INSTITUTION
INTERDEPARTEMENTALE
NORD-PAS-DE-CALAIS
pour
L'AMENAGEMENT DE LA VALLEE DE LA SENSEE

ETUDE HYDRAULIQUE GLOBALE DANS LE CADRE DU SAGE DE LA SENSEE

Rapport 4.
Modélisation du fonctionnement hydraulique et hydrogéologique de la Sensée

hydratec
groupe setec
Tour Gamma D
58, quai de la Rapée
75583 PARIS CEDEX 12

tel : 01.40.04.61.02
fax : 01.43.42.24.39

Réf : 19600-4.1 - BC/ALP/EH
Date : novembre 2010

1 CADRE ET OBJET DU RAPPORT 7

1.1 CONTEXTE DE L'ETUDE 7

1.2 OBJETS DE L'ETUDE 7

1.3 OBJET DU PRESENT RAPPORT 9

1ERE PARTIE : MODELISATION HYDRAULIQUE 10

2 DEMARCHE MISE EN ŒUVRE 11

2.1 COURS D'EAU MODELISES 11

2.2 CRUES MODELISEES ET SITUATION PRISE EN COMPTE 12

2.3 TOPOGRAPHIE UTILISEE POUR LA CONSTRUCTION DU MODELE 12

2.4 MODELISATION HYDRAULIQUE ET MODELISATION HYDROLOGIQUE 13

2.5 PRESENTATION DU LOGICIEL HYDRARIV UTILISE 14

3 MODELISATION HYDROLOGIQUE 15

3.1 DONNEES PLUVIOMETRIQUES RECUEILLIES 15

3.2 DECOUPAGE EN SOUS-BASSINS VERSANTS 16

3.3 MISE EN ŒUVRE DU MODELE PLUIE / DEBIT 18

4 PRESENTATION DU MODELE HYDRAULIQUE 19

4.1 PRINCIPE 19

4.2 CONSTRUCTION DU MODELE HYDRAULIQUE 19

4.2.1 Domaine filaire 19

4.2.2 Domaine casier 20

4.2.3 Singularités 22

4.3 PRESENTATION DES SOUS-MODELES HYDRAULIQUES SAM ET SAV 22

4.4 EXEMPLES D'ENTITES MODELISEES 25

4.4.1 Profils en travers 25

4.4.2 Casiers 26

4.4.3 Ponts 28

4.4.4 Barrages dans le lit mineur 29

4.4.5 Conditions limites aval 30

5 CALAGE DES MODELES HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE 31

5.1 DONNEES DISPONIBLES 31

5.2 METHODE DE CALAGE 34

5.2.1 Principes généraux 34
5.2.2 Spécificités du modèle hydrologique Sensée 35

5.3 RESULTATS DU CALAGE 37
5.3.1 Calage en débit 38
5.3.2 Calage en cote 39
5.3.3 Conclusions sur le calage 40

6 EXPLOITATION DU MODELE : ANALYSE DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE ACTUEL DU BASSIN VERSANT ET DE LA VALLEE 41

6.1 ANALYSE PLUVIOMETRIQUE DES TROIS CRUES MODELISEES 41

6.2 GENESE DES CRUES 42
6.2.1 Bilan hydrologique en crue 42
6.2.2 Sectorisation de l'importance des apports naturels en crue 44
6.2.3 Temps de réponse du bassin versant 45

6.3 PROPAGATION DES CRUES 45

6.4 ZONES DE DEBORDEMENT 48

6.5 IMPACT HYDRAULIQUE EN CRUE DES OUVRAGES HYDRAULIQUES 50

6.6 ANALYSES LOCALES DE DYSFONCTIONNEMENTS SOULEVES LORS DE L'ANALYSE DE PHASE 3 52
6.6.1 Cause des brusques variations de niveaux d'eau locales 52
6.6.2 Perte de débit sur la Sensée aval entre Pt07 et Pt08 53

6.7 HYDROGRAMMES D'APPORT DE LA SENSEE VERS LES CANAUX DE NAVIGATION 55

2EME PARTIE : MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE 58

7 PRINCIPES GENERAUX ET OBJET DE LA MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE 59

8 MODÈLE CONCEPTUEL 59

8.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN MODELE 59

8.2 CODE DE CALCUL 61

8.3 MODELE HYDROGEOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT HYDROGEOLOGIQUE DE LA SENSEE 61
8.3.1 L'extension du modèle 61
8.3.2 Maillage du modèle 64
8.3.3 Topographie du bassin versant 66
8.3.4 Géométrie des couches du modèle 67
8.3.5 La craie 67
8.3.6 Les sables tertiaires 72
8.3.7 Les alluvions 72
8.3.8 Les limites du modèle 72
8.3.9 Les données d'entrée du modèle 72
8.3.10 Les données de contrôle du calage 82

9 RESULTATS DU CALAGE DU MODELE 83

9.1 PRINCIPES DU CALAGE 83

9.2 PERIODE DE CALAGE ET PAS DE TEMPS 83

9.2.1 Régime permanent 83

9.2.2 Régime transitoire 84

9.3 CALAGE DU MODELE EN REGIME PERMANENT 84

9.4 CALAGE DU MODELE EN REGIME TRANSITOIRE 88

9.4.1 Coefficient d'emmagasinement 88

9.4.2 Echanges nappe-réseau hydrographique 91

9.4.3 Ratio pluie infiltrée, pluie ruisselée 94

9.4.4 Calage de la piézométrie 95

9.4.5 Calage des débits de rivière 99

9.5 ENSEIGNEMENTS DU CALAGE 102

9.5.1 Bilan des échanges hydrauliques globaux 102

9.5.2 Entités de fonctionnement dans le bassin-versant 104

9.5.3 Eléments du bilan 107

9.5.4 Fonctionnement en hautes eaux 107

10 SIMULATIONS 108

10.1 SIMULATION N°1 : ARRET DES PRELEVEMENTS SUR LE TERRITOIRE DU SAGE 108

10.2 SIMULATION N°2 : MISE EN PLACE D'UN NOUVEAU CHAMP CAPTANT A HAMBLAIN-LES-PRES 114

10.3 RESUME DES SCENARII TESTES 119

10.4 RECOMMANDATIONS POUR LE SAGE 120

Figure 1. Tronçons modélisés dans la simulation hydraulique 11
Figure 2. Pluviomètres retenus pour la modélisation hydrologique 16
Figure 3. Découpage en sous-bassins versants pour le modèle hydrologique 17
Figure 4. Localisation des points d'injection des apports issus de la modélisation hydrologique 18
Figure 5. Schématisation d'un profil en travers 20
Figure 6. Exemple de découpage en casiers sur l'Agache à Sauchy 21
Figure 7. Vue en plan du sous-modèle Sensée amont (SAM) 23
Figure 8. Vue en plan du sous-modèle Sensée aval (SAV) 24
Figure 9. Carte de localisation des points de calage du modèle 31
Figure 10. Localisation des points de calage pour chaque crue modélisée 33
Figure 11. Schématisation des deux entités du modèle hydrologique générant le ruissellement 35
Figure 12. Les 3 composantes intervenant dans la constitution des hydrogrammes des crues de mars 36
Figure 13. Les 2 composantes intervenant dans la constitution des hydrogrammes de l'orage d'août 36
Figure 14. Exemple de calage de la Sensée amont à Etaing en mars 2001 (hydrogramme) 37
Figure 15. Exemple de calage de la Sensée aval sur le fossé de Paillencourt en août 2008 (hydrogramme) 37
Figure 16. Pluies horaires à Epinoy pour les trois crues modélisées 41
Figure 17 Répartition spatiale des pluies de l'événement d'août 2008 42
Figure 18. Productivité des sous bassins versants naturels d'apport 44
Figure 19. Propagation des hydrogrammes de crue en mars 2001 47
Figure 20. Zones inondées sur la Sensée amont en mars 2001 49
Figure 21. Lignes d'eau calculées pour les trois crues simulées sur la Sensée aval à partir du marais du Bac 50
Figure 22. Limnigrammes aux stations de la Sensée aval pendant les trois ans de mesures 52
Figure 23. Hydrogrammes comparés des points Pt07 et Pt08 pendant les trois crues simulées 54
Figure 24. Hydrogrammes d'apport dans le canal de la Sensée en crue 56
Figure 25. Hydrogrammes d'apport dans le canal de l'Escaut en crue 57
Figure 26. Traduction du modèle conceptuel en modèle mathématique 60
Figure 27. Limites du bassin-versant hydrogéologique. Données piézométriques : Agence de l'Eau Artois Picardie 62
Figure 28. Localisation et extension du domaine modélisé (le réseau hydrographique est signalé comme repère. Il ne correspond pas systématiquement aux éléments entrés dans le modèle) 63
Figure 29. Maillage du modèle 65
Figure 30. Modèle numérique de terrain utilisé pour le modèle hydrogéologique 66
Figure 31. Carte géologique schématique du bassin-versant hydrogéologique. Localisation du profil géologique de la Figure 32. 69
Figure 32. Coupe Nord-Sud du bassin-versant, présentée dans le rapport de phase 3 70

Figure 33. Traduction de la coupe nord-sud de la figure précédente dans le modèle conceptuel 71
Figure 34. Retard pluviométrie/réaction de la piézométrie 74
Figure 35. Répartition des pluies infiltrées 75
Figure 36. Représentation du réseau hydrographique sous Visual Modflow, localisation des points de prélèvement 77
Figure 37. Réseau hydrographique : synthèse de la répartition des cotes introduites dans le modèle (m NGF IGN69) et variations annuelles moyennes des niveaux de la Sensée (2005-2008) 79
Figure 38. Rythmes de pompage appliqués au modèle hydrogéologique (total sur l'ensemble du bassin versant hydrogéologique des débits journaliers ; les moyennes ont été calculées au pas de temps mensuel) 81
Figure 39. Répartition des perméabilités de la craie aquifère (couche 2) 85
Figure 40. Écarts entre cotes calculées et mesurées en régime permanent (novembre 2005) . 87
Figure 41. Répartition des coefficients d'emmagasinement dans la couche de craie aquifère. . 89
Figure 42. Répartition des coefficients d'emmagasinement dans la couche de craie moins aquifère. 90
Figure 43. Potentiel d'échange entre les éléments rivières/drains et la nappe de la craie..... 93
Figure 44. Réseau piézométrique 97
Figure 45 . Débits calculés et mesurés. 100
Figure 46. Points de mesure des débits utilisés pour le calage du modèle hydrogéologique. . 101
Figure 47. Bilan des échanges hydrauliques globaux sur le territoire du SAGE. 103
Figure 48. Synthèse 106
Figure 49. Bilan des prélèvements pour l'année 2007. Données : Agence de l'Eau Artois Picardie. 109
Figure 50. Différentiel piézométrique calculé pour l'étiage 2006 (février 2006) entre la situation réelle et la situation fictive sans pompage. 110
Figure 51. Bilan des échanges hydrauliques dans le cas d'une absence de prélèvements souterrains sur le territoire du SAGE. 112
Figure 52. Emplacement et détails du champ captant simulé. 115
Figure 53. Impacts des prélèvements supplémentaires sur la piézométrie. 116
Figure 54. Bilan des échanges hydrauliques dans le cas d'un prélèvement supplémentaire de 9600 m^3/j le long du Trinquise. 118
Figure 55. Résultats des analyses hydrobiologiques 2005 à 2007 (IBGN) 121
Figure 56. Echanges potentiels entre la nappe et la rivière 122

Tableau 1. Ecarts entre les débits de pointe mesurés et générés par le modèle hydrologique . 38
Tableau 2. Ecarts entre les débits ponctuels mesurés (hors pics de crue) et les résultats du modèle 38
Tableau 3. Ecarts entre les mesures ponctuelles de cote d'eau et les résultats du modèle hydraulique..... 39
Tableau 4. Constitution hydrologique des débits de pointe..... 43
Tableau 5. Principales pertes de charge en crue des ouvrages hydrauliques et ponts 51
Tableau 6. Chroniques piézométriques disponibles pour le calage du modèle 82
Tableau 7. Valeurs de recharge introduites pour le calage du modèle en régime permanent sur la situation de l'étiage 1997. 83
Tableau 8. Perméabilités retenues pour les couches 1 et 3..... 86
Tableau 9. Evolution du ratio pluie infiltrée/pluie ruisselée..... 95
Tableau 10. Résumé des scénarii testés par le modèle hydrogéologique..... 119

1 CADRE ET OBJET DU RAPPORT

1.1 CONTEXTE DE L'ETUDE

Une démarche contrat de rivière a été engagée sur le bassin versant de la Sensée à la fin des années 80, autour de la problématique de l'envasement des étangs de Lécluse, premiers étangs situés en amont d'une succession d'autres étangs et de zones humides.

Le contrat de rivière de la Sensée a été signé en 1992 par une partie des communes du bassin versant (communes riveraines des cours d'eau).

Dans ce cadre, deux études portant sur l'hydraulique ont été réalisées : l'Etude d'Aménagement Intégré en 1993 – 1994, complétée par la suite par une étude plus opérationnelle, l'Etude Préalable aux Travaux de Réhabilitation du Milieu.

Un programme de travaux a été élaboré à partir des conclusions de ces deux études ; deux premiers chantiers ont été conduits sur la Sensée aval, mais le manque de données permettant de mesurer l'impact des travaux prévus (curage, réalimentation de la Sensée aval) a eu pour conséquence l'arrêt de ces travaux.

La persistance de problèmes et de dysfonctionnements hydriques sur l'ensemble du bassin ont montré la nécessité de réaliser une étude hydraulique globale sur le bassin versant de la Sensée.

Le contrat de rivière a pris fin le 13 décembre 1999. La suite donnée à ce contrat est un Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) sur le bassin versant de la Sensée. La présente étude hydraulique globale est réalisée dans le cadre de l'élaboration du SAGE de la Sensée.

1.2 OBJETS DE L'ETUDE

L'étude hydraulique globale comporte six parties :

1. <u>Action pilote sur l'amont du bassin versant de la Sensée</u>
   Pour l'amont du bassin versant de la Sensée, il s'agit de proposer une action pilote permettant la reconquête du chevelu de fossés actuellement détruit, ainsi que des mesures complémentaires favorisant l'infiltration de l'eau et la réduction de l'érosion des sols et de l'envasement des cours d'eau.

2. Tableau de bord et réseau de mesures

   Il s'agit de mettre en place un tableau de bord, étape nécessaire à la réalisation des phases suivantes de cette étude hydraulique globale (parties 3, 4 et 5). L'élaboration de ce tableau de bord passe par la mise en place et le suivi d'un réseau pertinent et cohérent de mesures quantitatives et qualitatives (niveaux piézométriques, niveaux des cours de l'eau, débits, paramètres permettant d'évaluer la qualité de l'eau) sur la rivière Sensée, ses affluents et les nappes.

3. Analyse, compréhension du fonctionnement hydraulique et identification des interrelations entre les éléments du bassin versant de la Sensée

   A partir des données existantes et à l'aide du tableau de bord nouvellement constitué, il s'agit d'élaborer un rapport décrivant le fonctionnement hydrique du bassin versant et identifiant les interrelations entre les différents éléments de ce bassin (étangs, cours d'eau et nappes souterraines).

4. Modélisation du fonctionnement hydraulique et hydrogéologique de la Sensée

   En vue d'approfondir ces connaissances, deux modèles mathématiques sont élaborés : hydraulique et hydrogéologique. Il s'agit également de comprendre les causes des différents dysfonctionnements constatés sur le terrain et d'évaluer les impacts occasionnés par les prélèvements en eau dans les nappes.

5. Etude des différents aménagements et outils de gestion

   Au vu des éléments précédents, il s'agit :

   - de définir un programme de travaux de restauration et d'aménagement des cours d'eau afin de solutionner, dans une optique de durabilité, les problèmes constatés et d'écarter l'émergence d'autres dysfonctionnements,
   - d'étudier les possibilités d'une éventuelle réalimentation en eau de la Sensée aval par le biais du canal, permettant ainsi de conserver un niveau d'eau respectable en période d'étiage, et d'éviter la mise en péril des zones humides,
   - d'élaborer un plan de gestion coordonné des niveaux des eaux concernant l'amont et l'aval jusqu'à la confluence avec l'Escaut. Ce plan est destiné à mettre fin à la gestion sectorisée et anarchique des milieux aquatiques et à contrôler en temps réel le niveau des eaux superficielles.

6. Synthèse générale de l'étude

1.3 OBJET DU PRESENT RAPPORT

Le présent rapport est relatif à la partie 4 de l'étude : « Modélisation du fonctionnement hydraulique et hydrogéologique de la Sensée ».

Cette partie a pour objet d'approfondir les connaissances relatives au fonctionnement du bassin. La modélisation hydraulique vise à analyser les relations entre cours d'eau et plans d'eau et à comprendre les raisons des différents dysfonctionnements constatés (notamment les causes des inondations). La modélisation hydrogéologique vise à préciser les relations entre les nappes et le réseau surfacique et à évaluer les impacts occasionnés par les prélèvements en eau dans les nappes.

Ultérieurement (5ème partie de l'étude), le modèle hydraulique sera utilisé pour tester les aménagements envisageables.

1ère partie : Modélisation hydraulique

2 DEMARCHE MISE EN ŒUVRE

2.1 COURS D'EAU MODELISES

Les cours d'eau modélisés ont été choisis à l'issue de la Partie 3 de l'étude. Au regard de l'analyse des différentes problématiques qui y sont évoquées, il a été retenu de modéliser les tronçons de cours d'eau suivants (voir Figure 1) :

- la Sensée amont à partir d'Etaing jusqu'à l'aval, au confluent avec le canal du Nord ;
- la Sensée aval à partir du siphon d'Oisy-le-Verger jusqu'à l'aval, au confluent avec le canal de l'Escaut ;
- l'Agache à partir de Marquion jusqu'à l'aval, au confluent avec la Sensée ;
- l'Hirondelle à partir de sa traversée du marais Becquerel jusqu'à l'aval, au confluent avec l'Agache.

Tous les plans d'eau traversés par ces cours d'eau ou en connexion avec eux (via des buses ou des bras d'alimentation) sont également retranscrits dans le modèle hydraulique.
Ainsi, un linéaire total de 45 km environ est modélisé.

Du fait de l'indépendance hydraulique totale entre la Sensée amont et la Sensée aval, le modèle hydraulique de la Sensée est découpé en deux sous-modèles hydrauliques distincts : la Sensée amont (dans la partie rosée de la figure ci-dessous) et la Sensée aval (dans la partie jaune). Les deux sous-modèles pourront toutefois être reconnectés ultérieurement si besoin (pour tester une hypothèse de réalimentation de la Sensée aval par exemple).

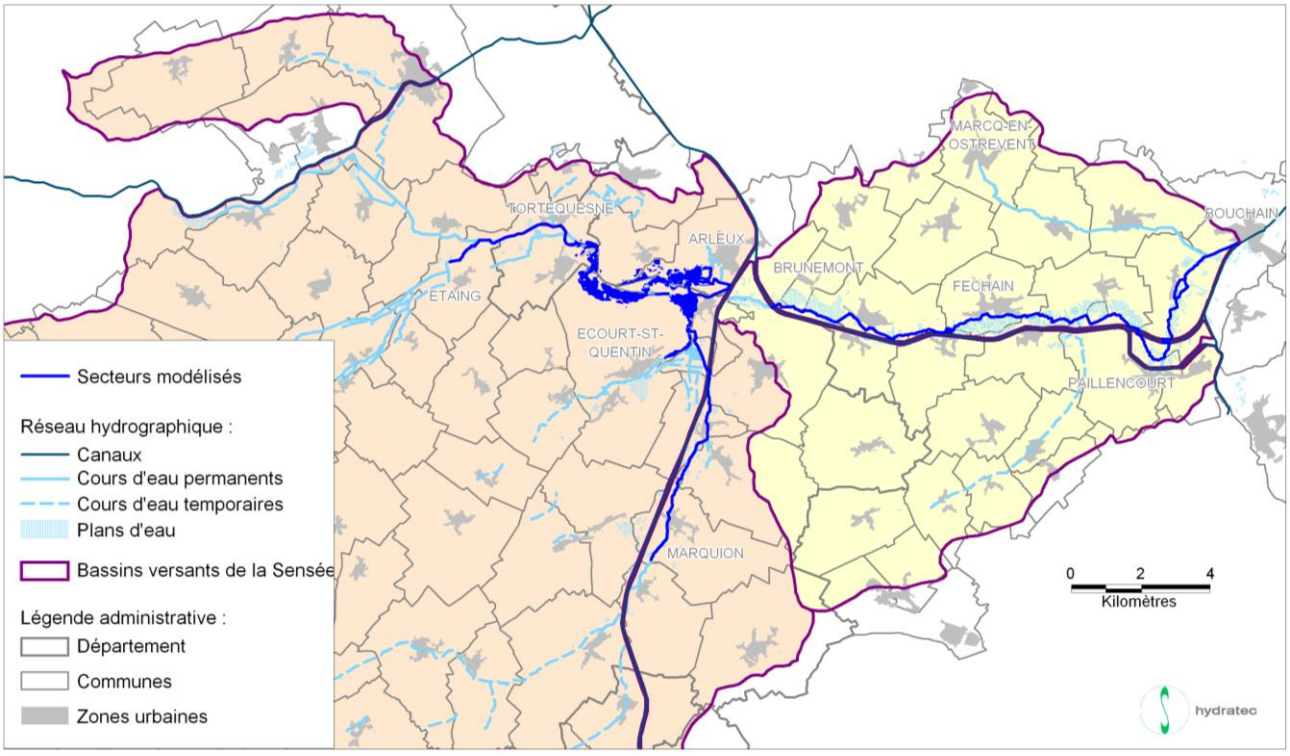


Figure 1. Tronçons modélisés dans la simulation hydraulique

Les tronçons de cours d'eau en amont des secteurs modélisés et les autres affluents ne sont pas modélisés car la problématique inondation par débordement de cours d'eau ou d'étang y est relativement absente (cf. rapport de Partie 3).

Les apports des affluents non modélisés et de l'ensemble du bassin versant sont toutefois pris en compte dans la modélisation hydraulique, puisque les débits apportés par ces affluents (issus du ruissellement et des apports de nappe) sont injectés dans le modèle hydraulique sous forme d'hydrogrammes (cf. explications § 2.4).

2.2 CRUES MODELISEES ET SITUATION PRISE EN COMPTE

Les crues historiques modélisées ont été choisies au regard des mesures hydrométriques exploitées dans la Partie 3 de l'étude. Il s'agit des crues de :

- **août 2008**, car c'est l'événement le plus important survenu pendant les trois ans de mesures réalisés pour l'étude (T=2 ans). Il s'agit d'un événement orageux d'été.
- **mars 2001**, car c'est la crue d'hiver la plus importante survenue depuis l'ouverture de la station hydrométrique d'Etaing (T=27 ans) ;
- **mars 1995**, car il s'agit d'un événement de période de retour intermédiaire (T=11 ans).

Ces trois crues étant de force et de genèse très différentes, elles serviront toutes trois au calage du modèle. On notera toutefois que les données de calage continues étant très peu nombreuses, il sera particulièrement délicat de caler le modèle, notamment celui de la Sensée aval (cf. § 5.1).

La situation prise comme référence (notamment dans l'optique de la comparer à des hypothèses de situations futures aménagées) est la situation actuelle. En particulier, les ouvrages hydrauliques sauvages pris en compte sont ceux présents lors des visites de terrain (janvier 2009) et du passage du géomètre (fin 2009). En particulier, des barrages sauvages non présents pendant ces reconnaissances peuvent être ajoutés illégalement dans le lit de la rivière, en été notamment.

2.3 TOPOGRAPHIE UTILISEE POUR LA CONSTRUCTION DU MODELE

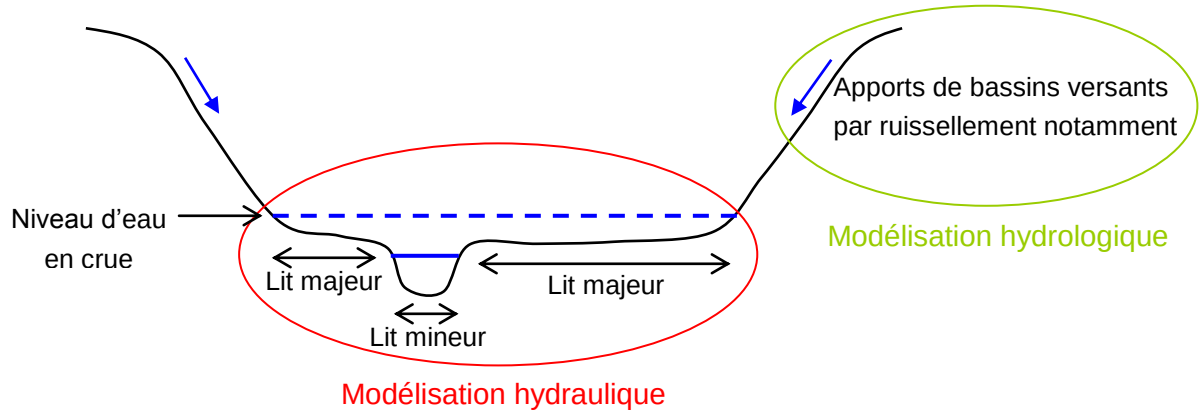
Lors de la Partie 3 de l'étude, un inventaire des levés topographiques existants a été réalisé. La seule topographie exploitable pour le modèle (car encore actuelle et suffisamment précise) concerne les siphons de passage sous les canaux.

Une campagne topographique a ensuite été lancée dans le cadre de la présente étude pour réaliser les levés nécessaires à la construction du modèle : profils en travers de lit mineur et de lit majeur, levés d'ouvrages hydrauliques (seuils, déversoirs…), de ponts et photogrammétrie du lit majeur. Ces levés topographiques ont été réalisés par le cabinet de géomètres-experts Axis Conseils.

Le modèle hydraulique est donc construit à partir de données de topographie actuelle.

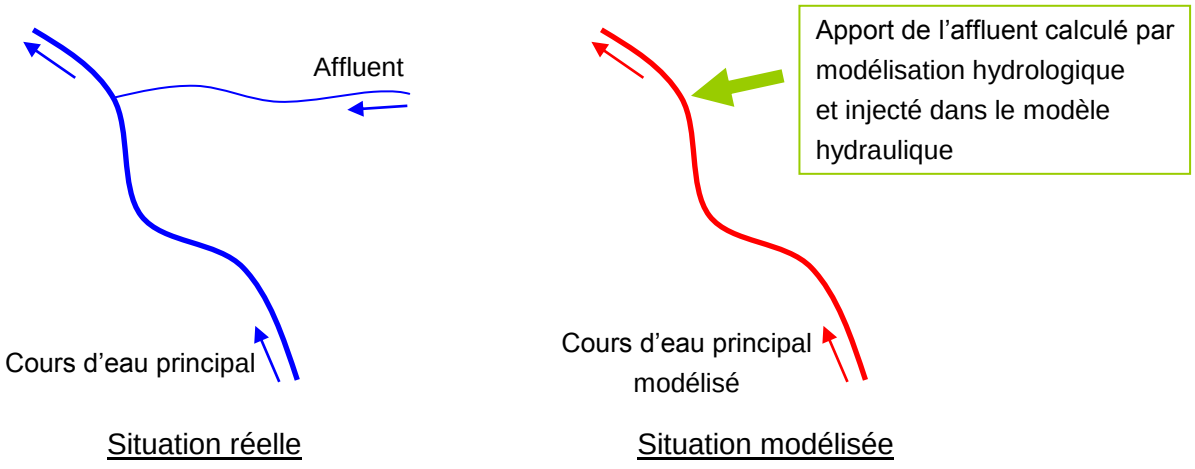
2.4 MODELISATION HYDRAULIQUE ET MODELISATION HYDROLOGIQUE

La modélisation hydraulique vise à schématiser les tronçons de vallées, c'est-à-dire leur lit mineur et leur lit majeur (plans d'eau inclus). Plusieurs modes de représentation peuvent être adoptés selon la configuration de la vallée modélisée (filaire, casier ou bi-dimentionnel).
La modélisation hydraulique permet de simuler le déplacement de l'onde de crue le long des cours d'eau, c'est-à-dire de retranscrire l'évolution des débits, des hauteurs d'eau et des vitesses au cours du temps en tout point des vallées modélisées.



La modélisation hydrologique permet de calculer les débits exutoires de bassins versants à partir de la pluviométrie d'événements donnés. Il s'agit en fait d'une quantification de l'eau qui s'en évacue par ruissellement, par ressuyage des terres ou par soutien de nappe. Plusieurs méthodes de calculs peuvent être adoptées selon la nature géologique des bassins versants (SCS modifié, méthode rationnelle, réservoir linéaire, hydrogramme unitaire…).
La modélisation hydrologique permet de comprendre le comportement de réponse du bassin versant aux précipitations, et de fournir les hydrogrammes d'apport à injecter dans le modèle hydraulique.

Ainsi, les cours d'eau qui ne figurent pas dans la modélisation hydraulique sont tout de même pris en compte dans la modélisation, puisque leurs débits d'apport sont calculés dans la modélisation hydrologique et intégrés au modèle hydraulique (voir illustration ci-dessous).



2.5 PRESENTATION DU LOGICIEL HYDRARIV UTILISE

HYDRARIV est un progiciel de modélisation hydrologique et hydraulique des espaces fluviaux. Il est conçu pour intégrer dans un même modèle des schémas de représentation contrastés, tels que la schématisation filaire, les casiers et les maillages bi dimensionnels. Cette souplesse permet d'adapter au mieux la modélisation à la spécificité des configurations rencontrées dans le domaine fluvial et aux objectifs de modélisation poursuivis.

HYDRARIV est une application totalement autonome, gérant tout à la fois la génération et l'édition des modèles via une interface graphique dédiée, le pilotage des calculs et l'exploitation des résultats. Elle est organisée autour d'un module de pilotage développé en VB6 et d'une base de données spécifique, interne à l'application : aucune licence externe n'est requise.

Le noyau de calcul est constitué par le logiciel HYDRA, développé et exploité par Hydratec depuis plus de 20 ans. Ce noyau englobe des algorithmes généraux intéressant les écoulements superficiels, il est utilisé dans plusieurs domaines d'intervention, dont l'hydraulique fluviale. La chaîne de simulation HYDRA est totalement transparente à l'utilisateur car elle est pilotée par l'interface d'HYDRARIV.

Les concepts de modélisation manipulés par HYDRARIV présentent un haut niveau d'intégration avec pour avantages :

- L'ergonomie : la description d'un domaine fluvial est basée sur des schémas de modélisation diversifiés accordant une grande latitude de choix au modélisateur selon sa compréhension du fonctionnement hydraulique du système modélisé. Par ailleurs HYDRARIV est conçu pour fonctionner dans un environnement WINDOWS. Il respecte les « guides de style Windows », ainsi que les règles d'ergonomie des environnements Windows.
- La fiabilité et la robustesse : la génération d'un modèle hydraulique subit de nombreux contrôles de cohérence des données et active automatiquement les options de calcul les plus appropriées aux caractéristiques du modèle défini par l'utilisateur,
- La performance : l'organisation interne des entités de modélisation est entièrement prise en charge par des programmes de génération spécifiques. Ceux-ci sont conçus pour optimiser la taille des systèmes matriciels et donc minimiser les temps de calcul.

Toutes les informations complémentaires sur le logiciel HYDRARIV sont accessibles sur le site internet : http://www.hydratec-software.com/.

3 MODELISATION HYDROLOGIQUE

La modélisation hydraulique de la présente étude est réalisée à l'aide du logiciel de modélisation fluvial HYDRARIV, logiciel sous licence Hydratec.

Comme expliqué au paragraphe 2.4, la modélisation hydrologique permet de « convertir » les hauteurs de pluie mesurées (par Météo France) en débit à l'exutoire d'un bassin versant. Cette modélisation permet d'obtenir tous les hydrogrammes d'entrée et intermédiaires des rivières modélisées sur le bassin versant.

La démarche a été la suivante :

1. Choix des pluviomètres et recueil des données pluviométriques sur chaque pluviomètre ;
2. Découpage du bassin versant de la Sensée en sous-bassins de modélisation hydrologique sur lesquels les calculs seront menés individuellement ;
3. Mise en œuvre du modèle de transformation pluie-débit (tâche effectuée en interne à HydraRiv).

3.1 DONNEES PLUVIOMETRIQUES RECUEILLIES

La localisation des pluviomètres retenus est donnée sur la carte suivante. Ils ont été choisis au regard de la répartition de la pluviométrie annuelle moyenne sur le bassin versant, de façon à ce que les données pluviométriques entrées dans le modèle hydrologique représentent le plus fidèlement possible cette répartition spatiale.

Tous les postes retenus ont des données pour les trois crues modélisées (mars 1995, mars 2001, août 2008), sauf le poste de Douchy-les-Ayettes, pour lequel les mesures prises lors de l'épisode de mars 1995 ne sont pas exploitables.

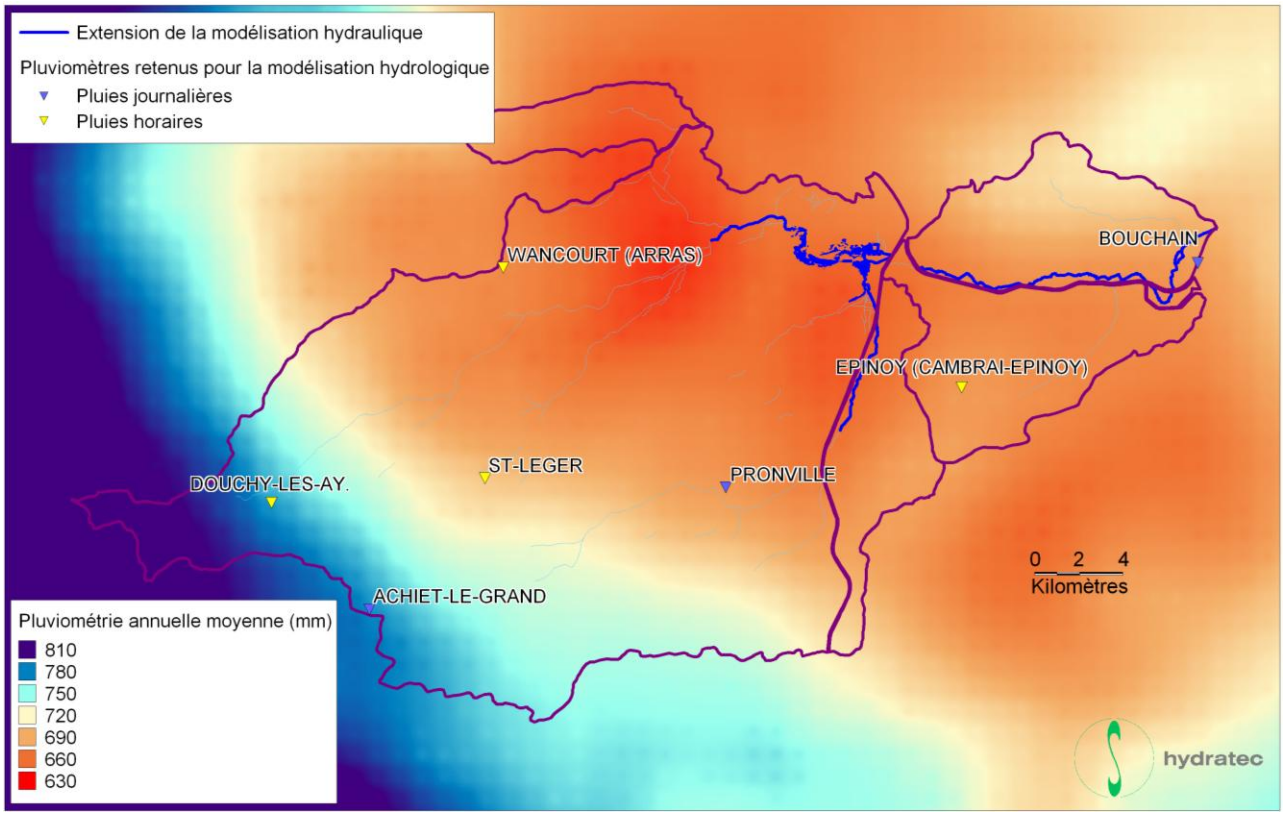


Figure 2. Pluviomètres retenus pour la modélisation hydrologique

Certains secteurs du bassin versant ayant des temps de réaction inférieurs à 24 heures, un recueil de données pluviométriques à pas de temps fin (pas de temps de 1 heure) a été entrepris sur les postes pluviométriques disposant de telles mesures (en jaune sur la figure précédente).

Pour les trois postes sur lesquels ces données horaires ne sont pas disponibles (en bleu sur la figure précédente), les précipitations journalières ont été recueillies et discrétisées au pas de temps horaire suivant la même répartition que celle constatée au poste pluviométrique horaire le plus proche.

Le tracé des données de pluviométrie horaire recueillies est présenté en annexe 1, et les pluies journalières en annexe 2.

3.2 DECOUPAGE EN SOUS-BASSINS VERSANTS

Le débit à l'exutoire du bassin versant dépend notamment de :

- sa surface,
- la nature du sol,
- l'état de saturation du sol,
- des hauteurs de précipitations pendant l'événement.

Le découpage du bassin versant de la Sensée en sous-bassins versants d'apports doit donc être réalisé de telle sorte que ces paramètres soient homogènes au sein d'un sous-bassin versant. La répartition des pluies annuelles notamment doit être prise en compte (voir carte suivante).

La localisation des points d'entrée du modèle et des points de calage (stations hydrométriques notamment) est également utilisée pour ce découpage.

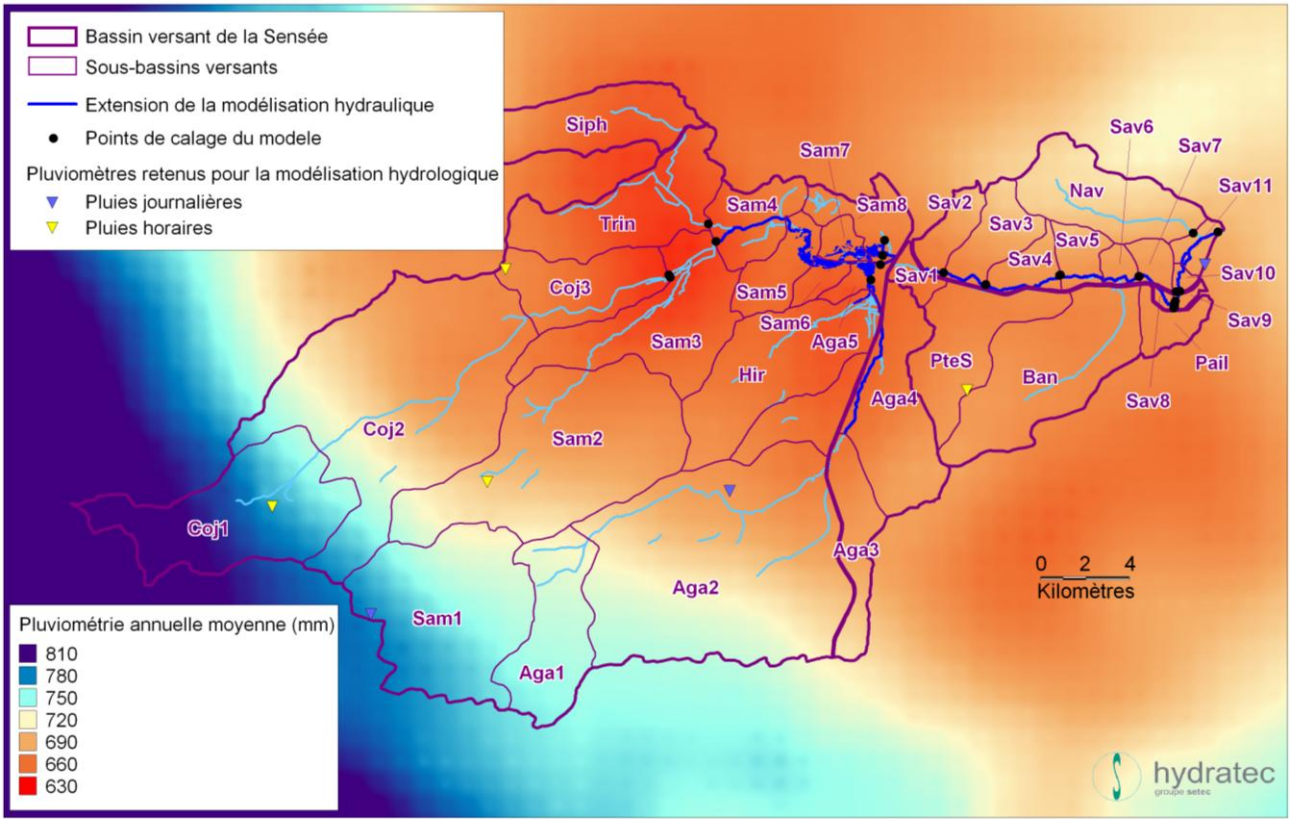


Figure 3. Découpage en sous-bassins versants pour le modèle hydrologique

Le bassin versant de la Sensée est ainsi décomposé en 34 sous bassins versants d'étude : 19 sur la Sensée amont, 15 sur la Sensée aval. Le découpage est affiné au niveau des cours d'eau, et plus lâche sur les têtes de bassins versants.

Aucun sous bassin versant n'est directement contrôlé par une station de mesure de débit en continu (i.e. aucune station de mesure de débit n'est présente à l'exutoire du sous bassin versant considéré). Le calage du modèle hydrologique devra donc se faire parallèlement au calage du modèle hydraulique (cf. § 5 Calage des modèles).

L'hydrogramme calculé à l'exutoire de chaque bassin versant est injecté dans le modèle hydraulique en un point d'injection (après un éventuel routage hydrologique prenant en compte le temps de transfert pour les sous-bassins lointains du point d'injection). Au total, il y a 27 points d'injection de débit dans les deux modèles Sensée (12 dans le BV amont et 15 dans le BV aval).

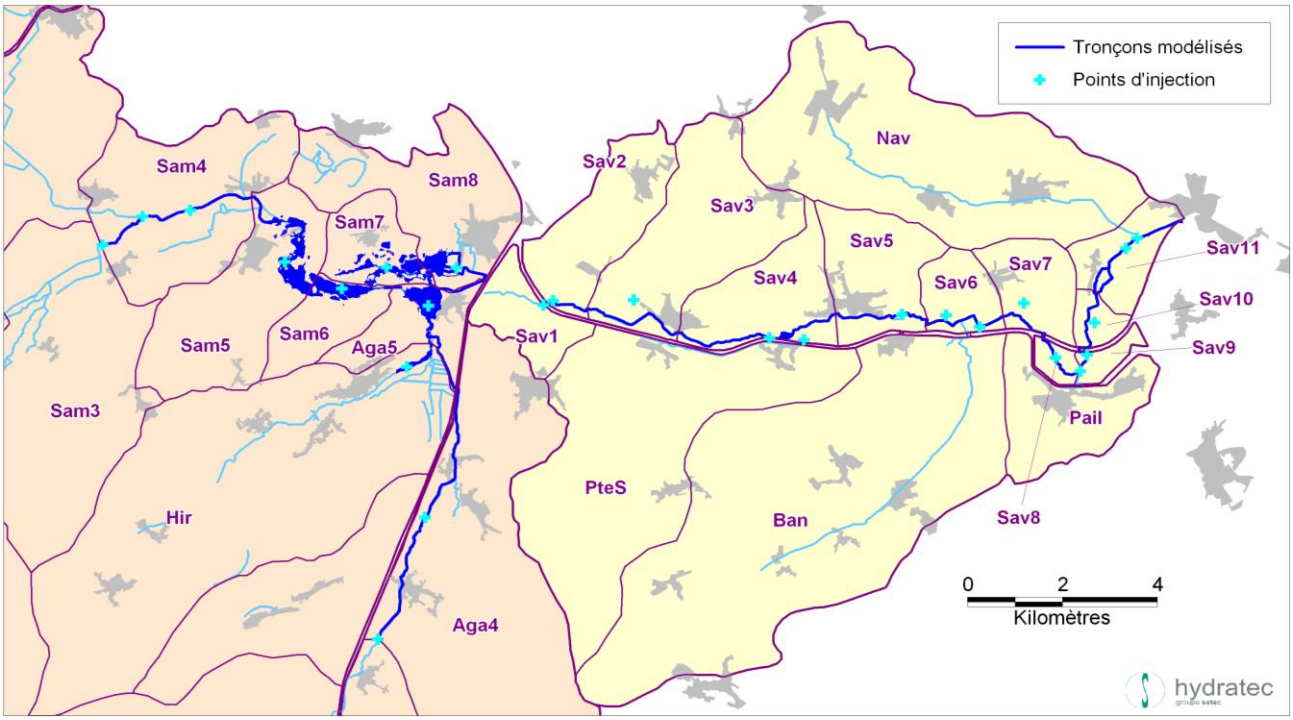


Figure 4. Localisation des points d'injection des apports issus de la modélisation hydrologique

3.3 MISE EN ŒUVRE DU MODELE PLUIE / DEBIT

A partir des chroniques de pluies enregistrées aux différents pluviomètres, le module de calcul hydrologique d'HydraRiv calcule un hyétogramme moyen tombant sur chaque sous-bassin versant. La méthode utilisée est l'interpolation par pondération des distances.

Ensuite, la fonction de production de la pluie nette sert à calculer la proportion des pluies brutes (mesurées) qui ruisselle. Dans le modèle de la Sensée, le modèle SCS est choisi pour effectuer ce calcul, puisqu'il est adapté aux bassins versants ruraux. Ce modèle tient compte explicitement du phénomène d'infiltration et de saturation du sol.
Les paramètres de calage intervenant dans le calcul sont la capacité d'interception du sol et le temps de ressuyage du sol.

Enfin, la fonction de production pluie-débit transforme l'hyétogramme des pluies nettes calculé précédemment en un hydrogramme à injecter dans le modèle hydraulique. Pour ce faire, la méthode de l'hydrogramme unitaire est employée. Elle est adaptée aux bassins versants ruraux.
Le calcul fait appel au temps de concentration notamment.

Les hydrogrammes calculés aux exutoires des sous-bassins versants sont ensuite sommés ou routés (transférés vers l'aval moyennant un retard de l'hydrogramme) ou directement injectés, selon la position du bassin versant considéré par rapport au point d'injection dans le modèle hydraulique.

4 PRESENTATION DU MODELE HYDRAULIQUE

La modélisation hydraulique de la présente étude est réalisée à l'aide du logiciel de modélisation fluvial HYDRARIV, logiciel sous licence Hydratec.

4.1 PRINCIPE

Deux représentations d'écoulement sont utilisées dans les modèles Sensée :

- les cours d'eau sont schématisés par des **domaines filaires**, caractérisés par une direction privilégiée d'écoulement le long de l'axe de vallée. Le domaine filaire représente le lit mineur et le lit majeur du cours d'eau. Il est défini à l'aide de **profils en travers** de la vallée.
- les plans d'eau traversés ou en connexion avec la rivière sont schématisés par des **casiers** : zones d'accumulation dans le lit majeur avec faible vitesse moyenne, où les transferts de débit sont conditionnés par des lois d'échange aux frontières. Les casiers sont des « cuvettes » définies par une loi de remplissage.
  Le lit majeur des biefs filaires peut également être modélisé par des casiers, lorsque le lit mineur est perché par rapport au lit majeur, c'est-à-dire lorsque les berges sont plus hautes que le terrain naturel avoisinant.

Plans d'eau, cours d'eau et lit majeur peuvent être reliés entre eux par des liaisons, dont les différents types traduisent les différentes natures de connexions existantes (buses, bras d'alimentation, déversoir…etc.).

Les apports de nappe le long des cours d'eau et plans d'eau modélisés, non négligeables dans la vallée de la Sensée, seront évalués à l'aide de la modélisation hydrogéologique, puis injectés dans le modèle hydraulique sous forme d'hydrogrammes (apports ponctuels), dont la répartition spatiale sera à déterminer.

4.2 CONSTRUCTION DU MODELE HYDRAULIQUE

4.2.1 Domaine filaire

Le domaine filaire représente le lit mineur et éventuellement le lit majeur du cours d'eau sur les tronçons modélisés.

Dans notre cas, il est défini à l'aide de **profils en travers** de la vallée relevés par le géomètre. Ce type de donnée topographique ne donne qu'une connaissance **discrète** du cours d'eau (en plusieurs points), et non une connaissance en continu sur tout le linéaire.

Les profils en travers entrés dans le modèle HydraRiv sont par ailleurs des **profils simplifiés** par rapport aux profils complexes levés par le géomètre (et déjà simplifiés par rapport à la réalité du terrain). La figure suivante illustre la transformation d'un profil « géomètre » (rouge) en un profil entré dans le modèle (bleu), défini par 6 couples de points dans le lit mineur et 4 points dans chaque lit majeur (points jaunes).

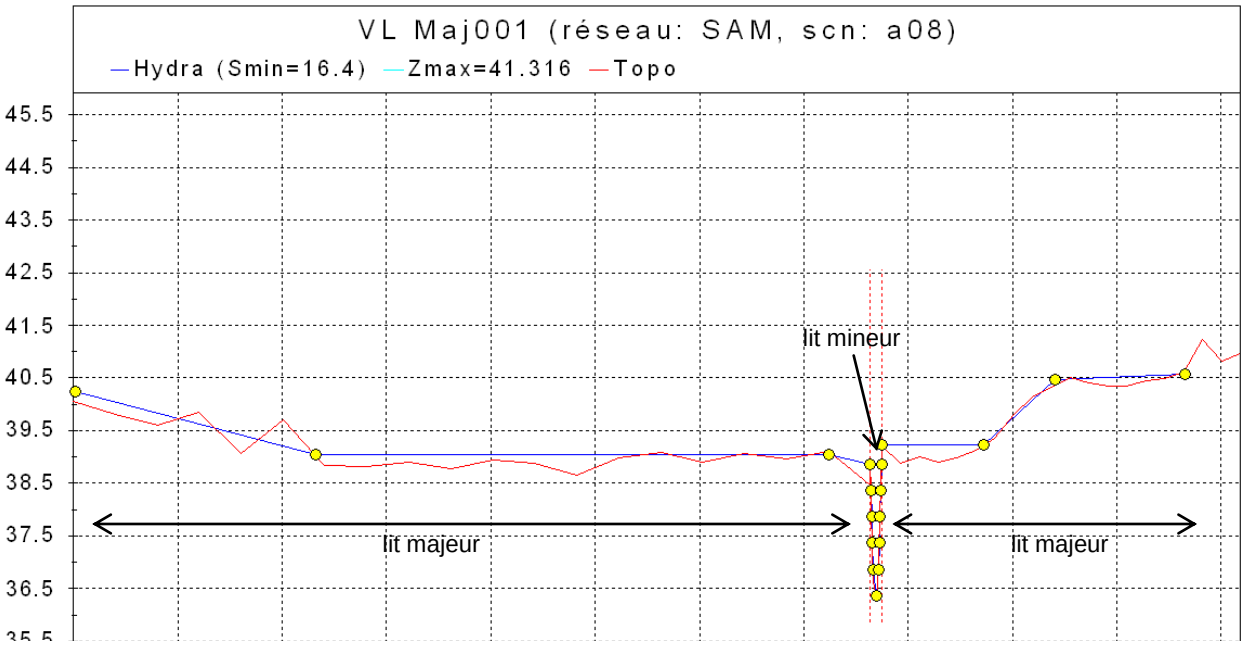


Figure 5. Schématisation d'un profil en travers

Une modélisation n'est donc pas une retranscription exacte de la réalité du terrain, **mais une schématisation de celle-ci**. L'exemple traite ici de la définition d'un profil en travers, mais des partis doivent être pris à tous les stades de la modélisation (ouvrages hydrauliques, ponts, casiers, points d'apport hydrologique…).

Les résultats de la modélisation devront donc être interprétés dans une **optique de connaissance globale**. La modélisation filaire à partir de profils en travers ne se prête donc pas à des analyses locales détaillées.

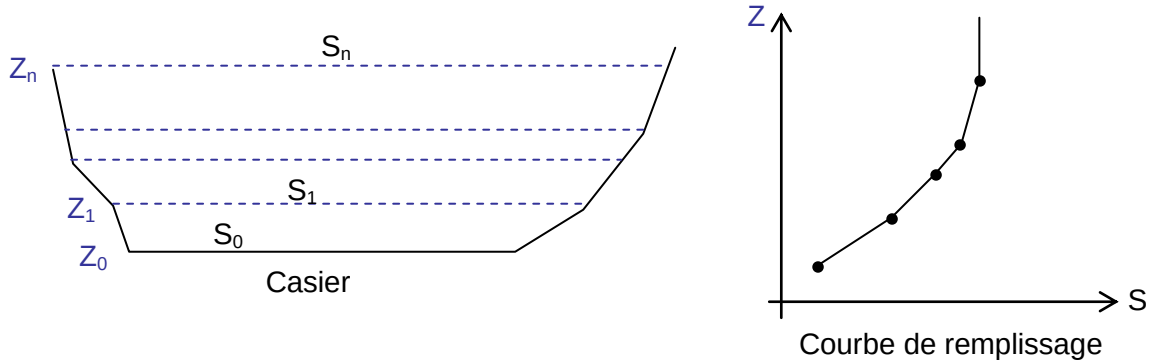
4.2.2 Domaine casier

Le domaine casier remplace le lit majeur du domaine filaire lorsque les écoulements y sont faibles ou lorsque le lit mineur est perché.

Le domaine casier est donc notamment adapté dans les cas suivants :

- plan d'eau endigué,
- lit majeur derrière remblai ou derrière une berge haute,
- villes importantes.

Les casiers sont définis par une loi de remplissage : surface en fonction de la cote altimétrique :



Cette information est issue de traitements cartographiques à partir de **semis de points** levés par photogrammétrie par le géomètre. La figure suivante illustre le découpage en casiers réalisé dans le lit majeur de l'Agache à Sauchy-Lestrée et Sauchy-Cauchy.

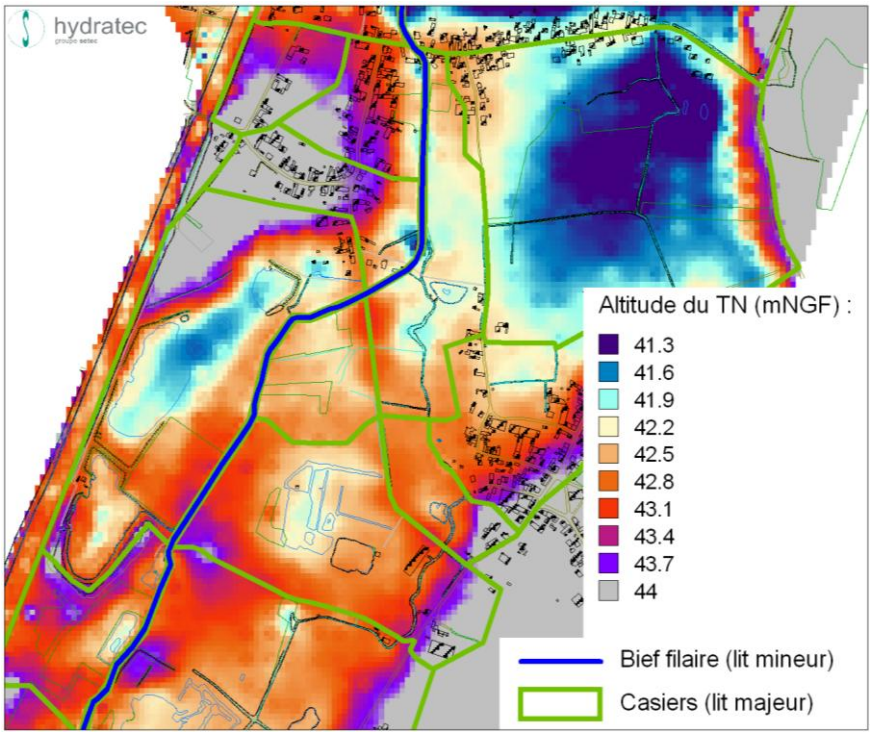


Figure 6. Exemple de découpage en casiers sur l'Agache à Sauchy

Les casiers sont connectés entre eux et avec la rivière à l'aide de **liaisons**. Il en existe différents types, selon la configuration topographique locale du terrain naturel.

4.2.3 Singularités

Les singularités hydrauliques traduisent généralement la présence d'un ouvrage hydraulique particulier dans le lit mineur du cours d'eau modélisé. Il peut notamment s'agir de :

- un point d'apport hydrologique,
- un pont créant une perte de charge,
- un seuil fontal,
- un vannage,
- un ouvrage de dérivation,
- un pompage…

HydraRiv dispose d'un panel de singularités hydrauliques ponctuelles permettant de **schématiser** ces différentes situations. Quelques singularités fréquemment rencontrées en modélisation hydraulique fluviale sont présentées dans le paragraphe 4.4.

4.3 PRESENTATION DES SOUS-MODELES HYDRAULIQUES SAM ET SAV

Le lit majeur des deux modèles Sensée est essentiellement représenté par des casiers, soit en raison de la présence de nombreux plans d'eau (le long de la rivière Sensée essentiellement), soit parce que la cote des berges des cours d'eau est plus élevée que le terrain naturel du lit majeur (Agache par exemple). Les seules portions du lit majeur représentées par des profils en travers sont :

- la Sensée amont entre Etaing et Tortequesne ;
- la Sensée amont à l'aval de la RD65 (pont des Prussiens) ;
- la rive droite de la Sensée aval à Oisy-le-Verger ;
- la Sensée aval à Aubigny-au-Bac.

Concernant le lit mineur, celui-ci est modélisé sous la forme de biefs filaires lorsque le tracé de la rivière est clairement identifié. Lorsque le cours d'eau se jette dans un plan d'eau, le cheminement est représenté par une succession de casiers reliés entre eux par des liaisons. C'est le cas notamment :

- à partir du décanteur de Tortequesne jusqu'aux étangs d'Arleux ;
- dans le marais du Petit Becquerel et dans l'étang de Palluel ;
- à la traversée du marais du Bac (Sensée aval).

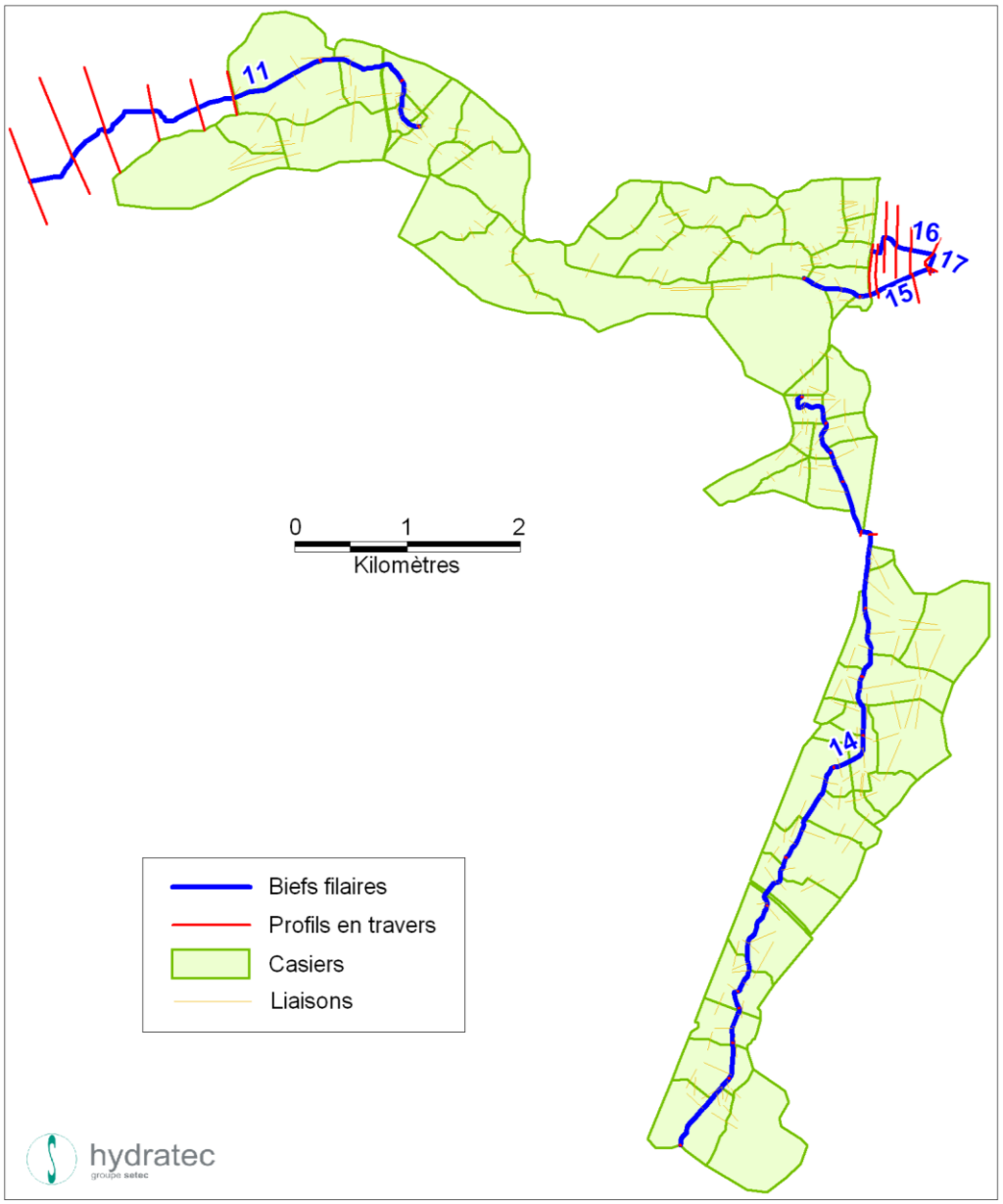


Figure 7. Vue en plan du sous-modèle Sensée amont (SAM)

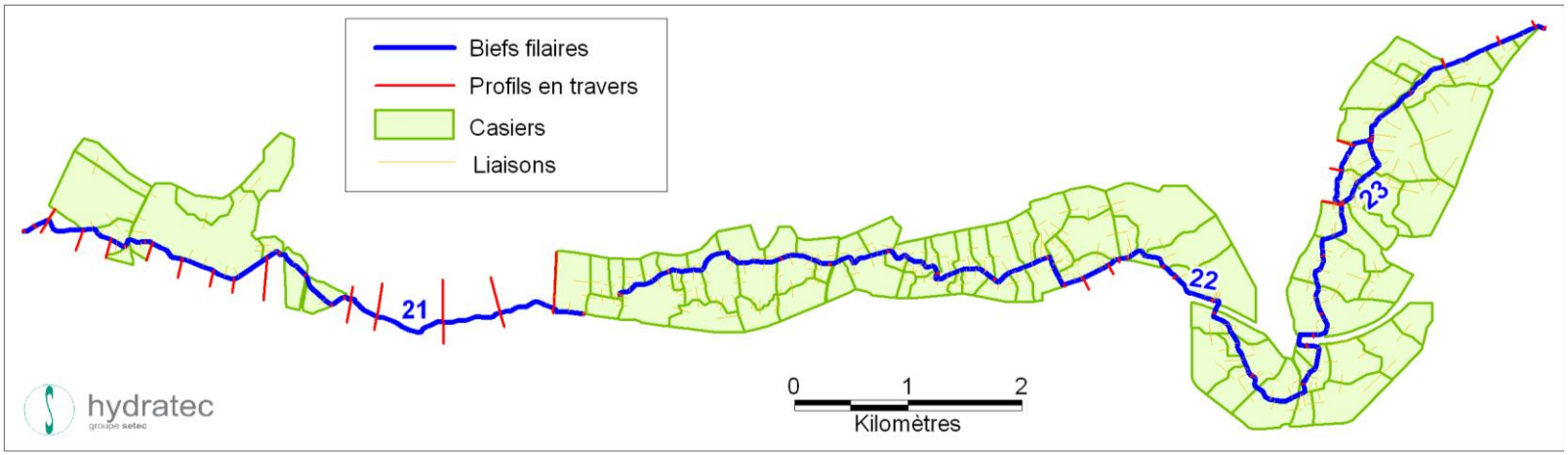
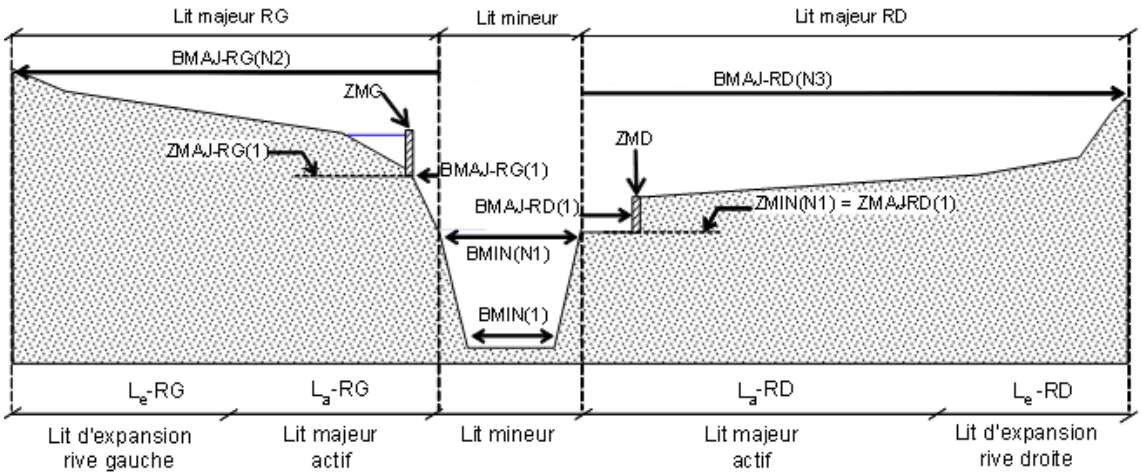


Figure 8. Vue en plan du sous-modèle Sensée aval (SAV)

4.4 EXEMPLES D'ENTITES MODELISEES

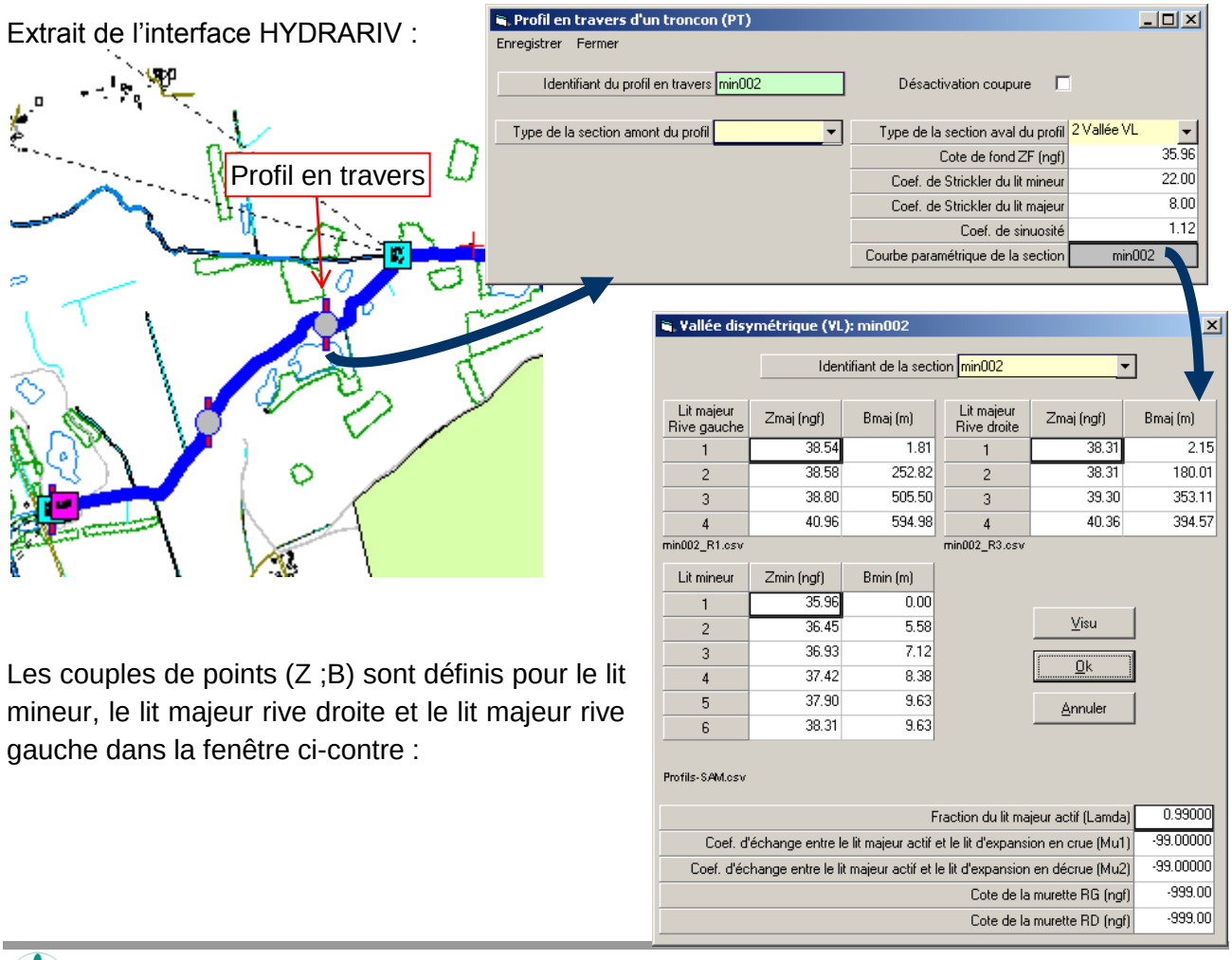
4.4.1 Profils en travers

Les profils en travers sont définis par des couples (cotes Z ; largeur B).



Dans le modèle hydraulique de la Sensée, ils sont définis par des tronçons de vallées dissymétriques :

Extrait de l'interface HYDRARIV :

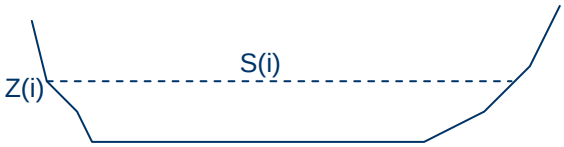


Les couples de points (Z ;B) sont définis pour le lit mineur, le lit majeur rive droite et le lit majeur rive gauche dans la fenêtre ci-contre :

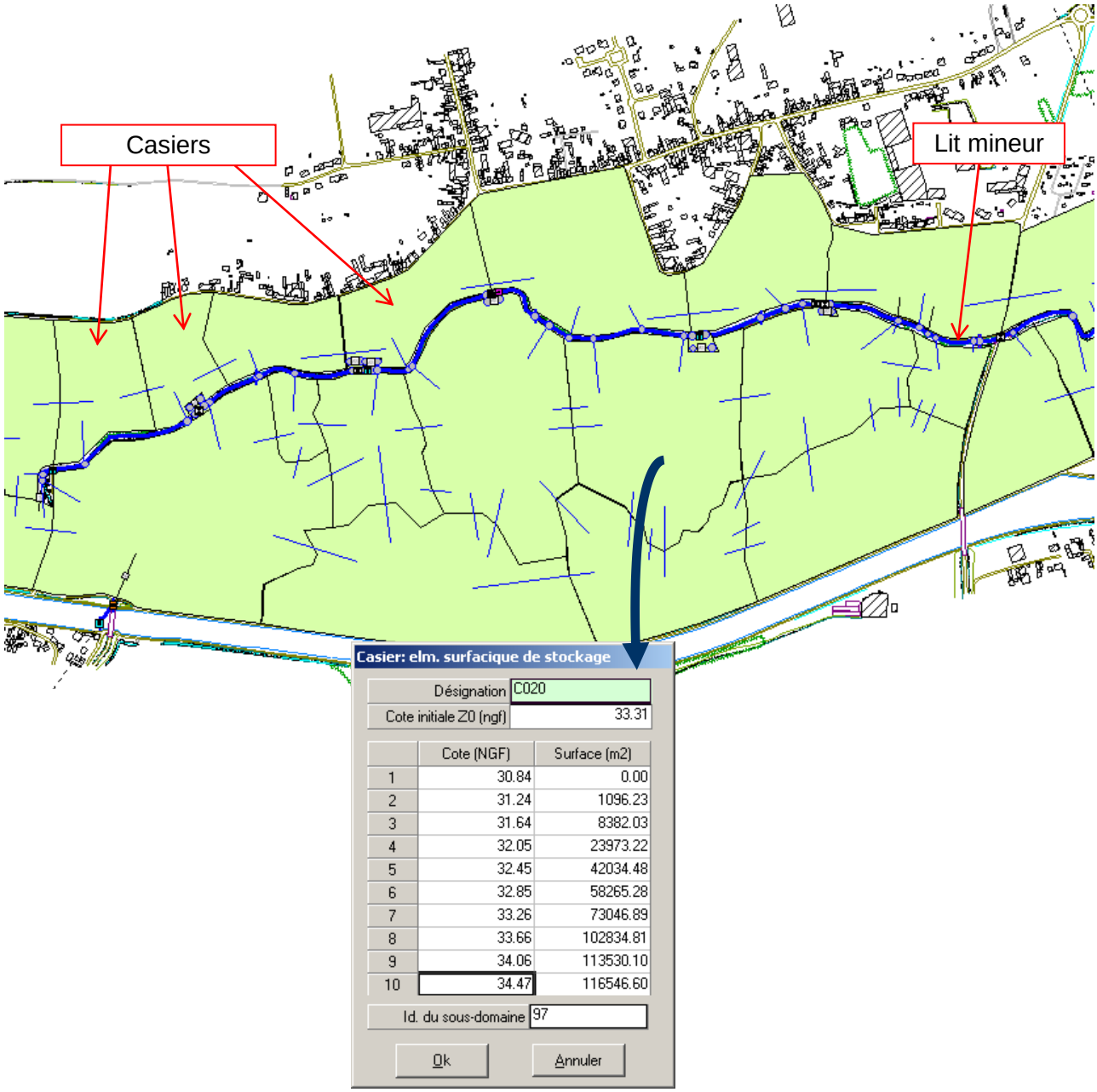
4.4.2 Casiers

<u>Secteur des marais de Féchain</u> :

Modélisation de casiers : zones de stockage où les vitesses d'écoulement sont faibles. Le casier est défini par une loi surface/cote :

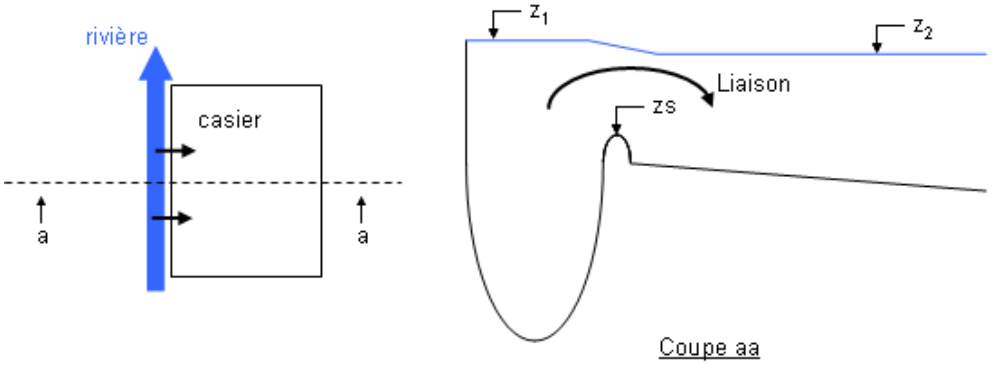


Extrait de l'interface HYDRARIV :

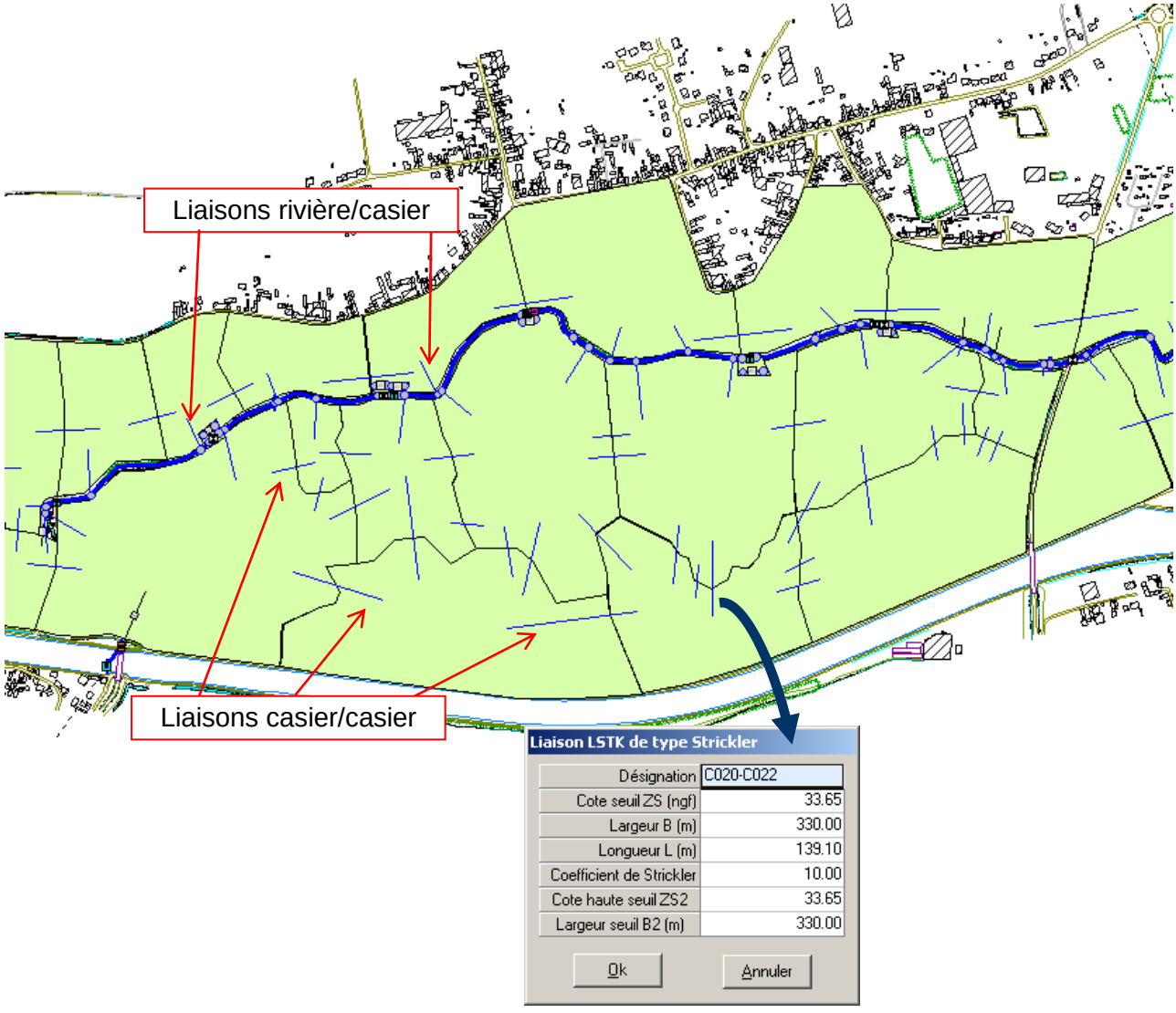


Le débit d'échange entre le lit mineur et le casier (et entre casiers) est contrôlé par une liaison dont le type dépend du contexte topographique local : seuil, orifice, frottement...

