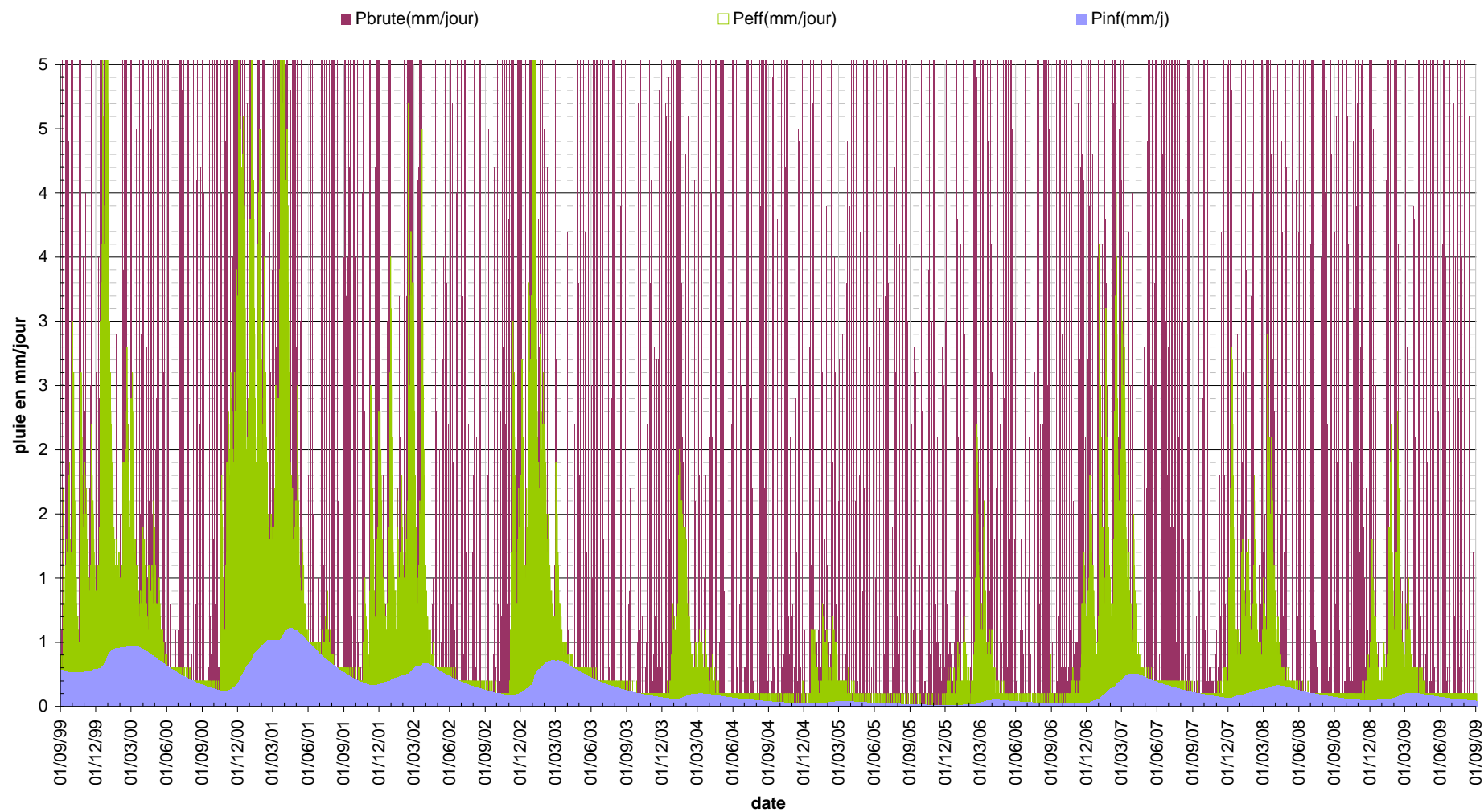
L'observation des chroniques de pluie brute, de pluie efficace et de pluie infiltrée sur le bassin versant montre un décalage dans le temps entre la pluie efficace et la pluie infiltrée. Cf. Figure 21

La pluie efficace est active à l'automne et en hiver, lorsque l'évapotranspiration est faible. Cette pluie efficace alimente le ruissellement et l'infiltration.

Le phénomène d'infiltration est retardé de l'ordre de 3 mois. Ainsi, la nappe de la craie a un comportement décalé par rapport à la pluie, c'est pourquoi l'étiage de nappe est généralement observé entre octobre et décembre et les hautes eaux entre mars et mai. Le calcul de la pluie infiltrée par le module HYDRA-BV permet de traduire ce phénomène de retard.

**C'est donc cette pluie infiltrée qui sera introduite par sous-bassins versant calculés dans le modèle hydrogéologique en tant que limite « recharge ».**

Figure 21 : Comparaison de la pluie brute, la pluie efficace et la pluie infiltrée



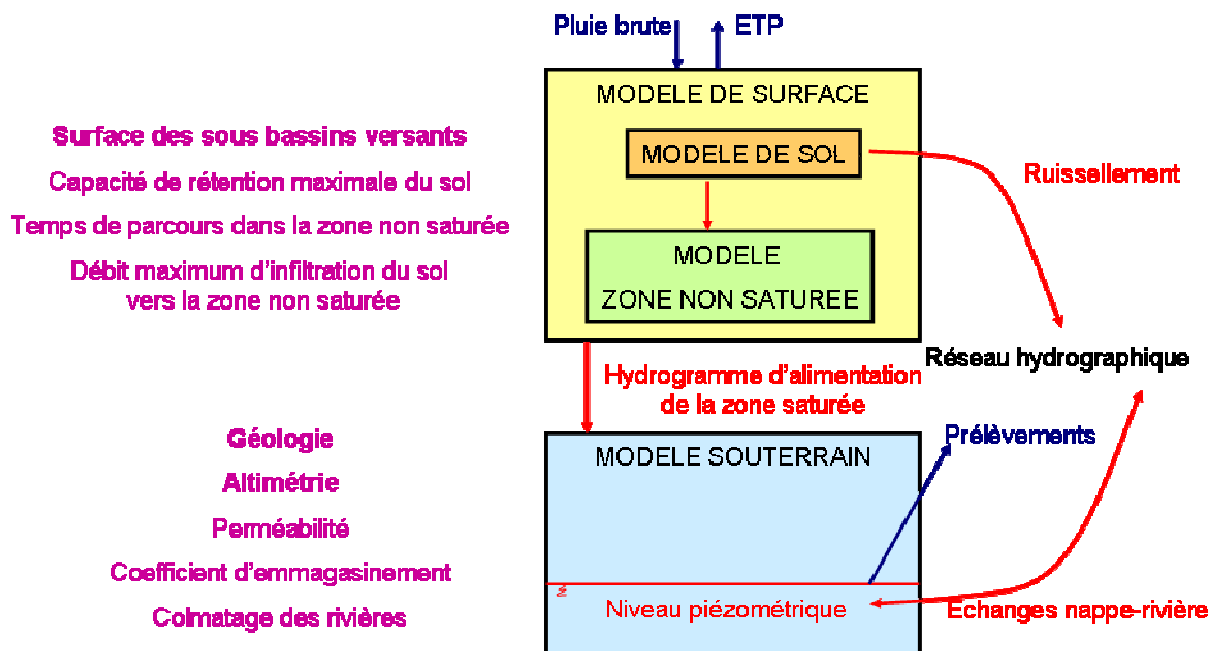
## 5 PRESENTATION DU MODELE DES ECOULEMENTS HYDRODYNAMIQUES ET DU CALAGE

### En résumé

Le présent chapitre est très technique et présente la construction du modèle et son calage. Sa lecture est destinée à de futurs utilisateurs du modèle de gestion de nappe. Le calage, réalisé sur une période longue de 1999 à 2008, est présenté sur la piézométrie en plan de la nappe, sur les variations piézométriques et sur les débits d'échange entre les rivières et leur nappe d'accompagnement qui participent au débit de l'Aronde à Clairoix. La période choisie pour le calage permet de représenter une période de hautes eaux exceptionnelles (2000-2001) de la nappe et une période de basses eaux exceptionnelles (2005-2006). Le modèle est donc calé sur des extrêmes hydrologiques. Une analyse de la sensibilité du modèle est présentée en fin de chapitre afin d'appréhender les incertitudes liées aux calculs.

Les écoulements souterrains sont modélisés sous le logiciel Visual Modflow. Seule la zone saturée de la nappe est prise en compte dans ce module de calcul. Ainsi les phénomènes de ruissellement et d'écoulement dans la zone non saturée sont intégrés au module de calcul hydra-BV de la chaîne de calcul, comme le montre le schéma de modélisation de la figure suivante.

Figure 22 : Présentation de la chaîne de calcul du modèle de la nappe de la craie Oise Aronde.



Le présent chapitre a pour objet de décrire la structure du module des écoulements souterrains.

## 5.1 AIRE MODELISEE

L'aire modélisée correspond au bassin versant hydrogéologique des vallées de l'Aronde et de l'Oise, concernées par le SAGE. Un seul modèle global est construit sur l'ensemble du territoire du SAGE Oise Aronde. En rive gauche de l'Oise, la forêt de Compiègne est incluse dans le périmètre de modélisation ainsi que les terrains au Sud de l'Oise où la craie est sous recouvrement tertiaire.

## 5.2 MAILLAGE ET ORIENTATION DU MODELE

Le modèle est découpé selon un maillage rectangulaire de taille variable. Les mailles les plus fines sont localisées dans les secteurs à fort enjeux : vallée de l'Aronde, marais de Sacy elles sont alors carrées de côté 62.5 m.

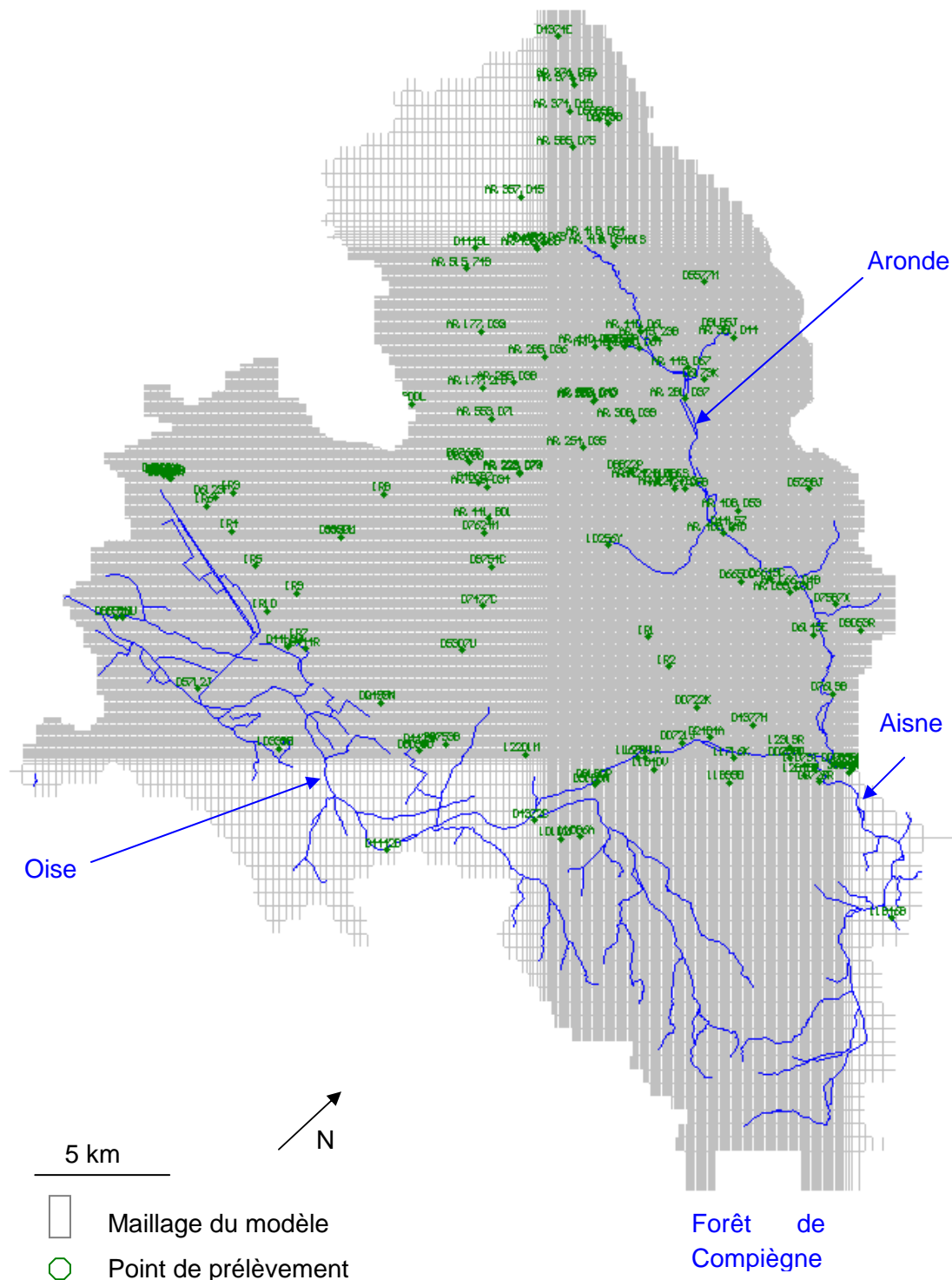
Sur les coteaux les mailles sont rectangulaires, le plus grand côté mesure alors 500 m.

Le modèle possède **6 couches géologiques**, leur épaisseur est déterminée à partir des données de géologie disponibles à la Banque de données du Sous Sol du BRGM, des rapports de forage disponibles au BRGM et de la carte hydrogéologique de l'Oise.

Chacune des 6 couches est découpée selon le même maillage. Au total, le modèle possède 581 580 mailles.

Le maillage est orienté selon l'axe tectonique des anticlinaux, soit Nord 44°.

Figure 23 : Présentation du maillage et des points de prélèvement introduits dans le modèle



### 5.3 TOPOGRAPHIE ET STRUCTURE GEOLOGIQUE DU MODELE

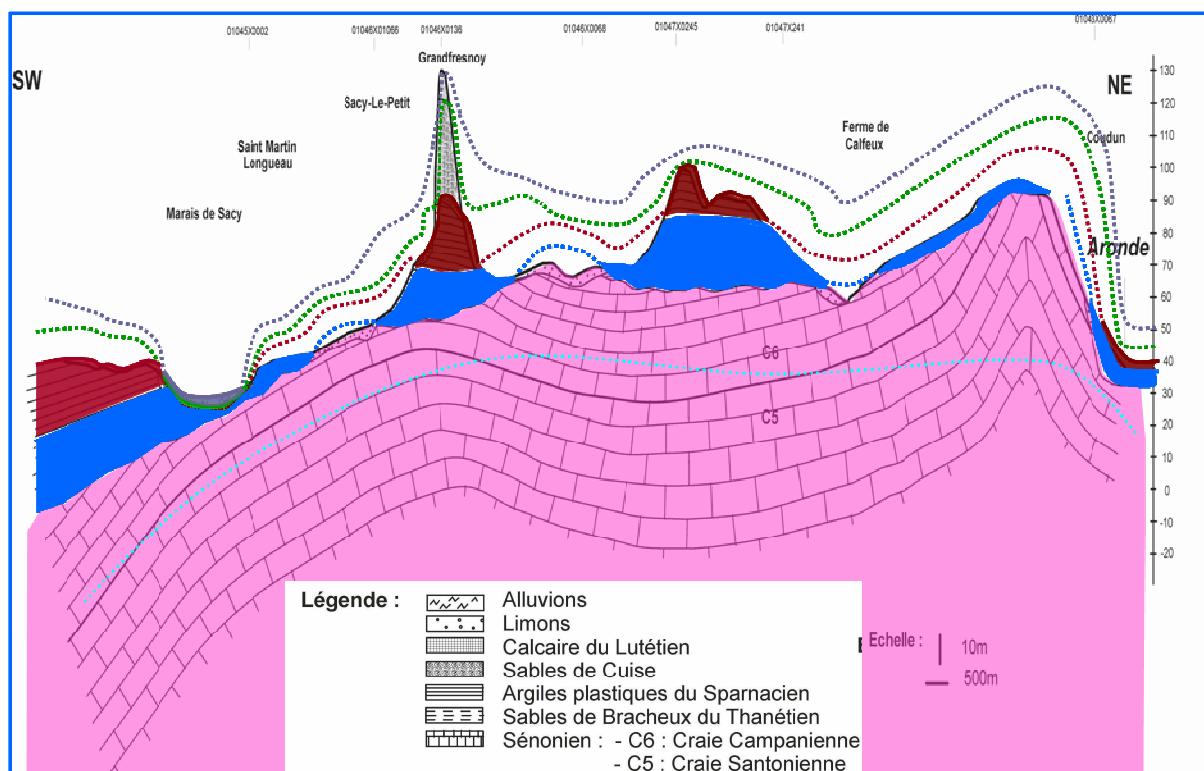
Le modèle construit concerne deux bassins versants distincts : le bassin versant de l'Aronde et le bassin versant de l'Oise. Les distinctions entre ces deux bassins versants sont topographiques, hydrogéologiques et géologiques. En effet, l'analyse du MNT et de la piézométrie permet de tracer deux bassins versants topographiques et hydrogéologiques.

De plus, le bassin versant de l'Aronde est essentiellement formé de 2 entités géologiques : la craie et les alluvions, plus ou moins tourbeuses de l'Aronde. Tandis que la vallée de l'Oise est constituée de la craie, de sables de Bracheux, des argiles Yprésiennes, des terrains tertiaires supérieurs (sables de Cuise et calcaire du Lutétien), alluvions de l'Oise et de l'Aisne.

Ainsi, la conceptualisation du modèle est également fonction de ces deux sous bassins versant :

- sur le bassin versant de l'Aronde, seules 4 couches permettent de représenter la géologie. Il s'agit de la couche de craie inférieure, peu perméable, de la craie perméable et de deux couches alluviales, destinées à la représentation des 10 premiers mètres de terrain et à la présence éventuelle d'horizons tourbeux.
- Sur le bassin de l'Oise, 6 couches permettent la représentation des horizons géologiques en lien avec le fonctionnement de la nappe de la craie.

Figure 24 : description de la conceptualisation du modèle



Certaines couches du modèle représentent différents horizons géologiques, les caractéristiques hydrodynamiques introduites permettent de distinguer les formations.

Les courbes isohypses<sup>3</sup> de chacune des couches modélisées sont présentées en fin de ce rapport. Ci-dessous les différents paragraphes précisent les représentations de chacune des couches du modèle.

### **5.3.1 Topographie**

La cote altimétrique est définie à partir du NASA Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) qui fournit les données topographiques sur le monde entier à un maillage de 90 m au niveau de l'équateur. Ce sont des données satellitaires, il a donc été nécessaires de corriger les valeurs fournies notamment au niveau des fonds de vallée boisés où la cote de la cime des arbres est généralement mesurée. La carte au chapitre 7.2 présente les données brutes du SRTM. Les différentes cartes des couches du modèle présentées, après la carte de la topographie, présentent les données corrigées par couche introduites dans le modèle.

### **5.3.2 La craie**

La craie est présente sur l'ensemble du bassin versant étudié. Elle est représentée en couche 5 et 6 dans le modèle. Ces deux couches permettent de modéliser la première tranche fracturée de la craie qui bénéficie d'une bonne perméabilité (couche 5) et la seconde couche plus compacte (couche 6). Cette représentation a été notamment utile pour faire figurer le dôme de craie de Margny-lès-Compiègne.

Le toit de la craie est créé à partir des sondages de la banque de données du sous sol et des données de topographie du SRTM dans les secteurs où la craie est affleurante. Pour la partie captive notamment au Sud du secteur d'étude, le toit de la craie est tracé à partir des isohypses de la carte hydrogéologique du département de l'Oise.

En l'absence de données précises sur l'épaisseur fracturée de la craie, elle a été fixée à 30 mètres sur l'ensemble du bassin versant.

### **5.3.3 Les sables de Bracheux**

Les sables de Bracheux ne sont pas présents sur tout le bassin versant. Leur présence est déterminée à partir des cartes géologiques (n° 103-104-80-81). Le toit des sables de Bracheux est créé à partir des données de sondage de la banque de données du sous sol et à partir des données de topographie du SRTM sur les secteurs où ils sont affleurants. Ils sont représentés par la couche 4 du modèle.

### **5.3.4 Les argiles Yprésiennes**

Les argiles Yprésiennes sont présentes au Sud de l'Oise et en butte au Nord de l'Oise. Elles sont représentées par la couche 3 à partir des sondages de la banque de données du sous sol et des données topographiques du SRTM pour les secteurs où les argiles sont affleurantes. Elles sont représentées dès qu'elles sont recouvertes par les alluvions.

---

<sup>3</sup> Courbes d'égale altitude

### **5.3.5 Les terrains supérieurs : sables de Cuise, calcaire du Lutétien**

Les argiles Yprésiennes sont surmontées par les terrains supérieurs constitués des sables de Cuise et du calcaire du Lutétien. Ces formations ne sont pas représentées dans le modèle hydrogéologique qui est focalisé sur le fonctionnement hydrodynamique de la nappe de la craie. Les relations de drainance entre la nappe de la craie et la nappe des sables de Cuise et des calcaires Lutétiens sont négligées dans le modèle.

### **5.3.6 Les alluvions de l'Oise**

Les alluvions de l'Oise sont définies sur les couches 1 et 2 du modèle lorsqu'elles surmontent les argiles Yprésiennes, c'est-à-dire dans la boucle de Longueil-Sainte-Marie, elles sont en couche 3 lorsqu'elles surmontent les sables de Bracheux et en couche 4 lorsqu'elles sont au-dessus de la craie. Les alluvions modernes et anciennes (plus graveleuses) sont distinguées. Les isohypses de ces formations ont été réalisées à partir des données disponibles à la banque de données du sous sol mais également des données de sondage des carrières, notamment les carrières Lafarge de Chevrières, Ribécourt et Choisy-au-Bac.

### **5.3.7 Les alluvions de l'Aronde**

Les alluvions de l'Aronde sont représentées sur les couches 3 et 4 car elles surmontent directement la craie représentée en couche 5. Deux couches ont été créées afin de représenter les tourbes du marais lorsqu'elles sont présentes.

## **5.4 REPARTITION DES POINTS DE PRELEVEMENTS**

Les points de prélèvement répertoriés au cours de la phase 1 sont introduits dans le modèle par leurs coordonnées Lambert. Ils sont affectés à un niveau géologique et d'un débit de pompage mensuel. Les points introduits sont présentés sur la Figure 23.

## **5.5 REPARTITION DE LA PLUIE INFILTREE**

La recharge est affectée sur la première couche active du modèle, c'est-à-dire sur la craie lorsque celle-ci est affleurante où lorsque les terrains qui la surmontent ne contiennent pas de nappe. Ainsi, c'est bien la pluie infiltrée après passage au travers de la zone non saturée qu'il faut appliquer au modèle hydrogéologique. Cette pluie est calculée par le module hydrologique hydra-BV présenté au chapitre 2. Ainsi, la recharge est affectée selon les 9 sous bassins versants définis au chapitre 2 pour le bassin de l'Aronde et les 3 sous bassins versants décrivant le fonctionnement hydrologique de l'Oise. Lorsque l'argile Yprésienne isole la nappe de la craie, la recharge appliquée est nulle. On considère alors que l'infiltration à la nappe de la craie est négligeable.



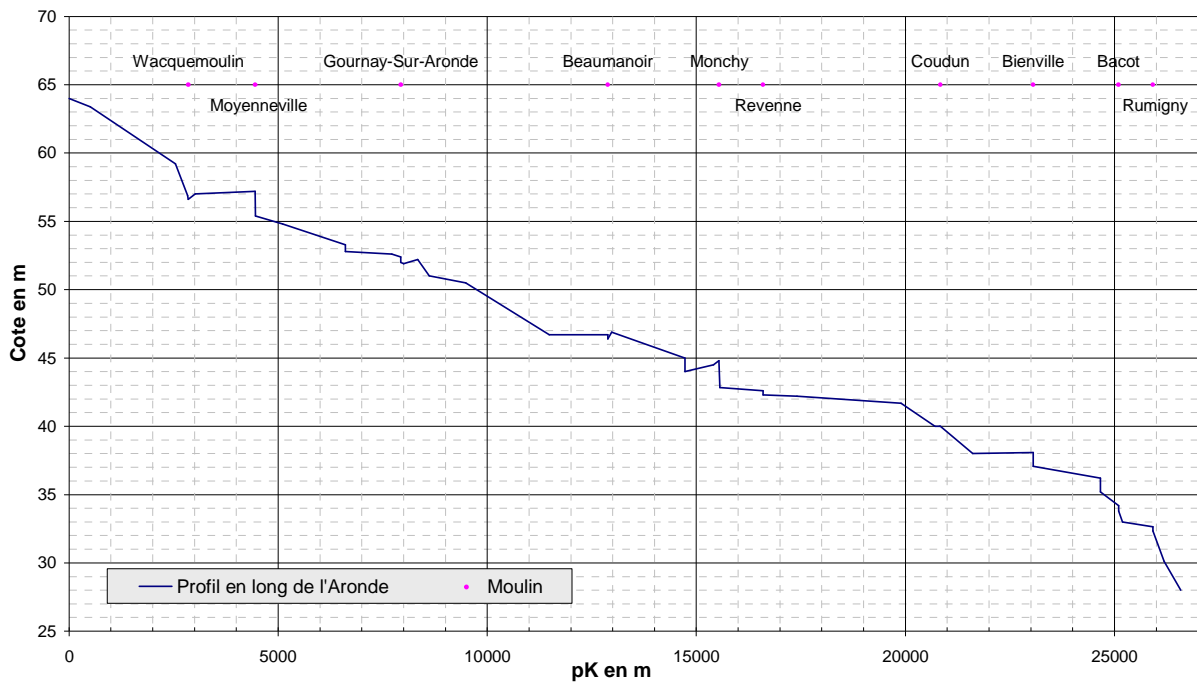
## 5.6 REPRESENTATION DES RIVIERES

Les rivières sont représentées dans Visual Modflow par des cellules « rivière » ou par des cellules « drain ».

