

Elaboration d'un outil de gestion des prélèvements d'eau sur le bassin de l'Avre

Phase 4b :
Construction et calage du modèle hydrogéologique
Phase 5 :
Exploitation du modèle

BRGM/RP-64826-FR
Juillet 2017

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 12RSE14

P.-Y. David, D. Pennequin, M. Servièrè, N. Amraoui
Avec la collaboration de
V. Hugot

Vérificateur :

Nom : Olivier Douez

Date : 18/09/2017

Signature :



Approbateur :

Nom : Claudie Carnec

Date : 30/11/2017

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.



Mots clés : Modélisation hydrogéologique, modèle maillé, craie, karst, Avre, Bassin versant, relation nappe-rivière, Marthe, Volumes Prélevables.

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

P.-Y. David, D. Pennequin, Servière M., Amraoui N. avec la collaboration de Hugot V., Elaboration d'un outil de gestion des prélèvements d'eau sur le bassin de l'Avre. Phase 4b : Construction et calage du modèle hydrogéologique et phase 5 : Exploitation du modèle. Rapport BRGM/RP-64826-FR. 219 pages, 118 ill., 10 tab., 8 annexes.

© BRGM, 2017, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Un niveau de prélèvements élevé, conjugué aux problèmes de disponibilité de la ressource en eau souterraine et d'impact écologique sur les masses d'eau superficielles en aval de Verneuil-sur-Avre (27), rend nécessaire une gestion équilibrée et durable de la ressource, qui prendrait à la fois en compte les besoins et les contraintes à respecter pour garantir sa préservation et sa protection, ainsi que celle des milieux aquatiques associés.

Le bassin de l'Avre fait actuellement l'objet d'un SAGE qui vise, entre autre, à sécuriser la distribution en eau potable et à optimiser les prélèvements d'eau dans le bassin.

Sa mise en place nécessite de disposer d'éléments d'appréciation utiles à la planification d'une politique de gestion durable des eaux souterraines dans le bassin.

A cet effet, la DREAL de Haute-Normandie, l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, Eau de Paris et le BRGM se sont unis pour réaliser une étude visant à évaluer l'impact des prélèvements et à définir des règles de gestion volumiques de la ressource en eau sur le bassin de l'Avre.

En réponse à cette sollicitation, le BRGM a conçu un programme d'étude en cinq étapes :

- Phase 1 : Etat de la connaissance : collecte des documents et données disponibles ;
- Phase 2 : Analyse des données : traitement des données et interprétation – bilan hydrologique et besoin éventuel d'acquisition complémentaire de connaissances ;
- Phase 3 : Acquisition de données complémentaires de terrain ;
- Phase 4a : Modélisation géologique numérique du bassin de l'Avre ;
- Phase 4b : Modélisation hydrodynamique des écoulements sur le bassin de l'Avre ;
- Phase 5 : Elaboration de règles de gestion volumiques de la ressource en eau prenant en compte l'analyse des usages et l'impact sur les milieux naturels.

L'objet de l'étude a consisté à mettre en place un outil de gestion dont l'objectif est d'aider la structure en charge de gérer la ressource en eau à déterminer les quotas de prélèvement pour chaque usage, en fonction de la situation hydrodynamique qui évolue dans le temps, dans le respect des différentes contraintes d'ordre technique, économique et environnementale en vigueur.

Les phases 1 et 2 et les phases 3 et 4a ont fait l'objet respectivement des rapports BRGM/RP-60458-FR de février 2012 et BRGM/RP-64817-FR de juin 2015.

Le présent rapport restitue le travail de construction, de calage (phases 4b) et d'exploitation (phase 5) du modèle de l'Avre.

La géométrie du modèle est héritée de celle du modèle géologique élaboré durant la première phase de l'étude. Le modèle hydrogéologique comporte cinq couches : (1) les alluvions et

formations à silex, (2) les sables du Perche, (3) la craie altérée, (4) la craie du Sénonien et du Turonien supérieur et moyen et (5) la craie du Turonien inférieur et du Cénomaniens.

La recharge et le ruissellement ont été déterminés à partir de données spatialisées de pluie issues de la grille AURELHY de Météo-France et de quatre chroniques pluviométriques journalières. Les paramètres de recharge ont été évalués par le biais de modélisations hydrologiques globales réalisées avec le logiciel GARDENIA.

Le réseau hydrographique principal a été explicitement intégré dans le modèle d'écoulement. Les paramètres qui dimensionnent les échanges nappes/rivières ont été estimés sur la base d'avis d'expert, avant d'être ajustés pendant le calage du modèle.

Une première affectation des paramètres hydrodynamiques a été faite pour chaque couche du modèle à partir de données issues des pompages d'essai et des connaissances d'experts locaux.

Les caractéristiques des prélèvements en nappe et en rivière sont issues des données fournies par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie et Eau de Paris. Lorsque les données mensuelles n'étaient pas disponibles, les chroniques ont été reconstituées à partir des éléments à disposition.

Le calage du modèle, en régime permanent puis en régime transitoire sur plus de vingt ans (1990-2012) au pas de temps mensuel, s'est appuyé sur les cartes piézométriques régionales disponibles, ainsi que sur plus de 80 mesures piézométriques ponctuelles réalisées en octobre 2006, une trentaine de chroniques piézométriques et cinq chroniques de débit enregistrées aux stations hydrométriques implantées sur le réseau hydrographique. Le calage a principalement consisté à ajuster les paramètres hydrogéologiques (perméabilité et coefficients d'emmagasinement), les paramètres de recharge et les paramètres dimensionnant les échanges nappe-rivière.

Les résultats du calage en régime transitoire sont satisfaisants malgré la complexité du domaine modélisé, localement karstiques. Les chroniques de débit simulées aux stations hydrométriques sont en bonne adéquation avec les mesures de terrain. Les niveaux piézométriques moyens, leurs fluctuations saisonnières et leurs évolutions pluriannuelles sont relativement bien reproduits sur la majorité des piézomètres. Il convient cependant de souligner que la reproduction des évolutions des débits et niveaux piézométriques, n'est pas totalement atteinte dans certains cas, du fait du comportement hydrodynamique complexe (notamment karstique) de l'hydrosystème dans certains secteurs et surtout d'incertitudes liées à des lacunes de connaissance ou de données. Les contraintes liées à la discrétisation de l'hydro-système peuvent parfois également y avoir contribué. Ces incertitudes ont été identifiées et listées au § 6.1. Le calage pourrait ainsi être encore amélioré dans certaines zones, sous réserve de disposer de données complémentaires. Des recommandations ont été établies à cet effet au § 6.2.

Le modèle hydrodynamique de l'hydro-système (nappe-rivières) ainsi construit apparaît toutefois suffisamment pertinent pour répondre aux principaux objectifs de l'étude qui étaient de mettre en place un outil de gestion destiné à aider la structure chargée de gérer la ressources en eau à définir des règles de prélèvements (volumes prélevables) et d'exploitation durable de celle-ci à l'échelle du bassin, qui permettent à la fois de satisfaire la demande en eau potable (locale et parisienne), de préserver les zones humides et de garder un débit réservé dans l'Avre en aval de Verneuil/Avre.

Ainsi, après les phases de construction, de calage et de validation du modèle intégré nappes-rivières, celui-ci a pu être utilisé en tant qu'outil d'aide à la décision pour atteindre les objectifs fixés, ou du moins certains d'entre eux. En effet, le « débit de référence » ou débit biologique des cours d'eau, qui constituait une des clefs d'entrée pour certaines des simulations prévues, n'a

pas pu être déterminé de manière rationnelle (celui-ci devait être établi par un groupe de travail en dehors du cadre de la présente étude, sur la base des contraintes liées aux écosystèmes en place). Aussi, en attendant qu'il puisse être défini, et pour ne pas trop retarder l'étude, le Comité de pilotage a donc retenu une approche adaptée au bassin pour au moins pouvoir déjà quantifier les impacts des différents scénarios de prélèvements sur le débit de l'Avre. Cette approche, fondée sur une démarche d'analyse différentielle, a consisté à calculer le ratio entre le QMNA5 impacté (issu d'une simulation sur 22 ans avec un niveau de prélèvement donné) et le QMNA5 naturel simulé (issu d'une simulation sur 22 ans sans prélèvement d'eau) ; la valeur de ce ratio a permis de constater et de comparer le pourcentage de dégradation du QMNA5 naturel dans les différents scénarii de prélèvements testés.

Il convient de souligner, que faute d'avoir pu déterminer un débit biologique à maintenir en aval des secteurs de captage, les calculs d'impact des prélèvements sur le Qmna5 naturel ne peuvent pas avoir de traduction biologique pour le milieu aquatique. Lorsque les débits de référence ou débits biologiques auront été définis, des simulations complémentaires pourront être relancées pour mieux déterminer le cadre d'exploitation, compatible avec les exigences des écosystèmes en place dans la rivière et dans les zones humides (établissement des volumes prélevables).

Dans le cadre de la présente étude, 7 scénarii ont été retenus par le COPIL et simulés :

- Scénario 1 : scénario de référence, sans prélèvement d'eau (débit total moyen prélevé nul), permettant de définir le débit naturel de l'Avre ;
- Scénarii 2a (débit total moyen prélevé de 1617 m³/h), 2b (débit total moyen prélevé de 6078 m³/h), 2c (débit total moyen prélevé de 2620 m³/h), : scénarii permettant de déterminer l'impact des prélèvements « actuels » sur le débit de l'Avre ;
- Scénario 3 : scénario permettant de déterminer l'impact des prélèvements agricoles sur le débit de l'Avre (prélèvements du scénario 2c auxquels sont retirés les prélèvements agricoles soit un débit total moyen prélevé de 2486 m³/h) ;
- Scénario 4 : scénario permettant de déterminer l'incidence de l'incertitude de la connaissance des prélèvements agricoles sur la gestion du milieu (prélèvements du scénario 2c avec remplacement des prélèvements agricoles de la base de données AESN par ceux estimées lors la phase 1 de l'étude AVRE (cf. rapport BRGM/RP-60458-FR) ; soit un débit total moyen prélevé de 3126 m³/h) ;
- Scénario 5 : scénario permettant de déterminer l'impact sur les débits de l'Avre du « fonctionnement en secours » (500m³/h) de deux forages de l'Agglomération du pays de Dreux (prélèvements du scénario 2c avec ajout du prélèvement supplémentaire envisagé par Dreux Agglomération).