Par exemple, une liaison rivière/casier de type seuil est caractérisée par une cote de débordement (zs), une largeur, une longueur et un coefficient de frottement (débitance) :

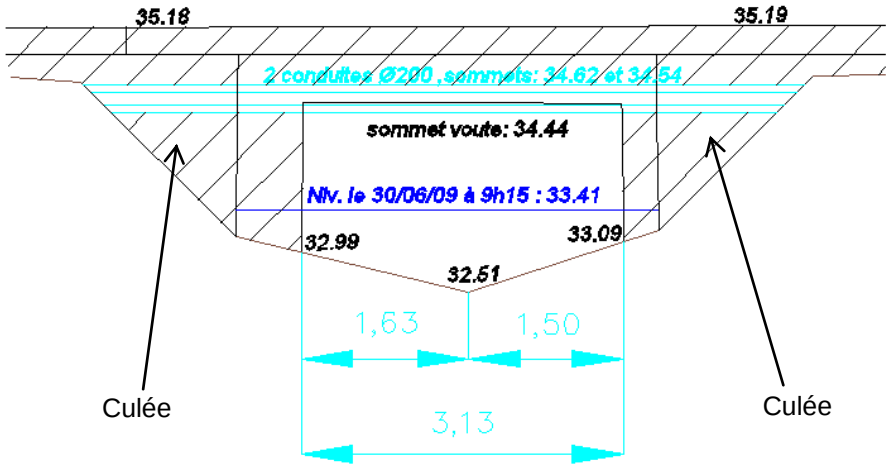


Extrait de l'interface HYDRARIV :



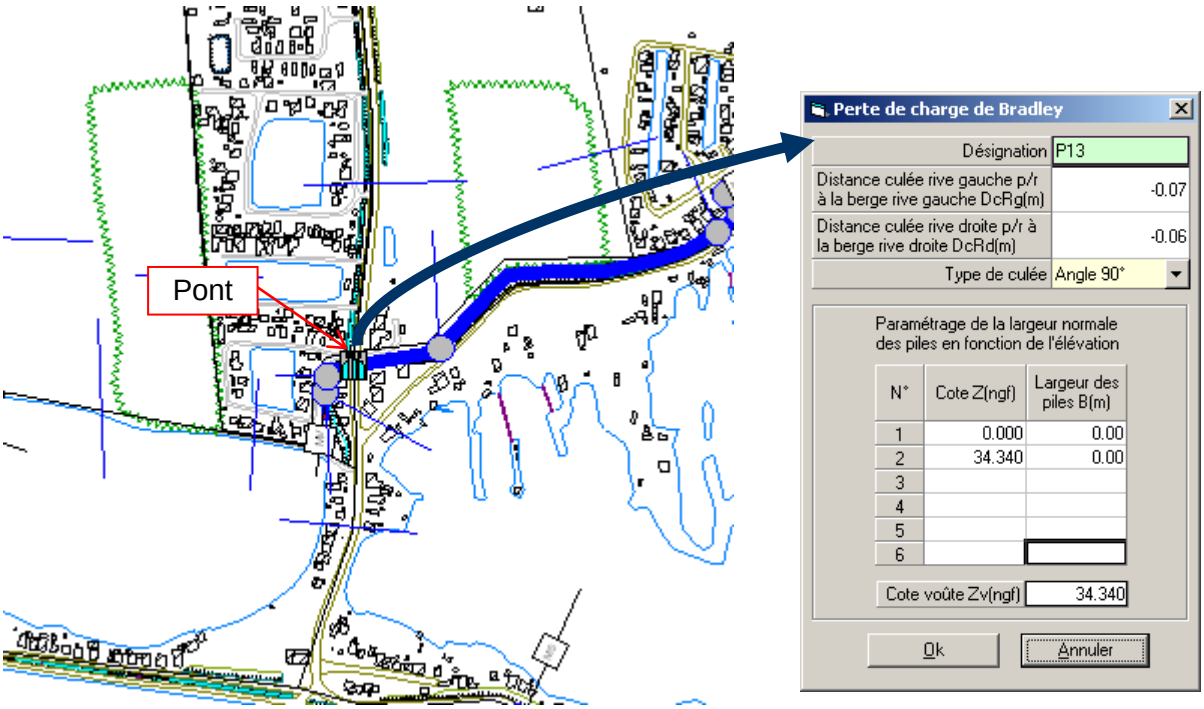
4.4.3 Ponts

Pont sous la D140 à Féchain :



L'ouvrage est modélisé à l'aide d'une perte de charge de type Bradley, prenant en compte la taille et l'emplacement des culées et des éventuelles piles du pont. Lorsque la cote d'eau en amont du pont dépasse la cote de voûte du pont, les équations de Bradley sont remplacées par des équations de type orifice.

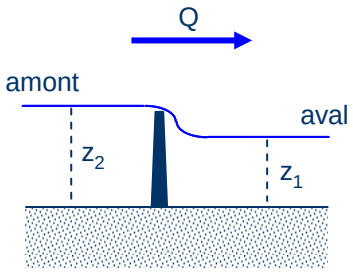
Extrait de l'interface HYDRARIV :



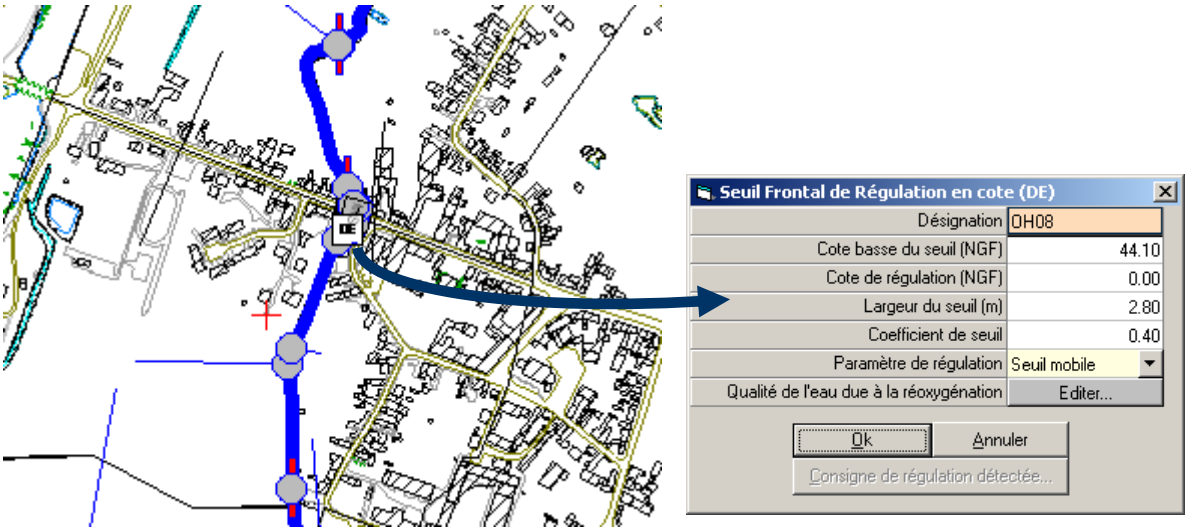
4.4.4 Barrages dans le lit mineur

Seuil à Marquion :

L'ouvrage maintient un niveau amont par un seuil frontal de largeur donnée :



Extrait de l'interface HYDRARIV :



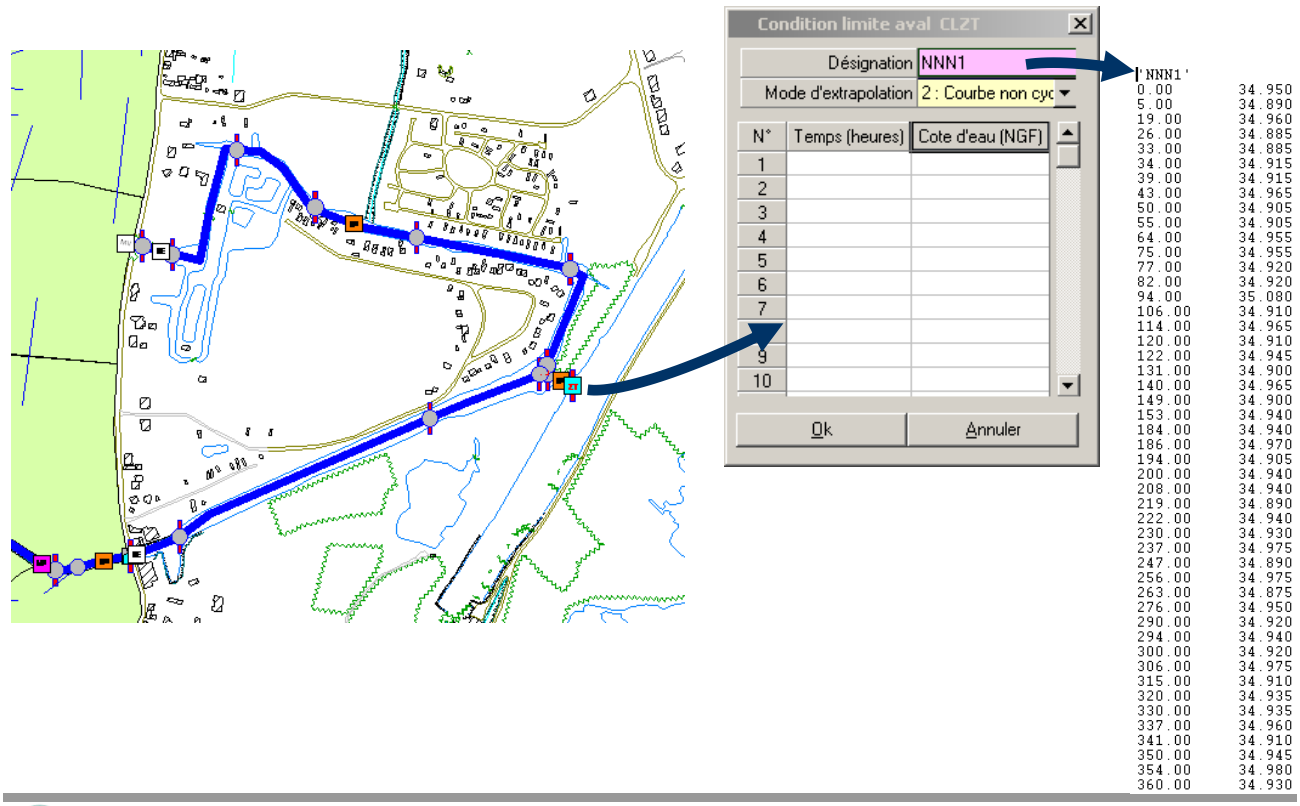
Ce module sert également à représenter les barrages frontaux régulés. Dans ce cas, en crue, lorsque le débit augmente, le barrage s'abaisse progressivement de façon à respecter la cote amont de consigne le plus longtemps possible.

4.4.5 Conditions limites aval

Les Sensée amont et aval ont leur exutoire dans un canal navigable : le canal de la Sensée pour la première, l'Escaut pour la seconde. Le niveau d'eau du canal de la Sensée influence donc le niveau d'eau de la Sensée amont, car celle-ci y est gravitairement connectée. Ce n'est pas le cas de la Sensée aval, car l'ouvrage de Bouchain maintient une chute d'eau importante entre la Sensée et l'Escaut.

Confluence Sensée amont – Canal de la Sensée

Pour les deux confluences, la condition limite aval est un limnigramme imposé (courbe cote – temps). Les VNF ont fourni les limnigrammes mesurés sur le bief Palluel – Gœulzin pour les crues a08 et m01. A défaut de données pour la Sensée aval et pour la Sensée amont en mars 95, la cote aval est prise constante et égale au NNN (Niveau Normal de Navigation).



5 CALAGE DES MODELES HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE

Le modèle est calé sur les trois scénarios hydrologiques, c'est-à-dire que pour ces événements, les paramètres du modèle sont ajustés de façon à ce que la modélisation reproduise le plus fidèlement possible les données mesurées (débits, hauteurs d'eau, volumes écoulés, temps de propagation).

5.1 DONNEES DISPONIBLES

Les données de calage disponibles, localisées sur la Figure 9, sont les suivantes :

- les chroniques de débits et de hauteurs d'eau instantanés (éventuellement plusieurs mesures par jour) mesurées à la station hydrométrique d'Etaing sur la Sensée amont à partir du 10/07/91 ;
- les chroniques de débits et de hauteurs d'eau instantanés ou hebdomadaires aux 11 stations de mesures implantées pour l'étude à partir du 21/09/05 (donc disponibles uniquement pour la simulation d'août 2008) ;
- les chroniques de débits journaliers (moyenne sur la journée) mesurées à la station d'Arleux sur le canal du Nord à partir du 01/01/05 ;
- des jaugeages ponctuels réalisés par la DIREN (1 à 2 mesures par mois au maximum) à partir des années 60 (notamment à Arleux et Palluel).

Par ailleurs, aucun repère de crue n'a été signalé dans les questionnaires adressés aux communes ni lors des entretiens ou visites de terrain. Ces données servent aussi au calage lorsqu'elles existent.

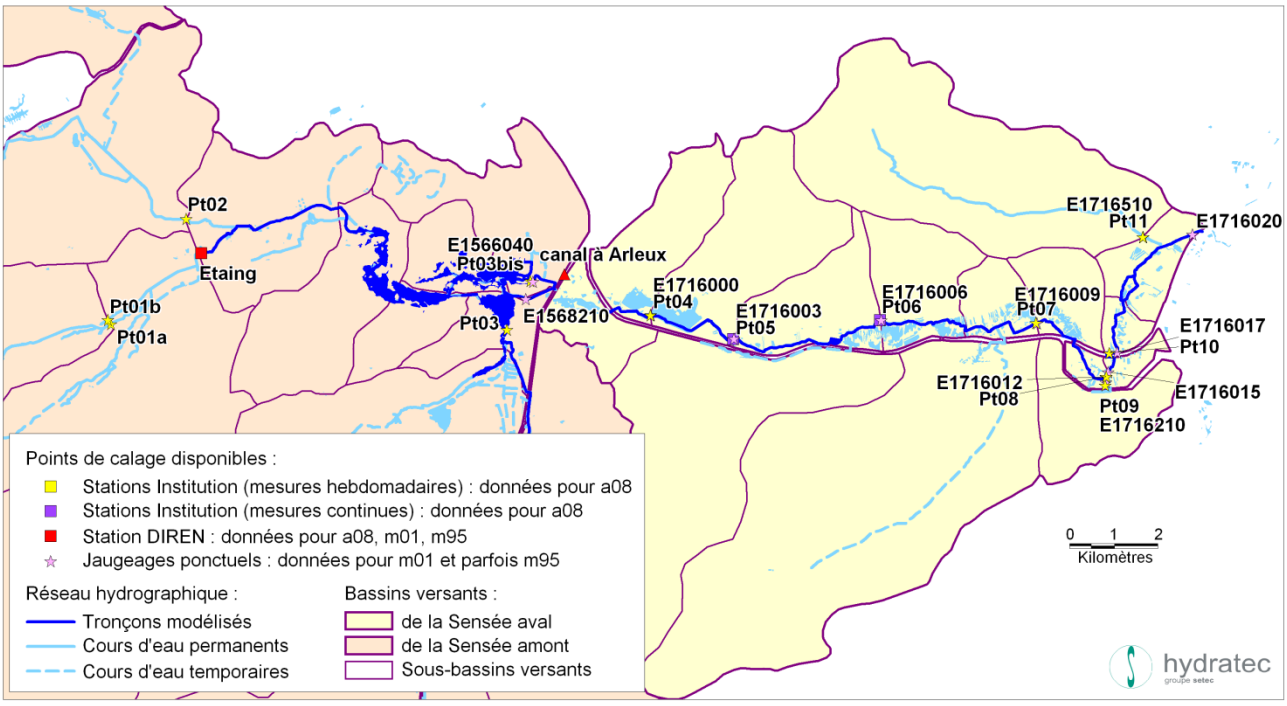


Figure 9. Carte de localisation des points de calage du modèle

Néanmoins, toutes les mesures existantes en théorie ne sont pas disponibles pour certaines crues ou pas exploitables :

- La sonde du Pt08 sur la Sensée à Paillencourt (réseau de l'Institution implanté pour l'étude), mesurant les hauteurs en continu, est défectueuse depuis juin 2008. Nous ne disposons donc que de deux mesures hebdomadaires en ce point pour la crue d'août 2008 au lieu des mesures en continu escomptées.

- Pour les stations continues Pt05 et Pt06 (Sensée à Aubigny et Féchain), l'analyse des mesures hebdomadaires de hauteur d'eau et de débit ne permet pas d'établir de courbe de tarage fiable pour les débits forts. Il est donc impossible de calculer les débits en continu à partir des mesures de hauteurs continues sur ces deux stations. Ainsi, seules les mesures directes de débit hebdomadaires sont exploitables pour ces deux points en août 2008.

- Les jaugeages ponctuels réalisés par la DIREN en 12 points du bassin versant consistent en une mesure de débit et une mesure de hauteur d'eau. Mais la cote altimétrique du repère servant de référence aux mesures de hauteur est inconnue du service hydrométrie. Seules les mesures de débit sont donc exploitables, mais pas les mesures de hauteurs d'eau.

- Les débits journaliers calculés à partir des données des bassinées fournies par VNF aux différentes écluses du canal à Grand Gabarit (canal de la Sensée) ne sont pas cohérents avec les jaugeages ponctuels réalisés par la DIREN en amont. Ces valeurs ne sont donc pas prises en compte pour le calage du modèle.

Finalement, les données réellement exploitables pour le calage du modèle sont indiquées sur la figure ci-dessous, pour chacune des trois crues simulées. On constate donc que les mesures en continu sont quasiment réduites à un point, la station d'Etaing, en entrée du modèle de la Sensée amont et que la crue de mars 1995 est celle disposant du moins de mesures. **Les données de calage sont donc très peu nombreuses et en particulier, le calage de la Sensée aval sera particulièrement incertain**.

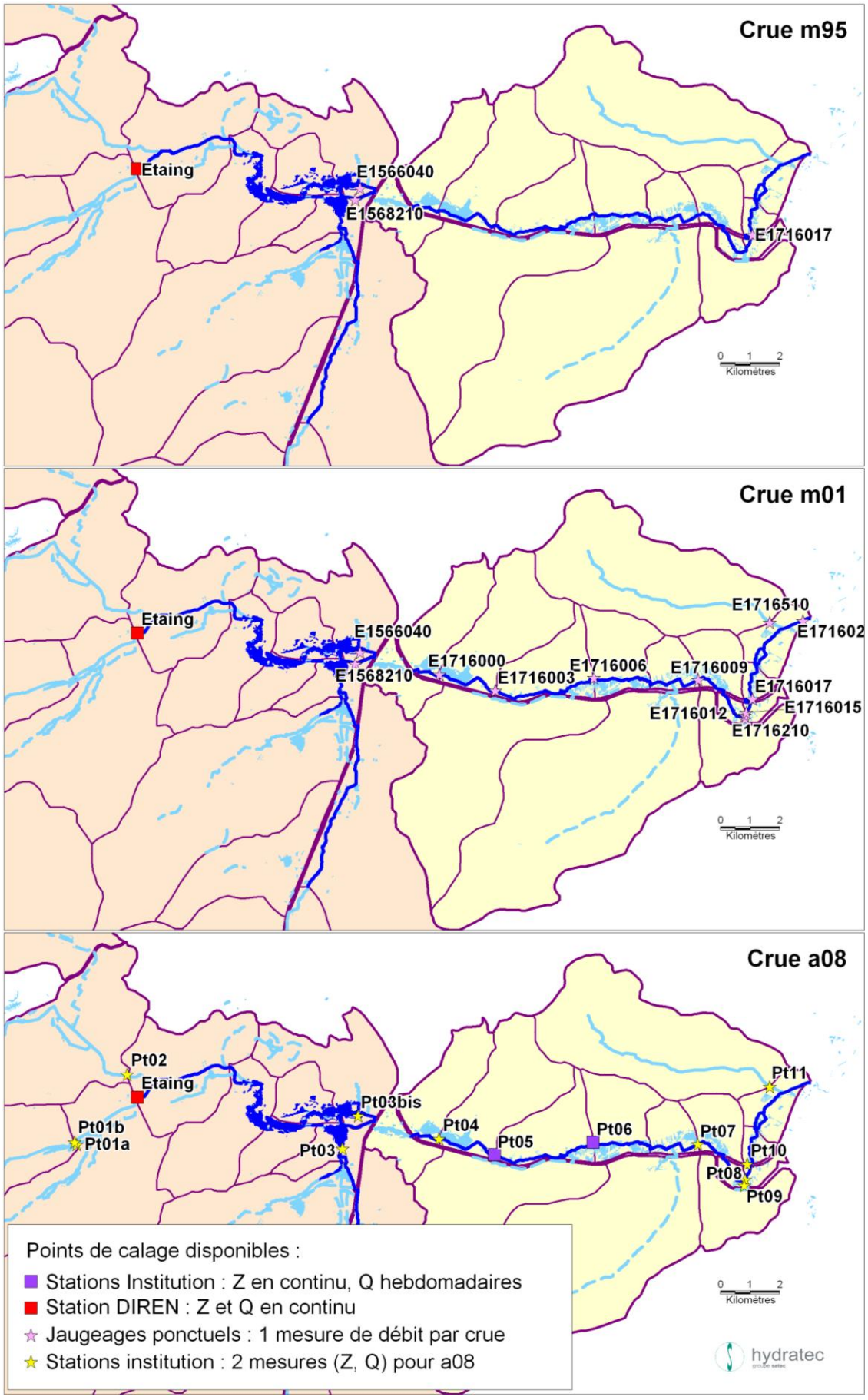


Figure 10. Localisation des points de calage pour chaque crue modélisée

5.2 METHODE DE CALAGE

5.2.1 Principes généraux

Dans un premier temps, on règle les paramètres hydrologiques des bassins versants d'apport pour reproduire les mesures de débit aux points d'entrée du modèle contrôlés par une station hydrométrique. Comme seule la station d'Etaing fournit des mesures de débit en continu à un point d'entrée du modèle (et ce, pour les trois crues modélisées), ce sont les apports des sous-bassins versant du Cojeul et de la Sensée amont (Coj1, Coj2, Coj3, Sam1, Sam2, Sam3 - cf. Figure 3) qui ont été conjointement calés.

Le calage des apports de bassins versants vise à reproduire :

- le débit maximum du ou des pics principaux ;
- le débit de base ;
- le temps de réponse (calage temporel de la pointe) ;
- le volume ruisselé et l'allure générale des hydrogrammes.

Les paramètres ainsi retenus ont ensuite été appliqués aux bassins versants du modèle Sensée amont, qui sont relativement homogènes vis-à-vis des caractéristiques géologiques notamment. Des pondérations ont été apportées au regard des surfaces interceptées, afin d'assurer une cohérence entre les sous-bassins versants.

Les paramètres des lois de production retenus sont identiques pour les trois crues d'étude. Néanmoins, la genèse de l'orage d'août 2008 est sensiblement différente de celle des crues de fin d'hiver de mars 2001 et mars 1995. Par conséquent, des adaptations ont dû être réalisées pour cet orage d'été. Ces adaptations ont visé à obtenir une représentativité satisfaisante des débits d'apport au modèle hydraulique pour toutes les crues (cf. explications ci-dessous).

La modélisation hydraulique (propagation des hydrogrammes d'apports le long des vallées) a ensuite permis de vérifier la pertinence des paramètres retenus sur les bassins versants non directement interceptés et de caler le modèle en altimétrie.

Les paramètres du modèle hydraulique pouvant jouer localement sur les niveaux d'eau sont ici :

- le coefficient de Strickler. Le logiciel HYDRARIV permet de distinguer les coefficients de Strickler du lit mineur (ici de l'ordre de 25) et du lit majeur (ici de l'ordre de 8-10). Ces coefficients, qui traduisent la rugosité des lits, influencent globalement les vitesses d'écoulement et permettent de régler les niveaux d'eau localement.
- les caractéristiques des singularités (ponts, barrages, liaisons…) ;
- la cote initiale des plans d'eau.

5.2.2 Spécificités du modèle hydrologique Sensée

La simulation hydrologique réalisée ne couvre pas la période préparatoire de la crue, à savoir les mois précédent l'événement intense et participant à la recharge des nappes et à la saturation des sols, car dans le cas du bassin versant de la Sensée, les débits du cours d'eau étant très fortement influencés par le niveau de la nappe de la craie, cette période préparatoire s'étend sur plusieurs années (et non à partir du début d'année hydrologique au 1er septembre comme usuellement). Ainsi, la simulation hydrologique intervient sans prendre en compte l'historique de la recharge des sols et des nappes (qui est prise en compte dans la modélisation hydrogéologique, cf. Partie 2 du rapport).

Afin de tout de même prendre en compte le niveau de nappe pendant la crue (qui conditionne très fortement le débit de base de la Sensée), un débit de base constant a été injecté en plus des apports hydrologiques pour chaque sous-bassin versant d'apport. Ces débits de base ont été déterminés pour chaque crue dans l'étape de calage du modèle, de façon à reproduire fidèlement les débits mesurés. Dans l'exemple de la Figure 14, le débit de base injecté vaut 3,35 m^3/s à Etaing pour la crue de mars 2001.

Par ailleurs, concernant les débits ruisselés issus de la pluviométrie de l'épisode intense sur la période modélisée, le modèle hydrologique de production des débits a été scindé en deux entités pour le bassin versant de la Sensée :

- un ruissellement rapide, générant un pic de crue marqué qui traduit le ruissellement surfacique ;
- un ruissellement retardé, pouvant être qualifié d'hypodermique, générant un hydrogramme relativement plat et disposant d'une inertie importante.

Ces deux composantes sont sommées pour former le débit ruisselé total, afin de reproduire fidèlement la réponse du bassin versant à la pluviométrie.

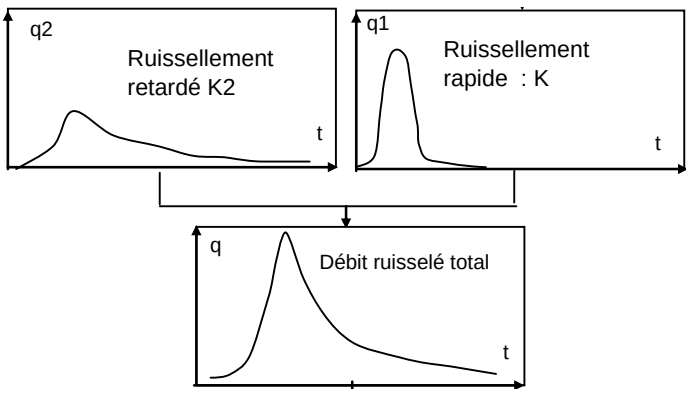


Figure 11. Schématisation des deux entités du modèle hydrologique générant le ruissellement

Pour la simulation d'août 2008, reproduisant un orage survenu en été, la composante du ruissellement retardé a été supprimée. L'événement bref et intense survenu sur des sols secs n'a pas généré de ruissellement hypodermique ; seule l'eau ruisselée rapidement est arrivée à la rivière, probablement car l'intensité pluvieuse a largement dépassé la capacité d'infiltration des sols.

En conclusion, les schémas suivants synthétisent les diverses composantes intervenant dans la génération des hydrogrammes d'apport du modèle hydraulique Sensée :

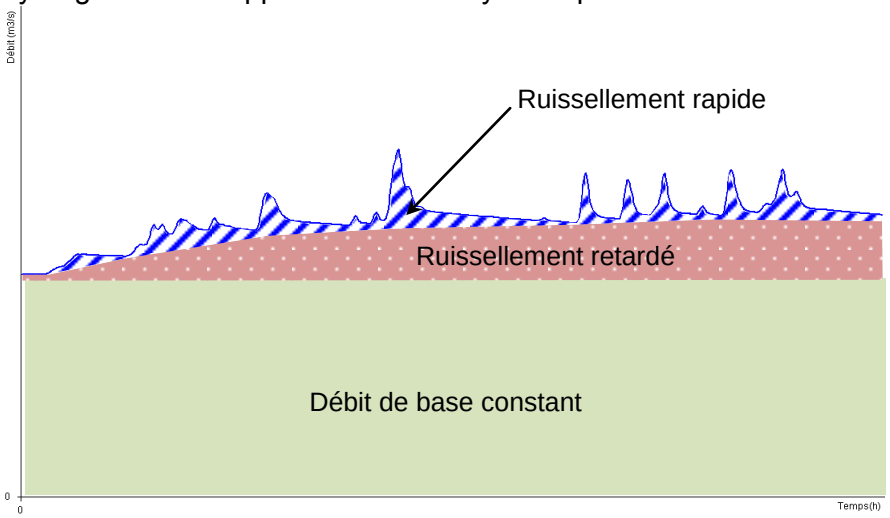


Figure 12. Les 3 composantes intervenant dans la constitution des hydrogrammes des crues de mars

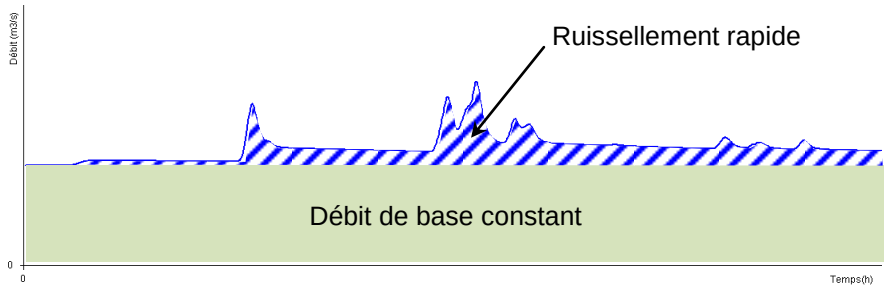


Figure 13. Les 2 composantes intervenant dans la constitution des hydrogrammes de l'orage d'août

Par ailleurs, les étapes de calage du modèle hydraulique ont indiqué qu'une partie importante des pointes de crue du ruissellement rapide provient des eaux pluviales urbaines qui sont directement rejetées dans les cours d'eau. Cela est particulièrement vrai pour la crue d'août 2008, où les coefficients de ruissellement sont relativement importants du fait de la forte intensité de cet orage (pris égaux à 0.6, contre 0.3 pour les deux crues de mars). C'est la raison pour laquelle des bassins versants urbains (avec une fonction de production de la pluie nette reposant sur la méthode du coefficient de ruissellement constant) ont été représentés dans le modèle hydrologique en sus des bassins versant ruraux présentés sur la Figure 3, là où les eaux pluviales urbaines sont rejetées directement dans un cours d'eau modélisé. Les communes représentées par ces bassins versants urbains sont listées dans le paragraphe 6.6.1.
Cet ajout n'a pas été jugé nécessaire lorsque les réseaux d'eaux pluviales urbaines trouvent leur exutoire dans des marais ou étangs, car l'hydrogramme généré est alors immédiatement écrêté.

5.3 RESULTATS DU CALAGE

Les hydrogrammes et limnigrammes obtenus aux points de mesure sont présentés en annexe 3 par modèle et par crue. La courbe issue de la modélisation (« Calcul ») est comparée à la courbe ou au(x) point(s) des cotes et débits mesurés. Les graphiques désignés par le titre « Apports » désignent les hydrogrammes générés par les bassins versants et injectés dans le modèle hydraulique. Voici ci-dessous pour exemple deux hydrogrammes illustrant le calage des modèles amont et aval pour deux crues différentes.

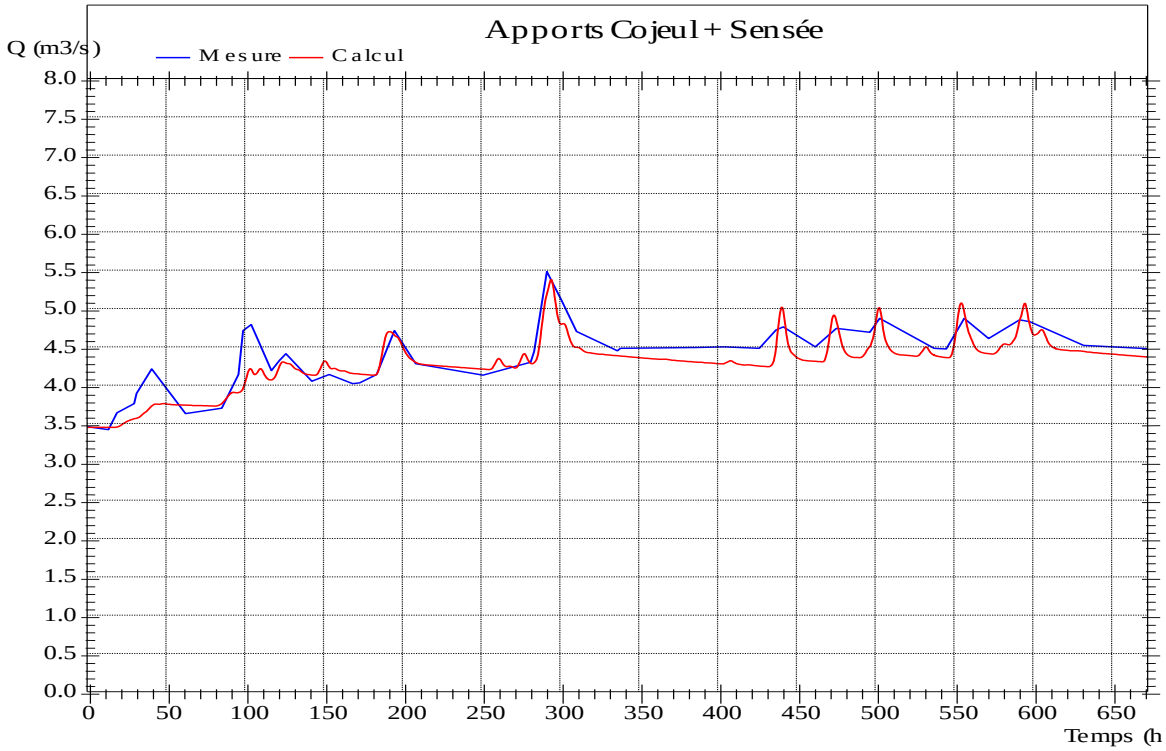


Figure 14. Exemple de calage de la Sensée amont à Etaing en mars 2001 (hydrogramme)

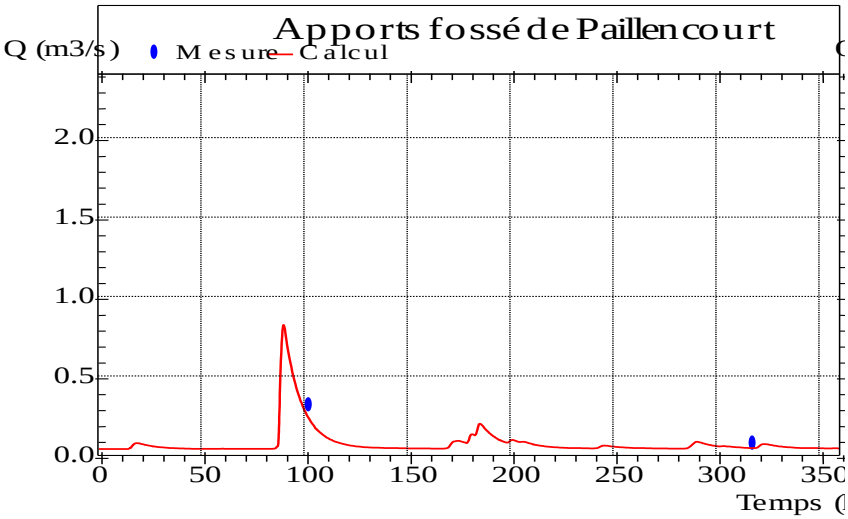


Figure 15. Exemple de calage de la Sensée aval sur le fossé de Paillencourt en août 2008 (hydrogramme)

5.3.1 Calage en débit

Globalement, l'allure générale des hydrogrammes est bien reproduite par le modèle hydrologique lorsque des mesures continues sont disponibles. De plus, les hydrogrammes d'apports sont bien calés en dynamique, puisque les temps de réponse et le nombre de pics de crue sont bien représentés. Le modèle reproduit également des valeurs proches des mesures ponctuelles réalisées.

Comme il est possible de le voir sur la Figure 14, les toutes premières pointes de débit ne sont pas fidèlement reproduites par le modèle à Etaing. Cette période de 2 à 4 jours selon les crues correspond à la phase de remplissage de la couche de sol. En effet, la simulation ne couvrant pas la période préparatoire depuis le 1er septembre de l'année hydrologique en cours, l'état de saturation initial des sols, qui dépend des conditions pluviométriques précédant la crue, n'est pas pris en compte. Ce biais ne perturbe pas la suite des calculs, puisque les pics principaux des hydrogrammes sont bien reproduits.

Pour l'unique station disposant de mesures de débit en continu (modèle SAM), le calage sur les débits de pointe est donné dans le tableau ci-dessous en pourcentage d'écart du débit maximum calculé par rapport à la mesure :

	a08	m01	m95
Etaing (SAM)	+ 14%	- 2%	- 2%

Tableau 1. Ecarts entre les débits de pointe mesurés et générés par le modèle hydrologique

Les résultats sont donc satisfaisants, d'autant plus que l'hydrogramme mesuré à Etaing en août 2008 ne présente que 3 mesures de débit en 42 h, ce qui laisse penser que le maximum de la crue n'a pas été mesuré par l'automate. Ainsi, le débit maximum observé pendant cet épisode est surement supérieur à la mesure, et le débit de pointe calculé est très certainement à moins de 10 % (voire 5 %) d'écart par rapport à l'observation.

Le résultat du calage en débit par rapport aux mesures ponctuelles effectuées, qui ne décrivent pas nécessairement le pic de la crue, est synthétisé dans le tableau suivant. La première ligne du tableau prend en compte toutes les mesures ponctuelles effectuées. Les écarts relatifs entre mesures et calculs sont importants pour la crue d'août 2008, mais ceci est dû au fait que les débits sont très petits pour cette crue. La seconde ligne du tableau ne prend en compte que les mesures dont le débit est supérieur 0,1 m^3/s (soit 65 % des valeurs mesurées en août 2008). Les écarts relatifs entre calculs et mesures sont alors de 10 % en moyenne.

	a08	m01	m95	**Moyenne**
Toutes les mesures	+ 91 %	+ 10 %	+ 32 %	**+ 44 %**
Mesures > 0,1 m^3/s	- 6 %	+ 3 %	+ 32 %	**+ 10 %**

Tableau 2. Ecarts entre les débits ponctuels mesurés (hors pics de crue) et les résultats du modèle

5.3.2 Calage en cote

Concernant le calage altimétrique, le tableau suivant synthétise les écarts entre la cotes calculées et les cotes mesurées lors des jaugeages ponctuels (il ne s'agit pas de la cote maximale de la crue, qui est inconnue en ces points). On constate que les mesures ponctuelles sont correctement reproduites par le modèle hydraulique, puisque l'écart (en valeur absolue) est en moyenne de 9 cm.

		a08			m01	m95	Moyenne
		Calcul	Mesure	Ecart (val. abs.)			
SAM	Pt03 : Agache à Ecourt	36.00 35.97	36.01 35.90	1 cm 7 cm	pas de mesures		5 cm
	Pt03bis : Pont des Prussiens	35.79 35.82	35.75 35.74	4 cm 8 cm	pas de mesures		
SAV	Pt04 : Sensée à Brunémont	34.40 34.34	34.56 34.55	16 cm 21 cm	pas de mesures		12 cm
	Pt07 : Sensée à Wasnes	33.01 33.01	33.04 33.02	3 cm 1 cm	pas de mesures		
	Pt08 : Sensée à Paillencourt	32.62 32.58	32.77 32.79	15 cm 21 cm	pas de mesures		
	Pt10 : Sensée à Wavrechain	32.56 32.53	32.66 32.60	10 cm 7 cm	pas de mesures		
Moyenne (cm)				9 cm			

Tableau 3. Ecarts entre les mesures ponctuelles de cote d'eau et les résultats du modèle hydraulique

D'autre part, on observe une différence notable entre les cotes mesurées et les cotes calculées au droit des points de mesure en continu. Ces écarts peuvent être analysés de la façon suivante :

- <u>A la station d'Etaing (SAM)</u>

  A Etaing, les limnigrammes calculés à l'aide du modèle sont 15-20 cm au dessus des mesures pour les deux crues de mars (alors que l'hydrogramme y est très fidèlement reproduit). Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer cet écart :
  - soit l'étalonnage du capteur mesurant les niveaux d'eau a été modifié entre 2001 et 2008, si bien que la cote « zéro » a changé ;
  - soit la courbe de tarage de la station d'Etaing est instable, ce qui est confirmé par M. Briquet de la DREAL, vu qu'un détarage progressif de mai à octobre est réalisé sur la station pour tenir compte de l'eutrophisation.

  Quoi qu'il en soit, cet écart local de cotes n'influence pas l'aval et ne se retrouve pas au niveau des autres points de mesure ponctuels de la Sensée amont (Pt03, Pt03bis).

  Par ailleurs, le limnigramme calculé en août 2008 à Etaing est également décalé par rapport au limnigramme mesuré, mais dans le sens inverse des deux autres crues : la courbe calculée est en dessous de la courbe mesurée d'environ 30 cm. Ceci s'explique facilement par la présence avérée d'une forte eutrophisation du lit mineur en été, qui rehausse les niveaux d'eau pour un débit donné.

- Au point Pt06 à Féchain (SAV)

  Le limnigramme calculé en août 2008 est une trentaine de centimètres sous le limnigramme relevé par l'automatisme. Etant donné que nous ne disposons pas de mesure continue en ce point pour les deux autres crues, nous ne pouvons déterminer si cet écart provient des spécificités de l'orage d'août, ou bien du modèle hydraulique. Il est toutefois probable que cette différence soit due à l'eutrophisation du lit (même écart que celui noté à Etaing) ou bien à la présence d'un barrage sauvage situé à l'aval, et non répertorié lors du passage du géomètre (donc non intégré au modèle).

- Au point Pt05 à Aubigny (SAV)

  On observe que le niveau d'eau mesuré en ce point en août 2008 est rehaussé de 10 cm après le passage du pic de crue principal. Ceci trouve très probablement son explication dans la présence d'embâcles et de flottants qui, apportés par l'onde de crue, ont obstrué l'amont du pont (le point de mesure est en amont). Le modèle ne reproduit évidemment pas ce phénomène.

On remarque enfin que les cotes initiales des plans d'eau influent de manière significative sur les hydrogrammes et les limnigrammes pendant les 4 ou 5 premiers jours des simulations (le pic de crue n'en est pas affecté). En effet, si les plans d'eau sont initialement bas, ils jouent un rôle tampon plus fort sur les crues que s'ils sont déjà pleins et les débits initiaux transitant vers l'aval sont plus faibles. L'allure des hydrogrammes et limnigrammes dans les secteurs des plans d'eau et à l'aval de ceux-ci s'en trouve donc modifié au début de la simulation. En l'absence d'autres données, les cotes initiales de plans d'eau ont été prises égales aux cotes relevées lors du passage du géomètre (sept. à déc. 2009) pour les trois crues simulées.

5.3.3 Conclusions sur le calage

Le calage en débit des deux modèles est très satisfaisant, dans la mesure où les écarts entre mesures et calculs sont du même ordre de grandeur que les incertitudes des mesures de débit (10%). Ce calage est d'autant plus satisfaisant que les débits mesurés sont très faibles (70 % des valeurs mesurées ponctuellement n'excèdent pas 1 m^3/s), ce qui constitue une difficulté supplémentaire pour le calage d'un modèle hydraulique de rivière.

Le calage en cote est réalisé à 9 cm près pour ce qui est des mesures ponctuelles, ce qui est satisfaisant. Concernant les mesures automatiques de hauteur d'eau, quelques écueils locaux ont été soulevés. De par le manque généralisé de mesures altimétriques (tant pour certaines crues que pour des secteurs entiers du bassin versant), il nous est impossible de réduire les écarts constatés. Par ailleurs, les chroniques peuvent parfois être considérées comme douteuses, ou bien l'écart entre mesures et calculs s'explique par des phénomènes extérieurs – eutrophisation, présence de seuil temporaire…etc. Ces incertitudes locales sur les hauteurs ne sont toutefois pas dommageables dans la mesure où la présence de nombreux plans d'eau résorbe les écarts constatés en amont (marnage très faible au cours des crues dans les zones de marais). Par ailleurs, l'exploitation du modèle pour mesurer les impacts des actions qui seront proposées dans la partie 5 de l'étude reposera sur un raisonnement relatif.

6 EXPLOITATION DU MODELE : ANALYSE DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE ACTUEL DU BASSIN VERSANT ET DE LA VALLEE

Le modèle hydrologique / hydraulique construit et calé comme expliqué dans les chapitres précédents permet d'approfondir l'analyse du fonctionnement hydraulique du bassin versant de la Sensée entamée en Phase 3 de l'étude, et de compléter les lacunes décelées dans la réflexion analytique engagée alors.

6.1 ANALYSE PLUVIOMETRIQUE DES TROIS CRUES MODELISEES

L'analyse des pluies tombées sur le bassin versant permet de caractériser la genèse des crues bien différente des trois événements modélisés. Les données de pluie horaire et journalière sont fournies en annexes 1 et 2 respectivement, et l'annexe 4 contient les cartes de répartition spatiale du cumul des pluies pour les trois événements modélisés : mars 1995, mars 2001 et août 2008.

On constate que les cumuls horaires des pluies sont bien plus importants pour la crue d'août 2008 (jusqu'à 30 mm/h à Epinoy et St-Léger) que pour les deux crues de mars (intensité maximale de l'ordre de 5 à 10 mm/h). La répartition temporelle des précipitations est par ailleurs plus concentrée en août 2008 que lors des deux crues de mars : les trains d'onde de pluie sont espacés les uns des autres et bien distincts.

Par ailleurs, la durée totale des précipitations générant la crue d'août 2008 (9 jours) est bien plus courte que les durées des deux crues de mars (20 et 30 jours environ).

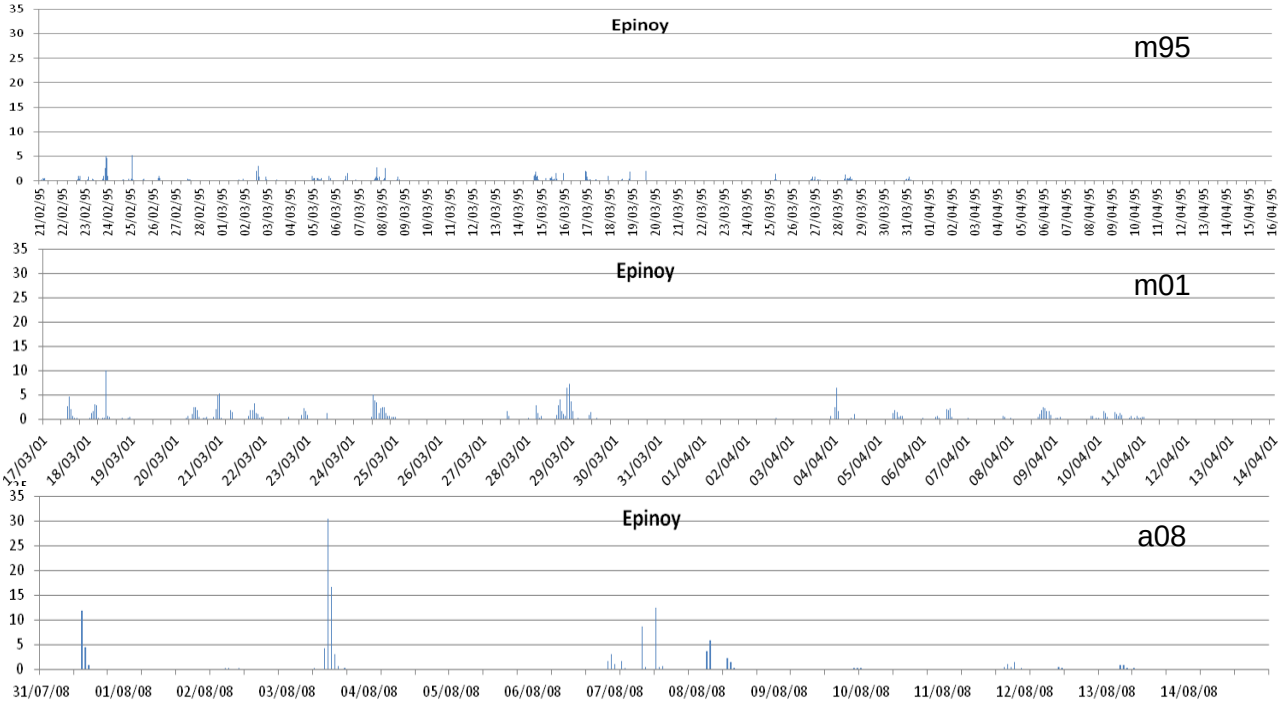


Figure 16. Pluies horaires à Epinoy pour les trois crues modélisées

D'un point de vue spatial, les cartes de l'annexe 4 indiquent que la répartition des précipitations d'août 2008 est également plus concentrée ; une quantité d'eau très importante s'est abattue à Saint-Léger (211 mm en 9 jours), mais il n'est tombé que 84 mm dans le même temps à Bouchain, soit un écart de l'ordre de 125 mm. Par conséquent, la pluie d'août est plus localisée, et les disparités d'un endroit à l'autre du bassin versant sont plus marquées que pour les deux crues de mars. En effet, le gradient pluviométrique de m01 et m95 est de l'ordre de 60 et 30 mm respectivement. Pour ces deux crues, la répartition spatiale des pluies est relativement homogène.

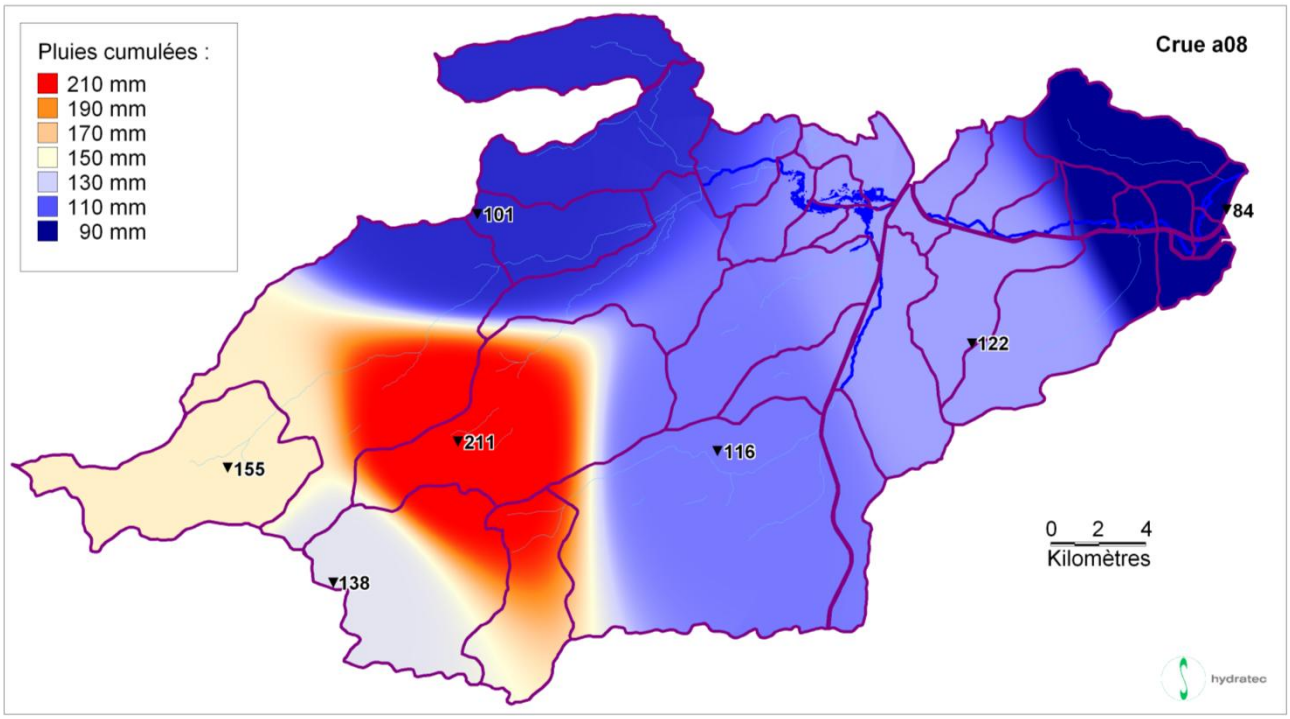


Figure 17 Répartition spatiale des pluies de l'événement d'août 2008

En conclusion, la crue d'août 2008 est de type « orage d'été », c'est-à-dire que de fortes précipitations surviennent sur une courte période à un endroit très localisé, le reste du bassin versant ne subissant qu'une pluie modérée usuelle à une période estivale. C'est la tête du bassin versant de la Sensée amont (Cojeul et Sensée) qui est le lieu des plus fortes précipitations.
Les crues de mars 2001 et mars 1995 sont quant à elles au contraire de type « hivernal », c'est-à-dire générées par des pluies longues réparties de façon relativement homogène sur l'ensemble du bassin versant. La crue de mars 2001, plus forte que celle de 1995, est générée principalement par des précipitations survenues dans le centre du bassin versant (amont de la Sensée aval). L'événement de mars 1995 trouve quant à lui sa genèse sur un territoire plus étendu, à l'ouest de la Sensée amont (Cojeul,Trinquise).

6.2 GENESE DES CRUES

6.2.1 Bilan hydrologique en crue

Le bassin versant de la Sensée est caractérisé par une très forte infiltration dans les sols et vers la nappe de la pluie précipitée lors des trois crues historiques modélisées. La

modélisation hydrogéologique présentée dans la deuxième partie du présent rapport en atteste également.

En effet, en termes de volumes, sur 100 % de précipitations brutes (observées) :

- 1 % seulement ruisselle directement à la surface du sol (ruissellement dit « rapide » dans le paragraphe 5.2.2) ;
- 10 % environ cheminent en subsurface (ruissellement dit « retardé »). Ce type de ruissellement est à priori légèrement plus important sur la Sensée aval que sur la Sensée amont. Cette composante est absente pour l'orage d'août 2008 ;
- les 89 % restants sont utilisés par les plantes, évaporés et alimentent la nappe.

Concernant le débit de pointe de crue observé en rivière, la part de ruissellement rapide, de ruissellement retardé et d'alimentation constante par la nappe qui le constituent (cf. illustrations Figure 12 et Figure 13) se décompose selon les crues en moyenne comme indiqué dans le tableau suivant.

	m95	m01	a08
Ruissellement rapide	3 %	12 %	45 %
Ruissellement retardé	19 %	42 %	0 %
Alimentation par la nappe	78 %	46 %	55 %

Tableau 4. Constitution hydrologique des débits de pointe

Ce tableau appelle les commentaires suivants :

- L'alimentation par la nappe est prépondérante et constitue pour les trois crues au moins la moitié du débit de pointe observé en rivière.

- Le ruissellement retardé n'est pas présent lors de l'orage d'août 2008 ; l'événement bref et intense survenu sur des sols secs n'a pas généré de ruissellement hypodermique. Toute l'eau précipitée a directement ruisselé, probablement car l'intensité pluvieuse a largement dépassé la capacité d'infiltration des sols. Ceci explique la part importante de ruissellement rapide indiquée par le modèle en août 2008 (45%).

- De par la pluviométrie précédant la crue, la saturation initiale des sols est plus importante en 2001 qu'en 1995, qui sont pourtant deux crues survenues au même moment de l'année (mars).

Par ailleurs, quelques indications peuvent être données au sujet de l'importance des apports de nappe en crue à différents endroits de la vallée (indications obtenues suite au calage) :

- L'alimentation de la rivière par la nappe en crue semble proportionnellement plus importante (toutes choses étant égales par ailleurs) dans le secteur de Paillencourt et en amont du siphon du Pré Piton.
- A l'inverse, la Navillé Tortue ne semble pas drainer la nappe lors des crues étudiées.

6.2.2 Sectorisation de l'importance des apports naturels en crue

L'annexe 5 présente, pour les trois crues modélisées, les débits spécifiques des bassins versants d'apport, c'est-à-dire leur « productivité » en termes de débits de pointe exprimée en l/s/km². Un exemple est fourni ci-dessous pour la crue de mars 2001.

Avant toute analyse, il convient de rappeler que **cette productivité est le produit de deux facteurs : le caractère ruisselant du bassin et la pluviométrie qu'il y tombe**.

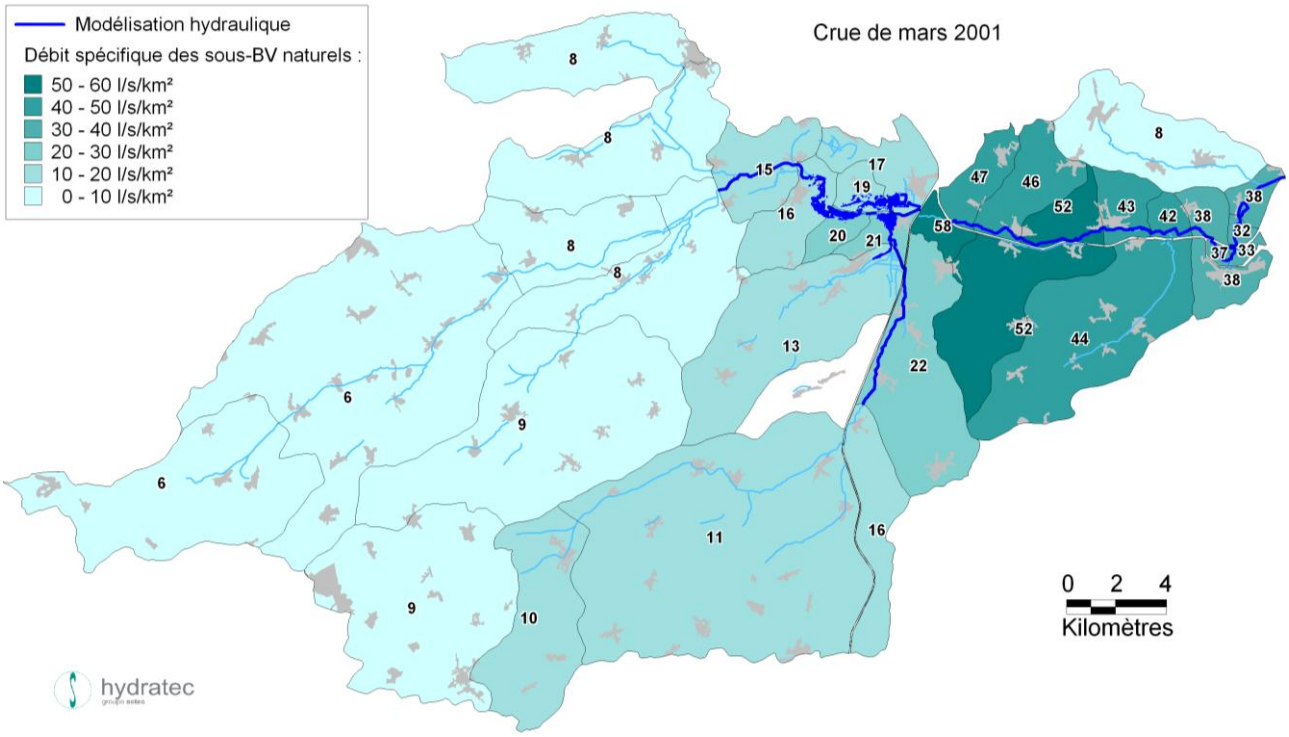
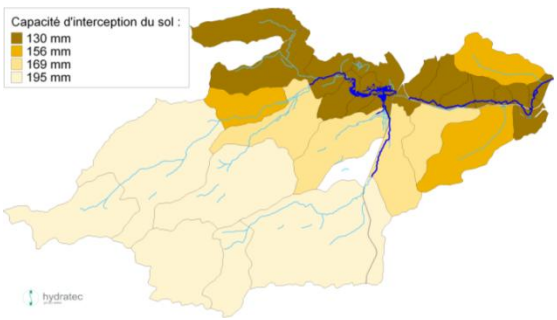


Figure 18. Productivité des sous bassins versants naturels d'apport

On observe tout d'abord que **la productivité des sous-bassins du bassin versant de la Sensée est très faible**, puisque même pour la crue la plus forte de 2001, le débit spécifique n'excède pas 55 l/s/km². A titre de comparaison, il est courant d'observer des valeurs de l'ordre de quelques centaines de l/s/km² sur d'autres bassins versants.

Il est par ailleurs délicat de conclure sur la productivité relative des différents sous-bassins les uns par rapport aux autres, puisque les valeurs de débits spécifiques dépendent :

1. de la répartition spatiale de la pluviométrie. Par exemple, lors de la crue de mars 2001 figurée ci-dessus, la plus forte productivité est observée au niveau de la Petite Sensée (amont de la Sensée aval), ce qui correspond à l'épicentre du phénomène pluvieux (cf. cartes annexe 4).
2. notamment de la capacité d'interception du sol (hauteur de stockage possible dans la couche insaturée). Les valeurs relatives de ce paramètre retenues pour la modélisation hydrologique (cartographiées ci-contre) ont été choisies au regard de la géologie notamment. On observe



une forte corrélation entre la capacité d'interception choisie et le débit spécifique.

Le manque général de données de calage n'a pas permis d'affiner précisément les valeurs de capacité d'interception du sol. Il est néanmoins possible de tirer la conclusion que **le Trinquise, le Siphon, l'aval du Cojeul et la Navillé Tortue sont particulièrement peu productifs**, puisque leurs débits spécifiques restent très faibles (moins de 10 l/s/km²) malgré une capacité d'interception faible, et ce, même lorsqu'ils reçoivent une pluviométrie importante.
Il est également possible d'indiquer que globalement, la productivité en crue de la Sensée aval est supérieure à celle de la Sensée amont.

6.2.3 Temps de réponse du bassin versant

Le temps de réponse du bassin versant exprime le temps de réaction du système à une averse. Il s'agit de l'intervalle de temps qui sépare le centre de gravité de la pluie nette de la pointe de crue du cours d'eau.

Sur la Sensée amont, le temps de réponse est de 8 à 10 h entre les pluies relevées à St-Léger et la pointe de débit mesurée à Etaing.

Sur la Sensée aval, cette valeur est beaucoup plus faible, dans la mesure où la pointe de débit est générée par les apports des eaux pluviales urbaines. Les bassins versants urbains ont une réactivité bien supérieure à celle des bassins versants naturels. Le temps de réponse entre la pluie mesurée à Epinoy et la pointe de crue calculée à Aubigny, qui correspond au temps de réponse d'un bassin versant urbain, est de l'ordre de 2 à 4 h.

6.3 PROPAGATION DES CRUES

L'annexe 6 présente, pour les trois crues modélisées, les hydrogrammes en différents points de la Sensée amont, de l'Agache et de la Sensée aval (en deux graphiques). Pour exemple, les graphes obtenus pour la crue de mars 2001 sont présentés page 47. Sur chaque graphique, les courbes sont déclinées de l'amont vers l'aval (courbe noir, puis rouge, puis verte…etc.).

Il apparaît à la lecture de ces graphiques que **les crues sont écrêtées lors de leur transfert vers l'aval, le long de la Sensée et de l'Agache**.
Le plus fort pouvoir écrêteur est bien sûr observé lors de la traversée des étangs de Lécluse, des marais de Saudemont et d'Arleux par la Sensée amont. Entre l'amont du décanteur et la sortie du marais d'Ecourt-St Quentin, le débit de pointe peut diminuer de 15 %. Cet écrêtement est d'autant plus marqué que le pic de crue est pointu (écrêtement très faible pour la crue de mars 1995, qui est une crue lente). Le même phénomène est observé sur la Sensée aval, lors de la traversée du marais du Bac.
Même lorsque la Sensée conserve son tracé filaire, les multiples connexions avec les étangs et marais voisins de la rivière lissent la crue ; c'est le cas notamment sur la Sensée aval à l'aval de Féchain, où les liaisons avec le marais Billoir, l'étang du Grand Clerc et le marais Chantraine

notamment écrêtent les hydrogrammes. Le petit chevelu hydrographique directement connecté à la rivière joue également ce rôle d'écrêtement, comme sur l'Agache, à Marquion et à Sauchy.

Ces écrêtements se traduisent également par le retardement de l'onde de crue, qui se propage moins vite dans les zones de marais et d'étangs que dans les biefs filaires. Par exemple, lors de l'orage d'août 2008, la crue s'est propagée à une vitesse de 0,8 m/s entre Etaing et l'entrée du décanteur (partie filaire), et seulement 0,1 m/s au travers du décanteur et des différents étangs jusqu'à la sortie du marais d'Ecourt-St-Quentin. L'inertie du système est également très visible à l'aval de la Sensée aval.

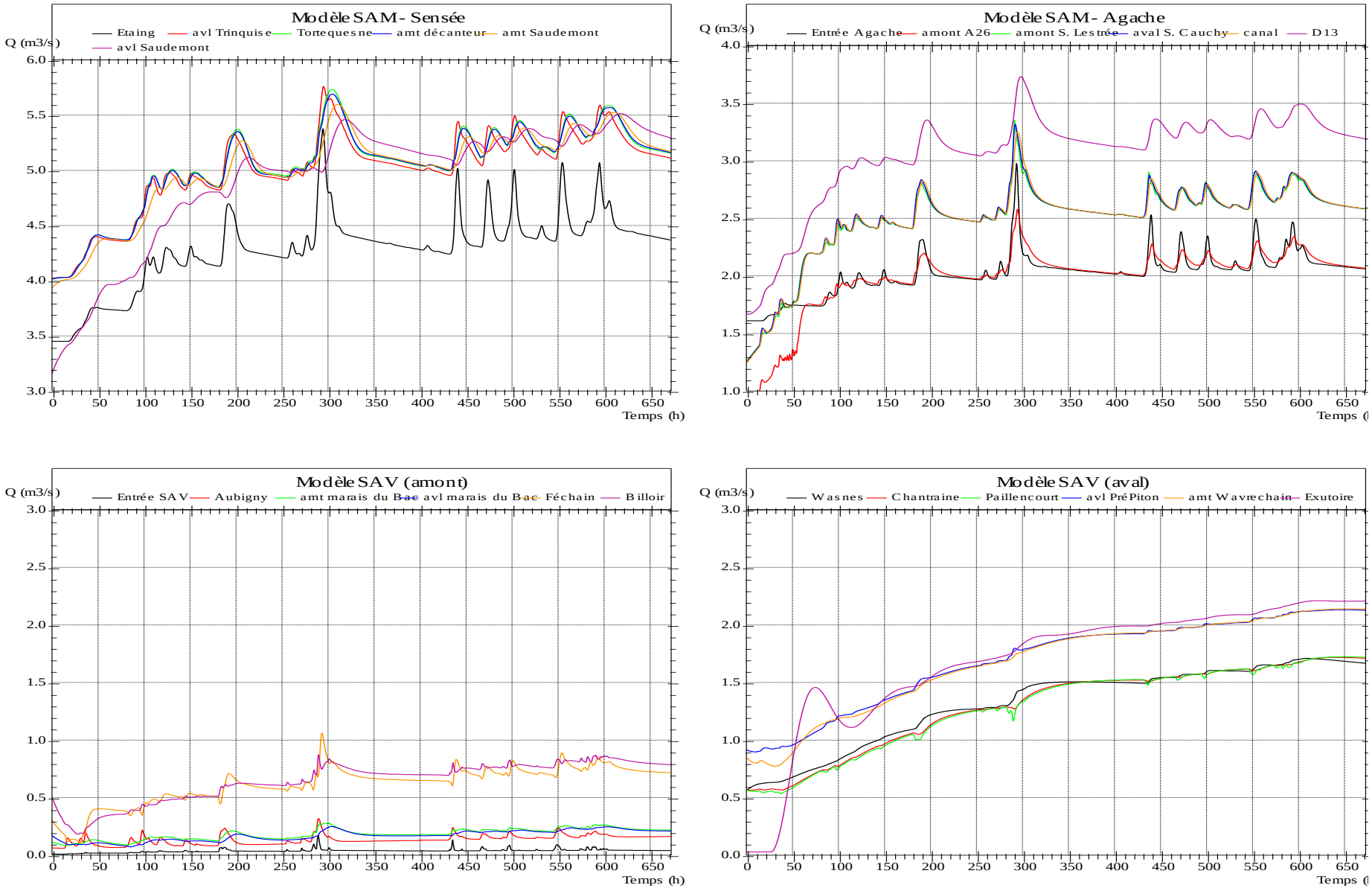


Figure 19. Propagation des hydrogrammes de crue en mars 2001

6.4 ZONES DE DEBORDEMENT

L'annexe 7 présente les cartes de zones inondées au 1/ 20 000è lors des trois crues modélisées. Elles résultent du croisement des résultats hydrauliques des simulations avec le semis de points levé par photogrammétrie pour l'étude. La planche illustrant les zones inondées sur la Sensée amont lors de la crue la plus forte modélisée, à savoir mars 2001, est présentée ci-après.

Nota bene : Le modèle n'ayant pas été conçu pour restituer des cartographies fines de zones inondables, les cartes présentées ne peuvent être exploitées à une échelle parcellaire. Elles permettent de rendre compte de façon globale des secteurs où la vulnérabilité aux habitations est la plus importante.

Il est frappant de remarquer que **les tronçons filaires de rivière ne débordent que très peu et très localement**, en raison d'une part des faibles débits générés lors des crues (puisque la productivité des bassins versants est faible) et d'autre part du large dimensionnement des lits mineurs de cours d'eau.

Les zones sensibles en termes de débordement se situent donc plutôt en bordure de plans d'eau et de marais. Il s'agit le plus souvent d'anciens habitats légers de loisirs convertis en habitations à l'année, comme par exemple :

- autour des étangs de Lécluse (communes de Lécluse et Hamel) ;
- entre l'étang d'Arleux et la D65 (commune d'Arleux) ;
- autour du marais de Brunémont ;
- dans tout le secteur de marais en rive droite de la Sensée aval à Fressie, Féchain, Hem-Lenglet ;
- quelques habitations en rive droite à Bouchain.

Les bourgs sont quant à eux très peu touchés, même en périphérie. Par exemple, les constructions le long de la D49 (à Wasnes-au-Bac) ne sont touchées que pour la crue de mars 2001.

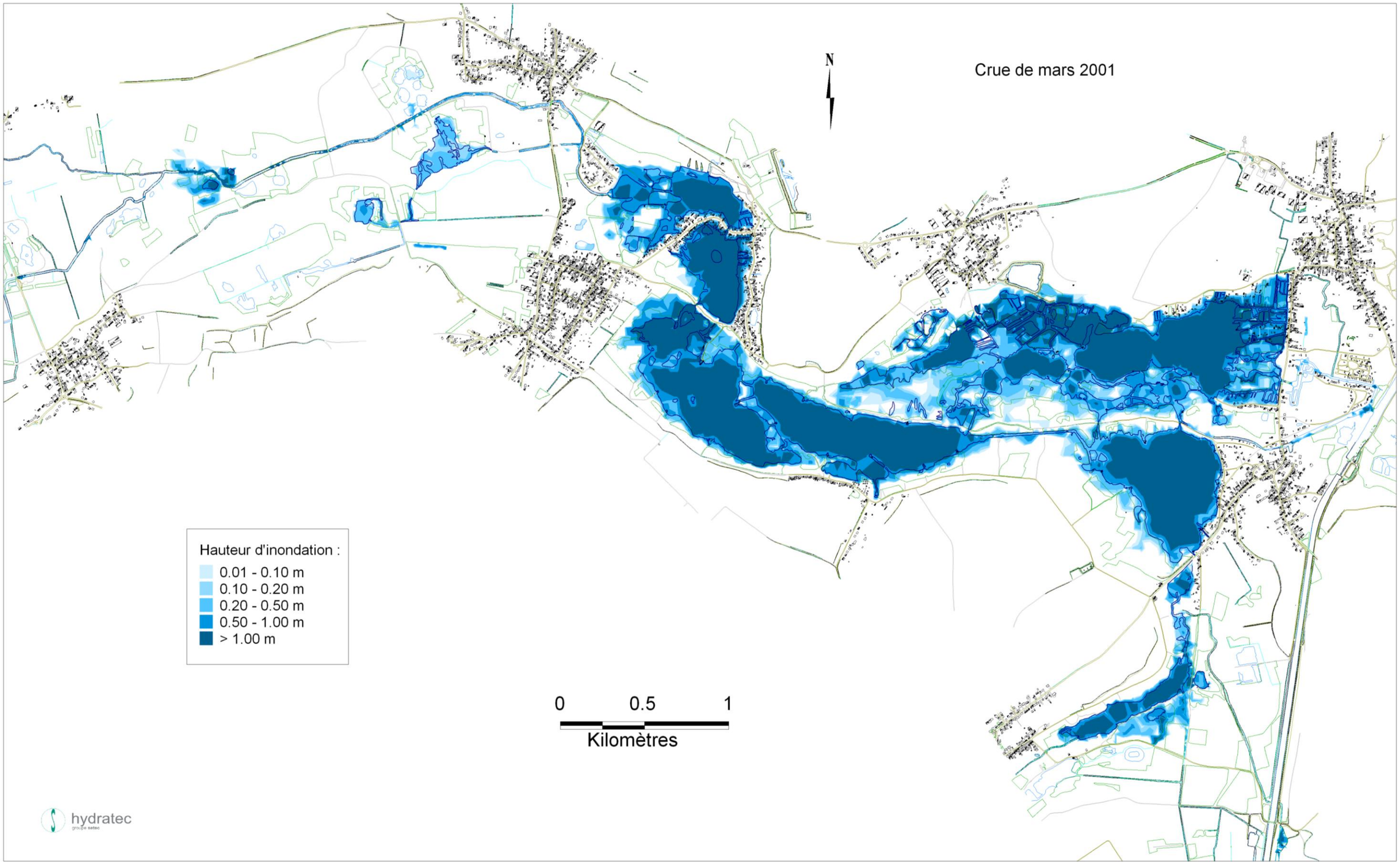


Figure 20. Zones inondées sur la Sensée amont en mars 2001

6.5 IMPACT HYDRAULIQUE EN CRUE DES OUVRAGES HYDRAULIQUES

Les principales pertes de charge situées le long des biefs filaires sont présentées en annexe 8. Pour chaque bief, les lignes d'eau maximales calculées par le modèle sont conjointement tracées pour les trois crues simulées.

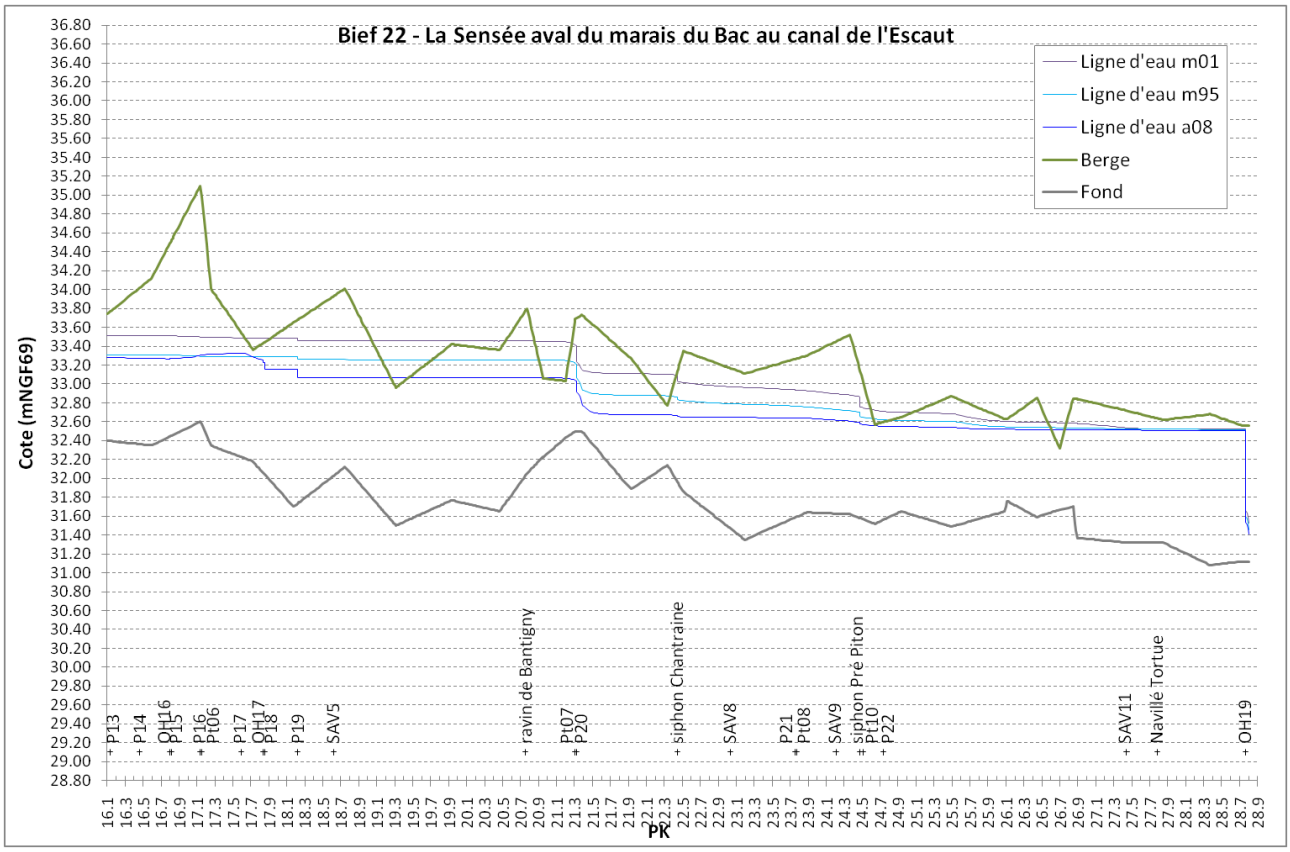


Figure 21. Lignes d'eau calculées pour les trois crues simulées sur la Sensée aval à partir du marais du Bac

Sur les biefs aval de la Sensée amont, la condition aux limites aval influence complètement les niveaux jusqu'à la perte de charge située en amont, c'est-à-dire que **les niveaux du canal du Nord influencent le Surion et le canal de Malderrez jusqu'aux seuils des deux ponts de la D65**.

Concernant la Sensée aval (figure ci-dessus), sa partie aval est contrôlée par l'ouvrage de Bouchain (appelé OH19 dans le modèle), manœuvré manuellement.
Les manœuvres effectuées sur cet ouvrage lors des trois épisodes simulés étant inconnues, le seuil de Bouchain est modélisé comme un ouvrage régulé automatiquement de façon à maintenir un niveau d'eau en amont constant (cote de consigne = 32.47 mIGN69, correspondant au niveau de la marque blanche prise comme référence par le gestionnaire de l'ouvrage). Ce mode de représentation explique le fait que les niveaux d'eau calculés par le modèle sont identiques pour les trois crues au niveau de l'ouvrage de Bouchain.
Différents tests effectués à l'aide du modèle ont permis de montrer que, pour les trois crues modélisées, **le niveau de consigne maintenu à l'ouvrage de Bouchain influe sur la ligne d'eau jusqu'au pont de Wasnes-au-Bac** (sous la D49, au niveau du point de mesures Pt07).