Les **cellules « rivière »** sont des limites à flux imposé, les échanges avec la nappe se réalisent au travers d'une couche représentant le lit de la rivière dont la perméabilité est calée. Les échanges peuvent être positifs ou négatifs selon que la rivière alimente ou draine la nappe. Les données caractérisant cette limite sont : la cote de la ligne d'eau, la cote du fond de la rivière, l'épaisseur et la perméabilité du lit de la rivière, la largeur du lit. Ces caractéristiques ont été déterminées à partir des mesures réalisées en avril 2009 par hydratec et des compléments obtenus dans la bibliographie notamment concernant les hauteurs de chute des moulins. Un rapport de terrain intitulé *Reconnaissance de l'Aronde et de ses affluents* a été rédigé dans le cadre de cette étude. Il présente l'ensemble des informations collectées par hydratec.

Ces mesures aboutissent à la réalisation du profil en long présenté ci-après. Les caractéristiques des différents tronçons introduits dans Visual-Modflow sont présentées au chapitre 7.3 par les sections amont et aval de chacun des tronçons.

Figure 25 : Profil en long de l'Aronde



L'Oise est représentée par des **cellules « rivière »**, caractérisées à partir des cotes de retenue normale des différents tronçons et des profils en travers du SNS.

Station	Cote de la ligne d'eau	Cote du fond de la rivière	Conductance <sup>4</sup> en m <sup>2</sup> /jour
Venette	29.73 m IGN69	27.11 m IGN69	50 000
Verberie amont		25.63 m IGN69	
Verberie aval	28.44 m IGN69	24.79 m IGN69	50 000
Sarron amont		24.64 m IGN69	
Sarron aval	27.04 m IGN69	23.2 m IGN69	50 000
Pont-Saint-Maxence		23.11 m IGN69	

L'Aisne est représentée sous la forme de cellules rivières également, les caractéristiques introduites sont issues des données de profils en travers du SNS et présentées ci-après.

Stations	Cote de la ligne d'eau	Cote du fond de la rivière	Conductance en m <sup>2</sup> /jour
Hérant	32.885 m IGN69	29.6 m IGN69	50 000
Carandeaup amont		27.8 m IGN69	
Carandeaup aval	31.01 m IGN69	27.5 m IGN69	50 000
Confluence Oise-Aisne		27.2 m IGN69	

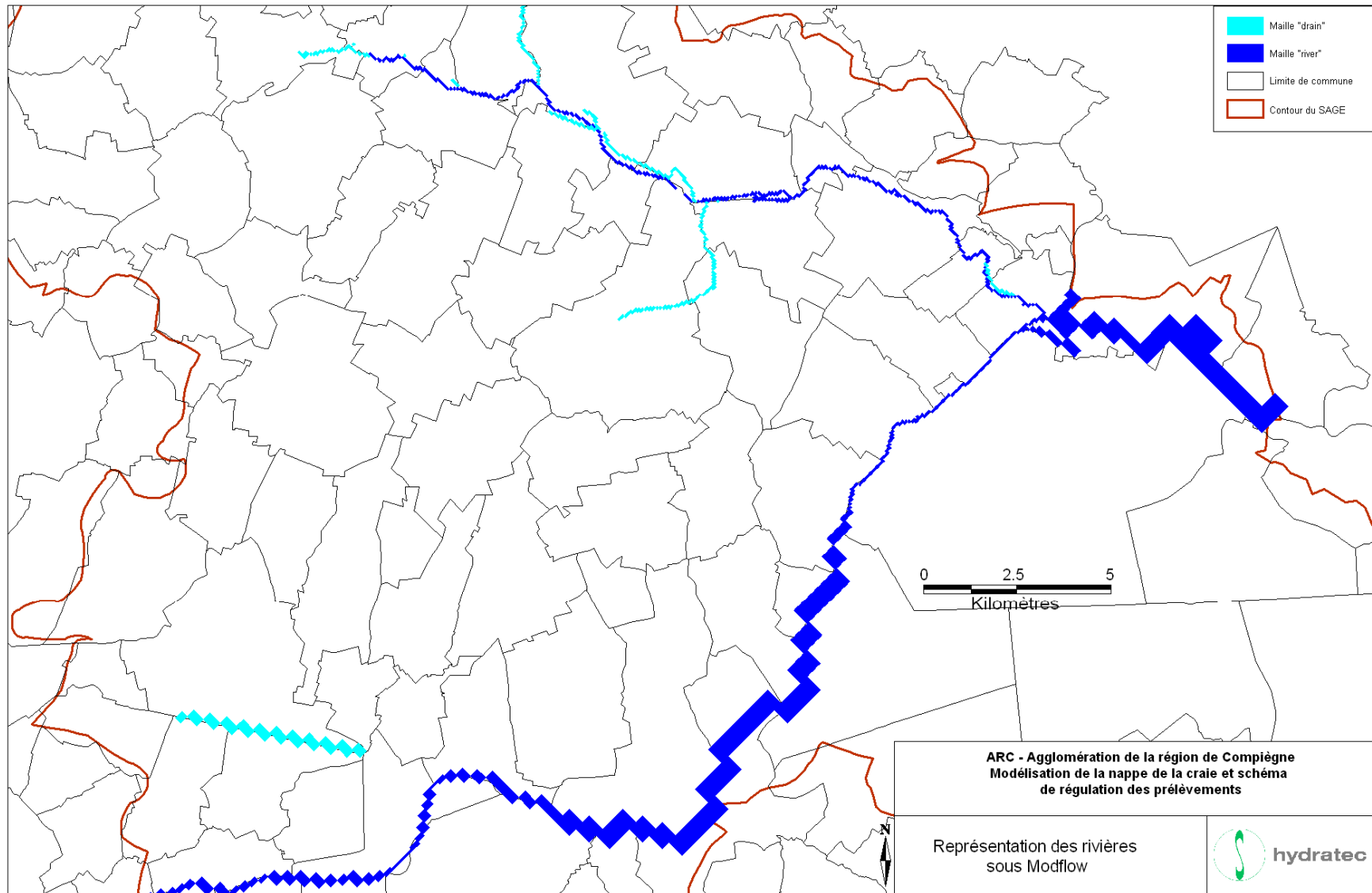
Les **cellules « drain »** sont des limites ne pouvant qu'extraire de l'eau au système aquifère. Elles sont caractérisées par une cote de drain, une épaisseur et une perméabilité d'échange avec la nappe. Elles sont utilisées pour représenter le fonctionnement des sources et des tronçons de fond de vallée.

La Frette est représentée sous la forme de cellules drain

La carte qui suit montre la représentation des rivières en cellules « drain » et « rivière » sous Visual Modflow.

<sup>4</sup> Conductance : terme qui régit les échanges entre une rivière et sa nappe d'accompagnement, qui intègre la perméabilité, l'épaisseur du lit de la rivière ainsi que la largeur et la longueur du tronçon de rivière dans la maille.

Figure 26 : Représentation des rivières sous Visual Modflow



Dans le calage, il a été choisi de ne représenter que les biefs de l'Aronde de fond de vallée dans le modèle. Les tronçons perchés provoquaient de fortes pertes de débit de la rivière vers sa nappe, qui n'étaient pas observées. Or ces tronçons peuvent être considérés colmatés en amont des seuils.

## 5.7 REPARTITION DES PERMEABILITES CALEES

Le calage des perméabilités prend en compte les données bibliographiques collectées présentées dans le rapport de phase 1 de la présente étude en page 16.

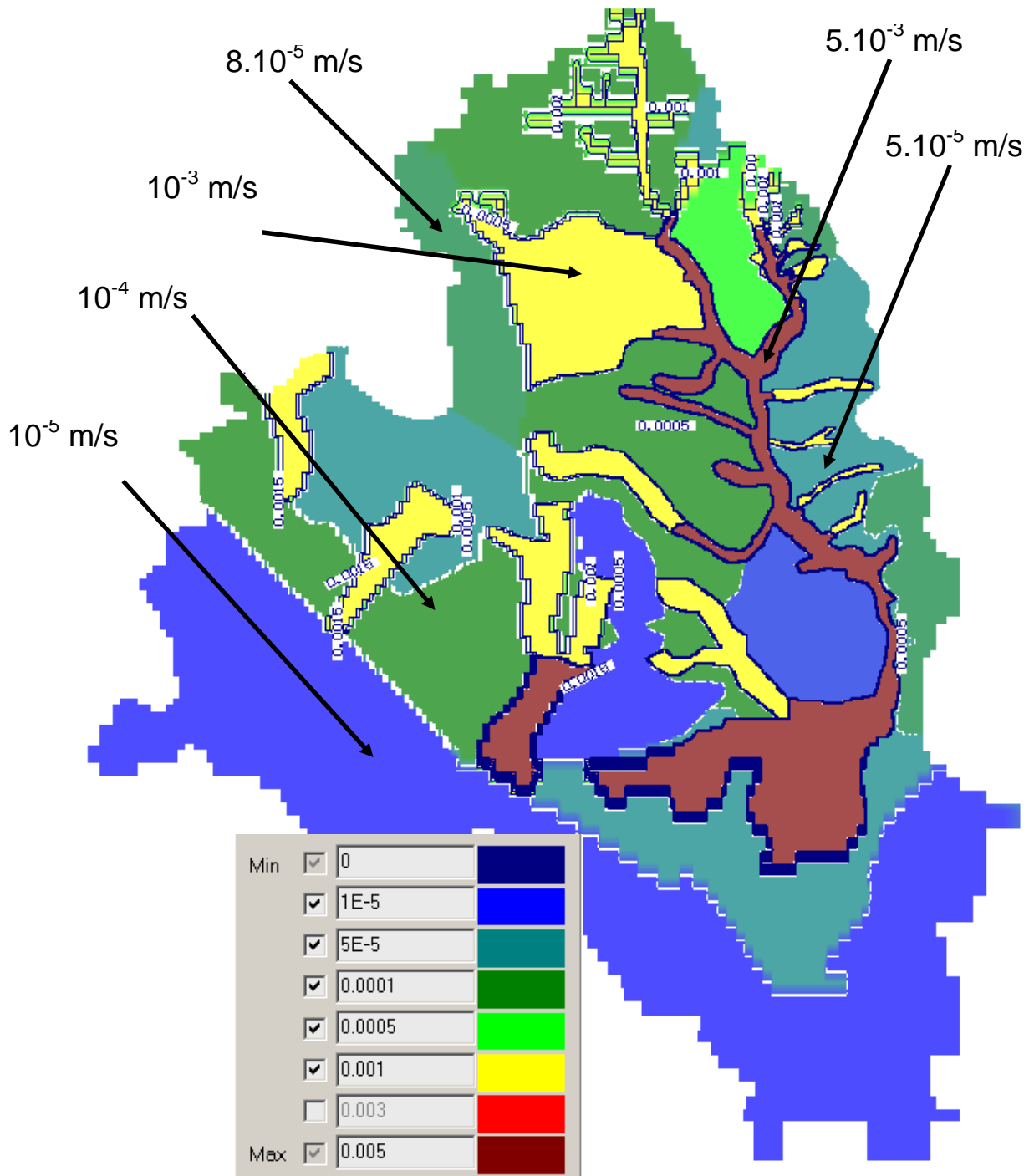
Une anisotropie<sup>5</sup> a été prise en compte pour la couche de la craie aquifère (couche 5 du modèle). Ainsi la perméabilité perpendiculaire à l'axe anticlinal est cinq fois plus forte que la perméabilité parallèle à l'axe de l'anticlinal. Cela traduit la présence d'une fissuration plus importante perpendiculaire à l'anticlinal.

La carte des perméabilités calées pour la couche crayeuse est présentée ci-dessous.

---

<sup>5</sup> Anisotropie : qualité d'un milieu dont les propriétés varient selon la direction, pour un sol, l'anisotropie se matérialise par des vitesses de circulation variables en fonction de la direction.

Figure 27 : Répartition des perméabilités retenues pour la craie.



Pour la craie inférieure (couche 6) la perméabilité retenue est de  $10^{-7}$  m/s.

Concernant les autres couches géologiques du modèle les perméabilités retenues sont les suivantes :

**Figure 28 : Perméabilités retenues pour les couches autres que la craie.**

Formation	Perméabilité en m/s
Alluvions modernes de l'Aronde	$1.10^{-5}$
Alluvions anciennes de l'Aronde	$4.10^{-4}$
Alluvions modernes de l'Oise	$4.10^{-5}$
Alluvions anciennes de l'Oise	$1.10^{-4}$
Sables de Bracheux	$2.10^{-5}$
Argiles Yprésiennes	$1.10^{-8}$

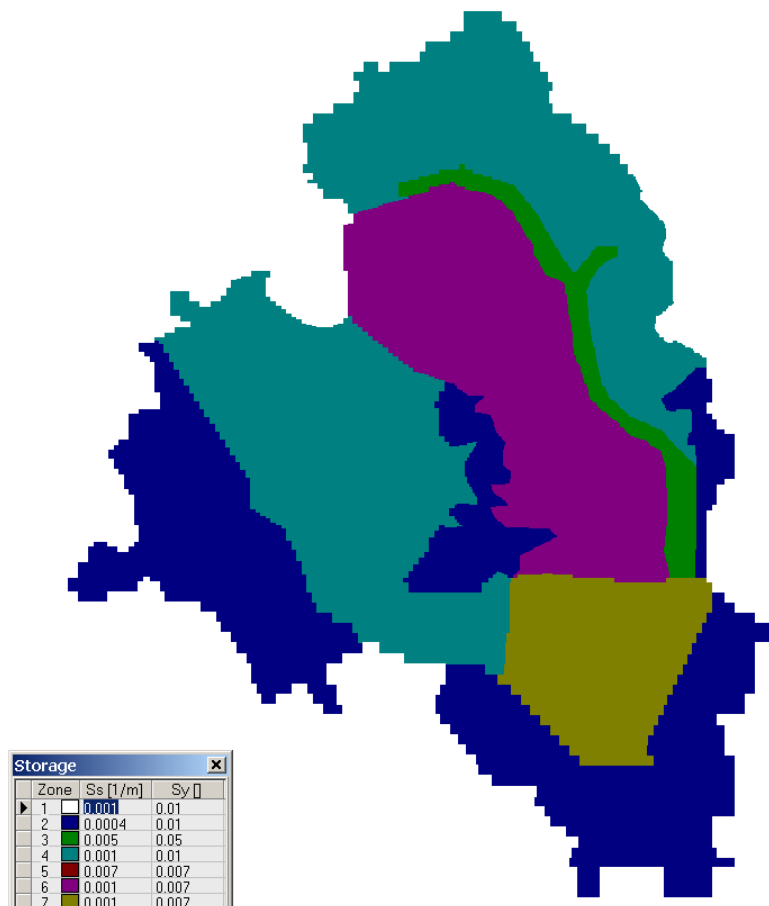
## 5.8 REPARTITION DES COEFFICIENTS D'EMMAGASINEMENT CALES

Le coefficient d'emmagasinement traduit l'effet capacitif de l'aquifère : il permet de représenter le stockage d'eau pendant les périodes de recharge de la nappe et la vidange lente de la nappe en étiage.

Le coefficient d'emmagasinement est rarement mesuré in-situ. Quelques valeurs sont disponibles dans la bibliographie, elles sont présentées dans le rapport de phase 1.

Le coefficient d'emmagasinement fait l'objet d'un calage, les valeurs retenues pour la nappe de la craie sont présentées sur la figure ci-dessous.

**Figure 29 : Répartition spatiale du coefficient d'emmagasinement.**



## 5.9 CALAGE DU MODELE

### 5.9.1 Calage de la piézométrie

Les variations piézométriques calculées par le modèle sont comparées à celles mesurées sur le terrain par les différents organismes (agence de l'eau, chambre d'agriculture, producteurs d'eau etc...).

Certains points d'observations sont perturbés par des prélèvements.

#### 5.9.1.1 Calage en régime permanent

Le régime permanent est un régime théorique pour lequel il n'existe aucune perturbation du système. Il peut être approché par une situation d'étiage, où l'on considère que le système est peu influencé par la pluviométrie. Dans le cas du bassin versant Oise Aronde, on a pu constater le rôle important que peuvent jouer les marais, notamment sur l'étiage de la nappe où ils peuvent contribuer à un soutien de l'étiage. L'observation d'un régime permanent est donc difficile sur ce bassin versant. Le calage en régime permanent a toutefois été réalisé sur la situation piézométrique de l'étiage 2005.

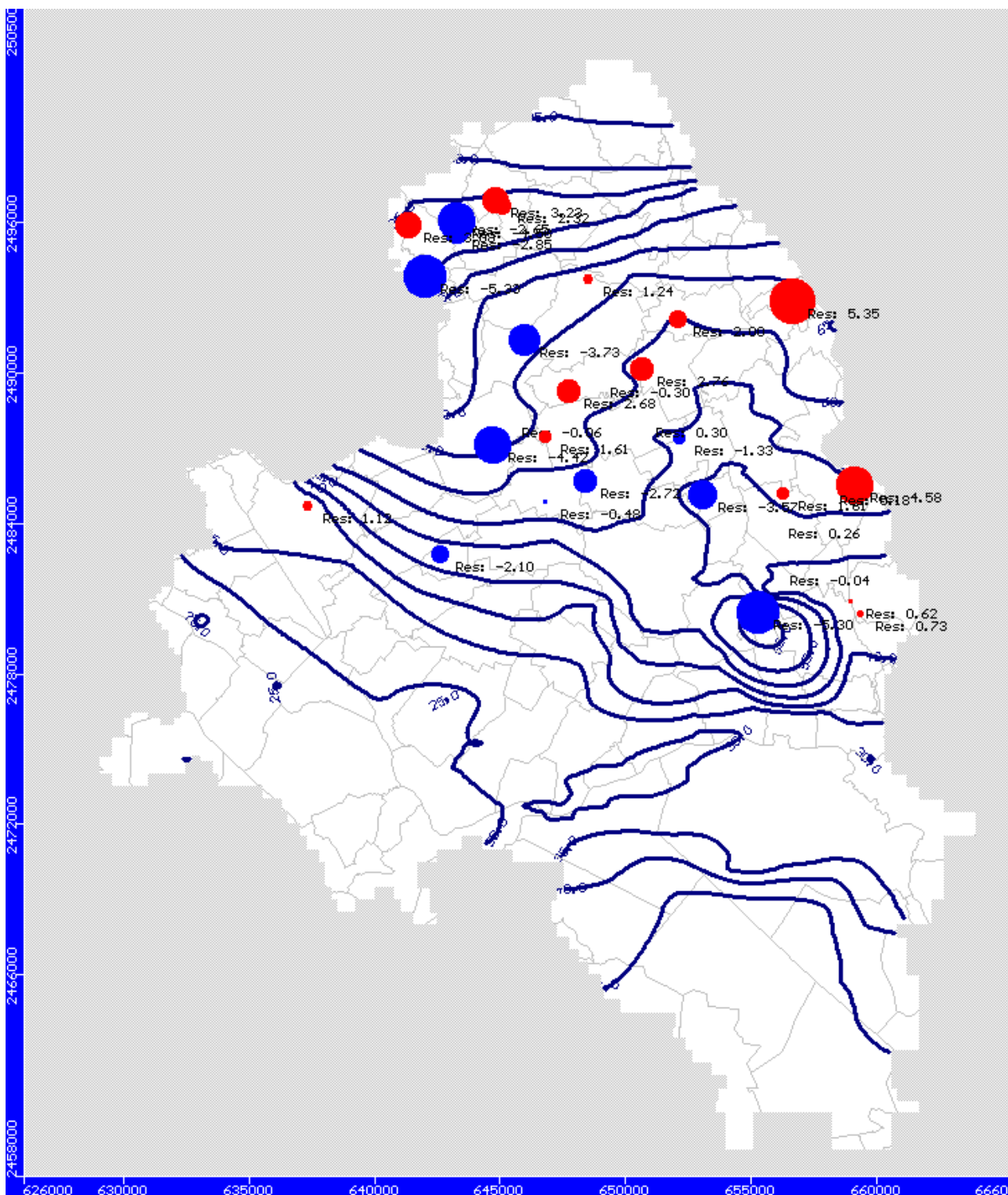
Le calage en régime permanent est apprécié par l'ajustement des cotes calculées aux cotes observées sur l'ensemble des points d'observation disponibles en 2005.

La carte de la figure suivante présente les résiduels de calcul sur les points d'observation retenus pour le calage du modèle. Les points représentés en rouge correspondent à un résiduel positif, les cotes calculées sont supérieures aux cotes observées tandis que les points bleus correspondent aux résiduels négatifs où les cotes calculées sont inférieures aux cotes observées. La taille des points est proportionnelle aux résiduels, ainsi, plus le point est petit, meilleur est le calage.

Il faut ajouter que les points de suivi ne sont pas tous réalisés à la même période car ils proviennent de sources différentes. De plus les cotes observées ne proviennent pas toujours de points qui ont été nivelés par un géomètre, les incertitudes sur ces points de mesure peuvent donc être de l'ordre du mètre en sommant l'ensemble de ces incertitudes.

Ainsi, le calage sur le régime permanent montre que la vallée de l'Aronde est calée en piézométrie à moins de 1 mètre sur la partie aval. Sur la partie amont du bassin de l'Aronde, on remarque que dans un même secteur les résiduels peuvent être positifs et négatifs, cela montre les incertitudes de mesure. Le dôme de Margny-les-Compiègne est calé à -5.6 m. Cependant le dôme est bien marqué avec un différentiel de l'ordre de 15 m entre le dôme et la vallée de l'Aronde. Améliorer le calage du dôme nous conduit à abaisser de façon trop importante la perméabilité de la craie. C'est pourquoi, nous préférons rester sur ce calage.

Figure 30 : Carte de calage du régime permanent





### 5.9.1.2 Calage en régime transitoire

Le calage en régime transitoire a été réalisé sur 3 volets simultanément :

- calage de la piézométrie en plan
- calage des variations piézométriques
- calage du débit de l'Aronde à Clairoux

#### ❖ Calage de la piézométrie en plan

L'objet de ce premier calage est de retrouver la forme de la carte piézométrique, c'est-à-dire de représenter correctement les dômes et les creux piézométriques.