Les résultats des simulations des scénarii 2a, 2b, 2c montrent que :

- Quelque soit le scénario de prélèvement envisagé, l'impact sur le débit naturel à l'étiage est faible à l'amont du bassin ;
- L'exploitation des sources de la Vigne et du Breuil au débit maximum autorisé (scénario 2b) provoque un impact très fort sur le débit naturel : le Qmna5 naturel est diminué de 79% (soit 1.08 m³/s) et 67% (soit 1.33 m³/s) respectivement aux stations d'Acon et Muzy ;
- Le scénario d'exploitation « médian » des sources de la Vigne et du Breuil (scénario 2c), provoque un impact significatif sur le débit naturel (hors prélèvements) de l'Avre, mais qui reste inférieur à 30% (moins de 30% de réduction du débit naturel de l'Avre) : le Qmna5 naturel est diminué de 25% (0.34 m³/s) et 30% (0.59 m³/s) respectivement aux stations d'Acon et Muzy.

Les résultats du scénario 3 indiquent que les prélèvements agricoles représentent ½ point (soit 0.06 m³/s) des 25% (0.341 m³/s) de dégradation du Qmna5 naturel constatée à Acon dans le

Scénario 2c, et presque un point ($0.015 \text{ m}^3/\text{s}$) des 29.5% ($0.556 \text{ m}^3/\text{s}$) de dégradation du Qmna5 naturel constatée à Muzy dans le scénario 2c. Ainsi, si les prélèvements agricoles connus dans la base de données de l'AESN semblent avoir un impact limité sur le QMNA5 de la rivière, le scénario 4 a en revanche montré que l'incertitude de la connaissance des prélèvements agricoles peut avoir une incidence forte sur la gestion du milieu. En effet, l'impact des prélèvements agricoles sur le débit du cours d'eau, dans le cas d'une prise en compte de la fourchette haute des prélèvements agricoles, est significatif : l'altération du Qmna5 naturel est augmentée de plus de 4 points supplémentaires aux stations d'Acon et de Muzy par rapport au scénario 2c (soit une diminution supplémentaire de $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ et $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ du débit naturel respectivement à ces deux stations).

Enfin le projet de pompage de secours par l'Agglomération du pays de Dreux dans le champ captant des Hauts-Prés à Vert-en-Drouais a été simulé dans le scénario 5. Par rapport au scénario 2c, la prise en compte de ces prélèvements de secours dégrade le Qmna5 naturel de plus de 6 points ($0.13 \text{ m}^3/\text{s}$) supplémentaires à la station de Muzy ; en effet le Qmna5 naturel est dégradé de 29,5% ($0.59 \text{ m}^3/\text{s}$) dans le scénario 2c et de 35,7% ($0.71 \text{ m}^3/\text{s}$) dans le scénario 5. Aucun impact supplémentaire n'est en revanche visible sur les stations amont (Acon, St Christophe, Randonnai).

Même si le modèle intégré nappes-rivières élaboré dans cette étude nécessite un affinage de son calage dans certains secteurs, il convient de souligner qu'il a permis d'approfondir beaucoup la connaissance des caractéristiques et du fonctionnement de l'hydro-système du bassin de l'Avre et, à ce niveau, de réaliser un grand pas en avant. Par ailleurs, même au stade de calage actuel, il a déjà permis de donner d'importants éléments de réponse qui pourront être utilisés dans le cadre d'une gestion durable de la ressource en eau, dans le bassin de l'Avre. Ce modèle pourra bien évidemment être affiné dans le futur au gré des acquisitions nouvelles de données (piézométriques, débitmétriques, etc...) et des besoins rencontrés pour la gestion et la protection de la ressource. Des recommandations sont données à cet effet au § 6.2.

En tout état de cause, il est peut-être utilisé pour beaucoup d'autres scénarii de gestion de la ressource, avec une précision dans les résultats qui dépendra de son degré de calage dans le ou les secteurs d'intérêt, moyennant sans doute, dans certains cas, un affinage préalable de son calage dans ce ou ces secteurs, voire d'adopter une approche relative ou différentielle.

Sommaire

1. Introduction.....	17
2. Rappel de notions d'hydrogéologie	19
2.1. AQUIFERE ET NAPPE	19
2.2. NAPPE LIBRE ET NAPPE CAPTIVE.....	20
2.3. CARACTERISATION D'UN AQUIFERE.....	21
2.3.1. Capacité de stockage	21
2.3.2. Capacité d'écoulement	23
3. Construction du modèle hydrogéologique	25
3.1. PRESENTATION DU CODE DE CALCUL UTILISE.....	25
3.1.1. Un modèle multicouche	25
3.1.2. Variables et paramètres d'entrée du modèle.....	26
3.2. GEOMETRIE DU SYSTEME AQUIFERE	29
3.2.1. Discrétisation verticale du modèle – horizons hydrogéologiques retenus.....	29
3.2.2. Extension du modèle et conditions aux limites	31
3.2.3. Discrétisation horizontale du modèle – maillage retenu	35
3.2.4. Traitement des failles.....	40
3.3. RECHARGE ET RUISSELLEMENT.....	40
3.3.1. Paramètres nécessaires à la modélisation.....	40
3.3.2. Répartition spatiale des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle (ETP)	41
3.3.3. Utilisation du modèle GARDENIA pour initialiser les paramètres de recharge du modèle spatialisé	42
3.3.4. Définition des zones de sols (zones hydroclimatiques)	50
3.4. RESEAU HYDROGRAPHIQUE	53
3.4.1. Représentation des écoulements de surface et des échanges nappe-rivière	53
3.4.2. Les paramètres définissant le réseau hydrographique	55
3.5. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES INITIAUX.....	59
3.5.1. Perméabilités	60
3.5.2. Coefficient d'emmagasinement.....	61
3.6. PRELEVEMENTS.....	62
3.6.1. Prélèvements pour l'alimentation en eau potable et l'industrie	63
3.6.2. Prélèvements pour l'irrigation.....	63
3.7. REJETS EN RIVIERE	65

3.8. INTEGRATION DES PRELEVEMENTS ET REJETS EN RIVIERE DES SOURCES DU BREUIL ET DE LA VIGNE DANS LE MODELE	66
4. Calage du modèle hydrodynamique.....	67
4.1. PROCEDURE DE CALAGE.....	67
4.1.1. Les objectifs du calage et les différentes étapes	67
4.1.2. Paramètres de calage du modèle	69
4.1.3. Données utilisées pour le calage du modèle	69
4.1.4. Déroulement du calage.....	83
4.2. RESULTATS DU CALAGE	84
4.2.1. Résultat du calage en régime permanent : carte piézométrique et diagramme de dispersion	84
4.2.2. Résultats du calage en régime transitoire : chroniques de débit et chroniques piézométriques	87
4.2.3. Paramètres ajustés à l'issue du calage.....	99
4.3. BILANS QUANTITATIFS DANS LE BASSIN DE L'AVRE	105
4.3.1. Bilan des flux globaux au niveau du système aquifère dans le bassin de l'Avre .	105
4.3.2. Bilan sur les rivières de l'ensemble de la zone modélisée.....	117
5. Exploitation du modèle : réalisation de scénarios et calcul des impacts.....	123
5.1. TENTATIVE D'ESTIMATION DES DEBITS MINIMUM BIOLOGIQUES (DMB).....	125
5.2. SCENARIO 1	126
5.3. SCENARII 2A, 2B ET 2C	130
5.3.1. Scénario 2a.....	132
5.3.2. Scénario 2b.....	132
5.3.3. Scénario 2c.....	133
5.3.4. Quantification de l'impact des 3 scénarii de prélèvements « actuels » sur le Qmna5 naturel.....	137
5.4. SCENARIO 3	138
5.5. SCENARIO 4	142
5.5.1. Rappel de l'estimation de la fourchette haute des prélèvements pour l'irrigation (extrait du rapport RP-60458-FR).....	142
5.5.2. Utilisation de cette estimation dans le cadre du scénario 4	146
5.5.3. Résultats du scénario 4	147
5.6. SCENARIO 5	150
6. Incertitudes et recommandations.....	155
6.1. INCERTITUDES	155

6.1.1. Contrôle des débits de l'Avre simulés en dehors des 3 stations de jaugeage de la DREAL.....	157
6.2. RECOMMANDATIONS.....	159
7. Conclusions	163
8. Bibliographie.....	167