Les niveaux d'eau observés à Féchain et Aubigny notamment sont donc indépendants des manœuvres effectuées à cet ouvrage.

A part l'ouvrage de Bouchain, les principales pertes de charge générées par les crues sur le linéaire modélisé sont calculées dans le tableau suivant. Les chutes d'eau en crue et à l'étiage (à la date de mesure du géomètre) sont indiquées ci-dessous.

Ouvrage	Chute d'eau à l'étiage	Chute d'eau en crue	**Perte de charge induite par les crues**
P01 Pont des vaches sur la Sensée amont	0 cm	60 à 100 cm	**60 à 100 cm**
P05 Pont de Marquion sur l'Agache	0 cm	30 à 100 cm	**30 à 100 cm**
OH09 Seuil sur l'Agache en amont du siphon à Oisy-le-Verger	50 cm	100 à 130 cm	**50 à 80 cm**
OH05 Seuil du pont des prussiens sur le Surion	60 cm	70 à 95 cm	**0 à 40 cm**

Tableau 5. Principales pertes de charge en crue des ouvrages hydrauliques et ponts

Les principales pertes de charge engendrées par les crues sont donc localisées sur le bassin versant de la Sensée amont (y compris Agache).

Les siphons génèrent quant à eux une perte de charge maximale de l'ordre de 5 cm (au marais Chantraine) à 15 cm (sur l'Agache) pour la crue forte de mars 2001. Rappelons que les éventuels embâcles et dysfonctionnements des siphons ne peuvent pas être pris en compte dans le modèle.

Concernant l'ancienne écluse du pont des Prussiens, des tests supplémentaires effectués à l'aide du modèle hydraulique indiquent que les manœuvres effectuées à cet ouvrage (ajout / suppression de batardeau) impactent la ligne d'eau :

- jusqu'au marais de Saudemont inclus pour une crue faible de type orage d'août 2008 : abaissement de 13 cm du niveau de ce plan d'eau si un batardeau de 20 cm est retiré à l'ancienne écluse ;
- jusqu'au décanteur de Tortequesne inclus pour une crue forte de type mars 2001 : abaissement de 2 cm du niveau de ce plan d'eau si un batardeau de 20 cm est retiré à l'ancienne écluse.

Les étangs d'Arleux sont quant à eux impactés de - 10 à -15 cm selon les crues si un batardeau de 20 cm est retiré à l'ancienne écluse.

6.6 ANALYSES LOCALES DE DYSFONCTIONNEMENTS SOULEVES LORS DE L'ANALYSE DE PHASE 3

6.6.1 Cause des brusques variations de niveaux d'eau locales

Au travers des questionnaires remplis pour l'étude, certains élus ont fait état de brusques variations du niveau d'eau de la Sensée, notamment sur l'Agache et la Sensée aval. Les mesures de hauteur d'eau effectuées pour l'étude pendant 3 ans ont attesté ce phénomène, notamment au droit des points Pt05 (Aubigny) et Pt06 (Féchain), où l'amplitude des oscillations observées peut atteindre 40 à 60 cm en quelques heures.

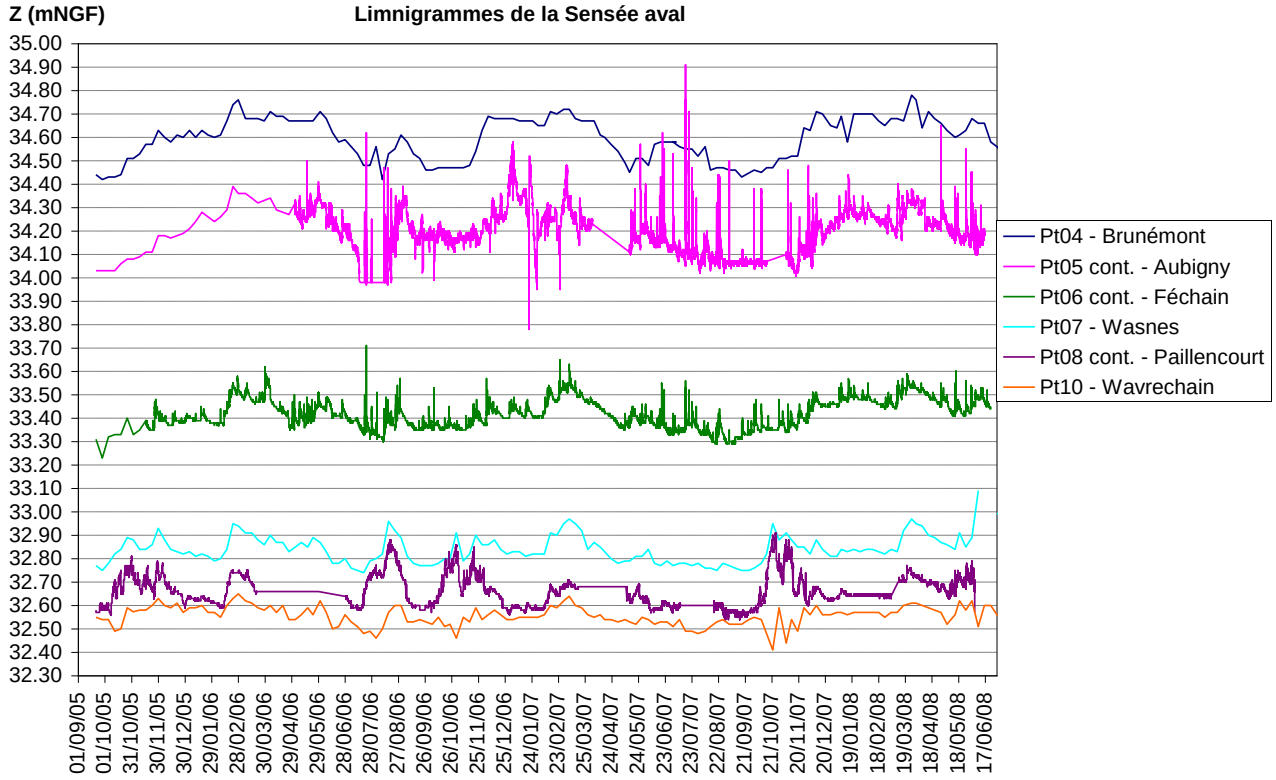


Figure 22. Limnigrammes aux stations de la Sensée aval pendant les trois ans de mesures

Les étapes de calage du modèle hydraulique ont permis de trouver une explication à ce phénomène ; une partie importante des pointes de crue des cours d'eau filaires provient des eaux pluviales urbaines qui sont directement évacuées dans les cours d'eau. Cela est particulièrement vrai pour la crue d'août 2008, où les coefficients de ruissellement sont relativement importants du fait de la forte intensité de cet orage (pris égaux à 0.6, contre 0.3 pour les deux crues de mars).

Ainsi, **les brusques oscillations du niveau d'eau observées en rivière sont dues aux apports rapides et brutaux des eaux pluviales urbaines**, qui sont pour la plupart non tamponnées dans des bassins d'orages avant rejet dans le milieu naturel. Les débits de crue sur la Sensée aval notamment étant très faibles, le débit d'apport urbain est significatif. Ces apports urbains sont visibles sur la Sensée aval à Aubigny, Féchain, Paillencourt, sur l'Agache à Marquion, Sauchy, et sur la Petit Hirondelle à Ecourt-St-Quentin notamment.

Là où ces rejets d'eau pluviale urbaine se déversent dans des plans d'eau, l'impact sur les niveaux d'eau est beaucoup moins visible.

6.6.2 Perte de débit sur la Sensée aval entre Pt07 et Pt08

L'analyse du fonctionnement hydraulique menée dans le rapport de phase 3 indiquait qu'une perte de débit notable était observée sur la Sensée aval entre les points Pt07 (Wasnes) et Pt08 (Paillencourt) lors des trois ans de mesures.

Plusieurs hypothèses avaient été avancées pour expliquer ce phénomène :
- cause hydrogéologique : drainage par la nappe ;
- cause hydraulique : rôle tampon du marais Chantraine ;
- cause anthropique : prélèvement dans la nappe de Wasnes.

Le modèle hydraulique peut apporter une réponse concernant l'aspect hydraulique des causes éventuelles. Les interrogations concernant les relations avec la nappe et les pompages pourront être tranchées dans la deuxième partie du présent rapport.

La figure suivante présente les hydrogrammes calculés par la modélisation aux Pt07 et Pt08 pour les trois crues simulées (courbes bleues et rouges respectivement). On note que le débit calculé au Pt08 est le plus souvent supérieur à celui calculé au Pt07, sauf :

- ponctuellement, pendant des laps de temps relativement courts (de t=170 à 210 h en a08 par exemple). Ces périodes correspondent aux moments où le fossé de Paillencourt présente un pic de crue (courbe verte sur les figures ci-dessous). Ainsi, lorsque le débit d'apport du fossé de Paillencourt est suffisamment important (comparativement au débit de la Sensée), l'onde de crue du fossé remonte légèrement dans la Sensée, ce qui a pour effet de diminuer momentanément le débit apparent de la Sensée.
  Ce phénomène, qui se produit majoritairement en crue, n'explique cependant pas la diminution quasi-permanente du débit entre les Pt07 et Pt08 observée lors de l'analyse de Phase 3.

- sur de longues périodes en début de calcul. Le débit perdu entre les deux points de mesure correspond au débit stocké dans le marais Chantraine. Ce marais peut donc jouer un rôle d'écrêtement des crues, dépendant du niveau initial de remplissage du plan d'eau.

On peut donc conclure que les pertes de débit temporaires en crue calculées entre les Pt07 et Pt08 peuvent trouver leur origine dans le fonctionnement hydraulique de surface. Ces explications ne peuvent toutefois justifier la perte de débit quasi-permanente observée en phase 3 (notamment en étiage). Cela laisse donc penser que **la cause du phénomène permanent observé est plutôt d'origine hydrogéologique**.

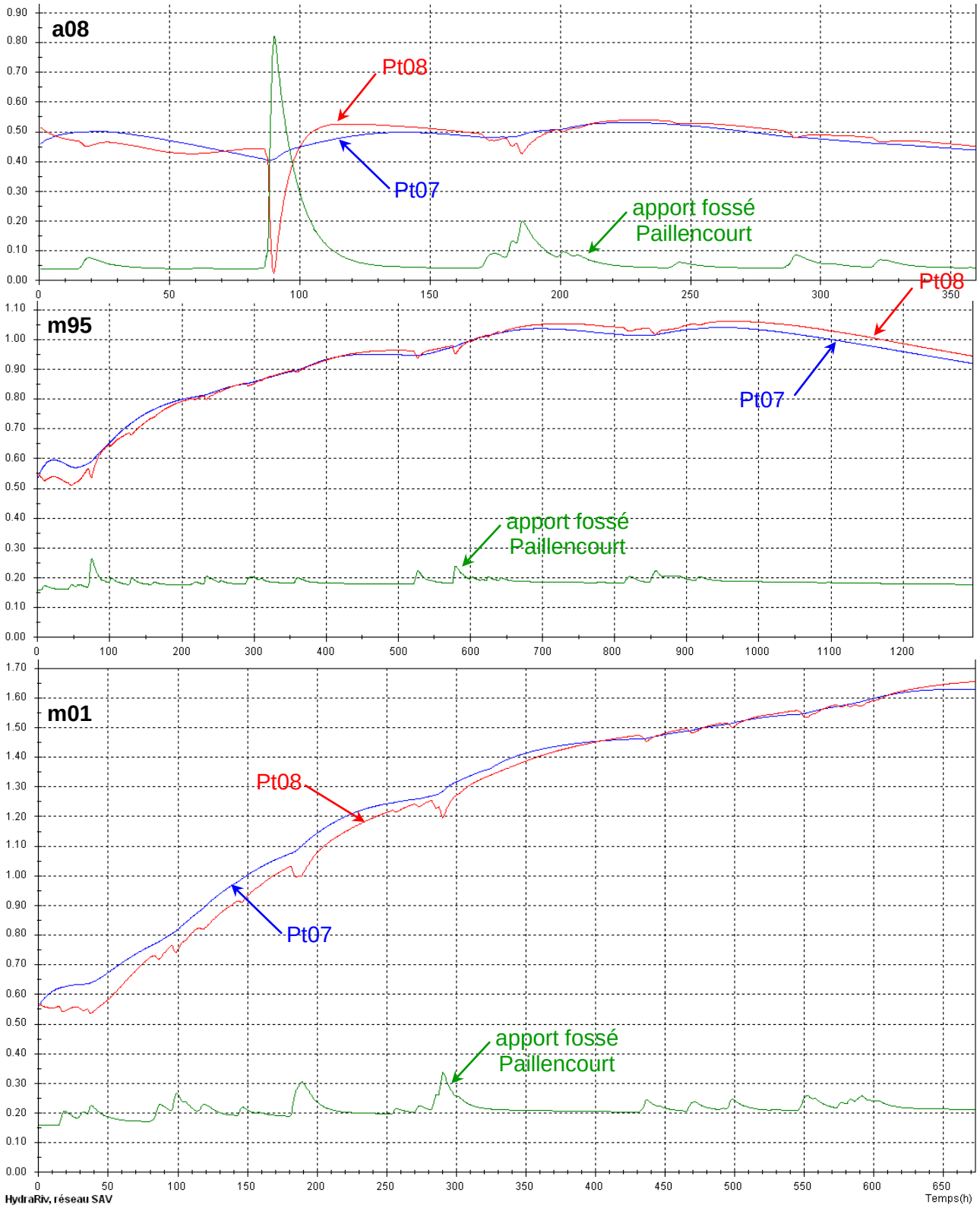


Figure 23. Hydrogrammes comparés des points Pt07 et Pt08 pendant les trois crues simulées

6.7 HYDROGRAMMES D'APPORT DE LA SENSEE VERS LES CANAUX DE NAVIGATION

Afin d'améliorer la connaissance du système complexe rivière / canaux du Nord – Pas-de-Calais, les hydrogrammes calculés par le modèle à l'exutoire des deux Sensée, qui constituent des apports pour les gestionnaires du Service de la Navigation, sont fournis ci-après pour les trois crues simulées.

On rappelle, comme expliqué à la fin du paragraphe 5.3.2 « Calage en cote », que les premiers jours des hydrogrammes et limnigrammes calculés à l'aval des zones de plans d'eau et de marais sont fortement conditionnées par les cotes initiales attribuées aux plans d'eau. Faute de données, ces cotes ont été prises égales aux cotes relevées lors du passage du géomètre (sept. à déc. 2009) pour les trois crues simulées, ce qui est probablement sous estimé, vu que les crues sont survenues en période de nappe chargée. Par conséquent, au début des simulations, la majorité des apports hydrologiques remplit les plans d'eau du modèle, mais ne se retrouve pas à l'aval de ceux-ci. Le véritable état initial observé lors des événements historiques commence donc après cette période transitoire de mise en eau du système, soit,

- sur la Sensée amont :
  - après 250 h en mars 1995,
  - après 200 h en mars 2001,
  - après 150 h en août 2008.
- sur la Sensée aval :
  - après 200 h en mars 1995,
  - après 250 h en mars 2001,
  - après 150 h en août 2008.

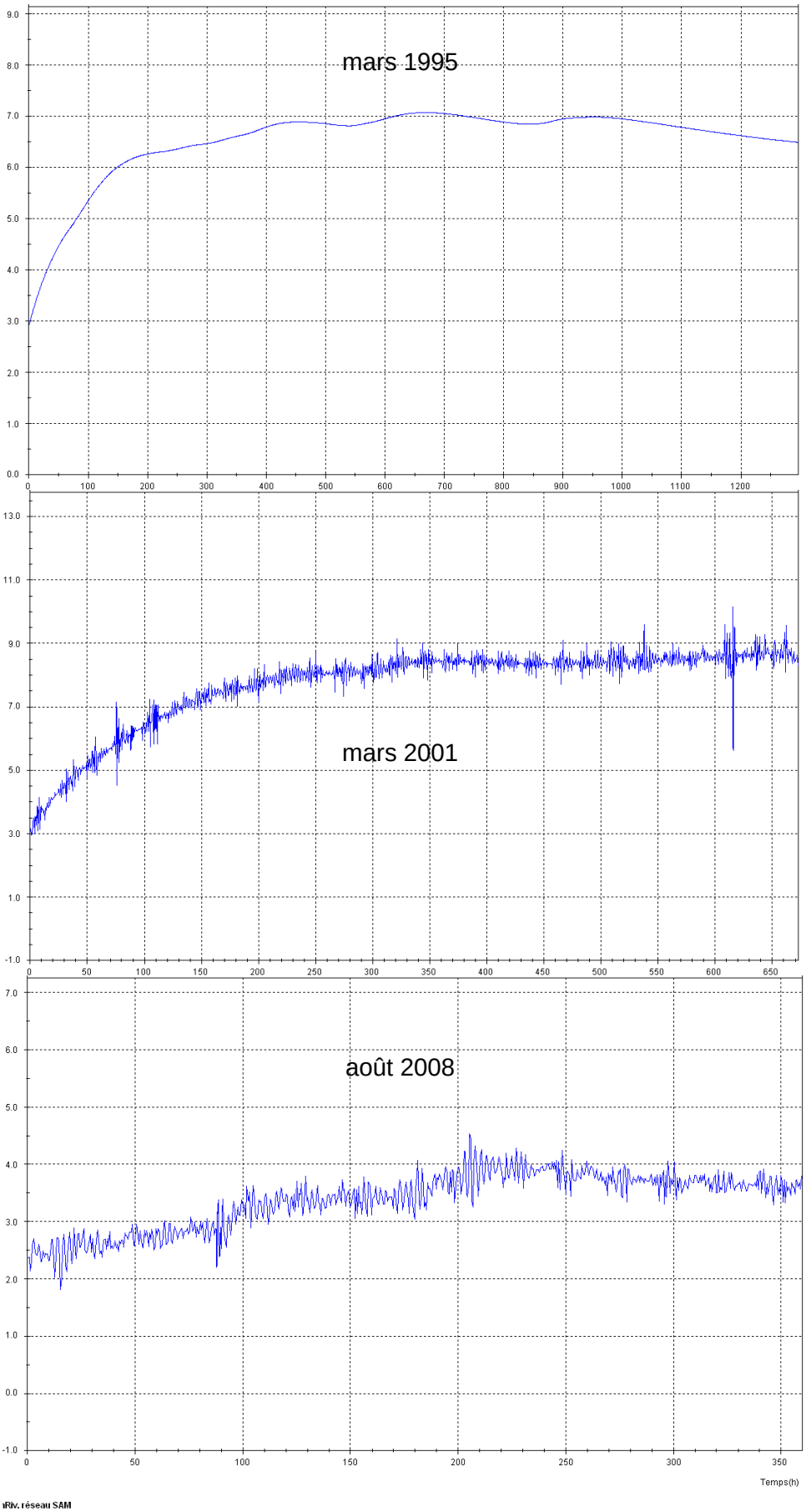


Figure 24. Hydrogrammes d'apport dans le canal de la Sensée en crue

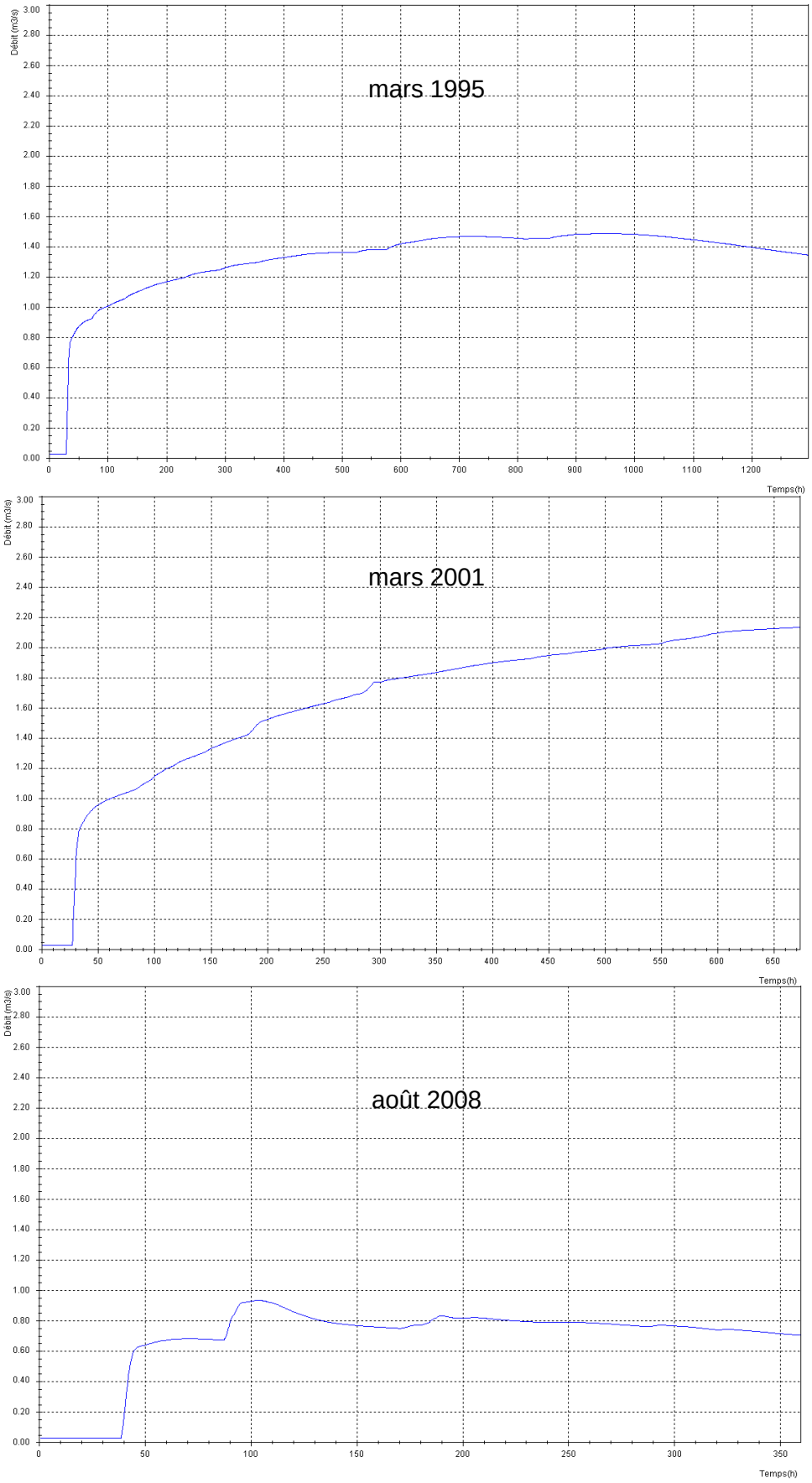


Figure 25. Hydrogrammes d'apport dans le canal de l'Escaut en crue

2ème partie : Modélisation hydrogéologique

7 PRINCIPES GENERAUX ET OBJET DE LA MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE

L'objectif de la modélisation est dans un premier temps de comprendre **le fonctionnement de la nappe de la craie** et ses relations avec les cours d'eau et marais, en traduisant les phénomènes observés par des relations mathématiques. Dans un deuxième temps, il s'agit d'**évaluer l'influence des prélèvements souterrains actuels et futurs sur la nappe de la craie et les milieux qui lui sont associés** au droit du territoire du SAGE.

Le modèle hydrogéologique est réalisé en régime transitoire, c'est-à-dire que le modèle est capable de traduire les phénomènes saisonniers observés. La chronique à reconstituer s'étale entre le 1er octobre 1997 et le 3 octobre 2008.

Les étapes de la modélisation sont les suivantes :

- Calage :
  Le modèle est calé en régime permanent sur une piézométrie de référence. Les résultats de la simulation, calculés maille par maille, sont comparés à une piézométrie observée. Les paramètres de calcul sont ajustés pour rechercher la meilleure adéquation entre les résultats et les observations. Ce calage se fait en deux temps :
  - le modèle est calé sur **une** situation piézométrique d'étiage bien renseignée, en l'occurrence sur la situation observée le 8 novembre 2005.
  - le modèle est calé sur **l'évolution** des niveaux piézométriques telle qu'elle a été observée du 1er octobre 1997 au 3 octobre 2008.

- Simulations prospectives :
  Le modèle est utilisé afin de préciser l'influence des prélèvements actuels sur la piézométrie de la nappe au droit du territoire du SAGE et de tester l'impact de nouveaux champs captant.
  L'outil de calcul donne les hauteurs d'eau dans chacune des mailles. A partir de ces valeurs, il est possible de calculer les différentiels piézométriques entre la chronique de niveaux observée et une chronique de niveaux non influencés par les prélèvements.

8 MODÈLE CONCEPTUEL

8.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN MODELE

Une modélisation débute par l'élaboration d'**un modèle conceptuel qui est une représentation simplifiée de la réalité**. Le modèle conceptuel traduit aussi bien la géométrie des couches aquifères que les relations entre les différentes entités jouant un rôle dans le cycle de l'eau souterraine. Un modèle mathématique est ensuite produit pour simuler ce modèle conceptuel. La Figure 26 montre ce passage du modèle conceptuel au modèle mathématique.

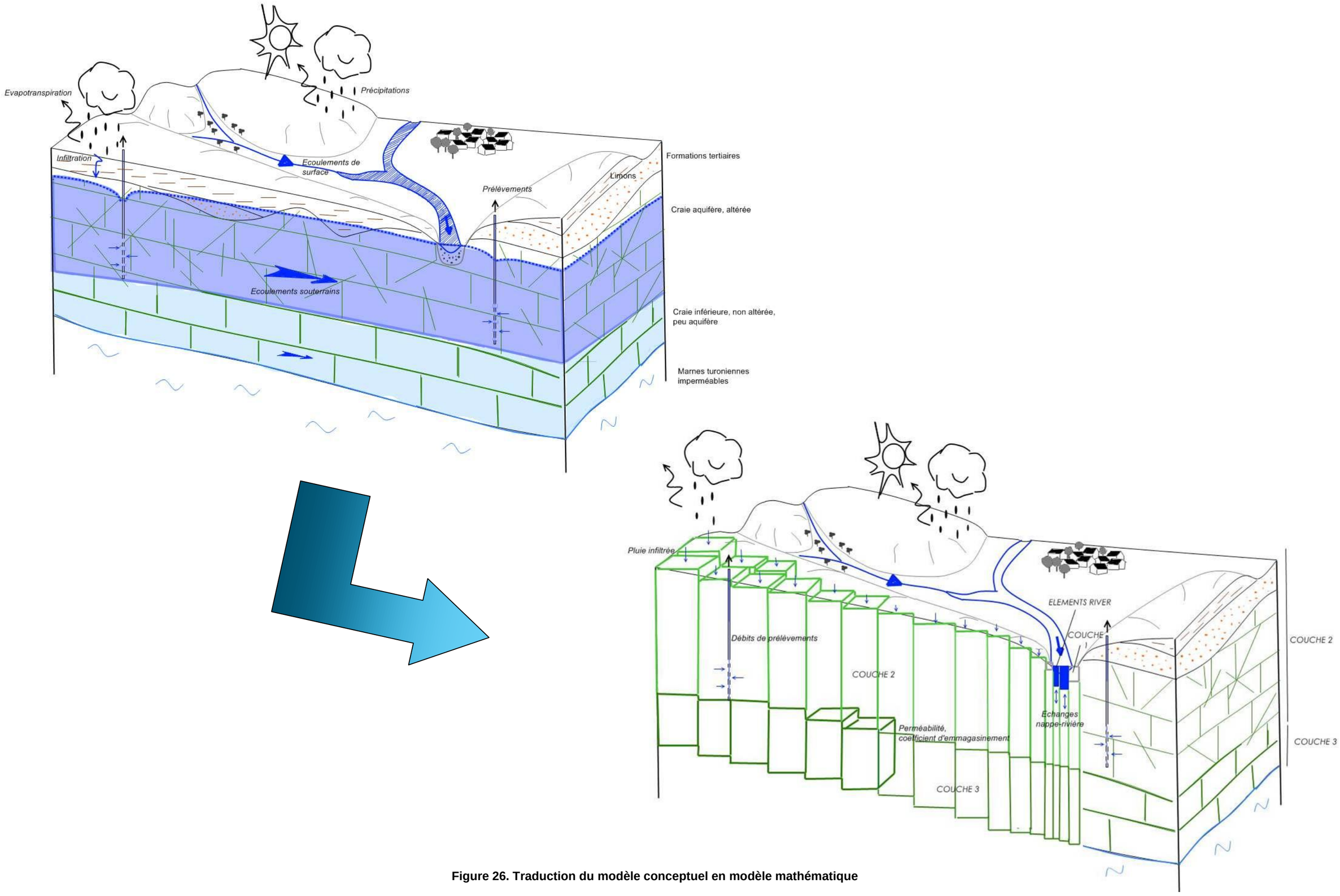


Figure 26. Traduction du modèle conceptuel en modèle mathématique

8.2 CODE DE CALCUL

Visual Modflow est une interface développée par la société Waterloo Hydrogeologic et commercialisée par Schlumberger. Ce logiciel utilise le code de calcul Modflow 2000. Modflow 2000 applique la méthode des différences finies et travaille en trois dimensions. L'espace est discrétisé en mailles élémentaires rectangulaires auxquelles sont attribués les paramètres hydrauliques représentatifs des écoulements souterrains (perméabilité, géométrie des couches, limites d'alimentation…). Ces mailles peuvent êtres affinées au droit des secteurs nécessitant le plus de précisions.

Le code de calcul résout les équations de base qui régissent les écoulements souterrains (loi de Darcy et conservation de la masse) en fonction des données d'entrée du modèle. Ces données d'entrée sont introduites par l'utilisateur et sont :

- pour partie des données connues (pluie, débits de prélèvements…)
- pour partie des données de calage que le modélisateur utilise pour retranscrire au mieux les valeurs observées (niveaux piézométriques, niveaux de la rivière, débit de la rivière)

Les résultats du calcul sont générés au centre de chacun des blocs issus du maillage.

8.3 MODELE HYDROGEOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT HYDROGEOLOGIQUE DE LA SENSEE

8.3.1 L'extension du modèle

Le modèle hydrogéologique du bassin-versant de la Sensée s'étend sur l'ensemble du bassin-versant hydrogéologique de la rivière tel qu'il a été défini dans la phase 3 de cette étude. Le paragraphe suivant reprend la description du bassin-versant.

« Les limites sont : au sud, une crête piézométrique oscillant autour de 100 m d'altitude (entre Monchy-au-Bois et Villers-au-Flos) ; à l'ouest et à l'est, deux lignes de courant se rejoignant au nord à une altitude voisine de 0 m au droit de Millonfosse, à près de 27 km de la Sensée. Un décrochement au voisinage de Pelves a été affecté aux frontières du bassin-versant : il s'appuie sur la faille de Marqueffles et englobe la partie amont de la vallée du Trinquise jusqu'à sa rive gauche, où il s'appuie sur une ligne de courant. Cette géométrie permet d'intégrer au bassin-versant hydrogéologique cette zone dont les enjeux sont importants, tout en évitant une extension jusqu'au voisinage d'Arras.
La surface couverte par le **bassin versant hydrogéologique** est de 1130 km². **Il est donc bien plus grand que le bassin versant hydrographique.** Cependant, quelques communes limitrophes n'en font pas partie : Beaurains, Bienvillers-au-Bois, Ficheux, Fresnes-les-Montauban, Gavrelles, Hannescamps, Hendecourt-les-Ransart, Plouvain. »

L'emprise du domaine modélisé est contenue dans un rectangle de 57 km de long par 37 km de large.

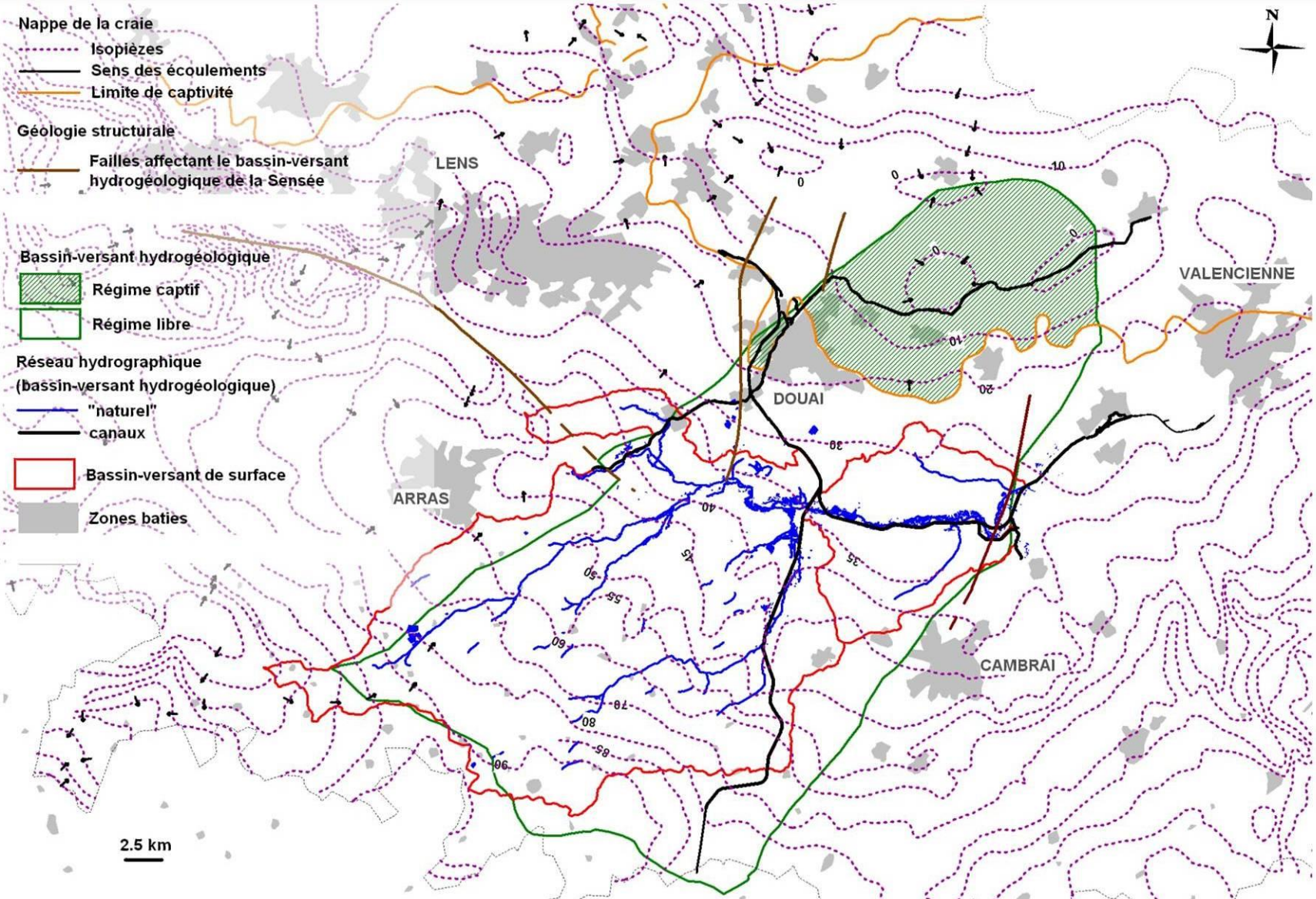


Figure 27. Limites du bassin-versant hydrogéologique. Données piézométriques : Agence de l'Eau Artois Picardie

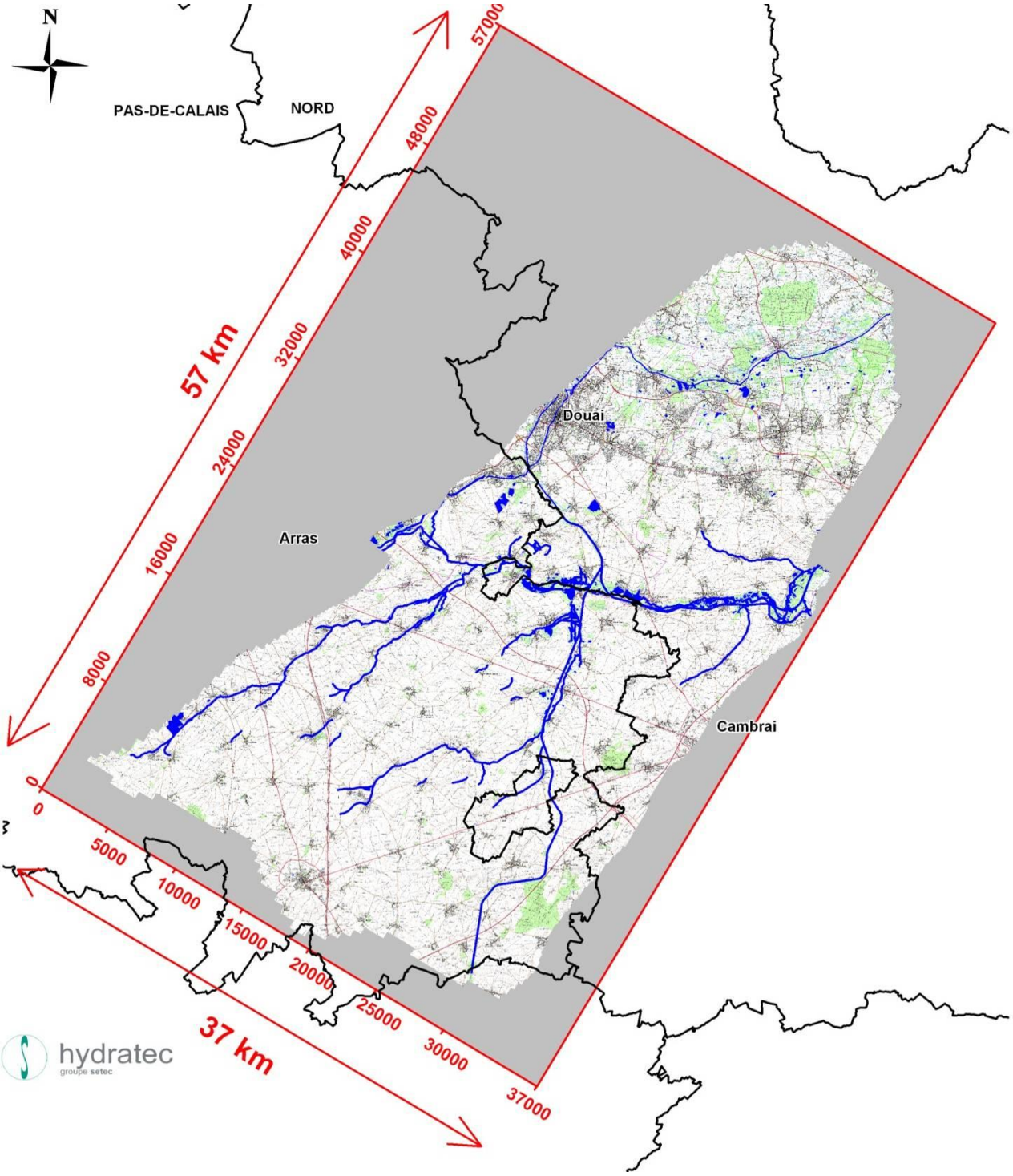


Figure 28. Localisation et extension du domaine modélisé (le réseau hydrographique est signalé comme repère. Il ne correspond pas systématiquement aux éléments entrés dans le modèle)

8.3.2 Maillage du modèle

Le modèle est découpé selon un maillage rectangulaire de taille variable. Les mailles les plus fines sont localisées dans les zones de vallée, elles ont une emprise de 125 x 125 m.
Sur les coteaux les mailles sont rectangulaires, le plus grand côté mesure alors 500 m.

Le modèle possède **trois couches géologiques**, dont les épaisseurs sont déterminées à partir des données de géologie disponibles à la Banque de données du Sous Sol du BRGM et des rapports de forage disponibles au BRGM ou communiqués par le SIDEN et le Syndicat Intercommunale d'Achiet-Bapaume-Ervillers.

Chacune des trois couches est découpée selon le même maillage. Au total, le modèle possède 178 710 mailles.

Le maillage est orienté selon l'axe principal des écoulements souterrains, soit Nord 31°.

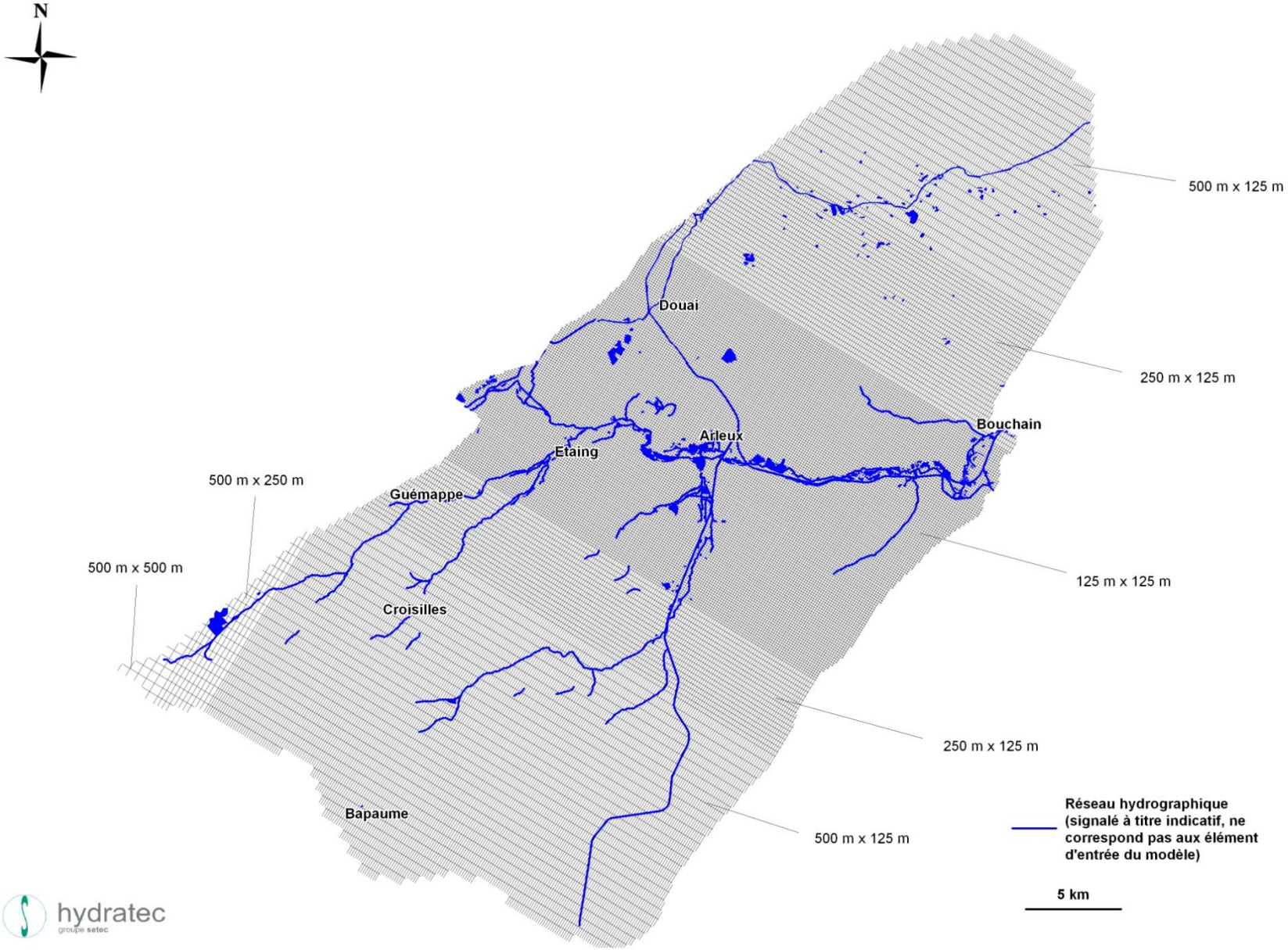


Figure 29. Maillage du modèle

8.3.3 Topographie du bassin versant

La cote altimétrique est définie à partir du modèle numérique de terrain SRTM fourni gratuitement par la NASA. 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 exagère les altitudes fournies. Les corrections ont été effectuées sur la base des données topographiques relevées par le géomètre, des valeurs de topographies fournies ponctuellement par la Banque du Sous Sol et par les points cotés de la carte IGN au 1/25 000.

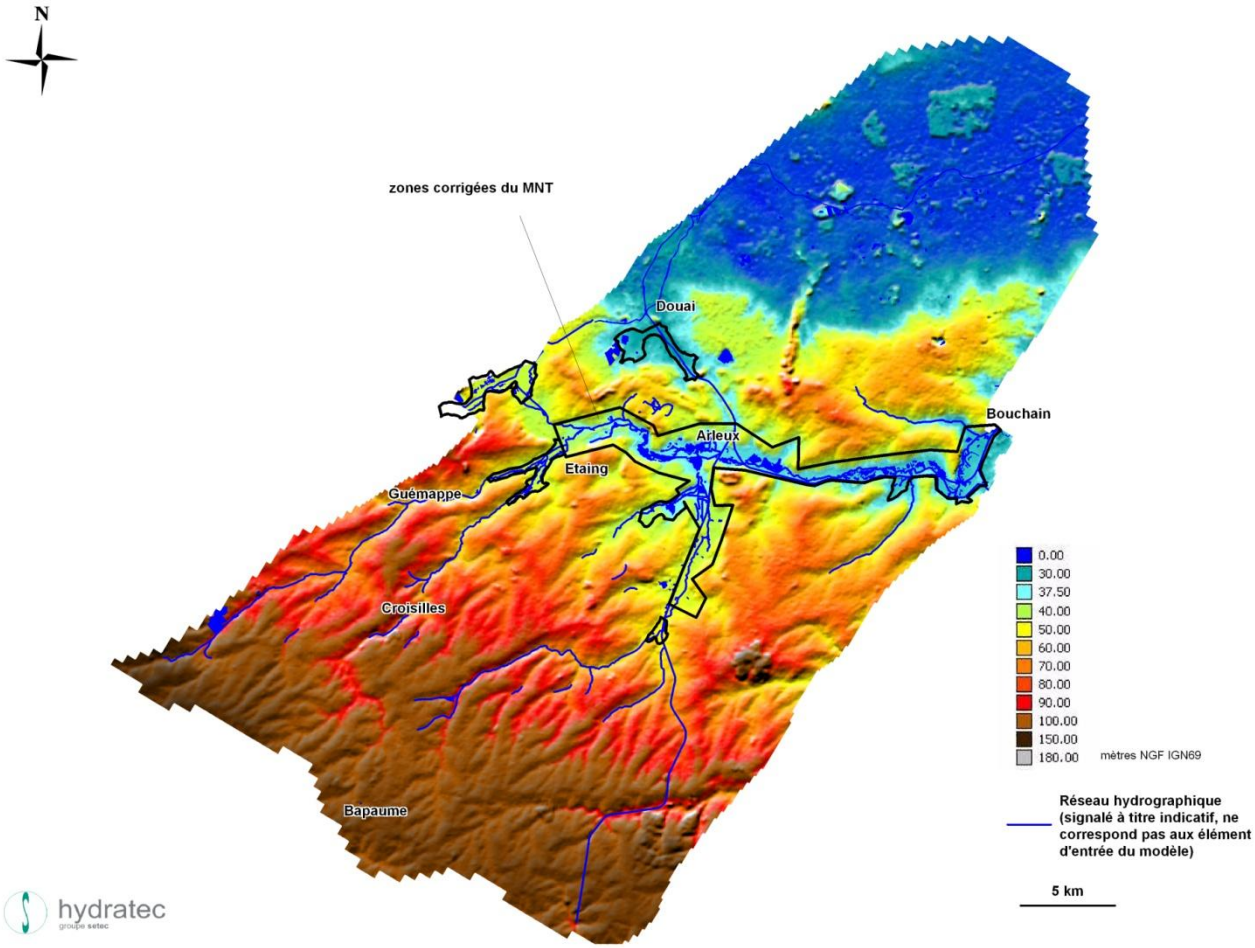


Figure 30. Modèle numérique de terrain utilisé pour le modèle hydrogéologique

8.3.4 Géométrie des couches du modèle

Le modèle est conceptualisé en trois couches superposées. Elles sont numérotées de haut en bas : la couche 1 est la couche la plus proche du terrain naturel, la couche 3 est la plus profonde. La couche 1 n'est active qu'au droit des zones d'alluvions et des sables tertiaires ; sur le reste de la zone modélisée, elle est inactive. Les couches 2 et 3 sont actives au droit de l'ensemble du bassin versant. Leur définition est exposée ci-dessous. La Figure 32 et la Figure 33 servent d'aide à la compréhension. Les cartes représentant les altitudes des différentes couches sont présentées en annexe.

8.3.5 La craie

La craie est présente sur l'ensemble du bassin versant étudié. Elle est représentée en couches 2 et 3 dans le modèle. Ces deux couches permettent de modéliser la première tranche fracturée de la craie qui bénéficie d'une bonne perméabilité (couche 2) et la seconde couche plus compacte (couche 3).

- La couche 2 représente la tranche supérieure fracturée de la craie qui bénéficie d'une bonne perméabilité. Pour des problèmes de géométrie du modèle et de convergence des calculs, il a été choisi d'ajouter la couche de limons et de sables tertiaires à cette couche de craie. Cet assemblage a été fait uniquement sur la partie du bassin versant située en dehors de la zone de captivité de la nappe. Cette fusion est valable car seules quelques cuvettes de limons très localisées sont effectivement ennoyées dans la nappe. La perméabilité de la couche est adaptée au droit de ces secteurs afin de rendre compte de la présence de ces matériaux moins perméables.

  Ainsi, la surface supérieure de la couche 2 est constituée par :

  - L'interface alluvions/craie au droit des vallées alluviales. Celle-ci a été déterminée sur la base des données de sondage disponibles à la Banque du Sous Sol.
  - L'interface sables tertiaires/craie au droit de la zone captive située au nord de la Sensée. Celle-ci a été déterminée sur la base des données de sondage disponibles à la Banque du Sous Sol.
  - La topographie issue du modèle numérique de terrain sur le reste du bassin versant.

  La surface inférieure de la couche 2 est constituée par l'interface craie aquifère/craie moins aquifère. Celle-ci a été définie comme suit :
  - Au droit de la zone captive : l'épaisseur de craie aquifère a été estimée à 25 m sur la base des données de forage disponibles à la Banque du Sous Sol.
  - Au droit de la zone libre : l'épaisseur de craie aquifère toujours en eau a été fixée à 15 m. Le niveau piézométrique le plus bas pris comme référence pour cette définition correspond à l'étiage de l'hiver 1997.

- La couche 3 représente la tranche inférieure, non altérée de la craie, qui bénéficie d'une faible perméabilité.
  - La surface supérieure de cette couche est définie comme la surface inférieure de la couche 2.
  - La surface inférieure de la couche 3 est définie sur la base des données de sondage de la Banque du Sous Sol et correspond à l'interface entre la craie et les marnes du turonien moyen (Dièves bleues).

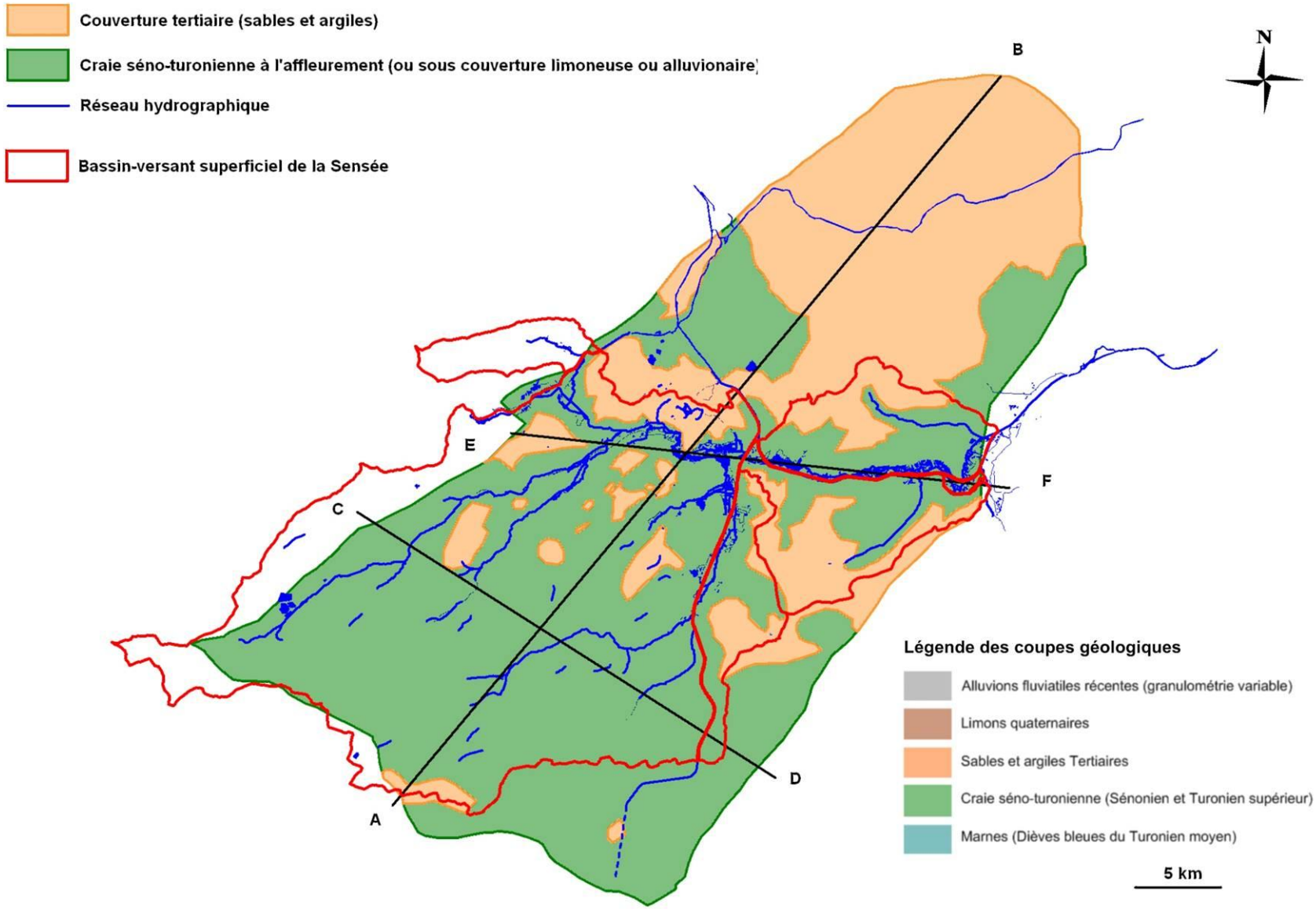


Figure 31. Carte géologique schématique du bassin-versant hydrogéologique. Localisation du profil géologique de la Figure 32.

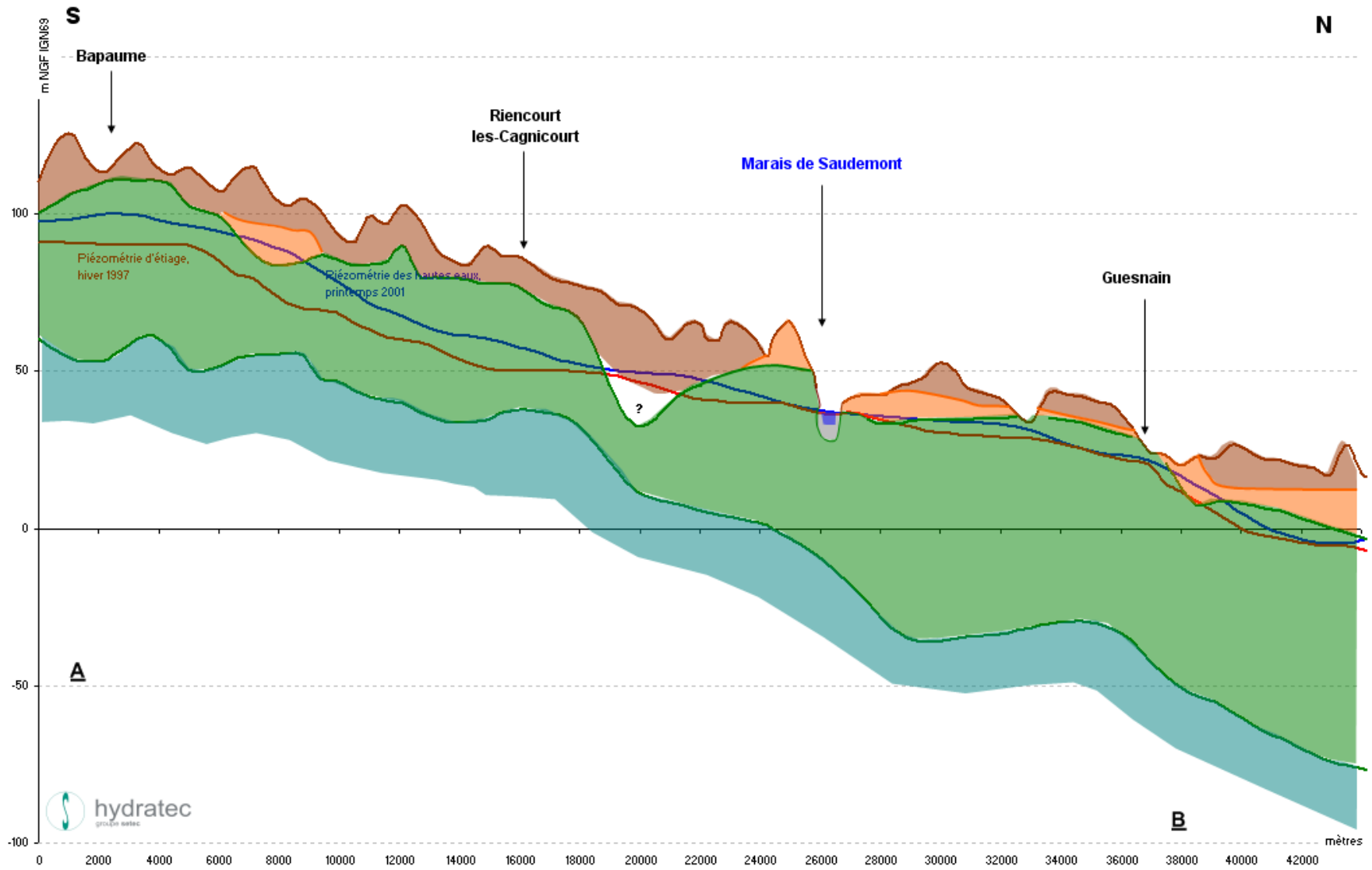


Figure 32. Coupe Nord-Sud du bassin-versant, présentée dans le rapport de phase 3

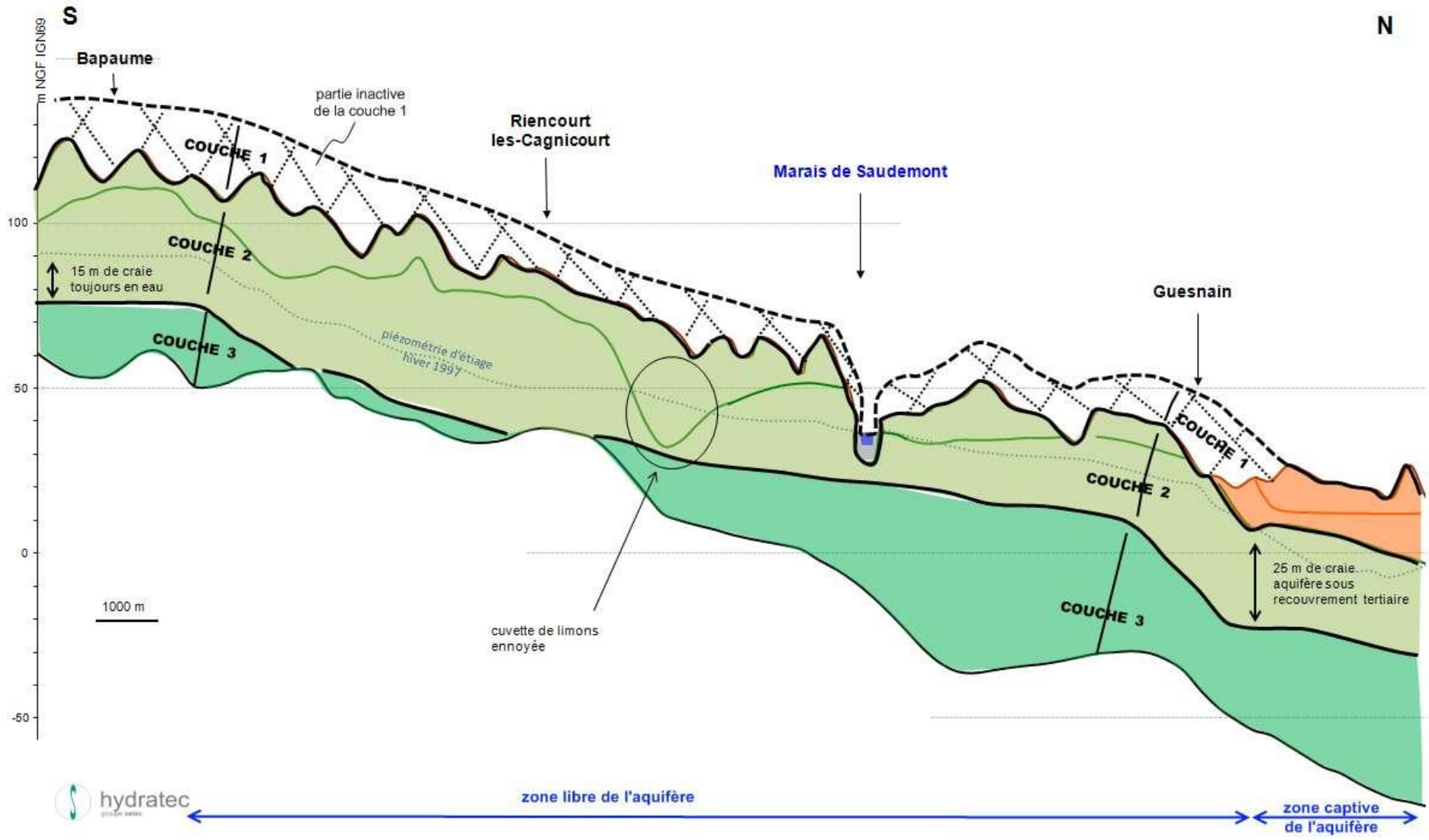


Figure 33. Traduction de la coupe nord-sud de la figure précédente dans le modèle conceptuel

8.3.6 Les sables tertiaires

En zone de captivité, les sables du tertiaire et les limons sus-jacents ont été affectés à la couche 1. La définition suivante des limites de cette couche est valable uniquement sur la zone de captivité du bassin versant :

- La surface supérieure de la couche 1 est définie par la topographie issue du modèle numérique de terrain.
- La surface inférieure de la couche 1 est définie sur la base des données de sondage de la Banque du Sous Sol et correspond à l'interface entre les sables tertiaires et la craie séno-turonienne.

8.3.7 Les alluvions

Au droit des vallées, les alluvions ont été affectées à la couche 1. Une seule couche d'alluvions a été mise en place. La présence de lits alluviaux distincts n'a pas été testée. Les limites de cette couche sont définies comme suit :

- La surface supérieure de la couche 1 est définie par la topographie issue du modèle numérique de terrain.
- La surface inférieure de la couche 1 est définie sur la base des données de sondage de la Banque du Sous Sol et correspond à l'interface entre les alluvions et la craie séno-turonienne.

8.3.8 Les limites du modèle

Les limites du modèle correspondent à des lignes de courant, sauf au sud où il s'agit d'une ligne de crête piézométrique. Ainsi, l'ensemble des limites du modèle sont des limites à flux nul.

8.3.9 Les données d'entrée du modèle

8.3.9.1 Pluie infiltrée

Les informations principales concernant l'analyse pluviométrique faite en phase 3 sont reprises ci-dessous. Il est à rappeler que l'analyse de la pluviométrie a été faite sur la base des données collectées sur le bassin-versant superficiel de la Sensée. Ainsi, nous ne disposons pas de données brutes sur la zone du bassin-versant hydrogéologique située en aval du territoire du SAGE de la Sensée.

- *La pluviométrie nette moyenne[1] est de 744 mm/an.*
- *La pluie efficace[2] moyenne est comprise entre 198 mm/an et 112 mm/an, pour des valeurs de RUmax[3] comprises entre 100 et 200 mm respectivement, soit 30 à 53 % de la pluie brute.*
- *La pluviométrie présente un gradient décroissant du sud-ouest vers le nord-est, sa dénivelée atteint 200 mm.*

Les calculs de la pluie efficace pour des valeurs de RUmax de 100 et 200 mm ont été exposés dans la phase 3. **La pluie infiltrée vers la nappe représente une fraction de cette pluie efficace. La phase de calage du modèle permet d'estimer le ratio pluie infiltrée/pluie efficace et ainsi d'apprécier le caractère plus ou moins ruisselant ou infiltrant du bassin versant.** Cette partie est développée au paragraphe 9.4.

Pour les besoins de calage du modèle, les valeurs de pluie efficace et donc de pluie infiltrée ont été calculées pour des valeurs de RUmax de 150 et 180 mm.

L'observation parallèle des chroniques piézométriques et pluviométriques font apparaître un temps de réponse entre pic pluviométrique et pic piézométrique compris entre 10 et 60 jours. Ce retard est dû notamment à l'épaisseur des terrains que les précipitations doivent traverser avant d'atteindre la nappe. Le code de calcul Modflow n'intègre pas ces phénomènes d'écoulements dans la zone non saturée (hors nappe) mais ils peuvent être intégrés par des coefficients de retard affectés aux chroniques pluviométriques. Cependant ces phénomènes ne sont pas homogènes sur l'ensemble du bassin-versant et, à l'échelle des 12 années de chronique piézométrique reconstituées, ces retards n'apportent pas d'informations supplémentaires sur le fonctionnement de l'aquifère. Ainsi, les entrées du modèle ne tiennent pas compte de ces décalages.

[1] Pluie nette : Il s'agit de la pluie qui atteint le sol soit directement, soit par égouttage de la végétation, soit par écoulement le long des troncs.
[2] Pluie efficace : il s'agit de la fraction de la pluie nette qui sert à la recharge des aquifères et/ou aux écoulements de surface. La différence entre pluie nette et pluie efficace est due à l'évapotranspiration et à la recharge de la réserve hydrique des sols (cf. rapport de phase 3).
[3] RUmax : quantité d'eau dont la végétation peut disposer pour assurer son alimentation en eau en l'absence de précipitation. Elle est fonction de la capacité de rétention des sols et de leur épaisseur.

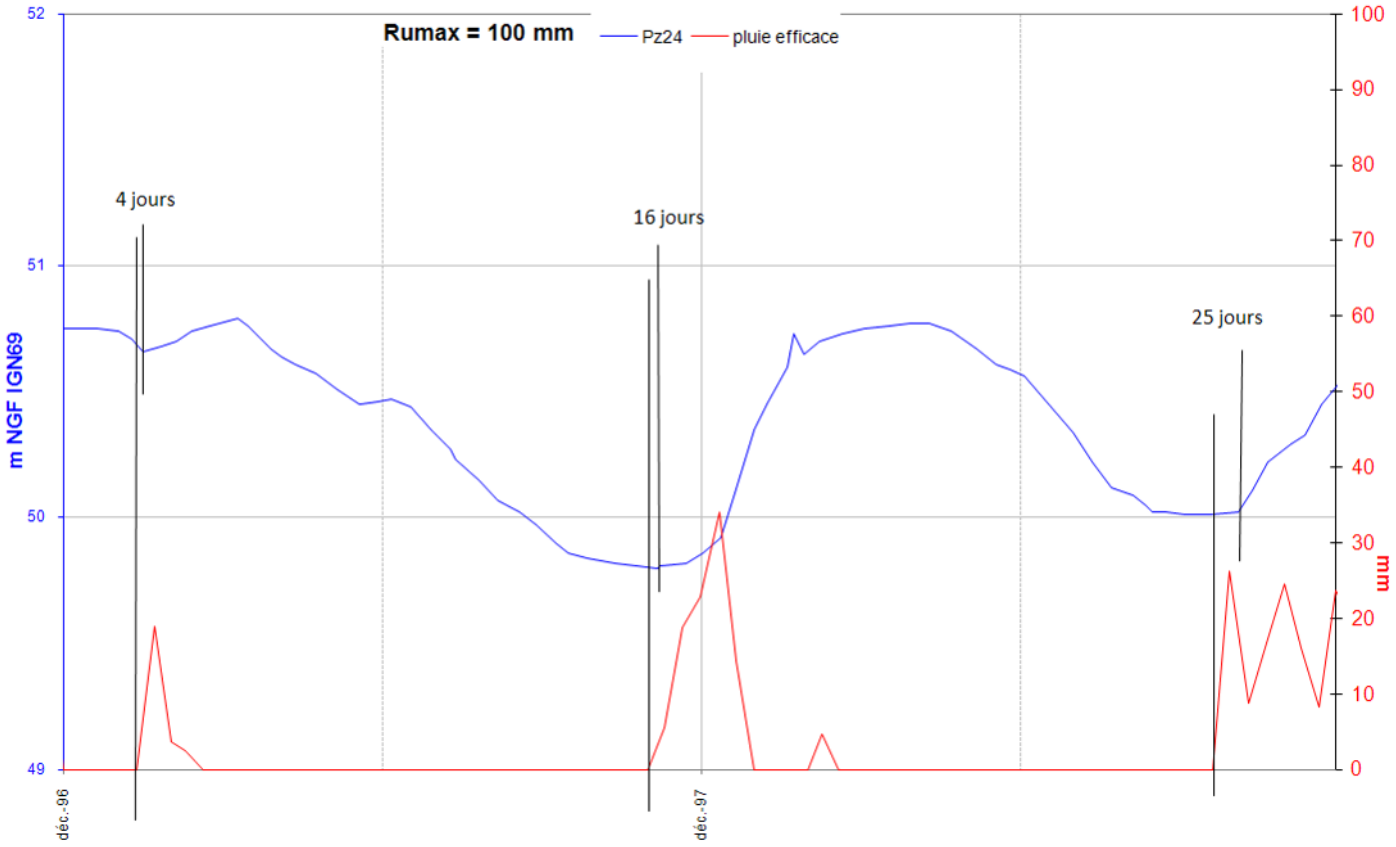


Figure 34. Retard pluviométrie/réaction de la piézométrie

La répartition spatiale des pluies infiltrées est induite à la fois par la répartition des pluies nettes, par la répartition de l'évapotranspiration et par la répartition des valeurs de RUmax. Les valeurs de RUmax étant majoritairement dépendantes de l'épaisseur des sols, il a été choisi de localiser les sols les moins épais aux abords des vallées et les plus profonds au droit des plateaux.

Les chroniques de pluie de 2005 à 2008 ne permettent pas de distinguer des tendances sur le long terme applicables à l'ensemble de la chronique. De plus, les seules données d'évapotranspiration disponibles sont celles du poste de Wancourt. C'est donc de la répartition spatiale de la RUmax des sols que découle le zonage des pluies efficaces appliquées au modèle.

Lorsque la nappe de la craie est captive sous les formations tertiaires, on considère que la nappe n'est pas rechargée par les précipitations : la pluie infiltrée est nulle.

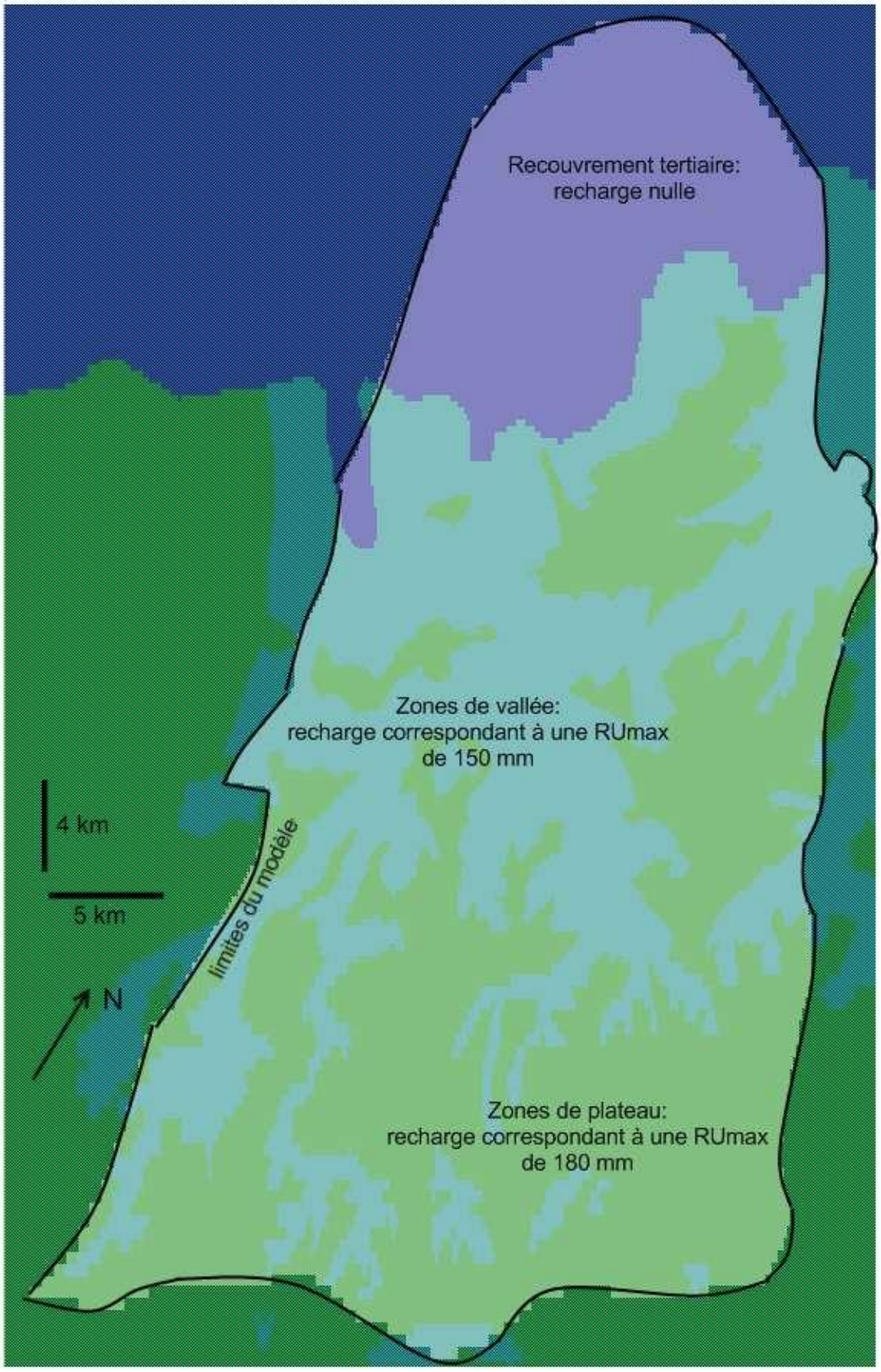


Figure 35. Répartition des pluies infiltrées

8.3.9.2 Le réseau hydrographique

8.3.9.2.1 Représentation du réseau hydrographique

Sous Visual Modflow, le réseau hydrographique peut être représenté de plusieurs façons. Le choix de la représentation la plus pertinente se fait sur la base du sens des relations de drainance/réalimentation locales entre l'aquifère et le réseau hydrographique.

8.3.9.2.1.1 Rivières

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.

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.

Les caractéristiques de ces différents éléments ont été déterminées à partir des mesures réalisées par le géomètre en 2009-2010 et des compléments obtenus dans la bibliographie notamment concernant les cotes des canaux.

Les cellules rivières ont été utilisées pour représenter la rivière Sensée amont à partir de sa confluence avec le Cojeul jusqu'au canal du Nord. Elles ont également été utilisées pour représenter la Sensée aval après son premier passage sous le canal de la Sensée. Certains biefs du canal du Nord ont également été représentés par des cellules rivières, notamment le souterrain de Ruyaulcourt.

Les cellules drains ont été utilisées pour représenter le fonctionnement des sources et des tronçons amont du Cojeul, de la Sensée, de l'Agache, de l'Hirondelle et du Trinquise.

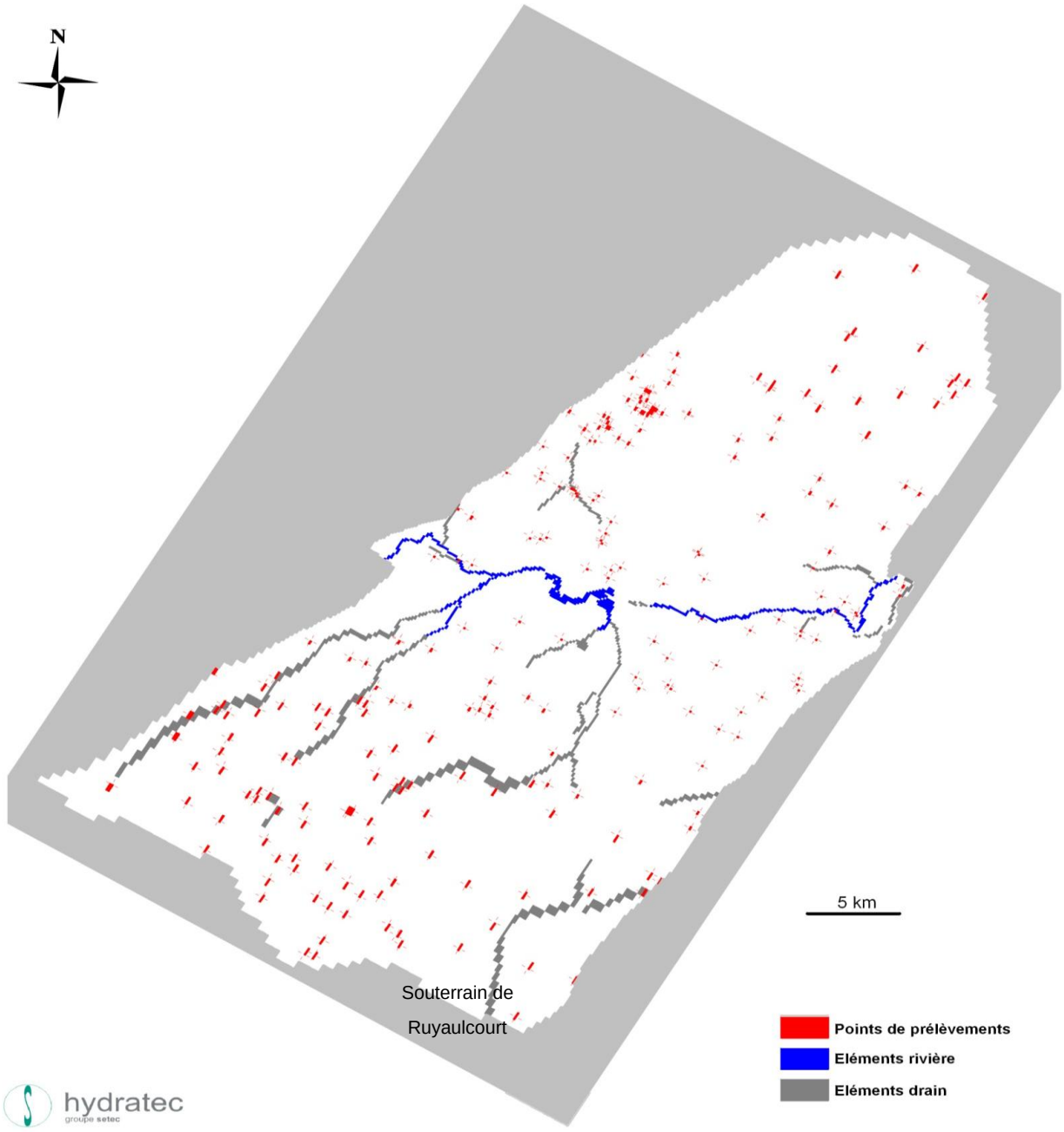


Figure 36. Représentation du réseau hydrographique sous Visual Modflow, localisation des points de prélèvement

8.3.9.2.1.2 Plans d'eau

Les plans d'eau ont été intégrés au modèle de la même façon que les cellules aquifères normales, mais en leur affectant une perméabilité suffisamment élevée pour que les écoulements s'y fassent sans aucun frein.