Sur le sous bassin versant de l'Aronde, l'accent a été mis sur :

- la représentation de la crête piézométrique entre le sous bassin versant de l'Oise et celui de l'Aronde.
- la représentation du dôme piézométrique de Margny-les-Compiègne,
- le caractère drainant des rivières montré par les cartes piézométriques établies lors de la phase 1
- l'effet de plateau piézométrique orienté Ouest – Est de la plaine d'Estrées-Saint-Denis

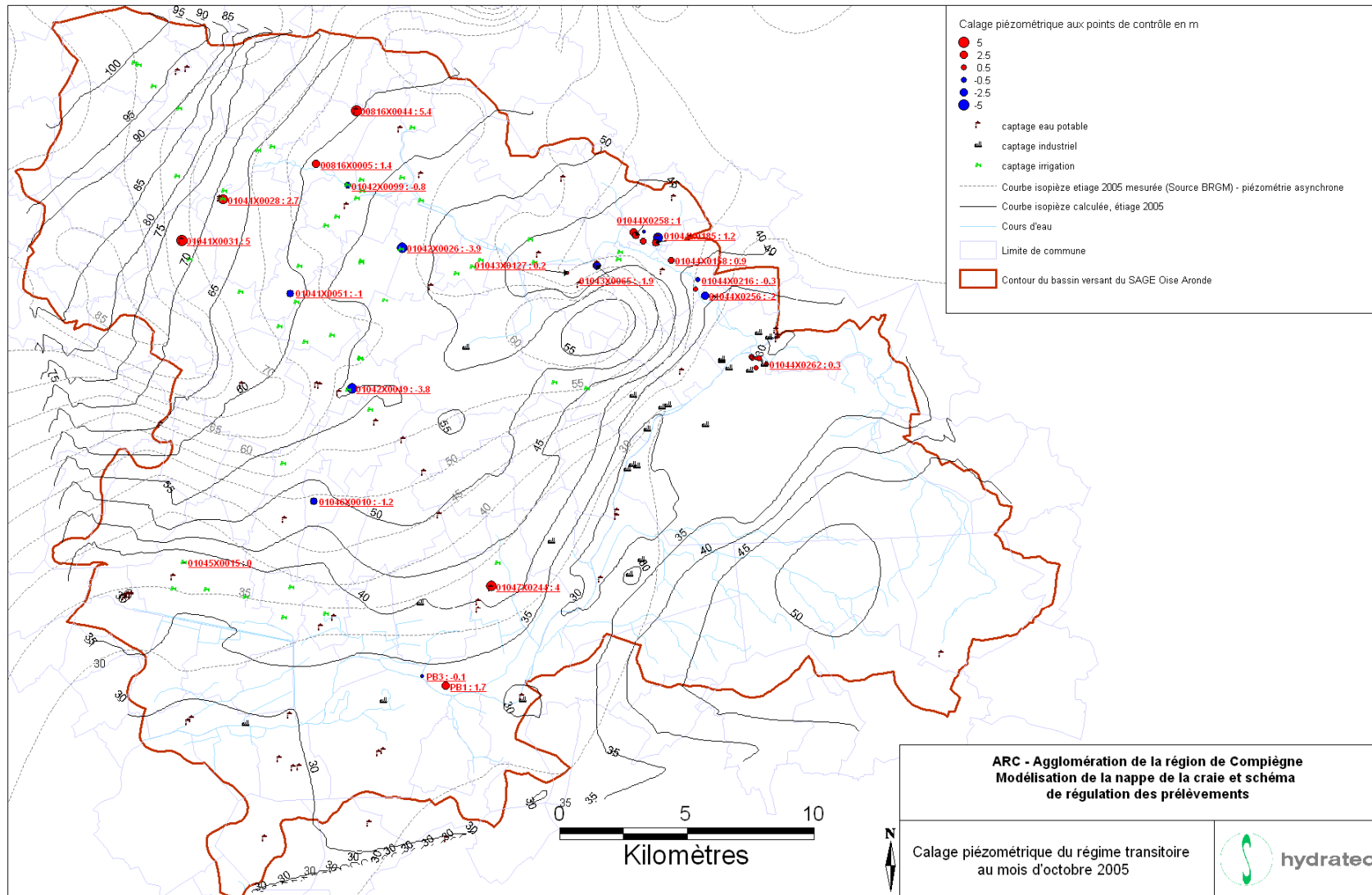
L'objet de l'étude est focalisé sur la gestion des étiages, ainsi, c'est sur le calage de la situation d'étiage que nous présentons les résultats. C'est le mois d'octobre 2005 qui est le mieux connu sur le sous bassin versant de l'Aronde grâce à la piézométrie réalisée par le BRGM entre le début du mois d'octobre et la mi-novembre 2005. La carte piézométrique réalisée par le BRGM est asynchrone, c'est-à-dire que toutes les mesures n'ont pas été réalisées le même jour, sur la même situation piézométrique. La durée de la campagne de mesure a été d'un mois et demi.

Ainsi, il s'agit de retrouver la situation de 2005 (également situation de calage du régime permanent) mais en régime transitoire, qui représente l'état antérieur de la nappe (années 1999 à 2005).

La carte de la figure suivante présente les courbes isopièzes (courbes d'égale cote piézométrique de la nappe) calculées par le modèle hydrogéologique (trait plein) et tracées par interpolation entre les points de mesure du BRGM (trait pointillé). Les points de contrôle utilisés pour le calage du régime transitoire sont également figurés en fonction de la valeur calculée entre la cote piézométrique calculée et la cote piézométrique mesurée. Les points où la cote piézométrique calculée est supérieure à celle mesurée sont présentés en rouge, et les points où la piézométrie calculée est inférieure à celle mesurée sont en bleu. Les points de captage en eau souterraine sont également représentés pour mémoire.

La carte est présentée sur la Figure 31 suivante.

Figure 31 : Calage piézométrique en plan du régime transitoire – situation de l'été 2005



Dans la vallée de l'Aronde, la situation piézométrique sur la partie aval, de Coudun à Clairoix, est bien reproduite. Par contre, de Moyenneville à Baugy, une incertitude de l'ordre de 5 m est calculée. La piézométrie observée intègre peu de points dans la vallée de l'Aronde, les piézomètres d'observation sont situés plutôt sur les coteaux, les cotes de l'Aronde n'ont pas été intégrées au calcul de la piézométrie d'étiage du BRGM. Les cotes de l'Aronde sont par contre introduites dans le modèle de calcul à 2.5 m près environ, puisque les cotes sont calculées à partir de la carte IGN au 1/25 000.

Sur le secteur amont de l'Aronde, la partie Nord Ouest du bassin versant Oise Aronde, souffre de lacunes d'informations pour la situation d'étiage 2005. Il est difficile de valider le calage sur ce secteur. Le modèle calcule une forte pente piézométrique et un dôme sur la pointe Nord Ouest du BV. En reprenant les cartes piézométriques établies au chapitre 3 du rapport de phase 1, on remarque qu'en 2001, sur la situation de hautes eaux piézométriques, la carte dessinée montre la présence d'un dôme piézométrique sur cette pointe Nord Ouest du bassin.

Le secteur de Cernoy, Lieuvilliers présente un dôme piézométrique sur la situation de 2005 qui permet de tracer le bassin versant hydrogéologique de l'Aronde. Ce dôme n'a pas pu être représenté par le modèle du fait des effets de bord (erreurs de calcul au droit des limites du modèle, induit par les conditions aux limites introduites).

Le plateau piézométrique de la Plaine d'Estrées est bien représenté, avec toutefois des incertitudes d'interpolation. Il n'existe pas de point de calage entre le piézomètre d'Estrées Saint Denis (intégré au réseau du SIEE) et le point de mesure situé sur le dôme de Margny. Ces deux points ont été mesurés à respectivement 58.8 m et 64.6 m, la pente piézométrique entre ces deux points n'est pas connue.

Le dôme de Margny-les-Compiègne est bien représenté par le modèle. La différence entre la cote calculée et la cote observée est d'environ 5m. Cependant nous ne disposons que d'une seule valeur sur le dôme piézométrique, la valeur de calage n'est donc pas exacte et la représentation des courbes isopièzes de la situation observée inclut également des incertitudes.

En rive gauche de l'Oise, sur la forêt de Compiègne, il n'y a pas de point de calage sur la situation de 2005. Les mesures réalisées en 2009 ont montré que sur la maison forestière de la Forte Haie, la cote piézométrique est comprise entre 34.5 m et 37 m. Le modèle calcule une cote comprise entre 30 m et 35 m. Les cotes des différents cours d'eau en relation avec la nappe sont introduites à partir des levés topographiques sur l'Aisne et l'Oise (précision 10 cm) et des cotes de la carte IGN pour les autres cours d'eau (précision 2.5 m).

En rive droite de l'Oise, il existe peu de points de calage hormis les piézomètres du SIEE de Blincourt et de Sacy-le-Grand. Ainsi, le tracé des courbes isopièzes observées n'est pas validé sur le secteur compris entre le dôme de Margny-les-Compiègne et Blincourt. Sur le secteur de Sacy-le-Grand, le piézomètre de Sacy-le-Grand est parfaitement calé tandis que celui de Blincourt est calé à -1.2 m près.

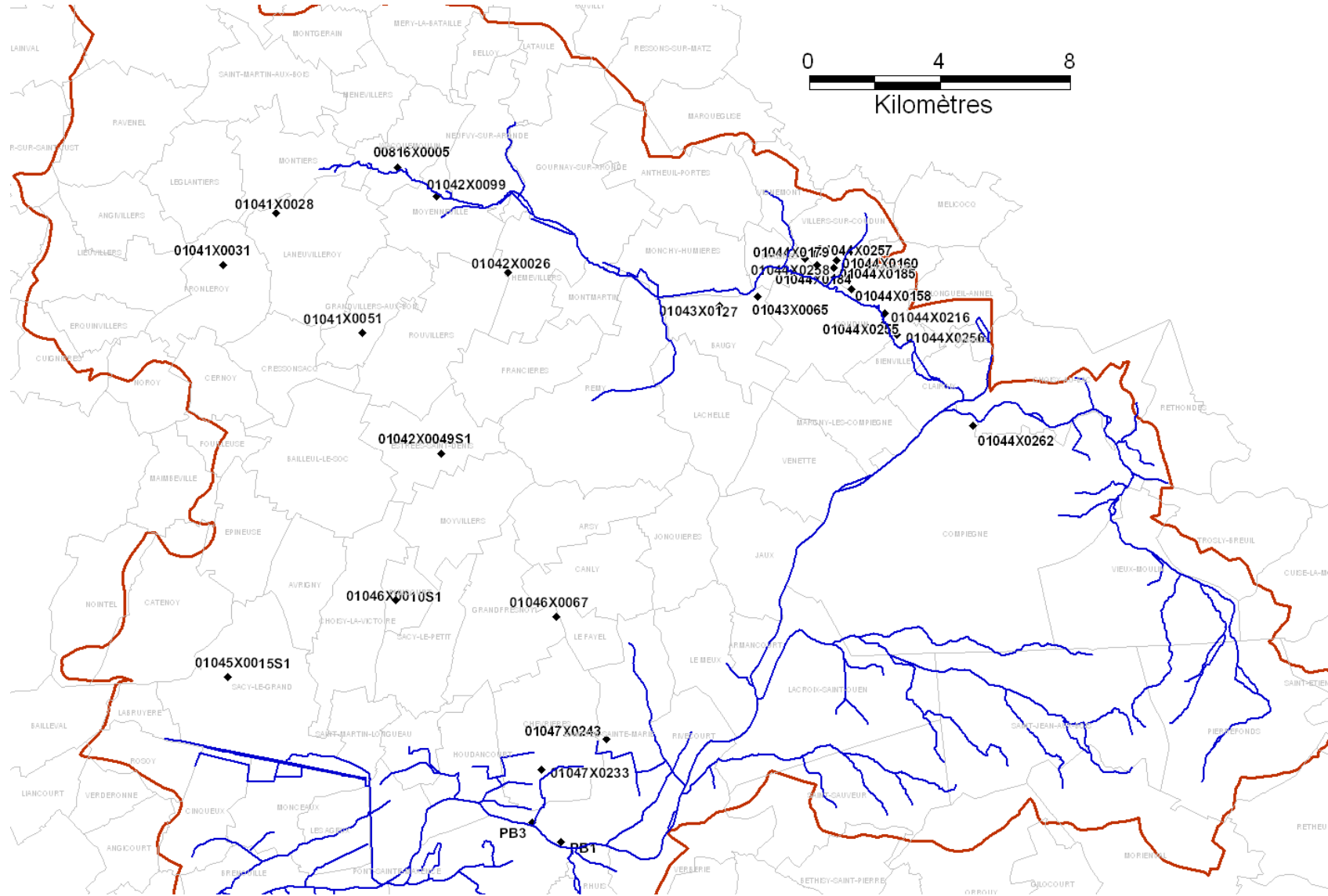
## ❖ Variations piézométriques

Dans un second temps, le calage en régime transitoire est apprécié sur la comparaison des variations entre le calcul et les observations de la cote piézométrique en fonction du temps. Cet aspect est très important puisqu'il représente les phénomènes de remplissage et de vidange de la nappe de la craie. Bien que les hautes eaux ne concernent pas directement cette étude, il est important de représenter même grossièrement ces phénomènes de recharge puisqu'ils déterminent les écoulements de l'étiage, puisque la nappe de la craie agit alors comme un château d'eau qui se vidangerait à un débit inférieur à son débit de remplissage pendant les périodes déficitaires en pluie efficace et sur plusieurs années.

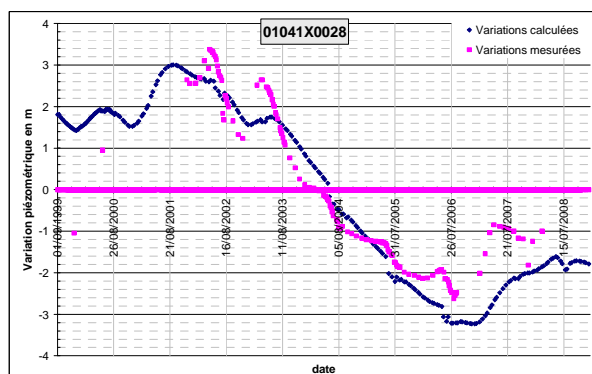
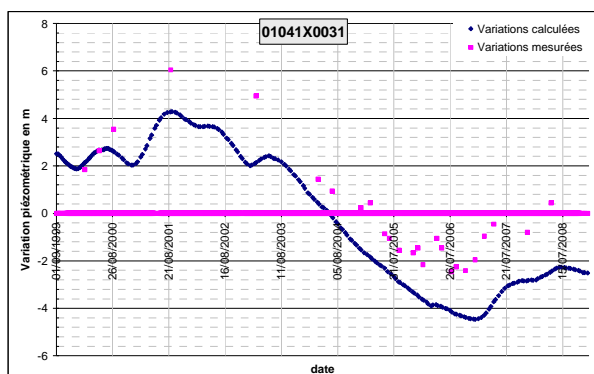
Les graphiques commentés ci-dessous représentent, pour l'ensemble des points de suivi, les variations piézométriques calculées et mesurées, entre la cote piézométrique à une date  $t$  et la cote moyenne calculée sur l'ensemble de la période de mesure. Ils sont regroupés par secteur géographique. La carte de la Figure 32 montre l'emplacement des points de contrôle.

Sur ces graphiques, c'est l'allure de la courbe de remplissage et de vidange qui doit concorder, c'est-à-dire les pentes des courbes représentées.

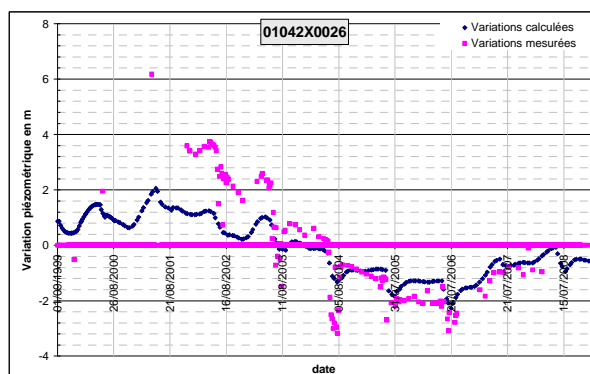
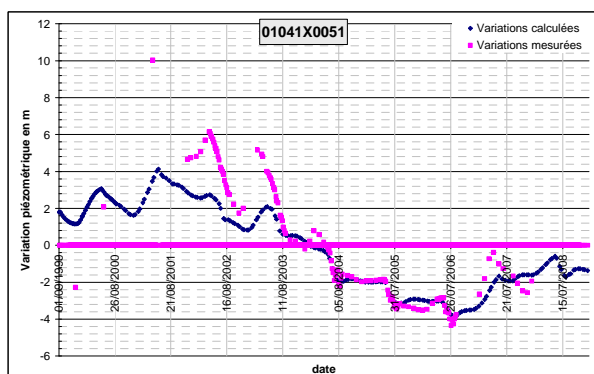
Figure 32 : Localisation des points de calage



■ Haut bassin de l'Aronde



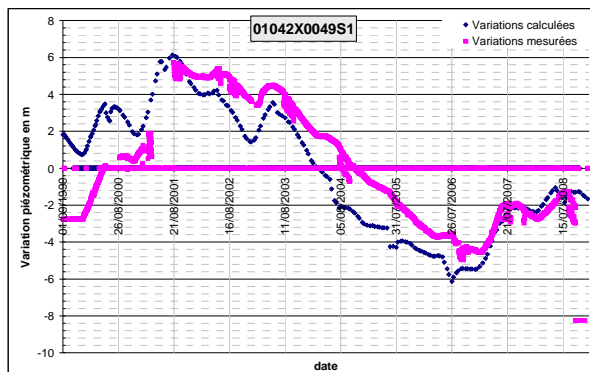
Les points d'observations notés 01041X0031 et 01041X0028 sont situés sur la commune de Laneuvilleroy et de Pronleroy en amont des sources de l'Aronde, ils sont suivis par la chambre d'agriculture de l'Oise. Le premier point d'observation est situé à proximité d'un captage en eau potable, tandis que le second est sur un ouvrage de prélèvement agricole. Le second peut donc être influencé en période d'irrigation. Les valeurs mesurées alors sont plus faibles que les variations naturelles. Les variations au cours du temps sont bien représentées sur ce secteur. On note cependant des différences de l'ordre de 50 cm à 2 m sur les hautes eaux de 2000-2001 et sur l'étiage de 2006. Sur le 2<sup>ème</sup> point, les périodes de forte vidange induites certainement par les pompages ne sont pas représentées. La décroissance piézométrique calculée est plutôt régulière alors que celle observée est décomposée en une forte décroissance, puis un palier. Il en est de même pour le remplissage, il est plus bref sur les chroniques observées que sur le calcul.



Le point numéroté 01041X0051 est situé à Grandvilliers-aux-Bois et est suivi mensuellement par la chambre d'agriculture de l'Oise. Les variations piézométriques sont bien représentées, notamment à l'étiage. Par contre le calcul des hautes eaux n'est pas aussi bien représenté. Les mesures montrent une influence par un ouvrage de captage des eaux souterraines situé sur la commune de Rouvilliers. Celle-ci est bien représentée puisque le palier qui succède à la période de prélèvement en 2004 et 2005 se retrouve dans les calculs.

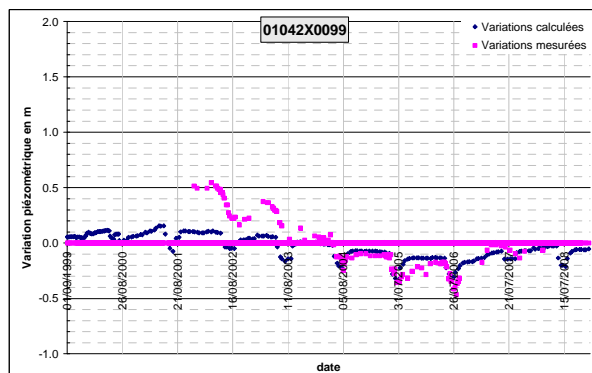
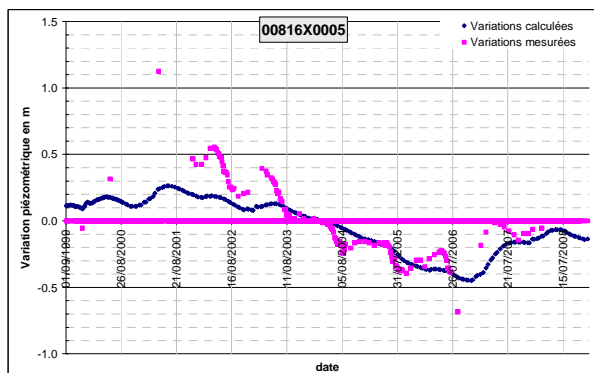
Le point noté 01042X0026 est localisé sur la commune de Hémevilliers et est suivi mensuellement par la chambre d'agriculture. Il est influencé par le pompage de la ferme. Les variations piézométriques induites par les pompages sont bien représentées étant donné que le modèle ne calcule pas les pertes de charges quadratiques dans le puits.

Il est donc normal que les variations mesurées soient plus faibles que celles calculées. Les hautes eaux ne sont pas bien représentées, il manque 2 mètres aux situations de 2000 – 2001. Cela est certainement lié au fait que le modèle ne représente pas le dôme piézométrique de Cernoy – Lieuvilliers. Malgré ce défaut, le modèle reproduit bien le fonctionnement de l'étiage.



Le point de suivi noté 01041X0049 est un piézomètre situé à Estrées Saint Denis et appartenant au réseau patrimonial de suivi des niveaux piézométriques. Il est suivi en continu. Il est influencé par la présence de 2 captages d'irrigation et un captage d'eau potable à proximité. Par ailleurs, tout ce secteur est largement exploité par des prélèvements en eau souterraine variés, irrigant vers le Nord et eau potable vers le sud. La décroissance des niveaux piézométriques calculés par le modèle est plus importante que celle qui a été mesurée. Par ailleurs, l'étiage 2006 est plus bas que la cote mesurée. On note un décalage temporel de l'ordre de 2 mois pendant les périodes de pompage. Par contre l'impact des pompages qui sont réalisés à proximité de l'ouvrage observé et non dans le piézomètre ont la bonne amplitude de variation. Par ailleurs, le modèle calcule des impacts d'un pompage en 2004 qui n'ont pas été mesurés. Les calculs sont dépendants des données de prélèvement introduites dans le modèle qui proviennent soit de mesures mensuelles réalisées par les irrigants et les producteurs d'eau potable, soit d'estimations des volumes mensuels à partir des données annuelles disponibles.

▪ Haute Vallée de l'Aronde

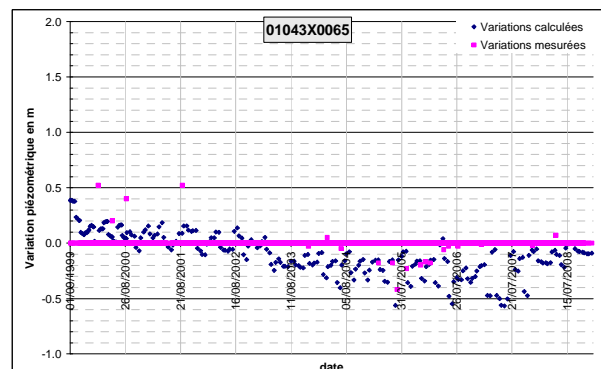
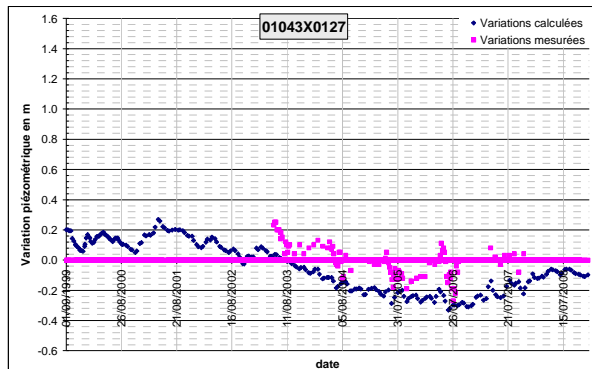


Les puits référencés 00816X0005 et 01042X0099 sont suivis mensuellement par la chambre d'agriculture depuis 2001. Le puits le plus en amont, localisé sur la commune de Wacquemoulin est proche de l'Aronde.

Les variations calculées sont plus faibles que celles mesurées. Le modèle ne représente pas les hautes eaux de 2000 et 2001, cela peut s'expliquer facilement puisqu'en l'absence de données sur les variations de la ligne d'eau de l'Aronde, elle a été considérée constante dans les calculs ce qui peut contribuer à l'atténuation des variations piézométriques. L'hiver 2001 a notamment été un hiver de très hautes eaux piézométriques avec des niveaux d'eau dans les cours d'eau élevés.

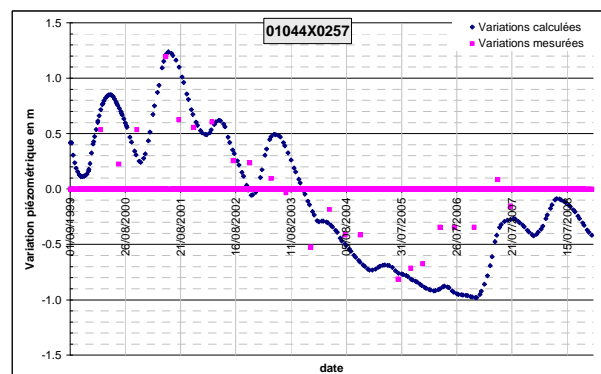
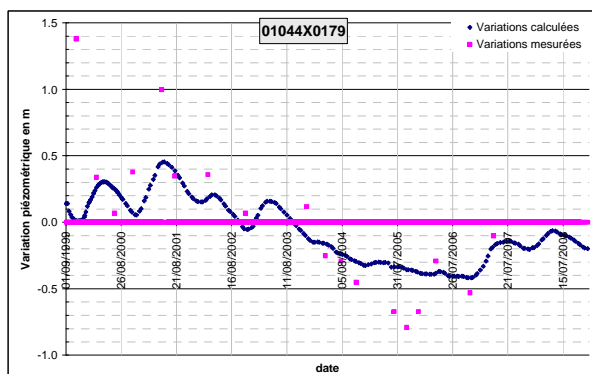
Le puits 1042X0099 est situé sur la commune de Moyenneville, en rive droite de l'Aronde. C'est un forage agricole. Les pompages se font ressentir sur les calculs puisque ce point de mesure est situé sur un forage d'irrigation. Comme sur le point précédent, les hautes eaux sont mal représentées mais les variations entre la valeur moyenne et l'étiage sont correctes.