Liste des illustrations

Illustration 1 : Zone saturée et zone non saturée d'un aquifère (Willeumier et al. 2014).....	20
Illustration 2 : Nappe libre et nappe captive : en 1, la nappe est libre ; en 2 la nappe est captive ; en 3 la nappe est captive et artésienne (Croiset et al. 2013).....	21
Illustration 3 : Porosité d'un aquifère, eau libre et eau liée (Croiset et al. 2013).....	22
Illustration 4 : Effet de la perméabilité sur un pompage : une perméabilité plus faible induit un rabattement plus important du niveau de la nappe (Croiset et al. 2013).....	23
Illustration 5 : Exemple de discrétisation d'un modèle maillé multicouche.....	26
Illustration 6: Environnement de fonctionnement de MARTHE (Croiset et al. 2013)	28
Illustration 7 : Carte des conduits karstiques supposés (en jaune) (Ah2D, Telosia, 2009).....	30
Illustration 8 : Extension de la zone modélisée	32
Illustration 9 : Conditions aux limites - portion 1	33
Illustration 10 : Conditions aux limites - portion 6.....	33
Illustration 11 : Conditions aux limites - portion 7.....	34
Illustration 12 : Conditions aux limites - portion 8.....	35
Illustration 13 : Extension du modèle globale et de la zone raffinée	36
Illustration 14 : Extension de la couche 1 des alluvions et formations à silex.....	37
Illustration 15 : Extension de la couche 2 des sables du Perche	38
Illustration 16 : Extension de la couche 3 dite de craie altérée	38
Illustration 17 : Extension de la couche 4 de la craie du Sénonien et Turonien supérieur et moyen	39
Illustration 18 : Extension de la couche 5 de la craie du Turonien inférieur et Cénomaniens	39
Illustration 19 : Zones climatiques et stations météorologiques de référence	42
Illustration 20 : Structure du modèle GARDENIA utilisé pour simuler le débit en rivière ainsi que le niveau piézométrique de la nappe drainée (Thiéry, 2014)	43
Illustration 21 : Pluviométrie moyenne annuelle selon la grille AURELHY établie par Météo France	46
Illustration 22 : Définition des quatre secteurs sur lesquels seront effectuées les modélisations gardenia.....	47
Illustration 23 : Unités de sol de la carte de l'INRA au millionième (source : base de données des sols de France INRA).....	52
Illustration 24 : Zones de sol retenues pour le modèle maillé	53
Illustration 25 : Réseau hydrographique de la zone d'étude	54
Illustration 26 : Acquisition sur le terrain de données relatives au réseau hydrographique en juin 2014 ...	56
Illustration 27 : Données relatives au réseau hydrographique	57
Illustration 28 : Acquisition de données relatives à la nature du lit des cours d'eau	58
Illustration 29 : Estimation des dérivations de l'Iton vers l'Avre (schéma utilisé dans le modèle spatialisé).....	59
Illustration 30 : Valeurs de débits spécifiques disponibles dans la zone d'étude.....	60
Illustration 31 : Valeurs de transmissivités disponibles dans la zone d'étude.....	61
Illustration 32 : Valeurs de coefficient d'emménagement disponibles dans la zone d'étude.....	62

Illustration 33 : Prélèvements (en m ³ /h) pour l'alimentation en eau potable et l'industrie dans les eaux de surface (en rouge) et dans les eaux souterraines (en bleu et en vert)	63
Illustration 34 : Répartition mensuelle des prélèvements pour l'irrigation du blé et de l'orge sur le bassin versant de l'Avre (David, 2012)	64
Illustration 35 : Prélèvements (en m ³ /h) pour l'irrigation dans les eaux de surface (1994 – 2012)	64
Illustration 36 : Prélèvements (en m ³ /h) pour l'irrigation dans les eaux souterraines (1994 – 2012)	65
Illustration 37 : Localisation des rejets en rivière dans la zone modélisée	66
Illustration 38 : Localisation des mesures ponctuelles piézométriques d'octobre 2006.....	70
Illustration 39 : Carte piézométrique de novembre 1990 (Planche B, BURGEAP, 1991).....	71
Illustration 40 : Carte piézométrique de mars 1991 (Planche C, BURGEAP, 1991).....	71
Illustration 41 : Carte piézométrique du Cénomani en mars 1994 (BRGM/RR-38582-FR)	72
Illustration 42 : Atlas hydrogéologique de Haute-Normandie - piézométrie hautes-eaux en 2001 (BRGM/RP-59301-FR, 2011)	73
Illustration 43 : Atlas hydrogéologique de Haute-Normandie - piézométrie basses-eaux en 2006 (BRGM/RP-59301-FR, 2011)	73
Illustration 44 : Carte piézométrique des moyennes eaux en 2001 pour le département d'Eure-et-Loir (CD28)	74
Illustration 45 : Carte piézométrique en juillet 2002 dans le département d'Eure-et-Loir (CD28).....	75
Illustration 46 : Carte piézométrique du Cénomani en octobre - novembre 2003 (Sogreah)	76
Illustration 47 : Carte piézométrique en mars 2009 sur le secteur aval de la vallée de l'Avre (BRGM/RP-58587-FR, 2010)	76
Illustration 48 : Carte piézométrique en octobre 2009 sur le secteur aval de la vallée de l'Avre (BRGM/RP-58587-FR, 2010)	77
Illustration 49 : Localisation des sources sur le secteur d'étude (source BSS et Base de données Karst de Haute-Normandie)	78
Illustration 50 : Stations de jaugeage disposant de chroniques de débits utilisées pour le calage du modèle en régime transitoire	79
Illustration 51 : Chronique de débits journaliers à Acon (H4230410) sur l'Avre entre 1990 et 2012	79
Illustration 52 : Chronique de débits journaliers à Muzy (H4250420) sur l'Avre entre 1990 et 2012	80
Illustration 53 : Chronique de débits journaliers à Saint-Christophe-sur-Avre (H4210410) sur l'Avre entre décembre 2004 et 2012.....	80
Illustration 54 : Chronique de débits journaliers à Bourth (H4330430) sur l'Iton entre décembre 1999 et 2012.....	81
Illustration 55 : Chronique de débits journaliers à Garnay (H4180410) sur la Blaise entre 1990 et juillet 2003.....	81
Illustration 56 : Localisation des jaugeages volants réalisés par la DREAL durant la période de calage du modèle (1990 – 2012)	82
Illustration 57 : Ouvrages disposant de chroniques piézométriques utilisées pour le calage du modèle	83
Illustration 58 : Diagramme de dispersion du calage piézométrique du modèle en régime permanent pour octobre 2006.....	84
Illustration 59 : Carte piézométrique simulée par le modèle à l'issue du calage en régime permanent et mesures piézométriques ponctuelles relevées en octobre 2006	85

Illustration 60 : Cartes piézométriques simulée issue du calage en régime permanent (en haut) et établie sur la base de données observées (en bas) pour le mois d'octobre 2006 (équidistance de 10 m entre les courbes de niveaux)	86
Illustration 61 : Direction des écoulements souterrains.....	87
Illustration 62 : Diagramme de dispersion du calage piézométrique en octobre 2006 (piézométrie observée : données ponctuelles issues de la campagne de mesure d'octobre 2006 ; piézométrie simulée : piézométrie moyenne du mois d'octobre 2006).....	88
Illustration 63 : Carte piézométrique simulée en régime transitoire (isopièzes tous les 20 mètres) et mesures piézométriques ponctuelles observées en octobre 2006 (valeurs en m NGF)	89
Illustration 64 : Cartes piézométriques simulée en régime transitoire (en haut) et issues des valeurs relevées sur le terrain (en bas) pour le mois d'octobre 2006 (équidistance de 10 m des courbes de niveaux)	90
Illustration 65 : Chroniques piézométriques observées (bleu) et simulées (rouge) en rive gauche de l'Avre dans le secteur karstique (pas de temps journalier simulé et observé)	91
Illustration 66 : Chroniques piézométriques observées (bleu) et simulées (rouge) en rive droite de l'Avre dans le secteur karstique (pas de temps journalier simulé et observé)	92
Illustration 67 : Chroniques piézométriques observées (bleu) et simulées (rouge) en rive droite de l'Avre à l'aval du bassin (pas de temps journalier simulé et observé).....	93
Illustration 68 : Chroniques piézométriques observées (bleu) et simulées (rouge) en rive gauche de l'Avre à l'aval du bassin (pas de temps journalier simulé et observé).....	94
Illustration 69 : Chroniques piézométriques observées (bleu) et simulées (rouge) en amont du bassin dans le secteur des sables du Perche (pas de temps journalier simulé et observé)	95
Illustration 70 : Stations hydrométriques dont les chroniques de débit ont été utilisées pour le calage dans le bassin versant de l'Avre.....	96
Illustration 71 : Débit de l'Avre à Saint-Christophe-sur-Avre.....	97
Illustration 72 : Débit de l'Avre à Acon.	98
Illustration 73 : Débit de l'Avre à Muzy.	99
Illustration 74 : Système faille étanche de Verneuil	101
Illustration 75 : Faille drainante de Nonancourt – Damville.....	102
Illustration 76 : Linéament jouant un rôle étanche au Sud-Ouest de Saint-André-sur-Eure.....	103
Illustration 77 : perméabilités (m/s) de la couche 3 (« craie altérée ») du modèle dans le secteur amont des sources de la Vigne et de Verneuil-sur-Avre. Des perméabilités fortes (de 1.10^{-2} à 0.1 m/s) ont été affectés le long de certains des linéaments présentés à l'illustration 7 pour représenter des écoulements préférentiels de type « axes fracturés » voir « karstique.....	104
Illustration 78 : Période de recharge (Stockage, débits positifs) et de vidange (déstockage, débits négatifs) de la nappe de la craie dans le bassin de l'Avre entre 1992 et 2012.....	106
Illustration 79 : Bilans quantitatifs réalisés pour le système aquifère dans le bassin versant topographique de l'Avre (d'après les résultats de la modélisation sur la période 1990-2012).....	107
Illustration 80 : Bilan quantitatif moyen réalisé pour la nappe dans le bassin versant topographique de l'Avre (d'après les résultats de la modélisation sur la période 1990-2012) – prise en compte de la contribution nette des échanges nappes/rivières	110
Illustration 81 : Débit d'échange nappes/rivières simulé au pas de temps 6148 (31/10/2006) – Débit positif = la rivière alimente la nappe ; Débit négatif = la nappe alimente la rivière – croix noire n°1 = station de jaugeage de Saint-Christophe-sur-Avre, croix noire n°2 = station de jaugeage d'Acon ; croix noire n°3 = station de jaugeage de Muzy.....	113