8.3.9.2.2 Niveaux de la Sensée et de ses affluents

Les cotes d'eau introduites dans les cellules rivières et drains ont été déduites :

- des valeurs moyennes relevées au droit des points de mesures instrumentés depuis 2005 sur la Sensée amont et aval.
- des valeurs relevées par le géomètre en 2009-2010 au cours de la campagne topographique.
- des cotes estimées du fond de la rivière sur les parties les plus à l'amont de la Sensée, du Cojeul, de l'Agache et de l'Hirondelle. La hauteur d'eau a été fixée à 0.5 m.

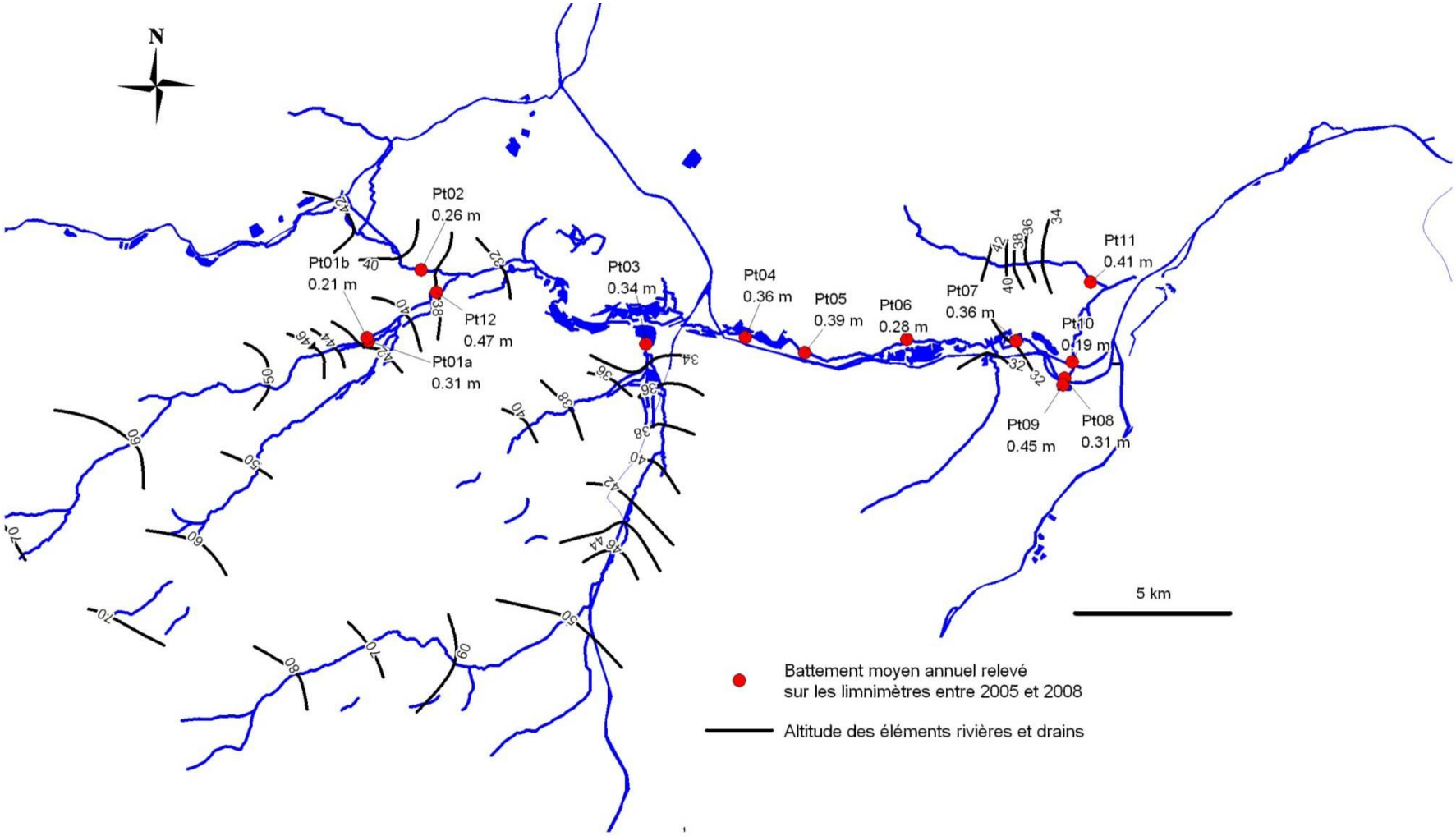


Figure 37. Réseau hydrographique : synthèse de la répartition des cotes introduites dans le modèle (m NGF IGN69) et variations annuelles moyennes des niveaux de la Sensée (2005-2008)

Les variations de niveau de la Sensée en dehors des épisodes de crue courts et violents sont comprises entre 0.19 et 0.47 m. Cette amplitude est comparable à la précision avec laquelle la cote de certains éléments est connue. Ainsi, par souci de simplicité, il a été choisi d'affecter des niveaux constants aux éléments hydrographiques du modèle.

8.3.9.3 Prélèvements

Un état des lieux des prélèvements a été fait dans la phase 3 de cette étude sur la base des données fournies par l'Agence de l'Eau Artois Picardie. Les données de base correspondent à des volumes prélevés annuellement. A chaque point de prélèvement localisé a été affecté un débit de prélèvement mensuel variable tout au long de la période modélisée. Le coefficient correspondant à chacun des mois dépend de l'usage de l'eau. Ainsi, les prélèvements industriels et eau potable sont affectés d'une pondération mensuelle de $^1/_{12}$ tandis que les prélèvements agricoles ne sont répartis que sur la période d'irrigation, c'est-à-dire les mois de juin, juillet et août, avec des pondérations respectives de ¼, ½, ¼.

Les chroniques de prélèvement annuel fournies par l'Agence de l'Eau Artois-Picardie concernent la période 2003-2007. Les données de prélèvement introduites pour la période 1997-2002 et pour l'année 2008 correspondent à des moyennes extrapolées des données de l'Agence (cf. Figure 38). Les points de prélèvements sont localisés sur la Figure 36.

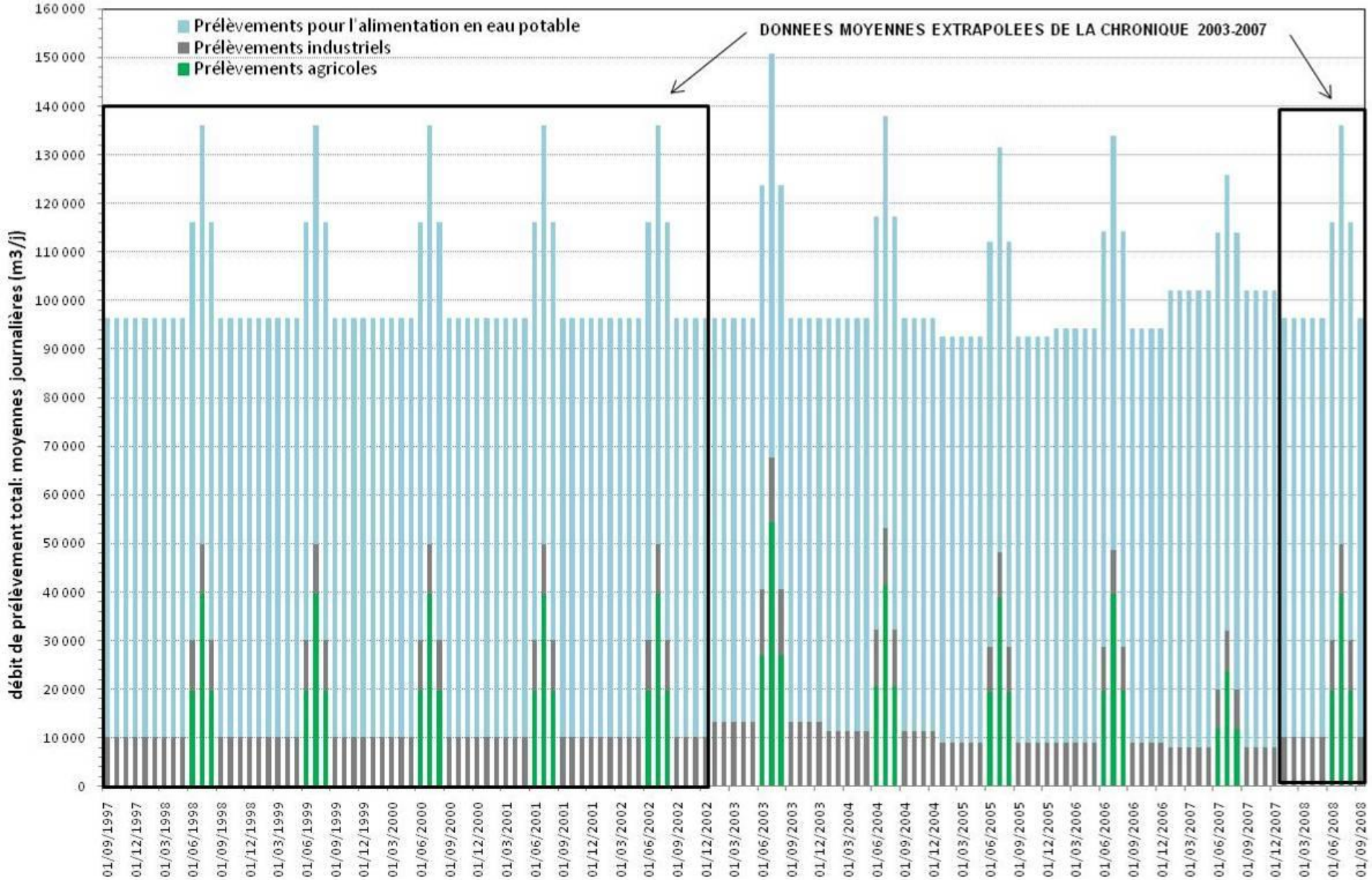


Figure 38. Rythmes de pompage appliqués au modèle hydrogéologique (total sur l'ensemble du bassin versant hydrogéologique des débits journaliers ; les moyennes ont été calculées au pas de temps mensuel)

8.3.10 Les données de contrôle du calage

□ Les chroniques piézométriques

Afin de contrôler le calage, les chroniques piézométriques disponibles sur le bassin versant pour la période 1997-2008 ont été utilisées. Tous les piézomètres ne disposent pas de données sur l'ensemble de cette période. Le Tableau 6 présente les chroniques disponibles pour chacun des piézomètres. En fonction de ces disponibilités, 32 points ont été utilisés pour le calage en permanent d'octobre 2005.

Identifiant	Précision du nivellement (m)	Chronique disponible pour le calage en transitoire	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
PZ01	+/- 0	sept-05/sept-08												
PZ02	+/- 0	sept-05/sept-08												
PZ03	+/- 0	sept-05/sept-08												
PZ04	+/- 0	sept-05/sept-08												
PZ05	+/- 0	sept-05/sept-08												
PZ06	+/- 0	sept-05/sept-08												
PZ07	+/- 0	sept-05/sept-08												
PZ08	+/- 0	sept-05/sept-08												
PZ09a	+/- 0	sept-05/sept-08												
PZ09b	+/- 0	sept-05/sept-08												
PZ10	+/- 0	sept-05/sept-08												
PZ12	+/- 0	oct-97/oct-08												
PZ13	+/- 0	oct-97/oct-06												
PZ14	+/- 0	oct-97/déc-06												
PZ15	+/- 0	oct-97/oct-08												
PZ16	+/- 0	oct-98/oct-01												
PZ17	+/- 1	oct-97/oct-03												
PZ18	+/- 1	oct-97/juin-05												
PZ19	+/- 0	oct-97/janv-05												
PZ20	+/- 0	oct-97/oct-08												
PZ21	+/- 0.5	oct-97/oct-08												
PZ22	+/- 1	oct-97/nov-03												
PZ23	+/- 0	oct-97/oct-08												
PZ24	+/- 1	oct-97/oct-08												
PZ25	+/- 1	avr-03/nov-06												
PZ26	+/- 0	oct-97/déc-06												
PZ28c	+/- 0	juin-04/avr-08												
PZ29c	+/- 0	juin-04/avr-08												
PZ30c	+/- 0	juin-04/avr-08												
PZ28a	+/- 0	juin-04/avr-08												
PZ29a	+/- 0	juin-04/avr-08												
PZ30a	+/- 0	juin-04/avr-08												
PZ28e	+/- 0	juin-04/avr-08												
PZ29e	+/- 0	juin-04/avr-08												
PZ30e	+/- 0	juin-04/avr-08												

Tableau 6. Chroniques piézométriques disponibles pour le calage du modèle

□ Les débits observés sur la Sensée

Les débits mesurés sur la Sensée servent de valeurs de contrôle pour le calage du modèle en régime permanent et en régime transitoire (cf. 9.4.5).

9 RESULTATS DU CALAGE DU MODELE

9.1 PRINCIPES DU CALAGE

Le calage du modèle consiste à ajuster les propriétés d'entrée (perméabilité, coefficient d'emmagasinement) et les conditions aux limites (conductance des drains et rivières) du modèle afin de retranscrire au mieux la piézométrie et les débits observés aux points de mesure.

9.2 PERIODE DE CALAGE ET PAS DE TEMPS

9.2.1 Régime permanent

Le régime permanent est un régime théorique pour lequel il n'existe aucune perturbation du système. Ce type de régime permet d'évaluer les différents paramètres des écoulements moyens sur de grandes échelles de temps. Il peut être approché par une situation d'étiage, où l'on considère que le système est peu influencé par la pluviométrie.

Pour exploiter au maximum les données piézométriques relevées au cours de la première phase de cette étude, le calage en régime permanent a été effectué sur la situation piézométrique de l'étiage 2005 (observations faites au mois de novembre 2005), pour laquelle on bénéficie des piézomètres mis en place en phase 2 de l'étude. Ce calage a ensuite été utilisé pour représenter la situation piézométrique de l'étiage 1997 afin de bénéficier d'une situation de départ stabilisée pour les calculs ultérieurs en régime transitoire de 1997 à 2008. Une vérification de la réponse du modèle dans cette situation a également été menée sur la base des observations faites au mois d'octobre 1997.

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.

Trois zones de recharge ont été introduites dans le modèle. Elles correspondent aux zonages établis selon la RUmax des sols.

Le tableau ci-dessous présente les valeurs de pluie infiltrée introduite pour le calage du modèle en octobre 1997. Le ratio pluie infiltrée/pluie nette totale est de 100%.

	Pluie infiltrée (mm/j)	Pluie infiltrée (mm/an)
Zone de plateaux	0.08	53.3
Zone de vallée	0.16	26.3
Zone de recouvrement tertiaire	0	0

Tableau 7. Valeurs de recharge introduites pour le calage du modèle en régime permanent sur la situation de l'étiage 1997.

Différents niveaux de recharge de la nappe de la craie sous les formations tertiaires ont été testés. C'est une absence de recharge qui permet de traduire le mieux la piézométrie observée au nord du bassin-versant. Cette absence de recharge retranscrit une drainance (échanges verticaux ascendants et/ou descendants entre deux niveaux aquifères superposés) négligeable dans son ensemble entre l'aquifère crayeux et les formations tertiaires sus-jacentes.

9.2.2 Régime transitoire

Le régime transitoire permet de restituer des situations pour lesquelles il existe des perturbations discontinues/variables du système (débits de pompage variables, une pluviométrie variable...). Ce régime tient compte de la capacité de stockage des aquifères.

La période de calage du modèle en régime transitoire débute en période d'étiage de la nappe, en automne-hiver 1997, et court jusqu'à la fin de la période d'observation des piézomètres instrumentés pour l'Institution Interdépartementale de la Vallée de la Sensée, octobre 2008. La situation de départ du calcul en régime transitoire est livrée par le calage en permanent sur la piézométrie de l'étiage 1997. Le nombre de pas de temps de calcul est égal à 396, qui s'étendent sur une période totale de 4220 jours. Le premier pas de temps dure 200 jours et est établi en régime permanent afin de stabiliser les calculs. L'amplitude des pas de temps restants est de 10 à 30 jours. Ceci permet d'être en phase avec les données pluviométriques décadaires et d'avoir un niveau de détail offrant un bon compromis entre précision et vitesse de calcul.

9.3 CALAGE DU MODELE EN REGIME PERMANENT

Le calage des régimes permanents est apprécié par l'ajustement des cotes calculées aux cotes observées sur l'ensemble des points d'observation disponibles pour l'étiage 2005 et pour l'étiage 1997.

La répartition des perméabilités calées pour la craie aquifère (couche 2) est présentée dans la figure suivante. On distingue deux zones principales sur la craie aquifère : la craie des vallées présente une bonne perméabilité de 10^{-3} m/s, sur les plateaux la perméabilité se réduit peu à peu jusqu'à atteindre des valeurs de 7 et 8.10^{-5} m/s dans les parties les plus hautes du bassin versant. Ces valeurs faibles s'expliquent par une altération faible de la craie liée à l'absence d'écoulements superficiels pérennes. Deux failles orientées sud-est / nord-ouest se distinguent par leur perméabilité élevée (0.02 m/s) liée à une plus grande fracturation de ces zones.

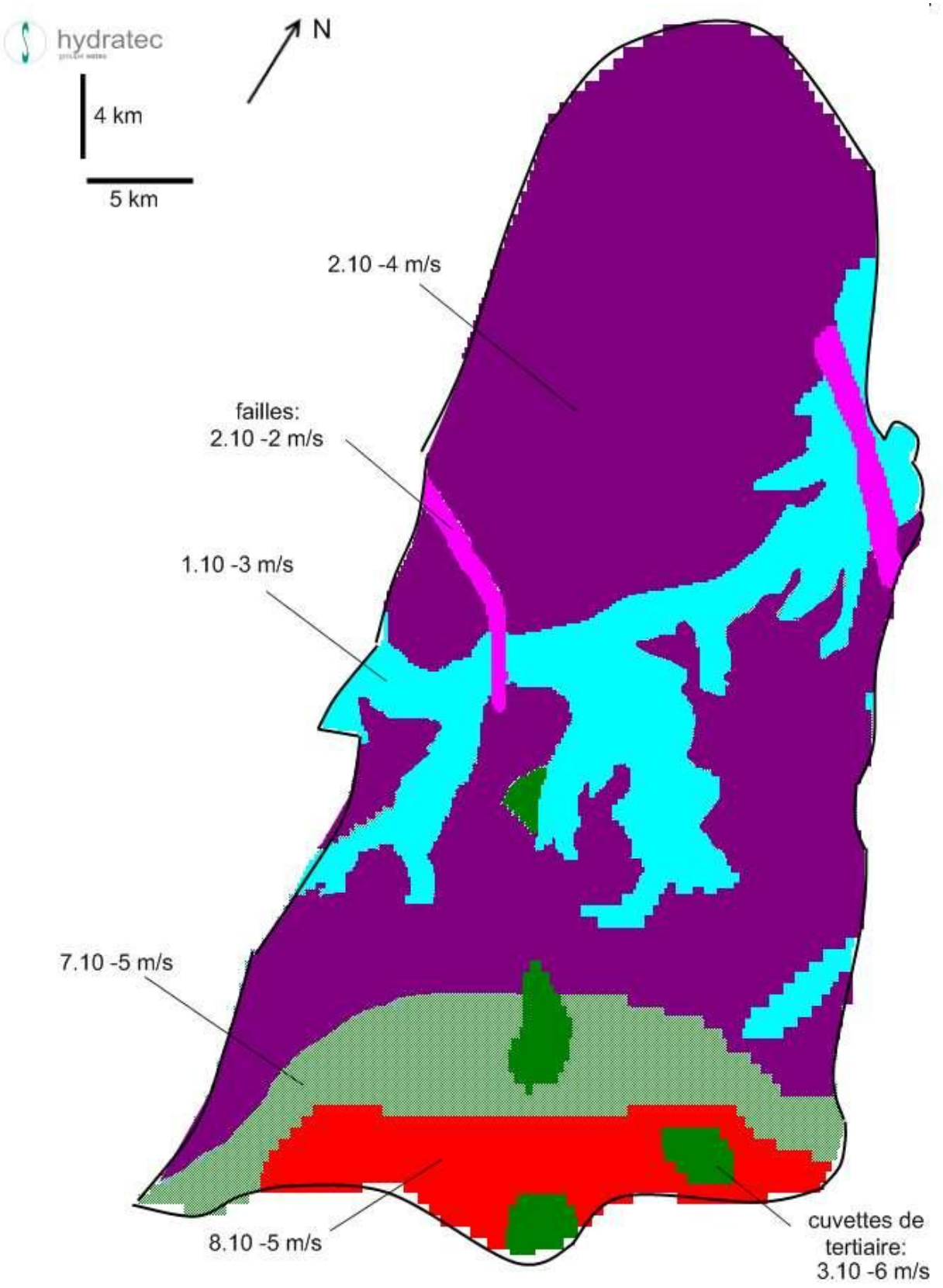


Figure 39. Répartition des perméabilités de la craie aquifère (couche 2)

Les valeurs de perméabilité retenues pour la couche 1 et la couche 3 sont présentées dans le tableau suivant :

Formation	Perméabilité en m/s
Alluvions de la Sensée	1.10^{-4}
Formations tertiaires, nord du bassin versant hydrogéologique	1.10^{-6}
Craie inférieure	6.10^{-5}

Tableau 8. Perméabilités retenues pour les couches 1 et 3

Les formations alluviales situées dans les vallées ont été représentées en une seule couche alors qu'en réalité, il s'agit de nombreuses strates entrecroisées et présentant des propriétés hydrodynamiques différentes. La couche représentative des alluvions présente une perméabilité plus faible que celle de la craie sur laquelle elle est directement posée (10^{-4} m/s), mais cette perméabilité reste élevée dans l'ensemble. Les zones localement captives n'ont pas été retranscrites. C'est la relation nappe de la craie – rivières telle qu'elle a été établie dans le modèle qui intègre à la fois les propriétés du lit de la rivière et celles des couches alluviales intercalées.

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, c'est à dire lorsque les cotes calculées sont supérieures aux cotes observées. 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 cotes observées ne proviennent pas toujours de points qui ont été nivelés par un géomètre, les incertitudes sur ces points de mesure sont détaillées dans le Tableau 6.

Le calage en régime permanent est inférieur à 1.2 m le long de la vallée de la Sensée. Au nord du bassin versant, les résiduels sont supérieurs à 3 m. Ceci est dû à la présence de nombreux champs captant qui déprime la nappe et sont mal traduisibles en régime permanent. Au sud-est du bassin versant les résiduels importants (7 et 8 m) sont dus à des effets de bord (erreurs de calcul au droit des limites du modèle, induites par les conditions aux limites introduites).

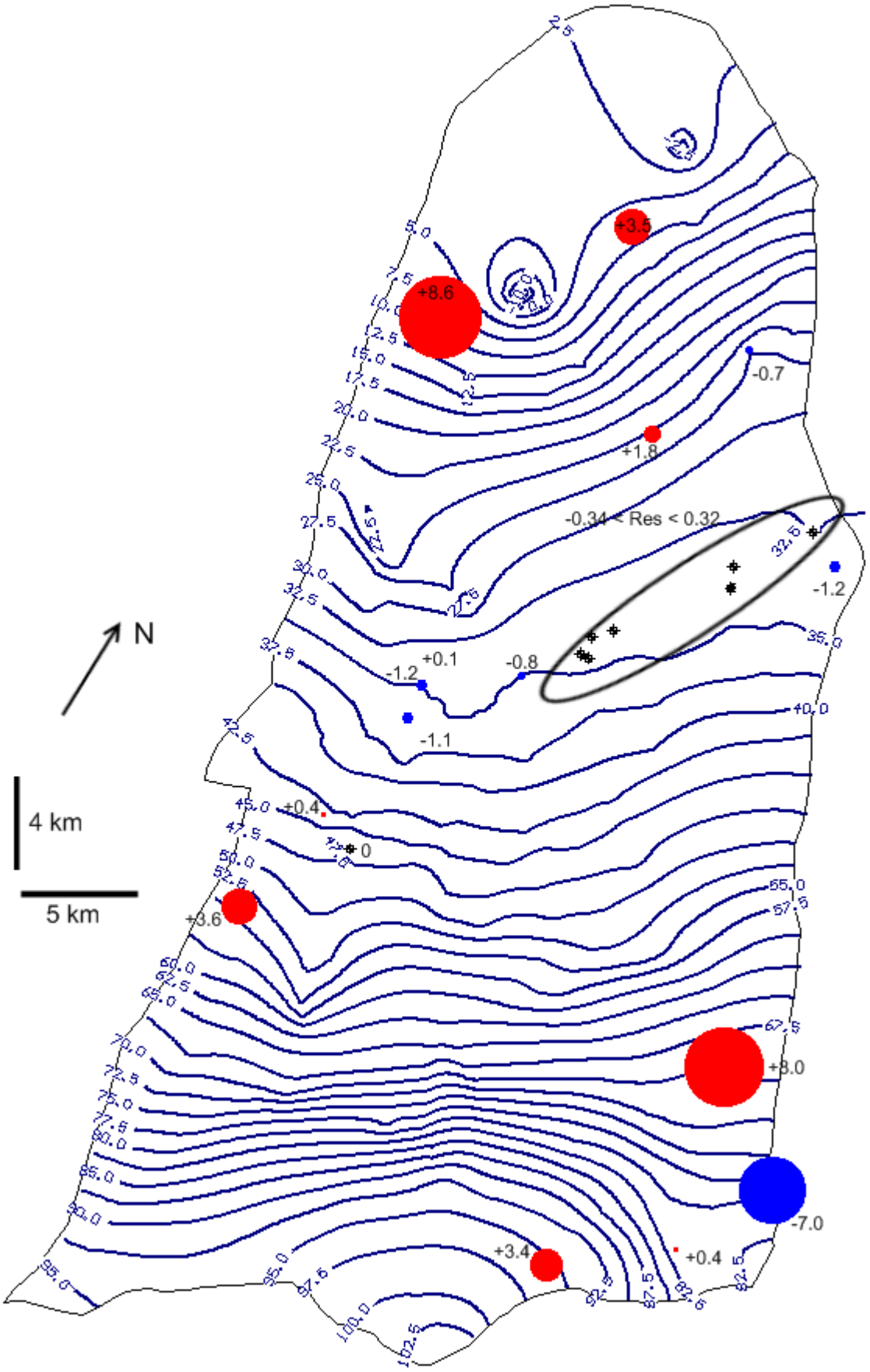


Figure 40. Écarts entre cotes calculées et mesurées en régime permanent (novembre 2005)

9.4 CALAGE DU MODELE EN REGIME TRANSITOIRE

9.4.1 Coefficient d'emmagasinement

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.

Le coefficient d'emmagasinement fait l'objet d'un calage, les valeurs retenues pour la nappe de la craie dans sa partie supérieure la plus aquifère sont présentées sur la Figure 41.

Deux ensembles se distinguent dans la couche la plus aquifère de la craie : la partie captive avec un coefficient d'emmagasinement très faible (10^{-5}) et la partie libre qui présente des coefficients d'emmagasinement compris entre 0.02 et 0.001. La partie captive réagit donc rapidement aux variations de niveaux piézométriques, tandis que la partie libre a un rôle de stockage.
Dans la nappe libre, trois zones se distinguent :

- Au nord de la Sensée et dans les vallées humides : cette zone est celle qui a la plus grande capacité à stocker de l'eau dans sa porosité
- Dans les zones de plateaux : la capacité à emmagasiner de l'eau dans cette partie est plus réduite.
- Les deux zones fracturées : comme pour la perméabilité, la fracturation plus importante de la roche assure une plus grande porosité et une capacité de stockage accrue de la craie dans ces zones.

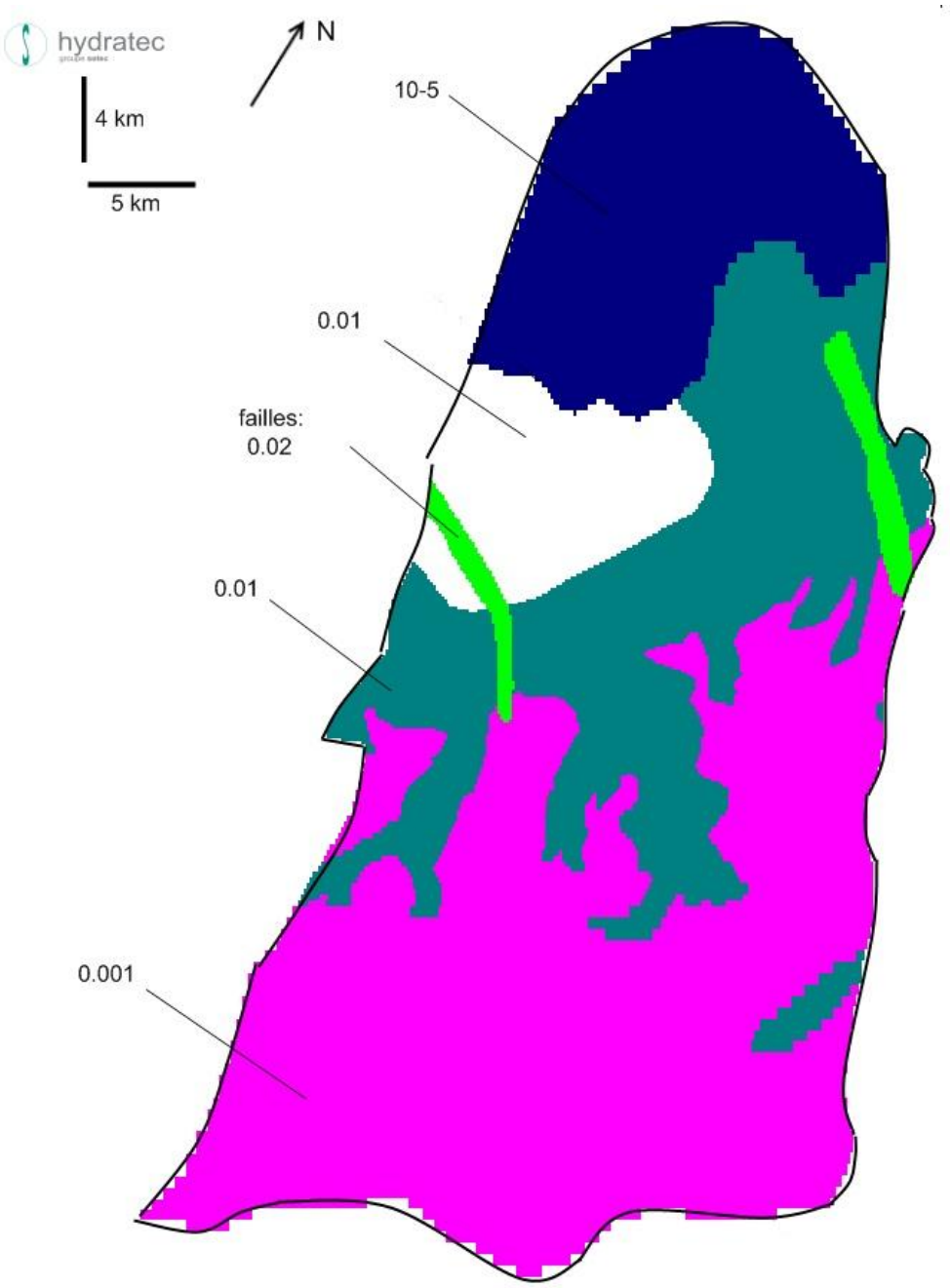


Figure 41. Répartition des coefficients d'emmagasinement dans la couche de craie aquifère.

Les valeurs retenues pour la base moins aquifère de l'aquifère crayeux sont présentées sur la Figure 42.

Deux ensembles se distinguent aussi dans cette couche plus profonde de la craie :

- La partie captive de la nappe de la craie est là encore caractérisée par un coefficient d'emmagasinement faible (5.10^{-5})
- La partie libre de la nappe de la craie est caractérisée par un coefficient d'emmagasinement plus important (0.001 à 0.002) que celui de la partie captive, mais plus faible que dans le niveau plus aquifère de la craie.

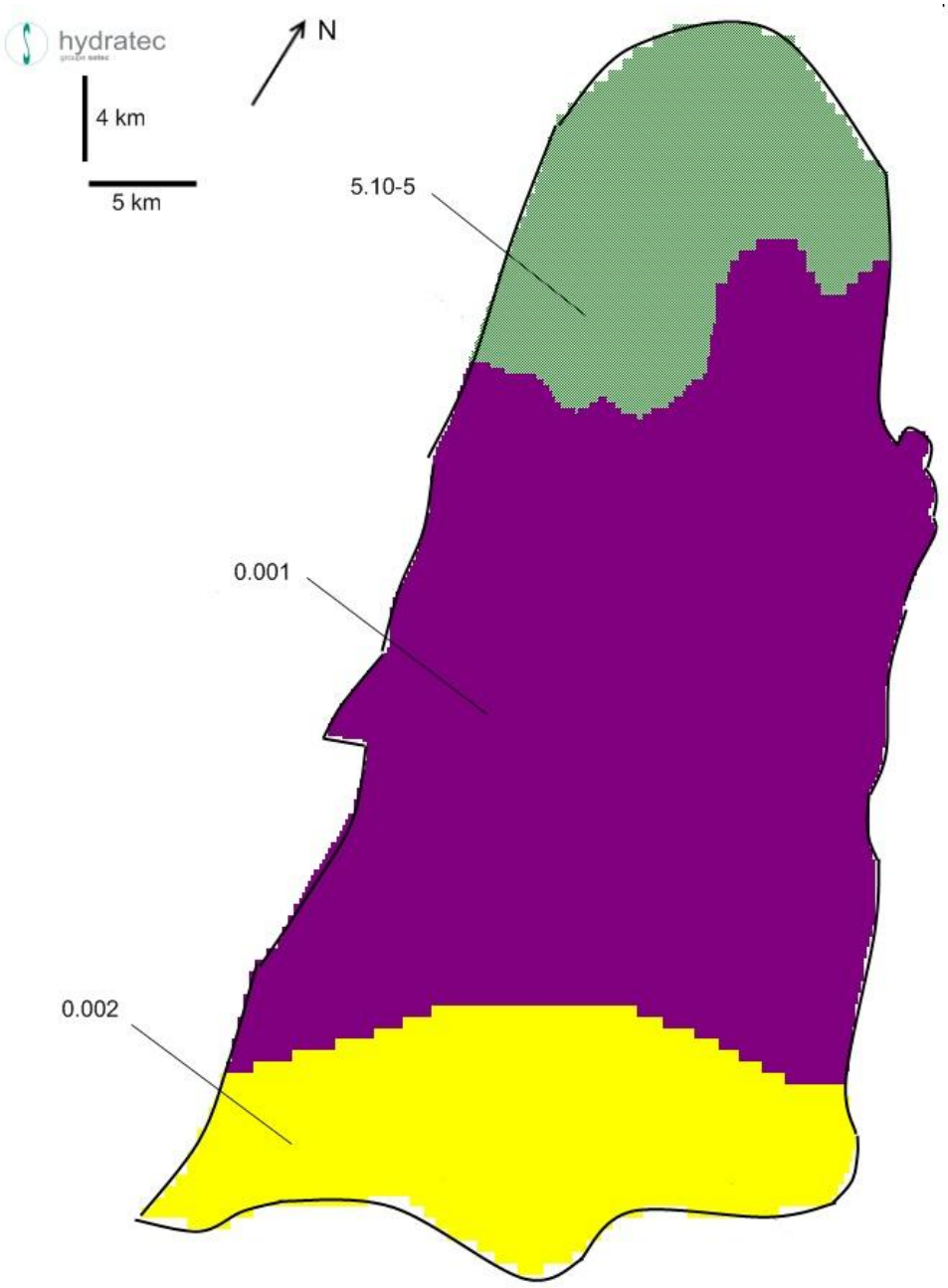


Figure 42. Répartition des coefficients d'emmagasinement dans la couche de craie moins aquifère.

La capacité de stockage de la nappe de la craie présente trois configurations distinctes :

- Partie captive : la capacité de stockage est assurée par l'ensemble de la couche crayeuse (aussi bien aquifère que moins aquifère)
- Partie libre :
    - Au nord de la Sensée et le long des vallées, la capacité de stockage est assurée par le niveau le plus aquifère de la craie
    - Sous la partie sud des plateaux : la capacité de stockage est assurée par l'ensemble des niveaux crayeux (aussi bien aquifère que moins aquifère)

Les valeurs retenues pour les formations modélisées dans la couche 1, sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Formation	Coefficient d'emmagasinement
Alluvions de la Sensée	10^{-2}
Formations tertiaires, nord du bassin versant hydrogéologique	10^{-3}

Ainsi, les alluvions de la Sensée assurent un rôle équivalent à celui de la craie dans la capacité de stockage de la nappe.

Les formations tertiaires se trouvent au droit de la zone captive de la nappe. Leur coefficient d'emmagasinement est relativement élevé pour une zone peu perméable ($K=10^{-6}$ m/s). Ainsi, malgré une drainance descendante négligeable (cf. 9.3), ces formations assurent un rôle de stockage mobilisable par les gros champs captant du nord du bassin versant.

9.4.2 Echanges nappe-réseau hydrographique

9.4.2.1 Nappe-rivière et étangs

Les rivières et les drains ont été placés soit directement sur la craie, pour les vallées où aucun dépôt alluvial n'avait été relevé, soit au droit d'une couche d'alluvions. Dans la réalité, ces alluvions sont constitués de plusieurs niveaux entrecroisés et hétérogènes ayant des propriétés hydrodynamiques différentes. La capacité d'échange entre la nappe de la craie et les rivières est conditionnée par ces couches, par la nature du lit de la rivière, par sa cote de fond et par son niveau de remplissage.

Dans le modèle, les alluvions ont été représentés en une seule couche, ainsi, la variabilité de la capacité d'échange nappe de la craie - rivière est directement représentée par les propriétés du lit de la rivière. Ces paramètres intègrent donc à la fois les propriétés liées à la rivière et celles liées aux multiples couches d'alluvions. Comme le coefficient d'emmagasinement, ils ont fait l'objet d'un calage en régime transitoire afin de restituer au mieux les débits de rivière mesurés sur les 3 années de chroniques disponibles (sauf Etaing : 12 ans) et de traduire au mieux l'évolution des niveaux piézométriques relevés à proximité. Ce calage est valide sur les tronçons de rivière muni de points de mesure de débit et sur les tronçons ou étang ayant des piézomètres à proximité (Sensée amont et Cojeul, à partir de leurs sources, sensée aval jusqu'au Bassin Rond). Pour les autres, il s'agit d'une estimation de modélisateur, faite sur la base de la géologie et de l'évolution des niveaux piézométriques. Une représentation qualitative plutôt que quantitative a donc été faite du potentiel d'échange direct entre la nappe de la craie et la rivière, elle est présentée à la Figure 43.
Quatre classes de potentiel ont été distinguées : fort, bon, faible, très faible.

Les vallées amont du Cojeul, de la Sensée et du Trinquise présentent un bon potentiel d'échange.

L'Agache et l'Hirondelle présentent un potentiel faible à bon, sauf entre Marquion et Sains-les-Marquion où les échanges sont plus difficiles.

Les étangs de la Sensée amont (à partir d'Etaing-Lécluse) ont été représentés avec un potentiel très faible qui s'explique à la fois par leur envasement important et par la présence de niveaux peu perméables au sein des alluvions. La première partie de la Sensée aval (jusqu'à Féchain) est dans la même situation. Vers l'aval, les échanges se rétablissent.

Par contre, la Sensée traverse ces étangs et puisque son débit amont est régit par la nappe, c'est elle qui répercute les variations de niveaux de la nappe dans ces zones.

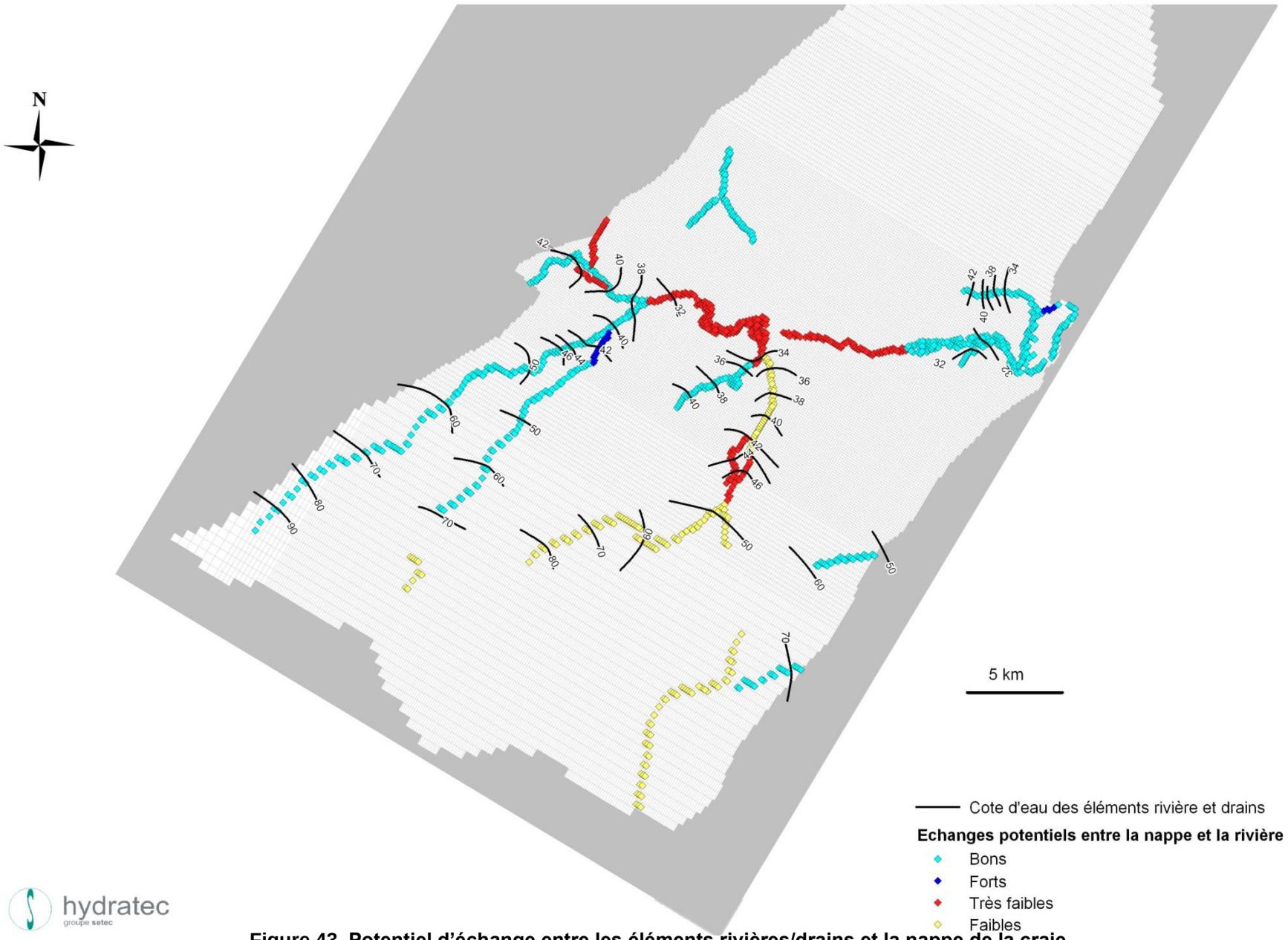


Figure 43. Potentiel d'échange entre les éléments rivières/drains et la nappe de la craie.

9.4.2.2 Nappe-canaux

Les relations entre canal et nappe de la craie ont été testées pour les différents biefs situés sur le bassin versant. A part pour le souterrain de Ruyaulcourt, aucune confirmation de l'existence d'une relation canaux - nappe n'a pu être établie : le calage piézométrique n'a pas été amélioré par ce biais.

Des mesures de différentiels de débits entre l'amont des biefs et l'aval seraient nécessaires pour établir plus précisément ces relations.

Comme il avait été précisé dans le rapport de phase 3, les oscillations des niveaux de la nappe observées sur les piézomètres proches du canal, au niveau de l'étang de Brunémont sont dues à la propagation de la surpression induite par le passage des péniches. Ces observations étaient déjà faites en 1960 par le BRGM.

9.4.3 Ratio pluie infiltrée, pluie ruisselée

Comme indiqué au paragraphe 8.3.9.1, la pluie infiltrée vers la nappe représente une fraction de la pluie efficace. La phase de calage du modèle permet d'estimer le ratio pluie infiltrée/pluie efficace et ainsi d'apprécier le caractère plus ou moins ruisselant ou infiltrant du bassin versant.

Ce ratio est en fait variable au fil des années et est notamment fonction de la répartition des pluies dans le temps et le niveau de saturation des sols au moment où ont lieu les pluies. Aucun facteur précis n'a pu être déterminé. A titre de comparaison, la pluie infiltrée représente généralement, en France, 20 à 25 % de la pluie efficace.

Au long des 12 années hydrologiques modélisées, quatre périodes distinctes ressortent, elles sont détaillées dans le Tableau 9. Ces quatre périodes peuvent être regroupées en deux séries distinctes :

- Forte à très forte infiltration : 60 à 90% de la pluie efficace s'infiltre dans les terrains sous-jacents et atteint la nappe. Ce sont les périodes de croissance et/ou de stagnation des niveaux piézométriques.

- Infiltration moyenne : 20% de la pluie efficace s'infiltre dans les terrains sous-jacents et atteint la nappe. Ce sont les périodes de décroissance des niveaux piézométriques.

Ainsi, le bassin versant hydrogéologique de la Sensée présente un caractère très peu ruisselant et une forte aptitude à l'infiltration. Celle-ci est cependant soumise à de fortes variations induites notamment par l'état dans lequel se trouve la végétation au moment des pluies et par le niveau de saturation des sols.

Cette forte infiltration permet une alimentation de la nappe de la craie variant selon les années entre 10 et 300 mm quels que soient les terrains de surface (hors recouvrement tertiaire).

Année hydrologique	Part de la pluie infiltrée sur la pluie efficace	Part de la pluie ruisselée sur la pluie efficace	Lame d'eau infiltrée totale (mm)	
			RU_{max}=150 mm	RU_{max}=180 mm
1997	0.9	0.1	53.3	26.3
1998	0.9	0.1	45.1	18.1
1999	0.6	0.4	116.6	98.6
2000	0.6	0.4	144.4	126.4
2001	0.6	0.4	297.3	295.8
2002	0.2	0.8	34.4	28.4
2003	0.2	0.8	25.8	19.8
2004	0.2	0.8	15.5	9.5
2005	0.2	0.8	17.4	11.4
2006	0.9	0.1	75.7	75.7
2007	0.9	0.1	89.3	62.3
2008	0.9	0.1	97.1	70.1

Tableau 9. Evolution du ratio pluie infiltrée/pluie ruisselée.

Les valeurs de pluie infiltrée introduites dans le modèle, par décade sont présentées en annexe 10.

9.4.4 Calage de la piézométrie

Les graphiques suivants présentent systématiquement deux courbes : en bleu - trait continu - les niveaux piézométriques calculés par le modèle, en violet - trait discontinu - les niveaux piézométriques réellement mesurés. Les abscisses représentent la date de simulation/d'observation, les ordonnées la cote piézométrique de la nappe de la craie ou de la nappe alluviale pour certains points situés le long de la Sensée aval.

De manière générale, sur les observations, la piézométrie s'élève de 1997 à 2001, s'abaisse de 2002 à 2005 et s'élève de manière plus ou moins forte de 2006 à 2008. Ces tendances sont correctement restituées par le modèle.

Les différences existantes entre les chroniques calculées et les chroniques observées correspondent soit à des décalages en altitude, déjà observés au cours du calage en régime permanent, soit à des différences dans les amplitudes de variation de la piézométrie (battement de la nappe).

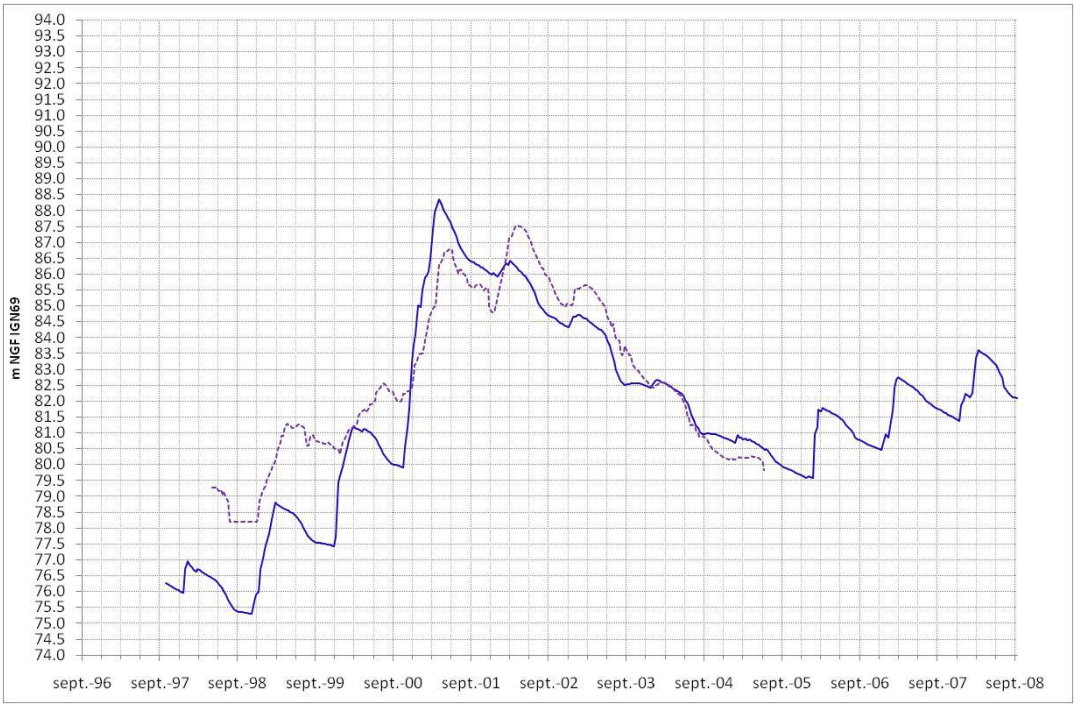
Le calage est illustré ci-dessous par trois points, une analyse complète figure en annexe 11. La présentation est faite de l'amont vers l'aval du bassin versant hydrogéologique.

- Légende

Calage du modèle en transitoire

Piézométrie observée

  - Coteaux au sud du bassin versant, Pz18 (00354X0058)



Ce piézomètre est situé sur la commune de Mory, le nivellement de l'ouvrage est estimé à +/- 1 m. Il est éloigné de tout prélèvement signalé à l'Agence de l'Eau Artois Picardie. Les deux premières années modélisées sont trop basses par rapport aux niveaux mesurés, puis la piézométrie calculée oscille autour des niveaux mesurés. Le pic de piézométrie est observé en 2002 tandis que qu'il est calculé en 2002 par le modèle.

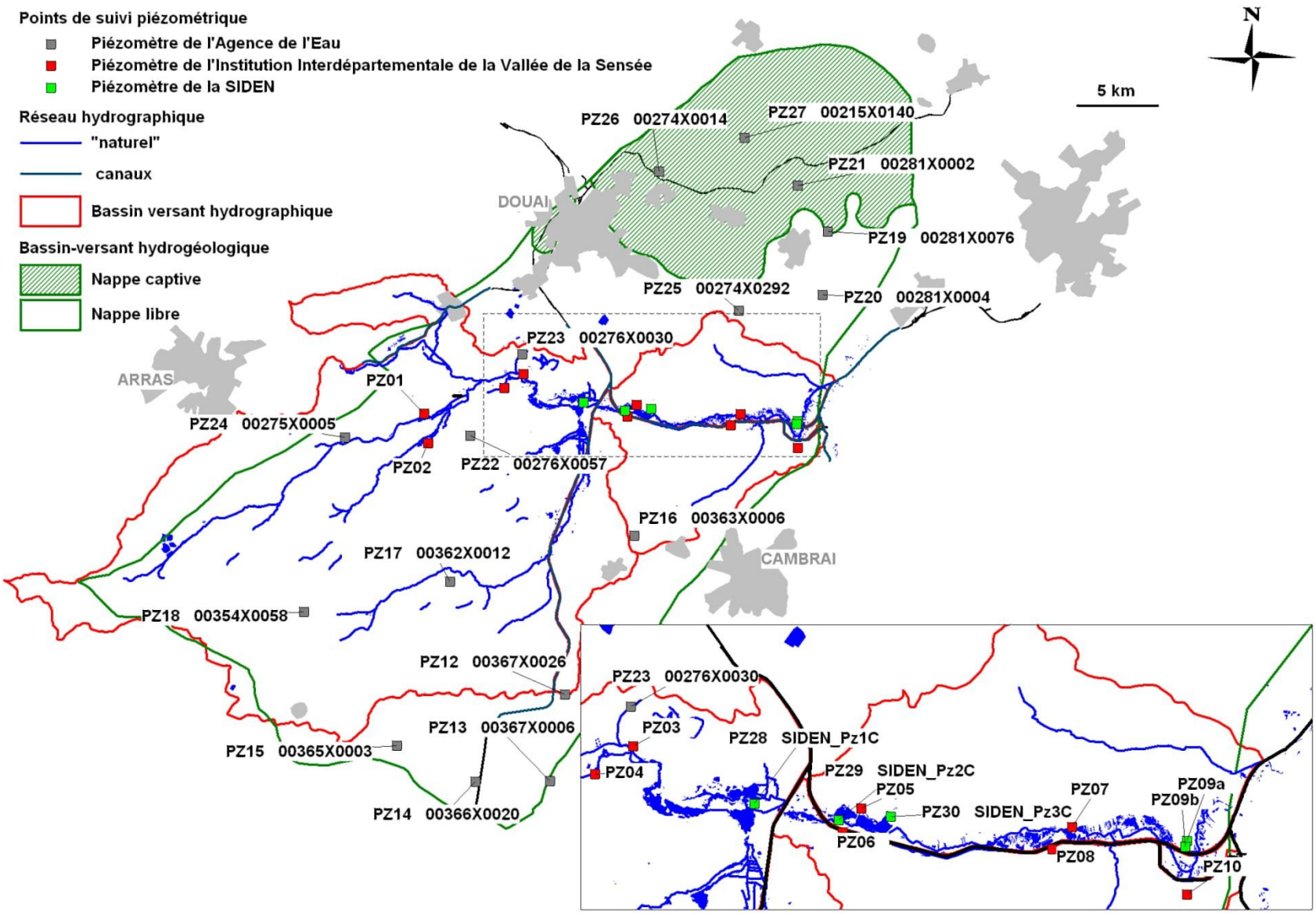
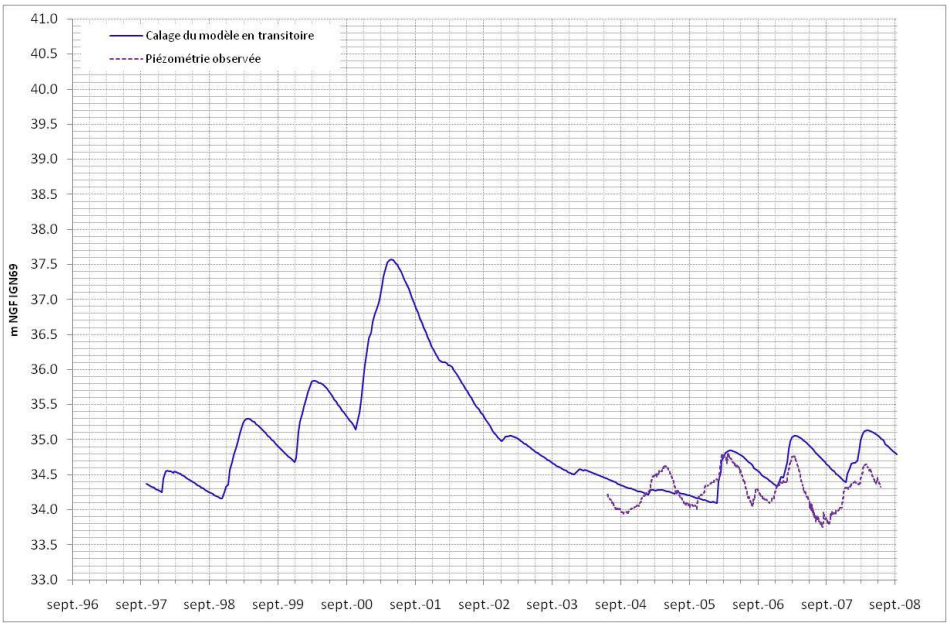


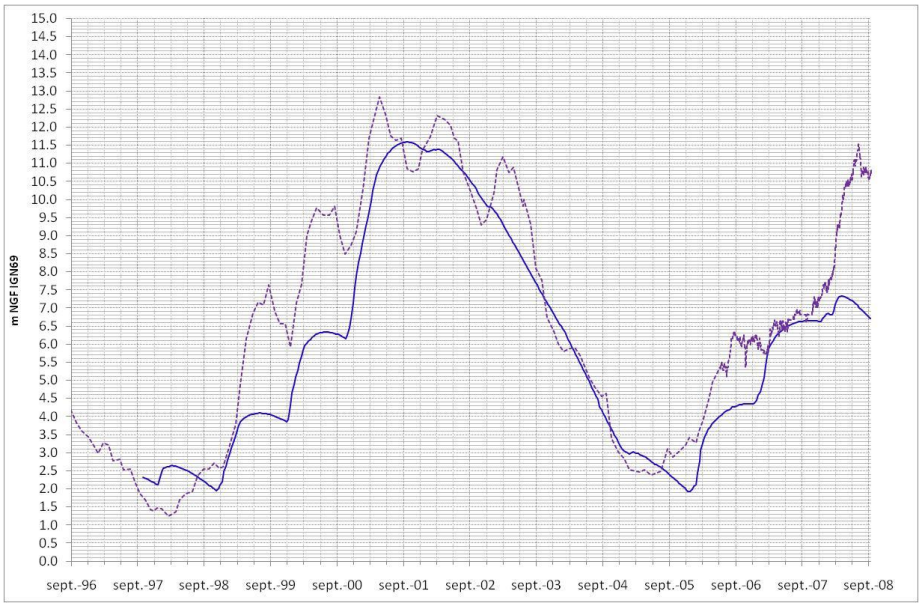
Figure 44. Réseau piézométrique

- Bords de la Sensée aval, Pz30



Ce piézomètre est situé sur la commune d'Aubigny-au-Bac. Il est situé en bordure du Marais d'Aubigny. Il capte les niveaux de craie. Il est géré par le SIDEN. La chronique piézométrique débute en 2005. Les niveaux de base et l'amplitude sont bien traduits.

- Nord de la Sensée, zone captive, Pz21 (00281X0002)

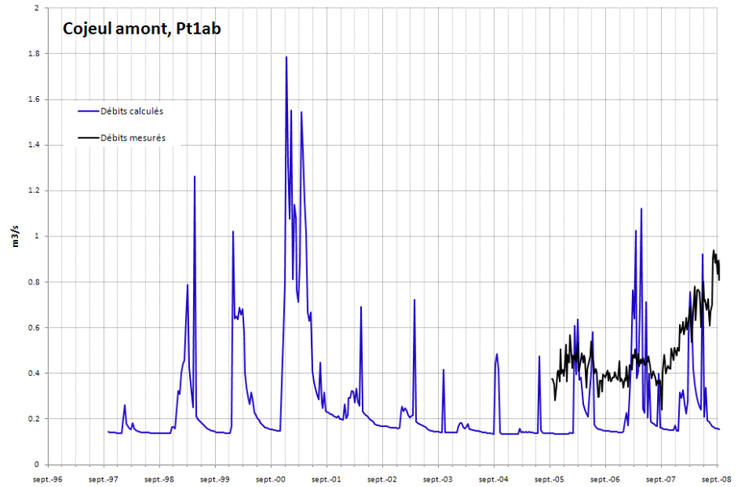


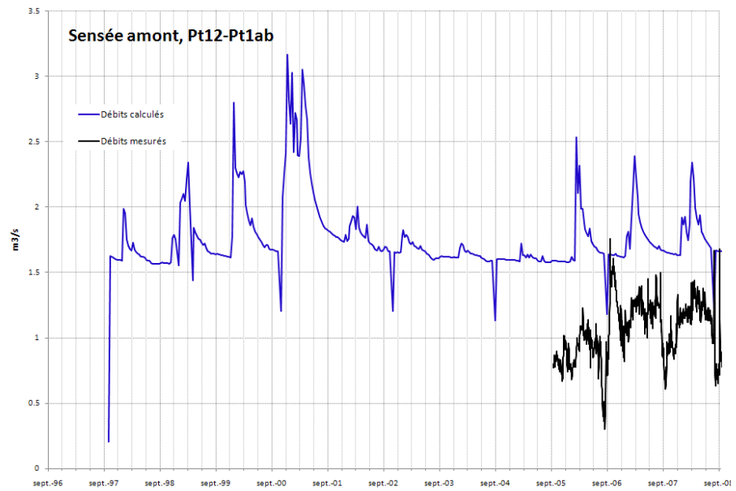
Ce piézomètre est situé sur la commune de Rieulay, au nord de la Vallée de la Sensée, hors du territoire du SAGE. Il est géré par l'AEAP. Il capte la craie en régime captif. L'évolution des niveaux de base pour la période de mesure disponible est bien traduite.

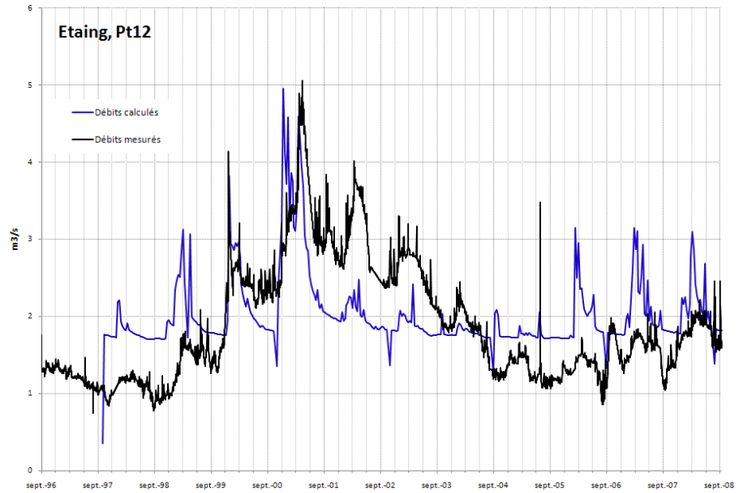
9.4.5 Calage des débits de rivière

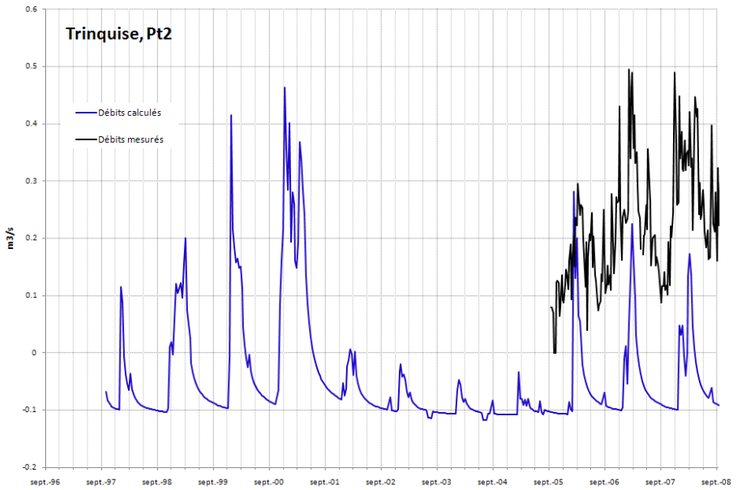
Dans la réalité, les débits de rivière sont générés à la fois par les apports depuis la nappe et par les apports liés au ruissellement. Le bassin versant hydrogéologique de la Sensée est très infiltrant sauf dans sa partie sous recouvrement tertiaire (9.4.2.2). Les débits de rivière sont donc générés pour une très grande partie par les échanges nappe de la craie - rivière. Ces échanges ont été quantifiés et comparés aux débits mesurés (cf. Figure 45). Le calage de ces débits a permis d'établir le potentiel d'échange entre les rivières et la nappe de la craie (9.4.2). Le but de ce calage est de restituer les ordres de grandeur des débits. La précision de ces résultats est limitée par le choix de maintenir les cotes d'eau constantes sur les éléments rivière (8.3.9.2.1.1).

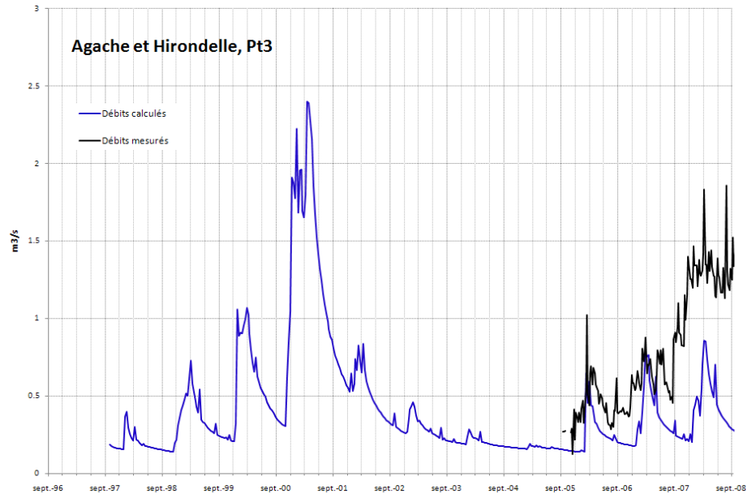
L'ordre de grandeur des débits est bien restitué, particulièrement en périodes de hautes eaux.
Le tronçon de la Sensée aval situé entre Wasnes-au-Bac et Paillencourt présente bien une perte de débits, comme constaté lors de l'analyse de mesures. La réponse du Trinquise indiquerait un fonctionnement périodique : drainage par la nappe en étiage et alimentation par la nappe en hautes eaux.
L'évolution pluriannuelle des débits de base sur le limnimètre d'Etaing est mal retranscrite mais les valeurs de débits et leurs variations annuelles sont satisfaisantes.

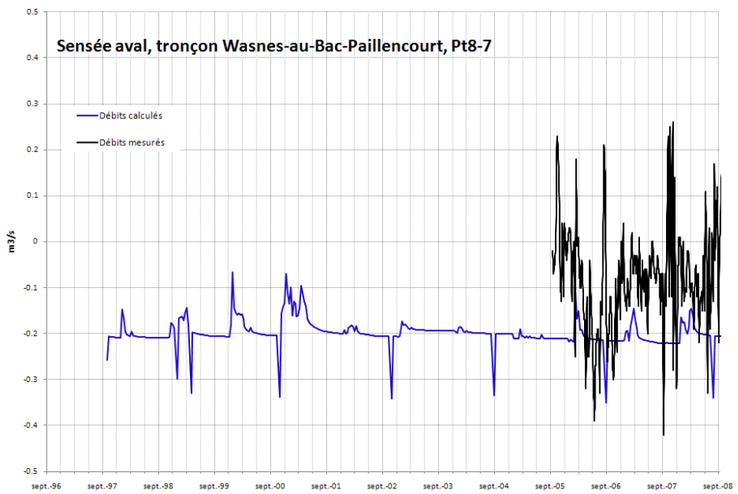












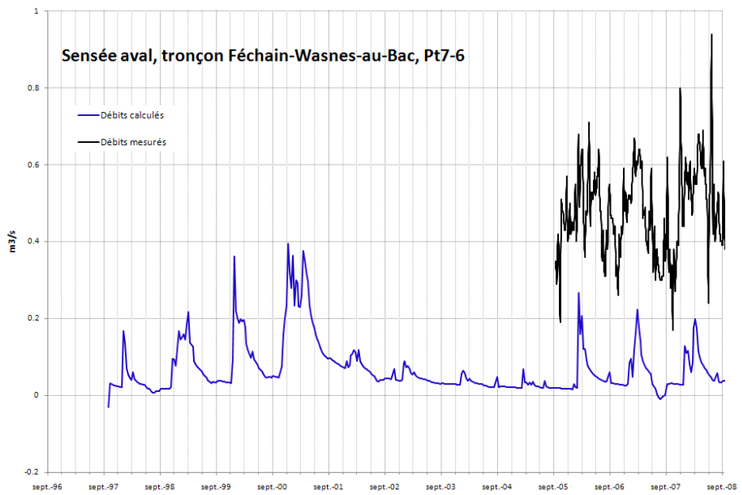


Figure 45 . Débits calculés et mesurés.

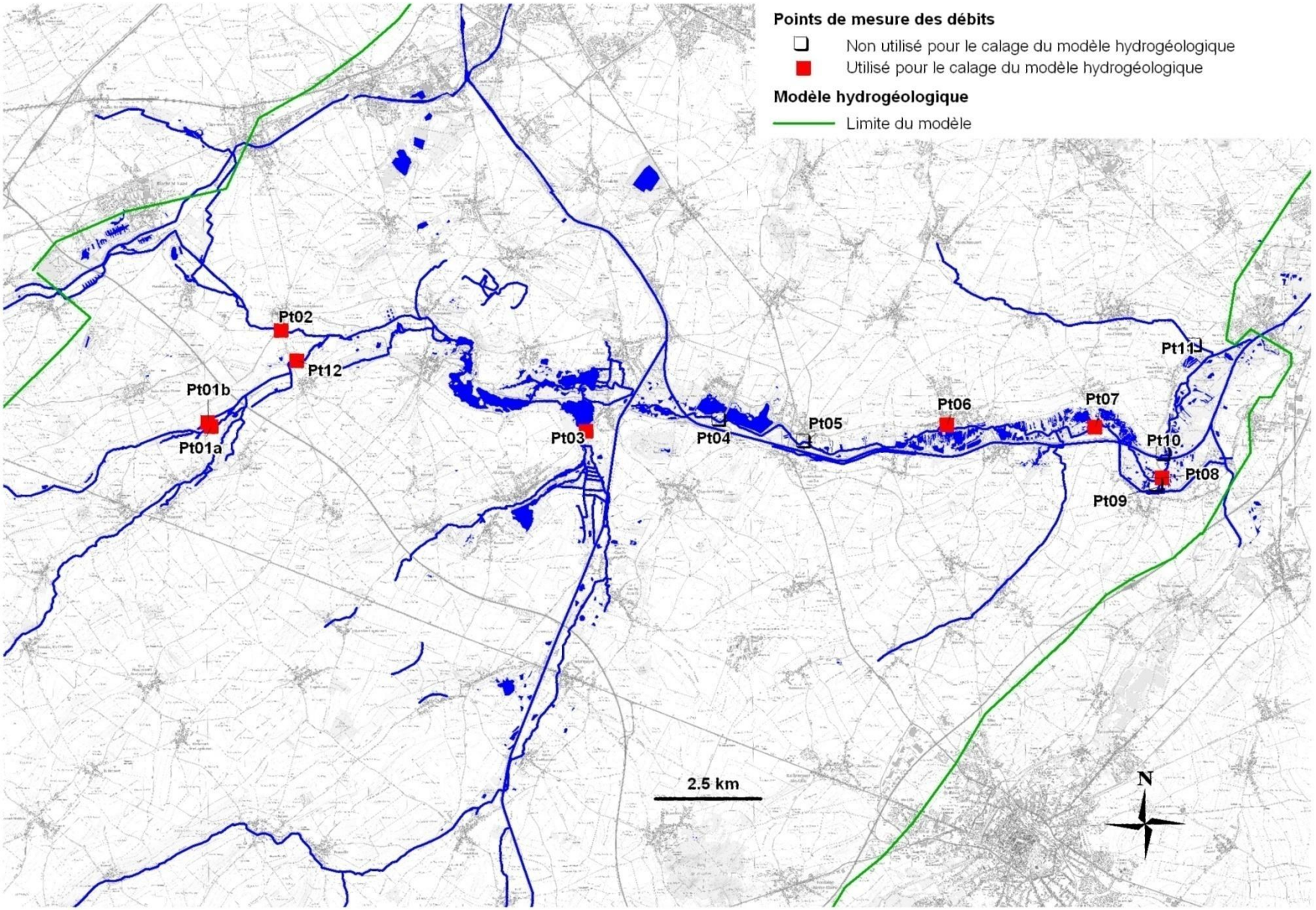


Figure 46. Points de mesure des débits utilisés pour le calage du modèle hydrogéologique.

9.5 ENSEIGNEMENTS DU CALAGE

9.5.1 Bilan des échanges hydrauliques globaux

A l'échelle du territoire du SAGE, la nappe de la craie subit des entrées (infiltration d'une part de la pluie) et des sorties (drainage par les rivières, pompages, écoulements vers le nord du bassin versant). Le bilan des entrées et des sorties (sauf les écoulements vers le nord du bassin versant) au droit du territoire du SAGE peut se traduire par la fonction de stockage instantanée présentée à la figure suivante. Lorsque la courbe est positive, l'aquifère de la craie stocke, et inversement.

Celle-ci montre que les périodes de stockage durent de 1 à 6 mois et les périodes de déstockage de 7 à 11 mois. Le déstockage est compris entre mars-avril et novembre-décembre.
Les périodes où les phases de stockage sont plus larges et présentent une amplitude importante correspondent à des périodes d'élévation des niveaux piézométriques. Au contraire, lorsque les périodes de déstockage sont plus longues et les phases de stockage ont une amplitude plus faible, les niveaux piézométriques s'abaissent.

Deux extrêmes sont signalés sur la figure, durant les années hydrologiques 2000-2001, la période de vidange a duré seulement 7 mois (mars à octobre), en 2005-2006, elle a duré 11 mois. Effectivement, 2001 a été une année de très hautes eaux, 2006, une année d'étiage sévère.

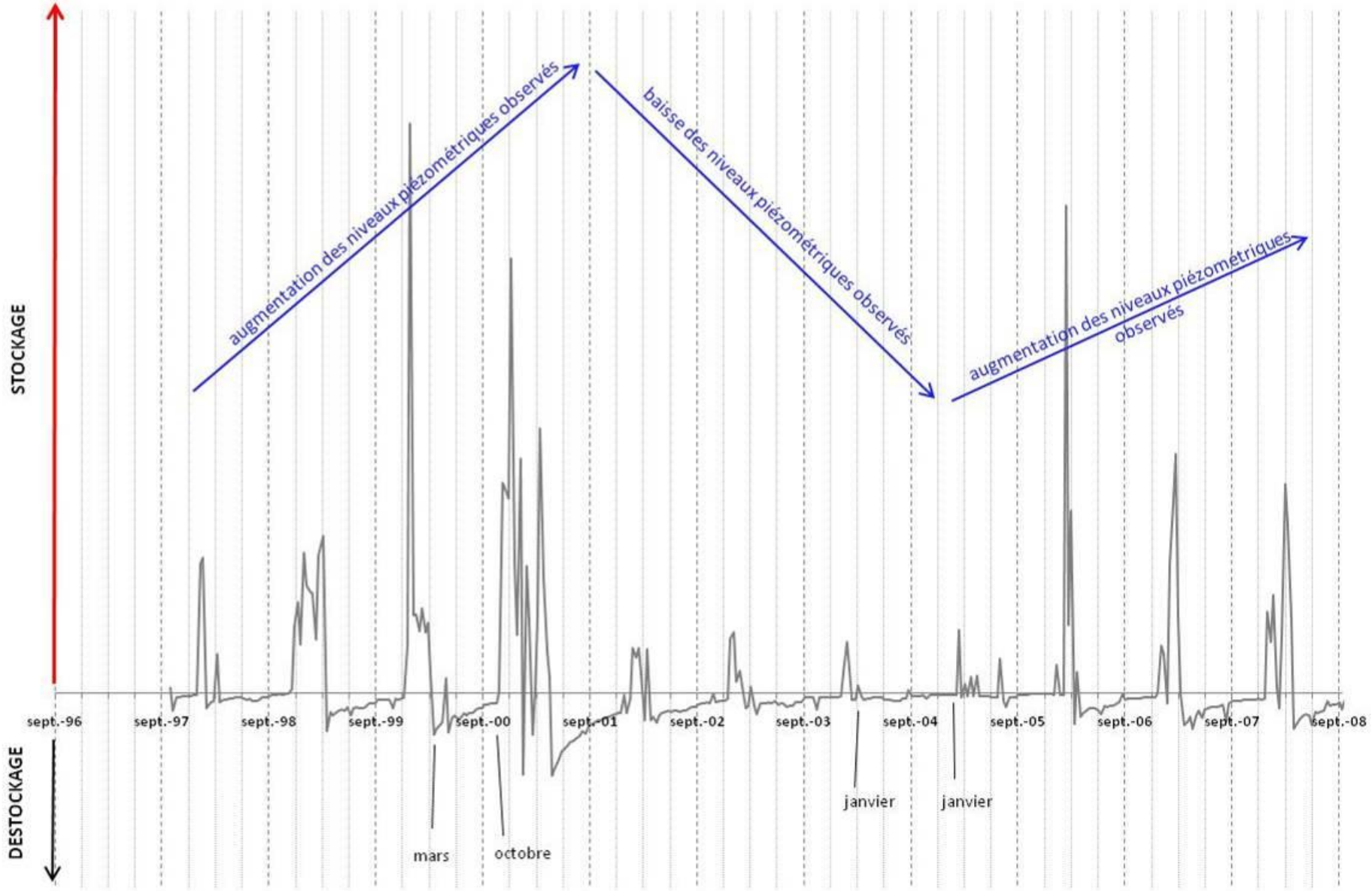


Figure 47. Bilan des échanges hydrauliques globaux sur le territoire du SAGE.