▪ Aval de la vallée de l'Aronde

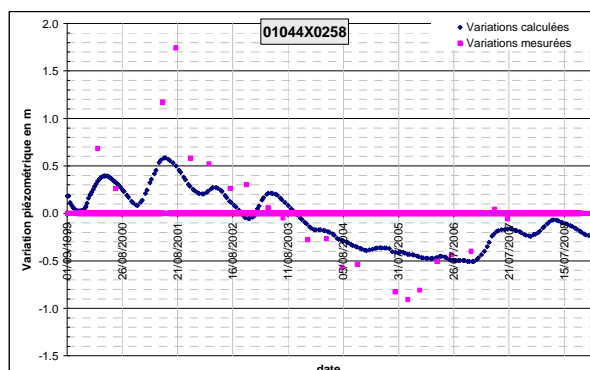
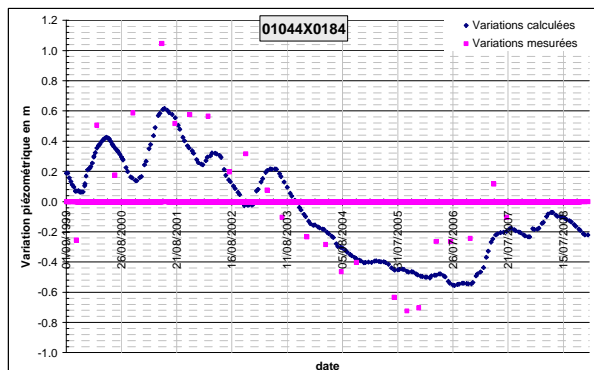


Le puits référencé 01043X0127 est suivi mensuellement par la chambre d'agriculture de l'Oise. Il est localisé à Baugy. Les hautes eaux de 2001 n'ont pas fait l'objet de mesures piézométriques. Ce point de mesures montre une variabilité piézométrique saisonnière de l'ordre de 20 cm alors que les calculs montrent une décroissance piézométrique interannuelle. Les hautes eaux annuelles de l'ordre de 20 cm ne sont pas simulées. En effet, le modèle n'intègre pas les variations de hauteur d'eau de l'Aronde qui sont de cet ordre de grandeur.

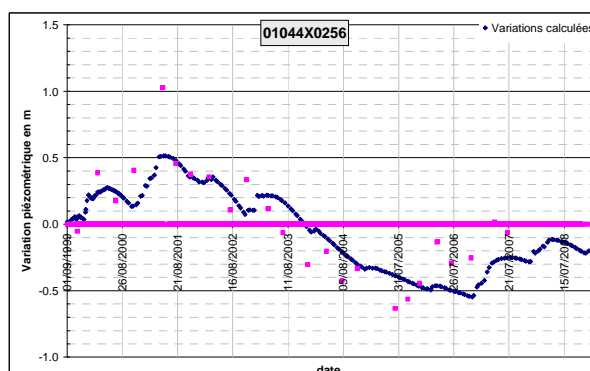
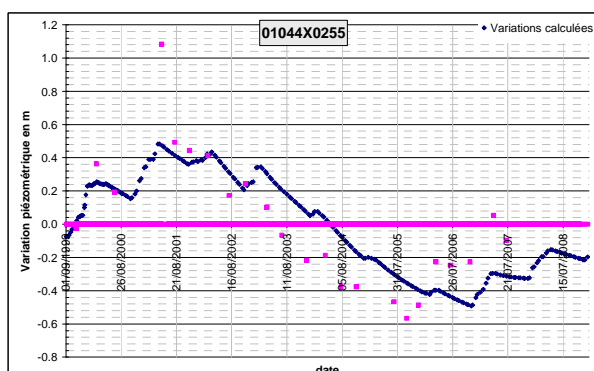
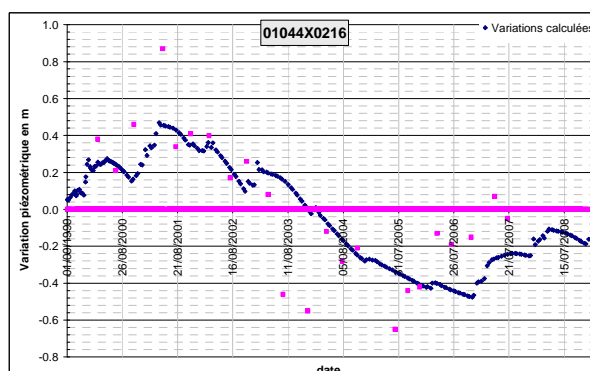
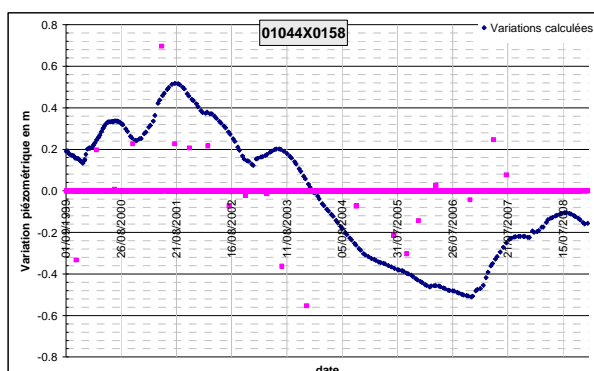
L'ouvrage 01043X0065 est situé sur le champ captant de Baugy de la ville de Compiègne. Cet ouvrage est influencé par le captage de Baugy. La faible fréquence des mesures ne permet pas de valider le calage de ce point.





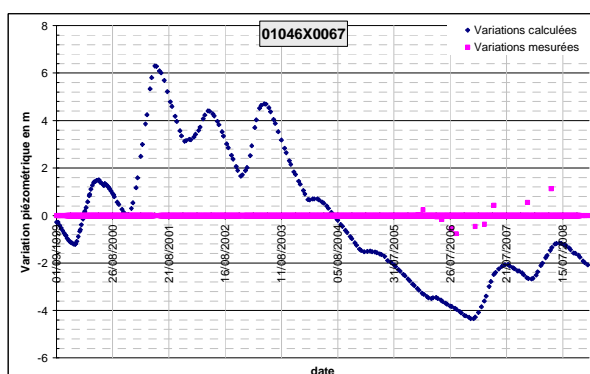
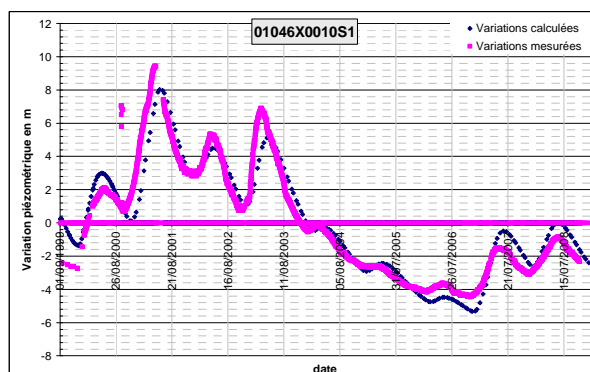
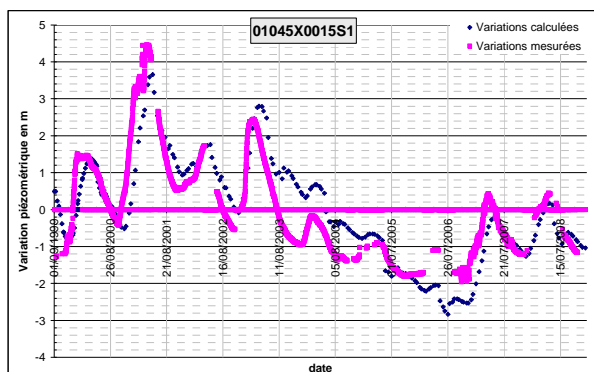


Ces mesures piézométriques sont réalisées sur les piézomètres de suivi de la pollution du site de Méta-Méca. Ces données ont été collectées auprès de la DRIRE Picardie. Ils sont tous situés en rive gauche de l'Aronde sur les communes de Villiers-sur-Coudun et Coudun. Ces points sont assez proches les uns des autres. Les variations piézométriques calculées sont dans l'ensemble bien représentées. Les hautes eaux de 2000 – 2001 sont toutefois trop faibles, mais les variations de l'étiage sont validées.



Les graphiques précédents correspondent à des points d'observation situés sur la commune de Coudun, à l'aval du village, excepté le 01044X0158 qui est situé en bord du marais à l'amont du village. Les variations piézométriques sont globalement validées étant donnée la faible fréquence des mesures.

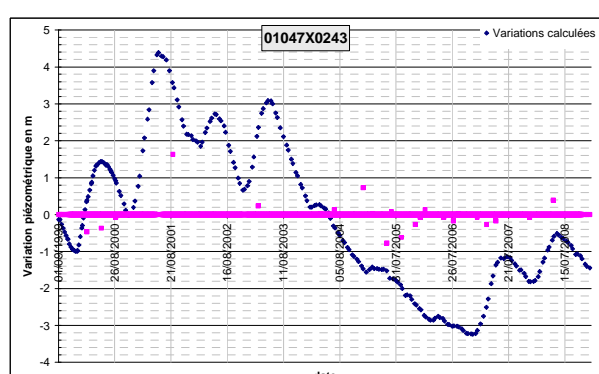
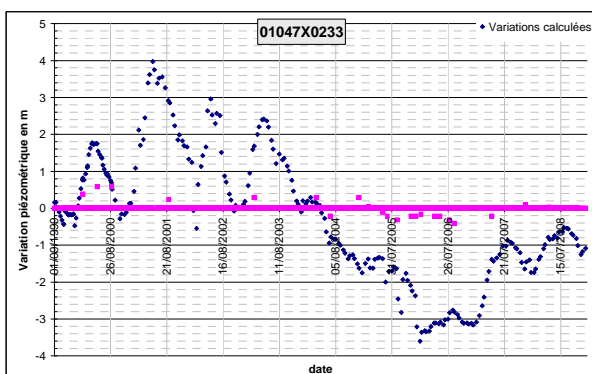
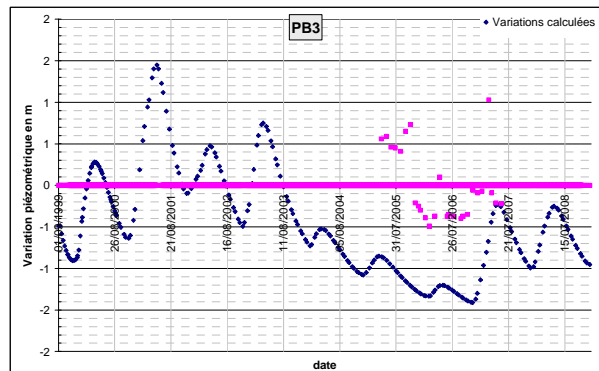
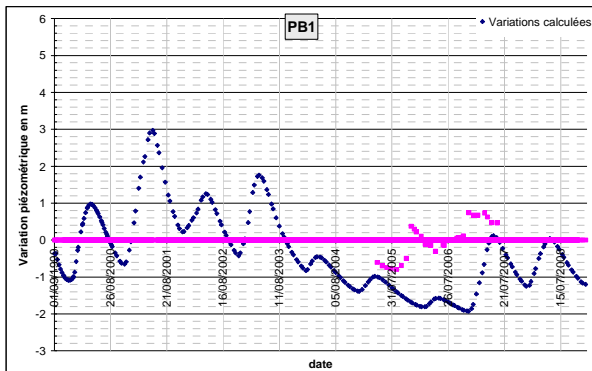
■ Vallée de l'Oise – coteaux



Les piézomètres 01045X0015 et 01046X0010 sont intégrés au réseau patrimonial d'observation des niveaux piézométriques et bénéficient d'un suivi en continu des niveaux d'eau. Le premier est situé sur la commune de Sacy-le-Grand tandis que le second se trouve sur le territoire de Blincourt. Les calculs permettent de reproduire les variations que ce soit en cote, en amplitude ou en temps. Les périodes de vidange et de remplissage de la nappe sont parfaitement bien représentées, avec des variations piézométriques de l'ordre de 6 m à 14 m. Les périodes de remplissage accusent parfois un retard de l'ordre de 20 jours, soit 2 pas de temps de calcul. Cet écart peut être dû à la représentation des phénomènes par décades ou à l'approximation des débits de prélèvement par décade.

Le point de suivi référencé 01046X0067 est situé sur la commune de Grandfresnoy, sur le forage AEP et est suivi par la SAUR. Le niveau mesuré est un niveau dit statique dans les données mais que l'on peut remettre en doute. Il n'y a qu'une dizaine de mesures, les variations autour de la moyenne ne sont donc pas représentatives.

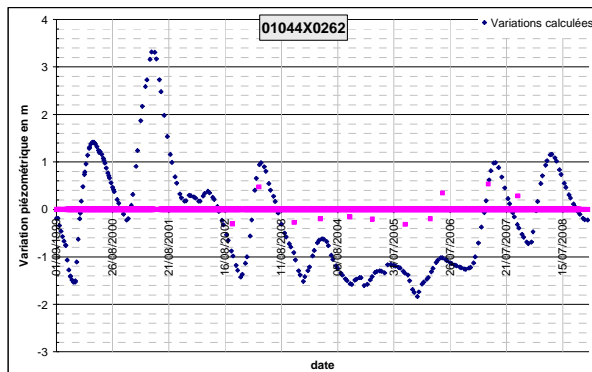
- Vallée alluviale de l'Oise



Les points d'observation de la vallée alluviale de l'Oise proviennent des sites d'exploitation de granulats de Chevrières et de Ribécourt. Ils sont implantés sur les sites en exploitation avec rabattement partiel et temporaire de la nappe et les mesures sont imposées par les arrêtés préfectoraux pendant les périodes d'exploitation. Les mesures peuvent donc être influencées par les rabattements de nappe, et elles concernent la nappe alluviale de l'Oise. En particulier, sur PB1, les premières mesures de 2005 semblent être influencées par un pompage non représenté dans le modèle de nappe puisque la hausse des niveaux piézométriques en 2006 est très marquée et soudaine et correspond à une période d'étiage général de la nappe. PB3 semble quand à lui plutôt marqué par un pompage en 2006 et 2007, ce qui correspondrait à un déplacement du site d'exploitation.

Les deux forages référencés 01047X0233 et 01047X0243 correspondent à des captages d'eau potable sur Longueil-Sainte-Marie. Les niveaux mesurés sont dits statiques. Les variations piézométriques mesurées sont faibles, elles ne sont certainement pas représentatives de la réalité, les mesures étant trop espacées dans le temps, elles n'ont certainement pas mesurés les extrêmes.

▪ Vallée de l'Aisne



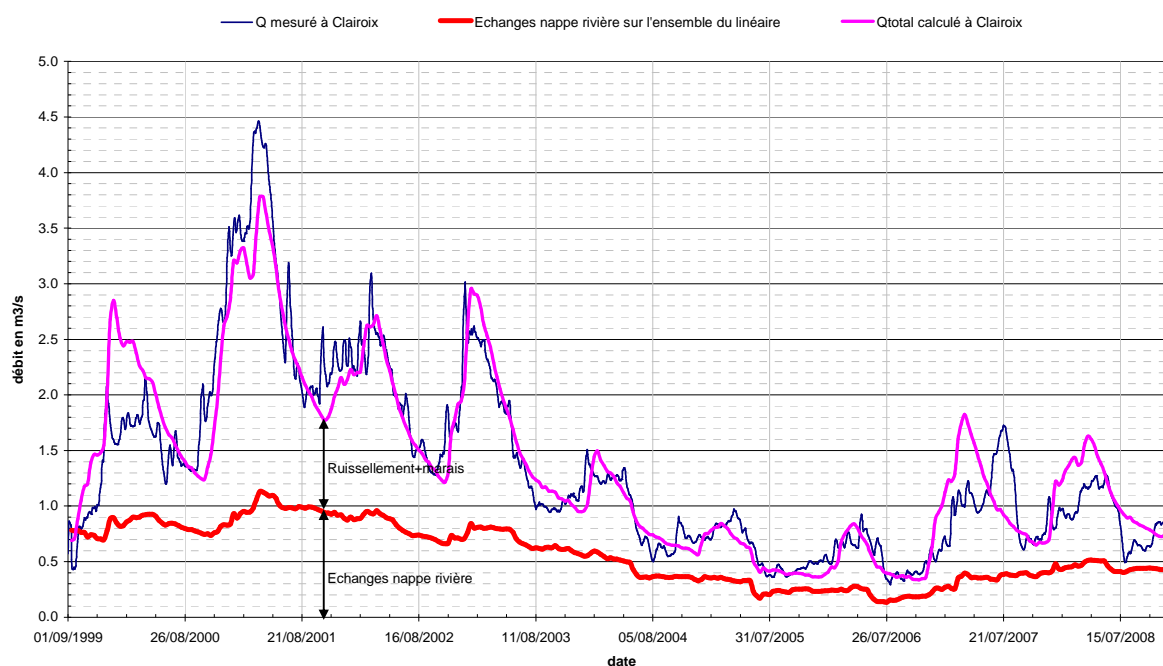
Les points d'observation de la vallée alluviale de l'Aisne proviennent des forages d'eau potable de Lyonnaise des Eaux. Ce sont donc des niveaux statiques. Dans la vallée, les niveaux statiques s'établissent certainement très rapidement avec l'Aisne. Le calage est alors correct étant donnée la fréquence des mesures disponibles.

## 5.9.2 Calage des échanges nappe rivière

### 5.9.2.1 Vallée de l'Aronde aval

Le graphique du calage du débit de l'Aronde à Clairoux présente le **débit mesuré** à la station de Clairoux (en bleu), le **débit d'alimentation de l'Aronde par la nappe** (en rouge) et le **débit calculé de l'Aronde** à Clairoux en rose (somme du débit ruisselé calculé par hydra-BV et du débit d'alimentation de l'Aronde par la nappe).

Figure 33 : calage du débit de l'Aronde à Clairoux



Le débit de drainage de la nappe par la rivière oscille entre 0.1 et 1 m<sup>3</sup>/s sur la période 1999-2008 d'après les calculs.

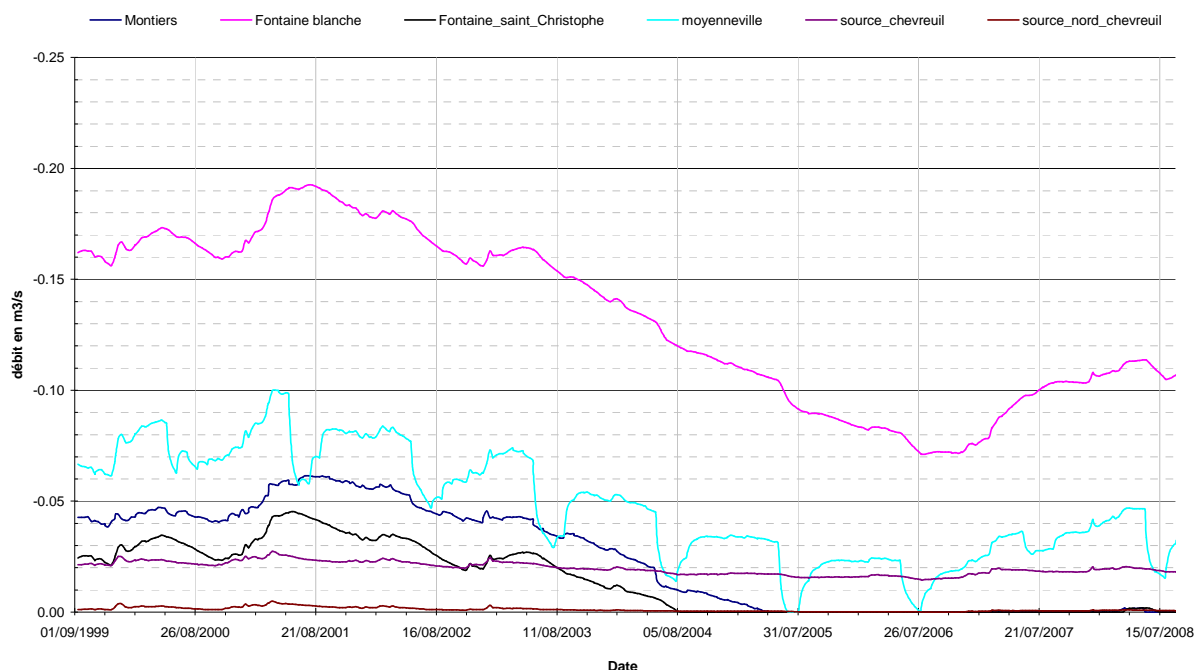
### 5.9.2.2 Débit des sources de l'Aronde

Les sources sont représentées par des cellules drain calées à des cotes nivelées par géomètre. Les débits restitués à la rivière à partir des sources sont présentés sur le graphique ci-après.

Ainsi d'après le modèle, la source de Montiers se tarit à partir du 31/07/2005. La source de la Fontaine Blanche est la plus productive avec une pointe en 2001 à 190 l/s. Elle ne se tarit pas dans le modèle et en 2005 elle continue à fournir 70l/s. Ce débit n'a pas été mesuré par l'ONEMA, au contraire en 2005, au pont de Wacquemoulin, les agents de l'ONEMA ont constaté un assec, le débit drainé de la source blanche a pu se réinfiltrer avant d'atteindre l'Aronde.

La cressonnière de Moyenneville peut fournir d'après les calculs jusqu'à 100 l/s. Elle est influencée par les prélèvements à proximité. D'après les calculs, elle aurait subi de courtes périodes de tarissement dû aux prélèvements à l'étiage 2005 et 2006. La source à l'aval du pont de la RN17 à Gournay sur Aronde est constante d'après les calculs. Ce secteur est moins sensible aux variations de l'étiage.

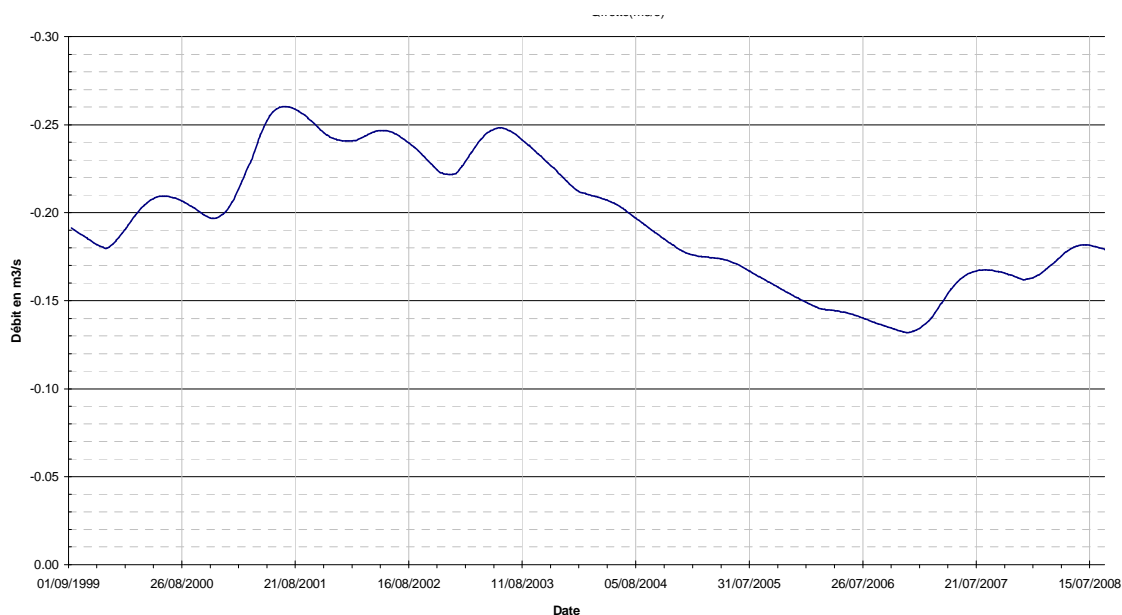
**Figure 34 : débit calculé des sources de l'Aronde**



### 5.9.2.3 Marais de Sacy

Dans le modèle d'hydratec la Frette est représentée comme une cellule « **drain** ». Les débits drainés cumulés en sortie du marais sont présentés sur le graphique ci-dessous. Ils varient entre 250 l/s et 130 l/s en fonction de l'état de la nappe de la craie. En l'absence de données de calage sur la période simulée, ces débits semblent cohérents avec les mesures réalisées en 1998 – 1999 sur cette rivière.

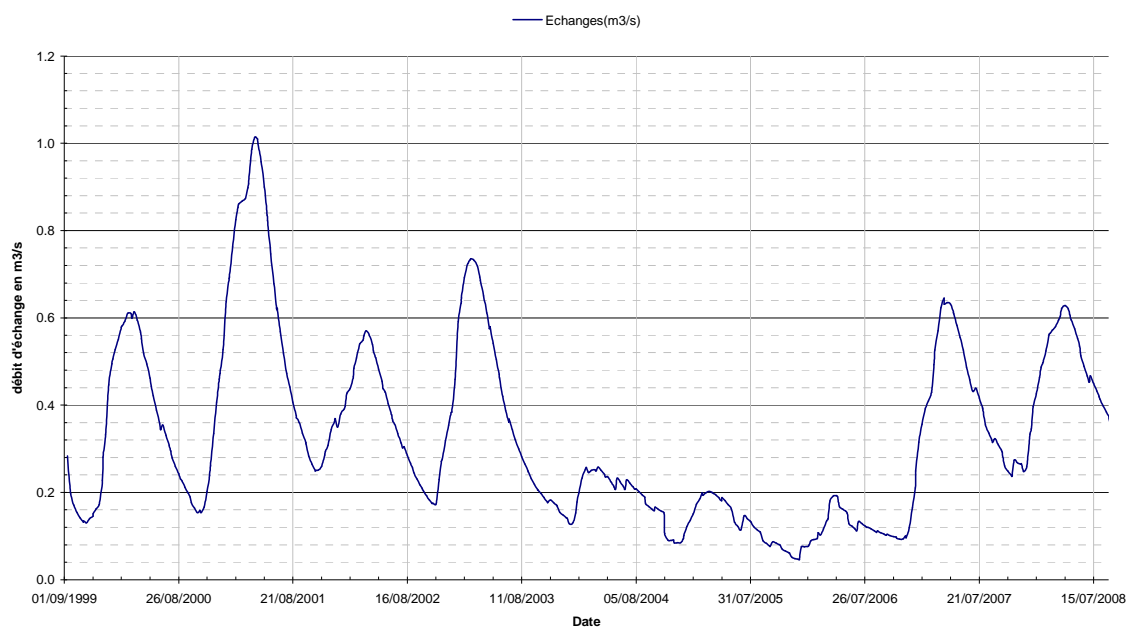
**Figure 35 : Débit calculé des échanges entre la Frette et la nappe alluviale**



#### 5.9.2.4 Vallée de l'Oise

Les débits d'échange calculés entre l'Oise et sa nappe d'accompagnement sont faibles. L'Oise alimente la nappe alluviale sur son cours de l'ordre de 1 m<sup>3</sup>/s maximum.