Illustration 82 : Débit d'échange nappes/rivières simulé au pas de temps 7921 (08/09/2011) – Débit positif = la rivière alimente la nappe ; Débit négatif = la nappe alimente la rivière – croix noire n°1 = station de jaugeage de Saint-Christophe-sur-Avre, croix noire n°2 = station de jaugeage d'Acon ; croix noire n°3 = station de jaugeage de Muzy.....	114
Illustration 83 : Débit d'échange nappes/rivières simulé au pas de temps 8281 (02/09/2012) – Débit positif = la rivière alimente la nappe ; Débit négatif = la nappe alimente la rivière – croix noire n°1 = station de jaugeage de Saint-Christophe-sur-Avre, croix noire n°2 = station de jaugeage d'Acon ; croix noire n°3 = station de jaugeage de Muzy.....	115
Illustration 84 : Bilans quantitatifs réalisés pour les différentes rivières de la zone modélisée (Avre, Blaise, et partiellement Iton et Eure) (d'après les résultats de la modélisation sur la période 1990-2012).....	118
Illustration 85 : bilan des flux (quantitatif) réalisé pour les différentes rivières de la zone modélisée (Avre, Blaise, et partiellement Iton et Eure) (d'après les résultats de la modélisation sur la période 1990-2012) – prise en compte de la contribution nette des échanges nappes/rivières	121
Illustration 86 : Synthèse des éléments concernant les 7 scénarii testés sur le modèle nappe-rivière du bassin de l'Avre	124
Illustration 87 : Comparaison des débits de l'Avre simulés avec et sans prélèvements (réels pour la période 1990-2012) aux trois stations hydrologiques de Saint-Christophe-sur-Avre, Acon et Muzy – période : 1990 -2012	128
Illustration 88 : Calcul des Qmna naturels par ajustement à une loi de Galton pour les stations d'Acon et de Muzy (valeurs en m3/h)	129
Illustration 89 : Résultats des calculs des Qmna naturels simulés (en m3/s) pour les stations d'Acon et de Muzy (calculés sur les 23 années simulées : 1990 à 2012).....	129
Illustration 90 : Hypothèse des prélèvements « actuels » retenus pour les scénarii 2a, 2b et 2c	131
Illustration 91 : localisation des principaux champs captants faisant l'objet des prélèvements « actuels » retenus pour les scénarii 2a, 2b et 2c	132
Illustration 92 : Comparaison des débits de l'Avre simulés dans le cadre des scénarii 1 et 2a aux trois stations de Saint-Christophe-sur-Avre, Acon et Muzy	134
Illustration 93 : Comparaison des débits de l'Avre simulés dans le cadre des scénarii 1 et 2b aux trois stations de Saint-Christophe-sur-Avre, Acon et Muzy	135
Illustration 94 : Comparaison des débits de l'Avre simulés dans le cadre des scénarii 1 et 2c aux trois stations de Saint-Christophe-sur-Avre, Acon et Muzy	136
Illustration 95 : quantification de l'impact des différents scénarii de prélèvements « actuels » sur le Qmna5 naturel. Réduction du Qmna5 naturel simulé en % dans le tableau du haut et en débit (m3/s) dans le tableau du bas	137
Illustration 96 : Comparaison des débits de l'Avre simulés dans le cadre des scénarii 1,2c et 3 aux trois stations de Saint-Christophe-sur-Avre, Acon et Muzy	140
Illustration 97 : Comparaison des débits de l'Avre simulés dans le cadre des scénarii 1,2c et 3 aux trois stations de Saint-Christophe-sur-Avre, Acon et Muzy – zoom sur les gammes de débits d'étiage.....	141
Illustration 98 : Groupes de culture pratiqués dans la zone d'étude de la phase 1 de l'étude Avre ainsi que leur surface respectives (données RPG 2009, ASP) (extrait du rapport BRGM/RP-60458-FR)	143
Illustration 99 : Cartographie des groupes de culture pratiqués dans la zone d'étude (données RPG 2009, ASP) (extrait du rapport BRGM/RP-60458-FR)	144
Illustration 100 : Extraction des parcelles potentiellement irriguées par recoupement SIG de la position des ouvrages de prélèvement agricoles (tampon de 100m autour de chaque ouvrage de prélèvement) et des ilots du RPG sur lesquels sont cultivés des cultures nécessitant de l'irrigation (blé, orge, pois et maïs) (extrait du rapport BRGM/RP-60458-FR).....	145

Illustration 101 : Estimation de la fourchette haute des prélèvements liés à l'irrigation (extrait du rapport BRGM/RP-60458-FR)	146
Illustration 102 : Comparaison des prélèvements agricoles en nappe pris en compte dans les scénarii 2c et 4	146
Illustration 103 : Comparaison des débits de l'Avre simulés dans le cadre des scénarii 1,2c,3 et 4 aux trois stations de Saint-Christophe-sur-Avre, Acon et Muzy.....	148
Illustration 104 : Comparaison des débits de l'Avre simulés dans le cadre des scénarii 1,2c,3 et 4 aux trois stations de Saint-Christophe-sur-Avre, Acon et Muzy – zoom sur les gammes de débits d'étiage..	149
Illustration 105 : Caractéristiques des captage des Prés Hauts (Setec, 2014)	150
Illustration 106 : prélèvements (m ³ /h) utilisés pour le calage du modèle pour les forages 02163X0035 et 02163X0038	151
Illustration 107 : prélèvements (m ³ /h) utilisés pour au scénario 2c pour les forages 02163X0035 et 02163X0038	151
Illustration 108 : prélèvements (m ³ /h) utilisés pour au scénario 5 pour les forages 02163X0035 et 02163X0038	151
Illustration 109 : Comparaison des débits de l'Avre simulés dans le cadre des scénarii 1,2c et 5 à la station de Muzy	152
Illustration 110 : comparaison entre les débits moyen mensuels restitués par Eau de Paris à l'Avre (part du débit non capté des sources du Breuil et de la Vigne), les débits moyens mensuels de l'Avre simulés à Courteilles et les débits mesurés sur cette même commune lors des deux jaugeages réalisés en septembre 2011 et 2012 par la DREAL Normandie.....	157
Illustration 111 : comparaison entre les débits de l'Avre simulés à Montigny-sur-Avre et les débits ponctuels mesurés (jaugeage ponctuels de la DREAL et de l'AESN)	158
Illustration 112 : comparaison entre les débits de l'Avre simulés à Courteilles (lieu-dit Montuel), Montigny-sur-Avre et à Acon	159
Illustration 113 : Réseau piézométrique complémentaire dont le suivi au pas de temps mensuel est réalisé par le SIVA depuis l'automne 2015 (source : SIVA).....	161
Illustration 114 : Chroniques piézométriques observées (bleu) et simulées (rouge) en rive gauche de l'Avre dans le secteur karstique.....	201
Illustration 115 : Chroniques piézométriques observées (bleu) et simulées (vert) en rive droite de l'Avre dans le secteur karstique.....	203
Illustration 116 : Chroniques piézométriques observées (bleu) et simulées (vert) en rive droite de l'Avre à l'aval du bassin	203
Illustration 117 : Chroniques piézométriques observées (bleu) et simulées (vert) en rive gauche de l'Avre à l'aval du bassin	203
Illustration 118 : Chroniques piézométriques observées (bleu) et simulées (vert) en amont du bassin dans le secteur des sables du Perche	204

Liste des tableaux

Tableau 1 : Valeurs de porosité efficace pour diverses formations (source : guide d'application de l'arrêté interministériel du 11 septembre 2003, MEDD, 2004)	22
Tableau 2 : Classification des aquifères selon leur perméabilité	23
Tableau 3 : Couches du modèle hydrogéologique.....	29

Tableau 4 : Caractéristiques du maillage du modèle	37
Tableau 5 : Détermination de quatre zones climatiques avec une station météorologique de référence affectée à chaque zone	46
Tableau 6 : Détermination des stations fictives de pluie par pondération des stations pluviométriques	47
Tableau 7 : Anomalies traitées dans les chroniques de pluie	48
Tableau 8 : Valeurs initiales des paramètres de recharge affectés au modèle, issues des résultats des modélisations réalisées avec GARDENIA.....	50
Tableau 9 : Perméabilités et emmagasinement libres ajustés à l'issue du calage	100
Tableau 10 : Paramètres de recharge ajustés à l'issue du calage	105

Liste des annexes

Annexe 1 Présentation du logiciel MARTHE (Modélisation d'Aquifères avec maillage Rectangulaire, Transport et Hydrodynamique)	169
Annexe 2 Principes et résultats de calage des modèles GARDENIA.....	173
Annexe 3 Calcul de la répartition mensuelle des prélèvements pour l'irrigation.....	193
Annexe 4 Chroniques de débit simulées et observées aux stations hydrométriques (simulés au pas de temps journalier)	197
Annexe 5 Chroniques piézométriques simulées et observées dans les ouvrages retenus pour le calage du modèle.....	201
Annexe 6 Distribution des perméabilités et des coefficients d'emmagasinement à l'issue du calage.....	205
Annexe 7 Support de la présentation faite par le SIVA lors de la réunion du COPIL 7 le 05/07/2016	213
Annexe 8 Comparaison des QMNA5 calculés pour chaque scénario avec les DMB et les 10iemes du module pour chaque station de jaugeage de l'Avre	217

1. Introduction

Un niveau de prélèvements élevé, conjugué aux problèmes de disponibilité de la ressource en eau souterraine et d'impact écologique sur les masses d'eau superficielles en aval de Verneuil-sur-Avre (27), rend nécessaire une gestion équilibrée et durable de la ressource, qui prendrait à la fois en compte les besoins et les contraintes à respecter pour garantir sa préservation et sa protection, ainsi que celle des milieux aquatiques associés.

Le bassin de l'Avre fait actuellement l'objet d'un SAGE qui vise, entre autre, à sécuriser la distribution en eau potable et à optimiser les prélèvements d'eau dans le bassin.

Sa mise en place nécessite de disposer d'éléments d'appréciation concrets et utiles à la planification d'une politique de gestion durable des eaux souterraines dans le bassin.

A cet effet, la DREAL de Haute-Normandie, l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, Eau de Paris et le BRGM se sont unis pour réaliser une étude visant à évaluer l'impact des prélèvements et à définir des règles de gestion volumiques de la ressource en eau sur le bassin de l'Avre.