9.5.2 Entités de fonctionnement dans le bassin-versant

La synthèse des différents enseignements du calage permet de distinguer différentes unités de fonctionnement de la craie et différents secteurs du réseau hydrographique. Un schéma illustratif est présenté en Figure 48.

L'aquifère crayeux est constitué de deux niveaux : un niveau supérieur bon aquifère et un niveau inférieur aquifère médiocre.

1. La zone de nappe captive, au nord, sous recouvrement tertiaire, n'est pas alimentée par les précipitations. C'est ce défaut d'alimentation, conjugué au pendage de la craie qui créé l'écoulement vers le nord du bassin versant. Ce phénomène est renforcé par les prélèvements importants dans cette zone. La nappe de la craie, au nord est en charge sous les formations tertiaires, une drainance verticale vers le haut semble avoir lieu. Celle-ci s'inverse aux abords des champs captant et les formations tertiaires assurent un rôle capacitif dans cette zone. La craie présente une faible perméabilité et une faible porosité dans cette zone, l'ensemble des couches crayeuses assurent le rôle capacitif de l'aquifère.

2. Sur le reste du bassin versant, la part de l'infiltration dans les pluies efficaces est forte (de 20 à 90%), ce qui assure une bonne alimentation de la nappe. Cependant, le ratio pluie infiltrée/pluie efficace est variable en fonction des périodes. Cette variabilité peut avoir diverses origines (croissance de la végétation, imbibition préalable des sols, battance). Les périodes de faibles ratios sont également des périodes de faible pluviométrie et induisent des baisses de niveau de nappe importantes (2002-2006).

Dans cette zone, deux types de fonctionnement se distinguent :

- Au droit des vallées et au nord de la Sensée : la perméabilité de la craie est forte (10^{-3} à 10^{-4} m/s), la porosité de la craie aquifère est bonne (0.01), le rôle capacitif de l'aquifère est assuré principalement par le niveau crayeux le plus aquifère. Les formations alluviales situées dans les vallées ont été représentées en une seule couche alors qu'en réalité, il s'agit de nombreuses strates entrecroisées et présentant des propriétés hydrodynamiques différentes. La relation nappe de la craie - réseau hydrographique est variable selon les tronçons de vallée. Ainsi, des zones déconnectées se distinguent, principalement à l'aval de la Sensée amont (zone des étangs) et à l'amont de la Sensée aval. La couche d'alluvions assure le même rôle capacitif que la craie aquifère.

- Au droit des plateaux : la perméabilité de la craie est moyenne à faible (10^{-4} à 10^{-6} m/s), la porosité de la craie aquifère est moins bonne que sur le reste de la zone libre (0.001), le rôle capacitif de l'aquifère est assuré par l'ensemble des niveaux crayeux.

Les relations entre canal et nappe de la craie ont été testées pour les différents biefs situés sur le bassin versant. A part pour le souterrain de Ruyaulcourt, aucune confirmation de l'existence d'une relation canaux - nappe n'a pu être établie.

Deux tronçons de rivière sont apparus comme alimentant la nappe de la craie :

- Le tronçon de la Sensée aval entre Paillencourt et Wasnes-au-Bac où le forage d'alimentation en eau potable situé à proximité induit une inversion des débits d'alimentation par la nappe

- Le Trinquise où la nappe draine la rivière et la nappe alluviale en période d'étiage.

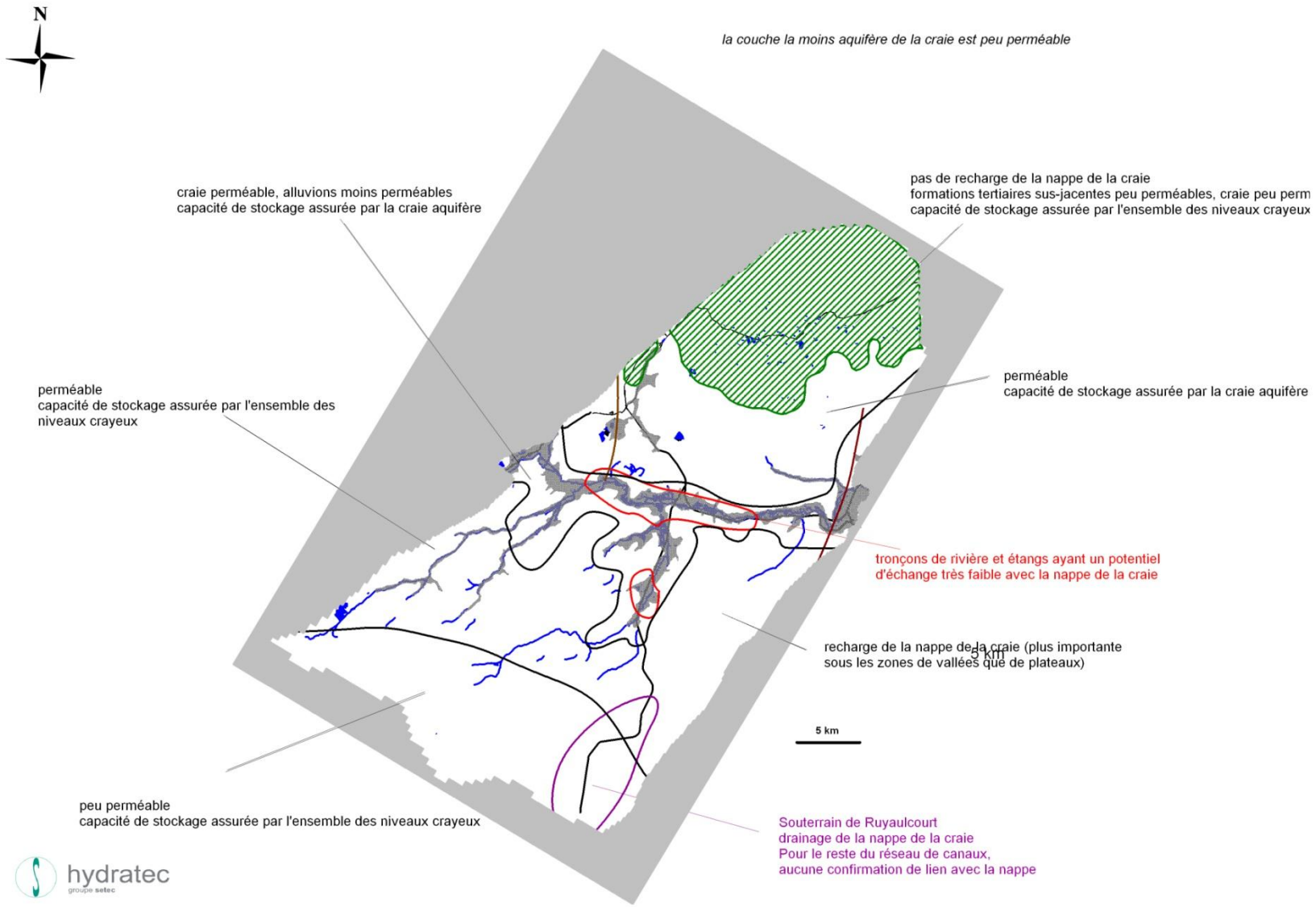


Figure 48. Synthèse

9.5.3 Eléments du bilan

Une évaluation analytique des différents termes du bilan avait été menée en phase 3. La modélisation a permis de préciser certains de ces termes.

Il apparaît qu'en 2005, année largement déficitaire, les prélèvements ont largement dépassé la valeur de la recharge de la nappe. Le reste des années (2003-2007), les débits prélevés atteignent environ 40% de la recharge, voire 70% en 2004.

	2003	2004	2005	2006	2007
Prélèvements souterrains (m^3/an)	34 267 191	33 771 960	33 789 040	33 149 500	35 706 800
Alimentation du bief de partage du canal du Nord	1 390 919	754 454	455 292	1 004 657	1 153 267
Recharge de la nappe (m^3/an)	89 886 332	48 803 343	28 274 704	72 613 868	73 606 553
Sollicitation =Prélèvements/recharge de la nappe	38%	69%	120%	46%	49%

9.5.4 Fonctionnement en hautes eaux

Les modélisations hydrauliques et hydrogéologiques ont montré que les débits de crue des cours d'eau étaient pour grande partie apportés par la nappe.

Ainsi, lors de la crue de mars 2001, les débits apportés par la nappe à la Sensée en amont d'Etaing atteignaient 3.35 m^3/s, soit 61% du débit de pointe de la crue.

10 SIMULATIONS

Le contenu des simulations prévues a été exposé et validé en phase 3 :

- Un arrêt des prélèvements sur le territoire du SAGE. Ce test permet d'apprécier un fonctionnement équilibré de la nappe dans la partie amont du bassin versant hydrogéologique.

- Une augmentation des prélèvements le long de la Sensée avec la mise en place d'un nouveau champ captant à Hamblain-les-Prés.

10.1 SIMULATION N°1 : ARRET DES PRELEVEMENTS SUR LE TERRITOIRE DU SAGE

Afin d'apprécier le fonctionnement non influencé au droit du territoire du SAGE, un arrêt des prélèvements a été simulé sur cette zone. Les calculs ont été effectués sur les douze années hydrologiques objet du calage. Ceci permet de comparer la situation réelle à une situation fictive « idéale » sans prélèvements sur ces douze années et plus particulièrement sur la période d'étiage de l'année hydrologique 2006 (février 2006).

La carte de la Figure 50 présente, pour l'étiage 2006, le différentiel constaté sur le bassin versant entre la situation réelle et la situation sans pompage.

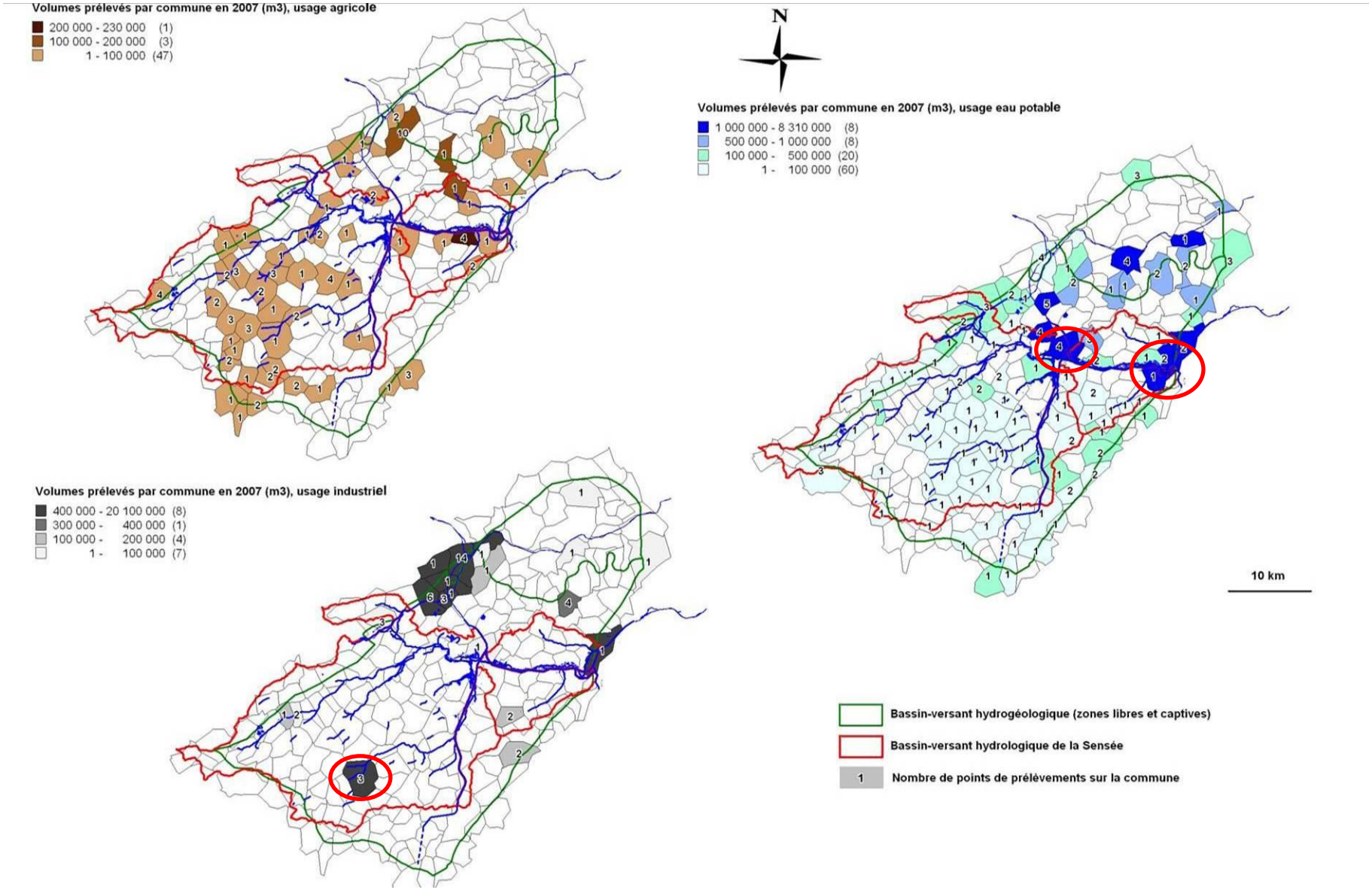


Figure 49. Bilan des prélèvements pour l'année 2007. Données : Agence de l'Eau Artois Picardie.

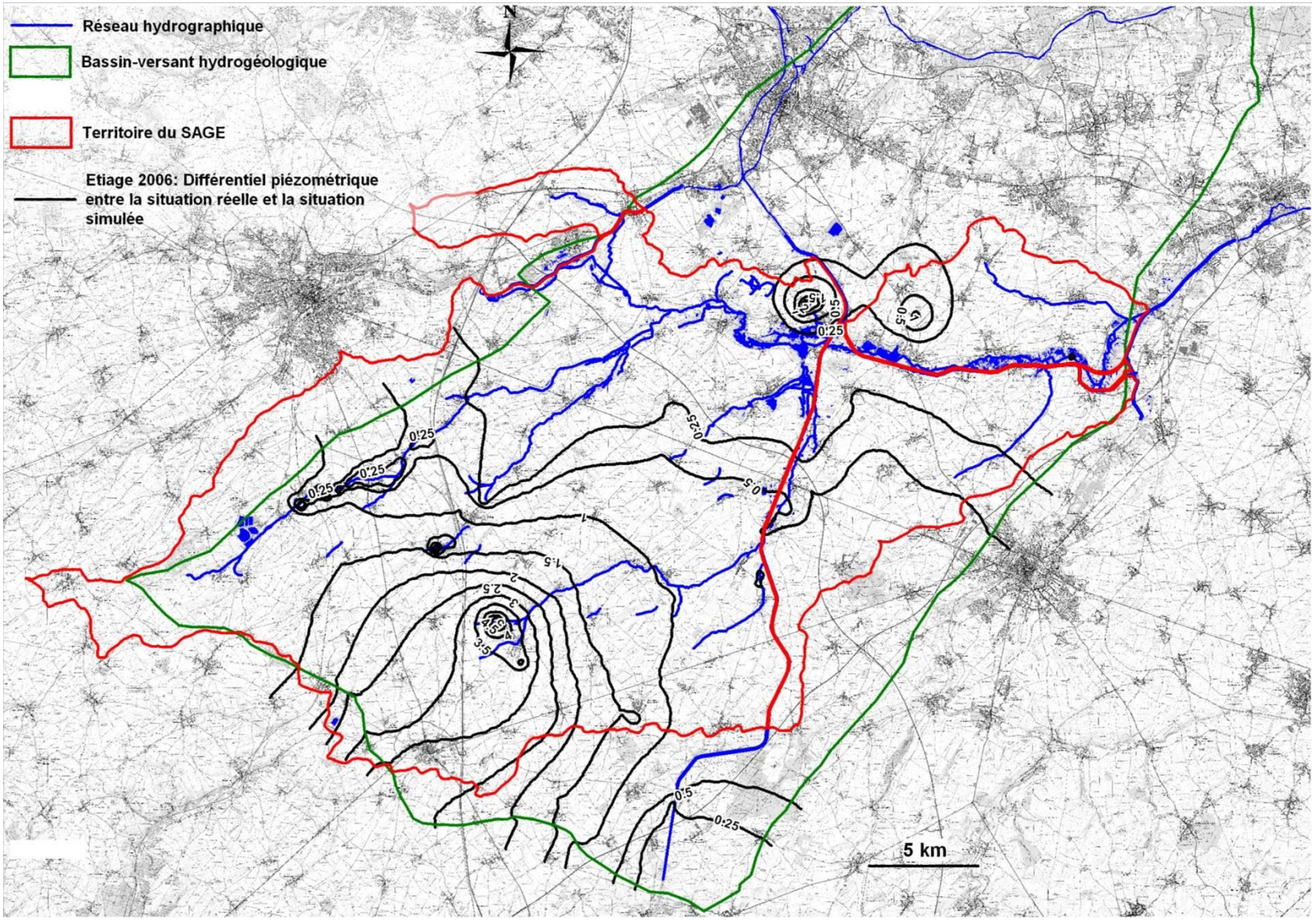


Figure 50. Différentiel piézométrique calculé pour l'étiage 2006 (février 2006) entre la situation réelle et la situation fictive sans pompage.

Deux phénomènes superposés sont observables :

1. Une rehausse généralisée comprise entre 0.25 m dans les parties basses des vallées affluentes de la Sensée et 1.5 m sous les coteaux, due à l'arrêt des pompages agricoles et d'alimentation en eau potable disséminés sur cette zone.

2. Une rehausse plus forte correspondant à deux cônes de rabattement au droit d'Arleux et de Vaulx-Vrecourt. Ils correspondent aux rabattements suivants :

   - 2.5 m au niveau du champ captant d'Arleux (7500 m^3/j au cours de février 2006, le champ captant était en cours de mise en route, les débits atteignent par la suite plus de 10 000 m^3/j)

   - 5 m au niveau de Vaulx-Vrecourt où des prélèvements industriels (Bonduelle) sont effectués à hauteur de 1200 m^3/j au cours de février 2006, les prélèvements destinés à la consommation en eau potable à hauteur de 200 m3/j et les prélèvements agricoles inexistants (débits évalués à 700 m^3/j en juillet 2006).

   Ces zones de forts prélèvements s'observent à l'analyse des débits prélevés en 2007 (cf. Figure 49) : trois communes se distinguent (Arleux-Brunémont, Vaulx-Vrecourt, Paillencourt- Wavrechain-sous-Faulx), elles sont entourées sur la Figure 49.
   Les forages d'adduction en eau potable situés le long de la Sensée induisent des différentiels piézométriques plus faibles, voire inexistants (Paillencourt-Wavrechain-sous-Faulx), tandis que les prélèvements situés à Vaulx-Vrecourt, bien que moins forts (ils ne représentent que 16% de ceux d'Arleux-Bugnicourt), induisent de forts rabattements, étendus. Cette réaction s'explique par trois points :

   - Les propriétés hydrodynamiques de la craie : la craie sous les coteaux présente une perméabilité et surtout un coefficient d'emmagasinement plus faibles

   - La pente de la surface piézométrique : sous les coteaux, la pente de la surface piézométrique est plus importante que sous la Vallée de la Sensée, un cône de rabattement se propage plus loin dans ces conditions

   - La réalimentation par la Sensée et sa nappe alluviale : la Sensée et sa nappe alluviale assurent une fonction de réalimentation importante pour les champs captants situés à proximité en assurant un maintien des niveaux piézométriques. Ce maintien peut avoir des conséquences sur les échanges nappe-rivière : le forage de Paillencourt induit une réalimentation locale de la nappe par la rivière et ainsi une baisse des débits.

La figure suivante présente le bilan des échanges hydrauliques à l'échelle du SAGE (hors sorties vers le reste du bassin versant hydrogéologique) dans ces conditions.

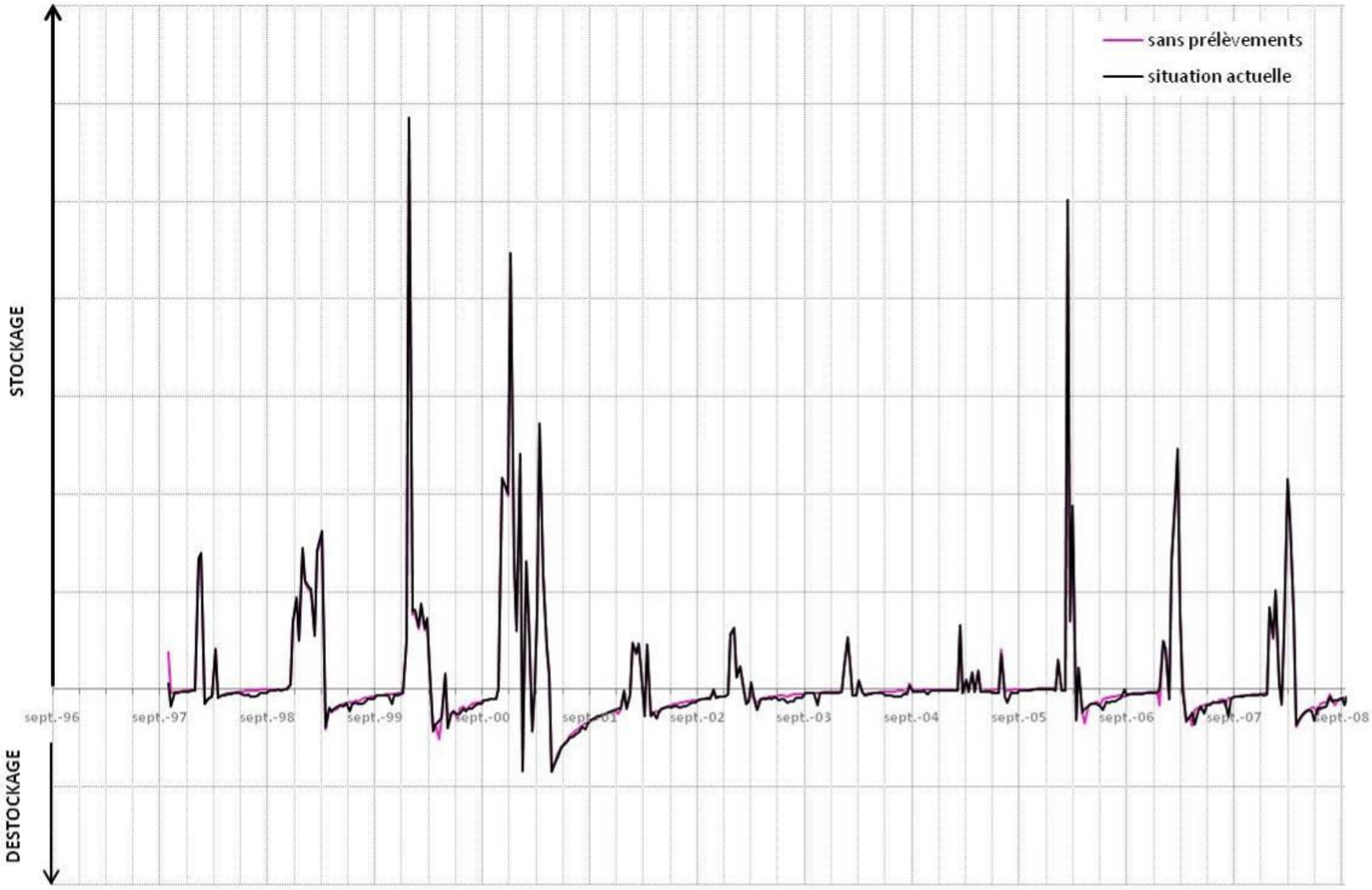


Figure 51. Bilan des échanges hydrauliques dans le cas d'une absence de prélèvements souterrains sur le territoire du SAGE.

Il apparaît que les phases de stockage et de déstockage restent les mêmes tant du point de vue de l'amplitude que de la période d'occurrence. Le fonctionnement général de l'aquifère n'est pas perturbé significativement par les prélèvements.

Un zoom sur le tronçon de la Sensée aval situé entre Paillencourt et Wasnes-au-Bac montre une diminution des débits drainés par la nappe (5 800 m^3/j en février 2006). L'ouvrage de prélèvement de l'agglomération Valenciennoise (00285X0461), situé à 60 m de la Sensée, est dimensionné pour prélever jusqu'à 6 000 m^3/j (4 800 m^3/j en février 2006). La diminution du drainage par la nappe résulte donc de l'effet conjugué de l'arrêt de ce pompage, très proche de la Sensée, et de l'arrêt des autres captages. Ce tronçon de la Sensée semble être encore drainé par la nappe. Ce drainage s'explique par la géométrie de la boucle de la Sensée : les niveaux d'eau à l'aval (Wavrechain-sous-Faulx) induisent une pente de la surface piézométrique favorisant le drainage à l'amont du coude. Ce lien est lui-même favorisé par la perméabilité plus élevée au droit de la faille qui borde la Sensée dans cette zone (cf. Figure 39).

Un zoom sur la station d'Etaing, permet d'établir que les débits sans prélèvements augmentent de 70 l/s en moyenne, soit 7% du QMNA5.

A l'échelle du SAGE, la comparaison entre la situation actuelle modélisée et la simulation sans prélèvements permet de constater qu'en moyenne l'arrêt des prélèvements (28 200 m^3/j) induit à la fois une augmentation des débits d'apport de la nappe vers la rivière (23 800 m^3/j soit 84% des débits prélevés en moyenne) et une augmentation de la recharge de la nappe (4400 m^3/j soit 16% des débits prélevés). L'augmentation de la recharge de la nappe calculée dans cette situation représente 3 % de la pluie infiltrée. L'augmentation de 300 l/s des débits apportés par la nappe au réseau hydrographique représente 22% des débits moyens calculés pour la situation actuelle. Ces valeurs sont données à l'échelle de l'ensemble du SAGE de la Sensée et ne peuvent pas être appliqués directement aux tronçons de rivière car l'intensité des apports de nappe est variable d'une zone à une autre.

Afin de juger du degré de sollicitation de l'aquifère, il serait nécessaire d'évaluer les débits minimums nécessaires au bon fonctionnement de certains points clés du réseau hydrographique (frayères…).

Néanmoins, en l'absence de ces valeurs, un point de comparaison a été établi en évaluant par modélisation hydraulique les QMNA 5 de la Sensée amont à son exutoire vers le Canal de la Sensée (1.5 m3/s) et de la Sensée aval à son exutoire vers le Canal de l'Escaut (0.4 m3/s). Ces valeurs ont permis de calculer par sommation un QMNA 5 fictif représentatif de l'intégralité des écoulements naturels du SAGE de la Sensée : 1.9 m3/s.

Il apparaît qu'en moyenne, 12 à 20% de ce QMNA5 représentatif de l'ensemble des écoulements est soustrait par les prélèvements souterrains ayant lieu au droit du territoire du SAGE. En pointe, les défauts d'alimentation peuvent être bien plus conséquents et atteindre près de 70% de ce QMNA5 fictif. Les périodes auxquelles les défauts d'alimentation sont les plus importants ont généralement lieu à la fin du printemps/début de l'été.

	Défaut d'alimentation moyen sur l'année	Défaut d'alimentation maximal		Prélèvements moyens
	m3/s	date	m3/s	m3/s
1999	0.293	mai-99	0.485	0.302
2000	0.351	avr.-00	1.346	0.304
2001	0.335	déc.-01	0.563	0.301
2002	0.268	avr.-02	0.379	0.304
2003	0.248	mars-03	0.876	0.307
2004	0.237	févr.-04	0.310	0.309
2005	0.256	juil.-05	0.354	0.328
2006	0.391	avr.-06	1.244	0.398
2007	0.388	janv.-07	1.311	0.406
2008	0.287	juin-08	0.870	0.363

10.2 SIMULATION N°2 : MISE EN PLACE D'UN NOUVEAU CHAMP CAPTANT A HAMBLAIN-LES-PRES

La Communauté Urbaine d'Arras (CUA) avait pour projet d'implanter un champ captant supplémentaire d'une capacité de 20 000 m^3/j sur le bassin versant de la Sensée, au niveau d'Hamblain-les-Prés. Ce projet a été abandonné en raison notamment d'un manque de protection de la ressource à cet endroit (site d'élevage porcin intensif).

Au vu de l'intérêt porté à cette zone, il a tout de même été jugé intéressant d'évaluer l'impact d'un tel prélèvement à l'échelle du territoire du SAGE. En effet, les études préalables à l'instauration d'un tel champ captant sont très poussées mais se restreignent à une zone limitée autour du champ captant.

Pour cette simulation, 4 forages ont été ajoutés au droit des emplacements testés par la CUA. Ils captent la craie. Un prélèvement global de 9600 m3/j (soit 100 m3/h par ouvrage pour un pompage en continu sur 24 heures) a été affecté à ce champ captant fictif. La Figure 52 montre leur emplacement. Les caractéristiques affectées à ces ouvrages (profondeur, emplacement, vérification des débits nominaux) sont celles des ouvrages d'essai effectivement implantés sur le site[4].

[4] District Urbain d'Arras, Restructuration de la desserte en eau potable, recherche d'une nouvelle ressource dans la vallée du Trinquise, Réalisation et interprétation de pompages d'essai simultanément sur les forages FR2, FR3, FR4, FR5, FR7 et FR8. ANTEA, janvier 1997, A08271.

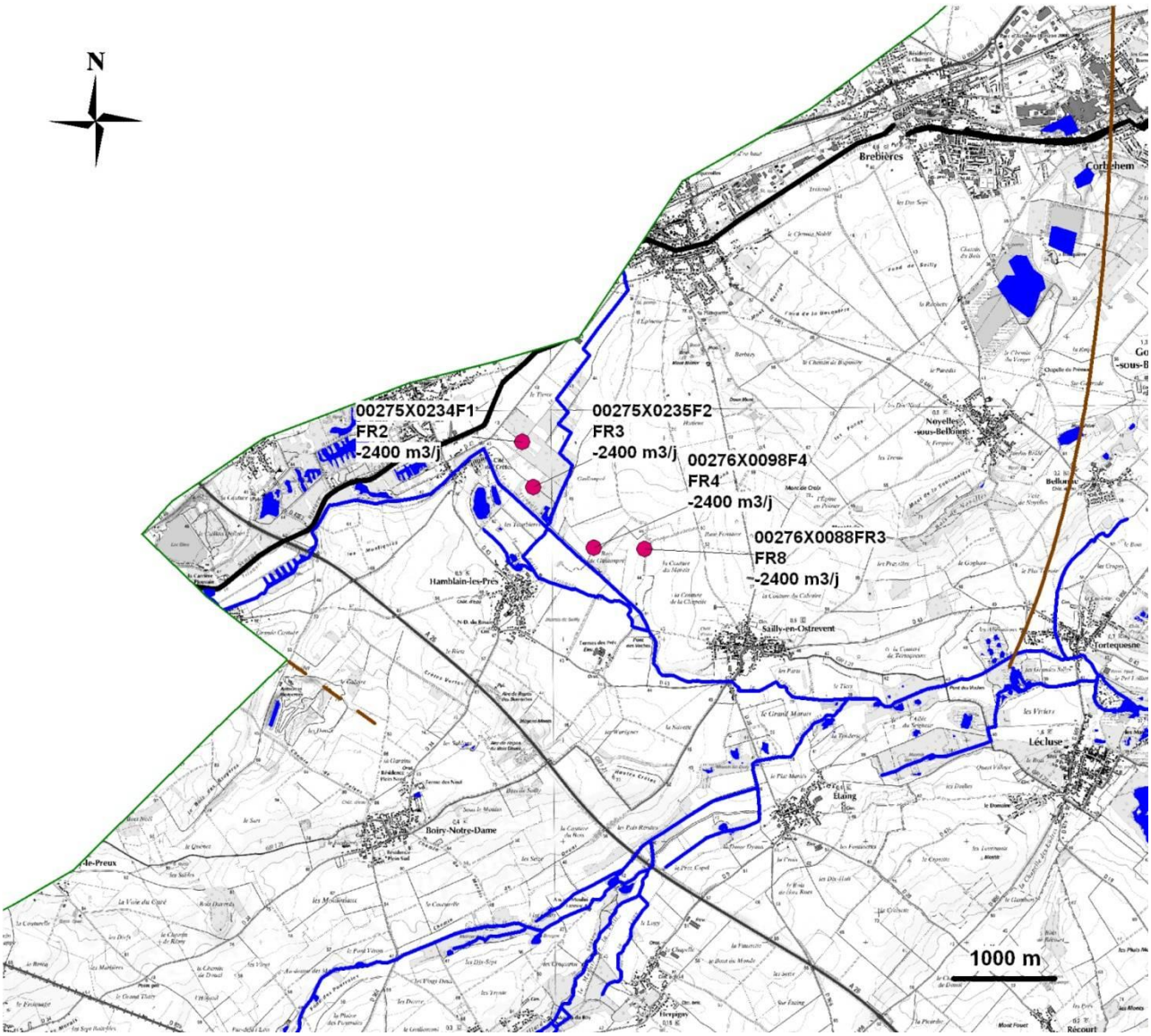


Figure 52. Emplacement et détails du champ captant simulé.

L'augmentation des prélèvements induit un rabattement des niveaux de la nappe de la craie et de la nappe alluviale atteignant jusqu'à 1.75 m au droit des forages les plus éloignés du Trinquise (FR8). La carte des impacts piézométriques est présentée à la Figure 53. Il s'agit du différentiel entre la situation avec pompage supplémentaire et la situation réelle, présenté pour l'étiage 2006.

Le cône de rabattement se propage sur plus de 3 km vers le nord (cf. Figure 53) et est stoppé par le Trinquise au sud-ouest. Pour la partie située hors des limites du modèle, les lignes d'isoimpacts représentées sur la figure suivante sont interpolées hors de la zone de calcul et doivent être considérées avec précautions.

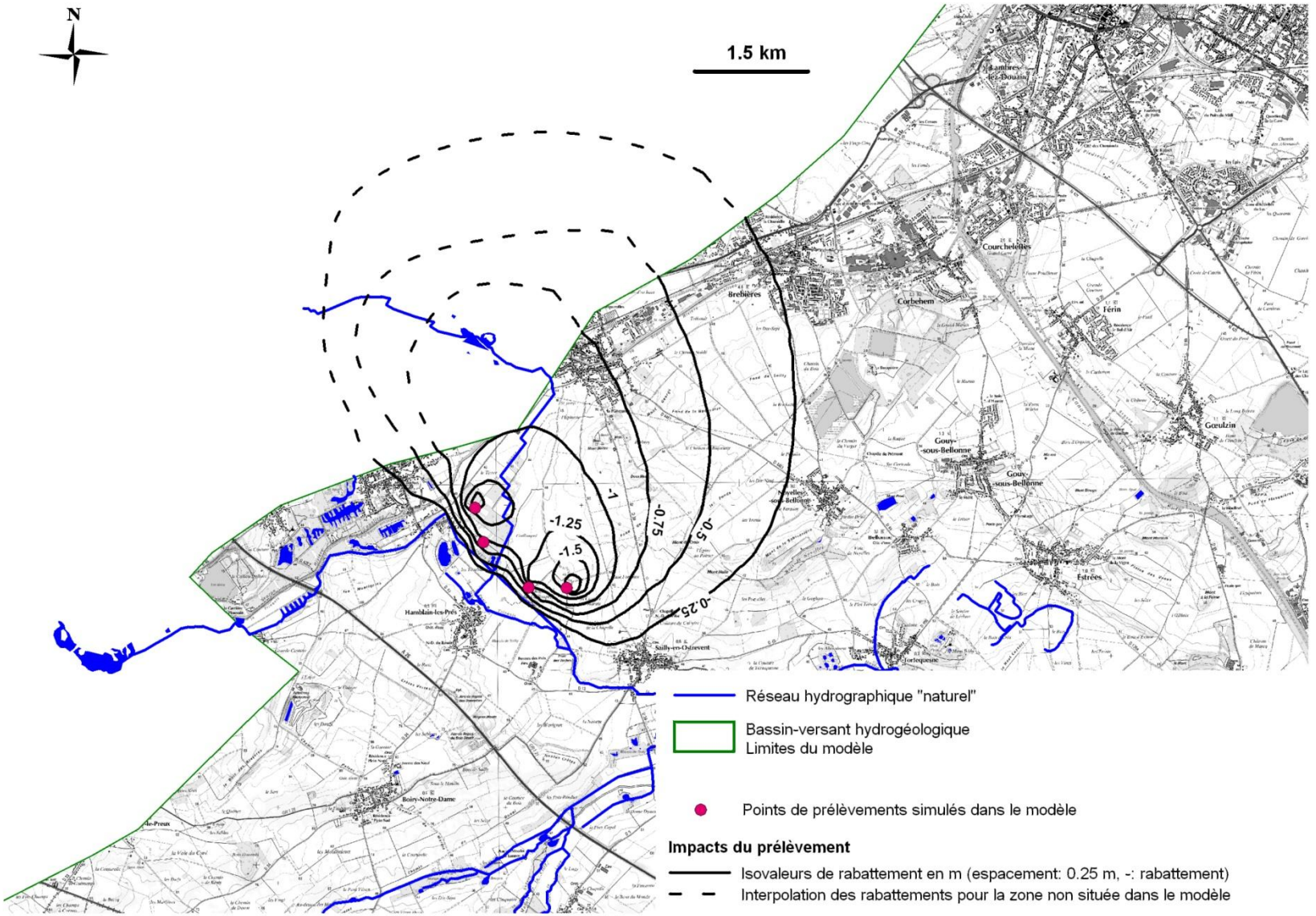


Figure 53. Impacts des prélèvements supplémentaires sur la piézométrie.

Le Trinquise présente naturellement des périodes de drainage par la nappe. L'augmentation des prélèvements induit directement une baisse des débits d'apport de nappe. Celle-ci se traduit par un drainage plus fort par la nappe durant les périodes sèches et une baisse des débits d'apport au cours des périodes humides. Le débit d'apport de nappe du Trinquise est réduit de 0.1 m^3/s, soit (8600 m^3/j) en moyenne. Ainsi, 90% des débits prélevés dans le champ captant auraient été drainés par le Trinquise. Les 10% restant proviennent de la partie nord du front d'appel.

Les prélèvements induisent un décalage dans le temps d'une dizaine de jours des pointes de débit.

Le fonctionnement général de l'aquifère n'est pas perturbé par ces prélèvements supplémentaires : les phases de stockage et de déstockage restent les mêmes tant du point de vue de l'amplitude que de la période d'occurrence (cf. Figure 54).

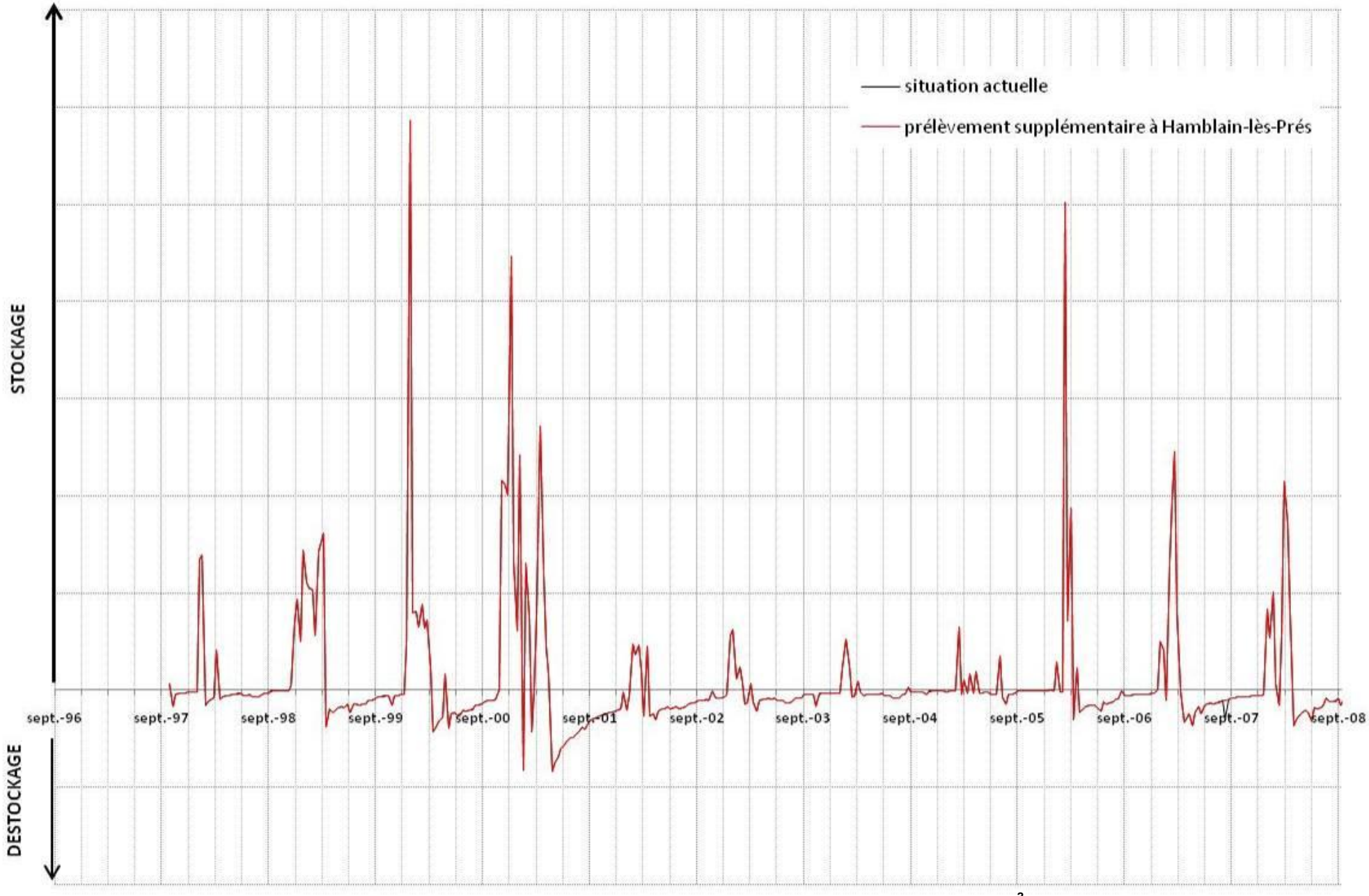


Figure 54. Bilan des échanges hydrauliques dans le cas d'un prélèvement supplémentaire de 9600 m^3/j le long du Trinquise.

10.3 RESUME DES SCENARII TESTES

Scénario testé	Situation comparée	Elément de compréhension		Conclusion partielle		Synthèse	
		Etat de la nappe de la craie	**Alimentation du réseau hydrographique par la nappe**	**Etat de la nappe de la craie**	**Alimentation du réseau hydrographique par la nappe**	**Etat de la nappe de la craie**	**Alimentation du réseau hydrographique par la nappe**
Arrêt des prélèvements sur le territoire du SAGE d'octobre 1997 à octobre 2008	Février 2006 : prélèvements de 28 200 m^3/j	Incidence de l'ensemble des pompages sur la profondeur de la nappe de la craie	Incidence de l'ensemble des pompages sur les débits d'apport de nappe aux rivières sur le territoire du SAGE	Rabattement moyen de 0.25 m dans les parties basses des vallées affluentes de la Sensée et 1.5 m sous les coteaux, avec des cuvettes plus profondes au droit des prélèvements les plus importants. Pour un pompage équivalent, l'incidence sur les niveaux de nappe est plus forte sous les plateaux	Les prélèvements induisent une baisse de débits d'apport de la nappe de la craie vers l'ensemble du réseau hydrographique. Cette baisse, répartie sur l'ensemble des rivières du territoire du SAGE est de 300 l/s pour la situation de février 2006.	**Baisse du stockage par la nappe à hauteur de 15% des débits prélevés**	**Baisse des débits d'apport de nappe à hauteur de 85% des débits prélevés. Ce manque représente 22% des débits d'alimentation moyens actuels.**
Ajout d'un champ captant supplémentaire de 9600 m3/j à Hamblain-lès-Prés	Février 2006. Le Trinquise présente une bonne capacité d'échange avec la nappe de la craie.	Incidence d'un prélèvement proche d'un cours d'eau sur la profondeur de la nappe de la craie	Incidence d'un prélèvement proche d'un cours d'eau sur son fonctionnement	Rabattement de 1.75 m au droit des ouvrages du champ captant. L'extension du cône de rabattement est arrêtée par le Trinquise au sud-ouest mais se propage sur 3 km vers le nord-est.	Les prélèvements induisent une baisse de l'alimentation moyenne du Trinquise par la nappe de 100 l/s : drainage par la nappe plus fort en période séche, baisse des débits d'apport en période humide.	**10% des débits prélevés proviennent de la nappe de la craie située au nord-est.**	**90% des débits prélevés par ce champ captant auraient servis à l'alimentation du Trinquise.**

Tableau 10. Résumé des scénarii testés par le modèle hydrogéologique.

10.4 RECOMMANDATIONS POUR LE SAGE

L'impact des prélèvements ne se fera pas de la même manière selon leur situation dans le bassin versant :

- Les prélèvements situés sur les plateaux induisent des impacts piézométriques forts, qui se propagent loin. Ils influencent les prélèvements adjacents et la localisation du début de l'écoulement des cours d'eau intermittents. La baisse de la piézométrie induit une migration vers l'aval de la source des écoulements de surface et un retard dans leur apparition.

- Les prélèvements situés le long de la Vallée de la Sensée induisent des impacts piézométriques plus faibles mais on constate une baisse des débits de nappe vers le réseau hydrographique, voire un drainage.

Il a été établi au travers du calage que le bassin-versant de la Sensée présente une très forte capacité d'infiltration et que les différents tronçons du réseau hydrographique ne présentaient pas tous la même capacité d'échange avec la nappe.

Les scénarii testés ont permis d'observer que les prélèvements actuels ont un impact sur les débits d'alimentation de la nappe vers les rivières : l'équivalent de 22% des débits d'apport de nappe actuels sont prélevés. Cette baisse est due à la fois aux forages situés sous les plateaux et aux forages proches des rivières. Cependant, en fonction de la capacité d'échange du tronçon de rivière voisin avec la nappe de la craie, les forages les plus proches des rivières induisent un défaut d'alimentation local. En fonction de la capacité d'échange nappe-rivière, une inversion du sens des échanges nappe-rivière peut se produire : la rivière va réalimenter la nappe et indirectement le point de prélèvement proche.

La modélisation hydrogéologique a mis en évidence :
- la forte dépendance des débits de la Sensée et de ses affluents aux apports de la nappe de la craie,
- les fortes incidences des prélèvements en eaux souterraines sur les débits et les écoulements des cours d'eau du bassin, ces incidences sont liées au rôle important des apports de nappe dans l'hydrologie des cours d'eau

Les IBGN mesurés en 2005, 2006 et 2007 par Hydrosphère (voir carte ci-dessous) montrent que la vie biologique est actuellement pauvre. L'état des lieux fait par Asconit Consultants permet de constater qu'elle est affectée par les pollutions, par l'envasement, par la dégradation morphologique des cours d'eau (lits trop larges en particulier), par l'absence de ripisylve sur de longs linéaires, par l'absence d'alimentation de la Sensée aval.

Dans cette situation écologique dégradée, il paraît vraisemblable que l'incidence des prélèvements sur les débits des cours d'eau participe à la dégradation de la vie biologique des cours d'eau du bassin. Cependant, nous ne sommes pas en mesure de préciser le poids de la baisse des débits due aux prélèvements dans la dégradation de la qualité écologique du réseau hydrographique. Préalablement à la détermination de ce

poids, il serait nécessaire de déterminer les débits seuils permettant d'atteindre une bonne qualité écologique et de les comparer aux débits réels. **Un manque dans les débits serait à attribuer à des prélèvements trop importants, aussi bien en nappe qu'en rivière.**

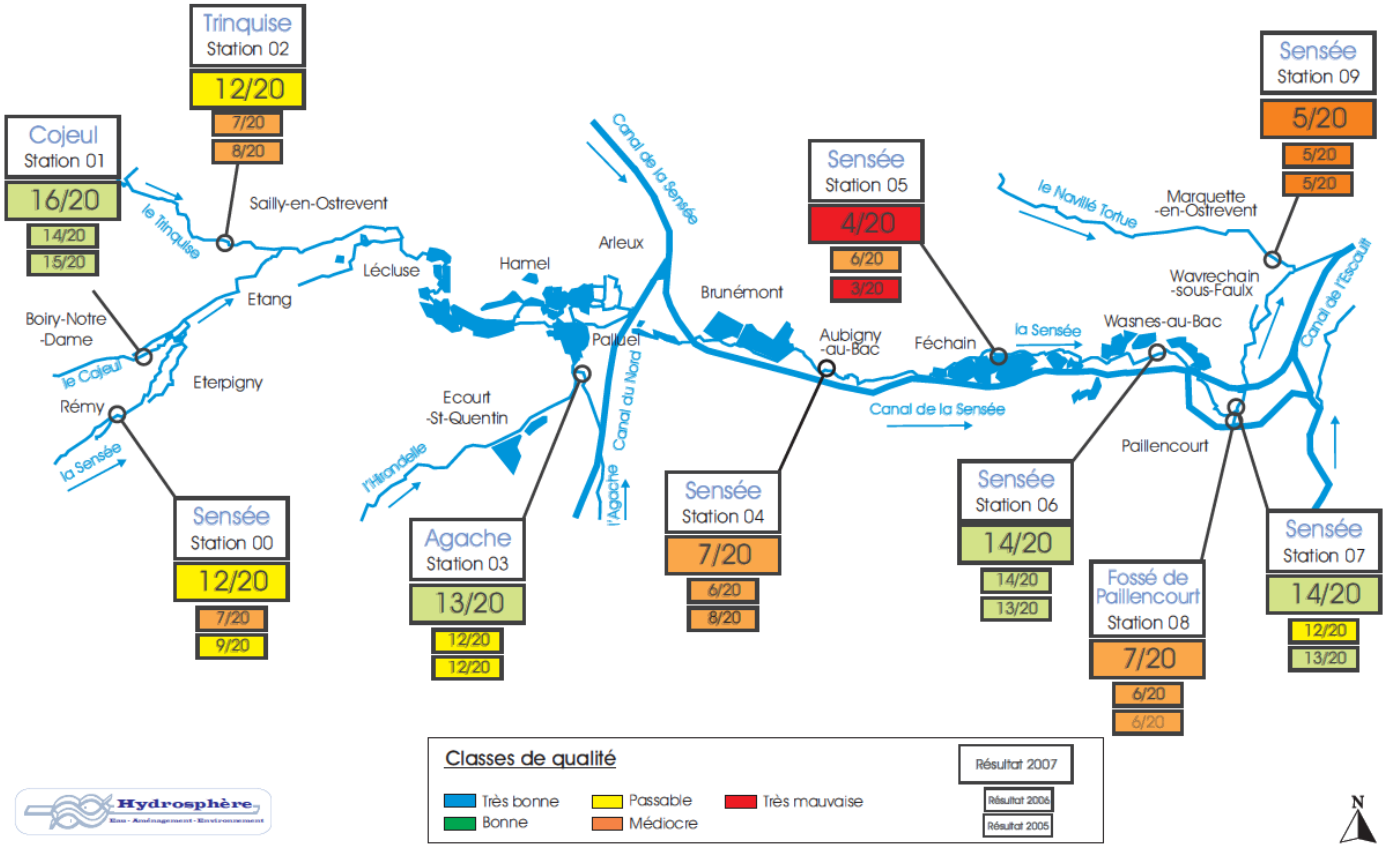


Figure 55. Résultats des analyses hydrobiologiques 2005 à 2007 (IBGN)

Dans l'attente de cette comparaison, par principe de précaution, il nous semble que **la reconquête de la qualité de la vie aquatique de la Sensée et de ses affluents** passe par :

- la lutte contre les pollutions qui arrivent dans les cours d'eau,
- des travaux de restauration des cours d'eau, intégrant des actions sur leur morphologie,
- la réalimentation de la Sensée aval,
- le maintien des débits des cours d'eau, **ce qui signifie la limitation des prélèvements d'eaux souterraines supplémentaires.**

Il y a lieu de préconiser aussi une politique d'économie d'eau sur le territoire du SAGE et sur les territoires adjacents qui sont alimentés avec de l'eau puisée sur le territoire du SAGE Sensée.

Figure 56. Echanges potentiels entre la nappe et la rivière

La limitation des prélèvements supplémentaires doit être modulée en fonction des débits demandés et de la localisation des ouvrages.
Les gros prélèvements, tels ceux qui sont nécessaires à l'AEP, au voisinage de tronçons de rivières ayant une bonne capacité d'échange avec la nappe seraient préjudiciables au maintien des débits de la Sensée. Les petits prélèvements isolés sous les coteaux auraient peu d'incidence sur les débits des rivières, mais leur cumul induirait des impacts piézométriques pouvant conduire à faire migrer vers l'aval le point d'initiation de l'écoulement du cours d'eau.

Nous recommandons donc d'inscrire dans le SAGE Sensée la limitation des prélèvements supplémentaires d'eaux souterraines dans l'attente de l'établissement des débits seuils biologiques des cours d'eau.
Il serait en effet contradictoire :

- d'une part, d'investir pour la restauration des cours d'eau et pour la reconquête de la vie aquatique,
- d'autre part, d'abaisser les débits des cours d'eau en prélevant plus d'eau souterraine dans le bassin.

ANNEXES

Annexe 1 - Données pluviométriques horaires recueillies pour les trois crues modélisées

Annexe 2 - Données pluviométriques journalières recueillies pour les trois crues modélisées

Annexe 3 - Résultats du calage du modèle hydrologique / hydraulique

Annexe 4 - Répartition spatiale des cumuls de pluviométrie – Crues de août 2008, mars 1995, mars 2001

Annexe 5 - Productivité des sous bassins versants d'apport naturels

Annexe 6 - Propagation des crues

Annexe 7 - Zones inondées lors des trois crues simulées

Annexe 8 - Lignes d'eau le long des biefs filaires pour les trois crues modélisées

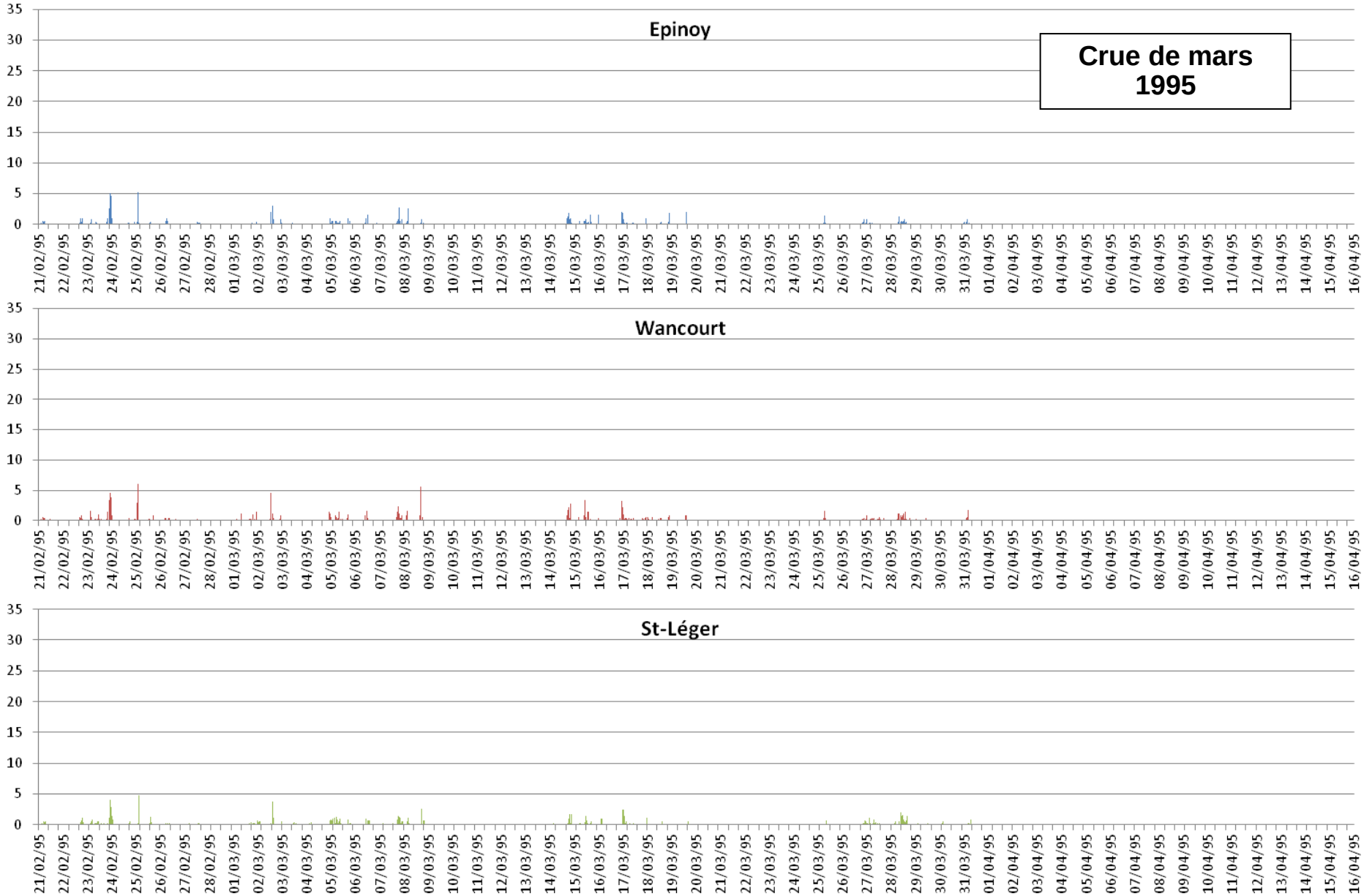
Annexe 9 - Cotes du mur des couches 2 et 3 du modèle

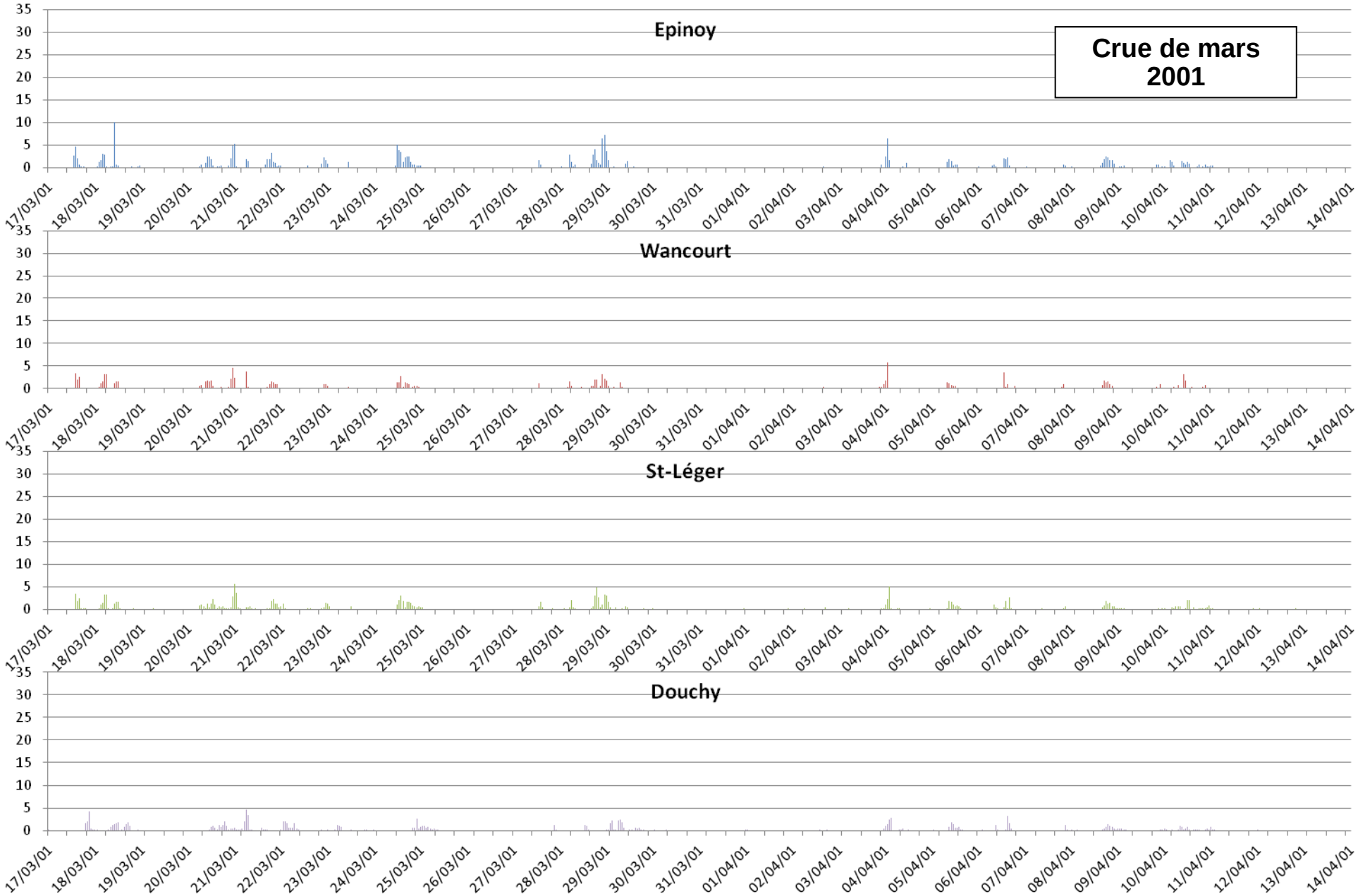
Annexe 10 - Valeurs de la recharge introduite dans le modèle transitoire

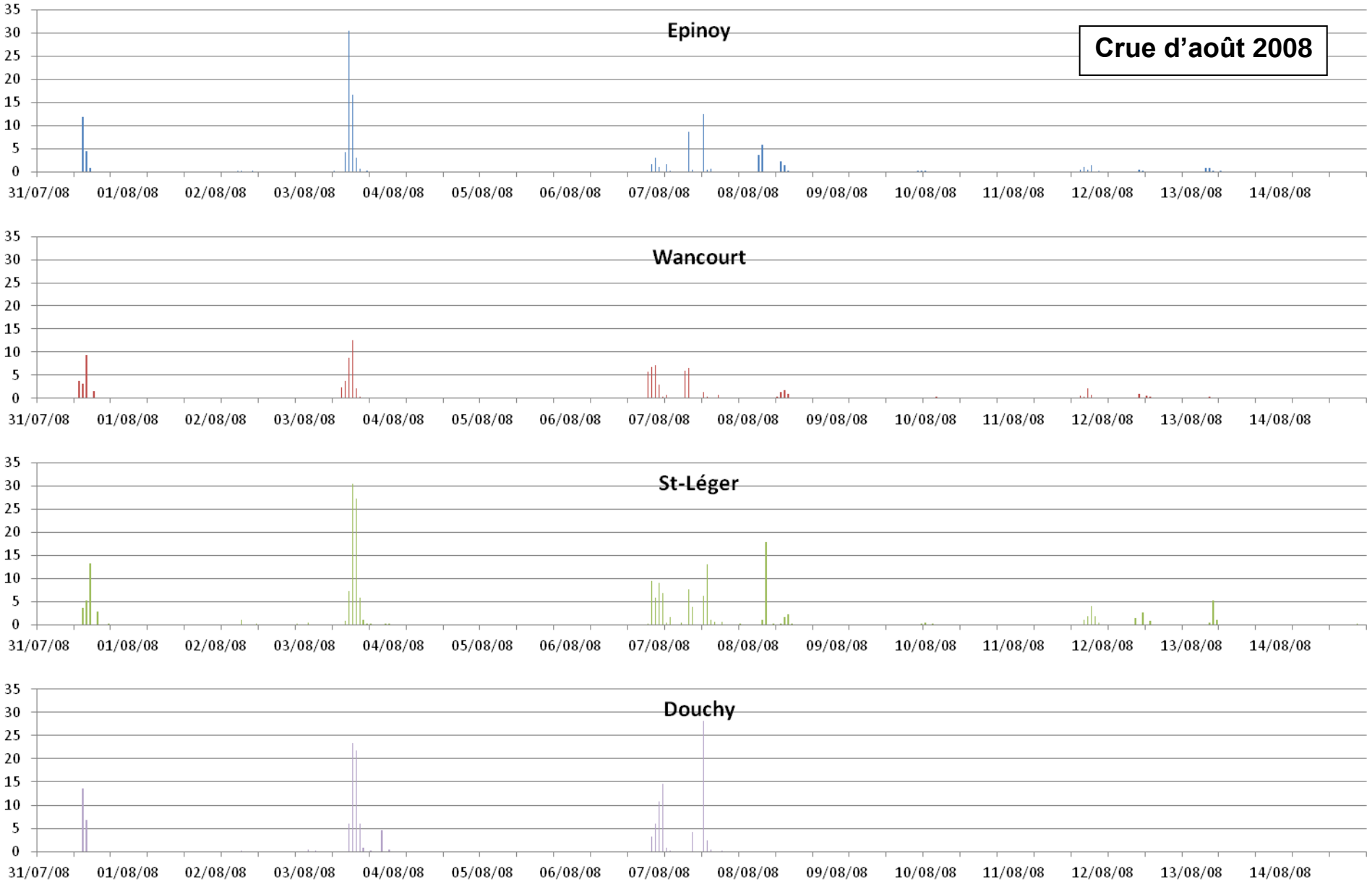
Annexe 11 - Analyse du calage de la piézométrie en régime transitoire

Annexe 1

Données pluviométriques horaires recueillies pour les trois crues modélisées

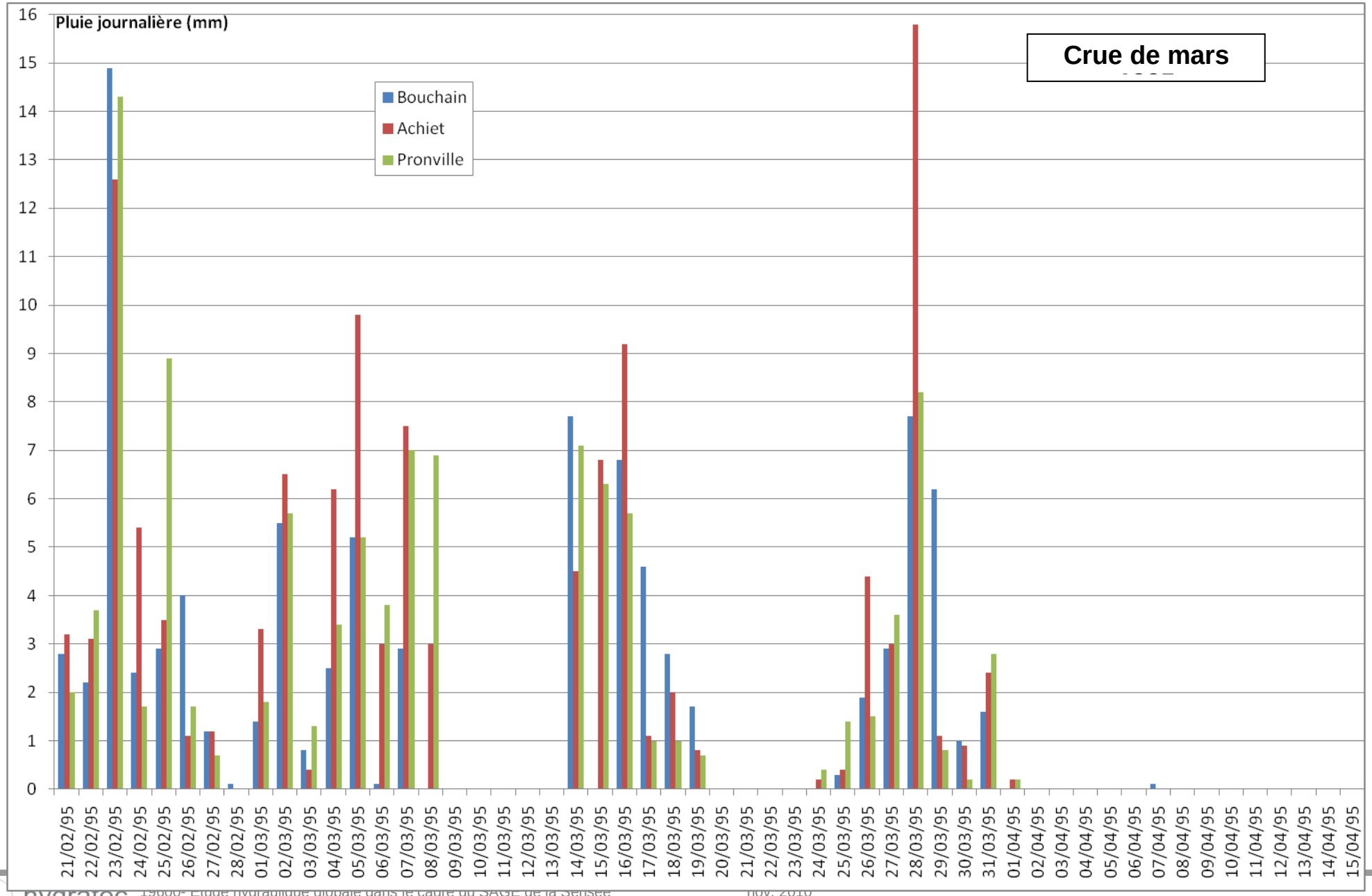

Epinoy
Crue de mars 1995
Wancourt
St-Léger
35
30
25
20
15
10
5
0
21/02/95
22/02/95
23/02/95
24/02/95
25/02/95
26/02/95
27/02/95
28/02/95
01/03/95
02/03/95
03/03/95
04/03/95
05/03/95
06/03/95
07/03/95
08/03/95
09/03/95
10/03/95
11/03/95
12/03/95
13/03/95
14/03/95
15/03/95
16/03/95
17/03/95
18/03/95
19/03/95
20/03/95
21/03/95
22/03/95
23/03/95
24/03/95
25/03/95
26/03/95
27/03/95
28/03/95
29/03/95
30/03/95
31/03/95
01/04/95
02/04/95
03/04/95
04/04/95
05/04/95
06/04/95
07/04/95
08/04/95
09/04/95
10/04/95
11/04/95
12/04/95
13/04/95
14/04/95
15/04/95
16/04/95

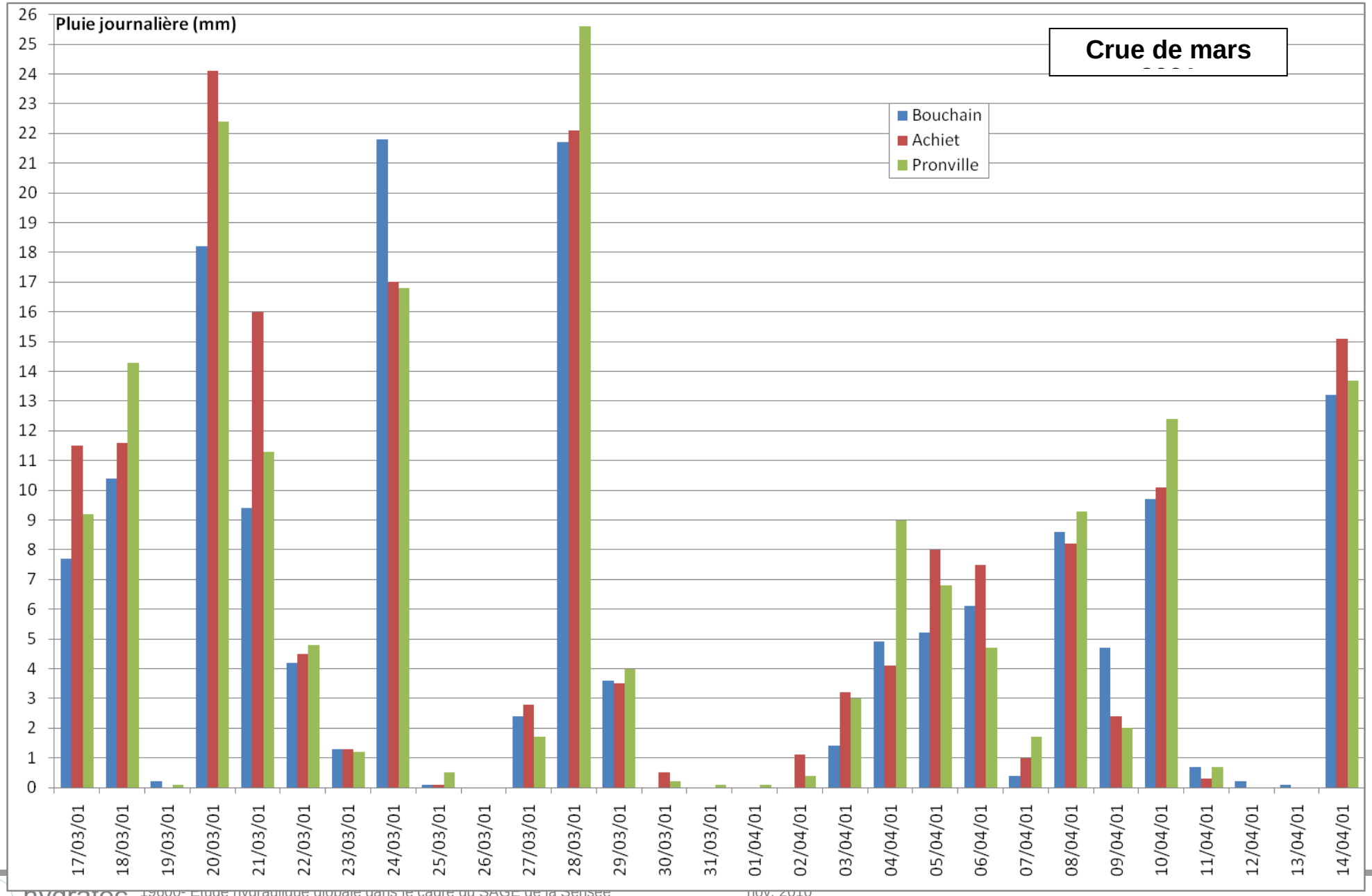

Crue de mars 2001
Epinoy
Wancourt
St-Léger
Douchy
35
30
25
20
15
10
5
0
17/03/01
18/03/01
19/03/01
20/03/01
21/03/01
22/03/01
23/03/01
24/03/01
25/03/01
26/03/01
27/03/01
28/03/01
29/03/01
30/03/01
31/03/01
01/04/01
02/04/01
03/04/01
04/04/01
05/04/01
06/04/01
07/04/01
08/04/01
09/04/01
10/04/01
11/04/01
12/04/01
13/04/01
14/04/01

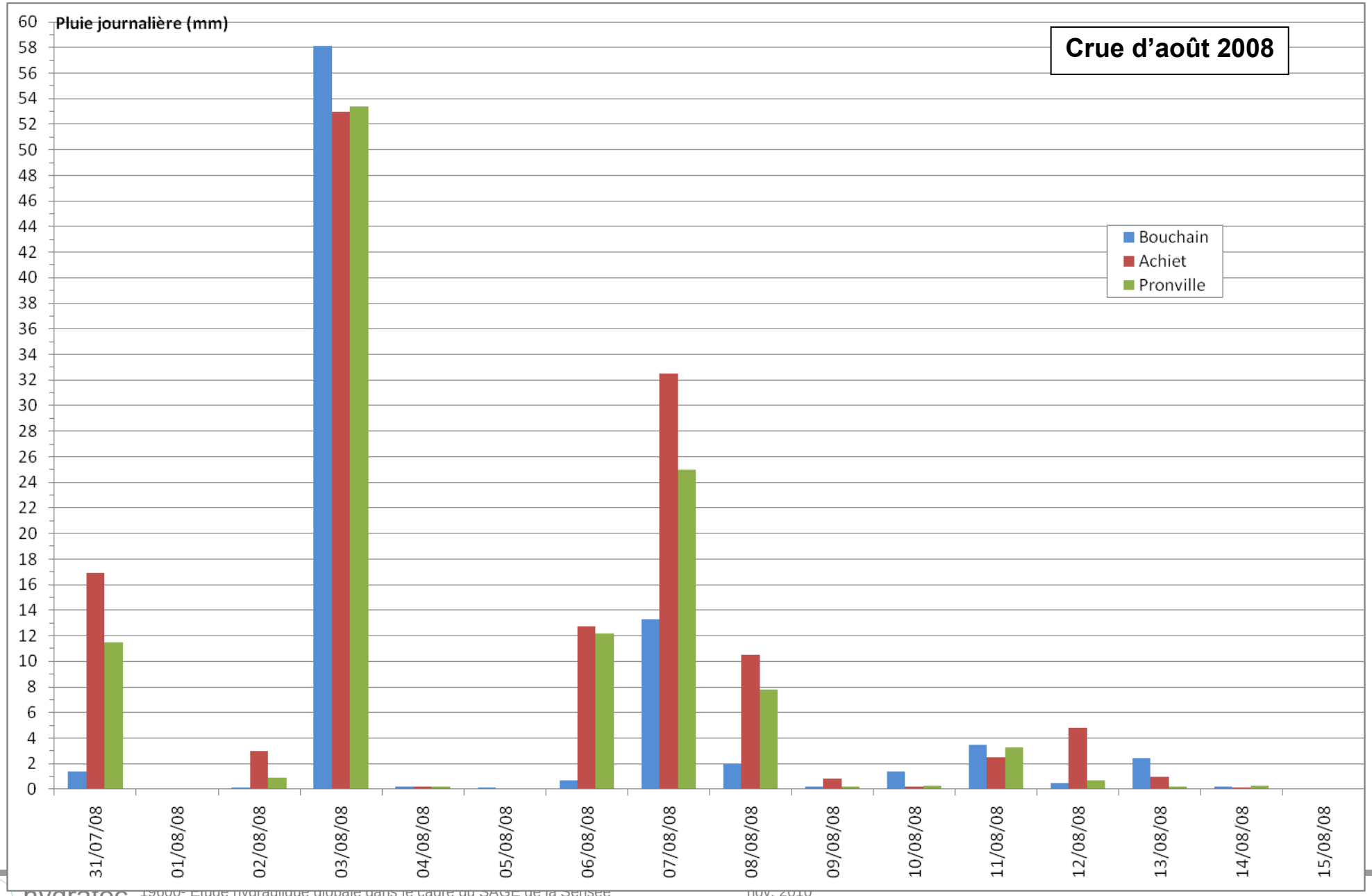

Crue d'août 2008
Epinoy
Wancourt
St-Léger
Douchy
35
30
25
20
15
10
5
0
31/07/08
01/08/08
02/08/08
03/08/08
04/08/08
05/08/08
06/08/08
07/08/08
08/08/08
09/08/08
10/08/08
11/08/08
12/08/08
13/08/08
14/08/08