**Figure 36 : Débit calculé des échanges de l'Oise avec la nappe alluviale**



### 5.9.2.5 Analyse spatiale des échanges entre la nappe et les rivières

Les cartes du chapitre 7.4 en fin de ce rapport montrent le sens des échanges pour trois périodes caractéristiques :

- août 2000
- mai 2001 (hautes eaux exceptionnelles)
- août 2006 (étiage sévère)

Ces cartes montrent que la nappe est principalement drainée sur l'ensemble du linéaire de l'Oise. On note toutefois la modification du sens des échanges entre août 2000 – mai 2001 et août 2006 au niveau de Margny-les Compiègne et Venette, l'Oise alimente alors la nappe alluviale.

Sur l'Aronde, les tronçons qui traversent les communes de Wacquemoulin, Moyenneville, Neufvy-sur-Aronde, Braisnes et Coudun drainent la nappe de la craie. D'autres tronçons comme Baugy et l'amont de Braisnes alimentent constamment la nappe de la craie.

Au mois d'août 2006, les tronçons de Montmartin et de Coudun deviennent alimentant. Les échanges entre la nappe et le cours d'eau s'inversent ce qui se traduit par une baisse du débit de l'Aronde.

En 2001, le linéaire calculé de tronçons alimentant la nappe de la craie est de 5.7 km environ, tandis qu'il est de 8.4 km en août 2006.

## 5.10 ANALYSE DE SENSIBILITE DU MODELE HYDROGEOLOGIQUE

### 5.10.1.1 Sensibilité du modèle à la perméabilité

La perméabilité est calée pour obtenir la meilleure adéquation entre les cotes et débits observés et calculés. Le calage a alors été réalisé à  $0.5 \cdot 10^n$  près, ainsi pour les classes de perméabilité de la craie aquifère, les valeurs suivantes ont été testées par classe de perméabilité :

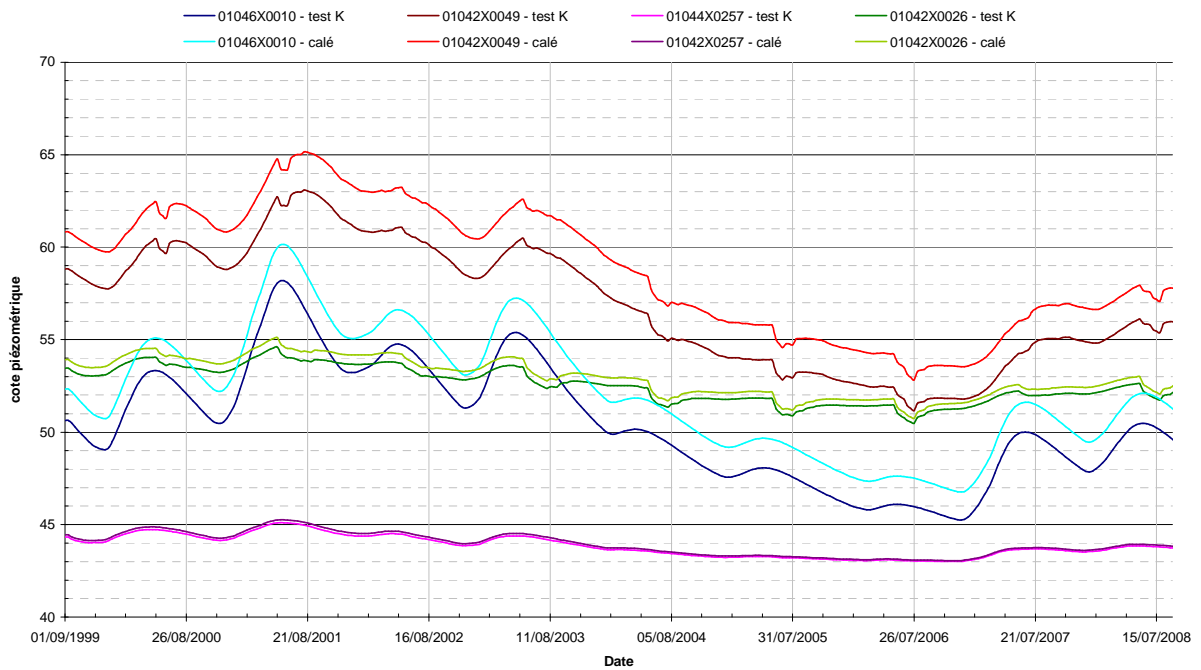
**Figure 37 : sensibilité de la perméabilité testée**

Perméabilité moyenne en m/s	Test de sensibilité : perméabilité testée en m/s
$1 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$
$5 \cdot 10^{-3}$	$5.5 \cdot 10^{-3}$
$1 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$
$5 \cdot 10^{-5}$	$5.5 \cdot 10^{-5}$
$1 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$

Les résultats sont présentés sur les graphiques ci-après en cotes piézométriques et en débit d'échange calculé entre l'Aronde et la nappe d'accompagnement.

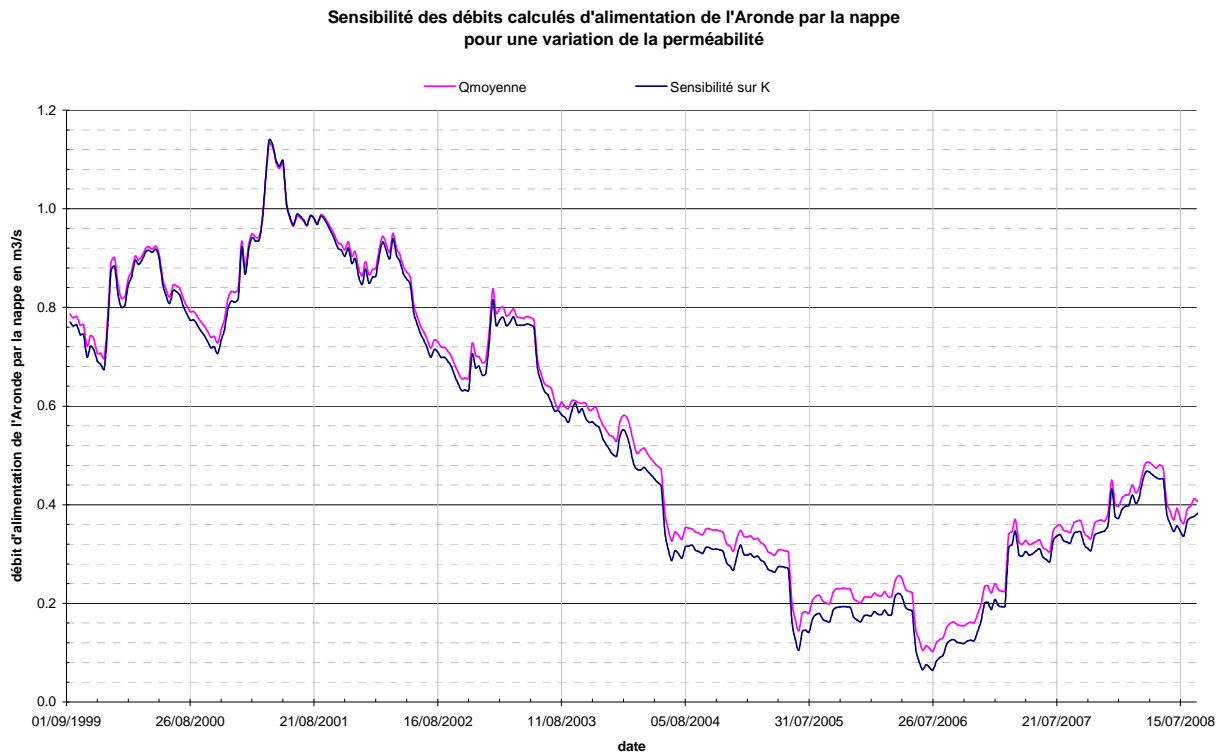


**Figure 38 : Sensibilité des cotes piézométriques calculées pour une variation de la perméabilité**



Concernant les cotes piézométriques, l'augmentation des perméabilités provoque la baisse des cotes piézométriques. Cette baisse est constante au cours du temps. Elle est de 1.5 m environ sur le plateau de la Plaine d'Estrées et de 30 cm environ sur le piézomètre de 01042X0026 sur le coteau de l'Aronde.

**Figure 39 : sensibilité des débits d'alimentation de l'Aronde par la nappe calculés à la perméabilité**



Concernant les débits d'échange entre l'Aronde et la nappe de la craie, l'augmentation des perméabilités a pour effet une baisse du débit de nappe drainé par l'Aronde en période d'étiage essentiellement. Sur les périodes de hautes eaux annuelles, les débits drainés par l'Aronde ne subissent pas de variation, par contre les étiages sont impactés au maximum de l'ordre de – 50l/s par l'augmentation des perméabilités.

Les calculs sont donc sensibles au coefficient de perméabilité introduit.

Ce premier test permet de vérifier que lorsque la cote piézométrique calculée sur le piézomètre d'Estrées-Saint-Denis baisse de 1.5 mètre, le débit de nappe drainé par l'Aronde calculé à l'étiage diminue de 50 l/s environ.

#### 5.10.1.2 Sensibilité du modèle au coefficient d'emmagasinement

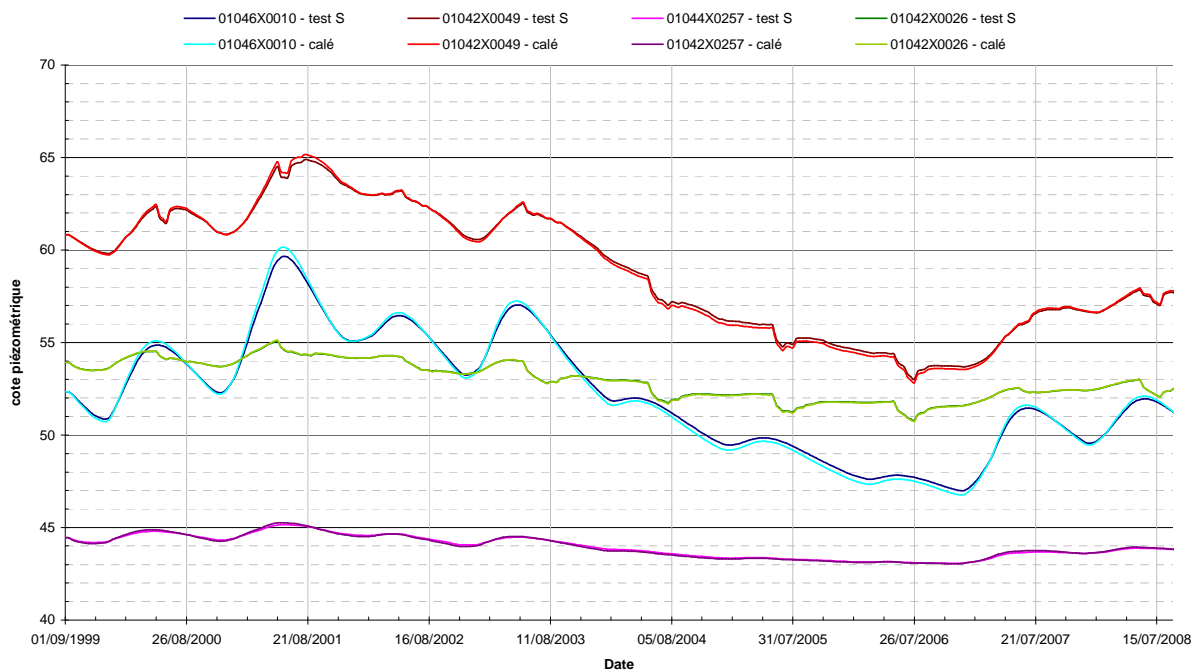
Le coefficient d'emmagasinement est également un paramètre calé. Un test de sensibilité a été réalisé sur ce paramètre. Les valeurs des paramètres testés sont présentées dans le tableau ci-après :

**Figure 40 : coefficient d'emmagasinement testé pour le test de sensibilité**

Coefficient d'emmagasinement moyen	Test de sensibilité : coefficient d'emmagasinement testé
0.001	0.0015
0.005	0.0055
0.0004	0.00045
0.0007	0.00075

La sensibilité du modèle est appréciée sur les débits d'apport de la nappe à l'Aronde et sur la piézométrie.

**Figure 41 : Sensibilité des cotes piézométriques calculées pour une variation du coefficient d'emmagasinement**



Les cotes piézométriques calculées par le modèle sont peu sensibles au coefficient d'emmagasinement. Les variations piézométriques sont de l'ordre de la dizaine de centimètres.

**Figure 42 : sensibilité des débits d'alimentation de l'Aronde par la nappe à une variation du coefficient d'emmagasinement**



Une variation du coefficient d'emmagasinement calé provoque une augmentation du débit d'échange entre la nappe et la rivière en période d'étiage notamment. La variation est de l'ordre de 25 l/s sur les débits échangés à l'étiage. Les débits échangés en hautes eaux ne sont pas impactés par ce paramètre.

### 5.10.1.3 Sensibilité du modèle à la conductance de l'Aronde

La conductance de l'Aronde est le paramètre qui permet de caler les échanges entre la rivière et sa nappe d'accompagnement. Il est calé par tronçons homogènes de l'Aronde. Il intègre la largeur de la rivière, la longueur du tronçon de rivière dans une maille, la perméabilité du lit de la rivière et l'épaisseur du lit au travers duquel s'effectuent les échanges. Ce paramètre est supposé pouvoir varier d'un facteur 2.

Les résultats des simulations sont présentés ci-après.

**Figure 43 : sensibilité des débits d'alimentation de l'Aronde par la nappe à une variation de la conductance de la rivière**



La variation de la conductance d'un facteur 2 a des impacts inférieurs à 10 l/s sur le débit de nappe drainé par l'Aronde.

#### 5.10.1.4 Sensibilité du modèle à la ligne d'eau de l'Aronde

Il existe une incertitude sur la variation de la ligne d'eau de l'Aronde. Le modèle a été construit sur la base des observations d'avril 2009 d'hydratec sur l'Aronde. Ainsi les cotes d'eau ont été définies à partir des mesures de hauteur d'eau dans les biefs mesurées par hydratec, elles sont constantes au cours du temps. Les cotes de fond ont été déterminées à partir des mesures et des points cotés de la carte IGN.

Si on considère que ces mesures sont correctes, il existe toutefois une incertitude sur les variations de la ligne d'eau au cours du temps. Ainsi un test de sensibilité a été réalisé en considérant une hauteur d'eau dans la rivière de 30 cm inférieure à la situation de calage. Les résultats sur le volume d'eau drainé par l'Aronde sont présentés sur le graphique ci-après.

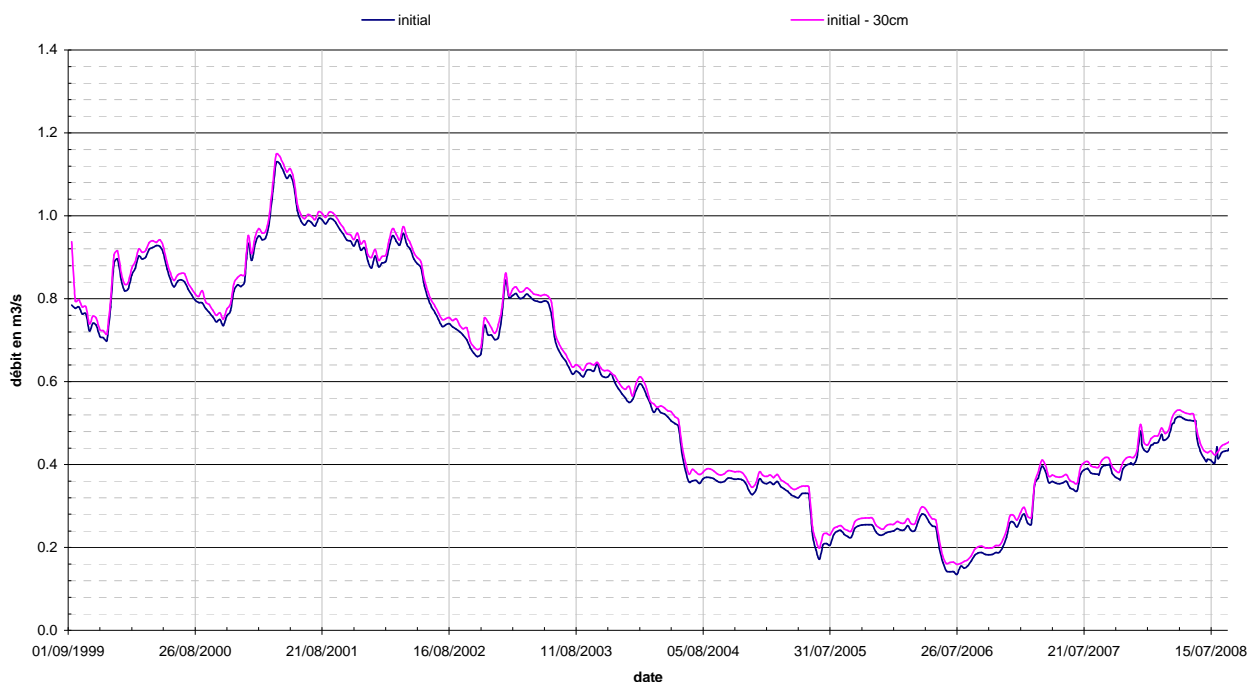
La première courbe bleue, présente le débit drainé dans la situation de calage. La seconde présente le débit drainé avec une ligne d'eau de 30 cm inférieure à la première simulation.

Il y a moins d'infiltration vers la nappe quand la ligne d'eau est plus basse, le débit calculé à l'aval de l'Aronde est donc supérieur dans la seconde simulation. Les impacts sont alors inférieurs à 30 l/s.

Ainsi, à l'échelle où nous travaillons et étant donné les données topographiques disponibles, il semble illusoire de vouloir créer un modèle hydraulique de l'Aronde dans le but de le coupler avec le modèle hydrogéologique.

Cette dernière remarque n'exclut cependant pas l'intérêt de la compréhension de l'hydraulique de l'Aronde pour identifier les variations de vitesse et de hauteur d'eau engendrées par une variation du débit de drainage.

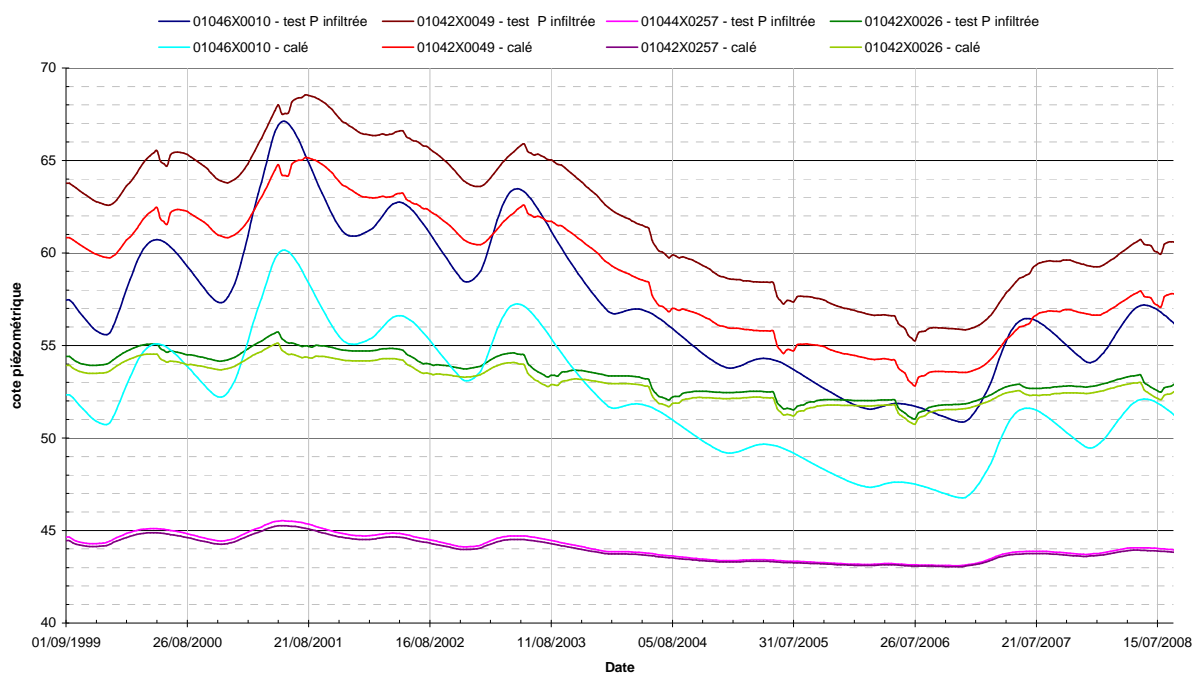
**Figure 44 : sensibilité des débits d'alimentation de l'Aronde par la nappe à une modification de la ligne d'eau de l'Aronde**



### 5.10.1.5 Sensibilité du modèle hydrogéologique à la pluie infiltrée

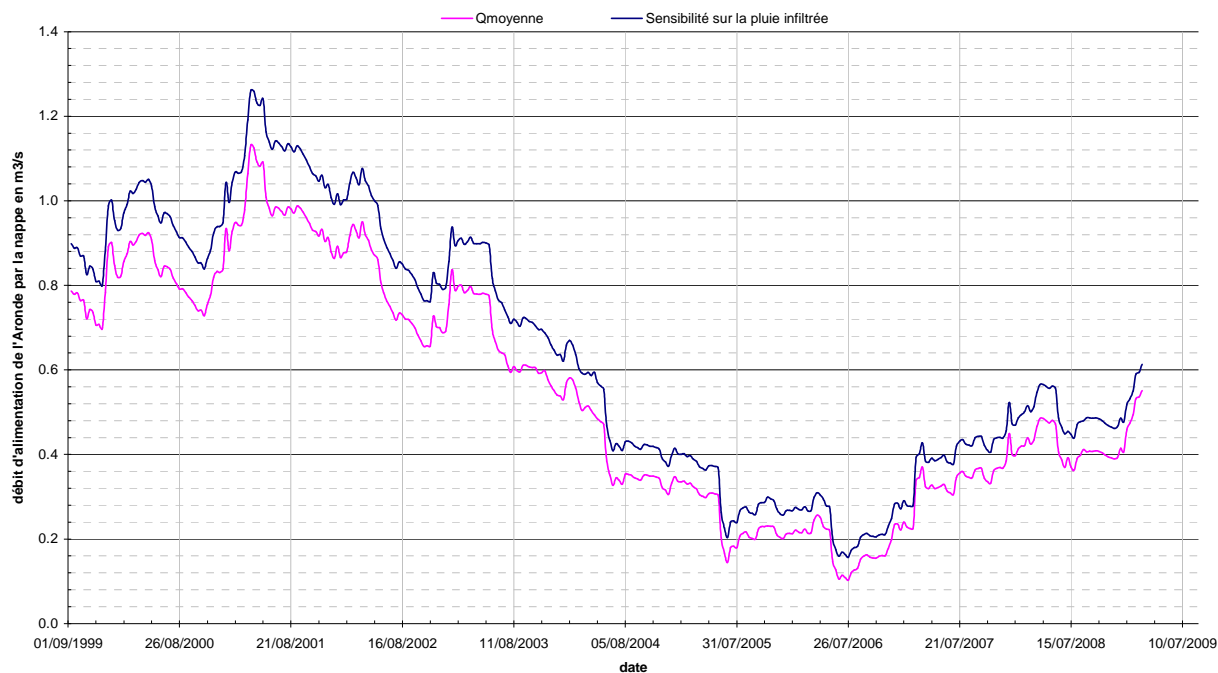
La pluie infiltrée introduite dans le modèle résulte du calage du modèle hydrologique. On estime l'incertitude des calculs de la pluie infiltrée à +/- 10 % près. Un test a donc été réalisé avec une pluie infiltrée 10 % supérieure à la pluie de calage. Les résultats sont présentés ci-après.

**Figure 45 : sensibilité des cotes piézométriques calculées à une variation de la pluie infiltrée**



Les cotes piézométriques calculées sont d'autant plus sensibles à la pluie infiltrée que l'on se situe sur le plateau. La sensibilité sur le piézomètre du plateau d'Estrées Saint Denis est de l'ordre de 2.50 m, tandis qu'elle est de la dizaine de centimètres dans la vallée de l'Aronde.