En réponse à cette sollicitation, le BRGM (Direction Régionale de Normandie) a conçu un programme d'étude en cinq étapes :

- Phase 1 : Etat de la connaissance : collecte des documents et données disponibles ;
- Phase 2 : Analyse des données : traitement des données et interprétation – bilan hydrologique et besoin éventuel d'acquisition complémentaire de connaissances ;
- Phase 3 : Acquisition de données complémentaires de terrain ;
- Phase 4a : Modélisation géologique numérique du bassin de l'Avre ;
- Phase 4b : Modélisation hydrodynamique des écoulements sur le bassin de l'Avre ;
- Phase 5 : Elaboration de règles de gestion volumiques de la ressource en eau prenant en compte l'analyse des usages et l'impact sur les milieux naturels.

La première partie de l'étude, couvrant la collecte et une première analyse des données, la synthèse hydrogéologique et la construction du modèle géologique, a été présentée dans les rapports BRGM/RP-60458-FR (David, 2012) et BRGM/RP-64817-FR (David et al., 2015).

Le présent rapport fait état des résultats des phases 4b et 5.

2. Rappel de notions d'hydrogéologie

Ce chapitre est issu du rapport BRGM/RP-62648-FR (Croiset N., Wuilleumier A., Bessière H., Gresselin F., 2013) sur la modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives (phase 2 : Construction et calage du modèle hydrogéologique).

Les descriptions, tableaux et figures présentés dans les chapitres suivants sont très largement inspirés du guide d'application de l'arrêté interministériel du 11 septembre 2003 (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable), dont la référence est donnée en bibliographie. On pourra s'y reporter pour plus d'informations.

2.1. AQUIFERE ET NAPPE

Deux termes sont régulièrement utilisés par les hydrogéologues lorsque l'on évoque les eaux souterraines : aquifère et nappe.

Un aquifère peut être défini¹ comme un ensemble de roches perméables, reposant sur -et parfois recouvert par- des roches moins perméables, comportant une zone saturée² et conduisant suffisamment l'eau pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables.

Une nappe est quant à elle définie comme l'« ensemble de l'eau présente dans la zone saturée d'un aquifère, dont toutes les parties sont en liaison hydraulique » (Castany et al. 1977).

En simplifiant, l'aquifère est le contenant (« le réservoir ») dans lequel s'écoule une nappe (le contenu).

Un aquifère comporte une zone saturée et, le cas échéant, une zone non saturée (cf. Illustration 1). La zone non saturée correspond à la partie de l'aquifère dans laquelle les « vides » de la roche ne sont pas entièrement saturés d'eau.

¹ Définition du Comité National Français des Sciences Hydrologiques

² La zone saturée d'un aquifère correspond à la zone du sous-sol dans laquelle l'eau occupe complètement les interstices des roches.

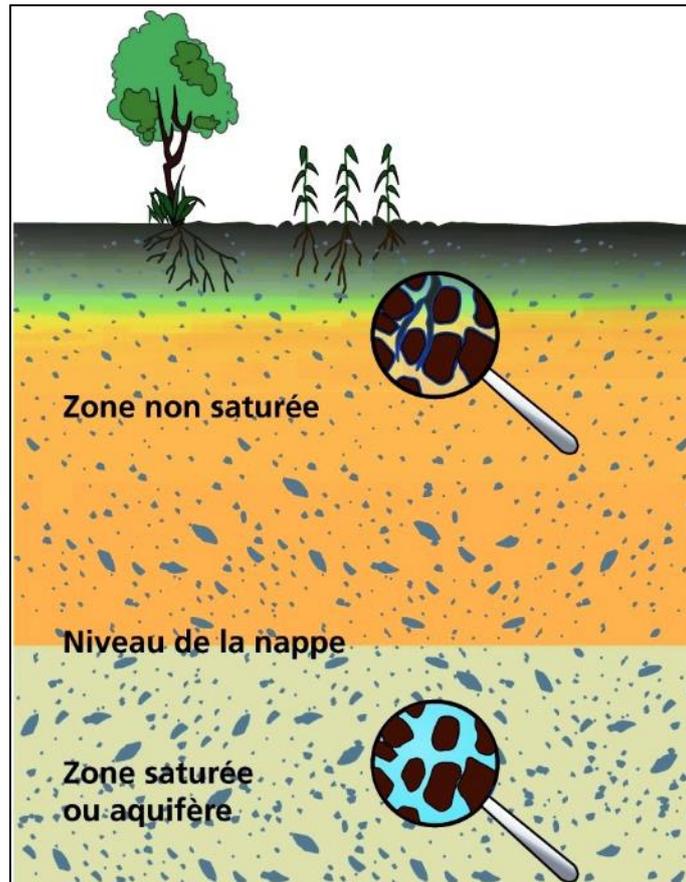


Illustration 1 : Zone saturée et zone non saturée d'un aquifère (Willeumier et al. 2014)

2.2. NAPPE LIBRE ET NAPPE CAPTIVE

Selon les conditions géologiques et topographiques – parfois artificiellement modifiées – une nappe se trouve en situation de « nappe libre » ou de « nappe captive ».

Une nappe libre repose sur une couche très peu perméable et elle est surmontée d'une zone non saturée au sein de l'aquifère. Elle est donc soumise à la pression atmosphérique. C'est en général la première nappe rencontrée depuis la surface.

Dans une nappe captive, l'eau est confinée dans l'aquifère entre deux formations géologiques très peu perméables. Elle est donc mise sous pression. Ceci se produit souvent dans des aquifères profonds mais peut aussi être observé à quelques dizaines de mètres de profondeur.

Lorsqu'un forage atteint une nappe captive, le niveau de l'eau remonte dans le forage. Ce niveau, exprimé en altitude par rapport au niveau de la mer, définit le niveau piézométrique. Si ce niveau se situe au-dessus de la surface du sol, l'eau jaillit naturellement. On dit alors que le forage est artésien.

L'illustration 2 présente les différents cas évoqués précédemment.

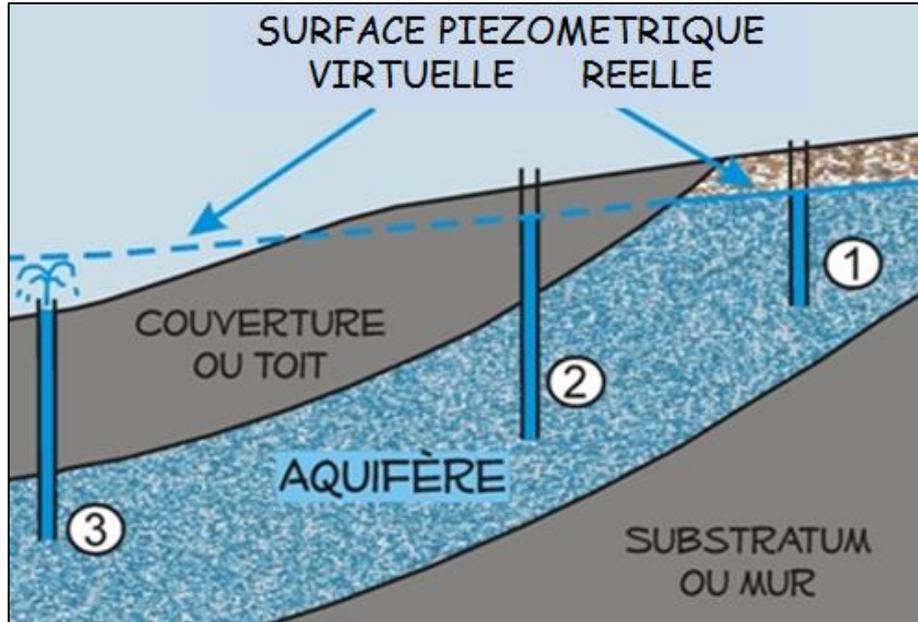


Illustration 2 : Nappe libre et nappe captive : en 1, la nappe est libre ; en 2 la nappe est captive ; en 3 la nappe est captive et artésienne (Croiset et al. 2013)

2.3. CARACTERISATION D'UN AQUIFERE

De nombreux paramètres permettent de qualifier les propriétés d'un aquifère. Quelques-uns sont cités ci-après, selon leur capacité à qualifier une fonction de stockage de l'aquifère ou une fonction d'écoulement dans l'aquifère.

2.3.1. Capacité de stockage

La quantité d'eau qu'un aquifère emmagasine dépend de ses dimensions (étendue, extension) et de la porosité des roches qui le constituent. La porosité d'une roche correspond au ratio entre le volume des « vides » dans la roche et le volume total. Une roche comporte en effet des vides résiduels entre les grains ou blocs qui la constituent (cf. Illustration 3). Cette porosité varie de quelques pourcents dans une roche compacte et massive (par exemple un basalte massif) à plus de 40% dans des argiles (la porosité des argiles n'est cependant pas exploitable en raison de la très petite taille des pores, laquelle induit d'importants phénomènes de capillarité).

La notion de porosité est essentielle car c'est elle, avec le volume du réservoir aquifère, qui détermine le volume d'eau contenu dans un aquifère. Néanmoins, seule une partie de l'eau contenue dans l'aquifère est disponible pour les écoulements. En effet, une partie de l'eau contenue au sein des pores est liée aux grains de la roche par des forces de capillarité. On l'appelle l'eau liée, par opposition à l'eau disponible pour les écoulements, dénommée l'eau libre (cf. Illustration 3).