Annexe 2

Données pluviométriques journalières recueillies pour les trois crues modélisées


Pluie journalière (mm)
Crue de mars
Bouchain
Achiet
Pronville
16
15
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
21/02/95
22/02/95
23/02/95
24/02/95
25/02/95
26/02/95
27/02/95
28/02/95
01/03/95
02/03/95
03/03/95
04/03/95
05/03/95
06/03/95
07/03/95
08/03/95
09/03/95
10/03/95
11/03/95
12/03/95
13/03/95
14/03/95
15/03/95
16/03/95
17/03/95
18/03/95
19/03/95
20/03/95
21/03/95
22/03/95
23/03/95
24/03/95
25/03/95
26/03/95
27/03/95
28/03/95
29/03/95
30/03/95
31/03/95
01/04/95
02/04/95
03/04/95
04/04/95
05/04/95
06/04/95
07/04/95
08/04/95
09/04/95
10/04/95
11/04/95
12/04/95
13/04/95
14/04/95
15/04/95


Pluie journalière (mm)
Crue de mars
Bouchain
Achiet
Pronville
26
25
24
23
22
21
20
19
18
17
16
15
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
17/03/01
18/03/01
19/03/01
20/03/01
21/03/01
22/03/01
23/03/01
24/03/01
25/03/01
26/03/01
27/03/01
28/03/01
29/03/01
30/03/01
31/03/01
01/04/01
02/04/01
03/04/01
04/04/01
05/04/01
06/04/01
07/04/01
08/04/01
09/04/01
10/04/01
11/04/01
12/04/01
13/04/01
14/04/01

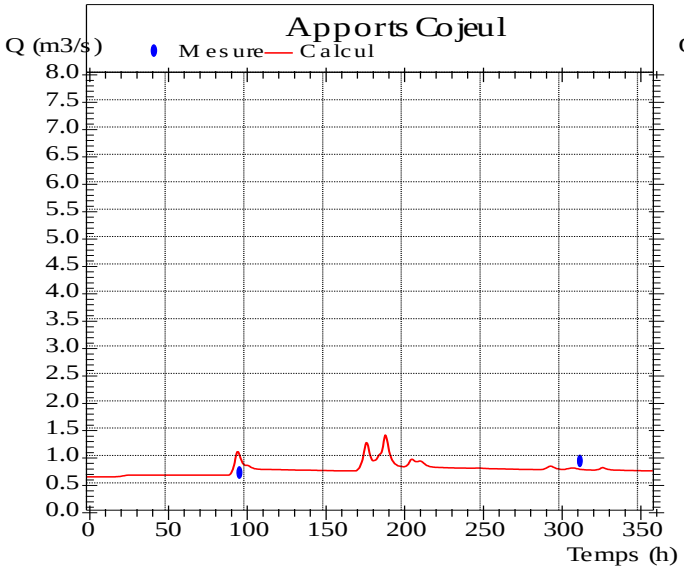

Crue d'août 2008
Pluie journalière (mm)
60
58
56
54
52
50
48
46
44
42
40
38
36
34
32
30
28
26
24
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
Bouchain
Achiet
Pronville
31/07/08
01/08/08
02/08/08
03/08/08
04/08/08
05/08/08
06/08/08
07/08/08
08/08/08
09/08/08
10/08/08
11/08/08
12/08/08
13/08/08
14/08/08
15/08/08

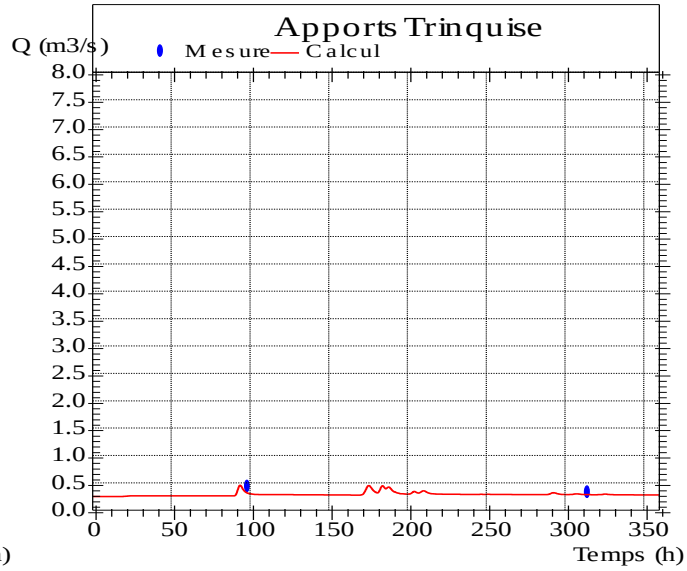
Annexe 3

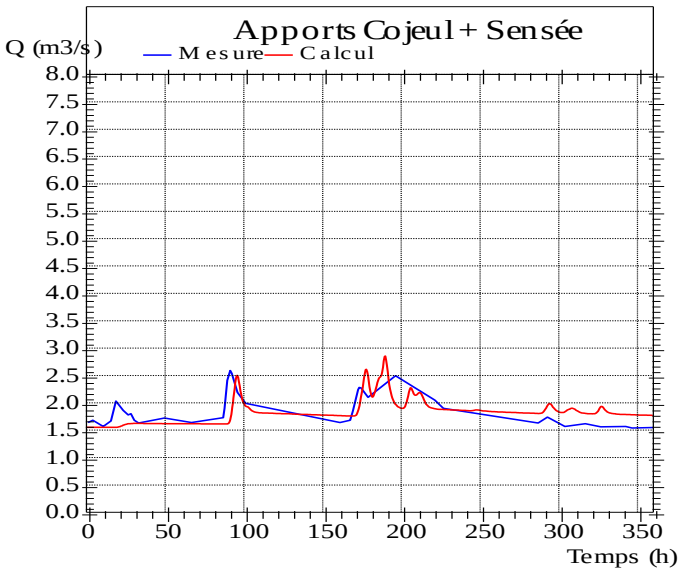
Résultats du calage du modèle hydrologique / hydraulique

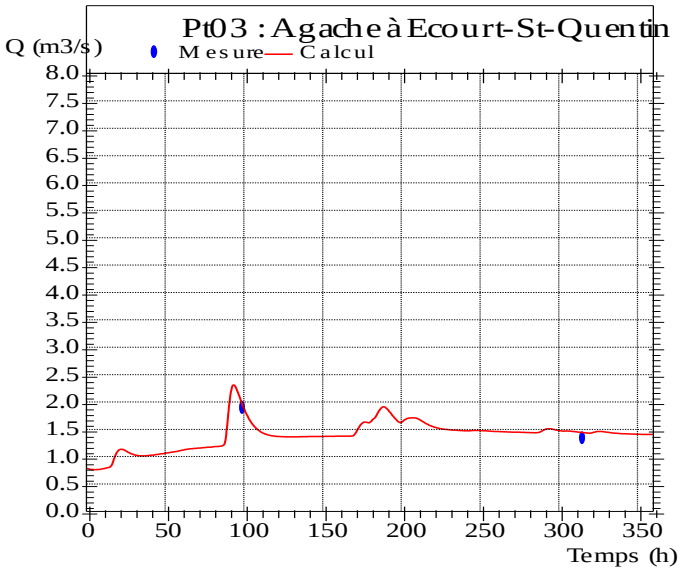
Calage modèle SAM (Sensée amont)

Calage SAM : Hydrogrammes a08

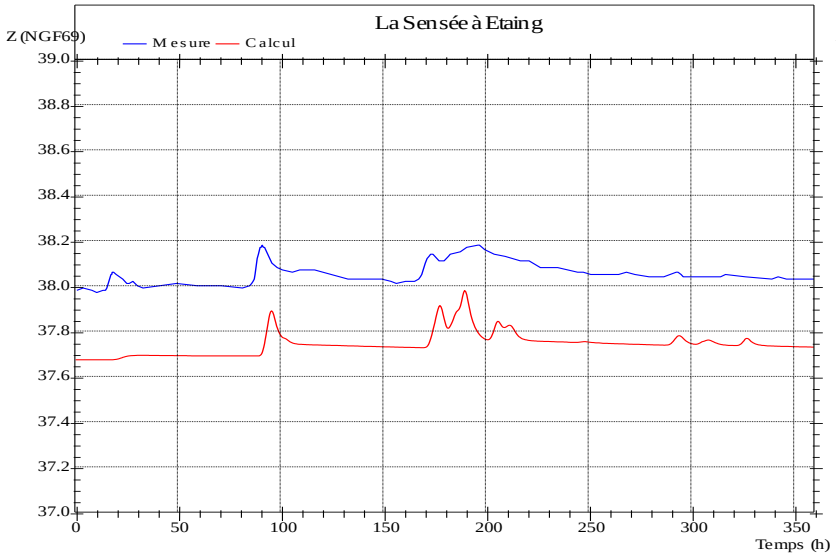


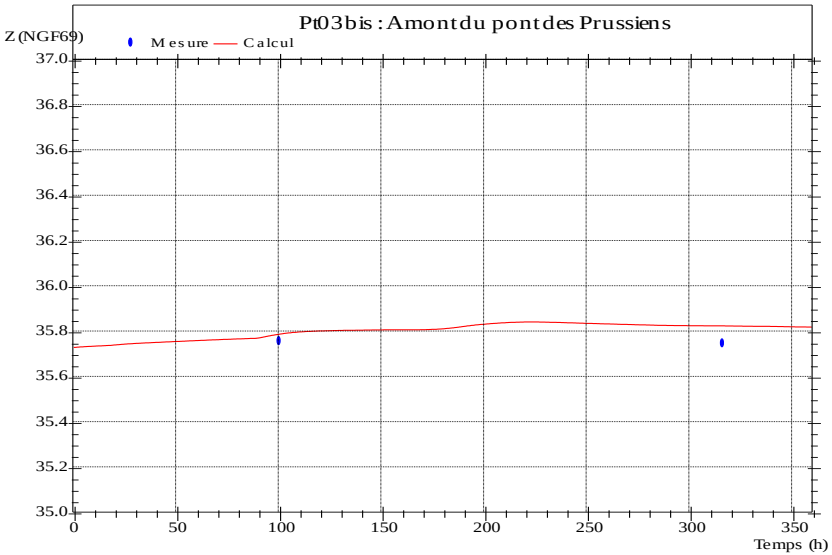


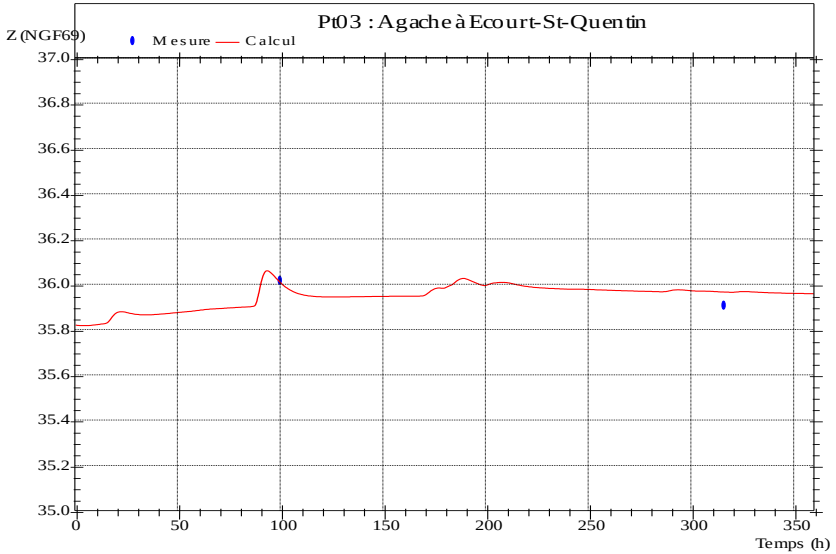


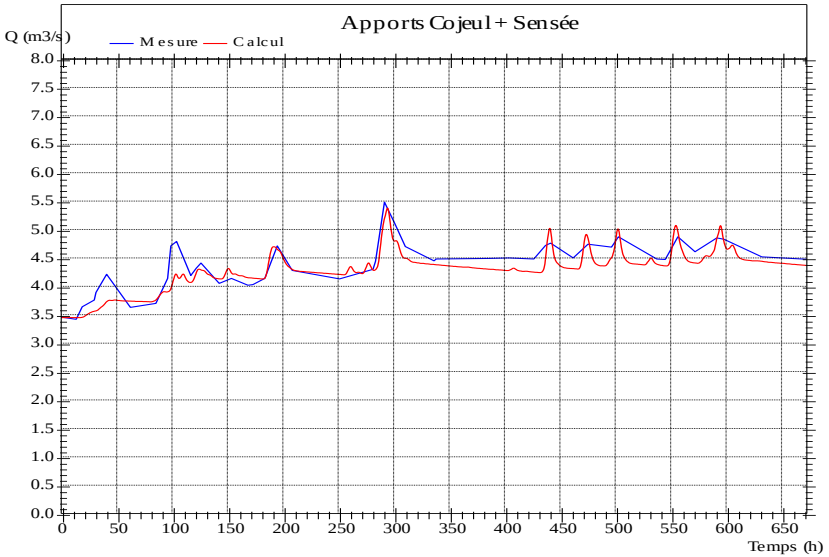


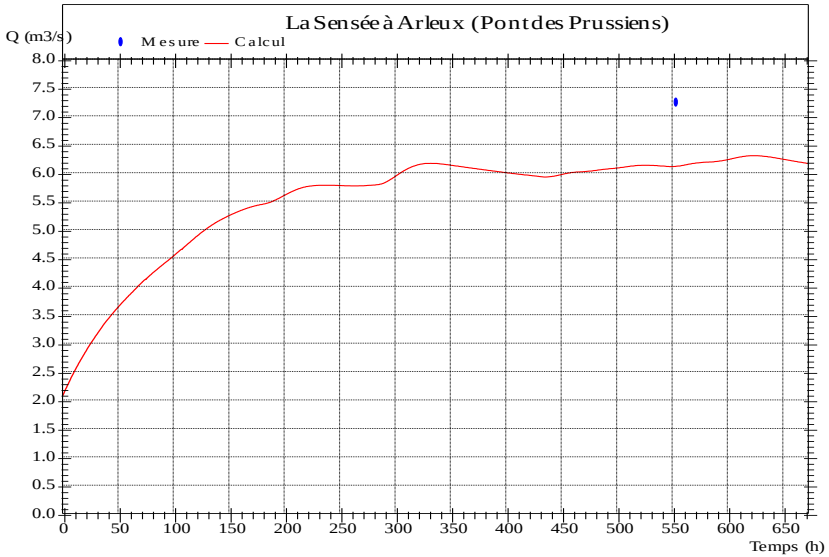
HydraRiv, scenario a08 - début simulation = 31/07/2008 06:00:00

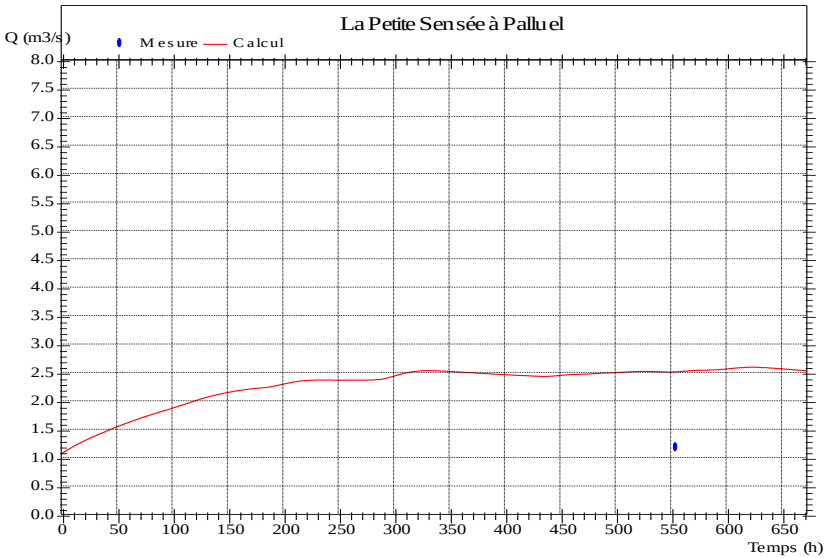

La Sensée à Etaing
Z (NGF69)
Mesure
Calcul
39.0
38.8
38.6
38.4
38.2
38.0
37.8
37.6
37.4
37.2
37.0
0
50
100
150
200
250
300
350
Temps (h)


Pt03bis : Amont du pont des Prussiens
Z (NGF69)
Mesure
Calcul
37.0
36.8
36.6
36.4
36.2
36.0
35.8
35.6
35.4
35.2
35.0
0
50
100
150
200
250
300
350
Temps (h)

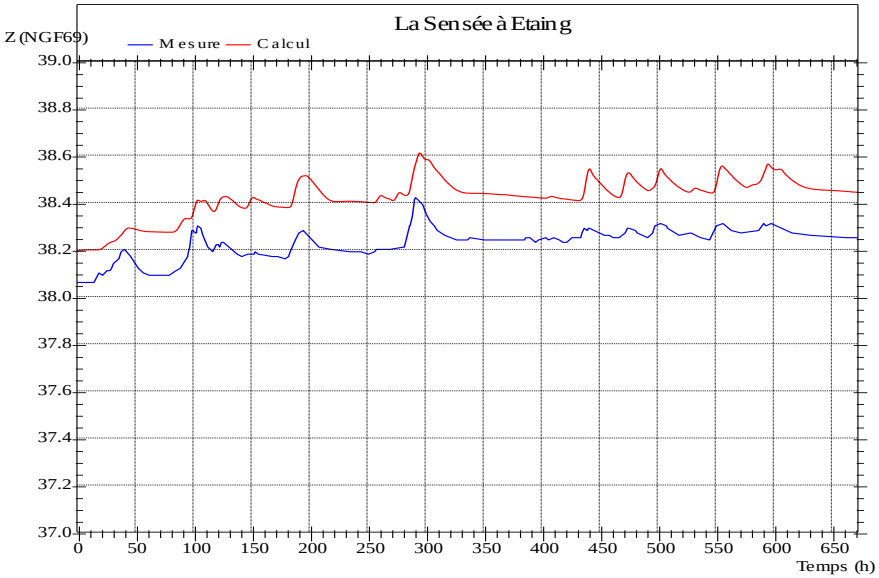

Pt03 : Agache à Ecourt-St-Quentin
Z (NGF69)
Mesure
Calcul
37.0
36.8
36.6
36.4
36.2
36.0
35.8
35.6
35.4
35.2
35.0
0
50
100
150
200
250
300
350
Temps (h)

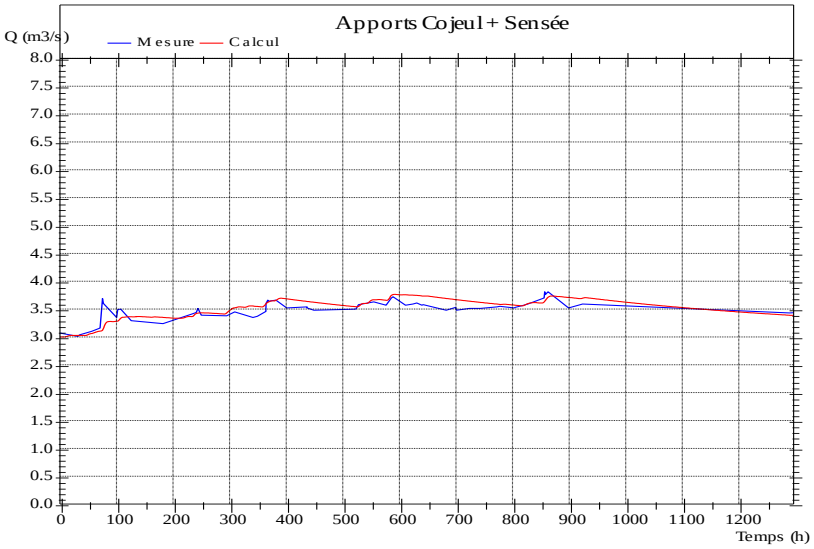

Apports Cojeul + Sensée
Mesure
Calcul
Q (m3/s)
Temps (h)

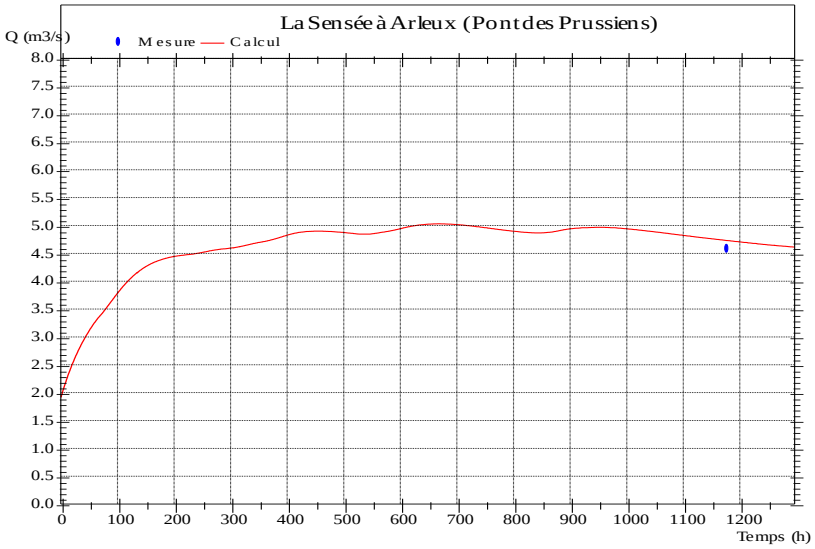

La Sensée à Arleux (Pont des Prussiens)
Mesure
Calcul
Q (m3/s)
Temps (h)

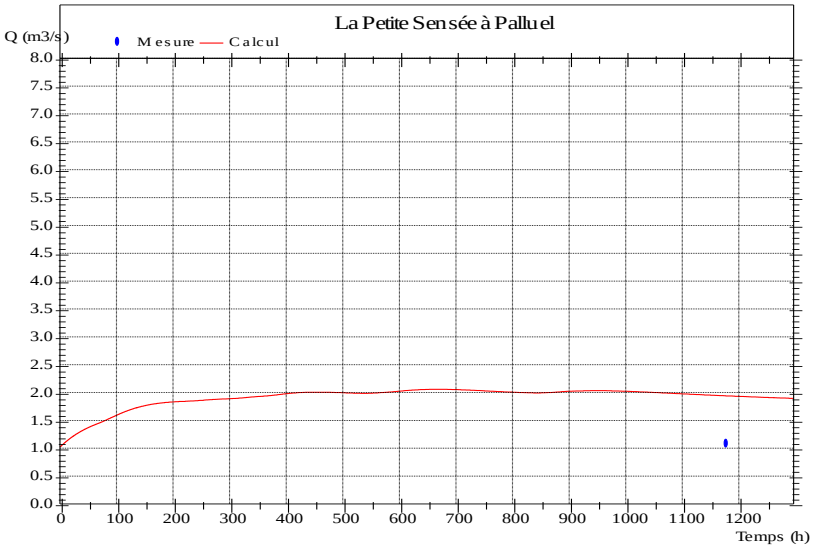

La Petite Sensée à Palluel
Mesure
Calcul
Q (m3/s)
Temps (h)

Calage SAM : Limnigrammes m01

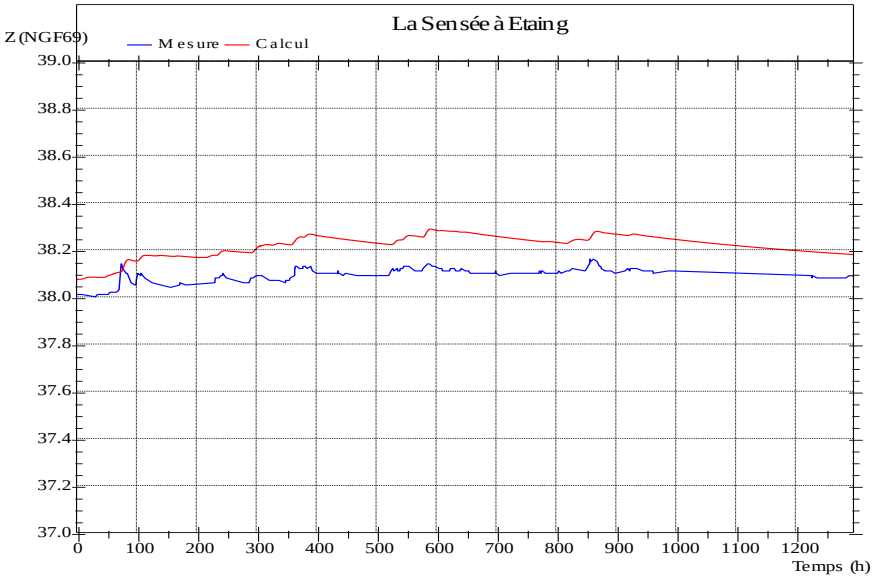



Apports Cojeul + Sensée
Q (m3/s)
Mesure
Calcul
Temps (h)


La Sensée à Arleux (Pont des Prussiens)
Q (m3/s)
Mesure
Calcul
Temps (h)

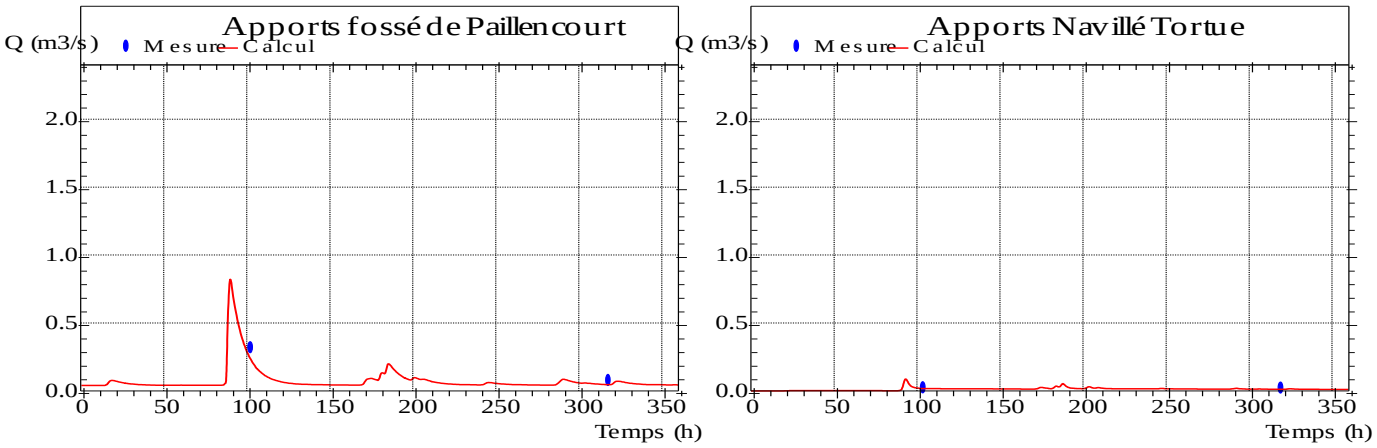

La Petite Sensée à Palluel
Q (m3/s)
Mesure
Calcul
Temps (h)

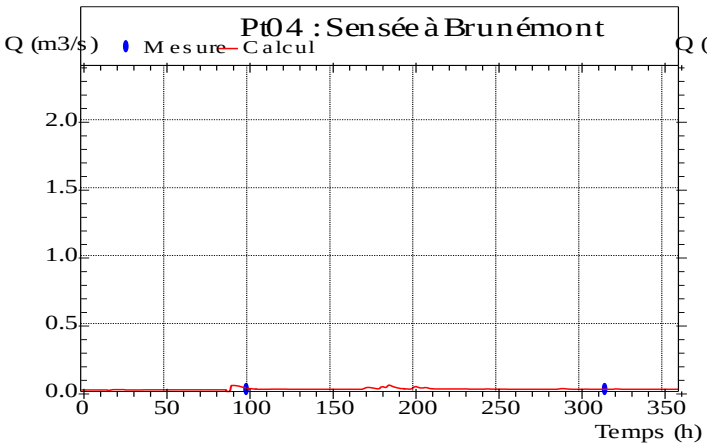
Calage SAM : Limnigrammes m95

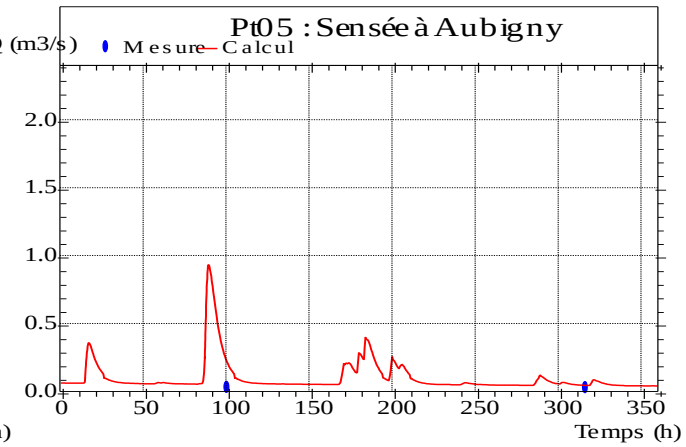


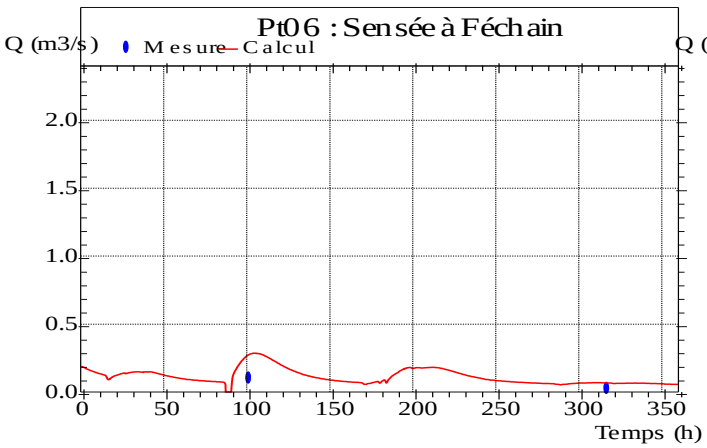
Calage modèle SAV (Sensée aval)

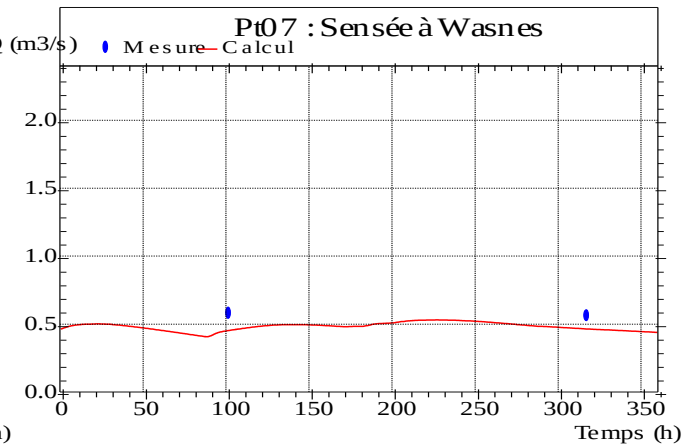
Calage SAV : Hydrogrammes a08

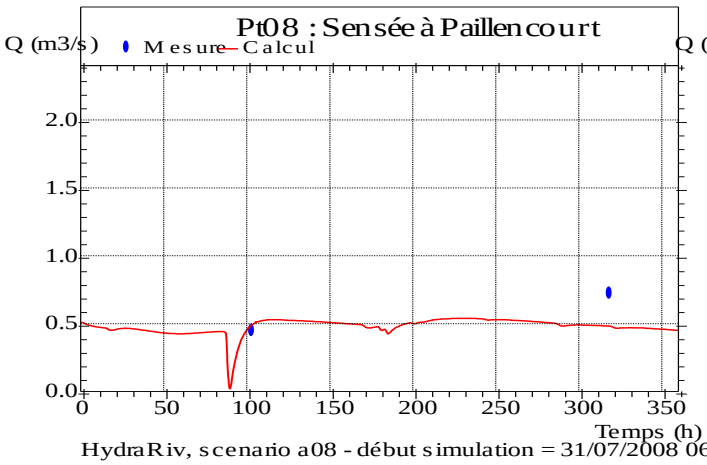


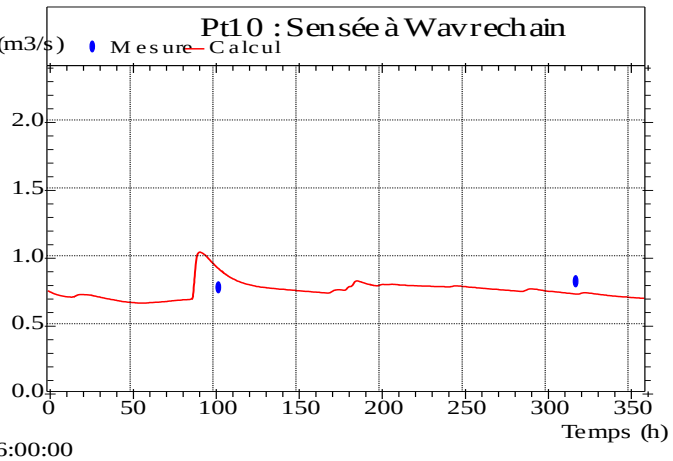






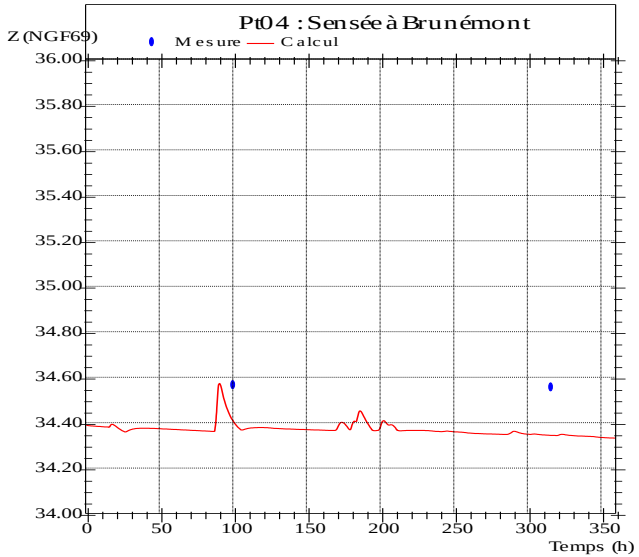


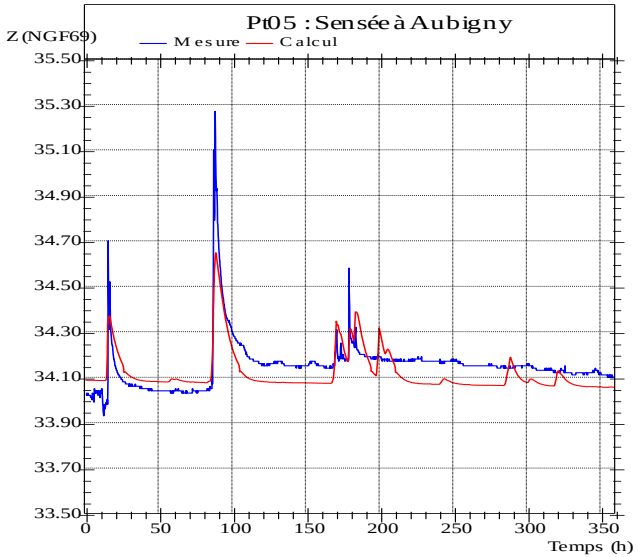


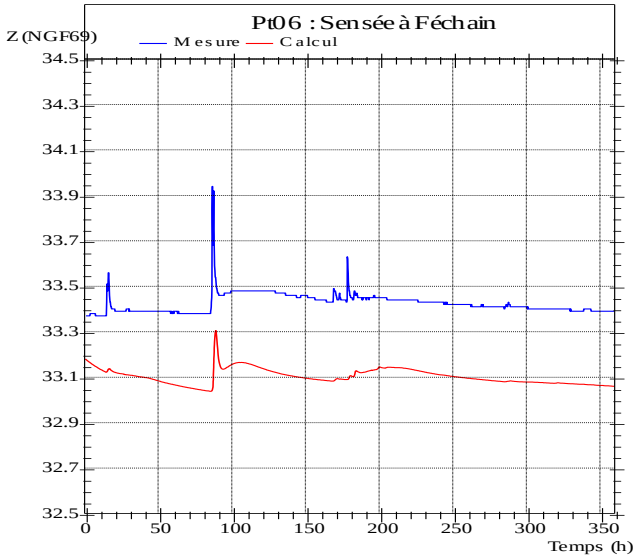


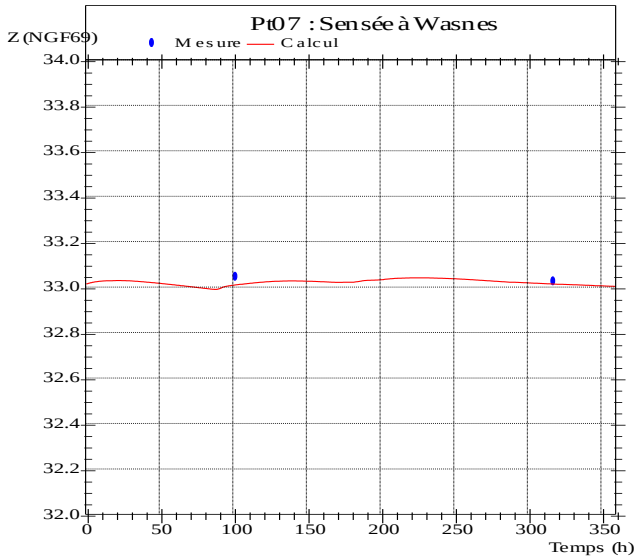
HydraRiv, scenario a08 - début simulation = 31/07/2008 06:00:00

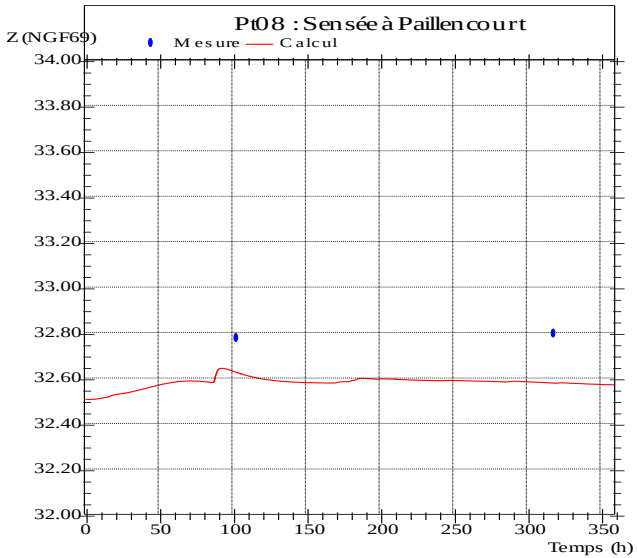
Calage SAV : Limnigrammes a08

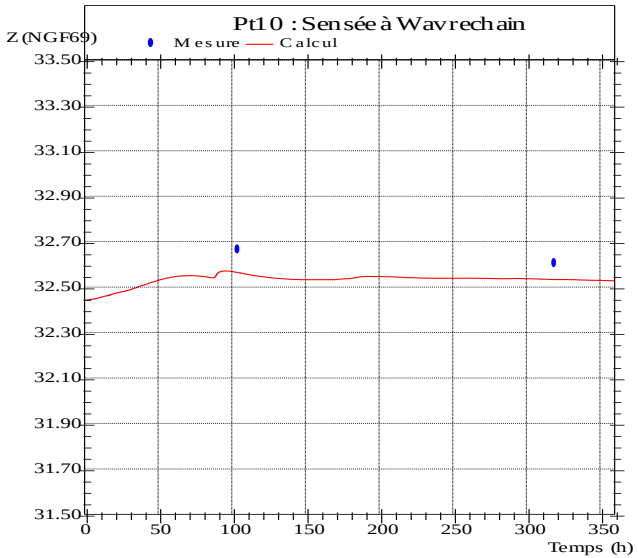




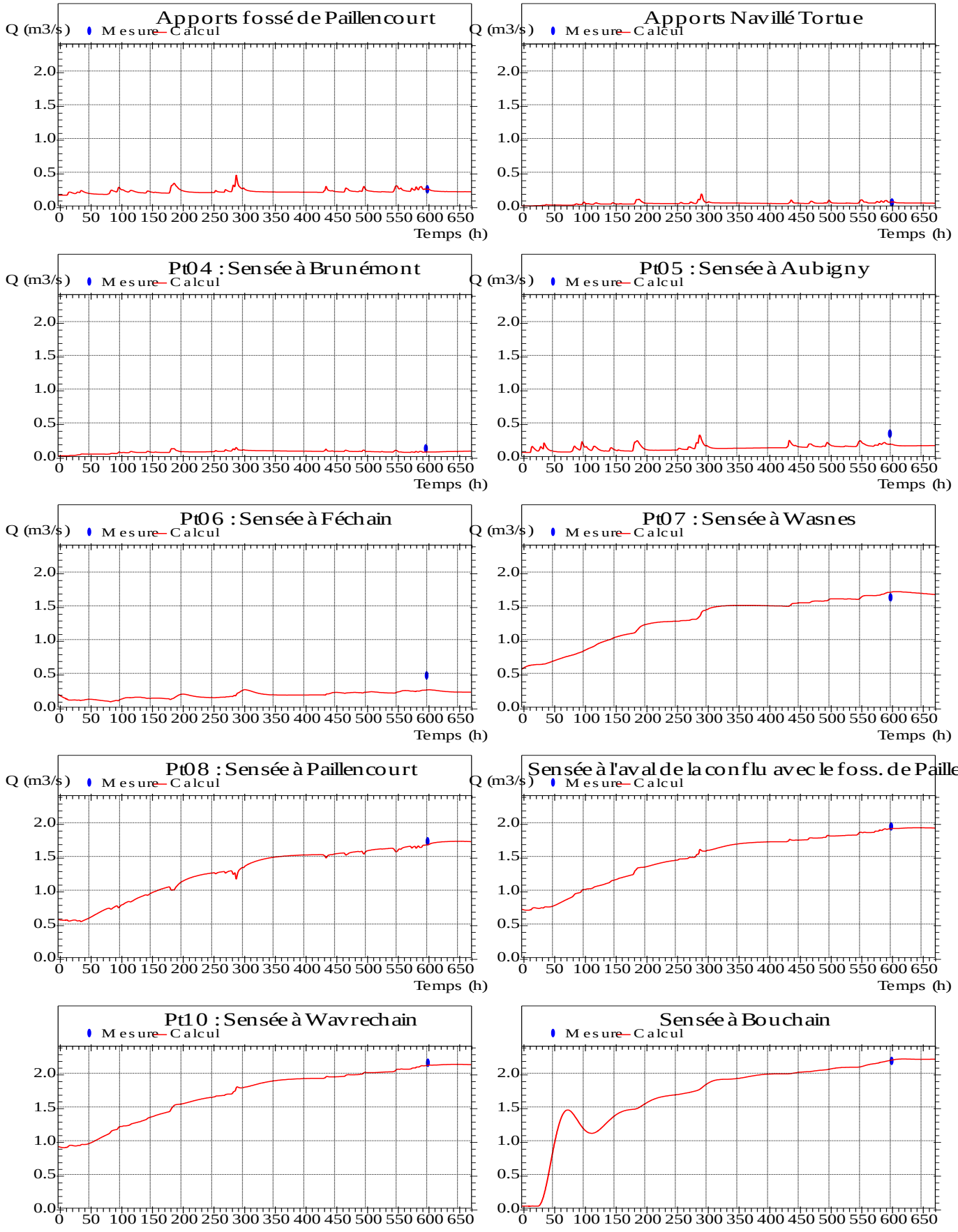






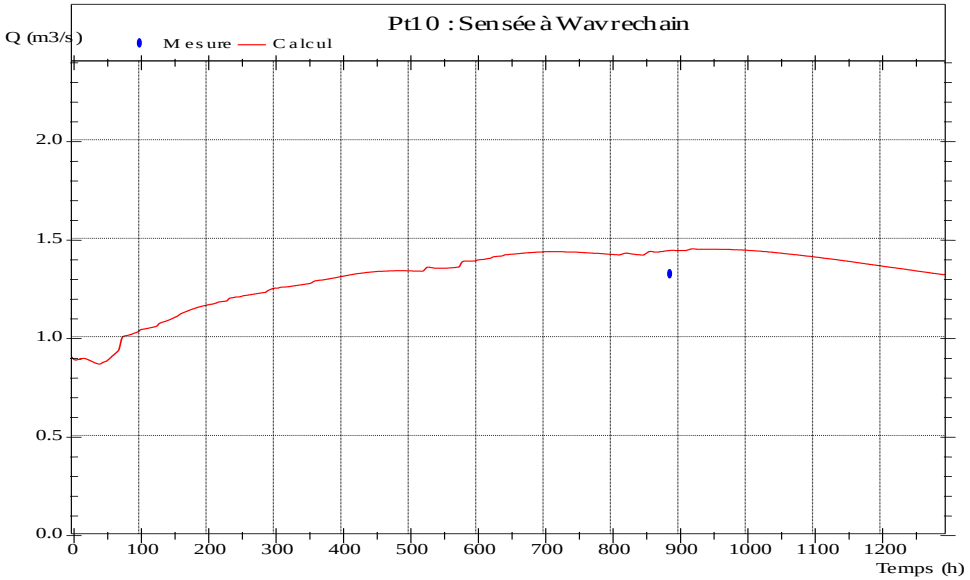


Calage SAV : Hydrogrammes m01



HydraRiv, scenario m01 - début simulation = 17/03/2001 06:00:00

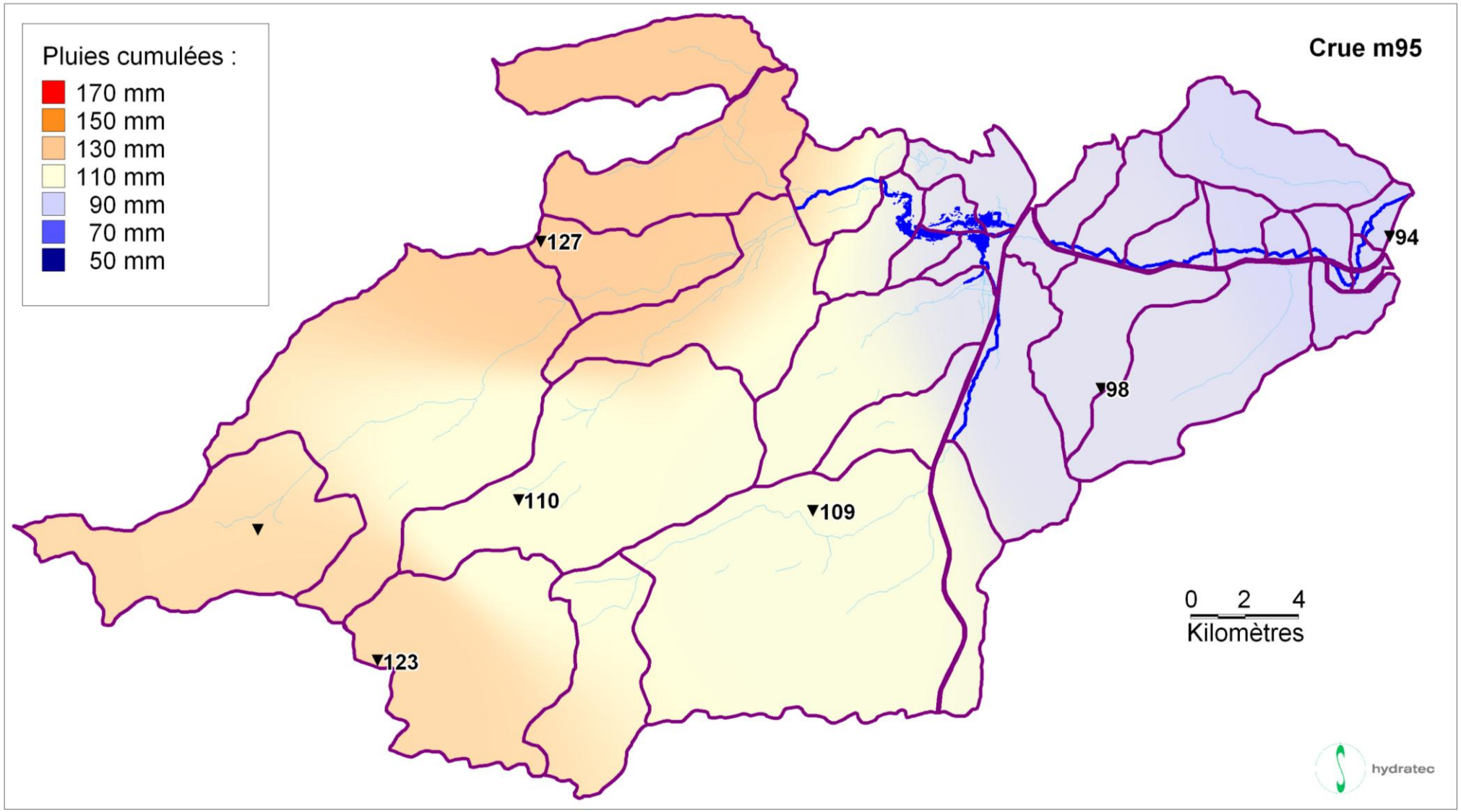
Calage SAV : Hydrogrammes m95

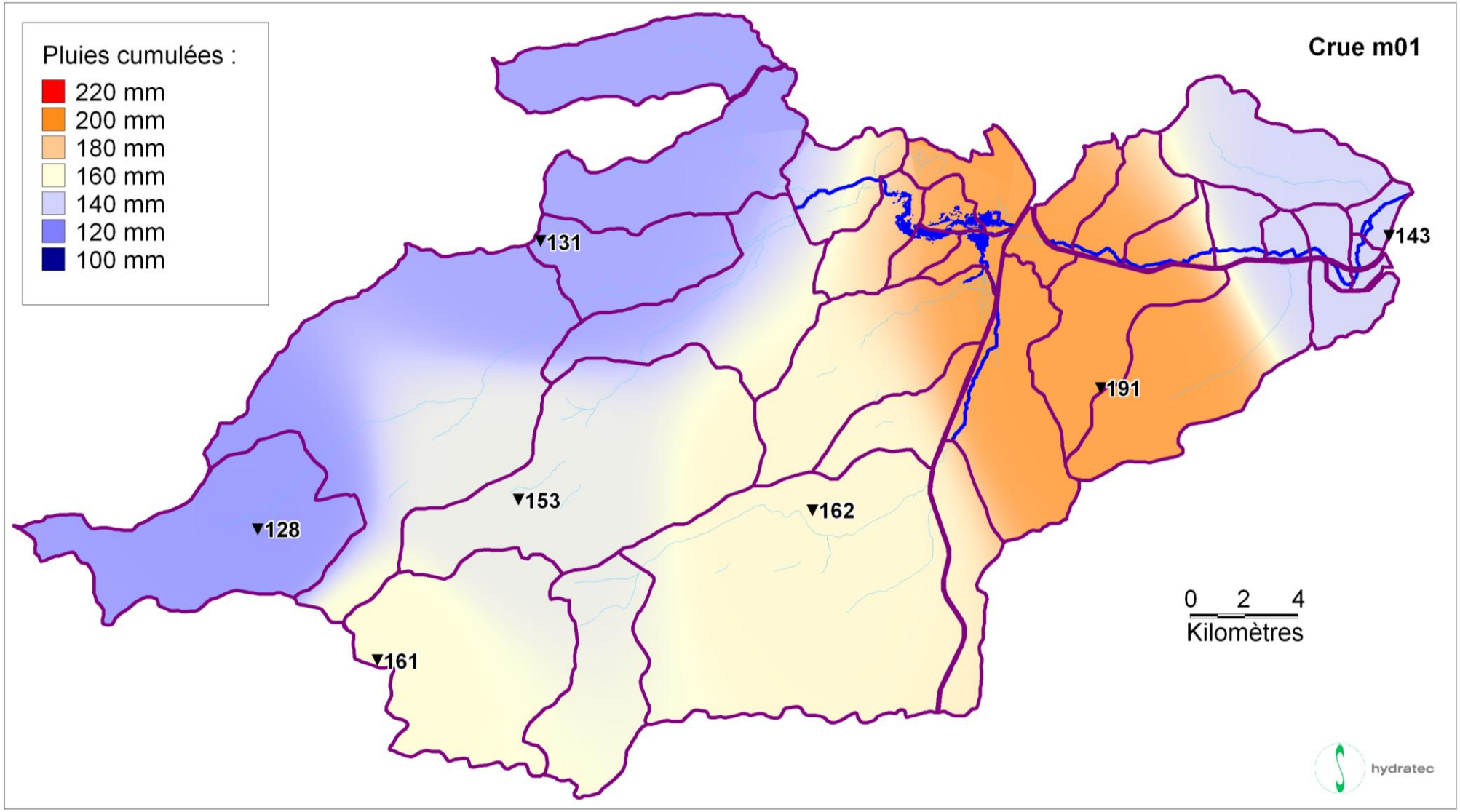


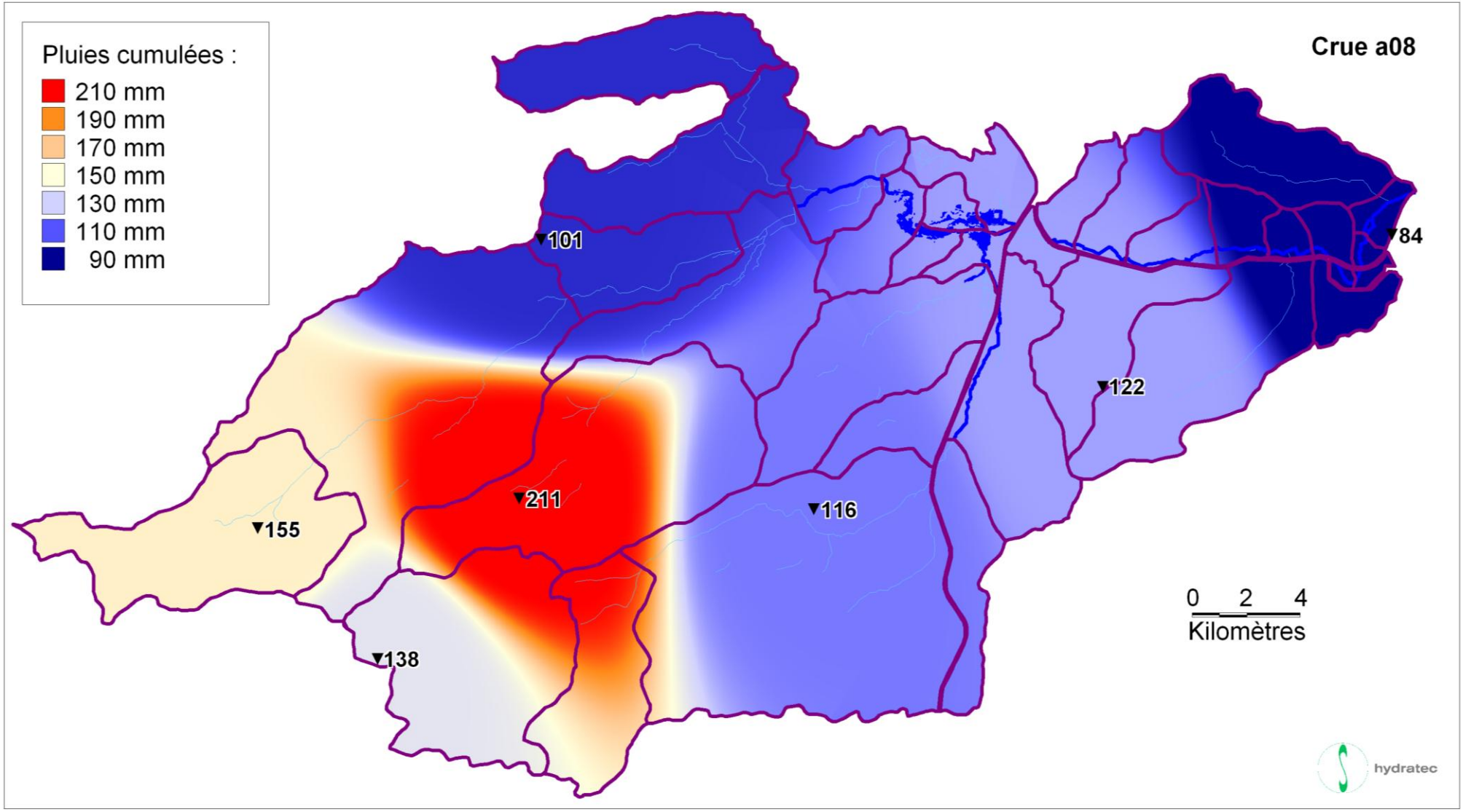
Annexe 4

Répartition spatiale des cumuls de pluviométrie

Crues de août 2008, mars 1995, mars 2001

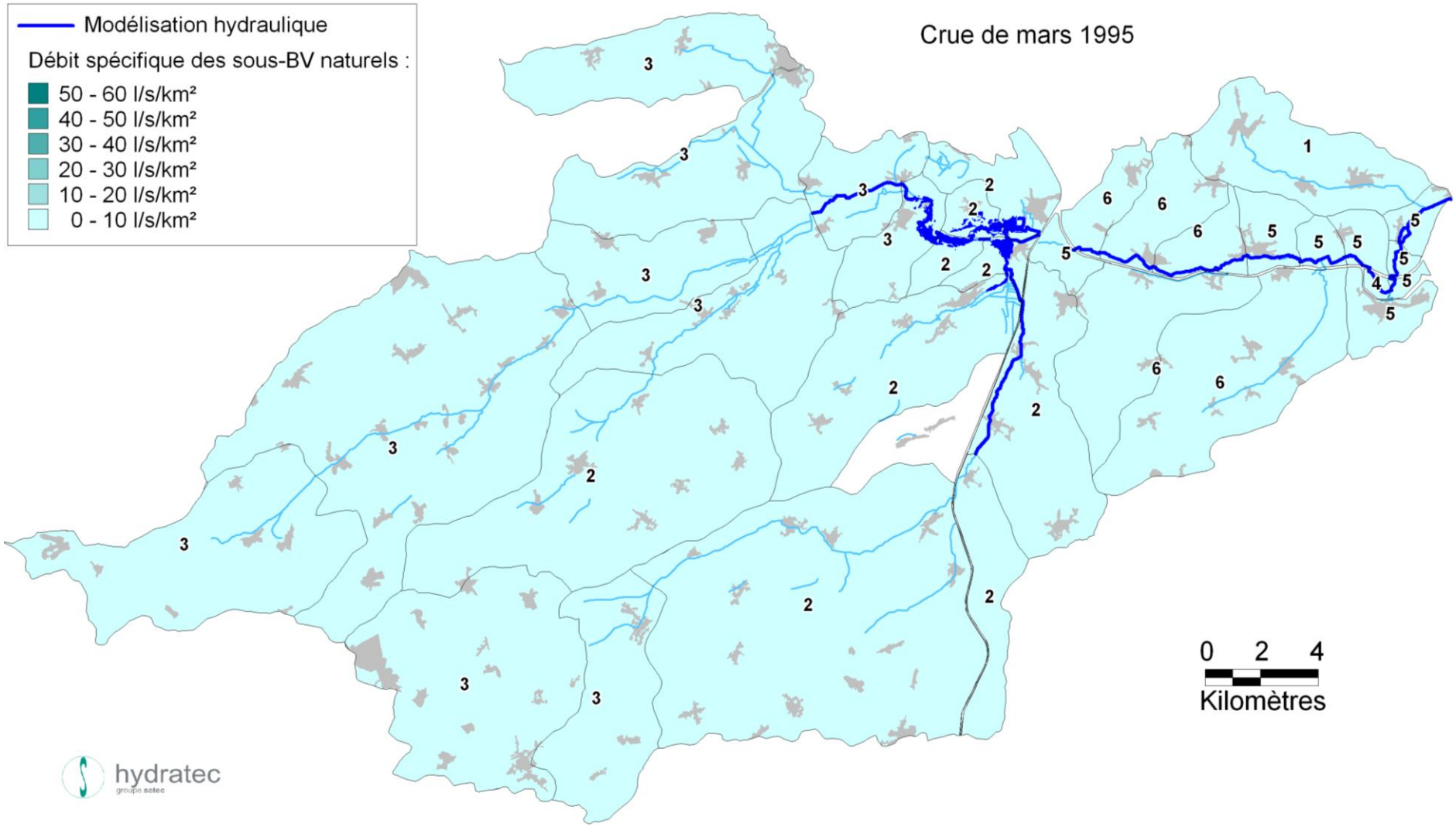

Pluies cumulées :
170 mm
150 mm
130 mm
110 mm
90 mm
70 mm
50 mm
Crue m95
127
94
98
110
109
123
0 2 4
Kilomètres
hydratec

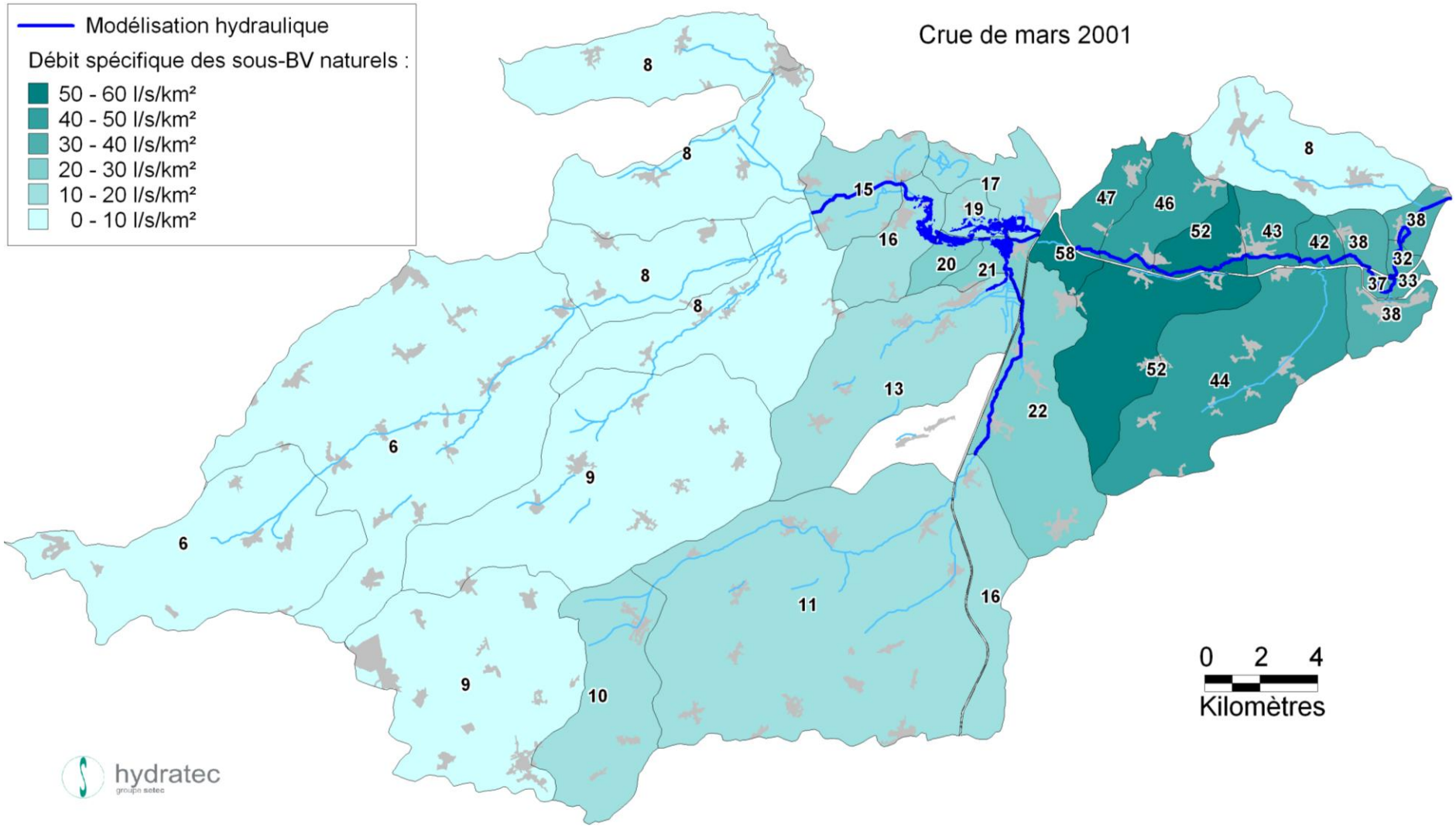

Pluies cumulées :
220 mm
200 mm
180 mm
160 mm
140 mm
120 mm
100 mm
Crue m01
▼131
▼143
▼191
▼153
▼162
▼128
▼161
0 2 4
Kilomètres
hydratec

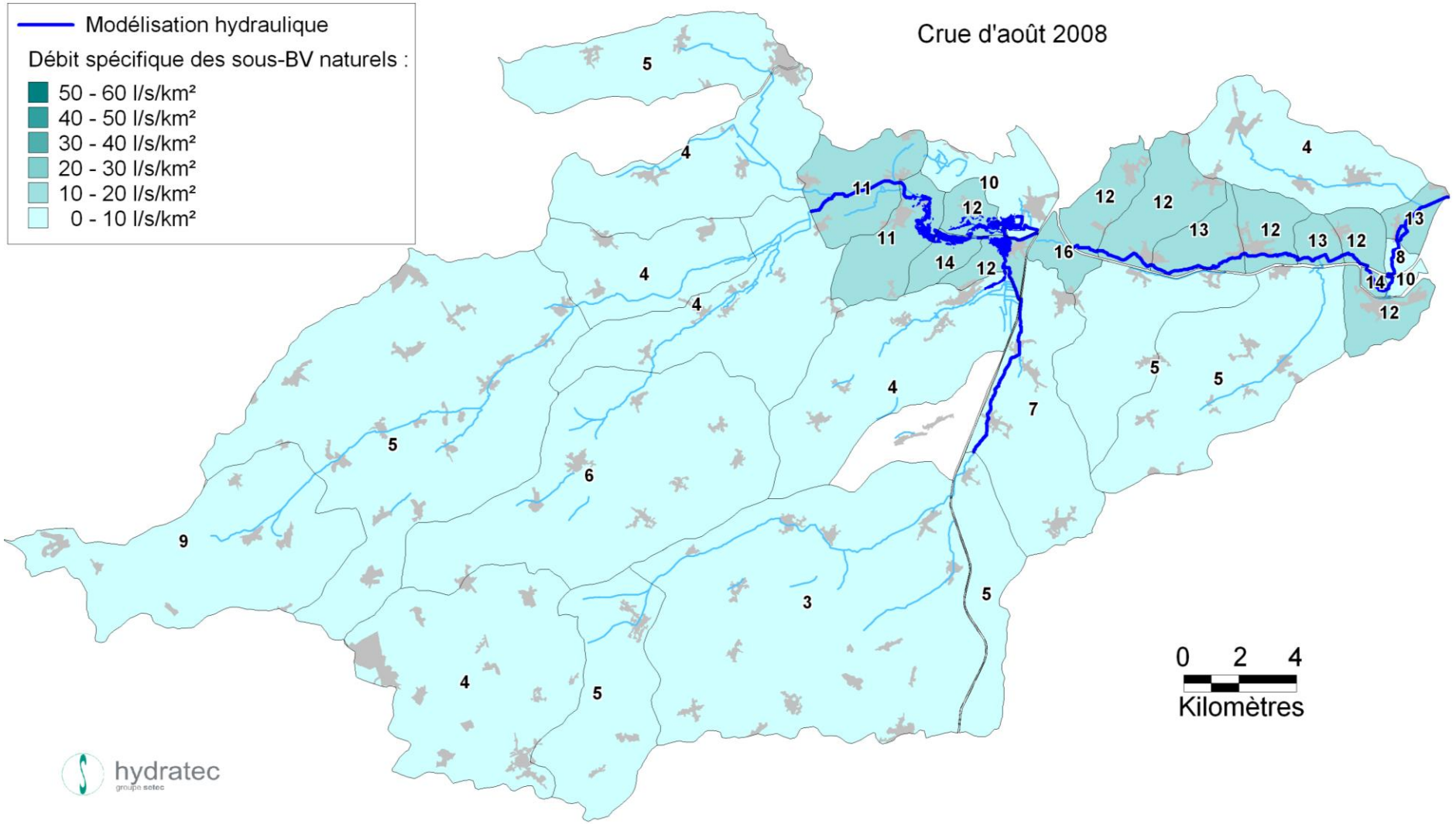

Pluies cumulées :
210 mm
190 mm
170 mm
150 mm
130 mm
110 mm
90 mm
Crue a08
101
84
122
211
116
155
138
0 2 4
Kilomètres
hydratec

Annexe 5

Productivité des sous bassins versants d'apport naturels

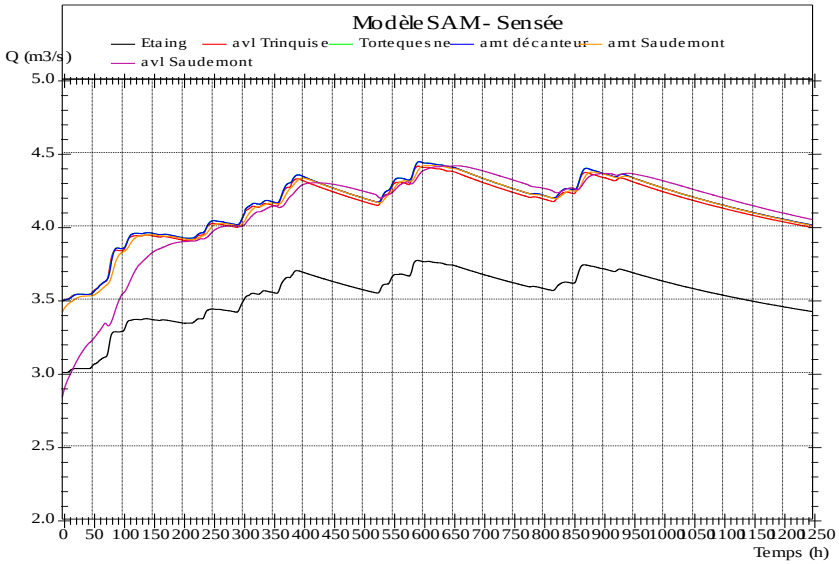

Modélisation hydraulique
Débit spécifique des sous-BV naturels :
50 - 60 l/s/km²
40 - 50 l/s/km²
30 - 40 l/s/km²
20 - 30 l/s/km²
10 - 20 l/s/km²
0 - 10 l/s/km²
Crue de mars 1995
0 2 4
Kilomètres
hydratec
groupe setec

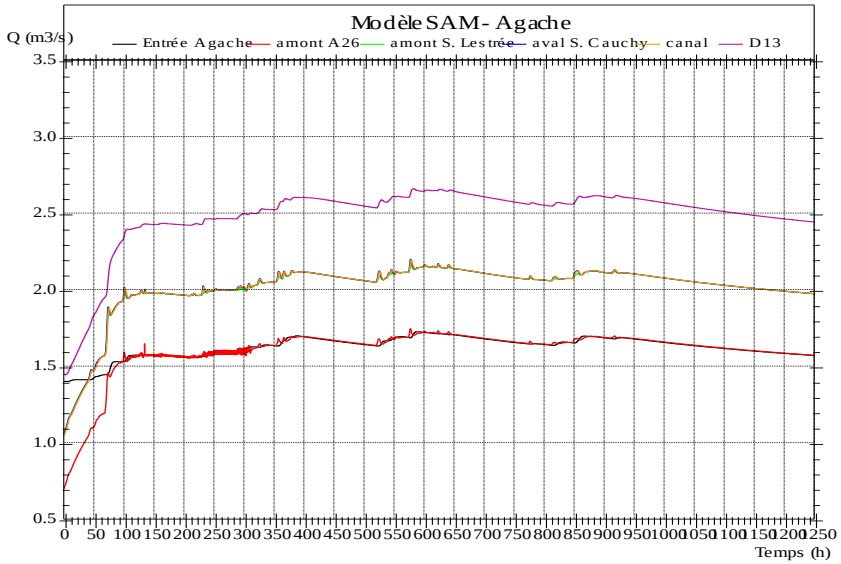

Modélisation hydraulique
Débit spécifique des sous-BV naturels :
50 - 60 l/s/km²
40 - 50 l/s/km²
30 - 40 l/s/km²
20 - 30 l/s/km²
10 - 20 l/s/km²
0 - 10 l/s/km²
Crue de mars 2001
0 2 4
Kilomètres
hydratec
groupe setec

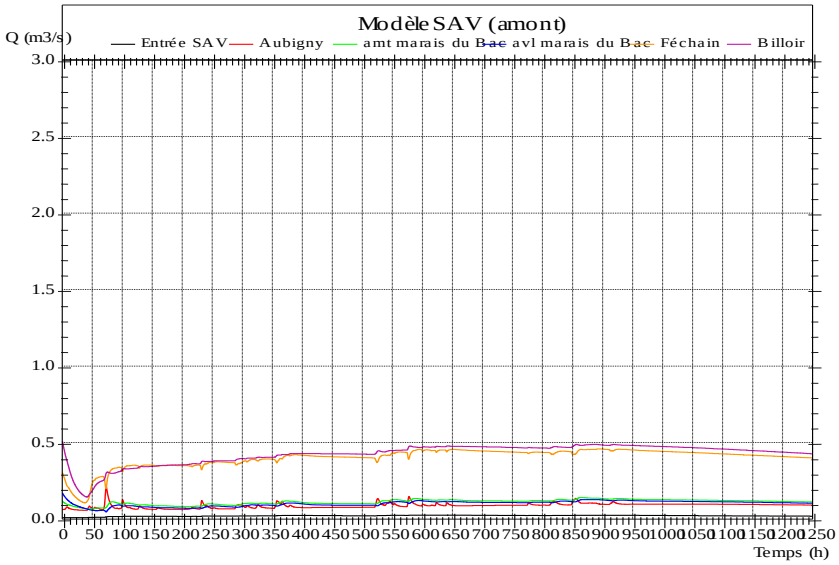

Modélisation hydraulique
Débit spécifique des sous-BV naturels :
50 - 60 l/s/km²
40 - 50 l/s/km²
30 - 40 l/s/km²
20 - 30 l/s/km²
10 - 20 l/s/km²
0 - 10 l/s/km²
Crue d'août 2008
0 2 4
Kilomètres
hydratec
groupe setec