**Figure 46 : sensibilité des débits d'alimentation de l'Aronde par la nappe à une variation de la pluie infiltrée**



Le graphique ci-dessus présente la variation du débit d'alimentation de l'Aronde par la nappe calculé pour la pluie de calage et pour la pluie de calage plus 10%. Les débits calculés sont sensibles à la variation de la pluviométrie. L'augmentation de 10 % implique une augmentation du débit de 50 l/s sur les situations d'étiage. Les impacts en hautes eaux sont de l'ordre de 100 l/s.

### 5.10.1.6 Synthèse sur la sensibilité du modèle hydrogéologique

Pour clore cette évaluation de la sensibilité du modèle, nous avons réalisé un calcul d'erreur qui permet de définir l'intervalle de confiance associé aux valeurs calculées par le modèle.

Ce calcul d'erreur est effectué selon la méthodologie présentée en 7.5 qui permet de calculer les intervalles de confiance à partir des variations calculées pour les tests de sensibilité de chacun des paramètres pouvant varier autour de la valeur calée.

Dans un premier temps on évalue l'erreur – l'intervalle de confiance – sur le calcul du débit de la nappe de la craie alimentant l'Aronde.

L'intervalle de confiance est défini en % d'erreur. Ainsi on dit que le débit de nappe alimentant l'Aronde est à 95 % de chances dans un intervalle étendu de 300 l/s autour de la valeur calculée par le modèle. Plus l'intervalle est étroit, plus l'incertitude est grande. Sur ce même exemple indiqué ci-dessous, le débit de nappe de l'Aronde est à 70% de chances dans un intervalle de 80l/s autour de la valeur calculée.

**Figure 47 : Intervalles de confiance sur le calcul du débit d'alimentation de l'Aronde par la nappe**



Ce même test de la confiance a été effectué sur le calcul du débit de ruissellement vers l'Aronde.

Le débit total de l'Aronde résulte de la somme entre le ruissellement et la nappe. Le calcul d'erreur in fine tient compte de ce cumul.



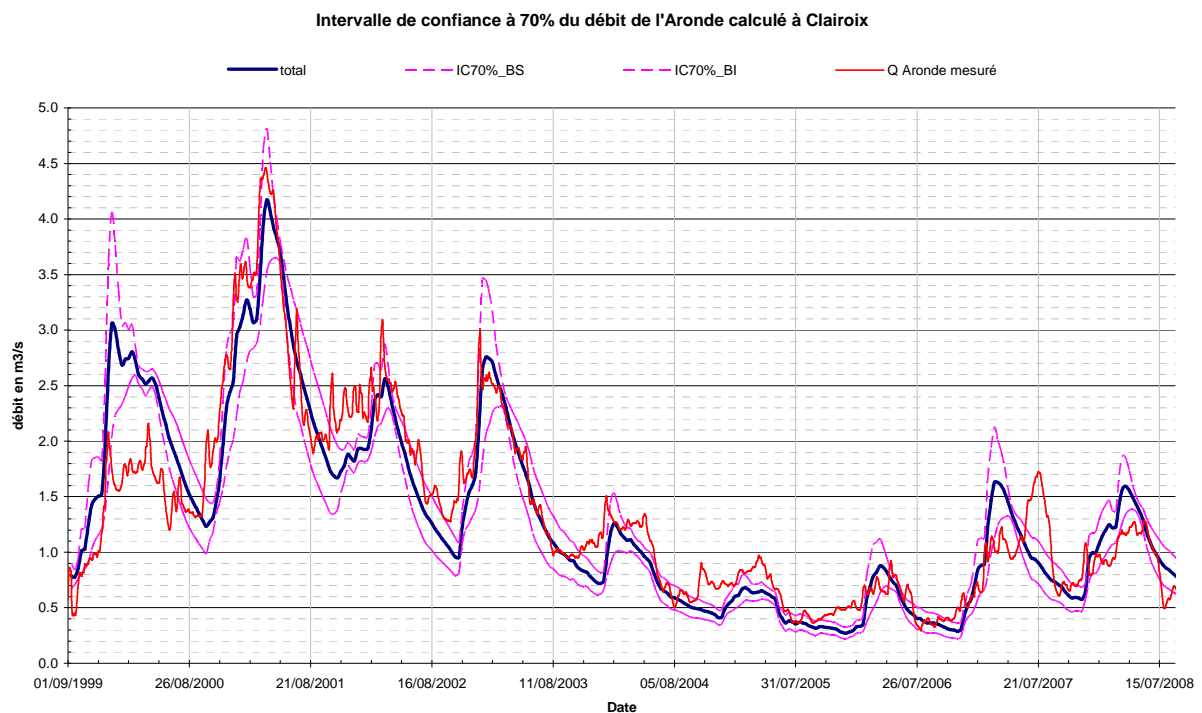
L'intervalle de confiance à 70 % sur le calcul du débit total est alors de **25 % du débit minimal observé (soit un intervalle de  $\pm 12.5\%$  autour de la valeur calculée)**.

Rappelons que le débit mesuré est lui-même estimé avec un intervalle de  $\pm 5\%$ .

Il y a donc 70% de chances que le débit réel soit compris dans un intervalle de  $\pm 100$  l/s autour du débit calculé. Cet intervalle est dessiné autour de la courbe bleue du débit calculé, sur la

Figure 48.

**Figure 48 : Intervalles de confiance sur le calcul du débit de l'Aronde à Clairoux**



Cette figure montre le remarquable calage des variations de débit de l'Aronde mesurés (courbe rouge) et des débits calculés (courbe bleue).

L'analyse des volumes annuels montre que le modèle est très bien calé.

Par ailleurs, cette figure montre que les années d'été chaud de 2003, 2004, 2005, se remarquent par la mauvaise adéquation entre le débit mesuré et le débit calculé :

Le débit mesuré y est systématiquement en dehors de l'intervalle de confiance à 70%. Cela souligne les erreurs de la courbe de tarage dues au développement d'algues, qui sont d'ailleurs connues du service hydrologique de la DREAL.

Il faudra donc par la suite proposer une station plus fiable pour le contrôle des débits sur l'Aronde.

## 6 CONCLUSION

Cette phase d'étude a permis d'améliorer le calage du modèle hydrogéologique de manière significative en termes de piézométrie et de volumes restitués aux rivières.

Le couple HYDRA-BV MODFLOW fonctionne correctement, et en particulier reproduit bien le débit soutien de l'Aronde par la nappe de la craie. Le calage s'est attaché à bien reproduire les temps de retard entre la pluie et la recharge de l'aquifère.

Les débits de restitution à l'Aronde et les débits de ruissellement sont calés sur la station de Clairoux, unique point de contrôle disponible à ce jour. Ce point présente l'avantage d'être intégrateur de tout ce qui se passe dans le bassin versant de l'Aronde.

Les phénomènes de recharge et de vidange de la nappe sont bien restitués par le modèle.

Les tests de sensibilité ont permis de vérifier la grande stabilité de l'outil de calcul.

Le modèle tel qu'il est maintenant finalisé constitue l'outil de travail de la phase 3.

Cette phase aura pour objet de définir le comportement de la nappe pour des situations de référence, d'étiage, d'années moyenne et de hautes eaux.

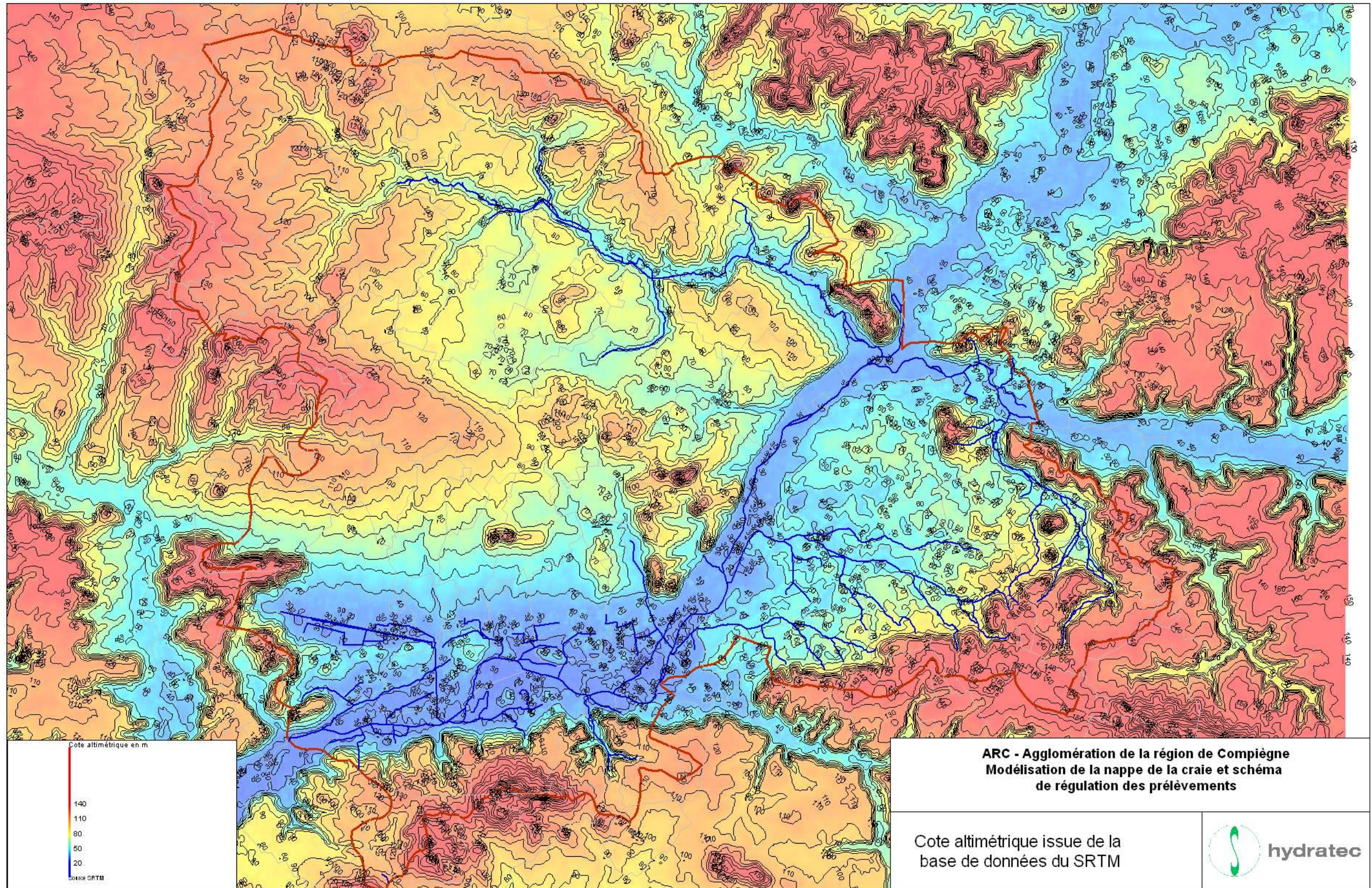
Nous définirons les situations pluviométriques correspondantes, pour ensuite décrire le comportement de la nappe par secteurs homogènes, et pour définir les volumes disponibles pour l'ensemble des besoins naturels, et anthropiques.

## 7 ANNEXES

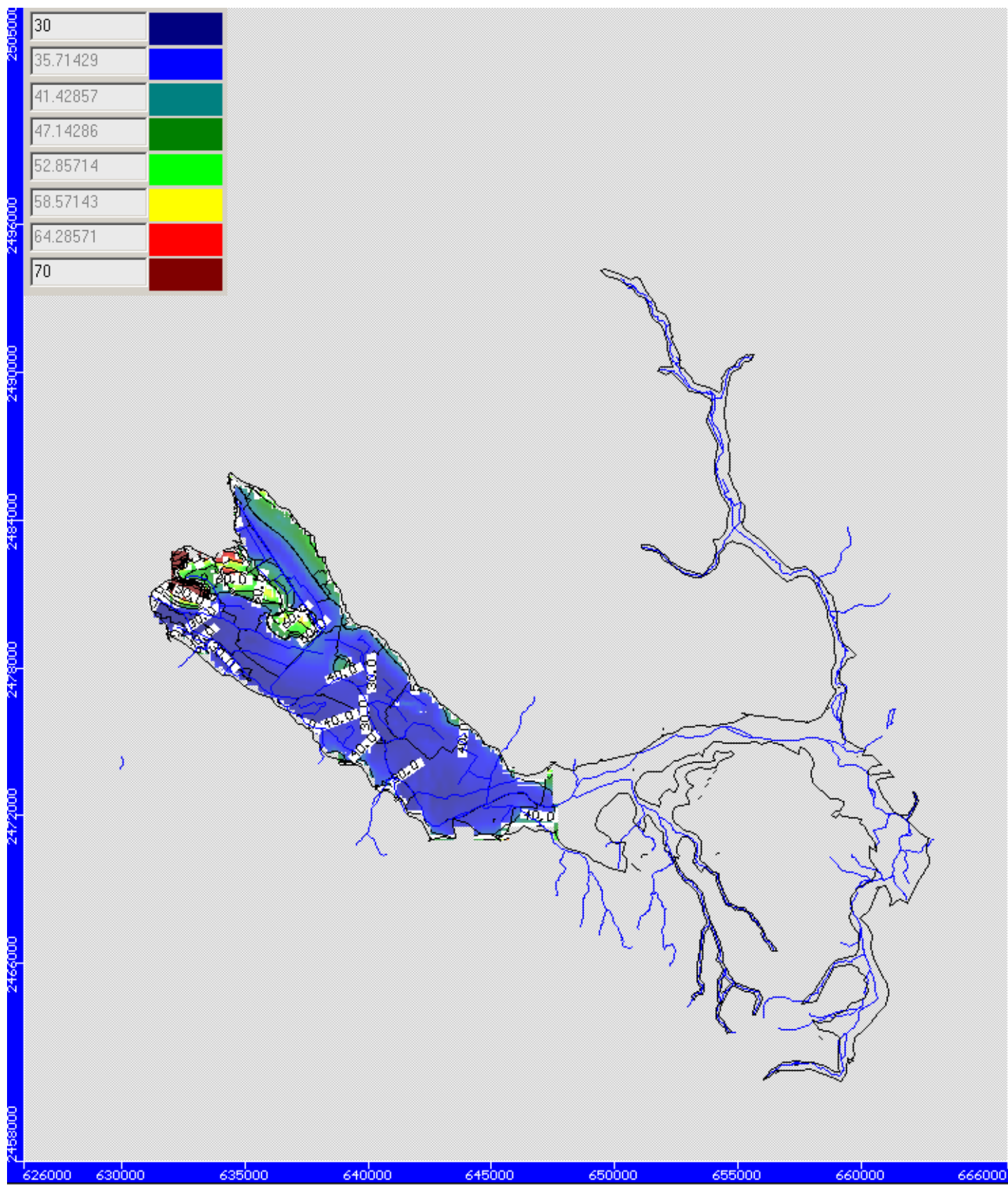
## 7.1 CARACTERISTIQUES DES SOUS BASSINS VERSANTS UTILISES POUR LE CALCUL DE LA PLUIE INFILTREE

Bassin versant	Hydrogramme de pluie brute	Superficie du bassin versant en km <sup>2</sup>	Capacité du réservoir de sol en mm	Vitesse d'infiltration maximum dans le sol en mm/jour	Temps de réponse au ruissellement en jours	Temps de transfert dans la couche insaturée en jours	Temps de réponse de l'aquifère en jours	Capacité de l'aquifère en mm
BVA1	godenvilliers	87	300	32	5	300	150	300
BVA2	godenvilliers	30	300	80	5	300	150	300
BVA3	chevrières	24	300	64	5	300	150	300
BVA4	chevrières	19	300	64	5	300	150	300
BVA5	chevrières	25	300	32	5	300	150	300
BVA6	chevrières	18	300	64	5	300	150	300
BVA3bis	chevrières	13	300	8	5	300	150	300
BVA7	chevrières	16	300	64	5	300	150	300
BVA8	chevrières	14	300	64	5	300	150	300
BVO1	chevrières	137	300	80	5	300	150	600
BVO2	chevrières	79	300	80	5	90	150	300
BVO5	chevrières	35	300	80	5	180	150	300