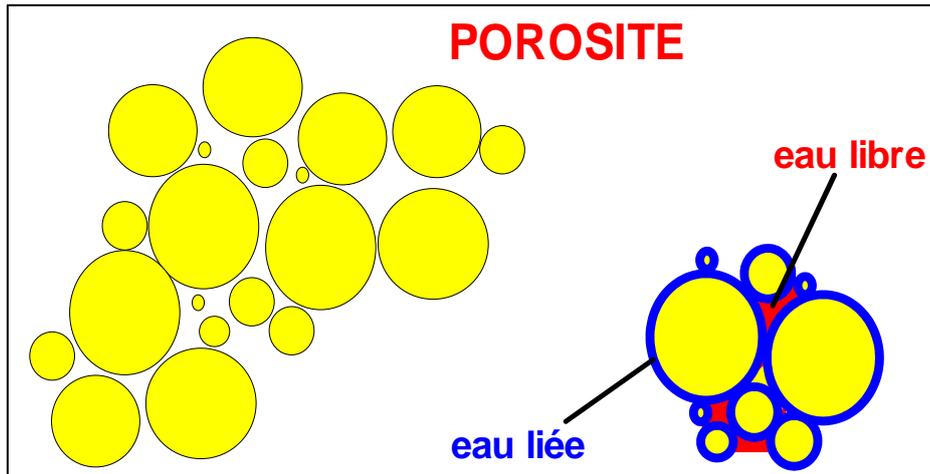


Illustration 3 : Porosité d'un aquifère, eau libre et eau liée (Croiset et al. 2013)

On définit donc une porosité efficace, correspondant schématiquement au ratio entre le volume d'eau libre qu'une roche peut contenir et le volume total de la roche. Cette « porosité efficace » est à bien distinguer de la « porosité » : pour une argile par exemple, la porosité dépasse 40%, tandis que la porosité efficace est généralement inférieure à 1%. Le Tableau 1 fournit des exemples de valeurs de porosité efficace.

Graviers	25%
Sable et graviers	20%
Sable fin, grès	10%
Graviers argileux, cimentés	5%
Sables argileux	2 à 4%
argile	< à 1%
Craie	2 à 5 %

Tableau 1 : Valeurs de porosité efficace pour diverses formations (source : guide d'application de l'arrêté interministériel du 11 septembre 2003, MEDD, 2004)

En nappe libre, la porosité efficace est assimilable au coefficient d'emménagement (calculé comme le volume d'eau libéré gravitairement par surface unitaire d'une nappe dont la surface libre baisserait de 1 m).

On définit également un coefficient d'emménagement pour les nappes captives. Dans ce cas, la quantité d'eau libérée pour une baisse d'un mètre du niveau piézométrique est bien plus faible puisqu'elle n'est due qu'à la décompression de l'eau et de la roche réservoir.

On définit un coefficient d'emménagement spécifique, dont l'unité s'exprime en m^{-1} , qui correspond à la quantité d'eau libérée par un cube aquifère d'un mètre carré de section et un mètre d'épaisseur saturée pour une baisse d'un mètre du niveau piézométrique.

2.3.2. Capacité d'écoulement

L'aptitude d'un aquifère à laisser circuler l'eau est caractérisée par la notion de perméabilité (exprimée en m/s). Plus la perméabilité est élevée, meilleure est la capacité de l'aquifère à laisser circuler l'eau. L'effet de la perméabilité sur un pompage est présenté en Illustration 4 : plus la perméabilité est faible, plus le rabattement est important. Des exemples de valeurs de perméabilité sont fournis au Tableau 2.

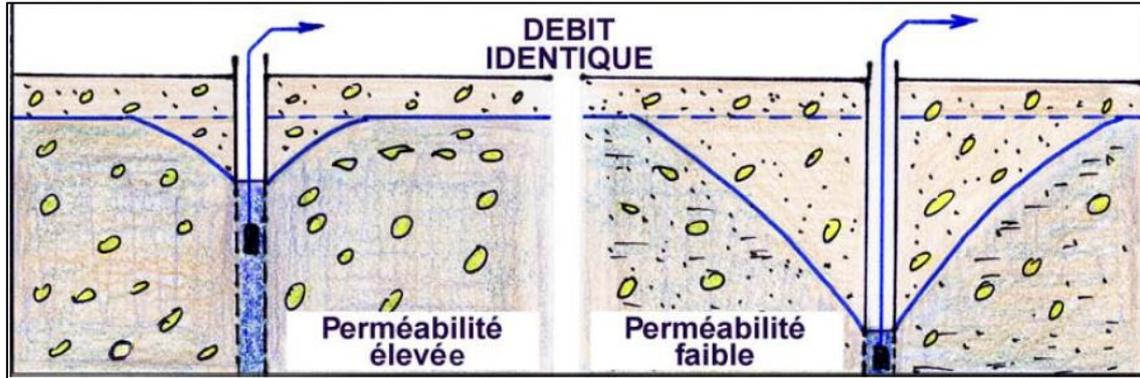


Illustration 4 : Effet de la perméabilité sur un pompage : une perméabilité plus faible induit un rabattement plus important du niveau de la nappe (Croiset et al. 2013)

Valeur de la Perméabilité	Classification hydrogéologique	Valeur de l'aquifère	Exemple de roche
10^{-2} à 10^{-4} m/s	perméable	très bon à bon	Sables et Gravier
10^{-5} m/s	assez perméable	assez bon	Calcaires gréseux
10^{-6} à 10^{-7} m/s	peu perméable	médiocre à mauvais	Limons, Marnes
égale ou inférieure à 10^{-8} m/s	très peu perméable	non aquifère	Argiles

Tableau 2 : Classification des aquifères selon leur perméabilité

Un autre paramètre utilisé en hydrogéologie (car il est déduit des pompages d'essai généralement effectués après la réalisation d'un forage) est la transmissivité. Exprimée en m^2/s , elle est égale au produit de la perméabilité par l'épaisseur saturée de l'aquifère.

Dans les modèles maillés d'écoulement souterrain, des valeurs de perméabilité sont affectées aux mailles et la transmissivité de l'aquifère varie automatiquement en fonction du niveau de nappe simulé par le logiciel (cas des nappes libres). Les valeurs de perméabilité attribuées au modèle sont généralement déduites des transmissivités déduites des pompages d'essai, par le biais d'une estimation de l'épaisseur aquifère saturée.

En l'absence de valeurs de perméabilité ou de transmissivité, le débit spécifique peut apporter une première approximation de la capacité d'un aquifère à laisser l'eau circuler en son sein. Ce paramètre, exprimé en $m^3/h/m$, est calculé comme le ratio entre un débit de pompage et le rabattement mesuré dans le forage pour ce débit. Le débit spécifique intégrant les pertes de charges quadratiques associées au forage et à son équipement, il ne reflète cependant pas uniquement les propriétés de l'aquifère.

3. Construction du modèle hydrogéologique

« Construire un modèle maillé, c'est traduire numériquement, dans des fichiers reconnus par le logiciel de modélisation, le schéma hydraulique sous-tendant le modèle conceptuel d'écoulement élaboré à l'issue de la synthèse hydrogéologique initiale. Il s'agit donc de transposer un concept hydrogéologique en une série de fichiers constitutifs d'un modèle numérique, les données concernées ayant déjà été analysées et traitées pendant la synthèse hydrogéologique initiale et l'éventuelle modélisation géologique 3D associée »- (Barthélemy et Seguin, 2013).

Ainsi que présenté dans le rapport de « Recommandations pour la modélisation maillée des écoulements souterrains » (Barthélemy et Seguin, 2013), la construction d'un modèle maillé comporte plusieurs étapes, détaillées dans les paragraphes suivants :

- Définition précise de l'extension horizontale et verticale du domaine à modéliser et définition des conditions aux limites ;
- Choix du logiciel et de la discrétisation de l'hydro-système, dont le maillage, en fonction de la connaissance de la géométrie des couches et des spécificités hydrogéologiques à prendre en compte ;
- Construction du maillage, définition de la géométrie du système aquifère par assignation des cotes de toit et mur à chacune des mailles du modèle ;
- Définition des flux de recharge et de ruissellement ;
- Définition du réseau hydrographique et des échanges nappe-rivière ;
- Affectation des propriétés hydrogéologiques à chacune des mailles ;
- Distribution des débits de pompage dans les mailles concernées.

3.1. PRESENTATION DU CODE DE CALCUL UTILISE

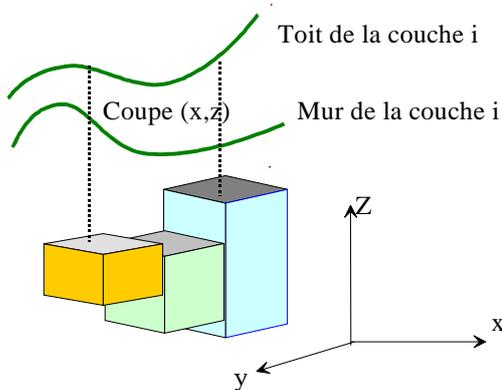
3.1.1. Un modèle multicouche

Le code de calcul retenu pour cette étude est le logiciel MARTHE (Thiéry, 1990), développé au BRGM et utilisé depuis plus de 25 ans dans de très nombreux projets de modélisation hydrogéologique. Il a notamment servi à la construction de plusieurs modèles d'extension régionale de gestion de la ressource, comme par exemple :

- Le modèle Nord-Aquitain (MONA), initié en 1993 et enrichi dans le cadre de plusieurs projets. Dans sa version actuelle, ce modèle simule les écoulements au sein de 15 aquifères du Nord du Bassin aquitain ;
- Le modèle des aquifères du Jurassique de Poitou-Charentes ;
- Le modèle du bassin versant de la Somme, construit pour mieux comprendre le risque d'inondations par remontées de nappe ;
- Le modèle des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives en Basse-Normandie, construit dans le cadre de la mise en place d'une zone de répartition des eaux.

Ce logiciel utilise la méthode des volumes finis et permet de traiter les écoulements en deux dimensions ou en multicouche, en zone saturée et non saturée, en régime permanent et transitoire. Il permet de prendre en compte les échanges entre un réseau hydrographique et les nappes sous-jacentes.

Le modèle utilisé est de type multicouche : chaque couche est discrétisée en mailles parallélépipédiques dont la face supérieure correspond au toit de la formation et la face inférieure au mur de la formation (voir Illustration 5). Pour une maille, les échanges peuvent se faire avec les mailles adjacentes –appartenant à la même couche-, ainsi qu'avec la maille inférieure et la maille supérieure.



Chaque formation géologique modélisée (aquifère ou épente) est représentée par un assemblage de mailles parallélépipédiques (voir schéma ci-contre).

Dans chacune des mailles, le logiciel calcule notamment une charge hydraulique (cote piézométrique) en fonction des données introduites (perméabilité, emmagasinement, débit de pompage, ...)