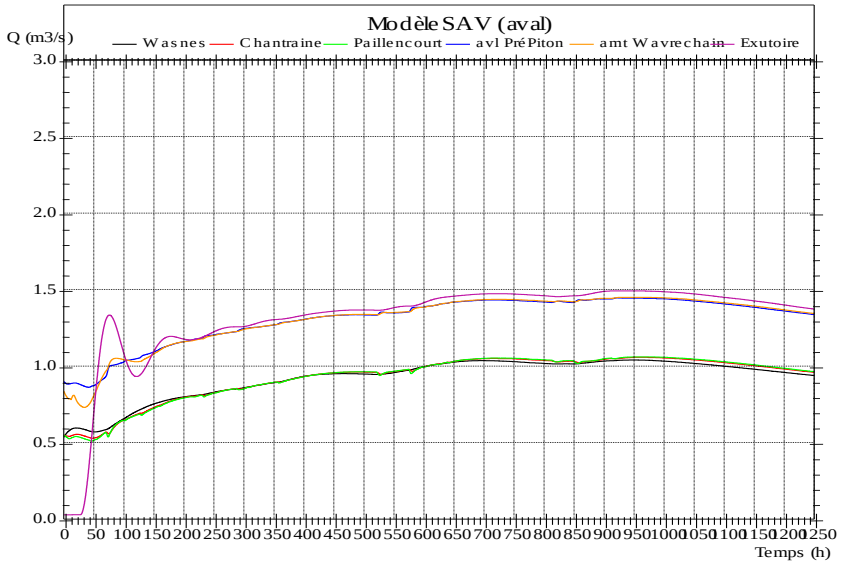
Annexe 6

Propagation des crues

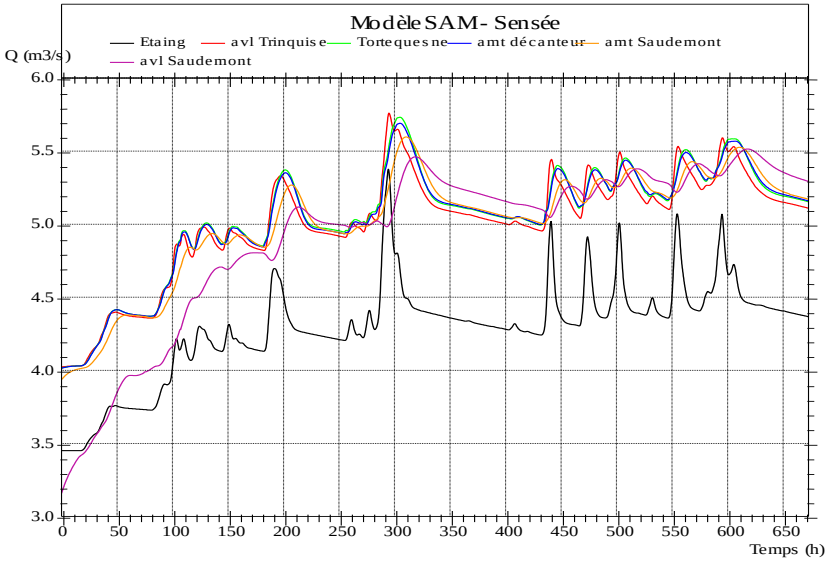


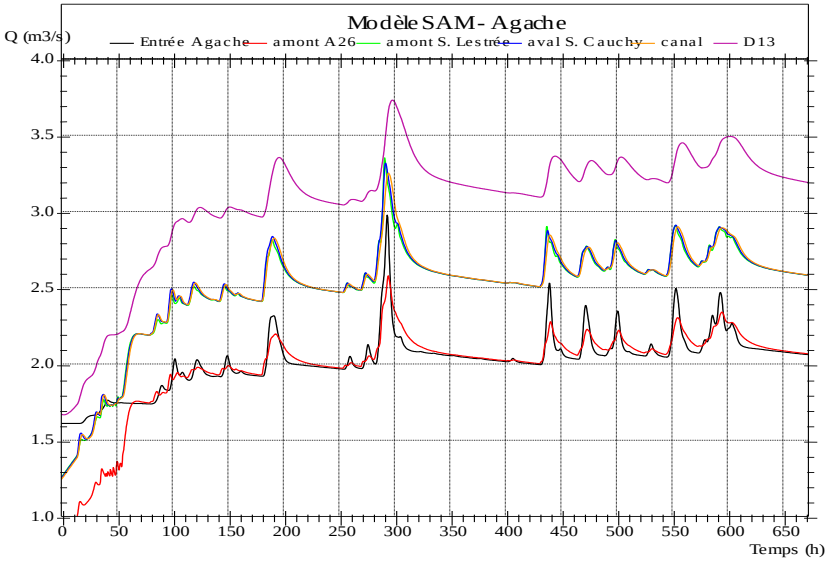


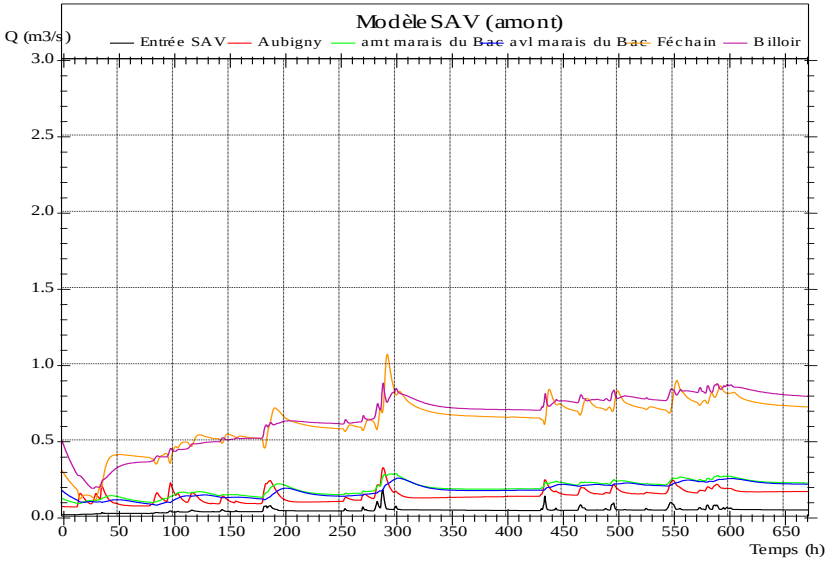


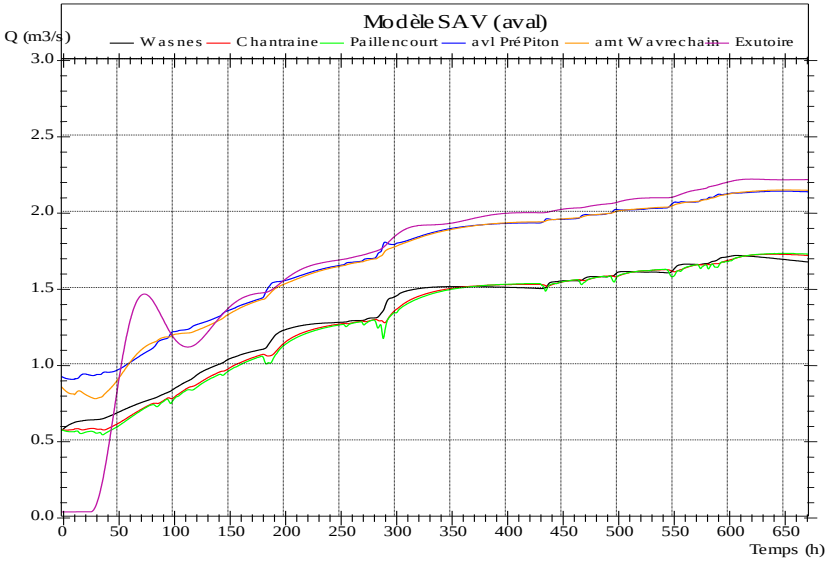


HydraRiv, scenario m95 - début simulation = 21/02/1995 06:00

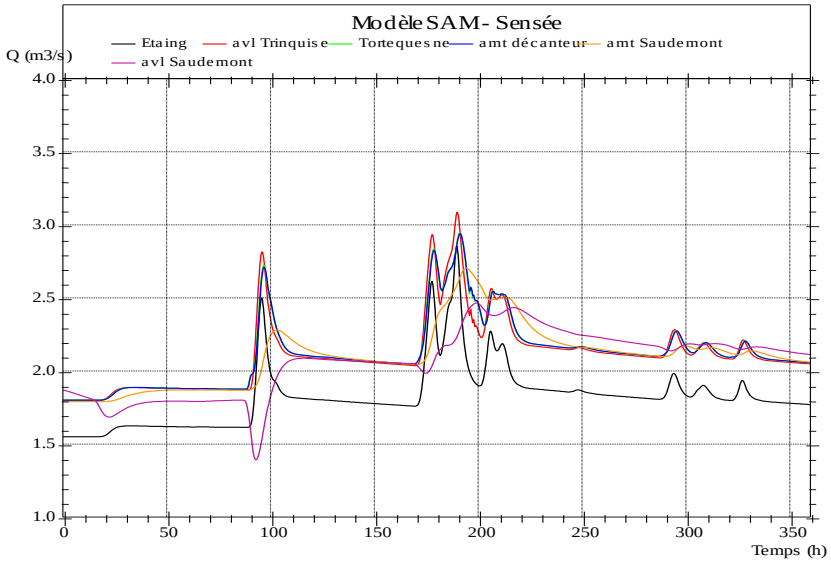


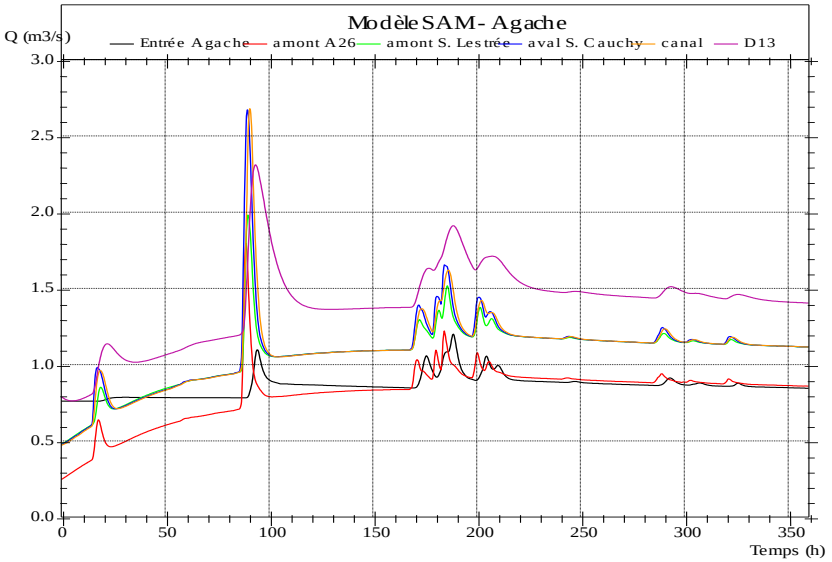


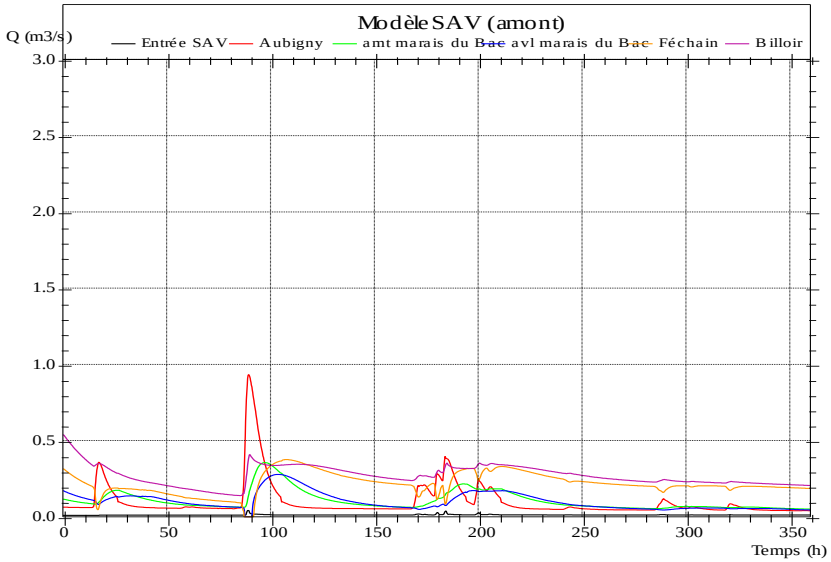


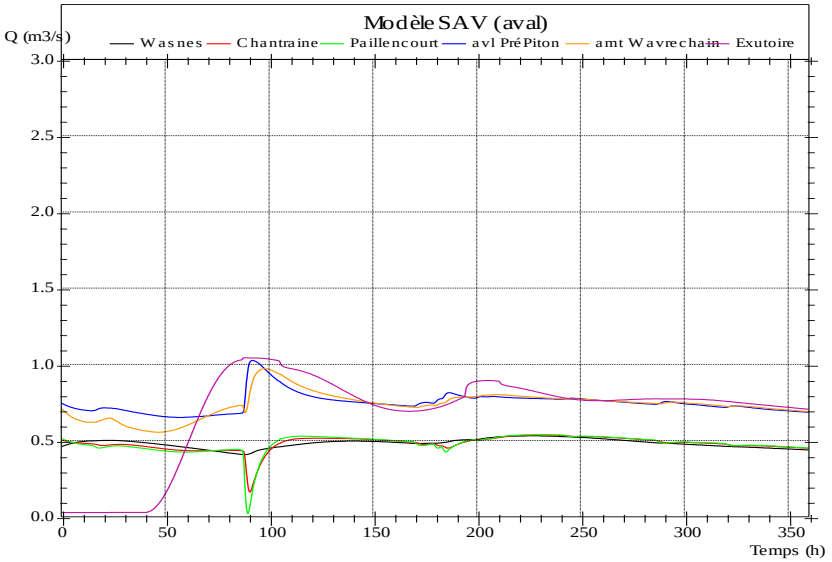


HydraRiv, scenario m01 - début simulation = 17/03/2001 06:00





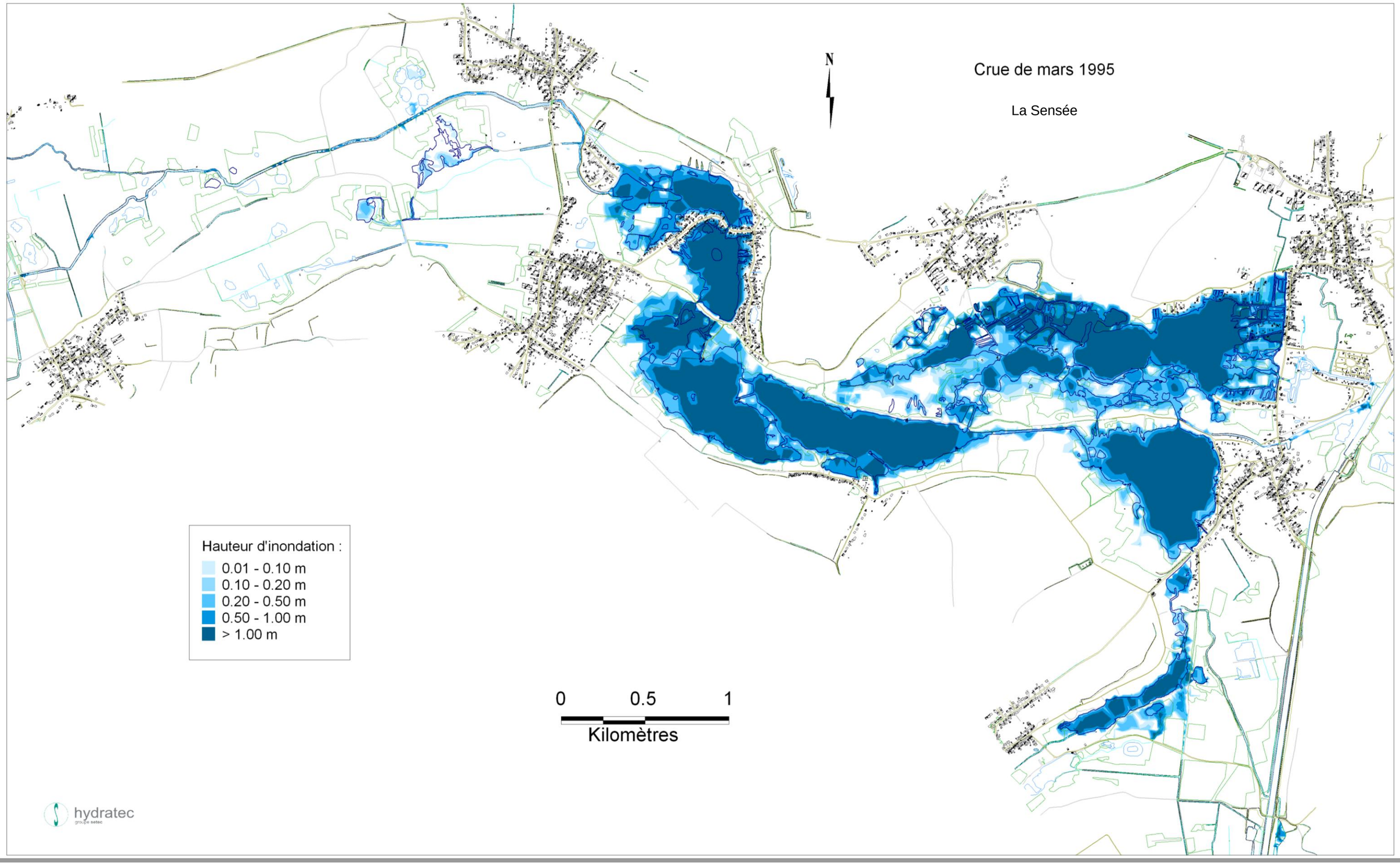


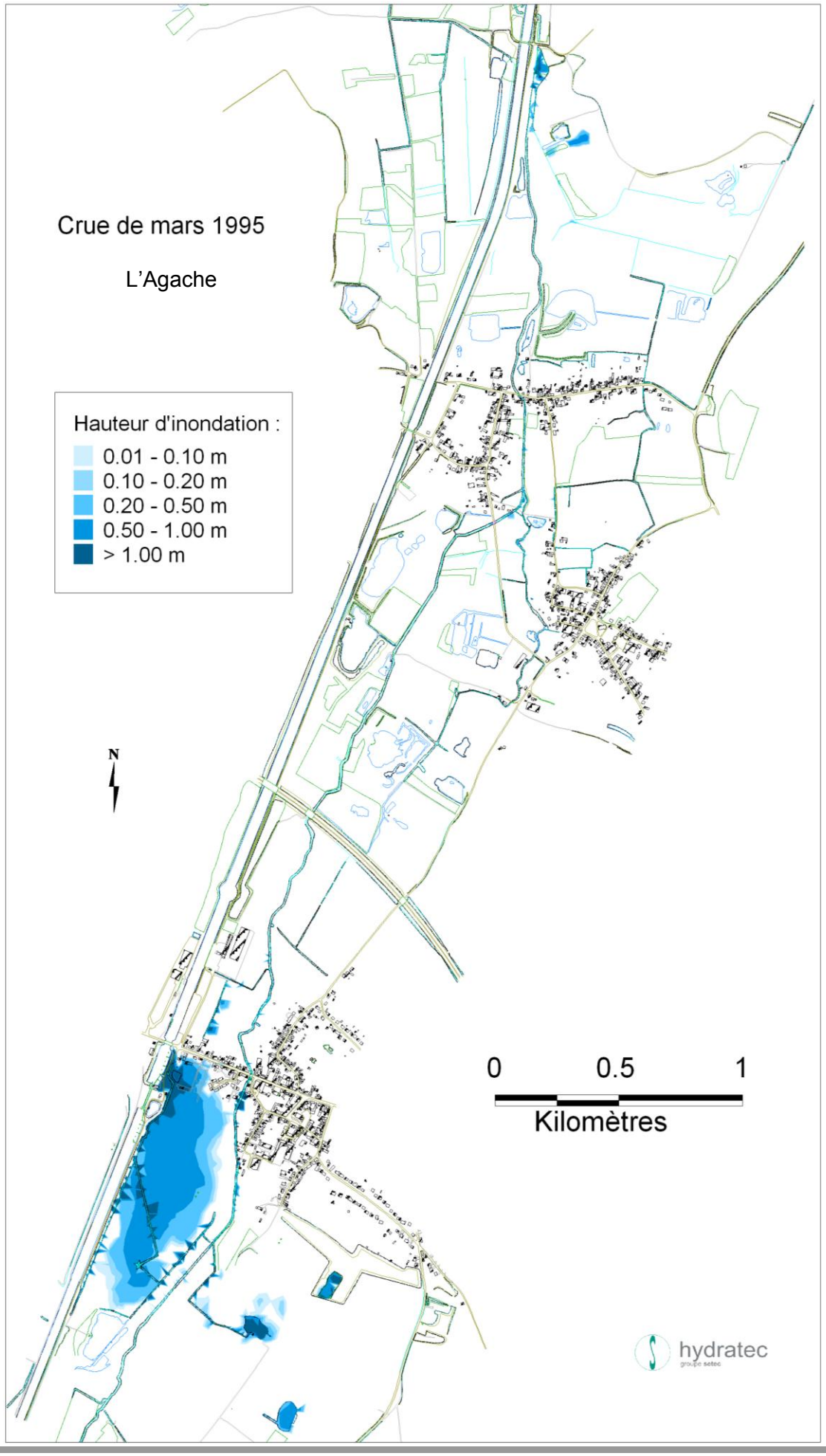


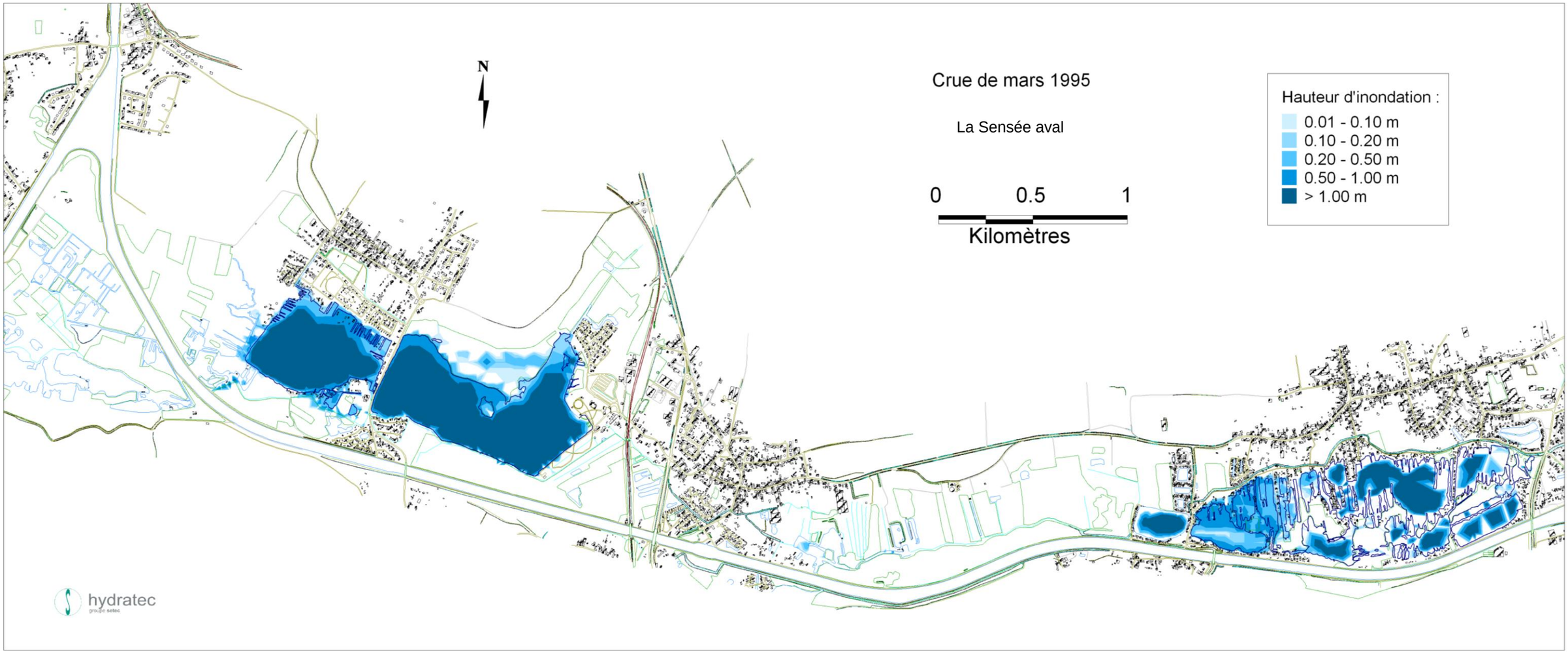
HydraRiv, scenario a08 - début simulation = 31/07/2008 06:00

Annexe 7

Zones inondées lors des trois crues simulées


N
Crue de mars 1995
La Sensée
Hauteur d'inondation :
0.01 - 0.10 m
0.10 - 0.20 m
0.20 - 0.50 m
0.50 - 1.00 m
> 1.00 m
0
0.5
1
Kilomètres


Crue de mars 1995
L'Agache
Hauteur d'inondation :
0.01 - 0.10 m
0.10 - 0.20 m
0.20 - 0.50 m
0.50 - 1.00 m
> 1.00 m
N
0
0.5
1
Kilomètres
hydratec

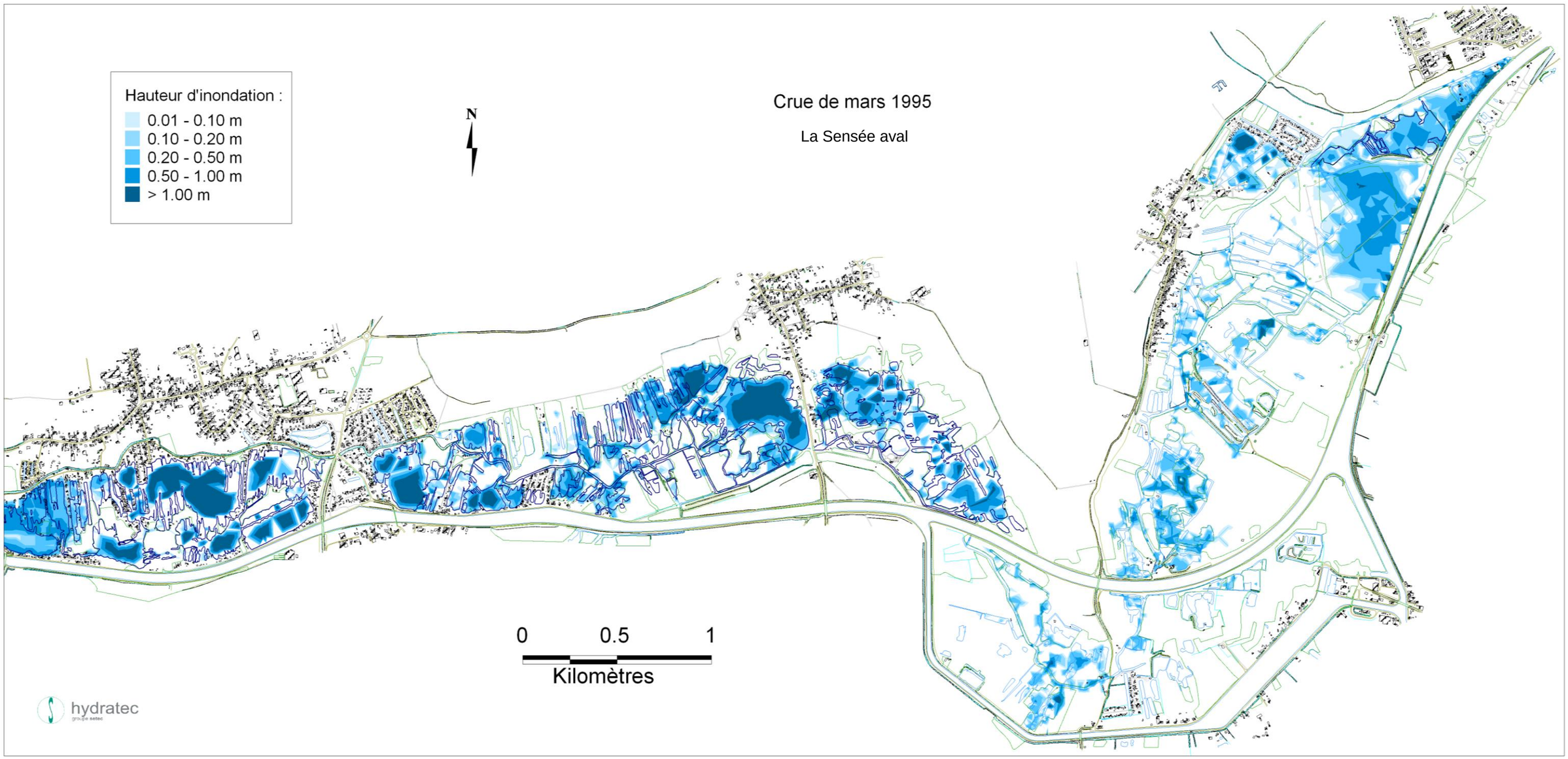

N
Crue de mars 1995
La Sensée aval
0
0.5
1
Kilomètres
Hauteur d'inondation :
0.01 - 0.10 m
0.10 - 0.20 m
0.20 - 0.50 m
0.50 - 1.00 m
> 1.00 m
hydratec
groupe setec

Hauteur d'inondation :
- 0.01 - 0.10 m
- 0.10 - 0.20 m
- 0.20 - 0.50 m
- 0.50 - 1.00 m
- > 1.00 m

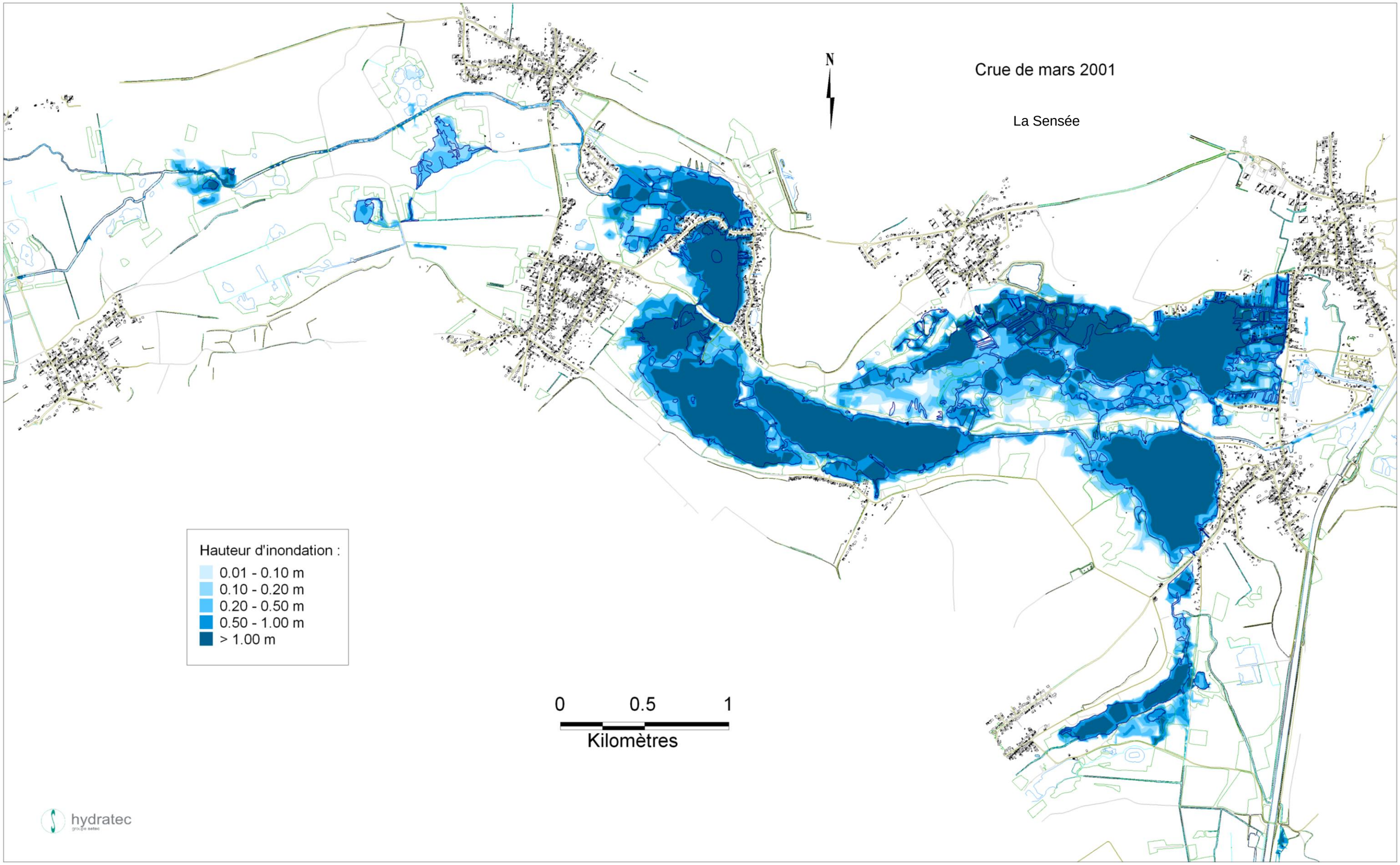
N

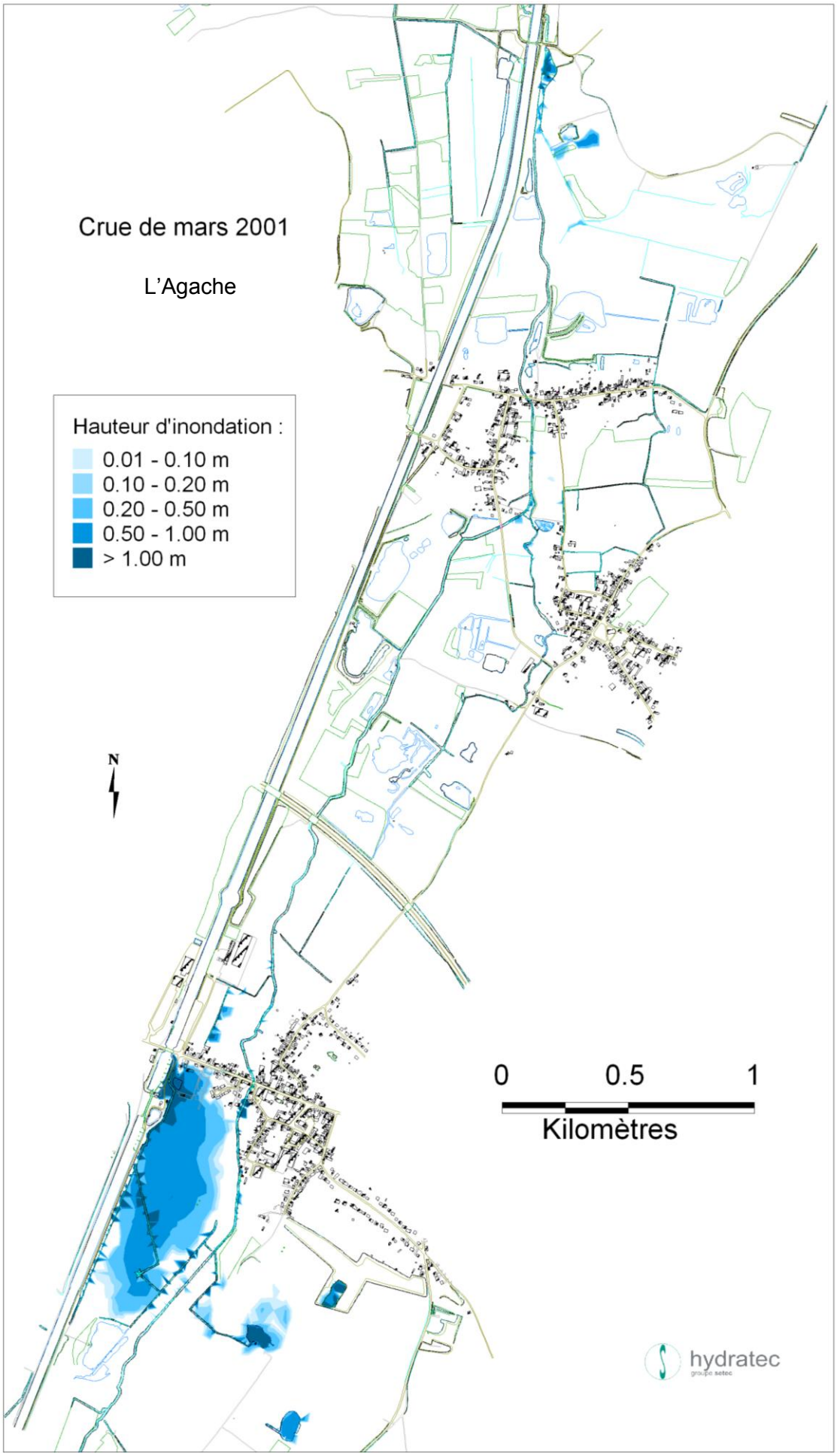
Crue de mars 1995

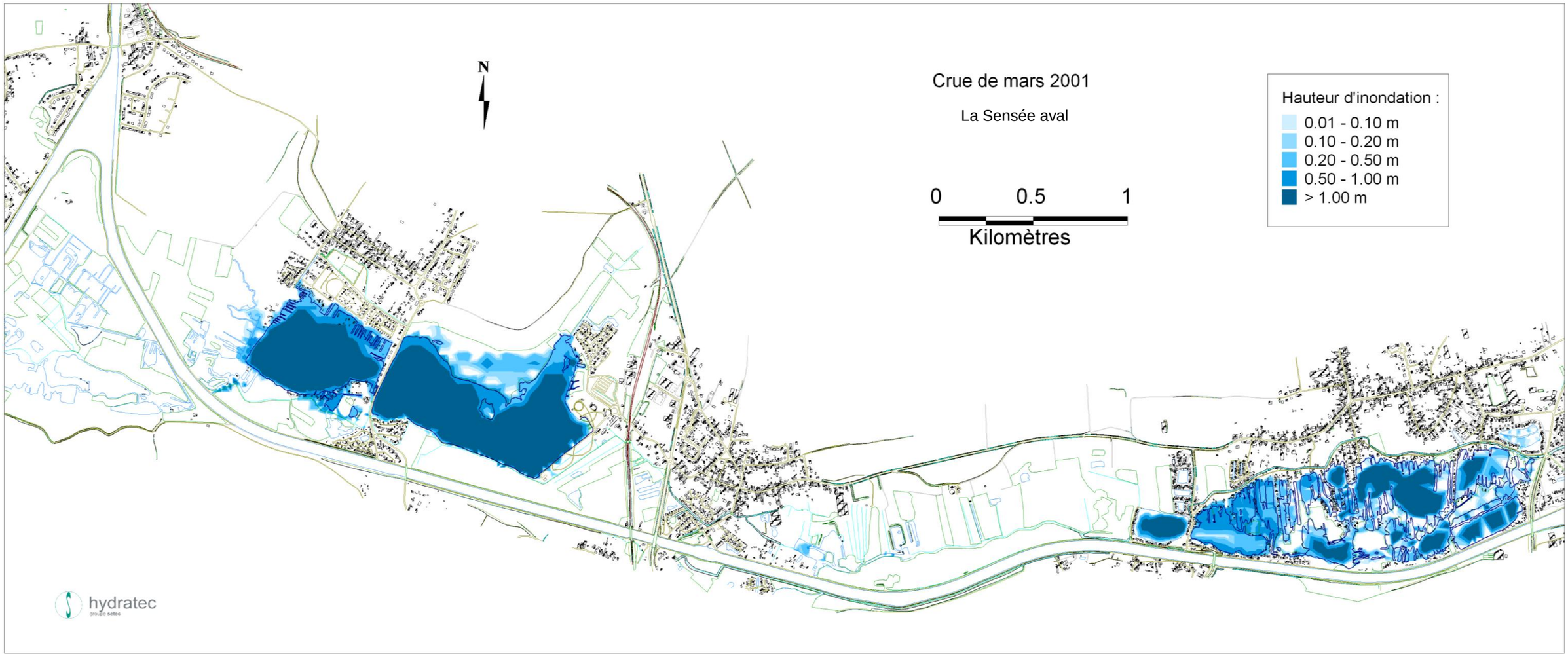
La Sensée aval



hydratec
groupe setec


N
Crue de mars 2001
La Sensée
Hauteur d'inondation :
0.01 - 0.10 m
0.10 - 0.20 m
0.20 - 0.50 m
0.50 - 1.00 m
> 1.00 m
0
0.5
1
Kilomètres


Crue de mars 2001
L'Agache
Hauteur d'inondation :
0.01 - 0.10 m
0.10 - 0.20 m
0.20 - 0.50 m
0.50 - 1.00 m
> 1.00 m
N
0
0.5
1
Kilomètres
hydratec

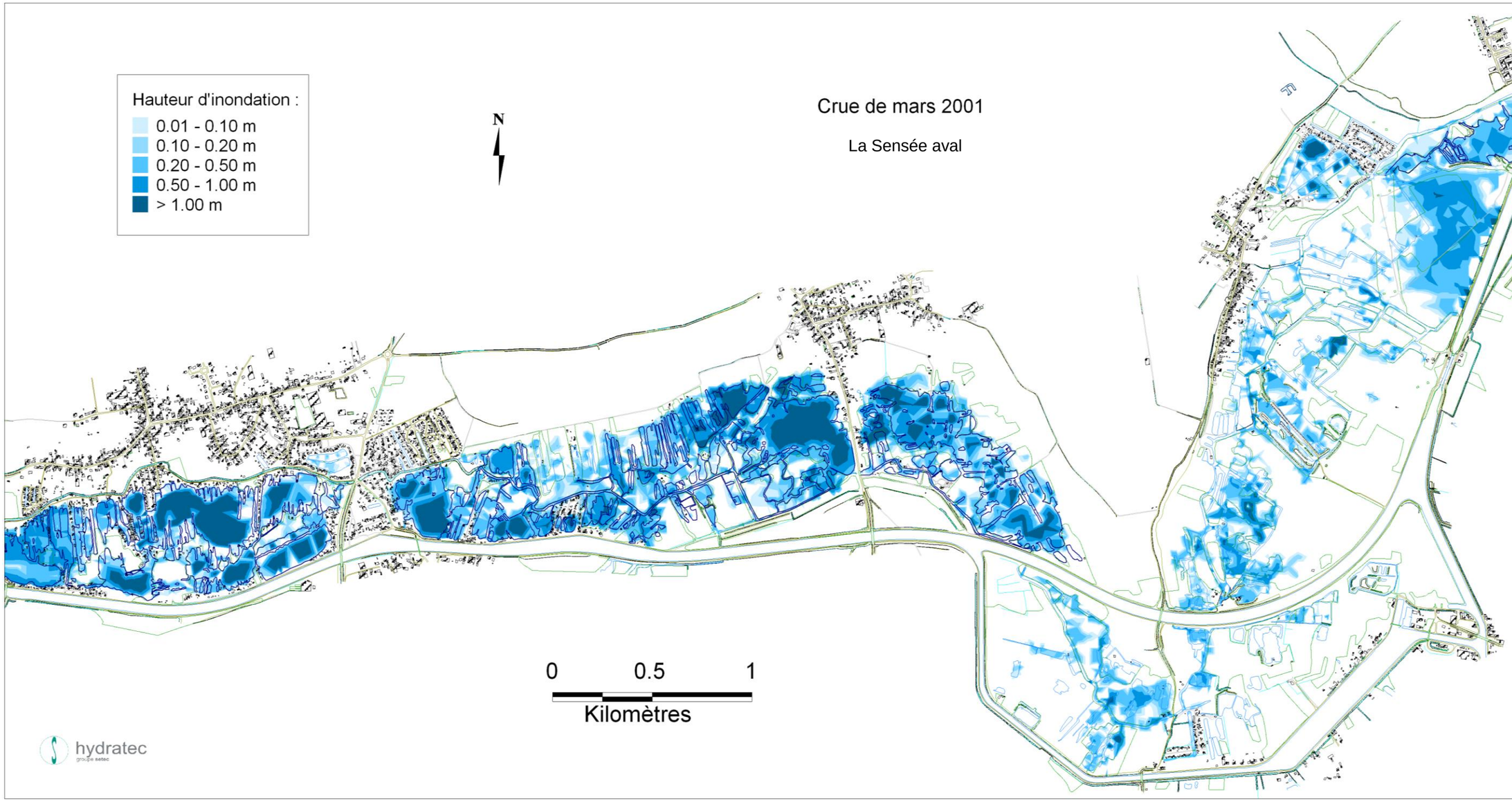

N
Crue de mars 2001
La Sensée aval
0
0.5
1
Kilomètres
Hauteur d'inondation :
0.01 - 0.10 m
0.10 - 0.20 m
0.20 - 0.50 m
0.50 - 1.00 m
> 1.00 m
hydratec
groupe setec

Hauteur d'inondation :
- 0.01 - 0.10 m
- 0.10 - 0.20 m
- 0.20 - 0.50 m
- 0.50 - 1.00 m
- > 1.00 m

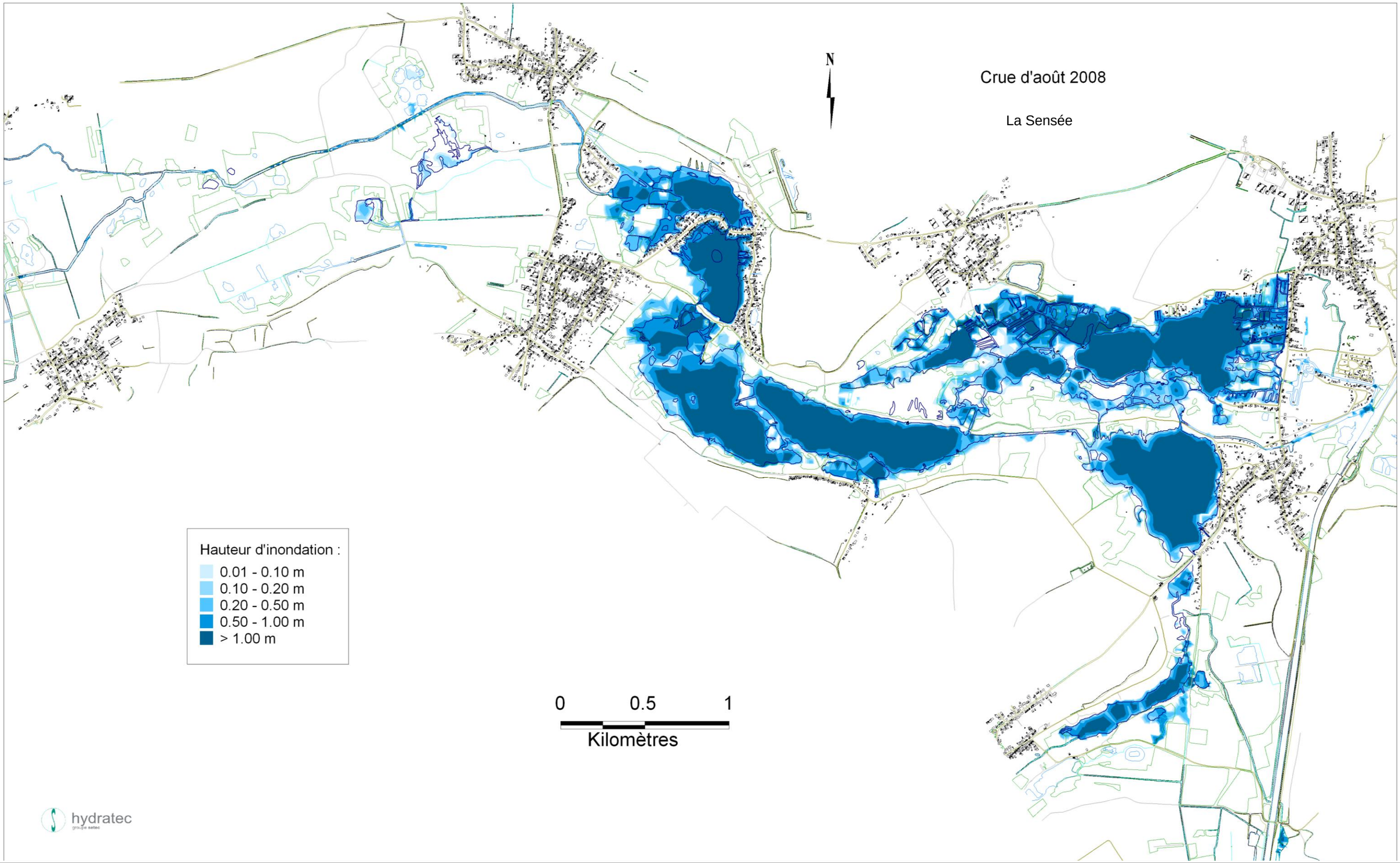
N

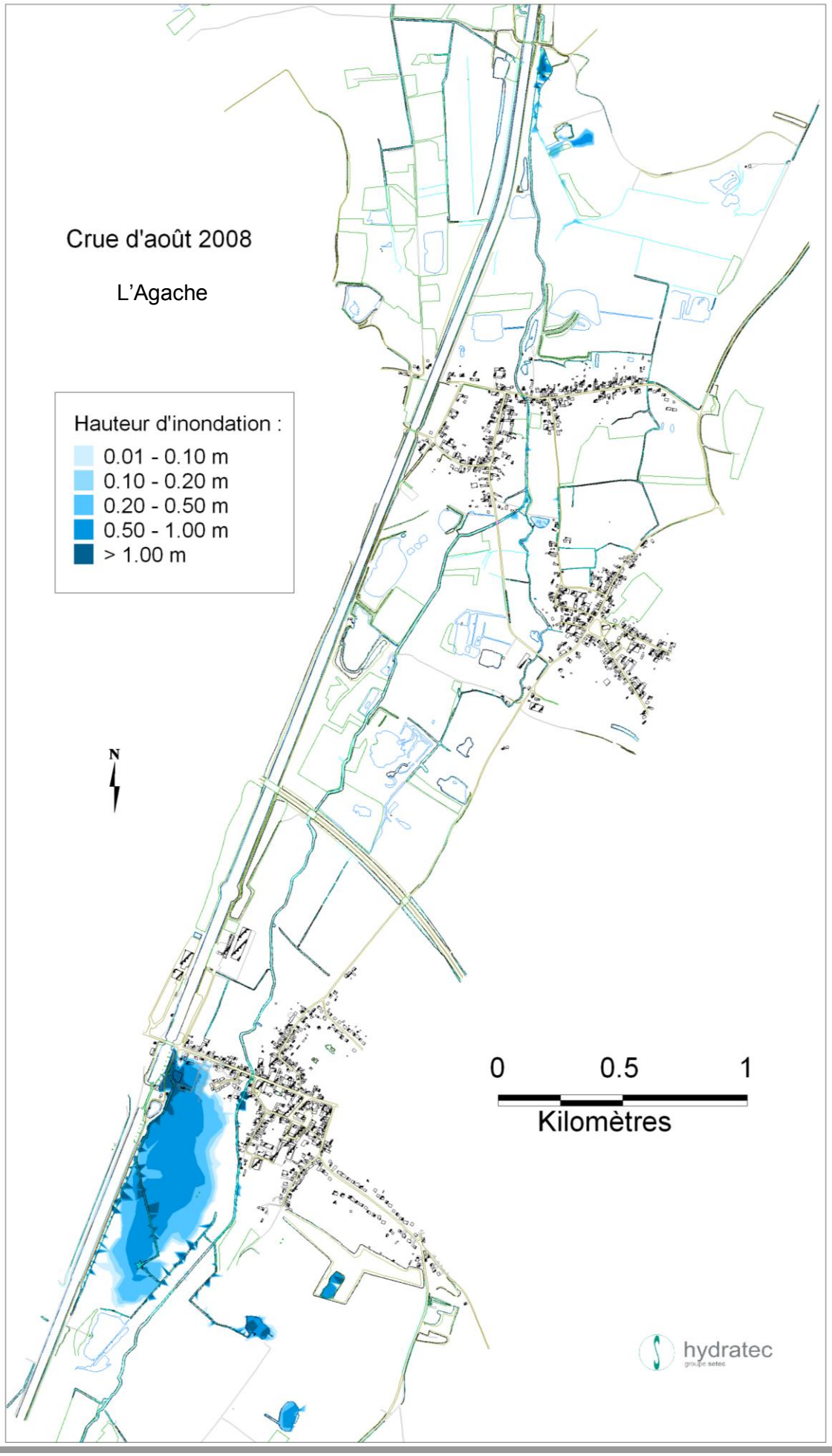
Crue de mars 2001

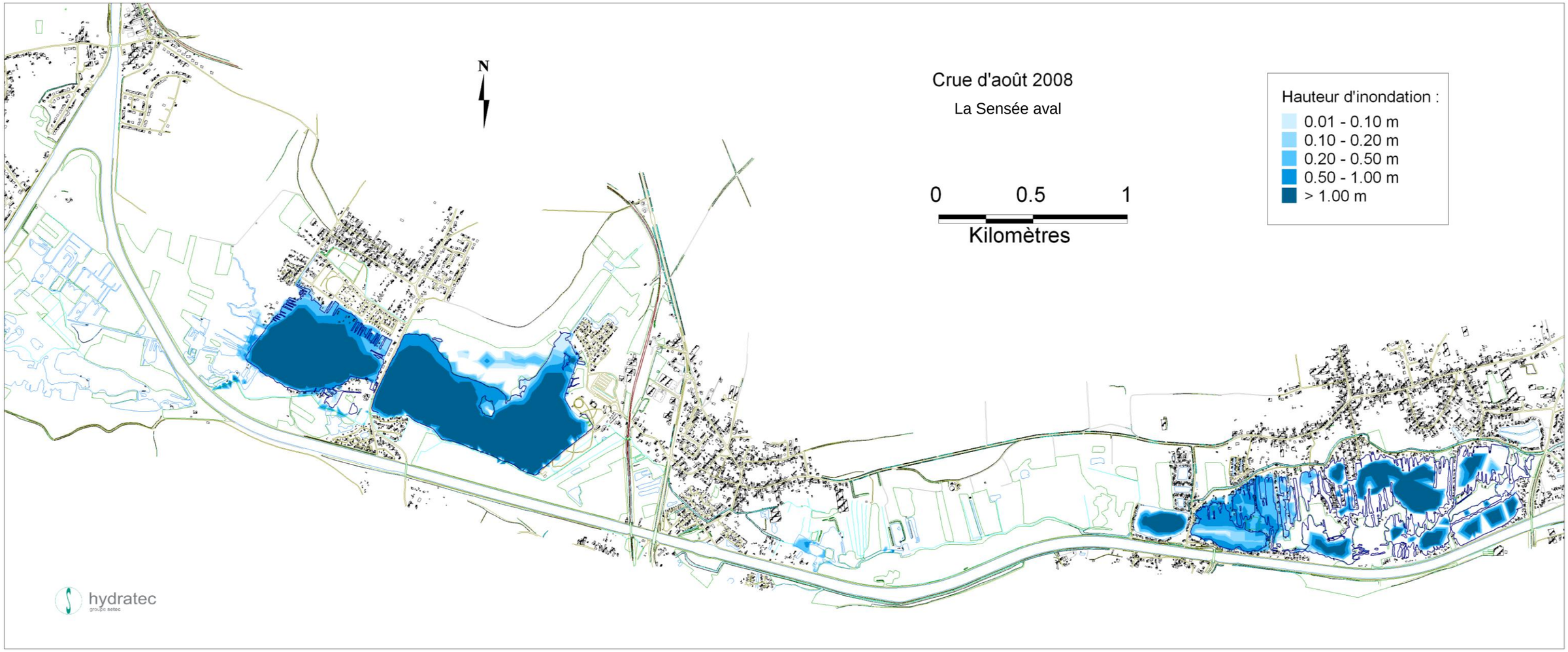
La Sensée aval



hydratec
groupe setec


N
Crue d'août 2008
La Sensée
Hauteur d'inondation :
0.01 - 0.10 m
0.10 - 0.20 m
0.20 - 0.50 m
0.50 - 1.00 m
> 1.00 m
0
0.5
1
Kilomètres


Crue d'août 2008
L'Agache
Hauteur d'inondation :
0.01 - 0.10 m
0.10 - 0.20 m
0.20 - 0.50 m
0.50 - 1.00 m
> 1.00 m
N
0
0.5
1
Kilomètres
hydratec
groupe setec

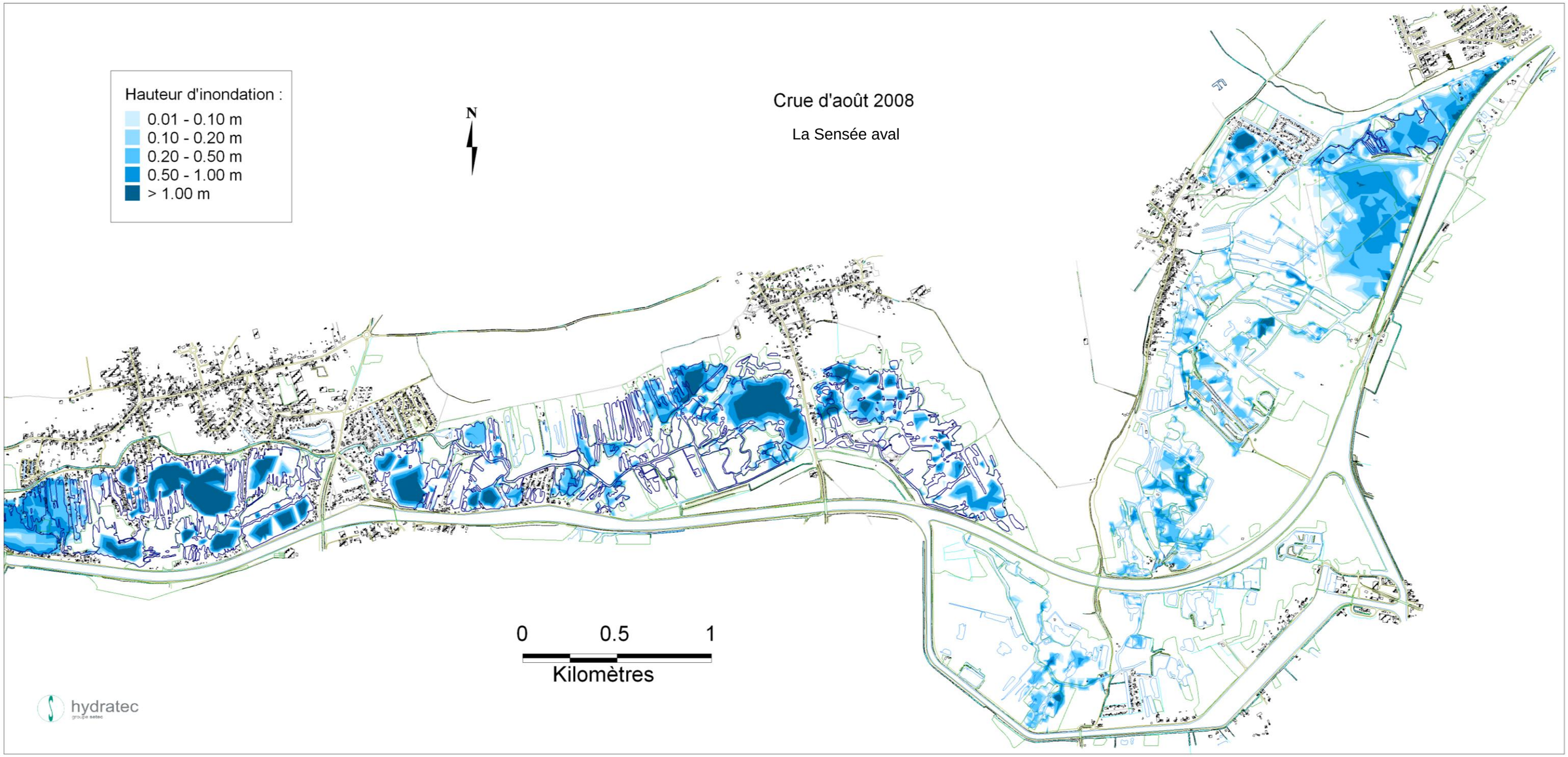

N
Crue d'août 2008
La Sensée aval
0
0.5
1
Kilomètres
Hauteur d'inondation :
0.01 - 0.10 m
0.10 - 0.20 m
0.20 - 0.50 m
0.50 - 1.00 m
> 1.00 m
hydratec
groupe setec

Hauteur d'inondation :
- 0.01 - 0.10 m
- 0.10 - 0.20 m
- 0.20 - 0.50 m
- 0.50 - 1.00 m
- > 1.00 m

N

Crue d'août 2008

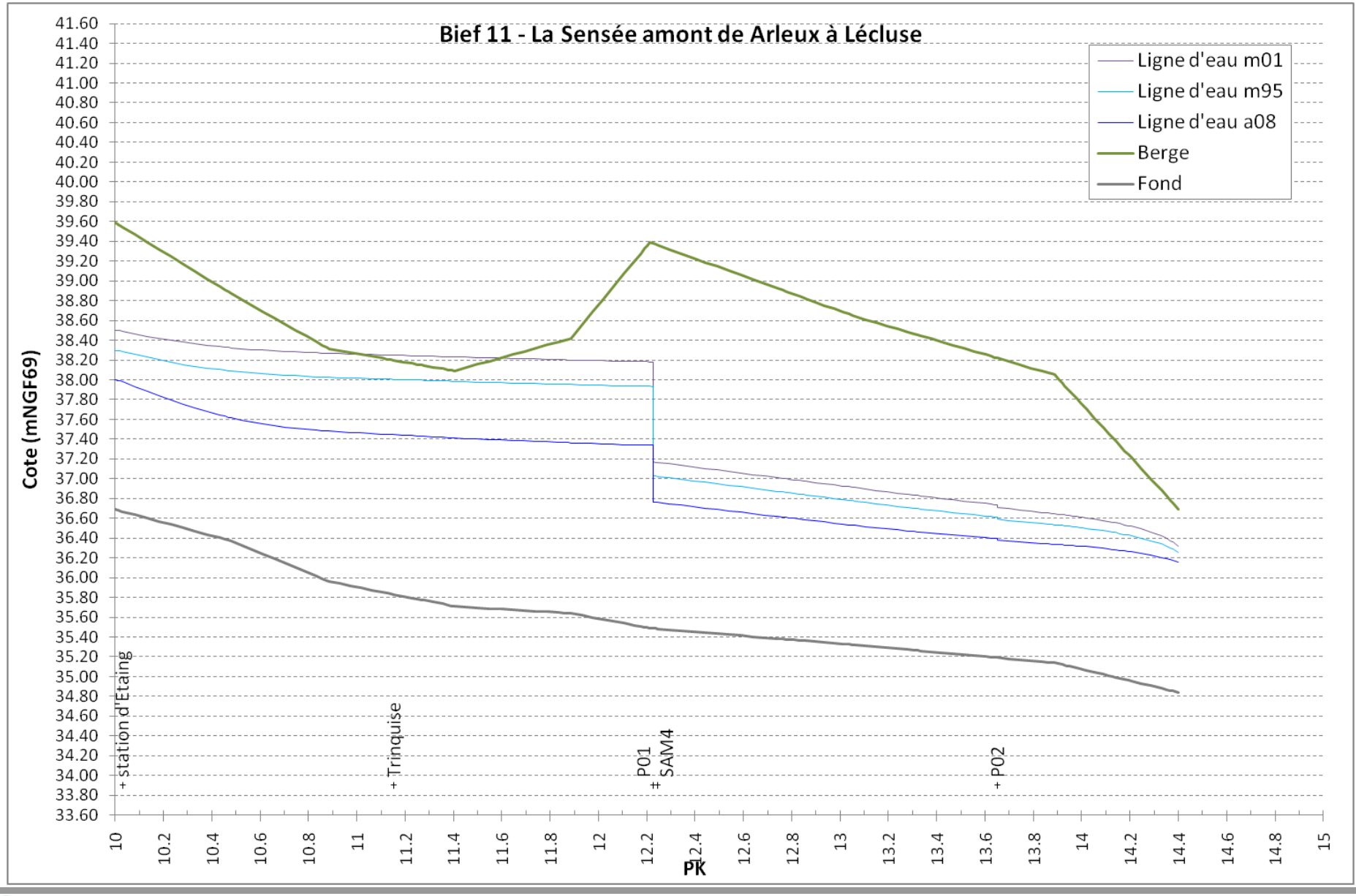
La Sensée aval

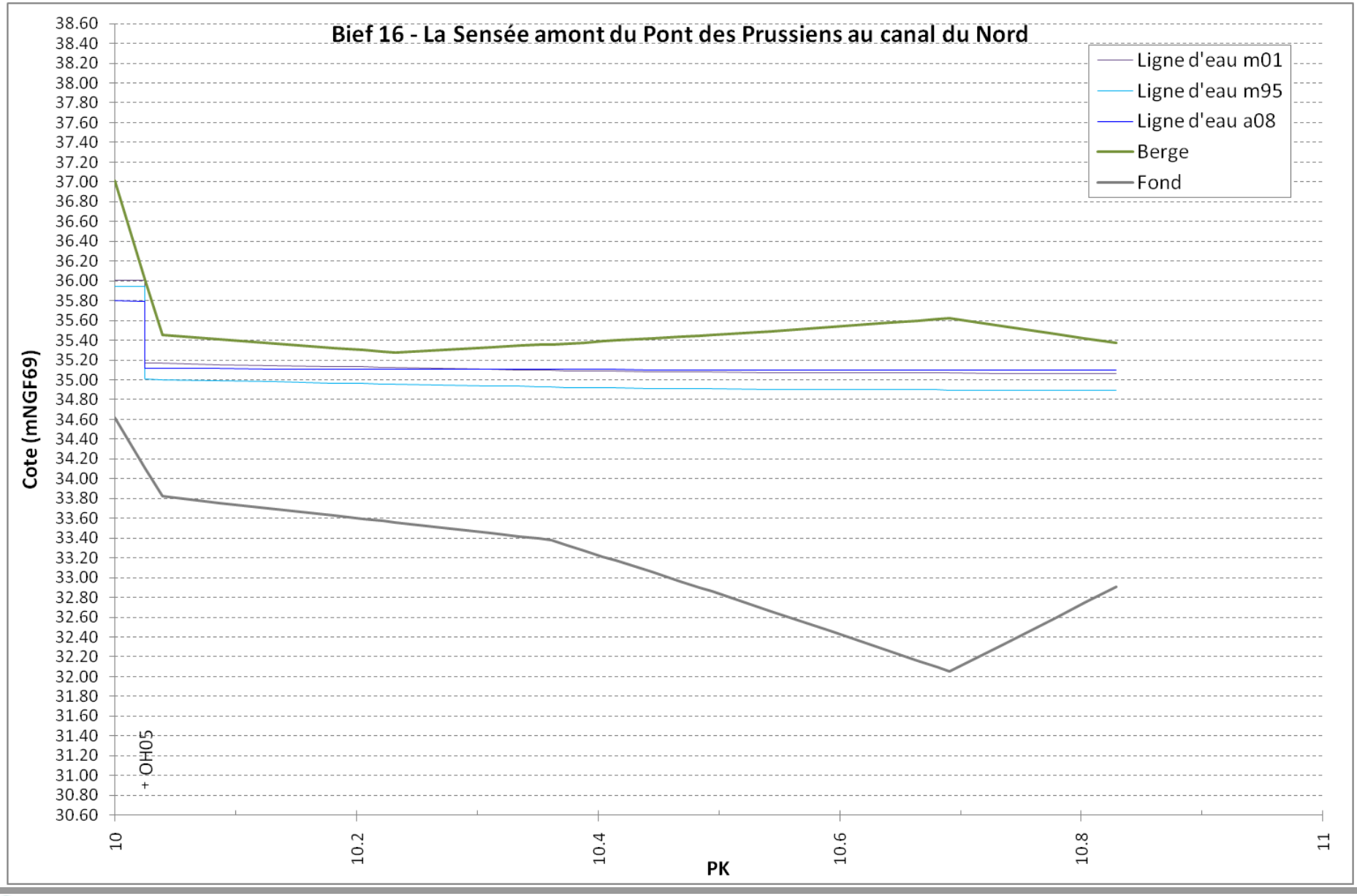


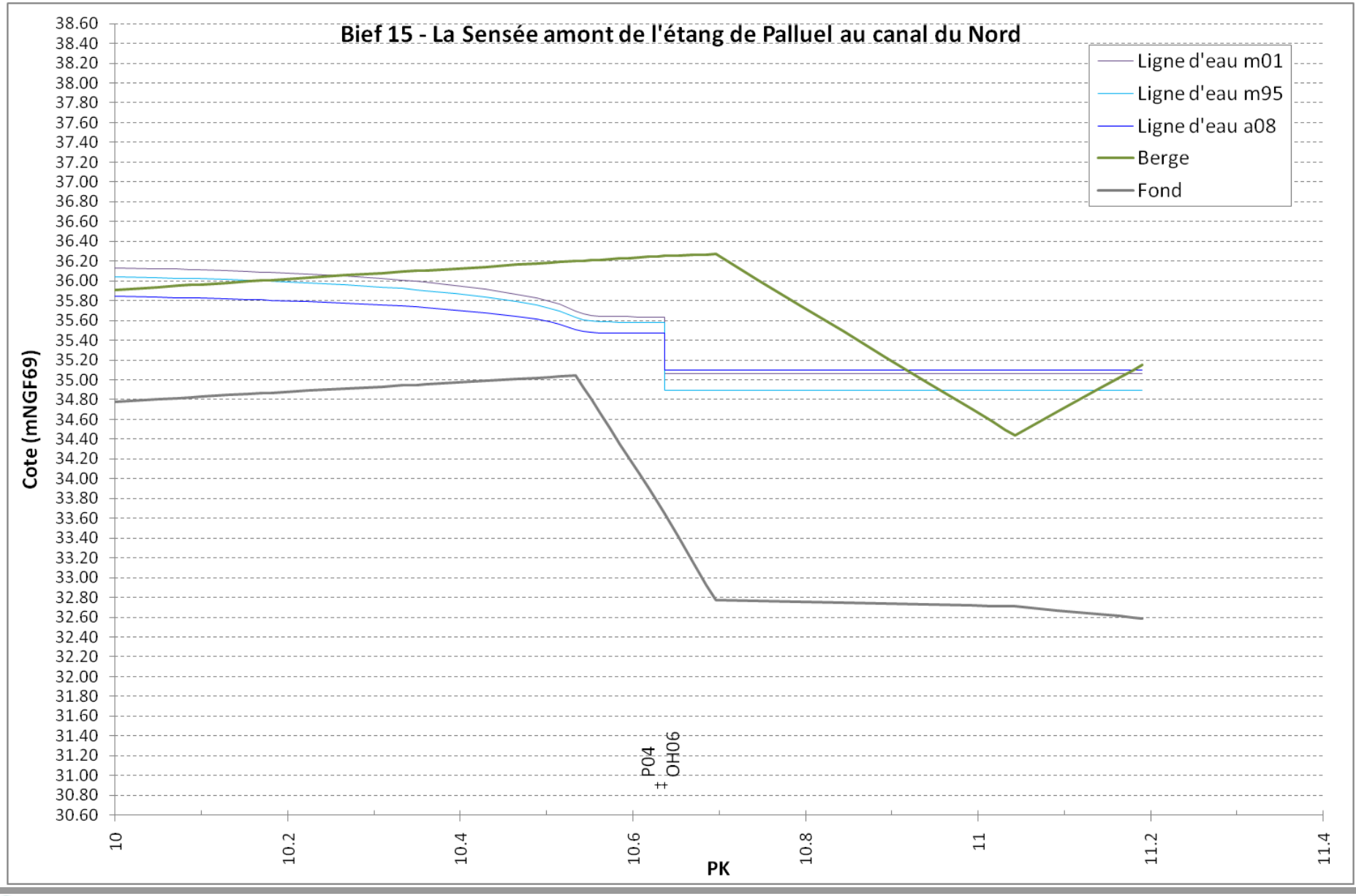
hydratec
groupe setec

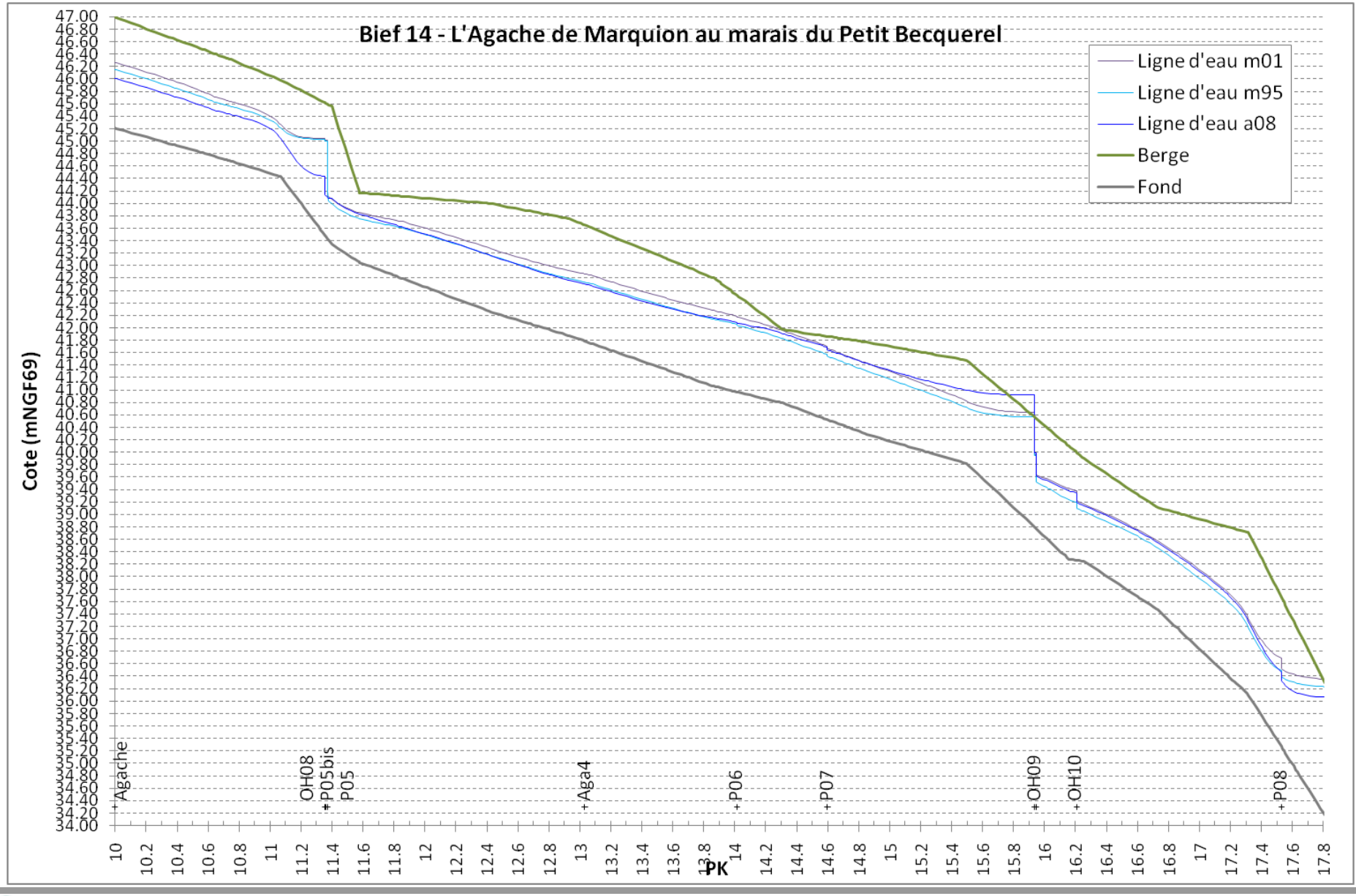
Annexe 8

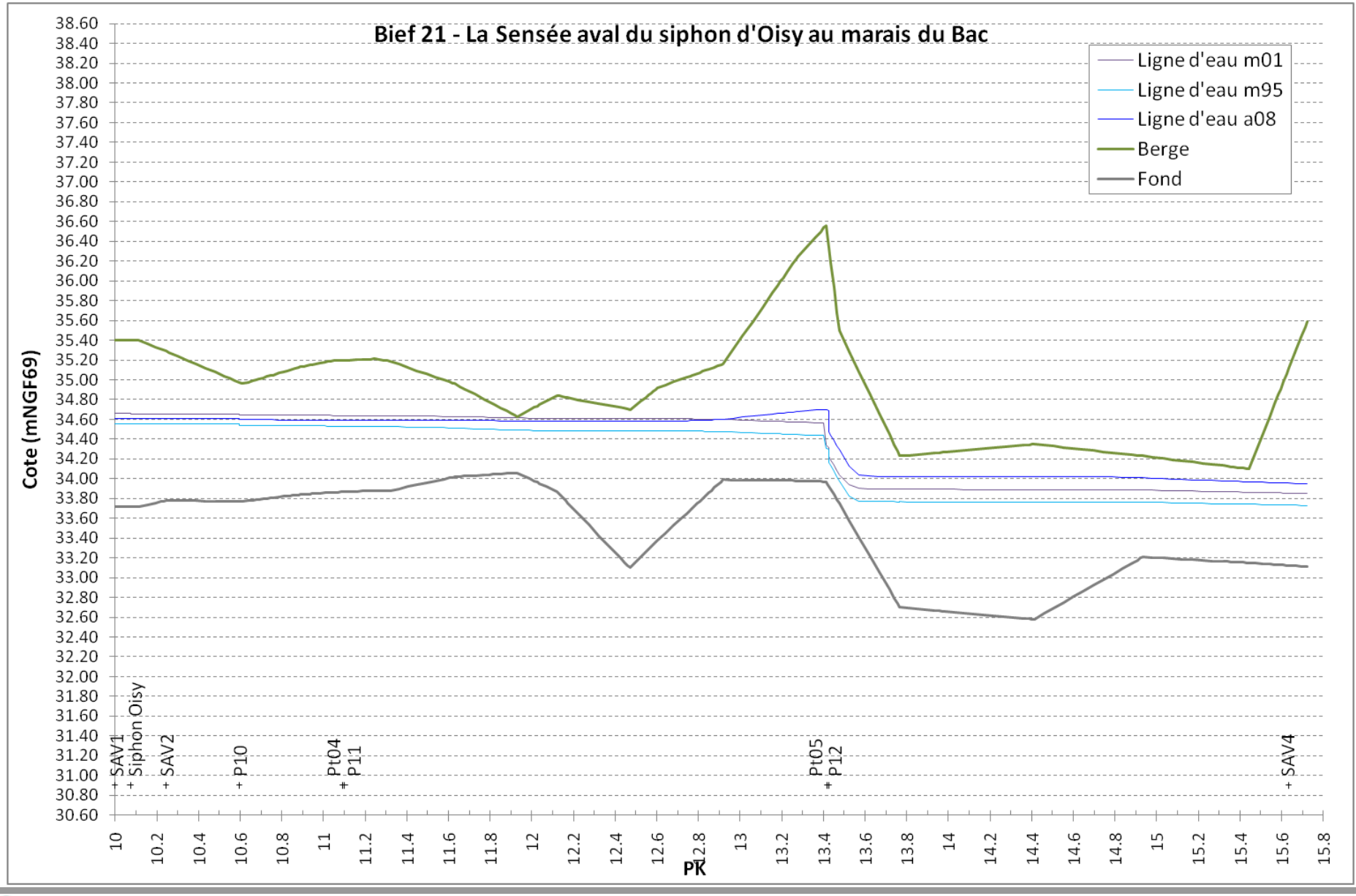
Lignes d’eau le long des biefs filaires pour les trois crues modélisées

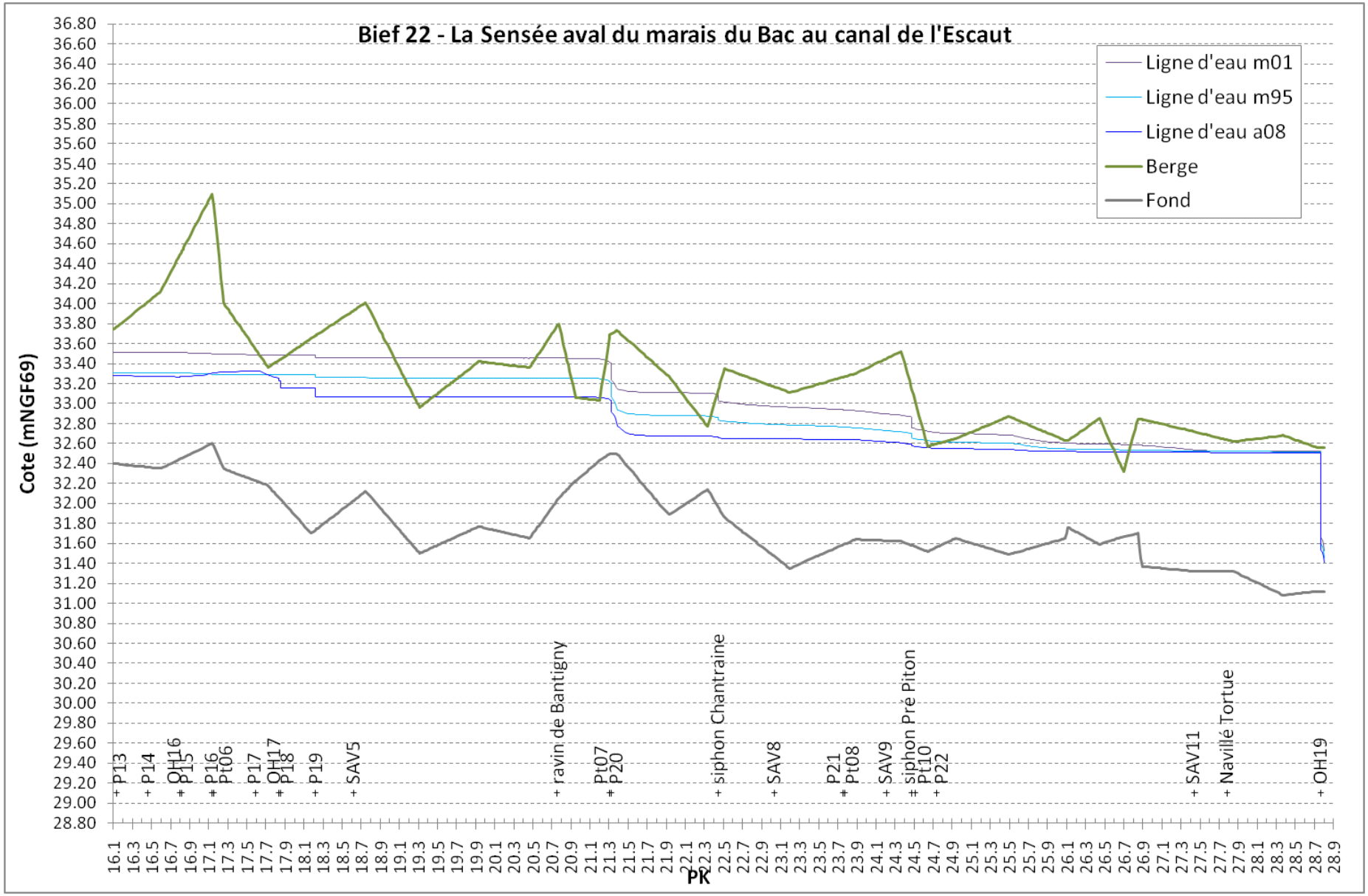

Bief 11 - La Sensée amont de Arleux à Lécluse
Ligne d'eau m01
Ligne d'eau m95
Ligne d'eau a08
Berge
Fond
Cote (mNGF69)
PK
+ station d'Etaing
+ Trinquise
PO1
+ SAM4
+ PO2