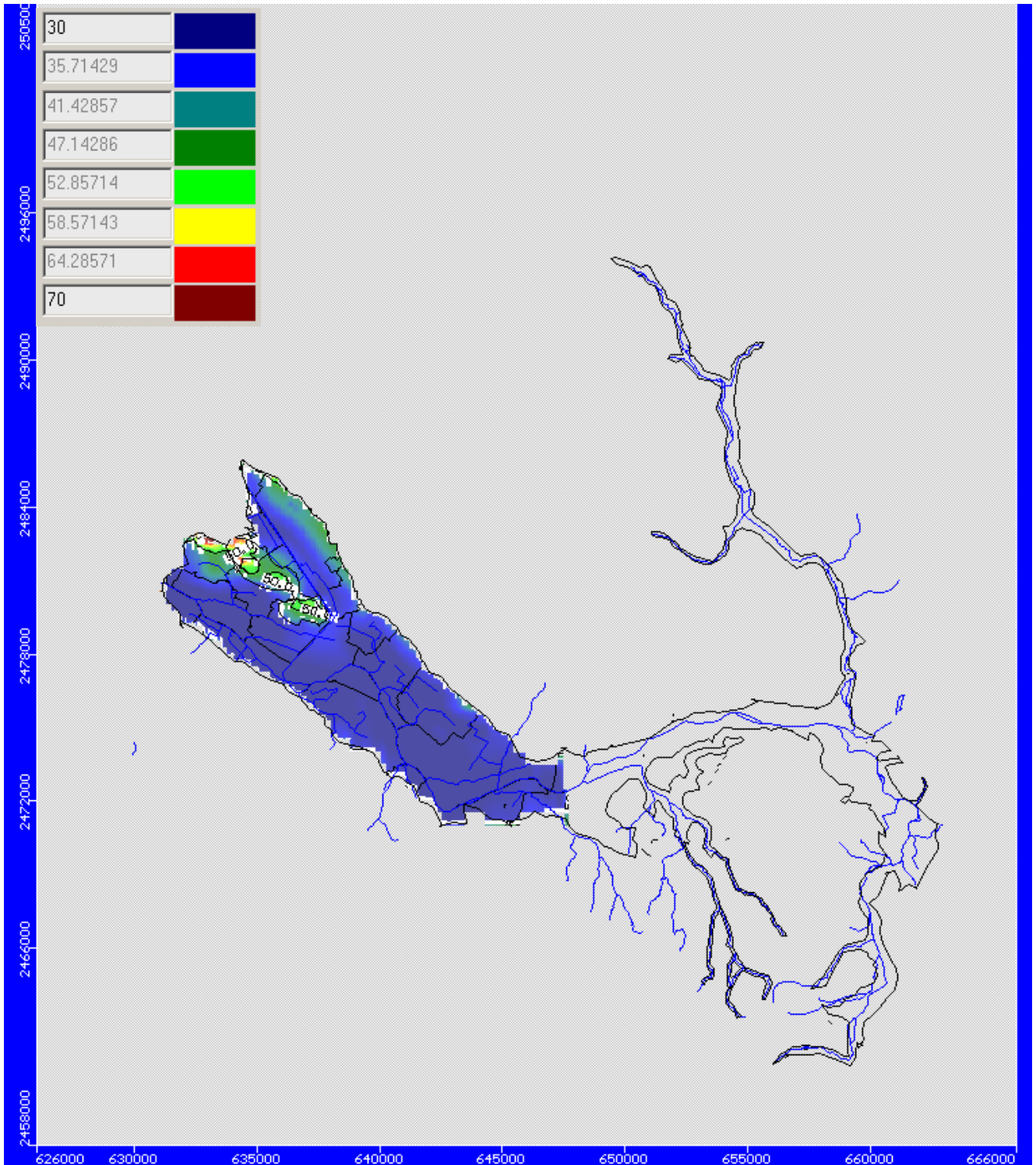
## 7.2 MORPHOLOGIE DES COUCHES DU MODELE : ISOHYPSES



# Toit de la couche 1

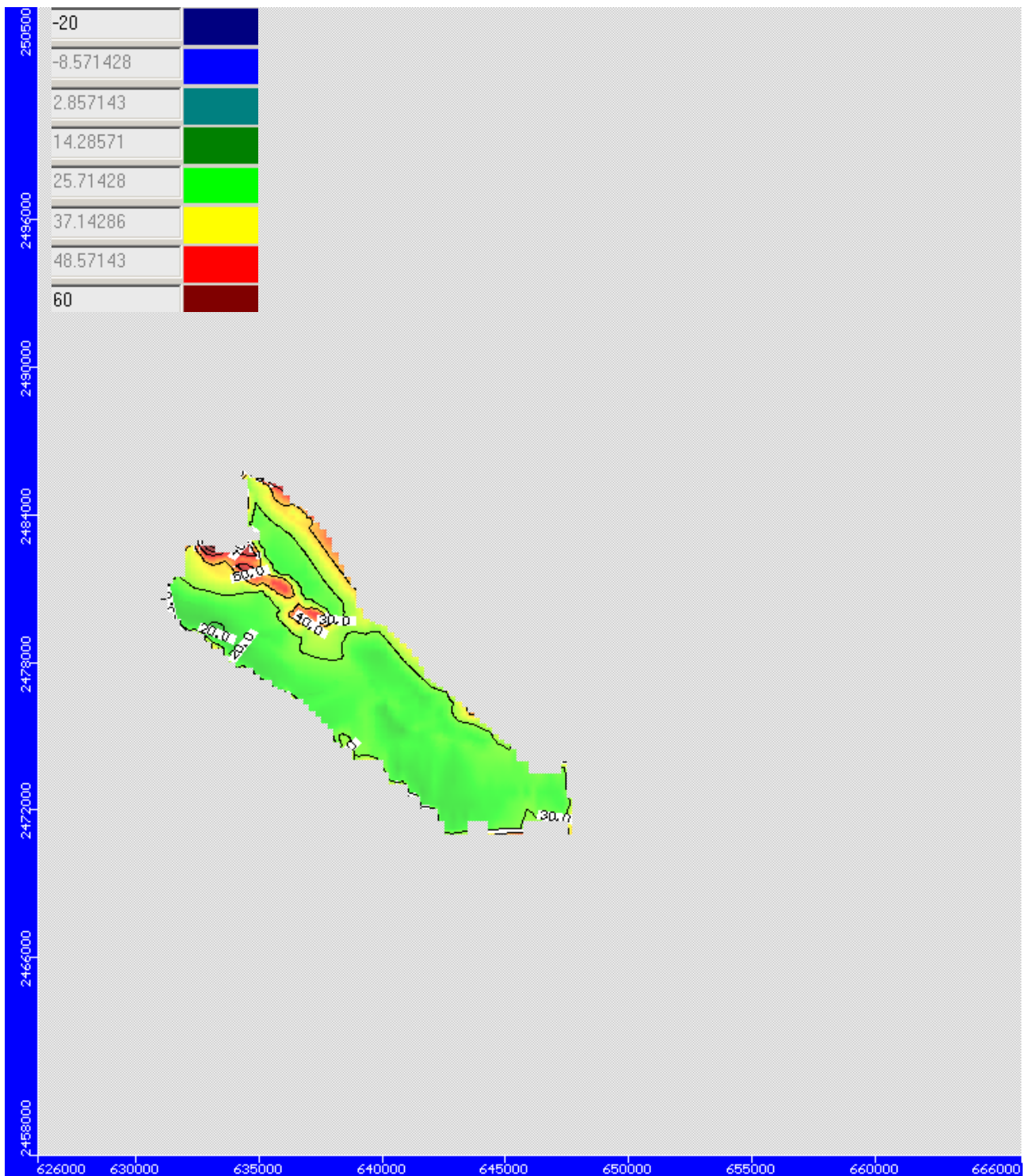


## Mur de la couche 1

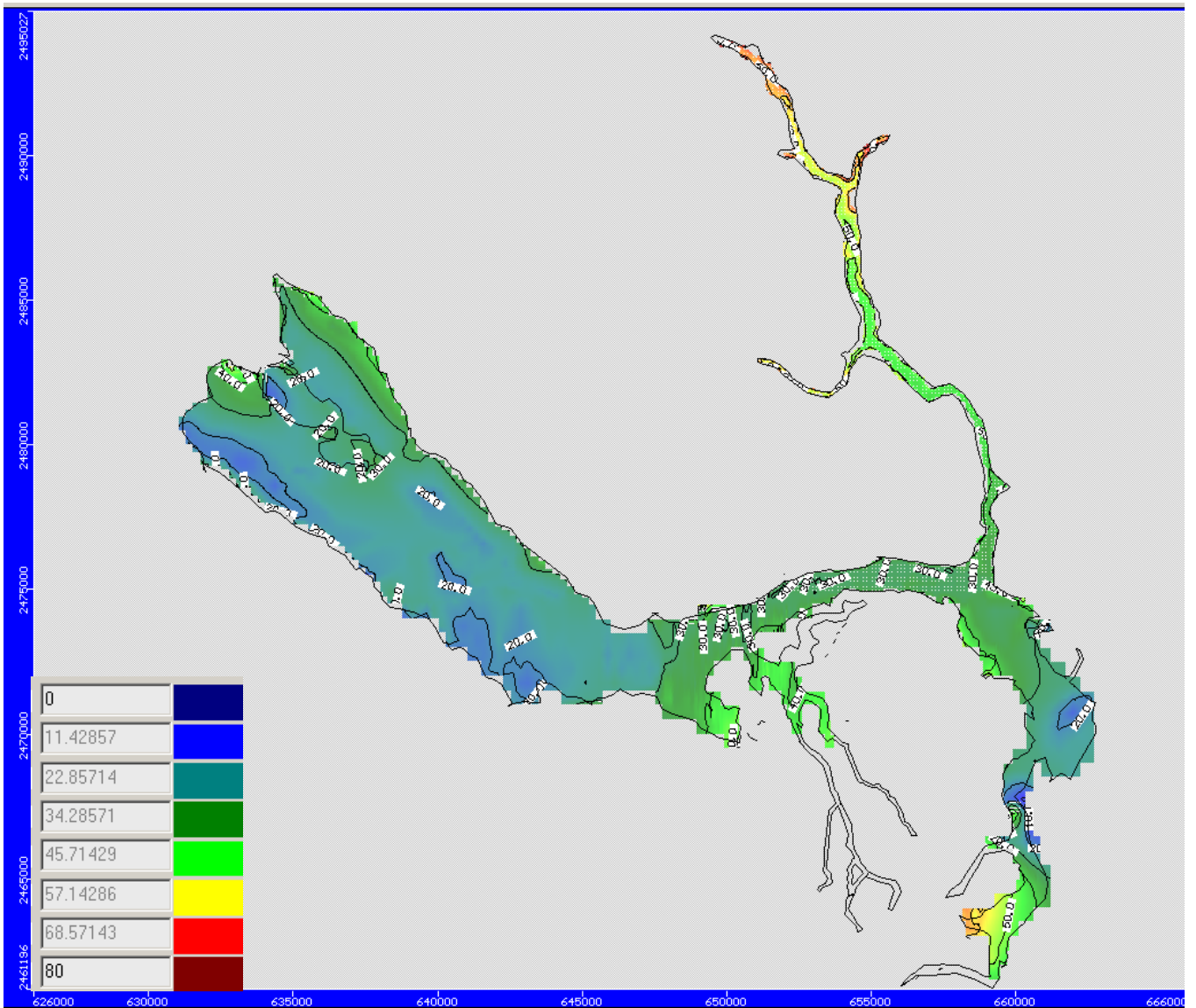




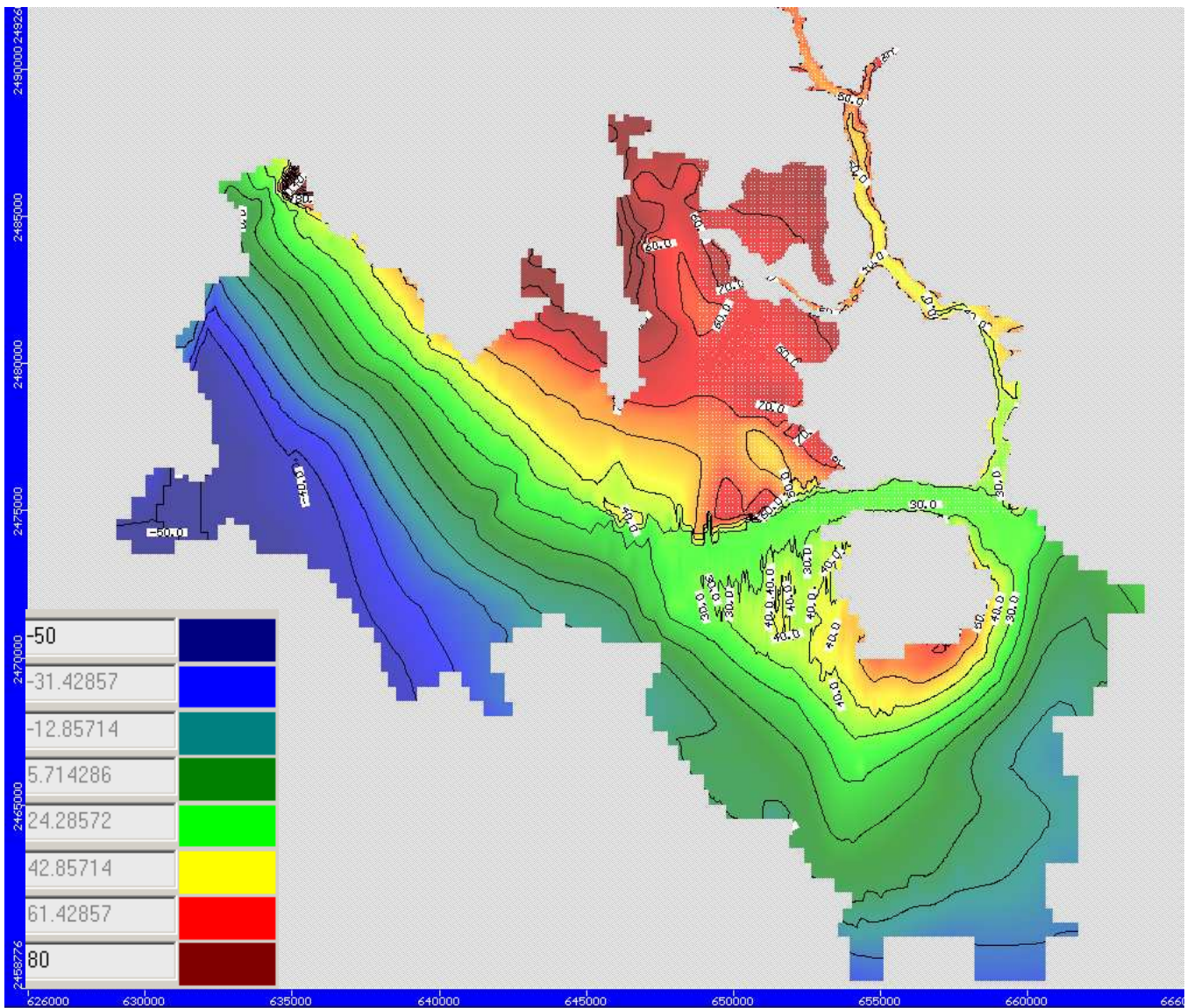
## Mur de la couche 2



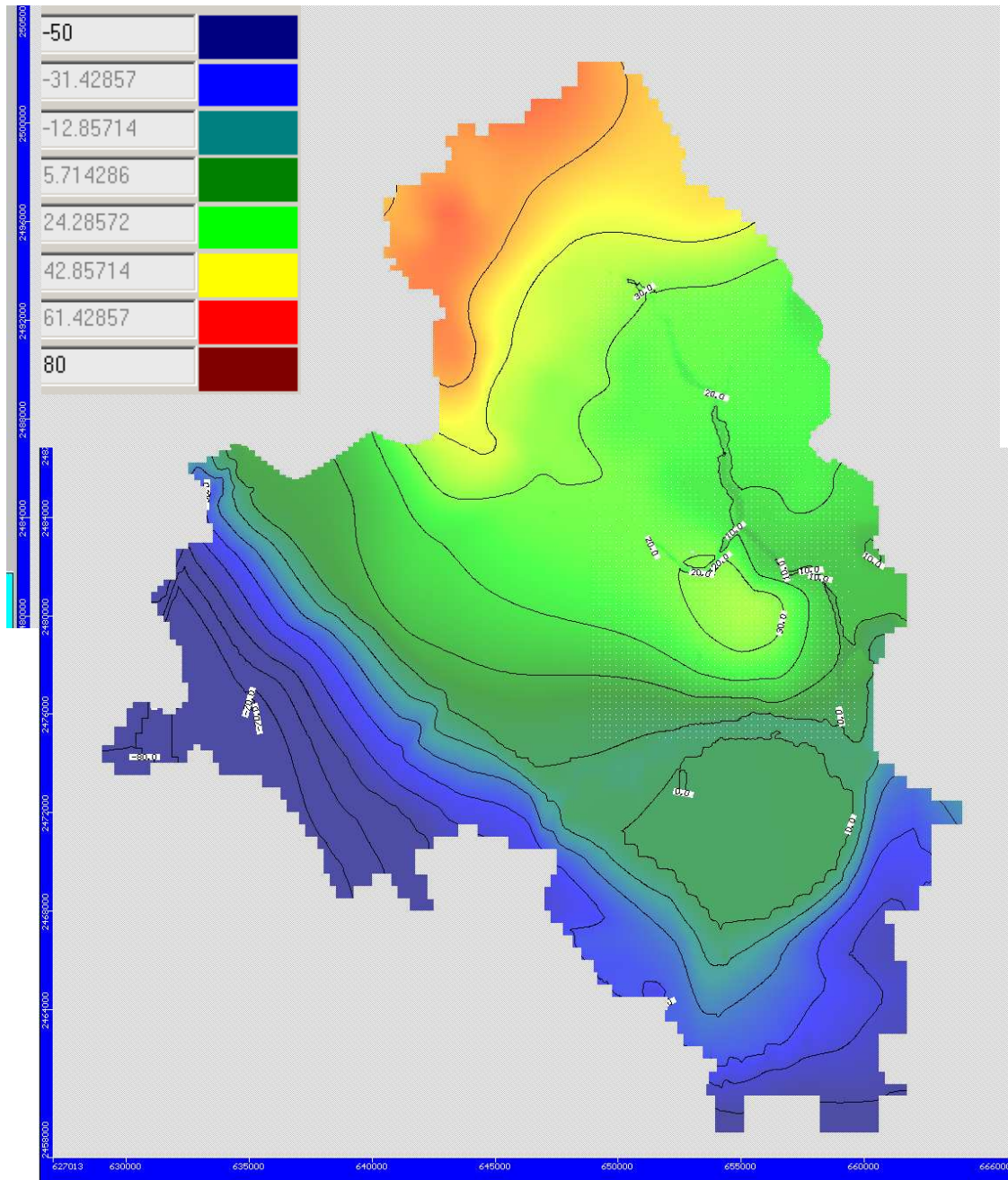
# Mur couche 3



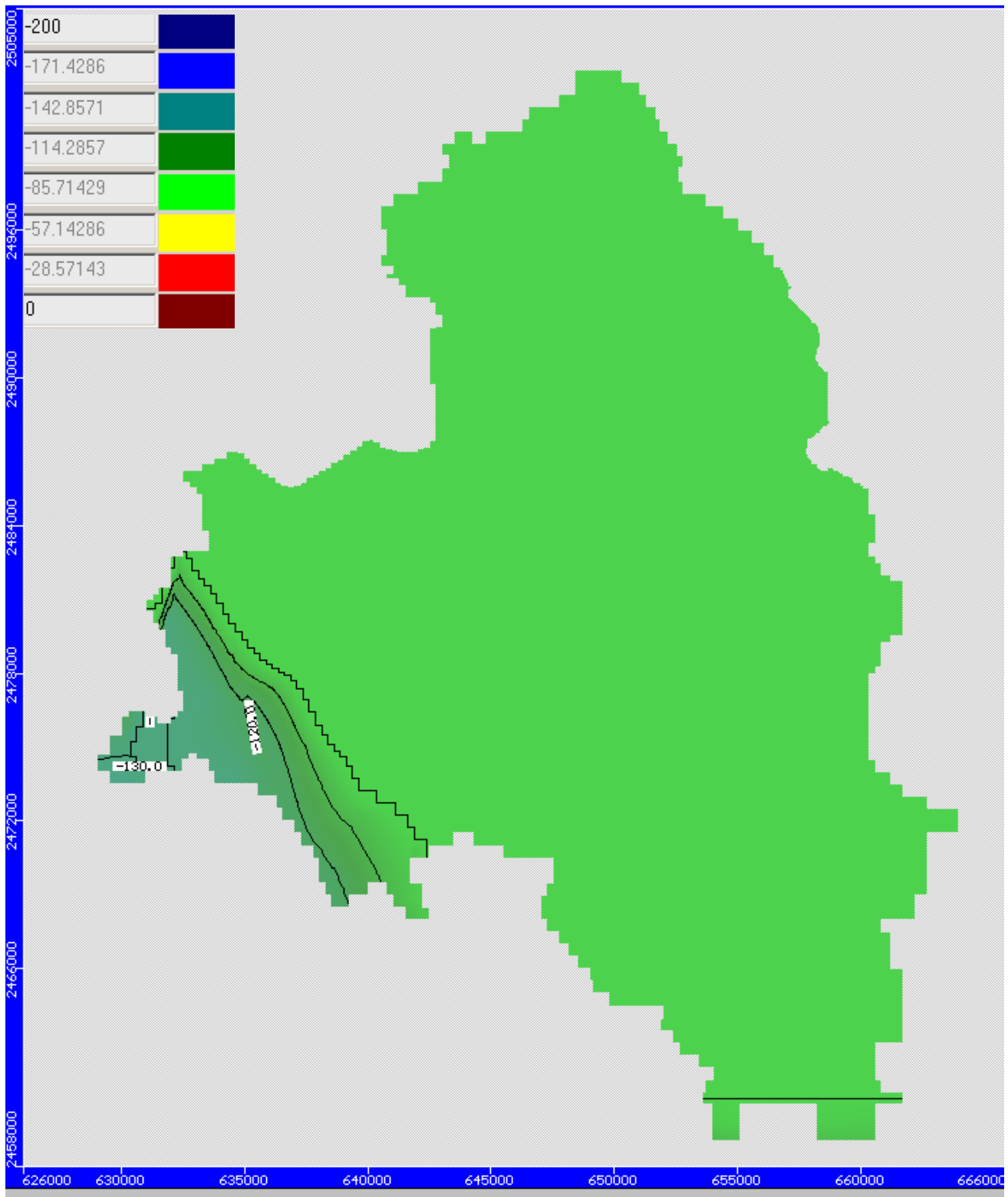
## Mur de la couche 4



## Mur de la couche 5



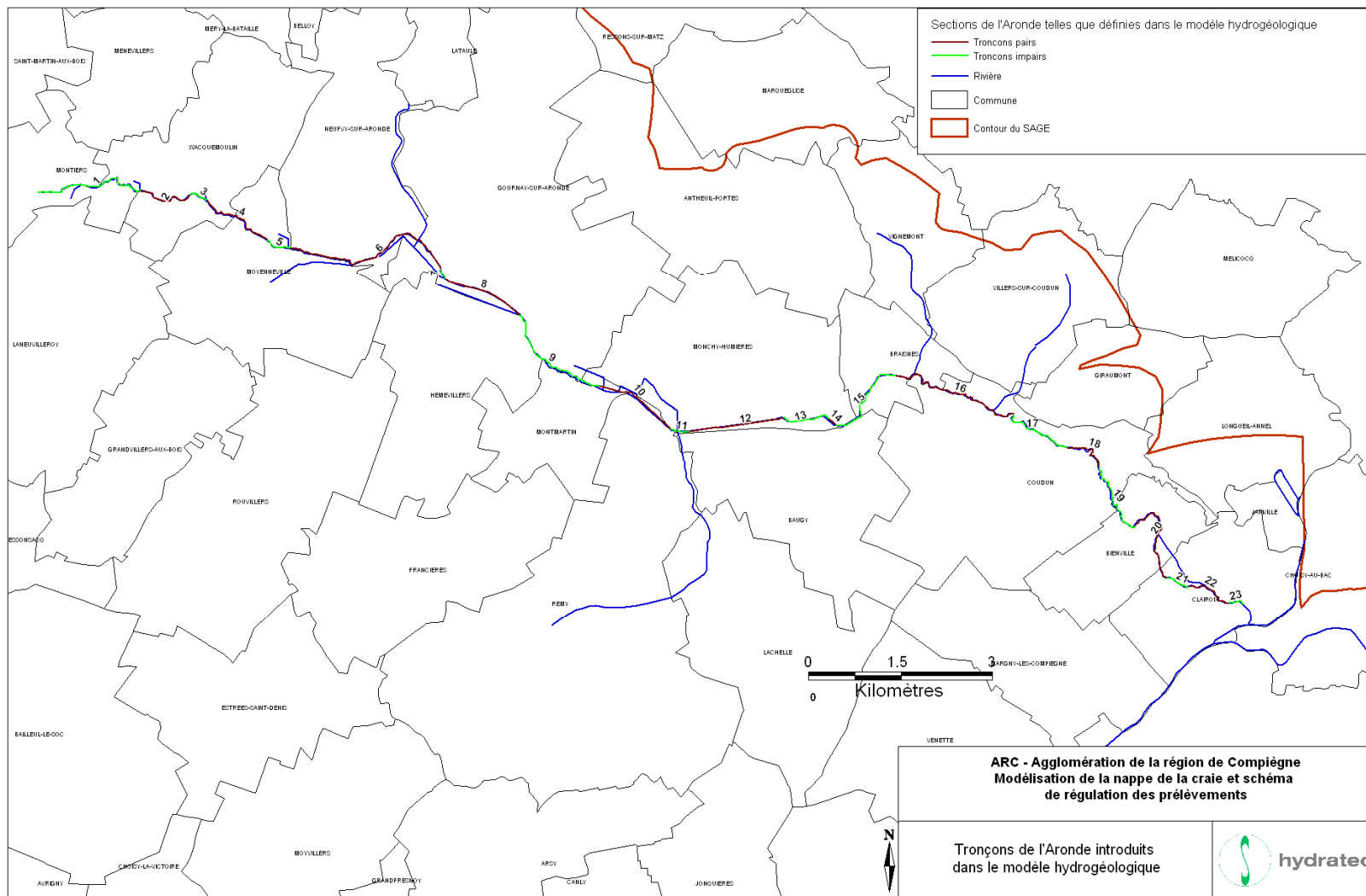
## Mur de la couche 6



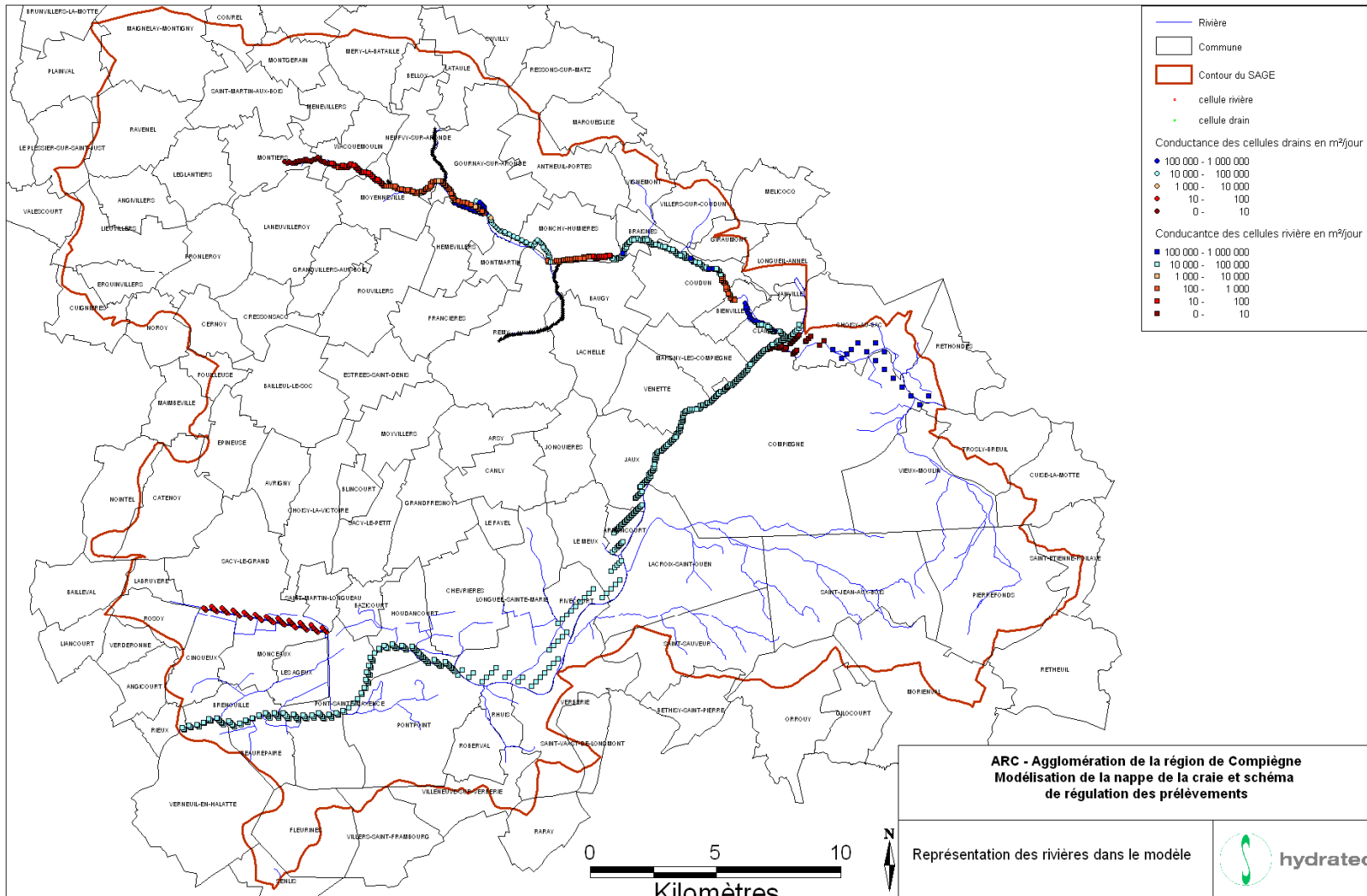
### 7.3 REPRESENTATION DES RIVIERES DANS LE MODELE VISUAL MODFLOW

Profils en travers introduits dans Visual Modflow

	pK km	Amont					Aval					
		Cote fond m	Cote de la ligne d'eau m	épaisseur du lit m	Largeur m	K m/s	Cote fond m	Cote de la ligne d'eau m	épaisseur du lit m	Largeur m	K m/s	
Tronçon 1	1.971	64	64.4	0.5	4	1.E-06	59.8	60.2	0.4	6	1.E-06	
Tronçon 2	2.937	59.8	60.2	0.4	6	1.E-06	56.9	57.3	0.4	8	1.E-06	Moulin Wacquemoulin
Tronçon 3	3.243	56.6	57	0.4	8	1.E-06	57	57.4	0.4	4	1.E-06	
Tronçon 4	4.449	57	57.4	0.4	4	1.E-06	57.2	57.6	0.4	4	1.E-06	Moulin Moyenneville
Tronçon 5	4.902	55.4	55.8	0.4	4	1.E-06	55	55.4	0.05	7	1.E-06	
Tronçon 6	7.934	55	55.4	0.05	7	1.E-06	52.4	52.8	0.05	10	1.E-06	Moulin Gournay
Tronçon 7	8.112	52	52.4	0.05	10	1.E-06	51.9	52.3	0.05	10	1.E-06	
Tronçon 8	9.487	51.9	52.3	0.05	10	1.E-06	50.5	50.9	0.05	7.5	1.E-06	
Tronçon 9	11.481	50.5	51	0.05	7.5	1.E-04	46.7	47.2	0.05	7.5	1.E-04	
Tronçon 10	12.884	46.7	47.2	0.05	7.5	1.E-04	46.7	47.2	0.05	5	1.E-04	Moulin Beaumanoir
Tronçon 11	13.203	46.7	47.2	0.05	5	1.E-04	46.5	47	0.05	4	1.E-04	
Tronçon 12	14.724	46.5	47	0.05	4	1.E-04	45	45.5	0.05	5	1.E-04	
Tronçon 13	15.54	45	45.5	0.05	5	1.E-04	44.8	45.3	0.05	6	1.E-04	Moulin Monchy
Tronçon 14	15.697	42.85	43.35	0.05	6	1.E-04	43	43.5	0.05	7	1.E-04	
Tronçon 15	16.592	43	43.5	0.05	7	1.E-04	42.6	43.1	0.05	7	1.E-04	Moulin Revenne
Tronçon 16	19.624	42.3	42.8	0.05	7	1.E-04	42	42.5	0.05	7	1.E-04	
Tronçon 17	20.834	42	42.7	0.05	7	1.E-04	40	40.7	0.05	8	1.E-04	Moulin Coudun
Tronçon 18	21.61	40	40.7	0.05	8	1.E-04	38	38.7	0.05	6.5	1.E-04	
Tronçon 19	23.056	38	38.7	0.05	6.5	1.E-04	38.075	38.775	0.05	7	1.E-04	Moulin Bienville
Tronçon 20	24.662	37.075	38.075	0.05	7	1.E-04	36.2	37.2	0.05	7	1.E-04	Moulin de Foisselle
Tronçon 21	25.098	35.2	36.2	0.05	7	1.E-04	34.19	35.19	0.05	7.7	1.E-04	Moulin Bacot
Tronçon 22	25.917	33.79	34.79	0.05	7.7	1.E-04	32.64	33.64	0.05	7.2	1.E-04	Moulin de Rumigny
Tronçon 23	26.187	32.34	33.34	0.05	7.2	1.E-04	30.4	30	0.05	10	1.E-04	







## 7.4 RESULTATS DU CALAGE POUR 3 SITUATIONS

Aout 2000

Mai 2001

Aout 2006

Les échanges entre la nappe et les cours d'eau sont exprimés en m<sup>3</sup>/jour/maille.