Illustration 5 : Exemple de discrétisation d'un modèle maillé multicouche

Les différentes fonctionnalités de MARTHE et leur mise en œuvre sont décrites par Thiéry (1990 et 2004).

Le fonctionnement du logiciel est brièvement décrit en annexe 1.

L'interface graphique Win-MARTHE est utilisée en pré- et post-processeur pour la préparation et la mise en forme des données ainsi que pour la visualisation des données et des résultats.

3.1.2. Variables et paramètres d'entrée du modèle

Les variables et paramètres constituant les données d'entrée du modèle sont récapitulés sur l'illustration 6.

On différencie les paramètres – qui ont une valeur fixe pendant toute la durée de la simulation – des variables – dont la valeur peut varier à chaque pas de temps.

On peut également distinguer :

- Les variables ou paramètres de calage (sur fond orange sur la figure) qui, n'étant évalués que par interprétation de mesures ponctuelles ou n'étant pas accessibles aux mesures, doivent être ajustés ou déterminés au cours des phases de calage du modèle : propriétés hydrogéologiques des formations (emmagasinement, perméabilités...), propriétés du réseau hydrographique, paramètres impliqués dans les calculs hydroclimatiques (capacité de stockage du sol, partition entre ruissellement et infiltration, déphasage induit par la zone non saturée),

- Les variables ou paramètres définis *a priori* (sur fond bleu sur l'illustration 6 ci-après), dont la valeur n'est pas réévaluée au cours du calage : structure du milieu géologique, structure du réseau hydrographique, pompages, chroniques de pluie et d'ETP...

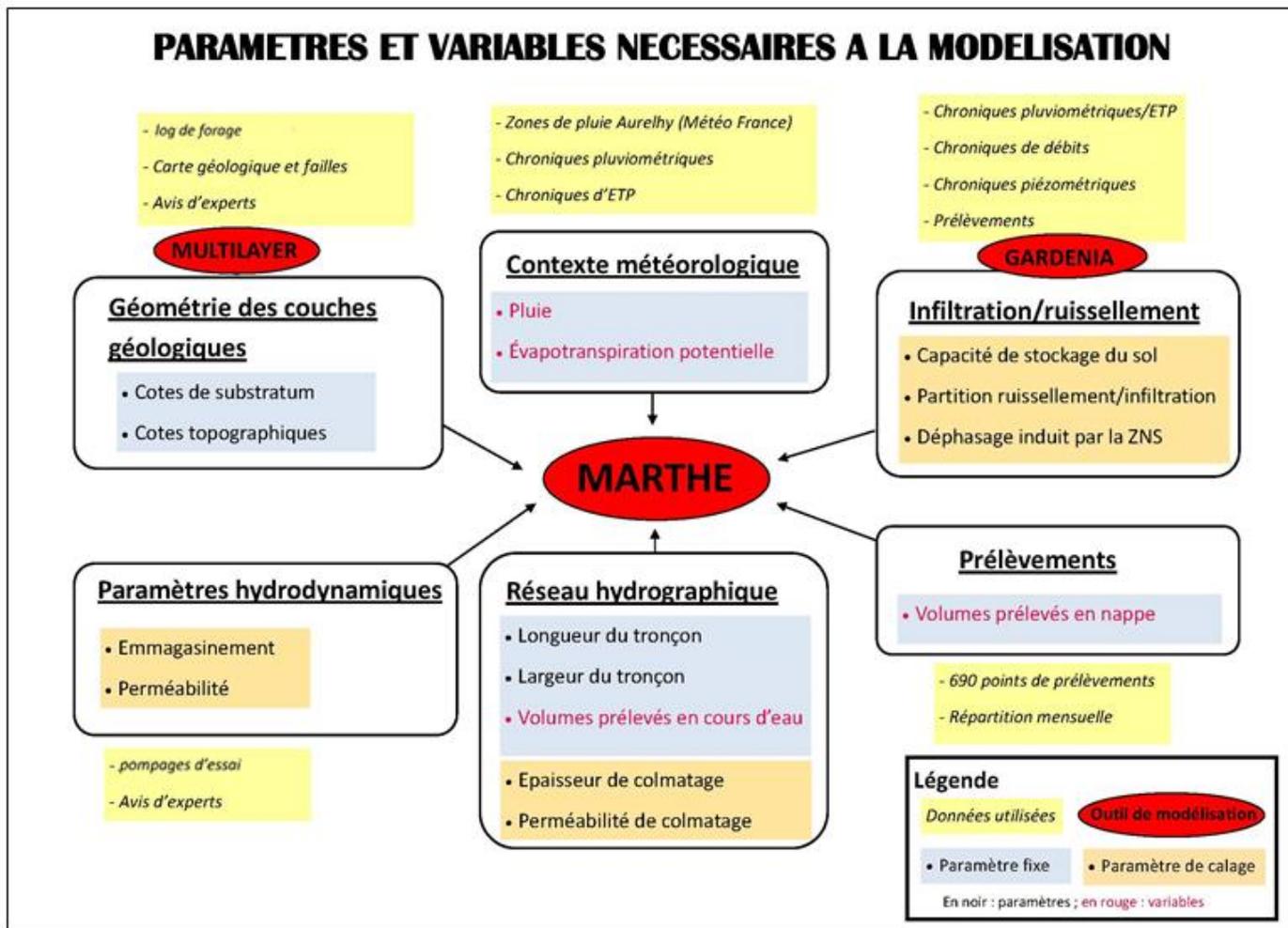


Illustration 6 : Environnement de fonctionnement de MARTHE (Croiset et al. 2013)

3.2. GEOMETRIE DU SYSTEME AQUIFERE

La structure géométrique du modèle hydrogéologique s'appuie sur celle du modèle géologique décrit dans le rapport RP-64817-FR (David et al., 2015). Pour les besoins de la modélisation hydrodynamique, quelques modifications ont cependant été apportées aux données associées.

3.2.1. Discrétisation verticale du modèle – horizons hydrogéologiques retenus

Un travail de simplification du modèle géologique réalisé sur la base d'une analyse hydrogéologique fine a amené à fusionner :

- les trois couches : Cénomaniens Basal, Cénomaniens Inférieurs et Cénomaniens Supérieurs,
- les deux couches : alluvions et argiles à silex,
- les deux couches : Sénonien Altéré et Cénomaniens Inférieurs Altérés.

Ce travail de simplification a permis de définir à partir d'un modèle géologique à 9 couches, 5 horizons hydrogéologiques structurants ; ces 5 horizons sont font l'objet du Tableau 3 ci-dessous. Le modèle hydrogéologique sur le plan de sa discrétisation verticale, a donc été construit sur ces bases.

	Formations hydrogéologiques	Epaisseur
1	Alluvions et formations à silex	Aquifère
2	Sables du Perche	Aquifère
3	Craie altérée	Aquifère
4	Craie du Sénonien et Turonien supérieur et moyen	Aquifère
5	Craie du Turonien inférieur et Cénomaniens	Aquifère

Tableau 3 : Couches du modèle hydrogéologique

Compte tenu du maillage (500 m x 500 m en dehors de la zone gigogne), les formations des alluvions et des argiles à silex ont été regroupées.

Comme indiqué dans le rapport de phases 1 et 2, la particularité du bassin de l'Avre est la présence d'un karst très développé, essentiellement dans le secteur amont. Des expériences de traçages réalisées dans le passé ont montré que les eaux de surface s'engouffrent dans ces zones de pertes, puis résurgent au droit des sources de la Vigne, du Breuil et Gonord. Une carte des réseaux karstiques supposés a été dressée sur la base de ces résultats de traçages et d'une analyse de la fracturation par Télusia en 2009 (Illustration 7). Cette carte reste toutefois à prendre avec précaution à ce stade.