Bief 16 - La Sensée amont du Pont des Prussiens au canal du Nord
Ligne d'eau m01
Ligne d'eau m95
Ligne d'eau a08
Berge
Fond
Cote (mNGF69)
PK
+ OH05
38.60
38.40
38.20
38.00
37.80
37.60
37.40
37.20
37.00
36.80
36.60
36.40
36.20
36.00
35.80
35.60
35.40
35.20
35.00
34.80
34.60
34.40
34.20
34.00
33.80
33.60
33.40
33.20
33.00
32.80
32.60
32.40
32.20
32.00
31.80
31.60
31.40
31.20
31.00
30.80
30.60
10
10.2
10.4
10.6
10.8
11


Bief 15 - La Sensée amont de l'étang de Palluel au canal du Nord
Ligne d'eau m01
Ligne d'eau m95
Ligne d'eau a08
Berge
Fond
Cote (mNGF69)
38.60
38.40
38.20
38.00
37.80
37.60
37.40
37.20
37.00
36.80
36.60
36.40
36.20
36.00
35.80
35.60
35.40
35.20
35.00
34.80
34.60
34.40
34.20
34.00
33.80
33.60
33.40
33.20
33.00
32.80
32.60
32.40
32.20
32.00
31.80
31.60
31.40
31.20
31.00
30.80
30.60
P04
OH06
10
10.2
10.4
10.6
10.8
11
11.2
11.4
PK


Bief 14 - L'Agache de Marquion au marais du Petit Becquerel
Ligne d'eau m01
Ligne d'eau m95
Ligne d'eau a08
Berge
Fond
Cote (mNGF69)
PK
Agache
OH08
P05bis
P05
Aga4
P06
P07
OH09
OH10
P08

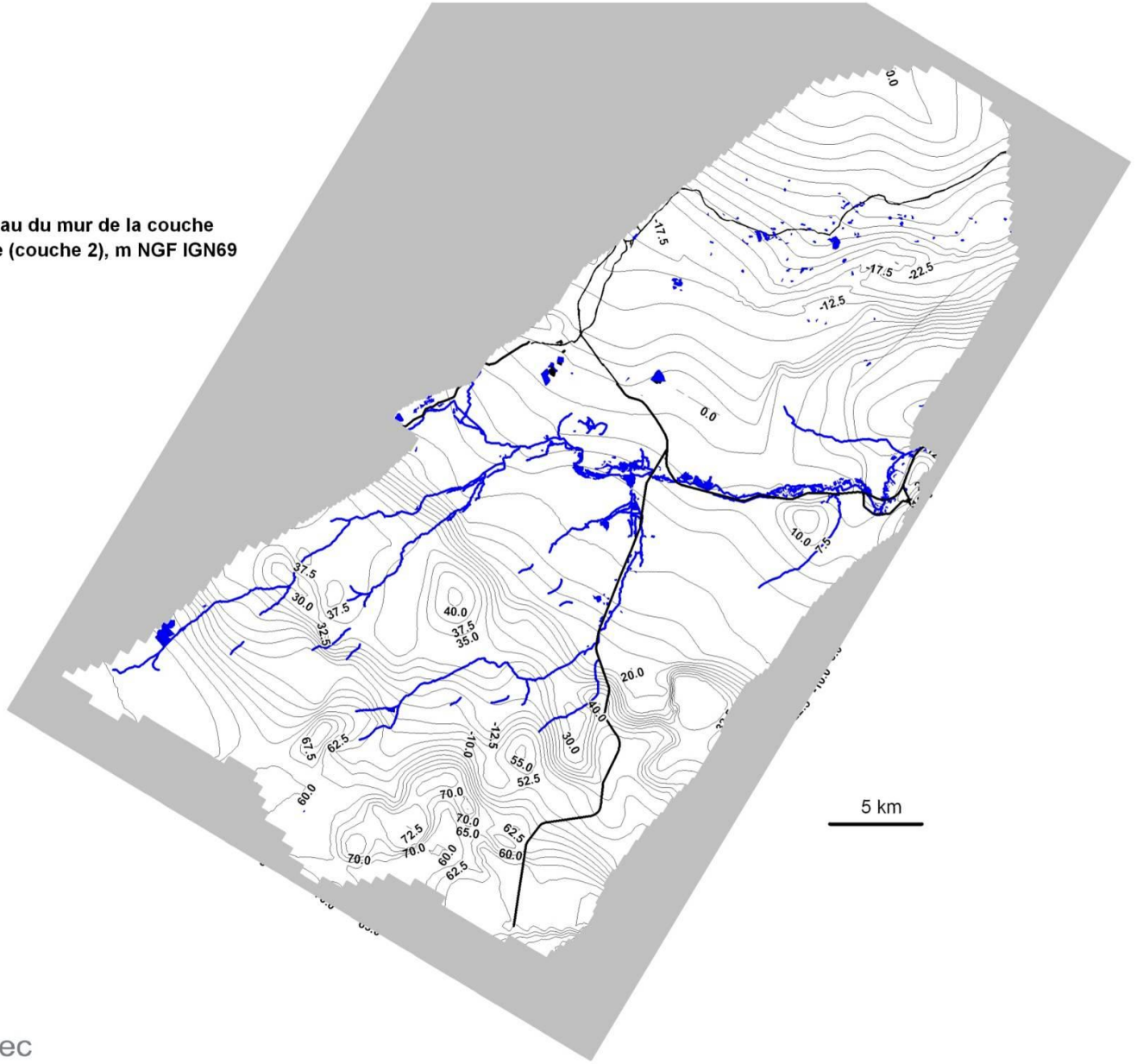

Bief 21 - La Sensée aval du siphon d'Oisy au marais du Bac
Ligne d'eau m01
Ligne d'eau m95
Ligne d'eau a08
Berge
Fond
Cote (mNGF69)
PK
SAV1
Siphon Oisy
SAV2
P10
Pt04
P11
Pt05
P12
SAV4


Bief 22 - La Sensée aval du marais du Bac au canal de l'Escaut
Ligne d'eau m01
Ligne d'eau m95
Ligne d'eau a08
Berge
Fond
Cote (mNGF69)
PK
P13
P14
OH16
P15
P16
Pt06
P17
OH17
P18
P19
SAV5
ravin de Bantigny
Pt07
P20
siphon Chantraine
SAV8
P21
Pt08
SAV9
siphon Pré Piton
Pt10
P22
SAV11
Navillé Tortue
OH19

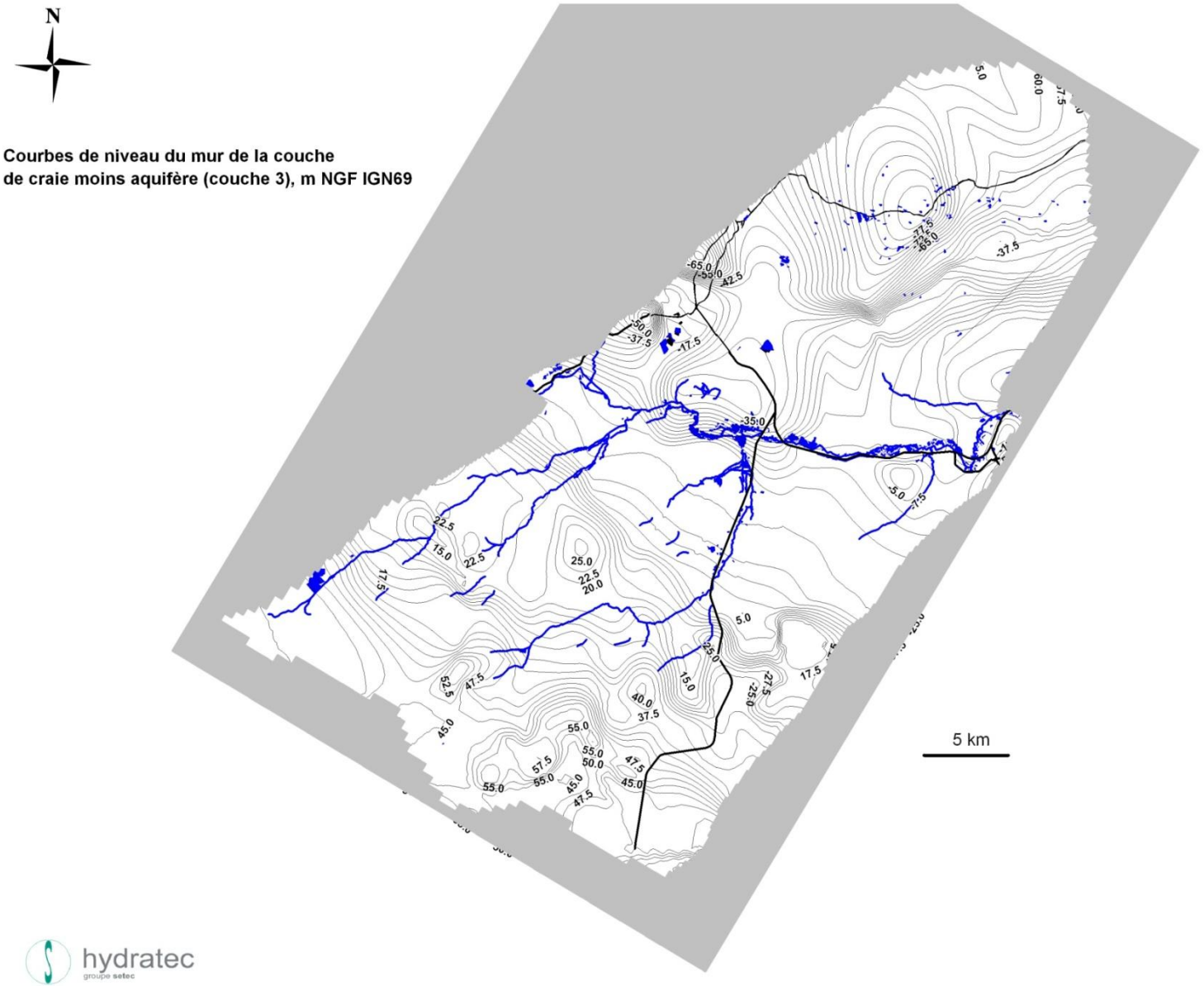
Annexe 9

Cotes du mur des couches 2 et 3 du modèle

Courbes de niveau du mur de la couche de craie aquifère (couche 2), m NGF IGN69



hydratec
groupe setec



hydratec
groupe setec

Annexe 10

Valeurs de la recharge introduite dans le modèle transitoire

Date de début de période	Date de fin de période	Infiltration vers la nappe (m/jr)	
		RU_{max} = 150 mm	RU_{max} = 180 mm
01/10/1997	10/10/1997	0	0
11/10/1997	20/10/1997	0	0
21/10/1997	31/10/1997	0	0
01/11/1997	10/11/1997	0	0
11/11/1997	20/11/1997	0	0
21/11/1997	30/11/1997	0	0
01/12/1997	10/12/1997	0	0
11/12/1997	20/12/1997	0	0
21/12/1997	31/12/1997	0	0
01/01/1998	10/01/1998	0.002799	9.9E-05
11/01/1998	20/01/1998	0.001287	0.001287
21/01/1998	31/01/1998	0	0
01/02/1998	10/02/1998	0	0
11/02/1998	20/02/1998	0	0
21/02/1998	28/02/1998	0	0
01/03/1998	10/03/1998	0.000423	0.000423
11/03/1998	20/03/1998	0	0
21/03/1998	31/03/1998	0	0
01/04/1998	10/04/1998	0	0
11/04/1998	20/04/1998	0	0
21/04/1998	30/04/1998	0	0
01/05/1998	10/05/1998	0	0
11/05/1998	20/05/1998	0	0
21/05/1998	31/05/1998	0	0
01/06/1998	10/06/1998	0	0
11/06/1998	20/06/1998	0	0
21/06/1998	30/06/1998	0	0

Date de début de période	Date de fin de période	Infiltration vers la nappe (m/jr)	
		RU_{max} = 150 mm	RU_{max} = 180 mm
01/07/1998	10/07/1998	0	0
11/07/1998	20/07/1998	0	0
21/07/1998	31/07/1998	0	0
01/08/1998	10/08/1998	0	0
11/08/1998	20/08/1998	0	0
21/08/1998	31/08/1998	0	0
01/09/1998	10/09/1998	0	0
11/09/1998	20/09/1998	0	0
21/09/1998	30/09/1998	0	0
01/10/1998	10/10/1998	0	0
11/10/1998	20/10/1998	0	0
21/10/1998	31/10/1998	0	0
01/11/1998	10/11/1998	0	0
11/11/1998	20/11/1998	9.6E-05	0
21/11/1998	30/11/1998	0.00147	0
01/12/1998	10/12/1998	0.000966	0.000732
11/12/1998	20/12/1998	0.000498	0.000498
21/12/1998	31/12/1998	0.001293	0.00129273
01/01/1999	10/01/1999	0.00111	0.00111
11/01/1999	20/01/1999	0.001086	0.001086
21/01/1999	31/01/1999	0.001096	0.00109636
01/02/1999	10/02/1999	0.000714	0.000714
11/02/1999	20/02/1999	0.001248	0.001248
21/02/1999	28/02/1999	0.000458	0.0004575
01/03/1999	10/03/1999	0.001482	0.001482
11/03/1999	20/03/1999	0	0
21/03/1999	31/03/1999	0	0

Date de début de période	Date de fin de période	Infiltration vers la nappe (m/jr)	
		RU_{max} = 150 mm	RU_{max} = 180 mm
01/04/1999	10/04/1999	0	0
11/04/1999	20/04/1999	0	0
21/04/1999	30/04/1999	0	0
01/05/1999	10/05/1999	0	0
11/05/1999	20/05/1999	0	0
21/05/1999	31/05/1999	0	0
01/06/1999	10/06/1999	0	0
11/06/1999	20/06/1999	0	0
21/06/1999	30/06/1999	0	0
01/07/1999	10/07/1999	0	0
11/07/1999	20/07/1999	0	0
21/07/1999	31/07/1999	0	0
01/08/1999	10/08/1999	0	0
11/08/1999	20/08/1999	0	0
21/08/1999	31/08/1999	0	0
01/09/1999	10/09/1999	0	0
11/09/1999	20/09/1999	0	0
21/09/1999	30/09/1999	0	0
01/10/1999	10/10/1999	0	0
11/10/1999	20/10/1999	0	0
21/10/1999	31/10/1999	0	0
01/11/1999	10/11/1999	0	0
11/11/1999	20/11/1999	0	0
21/11/1999	30/11/1999	0	0
01/12/1999	10/12/1999	0	0
11/12/1999	20/12/1999	0.001176	0
21/12/1999	31/12/1999	0.005547	0.00498

Date de début de période	Date de fin de période	Infiltration vers la nappe (m/jr)	
		RU_{max} = 150 mm	RU_{max} = 180 mm
01/01/2000	10/01/2000	0.001082	0.00108244
11/01/2000	20/01/2000	0.00107	0.00107044
21/01/2000	31/01/2000	0.000924	0.00092404
01/02/2000	10/02/2000	0.001134	0.001134
11/02/2000	20/02/2000	0.000942	0.000942
21/02/2000	29/02/2000	0.001033	0.00103333
01/03/2000	10/03/2000	0.0006	0.0006
11/03/2000	20/03/2000	0	0
21/03/2000	31/03/2000	0	0
01/04/2000	10/04/2000	0	0
11/04/2000	20/04/2000	0	0
21/04/2000	30/04/2000	0.000384	0.000384
01/05/2000	10/05/2000	0	0
11/05/2000	20/05/2000	0	0
21/05/2000	31/05/2000	0	0
01/06/2000	10/06/2000	0	0
11/06/2000	20/06/2000	0	0
21/06/2000	30/06/2000	0	0
01/07/2000	10/07/2000	0	0
11/07/2000	20/07/2000	0	0
21/07/2000	31/07/2000	0	0
01/08/2000	10/08/2000	0	0
11/08/2000	20/08/2000	0	0
21/08/2000	31/08/2000	0	0
01/09/2000	10/09/2000	0	0
11/09/2000	20/09/2000	0	0
21/09/2000	30/09/2000	0	0

Date de début de période	Date de fin de période	Infiltration vers la nappe (m/jr)	
		RU_{max} = 150 mm	RU_{max} = 180 mm
01/10/2000	10/10/2000	0	0
11/10/2000	20/10/2000	0	0
21/10/2000	31/10/2000	4.36E-05	0
01/11/2000	10/11/2000	0.002016	0.001914
11/11/2000	20/11/2000	0.00204	0.00204
21/11/2000	30/11/2000	0.002076	0.002076
01/12/2000	10/12/2000	0.004464	0.004464
11/12/2000	20/12/2000	0.001872	0.001872
21/12/2000	31/12/2000	0.001222	0.00122182
01/01/2001	10/01/2001	0.002868	0.002868
11/01/2001	20/01/2001	0	0
21/01/2001	31/01/2001	0.001827	0.00182727
01/02/2001	10/02/2001	0.00138	0.00138
11/02/2001	20/02/2001	0.0003	0.0003
21/02/2001	28/02/2001	0.000645	0.000645
01/03/2001	10/03/2001	0.001314	0.001314
11/03/2001	20/03/2001	0.003156	0.003156
21/03/2001	31/03/2001	0.00192	0.00192
01/04/2001	10/04/2001	0.001254	0.001254
11/04/2001	20/04/2001	0.00096	0.00096
21/04/2001	30/04/2001	0	0
01/05/2001	10/05/2001	0	0
11/05/2001	20/05/2001	0	0
21/05/2001	31/05/2001	0	0
01/06/2001	10/06/2001	0	0
11/06/2001	20/06/2001	0	0
21/06/2001	30/06/2001	0	0

Date de début de période	Date de fin de période	Infiltration vers la nappe (m/jr)	
		RU_{max} = 150 mm	RU_{max} = 180 mm
01/07/2001	10/07/2001	0	0
11/07/2001	20/07/2001	0	0
21/07/2001	31/07/2001	0	0
01/08/2001	10/08/2001	0	0
11/08/2001	20/08/2001	0	0
21/08/2001	31/08/2001	0	0
01/09/2001	10/09/2001	0	0
11/09/2001	20/09/2001	0	0
21/09/2001	30/09/2001	0	0
01/10/2001	10/10/2001	0	0
11/10/2001	20/10/2001	0	0
21/10/2001	31/10/2001	0	0
01/11/2001	10/11/2001	0	0
11/11/2001	20/11/2001	0	0
21/11/2001	30/11/2001	0	0
01/12/2001	10/12/2001	0	0
11/12/2001	20/12/2001	0	0
21/12/2001	31/12/2001	0.000409	0
01/01/2002	10/01/2002	0	0
11/01/2002	20/01/2002	0.000212	6.2E-05
21/01/2002	31/01/2002	0.0006	0.0006
01/02/2002	10/02/2002	0.000518	0.000518
11/02/2002	20/02/2002	0.000636	0.000636
21/02/2002	28/02/2002	0.000413	0.0004125
01/03/2002	10/03/2002	0	0
11/03/2002	20/03/2002	0.000636	0.000636
21/03/2002	31/03/2002	0	0

Date de début de période	Date de fin de période	Infiltration vers la nappe (m/jr)	
		RU_{max} = 150 mm	RU_{max} = 180 mm
01/04/2002	10/04/2002	0	0
11/04/2002	20/04/2002	0	0
21/04/2002	30/04/2002	0	0
01/05/2002	10/05/2002	0	0
11/05/2002	20/05/2002	0	0
21/05/2002	31/05/2002	0	0
01/06/2002	10/06/2002	0	0
11/06/2002	20/06/2002	0	0
21/06/2002	30/06/2002	0	0
01/07/2002	10/07/2002	0	0
11/07/2002	20/07/2002	0	0
21/07/2002	31/07/2002	0	0
01/08/2002	10/08/2002	0	0
11/08/2002	20/08/2002	0	0
21/08/2002	31/08/2002	0	0
01/09/2002	10/09/2002	0	0
11/09/2002	20/09/2002	0	0
21/09/2002	30/09/2002	0	0
01/10/2002	10/10/2002	0	0
11/10/2002	20/10/2002	0	0
21/10/2002	31/10/2002	0	0
01/11/2002	10/11/2002	0	0
11/11/2002	20/11/2002	0	0
21/11/2002	30/11/2002	0	0
01/12/2002	10/12/2002	0	0
11/12/2002	20/12/2002	5.6E-05	0
21/12/2002	31/12/2002	0.000851	0.00035636

Date de début de période	Date de fin de période	Infiltration vers la nappe (m/jr)	
		RU_{max} = 150 mm	RU_{max} = 180 mm
01/01/2003	10/01/2003	0.00064	0.00064
11/01/2003	20/01/2003	0.00023	0.00023
21/01/2003	31/01/2003	0.000333	0.00033273
01/02/2003	10/02/2003	0.000196	0.000196
11/02/2003	20/02/2003	0	0
21/02/2003	28/02/2003	0	0
01/03/2003	10/03/2003	0.00016	0.00016
11/03/2003	20/03/2003	0	0
21/03/2003	31/03/2003	0	0
01/04/2003	10/04/2003	0	0
11/04/2003	20/04/2003	0	0
21/04/2003	30/04/2003	0	0
01/05/2003	10/05/2003	0	0
11/05/2003	20/05/2003	0	0
21/05/2003	31/05/2003	0	0
01/06/2003	10/06/2003	0	0
11/06/2003	20/06/2003	0	0
21/06/2003	30/06/2003	0	0
01/07/2003	10/07/2003	0	0
11/07/2003	20/07/2003	0	0
21/07/2003	31/07/2003	0	0
01/08/2003	10/08/2003	0	0
11/08/2003	20/08/2003	0	0
21/08/2003	31/08/2003	0	0
01/09/2003	10/09/2003	0	0
11/09/2003	20/09/2003	0	0
21/09/2003	30/09/2003	0	0

Date de début de période	Date de fin de période	Infiltration vers la nappe (m/jr)	
		RU_{max} = 150 mm	RU_{max} = 180 mm
01/10/2003	10/10/2003	0	0
11/10/2003	20/10/2003	0	0
21/10/2003	31/10/2003	0	0
01/11/2003	10/11/2003	0	0
11/11/2003	20/11/2003	0	0
21/11/2003	30/11/2003	0	0
01/12/2003	10/12/2003	0	0
11/12/2003	20/12/2003	0	0
21/12/2003	31/12/2003	0	0
01/01/2004	10/01/2004	0	0
11/01/2004	20/01/2004	0.00055	0
21/01/2004	31/01/2004	0.00052	0.00047455
01/02/2004	10/02/2004	0.000268	0.000268
11/02/2004	20/02/2004	8E-06	8E-06
21/02/2004	29/02/2004	0	0
01/03/2004	10/03/2004	0.000128	0.000128
11/03/2004	20/03/2004	2.8E-05	2.8E-05
21/03/2004	31/03/2004	0	0
01/04/2004	10/04/2004	0	0
11/04/2004	20/04/2004	0	0
21/04/2004	30/04/2004	0	0
01/05/2004	10/05/2004	0	0
11/05/2004	20/05/2004	0	0
21/05/2004	31/05/2004	0	0
01/06/2004	10/06/2004	0	0
11/06/2004	20/06/2004	0	0
21/06/2004	30/06/2004	0	0

Date de début de période	Date de fin de période	Infiltration vers la nappe (m/jr)	
		RU_{max} = 150 mm	RU_{max} = 180 mm
01/07/2004	10/07/2004	0	0
11/07/2004	20/07/2004	0	0
21/07/2004	31/07/2004	0	0
01/08/2004	10/08/2004	0	0
11/08/2004	20/08/2004	0	0
21/08/2004	31/08/2004	0	0
01/09/2004	10/09/2004	0	0
11/09/2004	20/09/2004	0	0
21/09/2004	30/09/2004	0	0
01/10/2004	10/10/2004	0	0
11/10/2004	20/10/2004	0	0
21/10/2004	31/10/2004	0	0
01/11/2004	10/11/2004	0	0
11/11/2004	20/11/2004	0	0
21/11/2004	30/11/2004	0	0
01/12/2004	10/12/2004	0	0
11/12/2004	20/12/2004	0	0
21/12/2004	31/12/2004	0	0
01/01/2005	10/01/2005	0	0
11/01/2005	20/01/2005	0	0
21/01/2005	31/01/2005	0	0
01/02/2005	10/02/2005	2E-06	0
11/02/2005	20/02/2005	0.000918	0.00032
21/02/2005	28/02/2005	0	0
01/03/2005	10/03/2005	0.000112	0.000112
11/03/2005	20/03/2005	0	0
21/03/2005	31/03/2005	0.000162	0.00016182

Date de début de période	Date de fin de période	Infiltration vers la nappe (m/jr)	
		RU_{max} = 150 mm	RU_{max} = 180 mm
01/04/2005	10/04/2005	0	0
11/04/2005	20/04/2005	0.00018	0.00018
21/04/2005	30/04/2005	0	0
01/05/2005	10/05/2005	0	0
11/05/2005	20/05/2005	0	0
21/05/2005	31/05/2005	0	0
01/06/2005	10/06/2005	0	0
11/06/2005	20/06/2005	0	0
21/06/2005	30/06/2005	0	0
01/07/2005	10/07/2005	0.00035	0.00035
11/07/2005	20/07/2005	0	0
21/07/2005	31/07/2005	0	0
01/08/2005	10/08/2005	0	0
11/08/2005	20/08/2005	0	0
21/08/2005	31/08/2005	0	0
01/09/2005	10/09/2005	0	0
11/09/2005	20/09/2005	0	0
21/09/2005	30/09/2005	0	0
01/10/2005	10/10/2005	0	0
11/10/2005	20/10/2005	0	0
21/10/2005	31/10/2005	0	0
01/11/2005	10/11/2005	0	0
11/11/2005	20/11/2005	0	0
21/11/2005	30/11/2005	0	0
01/12/2005	10/12/2005	0	0
11/12/2005	20/12/2005	0	0
21/12/2005	31/12/2005	0	0

Date de début de période	Date de fin de période	Infiltration vers la nappe (m/jr)	
		RU_{max} = 150 mm	RU_{max} = 180 mm
01/01/2006	10/01/2006	0	0
11/01/2006	20/01/2006	0.000252	0.000252
21/01/2006	31/01/2006	0	0
01/02/2006	10/02/2006	0	0
11/02/2006	20/02/2006	0.004347	0.004347
21/02/2006	28/02/2006	0.000833	0.0008325
01/03/2006	10/03/2006	0.001854	0.001854
11/03/2006	20/03/2006	0	0
21/03/2006	31/03/2006	0.000409	0.00040909
01/04/2006	10/04/2006	0	0
11/04/2006	20/04/2006	0	0
21/04/2006	30/04/2006	0	0
01/05/2006	10/05/2006	0	0
11/05/2006	20/05/2006	0	0
21/05/2006	31/05/2006	0	0
01/06/2006	10/06/2006	0	0
11/06/2006	20/06/2006	0	0
21/06/2006	30/06/2006	0	0
01/07/2006	10/07/2006	0	0
11/07/2006	20/07/2006	0	0
21/07/2006	31/07/2006	0	0
01/08/2006	10/08/2006	0	0
11/08/2006	20/08/2006	0	0
21/08/2006	31/08/2006	0	0
01/09/2006	10/09/2006	0	0
11/09/2006	20/09/2006	0	0
21/09/2006	30/09/2006	0	0

Date de début de période	Date de fin de période	Infiltration vers la nappe (m/jr)	
		RU_{max} = 150 mm	RU_{max} = 180 mm
01/10/2006	10/10/2006	0	0
11/10/2006	20/10/2006	0	0
21/10/2006	31/10/2006	0	0
01/11/2006	10/11/2006	0	0
11/11/2006	20/11/2006	0	0
21/11/2006	30/11/2006	0	0
01/12/2006	10/12/2006	0	0
11/12/2006	20/12/2006	0	0
21/12/2006	31/12/2006	8.18E-05	0
01/01/2007	10/01/2007	0.001161	0
11/01/2007	20/01/2007	0.001071	0
21/01/2007	31/01/2007	0	0
01/02/2007	10/02/2007	0.00144	0.001062
11/02/2007	20/02/2007	0.001836	0.001836
21/02/2007	28/02/2007	0.002374	0.00237375
01/03/2007	10/03/2007	0.001008	0.001008
11/03/2007	20/03/2007	0.000423	0.000423
21/03/2007	31/03/2007	0	0
01/04/2007	10/04/2007	0	0
11/04/2007	20/04/2007	0	0
21/04/2007	30/04/2007	0	0
01/05/2007	10/05/2007	0	0
11/05/2007	20/05/2007	0	0
21/05/2007	31/05/2007	0	0
01/06/2007	10/06/2007	0	0
11/06/2007	20/06/2007	0	0
21/06/2007	30/06/2007	0	0

Date de début de période	Date de fin de période	Infiltration vers la nappe (m/jr)	
		RU_{max} = 150 mm	RU_{max} = 180 mm
01/07/2007	10/07/2007	0	0
11/07/2007	20/07/2007	0	0
21/07/2007	31/07/2007	0	0
01/08/2007	10/08/2007	0	0
11/08/2007	20/08/2007	0	0
21/08/2007	31/08/2007	0	0
01/09/2007	10/09/2007	0	0
11/09/2007	20/09/2007	0	0
21/09/2007	30/09/2007	0	0
01/10/2007	10/10/2007	0	0
11/10/2007	20/10/2007	0	0
21/10/2007	31/10/2007	0	0
01/11/2007	10/11/2007	0	0
11/11/2007	20/11/2007	0	0
21/11/2007	30/11/2007	0	0
01/12/2007	10/12/2007	0	0
11/12/2007	20/12/2007	0	0
21/12/2007	31/12/2007	0	0
01/01/2008	10/01/2008	0.001935	0
11/01/2008	20/01/2008	0.001026	0.000261
21/01/2008	31/01/2008	0.00099	0.00099
01/02/2008	10/02/2008	0.000207	0.000207
11/02/2008	20/02/2008	0	0
21/02/2008	29/02/2008	0.00062	0.00062
01/03/2008	10/03/2008	0.002016	0.002016
11/03/2008	20/03/2008	0.001773	0.001773
21/03/2008	31/03/2008	0.001006	0.00100636

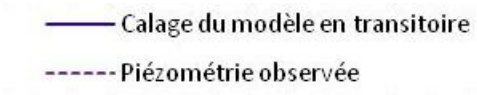
Date de début de période	Date de fin de période	Infiltration vers la nappe (m/jr)	
		RU_{max} = 150 mm	RU_{max} = 180 mm
01/04/2008	10/04/2008	0	0
11/04/2008	20/04/2008	0	0
21/04/2008	30/04/2008	0	0
01/05/2008	10/05/2008	0	0
11/05/2008	20/05/2008	0	0
21/05/2008	31/05/2008	0	0
01/06/2008	10/06/2008	0	0
11/06/2008	20/06/2008	0	0
21/06/2008	30/06/2008	0	0
01/07/2008	10/07/2008	0	0
11/07/2008	20/07/2008	0	0
21/07/2008	31/07/2008	0	0
01/08/2008	10/08/2008	0	0
11/08/2008	20/08/2008	0	0
21/08/2008	31/08/2008	0	0
01/09/2008	10/09/2008	0	0
11/09/2008	20/09/2008	0	0
21/09/2008	30/09/2008	0	0

Annexe 11

Analyse du calage de la piézométrie en régime transitoire

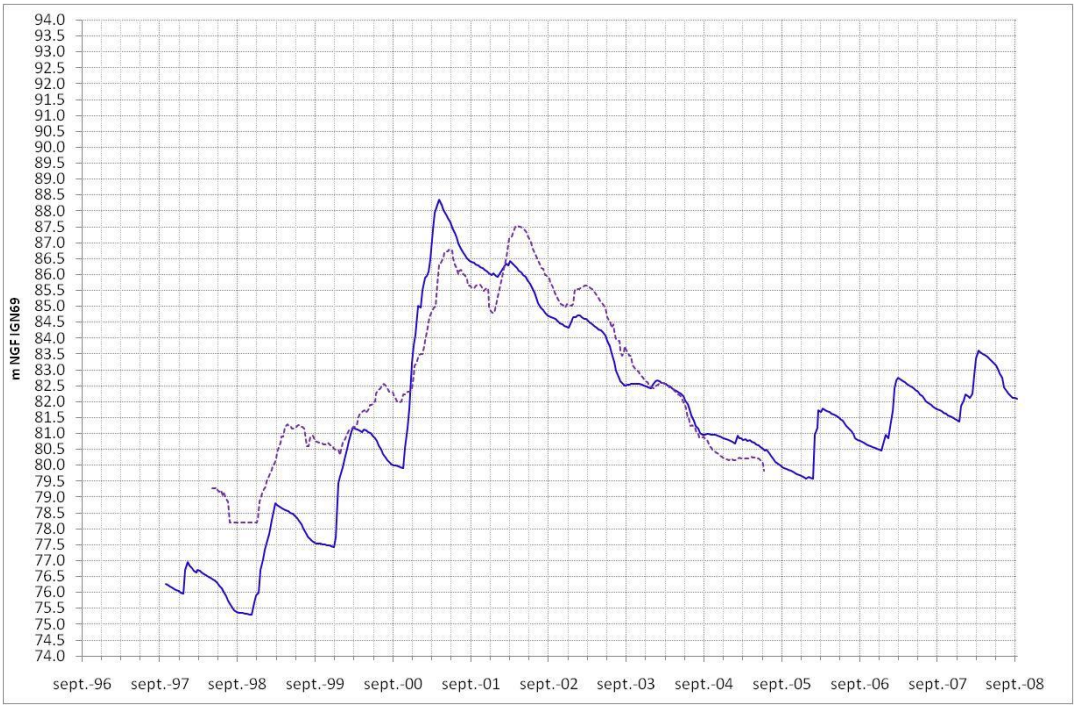
La présentation est faite de l'amont vers l'aval du bassin versant hydrogéologique, par secteurs.

Légende



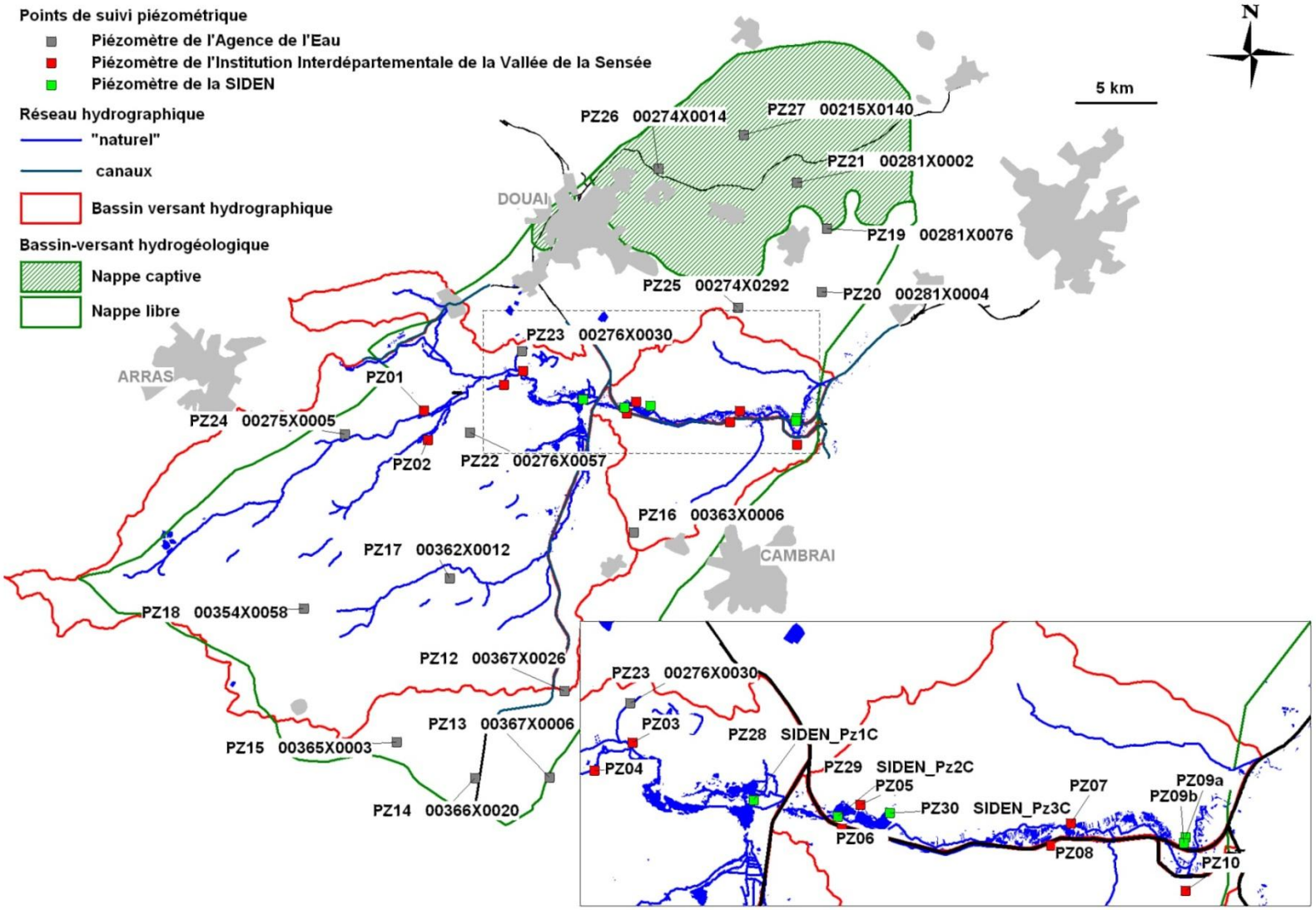
- Coteaux au sud du bassin versant

Pz18 (00354X0058)



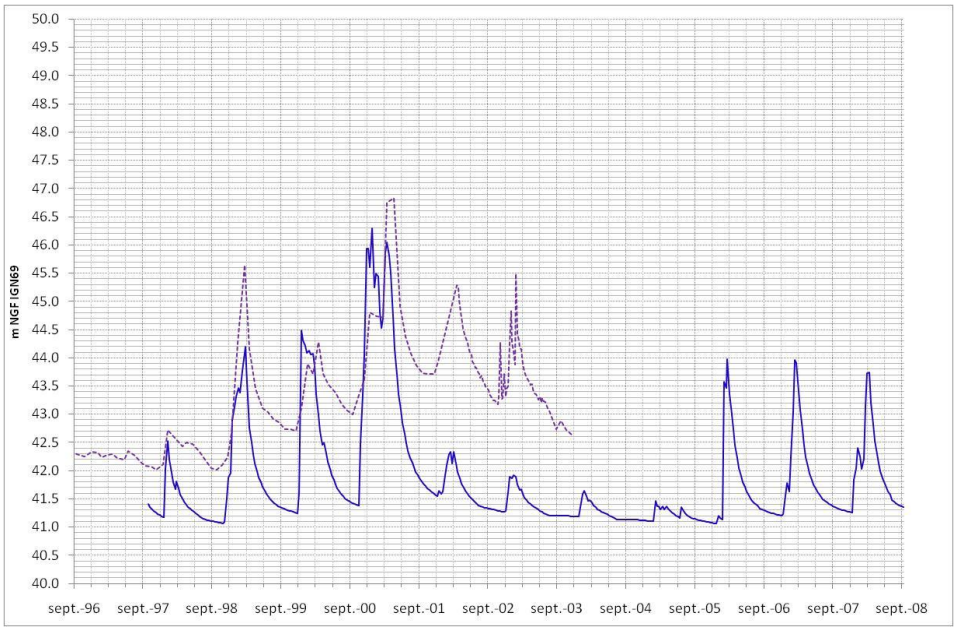
Ce piézomètre est situé sur la commune de Mory, le nivellement de l'ouvrage est estimé à +/- 1 m. Il est éloigné de tout prélèvement signalé à l'Agence de l'Eau Artois Picardie. Les deux premières années modélisées sont trop basses par rapport aux niveaux mesurés, puis la piézométrie calculée oscille autour des niveaux mesurés. Le pic de piézométrie est observé en 2002 tandis que qu'il est calculé en 2002 par le modèle.

Réseau piézométrique



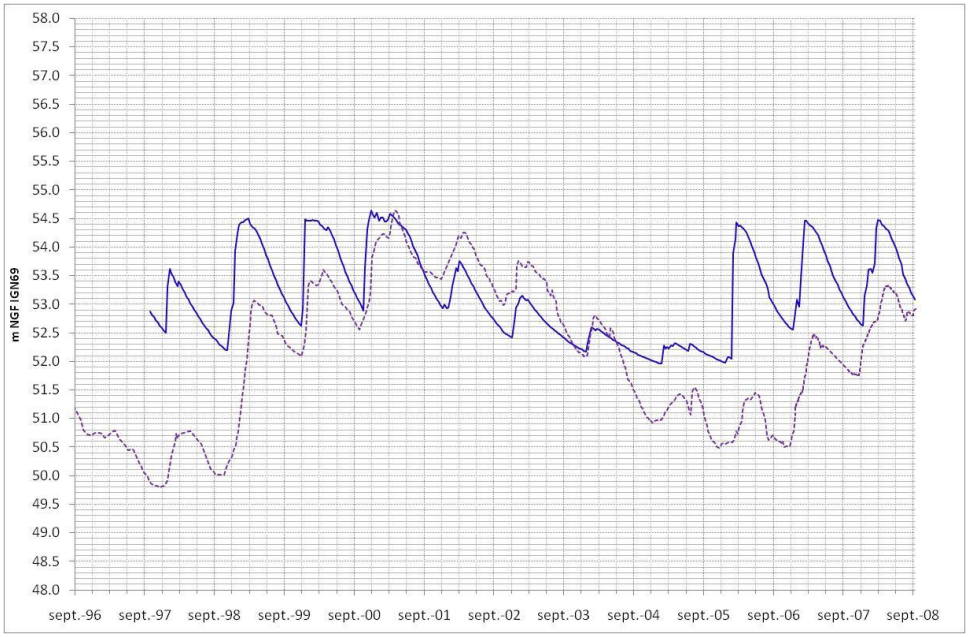
- Bords de la Sensée amont

Pz22 (00276X0057)



Ce piézomètre est situé sur la commune de Dury. Il est placé sur le coteau situé entre la Petite Hirondelle et la Sensée. Il est géré par l'AEAP. Les niveaux de hautes eaux calculés sont bons, les niveaux d'étiage sont trop bas (1 m), ce qui tendrait à indiquer que le drainage par la Sensée et la Petite Hirondelle se propage un peu trop loin dans le modèle.

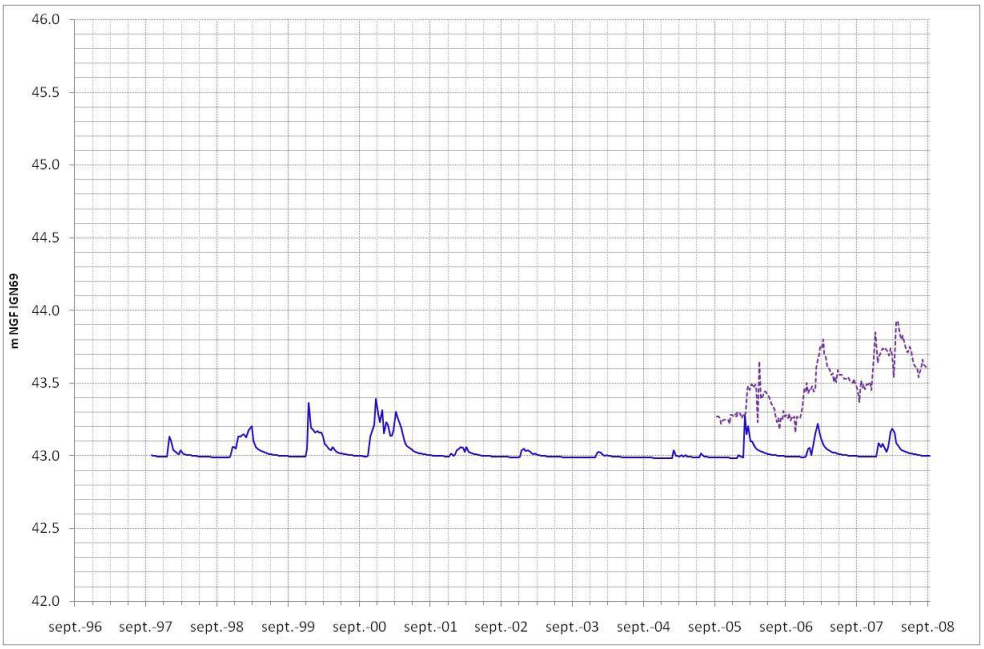
Pz24 (00275X0005)



Ce piézomètre est situé sur la commune de Guémappe. Il est géré par l'AEAP. Il est situé à proximité (350 m) de la Sensée. Il est proche des limites du modèle (1200 m). Pour les années hydrologiques 2000 à 2004, les niveaux sont bien retranscris. La baisse des niveaux de nappe en 2005 et 2006 est mal traduite, ce qui peut s'expliquer par des effets de bords dus à la proximité de

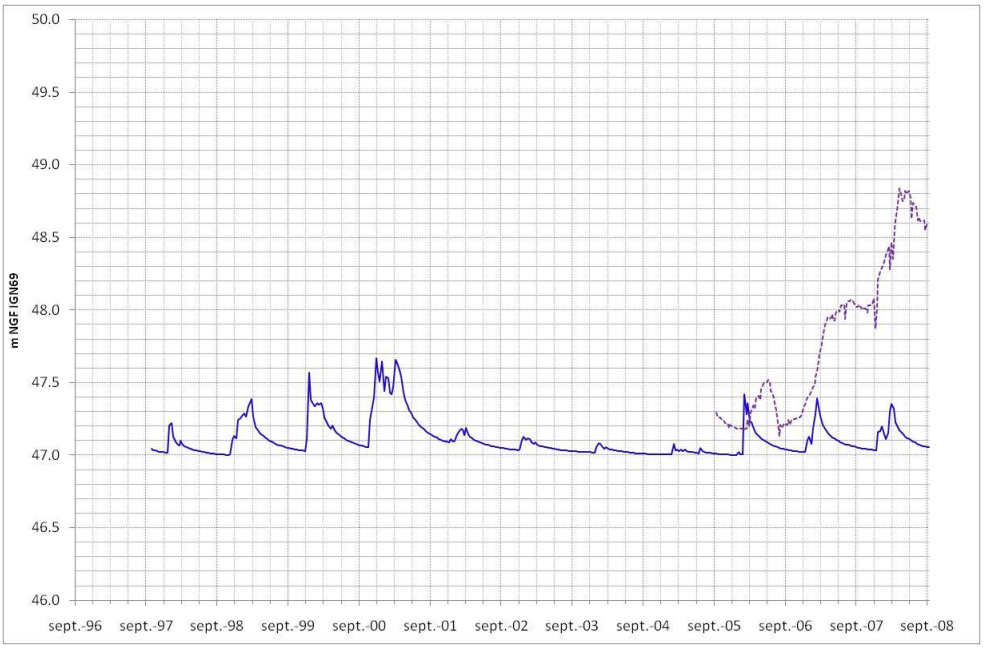
la limite du modèle. Les variations de la piézométrie des années ultérieures est bonne en amplitude.

Pz1



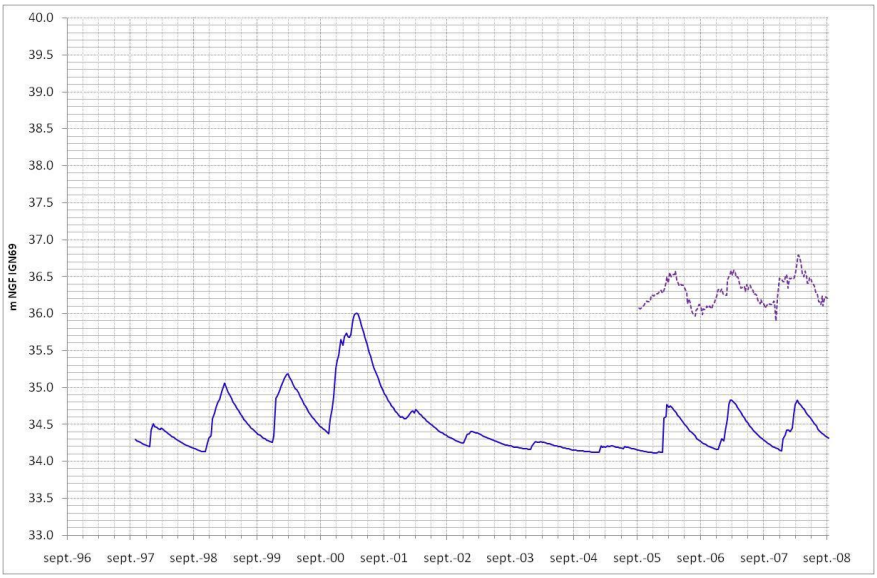
Ce piézomètre est situé sur la commune de Boiry-Notre-Dame. Il est situé à 200 m du Cojeul. Il est géré par l'Institution Interdépartementale de la Vallée de la Sensée. La chronique piézométrique débute en 2005. Tout au long de la chronique simulée, les niveaux de base se maintiennent autour d'une même cote. Ce maintien stable est dû à l'influence du Cojeul dont la cote de niveau d'eau ne varie pas dans le modèle. Au contraire dans la réalité, on constate une légère rehausse de 0.3 m en 3 ans sur ce point. Cette rehausse correspond au battement des niveaux constatés sur le tronçon voisin du Cojeul.

Pz2



Ce piézomètre est situé sur la commune de Rémy. Il est situé à 200 m de la Sensée. Il est géré par l'Institution Interdépartementale de la Vallée de la Sensée. La chronique piézométrique débute en 2005. Tout au long de la chronique simulée, les niveaux de base se maintiennent autour d'une même cote. Ce maintien stable est dû à l'influence de la Sensée dont la cote de niveau d'eau ne varie pas dans le modèle. Au contraire dans la réalité, on constate une rehausse de 1.5 m en 3 ans sur ce point. Comme pour le point Pz22, ce constat tendrait à indiquer que le drainage par la Sensée se propage trop fortement dans le modèle.

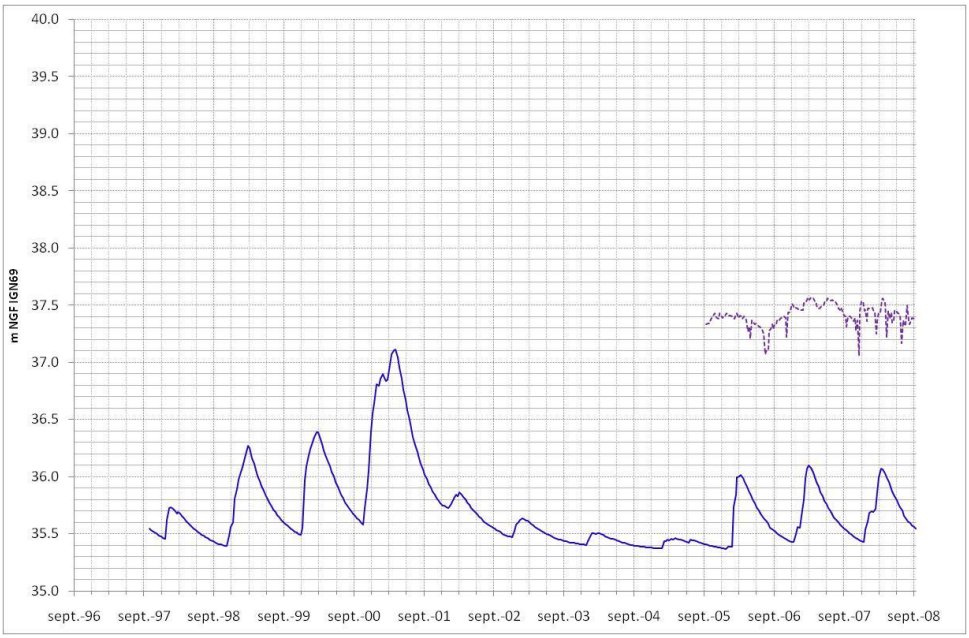
Pz3



Ce piézomètre est situé sur la commune de Tortequesne. Il est situé à 150 m de la Sensée. Il est géré par l'Institution Interdépartementale de la Vallée de la Sensée. La chronique piézométrique débute en 2005. Le niveau moyen est situé 1.5 m trop bas, mais les trois années de mesure sont

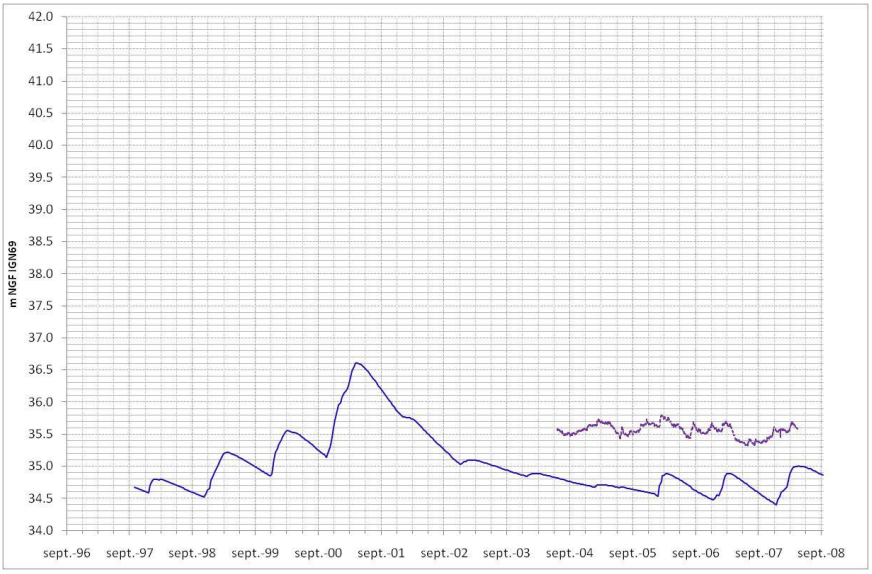
bien retranscrites en terme d'amplitude. L'influence de la rivière sur la nappe est donc bien traduite.

Pz4



Ce piézomètre est situé sur la commune de Lécluse. Il est situé dans le Marais des Vaches, qui alimente la Sensée. Il capte les niveaux de craie. Il est géré par l'Institution Interdépartementale de la Vallée de la Sensée. La chronique piézométrique débute en 2005. Le niveau moyen est situé 2 m trop bas, mais les trois années de mesure sont bien retranscrites en terme d'amplitude.

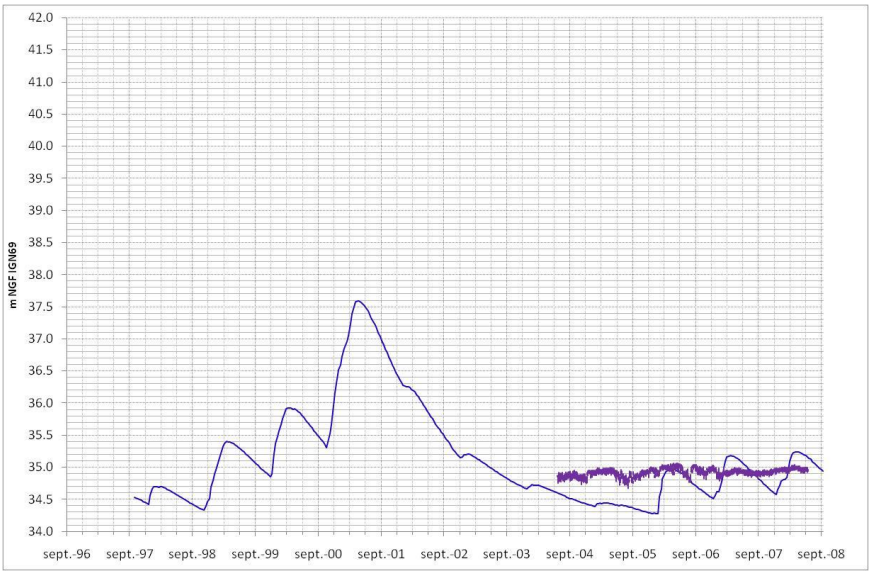
Pz28



Ce piézomètre est situé sur la commune d'Arleux. Il est situé dans le Grand Marais. Il capte les niveaux de craie. Il est géré par le SIDEN. La chronique piézométrique débute en 2005. Le niveau moyen est situé 1 m trop bas, mais les trois années de mesure sont bien retranscrites en terme d'amplitude.

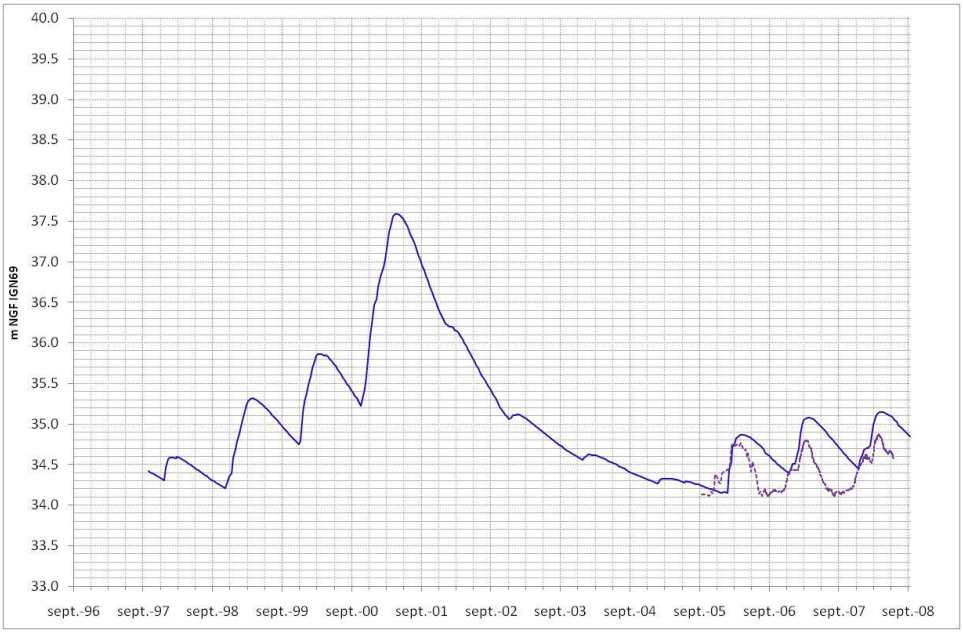
- Bords de la Sensée aval

Pz29



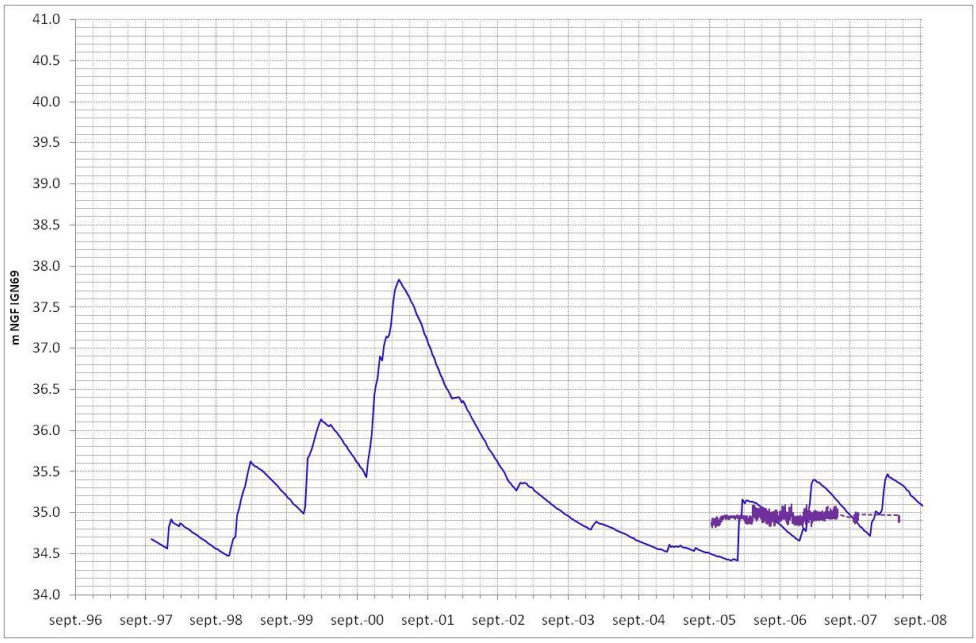
Ce piézomètre est situé sur la commune de Brunémont. Il est situé dans le Marais de Brunémont. Il capte les niveaux de craie. Il est géré par le SIDEN. La chronique piézométrique débute en 2005. Le niveau moyen est bon, mais les trois années de mesure sont mal retranscrites en termes d'amplitude. L'effet de drainage de la Sensée n'est pas assez poussé en ce point du modèle.

Pz5



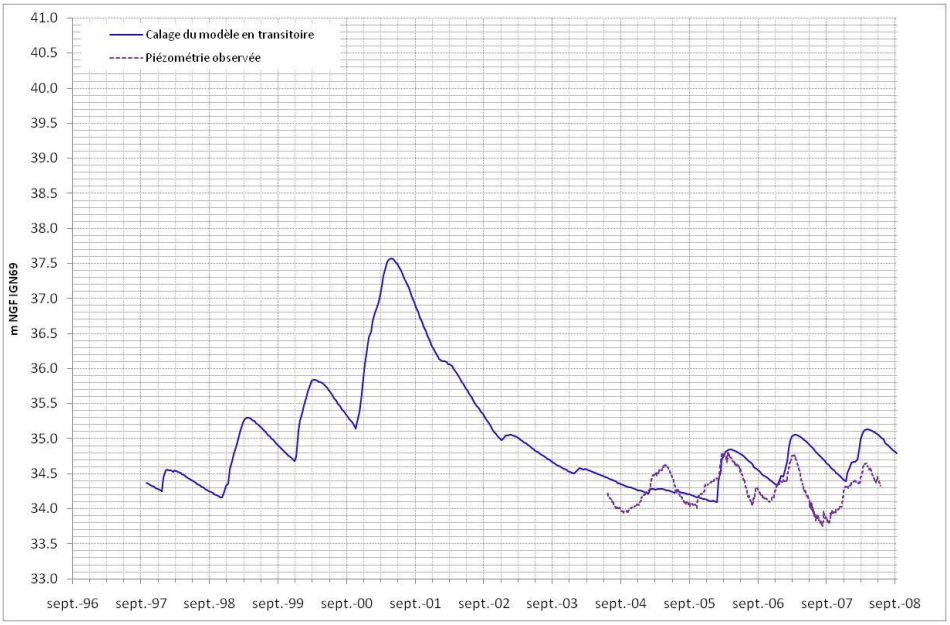
Ce piézomètre est situé sur la commune d'Aubigny-au-Bac. Il est situé en bordure des Marais de Brunémont et d'Aubigny-au-Bac. Il capte les niveaux de craie. Il est géré par l'Institution Interdépartementale de la Vallée de la Sensée. La chronique piézométrique débute en 2005. Les niveaux de base et l'amplitude sont bien traduits.

Pz6



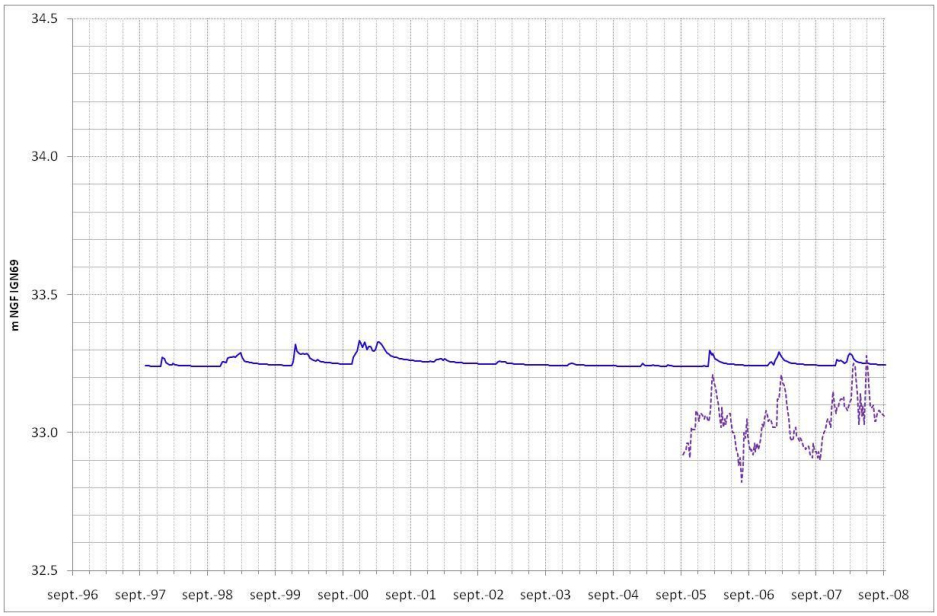
Ce piézomètre est situé sur la commune d'Oisy-le-Verger. Il est situé en bordure du Canal de la Sensée. Il capte les niveaux de craie. Il est géré par l'Institution Interdépartementale de la Vallée de la Sensée. La chronique piézométrique débute en 2005. Les niveaux de base sont bien traduits. Les amplitudes calculées sont trop fortes. L'influence du tronçon voisin de la Sensée et des étangs connectés est sans doutes trop faible dans le modèle.

Pz30



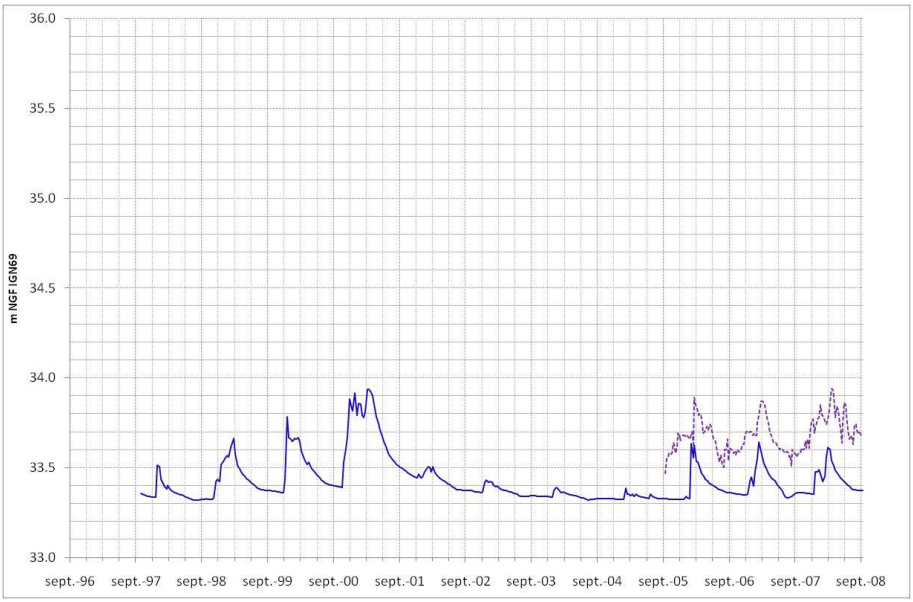
Ce piézomètre est situé sur la commune d'Aubigny-au-Bac. Il est situé en bordure du Marais d'Aubigny. Il capte les niveaux de craie. Il est géré par le SIDEN. La chronique piézométrique débute en 2005. Les niveaux de base et l'amplitude sont bien traduits.

Pz7



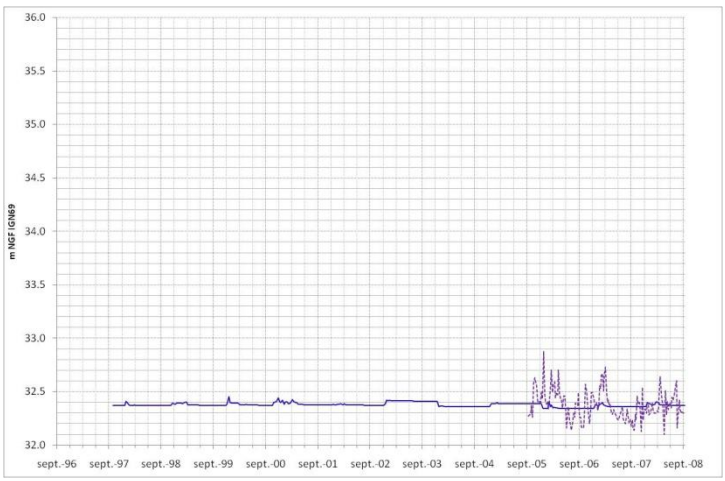
Ce piézomètre est situé sur la commune de Féchain. Il est situé au bord du Marais Billoir, à côté de la station d'épuration. Il est géré par l'Institution Interdépartementale de la Vallée de la Sensée. La chronique piézométrique débute en 2005. Tout au long de la chronique simulée, les niveaux de base se maintiennent autour d'une même cote. Ce maintien stable est dû à l'influence de la Sensée dont la cote de niveau d'eau ne varie pas dans le modèle.
Au contraire dans la réalité, on constate une légère rehausse de 0.1 m en 3 ans sur ce point et un battement annuel moyen de 0.3 m. Ces variations sont la conséquence des variations de cotes de la Sensée : les variations annuelles mesurées à ce niveau atteignent 0.4 m en moyenne et l'élévation progressive du niveau de la Sensée est de 0.3 m sur 3 ans.

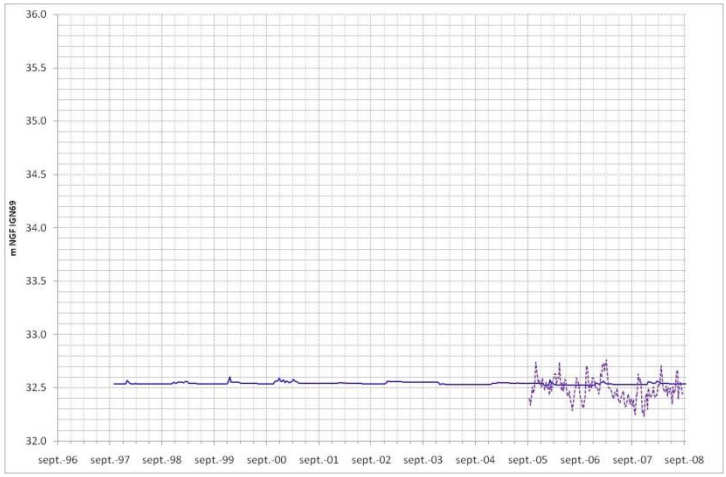
Pz8



Ce piézomètre est situé sur la commune d'Hem-Langlet. Il est situé en bordure du Canal de la Sensée. Il capte les niveaux de craie. Il est géré par l'Institution Interdépartementale de la Vallée de la Sensée. La chronique piézométrique débute en 2005. Les niveaux de base et l'amplitude sont bien traduits.

Pz9a, Pz9b

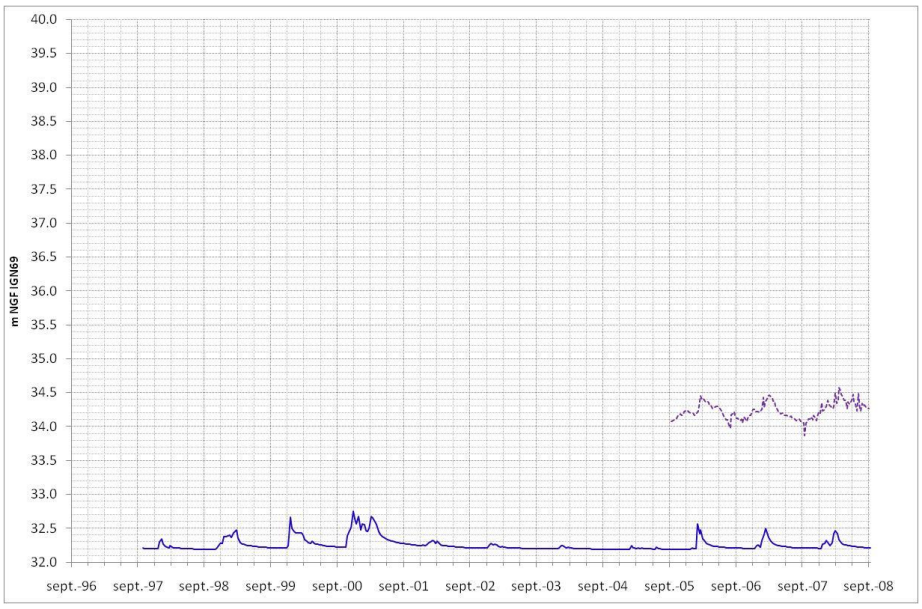




Ce piézomètre est situé sur la commune de Wavrechain-sous-Faulx. Ils sont situés entre les Marais Chantraine et les Mauvais Prés, à 50 et 150 m d'un forage d'AEP géré par le SIDEN Ils captent les niveaux de craie. Ils sont gérés par le SIDEN. La chronique piézométrique débute en 2005.

Les niveaux de base sont bien traduits. A cause de la proximité du captage, le battement de la nappe à cet endroit (0.4 m) n'est pas retranscrit.

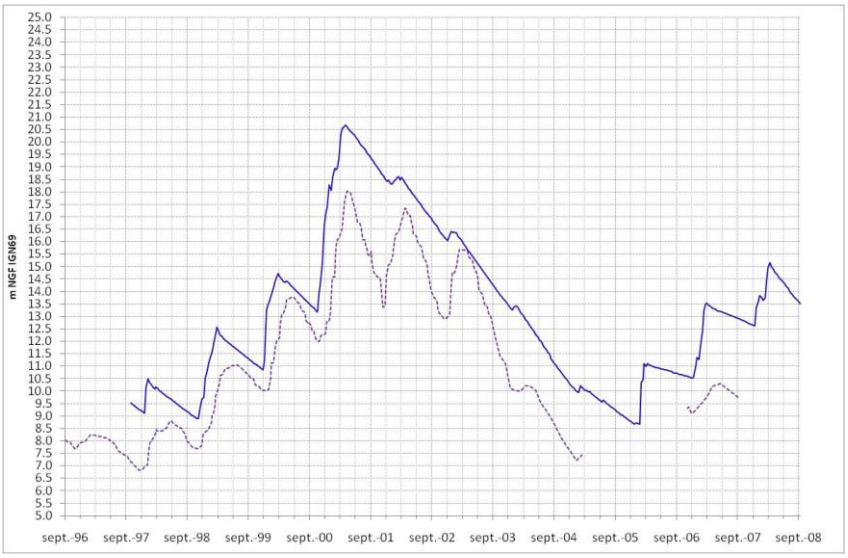
Pz10



Ce piézomètre est situé sur la commune de Paillencourt. Il est situé en bordure du Canal de la Sensée à proximité d'une zone de sources. Il capte les niveaux de craie. Il est géré par l'Institution Interdépartementale de la Vallée de la Sensée. La chronique piézométrique débute en 2005. Les niveaux de base sont trop bas (2 m) mais le battement est bien traduit.

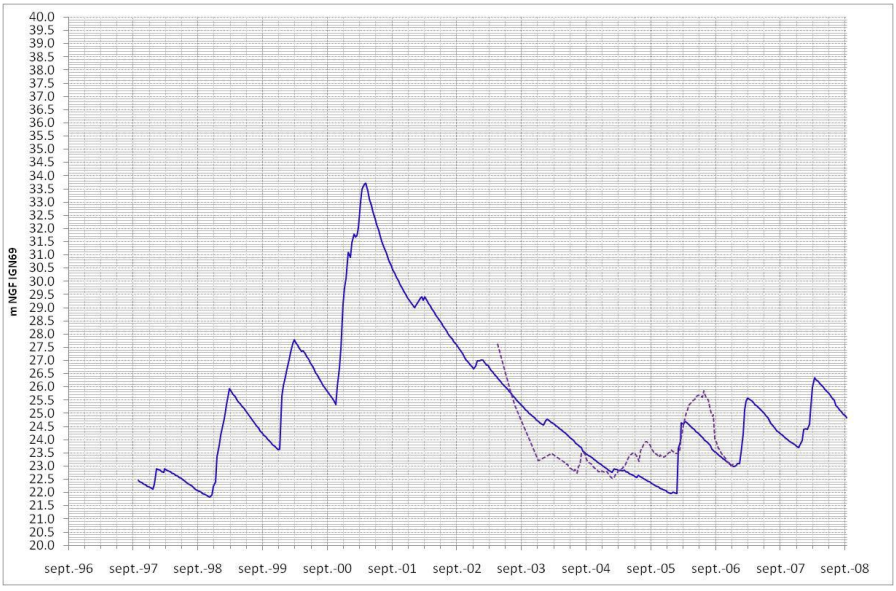
Nord de la Sensée, zone libre

Pz19



Ce piézomètre est situé sur la commune de Fenain, au nord de la Vallée de la Sensée, hors du territoire du SAGE. Il est géré par l'AEAP. Il est situé dans la zone de transition nappe captive-nappe libre. Il capte la craie. L'évolution des niveaux de base est bien retranscrite. Les battements sont également bien calculés de 1998 à 2001. Lors de la phase de baisse des niveaux piézométriques (2002-2005), les battements calculés sont trop faibles. Cependant, la baisse des niveaux est bien retranscrite.

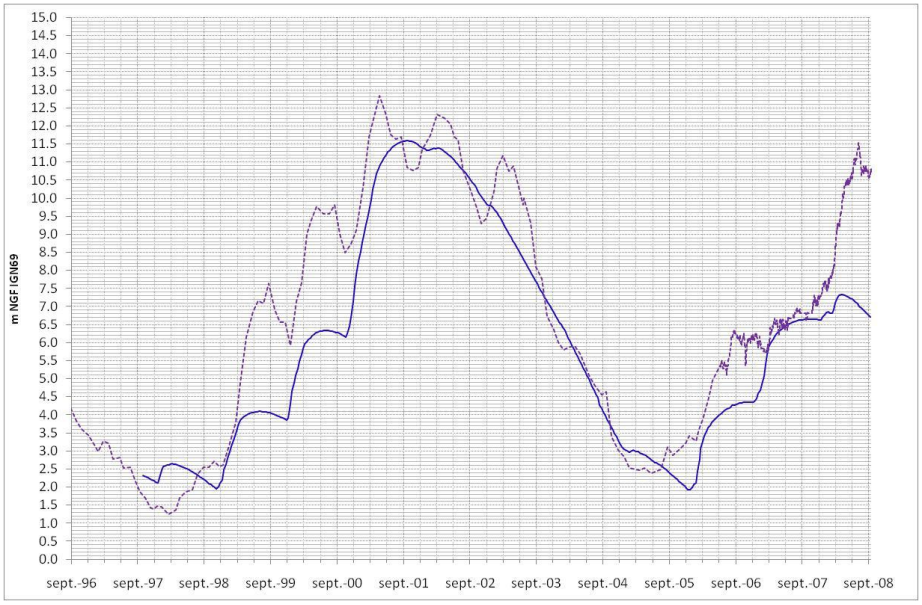
Pz25



Ce piézomètre est situé sur la commune d'Auberchicourt, au nord de la Vallée de la Sensée, hors du territoire du SAGE. Il est géré par l'AEAP. Il capte la craie libre. L'évolution des niveaux de base pour la période de mesure disponible est bien traduite.

- Sud de la Sensée, zone captive

Pz21 (00281X0002)



Ce piézomètre est situé sur la commune de Rieulay, au nord de la Vallée de la Sensée, hors du territoire du SAGE. Il est géré par l'AEAP. Il capte la craie en régime captif. L'évolution des niveaux de base pour la période de mesure disponible est bien traduite.