Echange positif : alimentation de la nappe par la rivière ; gamme de couleur bleue

Echange négatif : drainage de la nappe par la rivière ; gamme de couleur rouge

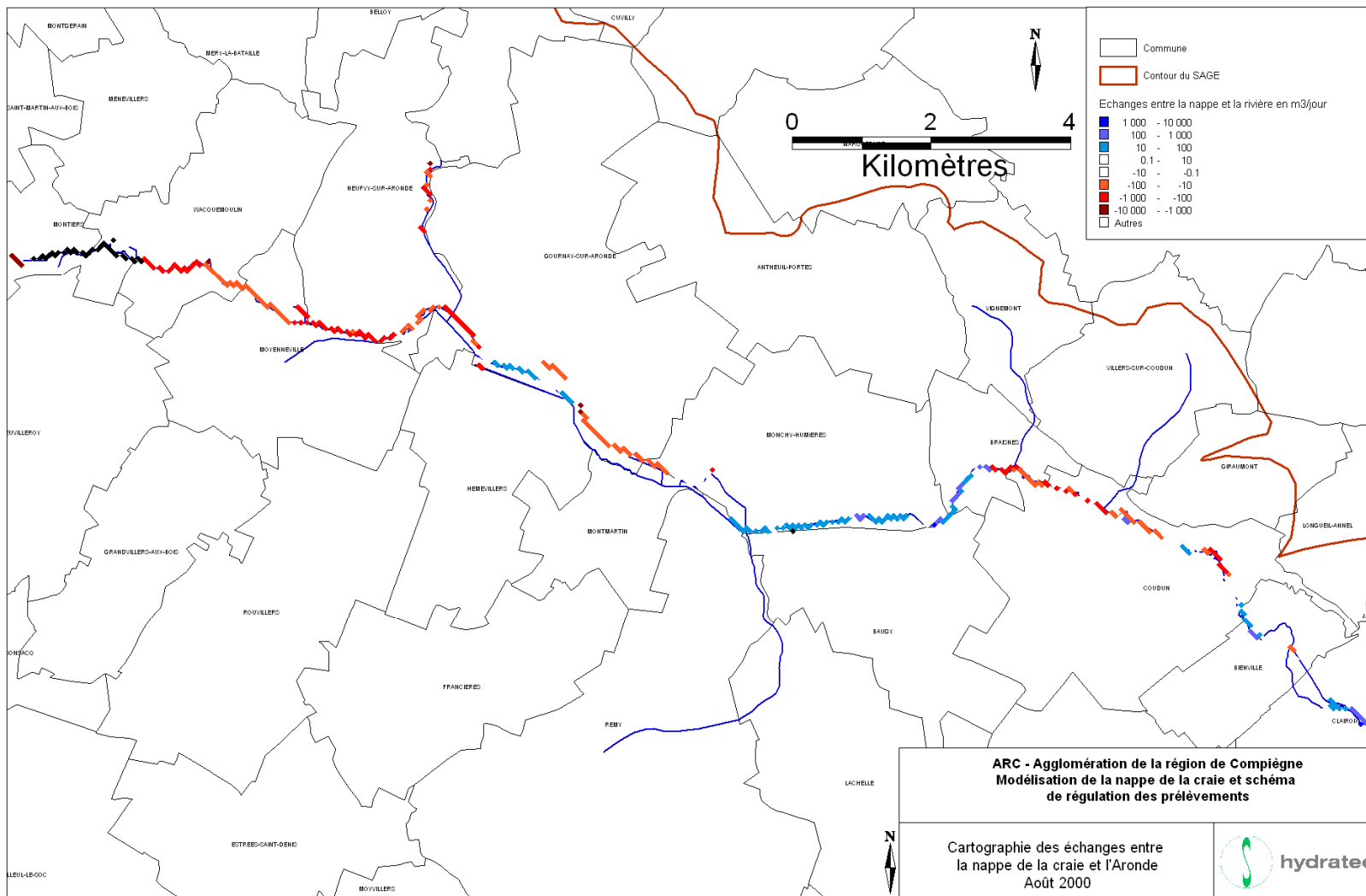
Correspondance m<sup>3</sup>/jour et l/s :

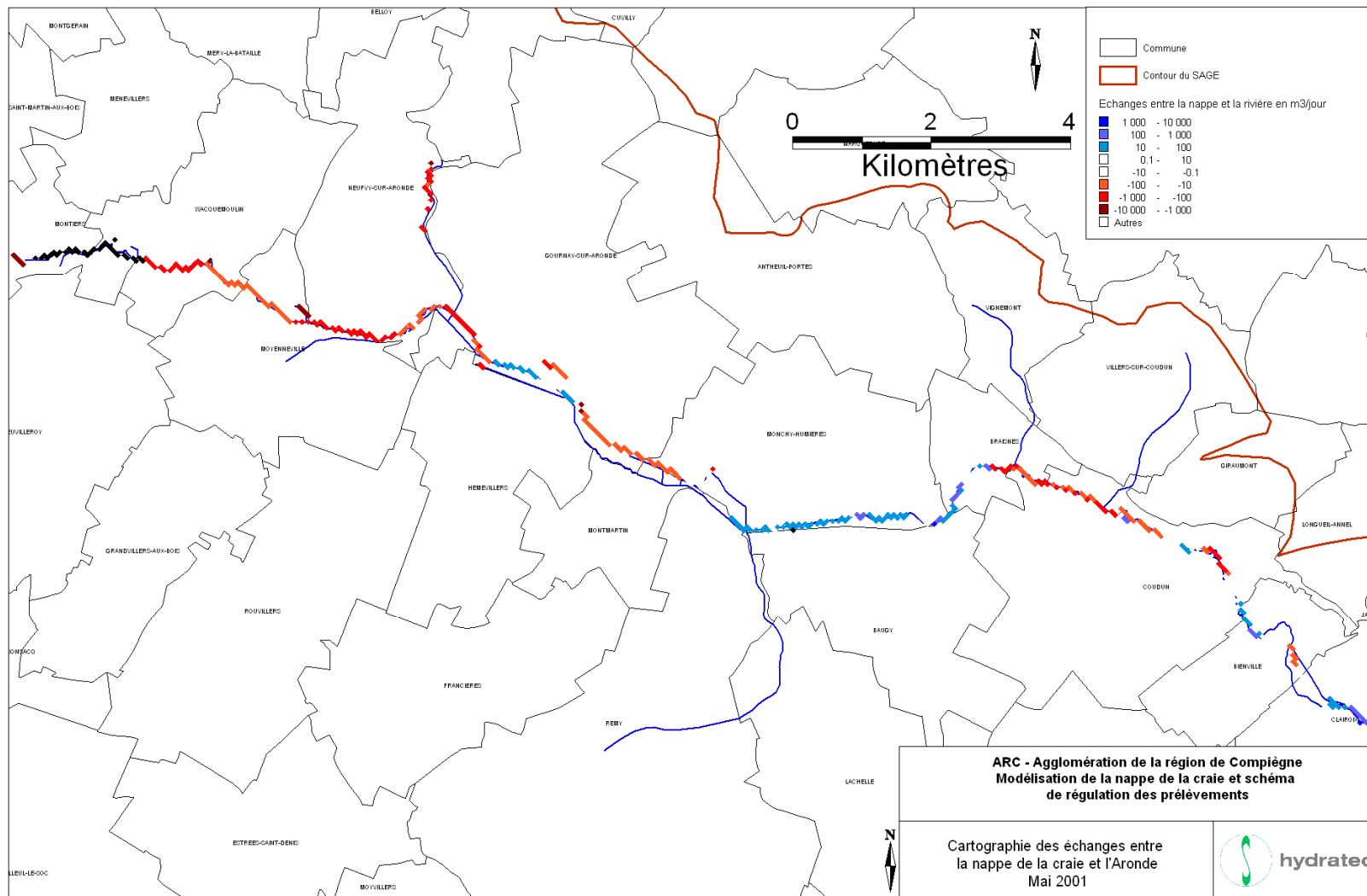
10000 m<sup>3</sup>/jour = 120 l/s

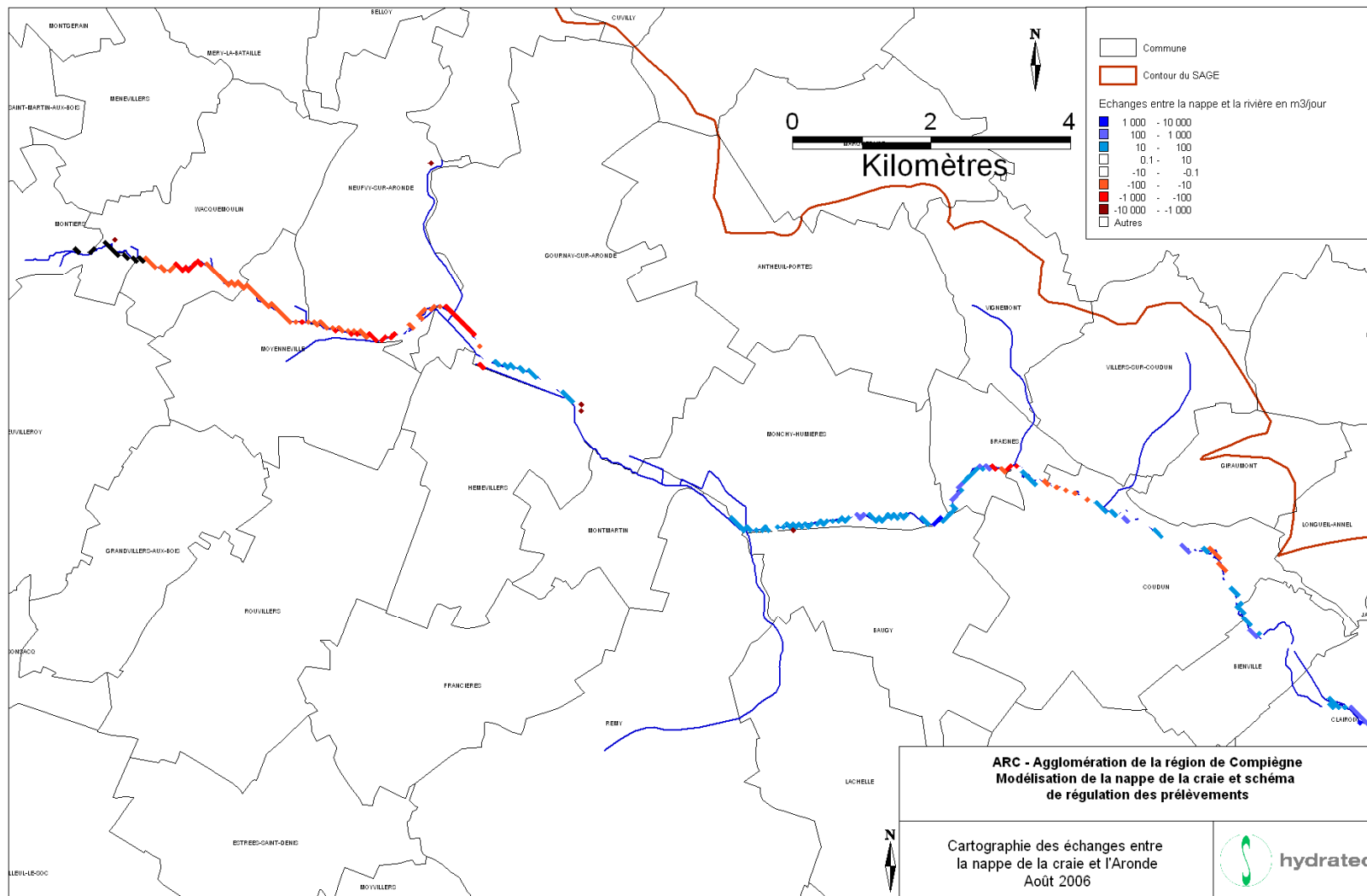
1000 m<sup>3</sup>/jour = 12 l/s

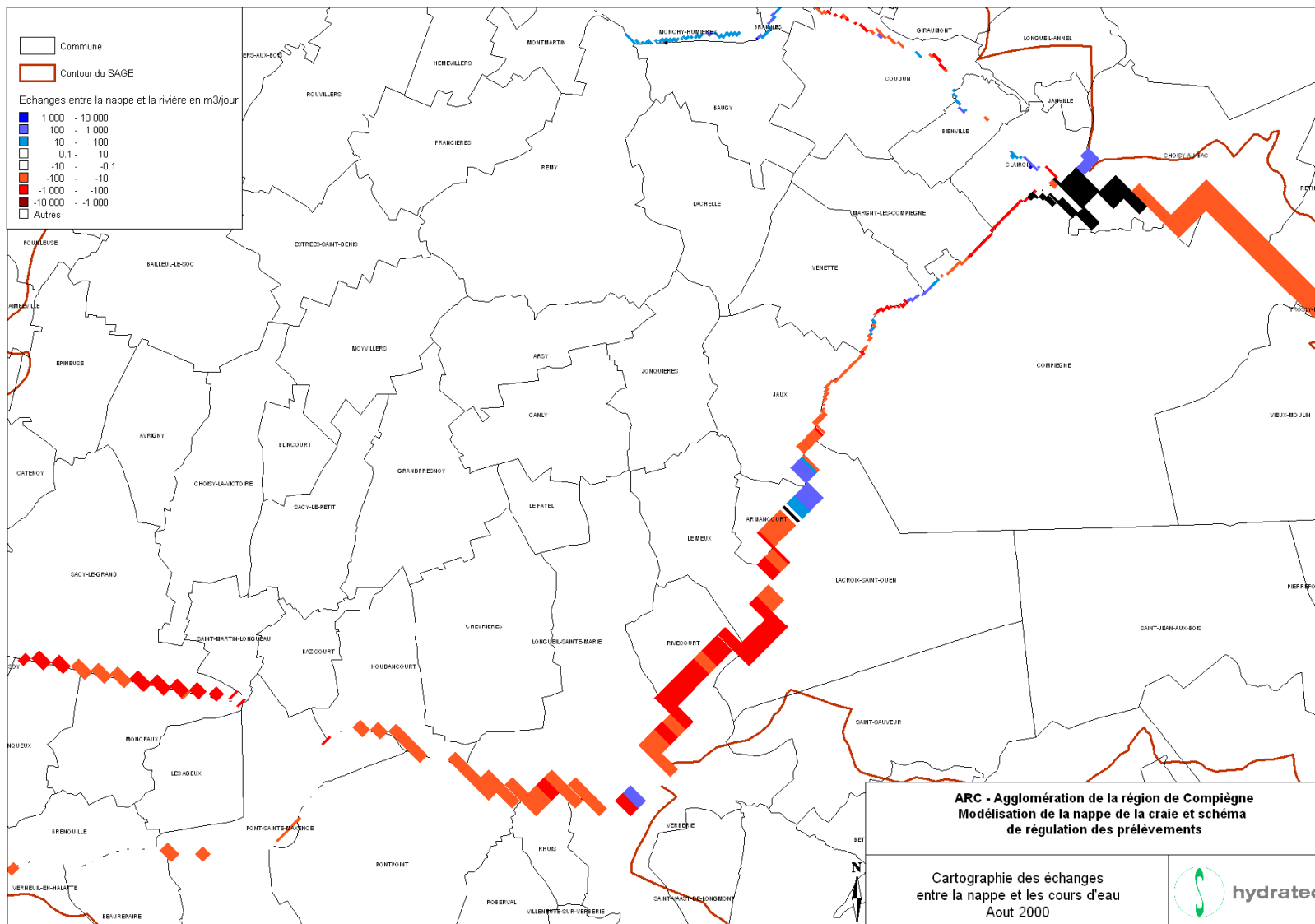
100 m<sup>3</sup>/jour = 1.2 l/s

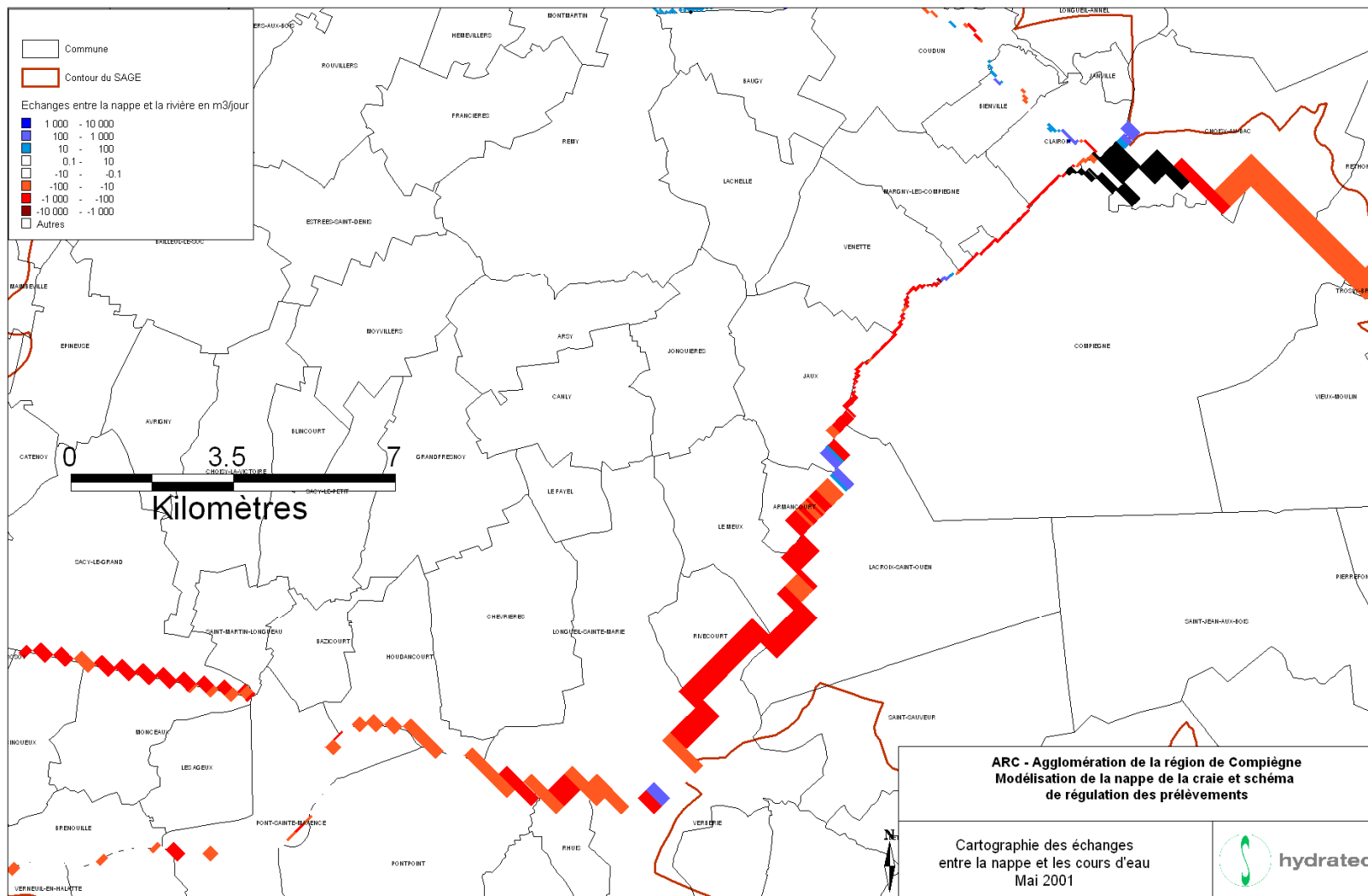
10 m<sup>3</sup>/jour = 0.12 l/s

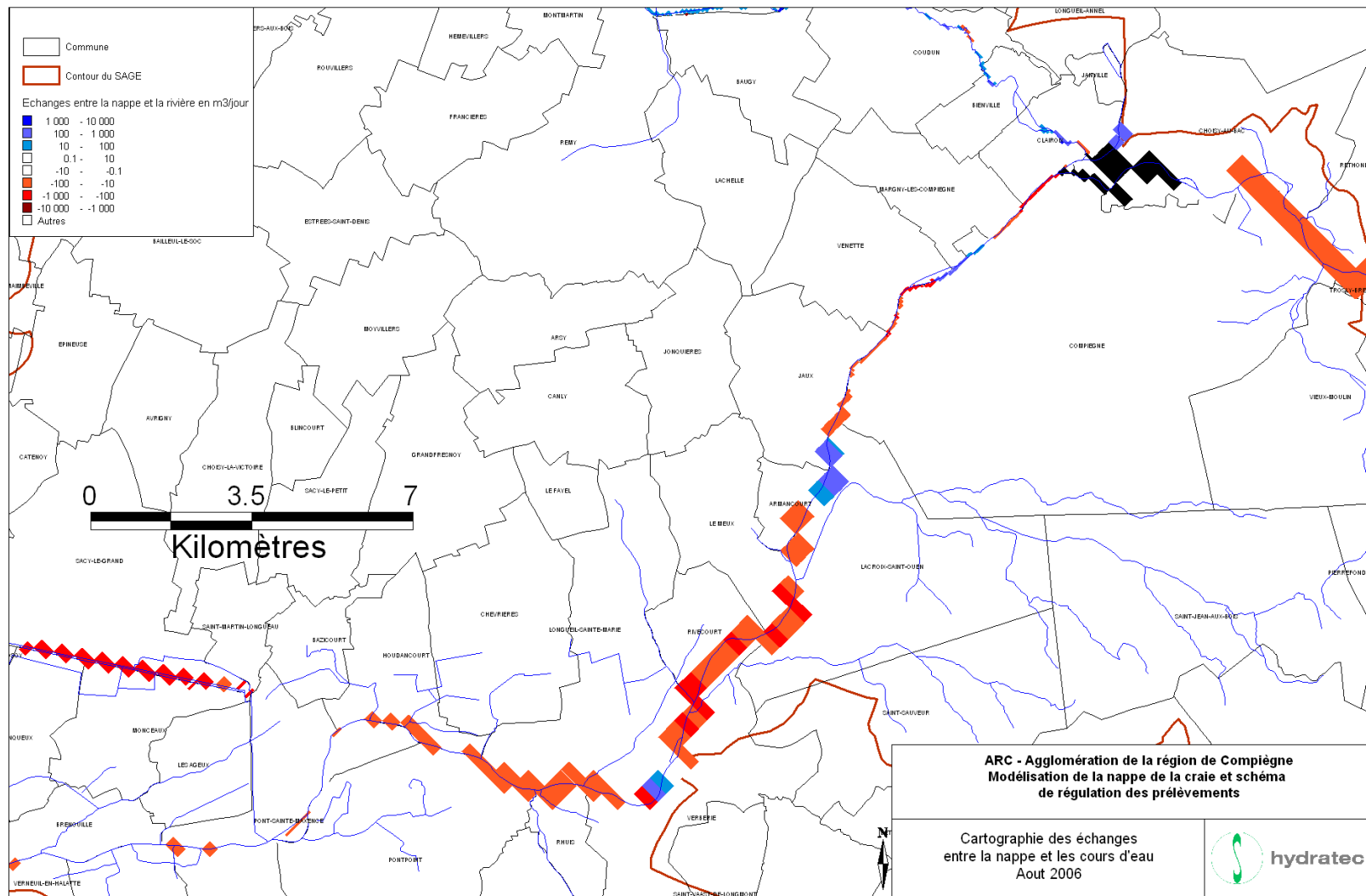














## 7.5 CALCUL DES INTERVALLES DE CONFIANCE, METHODOLOGIE

Afin d'encadrer les débits d'alimentation de l'Aronde par la nappe de la craie, on utilise la propriété suivant :

Soit la fonction

$$Y=F(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

Où les  $x_i$  sont les valeurs prises par la variable aléatoire  $X_i$  et  $F$  est une fonction connue. On souhaite connaître l'écart type  $s_y$  autour de la valeur moyenne  $y_0$ , telle que :

$$Y_0 = F(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0}) \text{ où } x_{i0} \text{ désigne la valeur moyenne prise par la variable } x_i.$$

On désigne par  $s_{xi}$  l'écarte type de la variable  $X_i$  et par  $s_{yi}$  l'écart type associé à la variable :  $\{Y_i = F(X_i)$ , sachant que  $X_k = x_{k0}$ ,  $k$  différent de  $i\}$

Si les variables  $X_i$  sont indépendantes alors l'écart type  $s_y$  associé à la variable aléatoire  $Y$  est donné par l'expression :

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_i \sigma_{yi}^2}$$

Le calcul de l'intervalle de confiance sur les débits d'échange découle directement de cette propriété si on considère que

- $F$  désigne la fonction de transfert du modèle hydrogéologique : elle permet le calcul de la cote piézométrique puis à partir de cette donnée les débits échangés entre la nappe et la rivière,
- $s_{xi}$  est l'écart type de l'incertitude de la variable  $X_i$  autour de sa valeur moyenne  $x_{i0}$ ,
- $s_{yi}$  est l'écart obtenu sur  $Y$  lorsque le paramètre  $x_i$  accuse un écart de  $s_{xi}$  autour de la valeur  $x_i=x_{i0}$ , les autres variables étant figées à leur valeur de référence.

En admettant que les distributions des écarts suivent des lois normales,  $s_{xi}$  est relié aux intervalles de confiance par les relations :

$$I_{70\%} = 0.6s,$$

$$I_{95\%} = 1.7s .$$