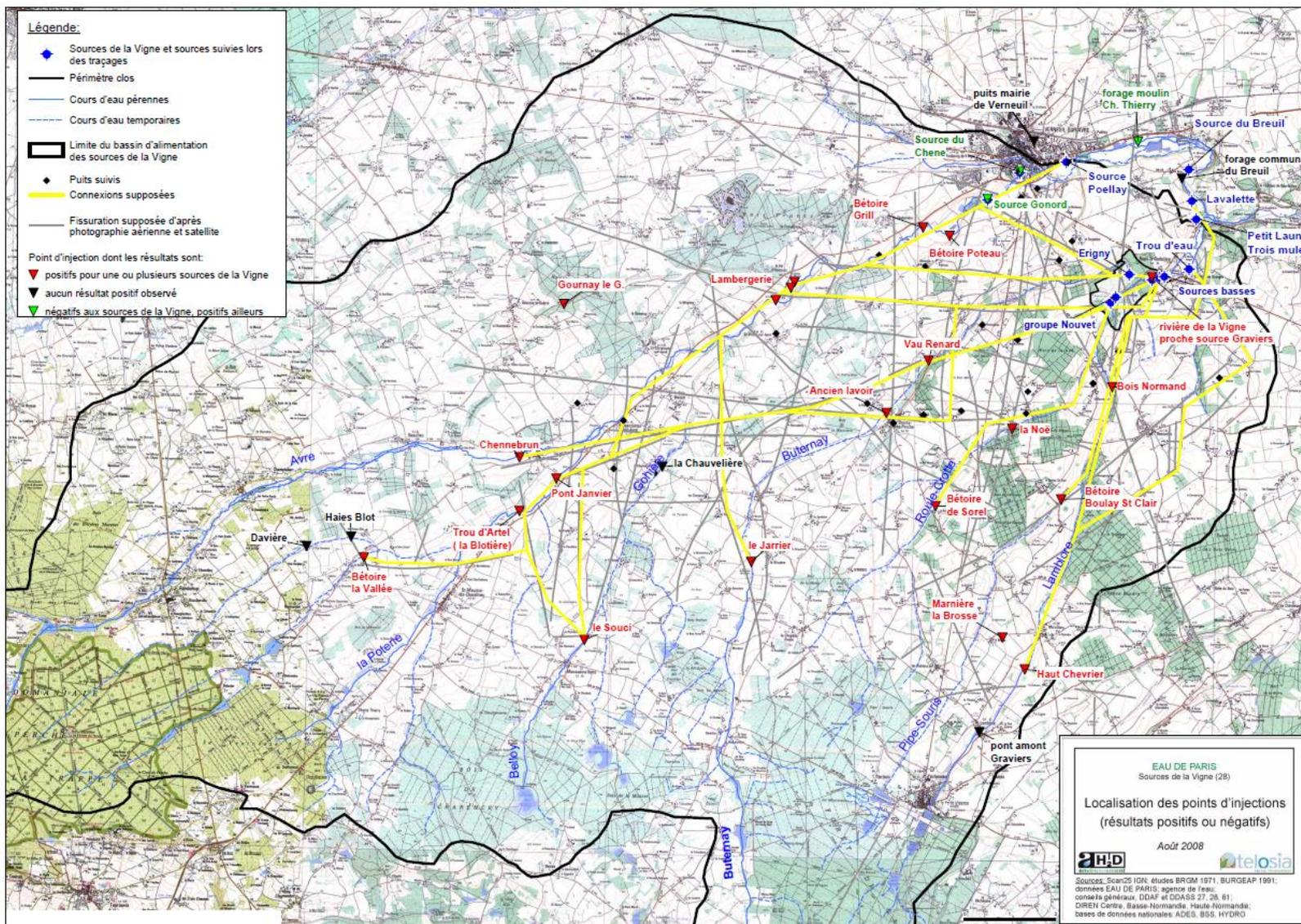


Illustration 7 : Carte des conduits karstiques supposés (en jaune) (Ah2D, Telosia, 2009)

Il est possible sur Marthe de modéliser des drains karstiques à la manière de tronçons de cours d'eau, voire de conduites sous pression ; cela se fait en général lorsque la connaissance du karst est suffisante, et lorsque la dimension du conduit karstique, en particulier de son diamètre, est significative par rapport à la taille de la maille utilisée. C'est également recommandé dans les modèles qui traitent du transfert de polluants.

Dans le cas présent, la géométrie précise du karst, telle que le diamètre des conduits, leur profondeur et leur extension, n'est pas suffisamment connue. De plus, le modèle de l'Avre n'a pour le moment que des objectifs purement d'ordre quantitatif (maintien d'un débit réservé dans l'Avre, impacts de schémas de prélèvement sur les nappes et les rivières, ...). Cette option n'a donc pas été retenue dans le modèle réalisé à ce stade, mais pourra plus tard être intégrée si besoin (ex. pour le transfert de polluants), et si les connaissances du karst évoluent.

Les connaissances actuelles du karst dans le bassin hydrographique de l'Avre suggèrent que celui-ci se trouverait à quelques mètres sous le contact avec les formations à silex, soit à une trentaine de mètres de profondeur sous les plateaux et à une vingtaine de mètres de profondeur sous les vallées (BURGEAP, juillet 1991). Afin de représenter au mieux le comportement différentiel de la craie selon si elle majoritairement fissurée/karstifiée ou saine, il a donc été décidé de réaliser une couche dite de « craie altérée », étendue sur l'ensemble de la zone modélisée et recoupant la craie sous les formations à silex, alluvions et sables du Perche, au niveau de laquelle il a été appliqué des paramètres propres à un comportement altérée et/ou karstique, telle qu'une forte perméabilité, dans les secteurs concernés. L'épaisseur de cette couche (craie altérée) a été établie, à dire d'expert, soit à une trentaine de mètres sous les vallées et une quinzaine de mètres sous les plateaux.

3.2.2. Extension du modèle et conditions aux limites

La zone d'étude correspond au bassin versant de l'Avre. Les limites de la zone modélisée correspondent à des limites à la fois hydrogéologiques et hydrographiques, suffisamment éloignées de la zone d'intérêt pour ne pas en rigidifier le fonctionnement du modèle (Illustration 8).

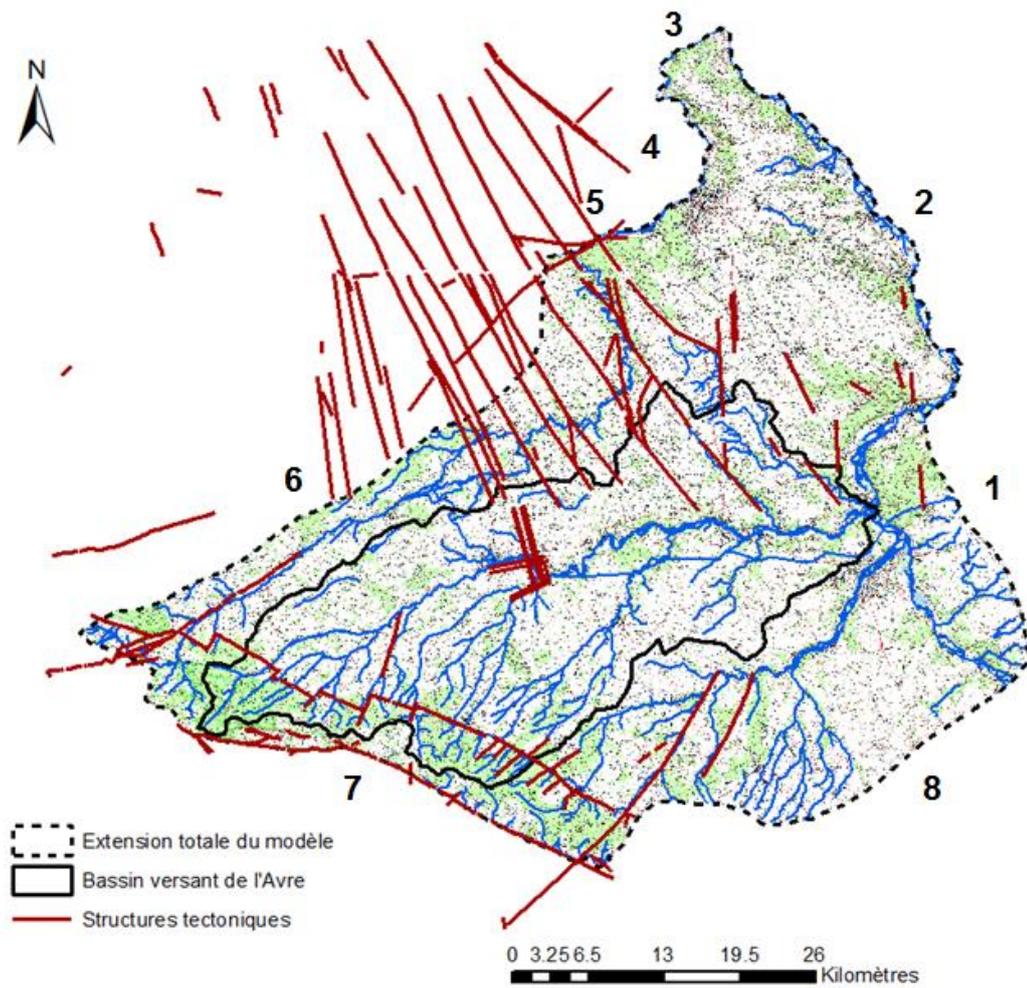


Illustration 8 : Extension de la zone modélisée

Sur la portion 1, la limite de la zone modélisée est une crête piézométrique présente sur les cartes piézométriques de juillet à septembre 1994 et d'octobre 2009 (Illustration 9). Il est donc considéré qu'il n'y a aucun flux entre la zone modélisée et l'extérieur.

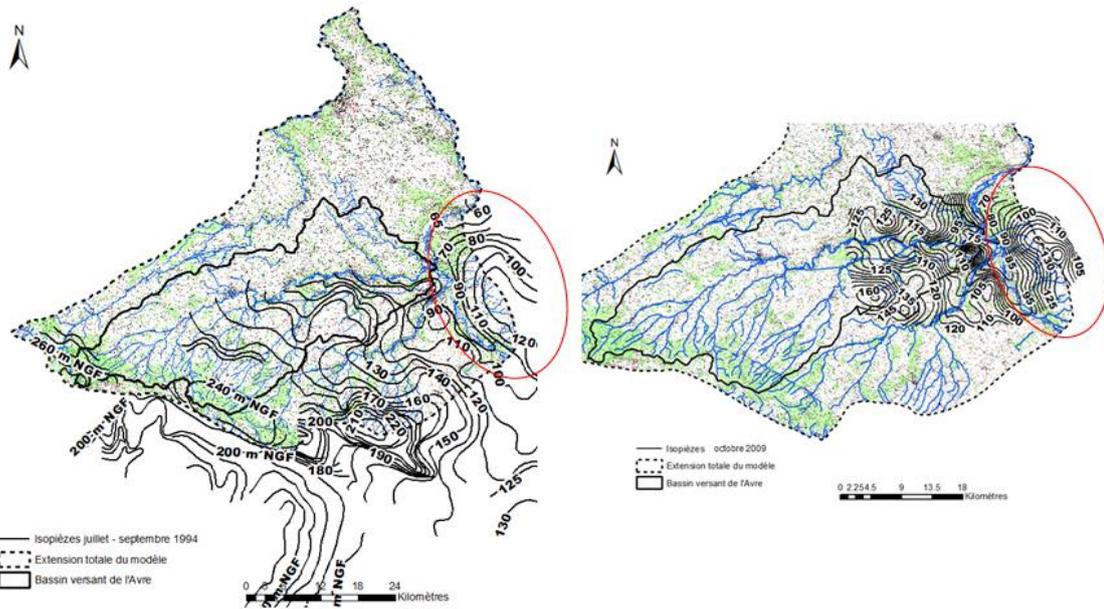


Illustration 9 : Conditions aux limites - portion 1

Sur les portions 2 à 5, la limite de la zone modélisée correspond aux cours d'eau de l'Eure et de l'Iton. Au droit des portions 2, 3 et 5, la nappe étant drainée par les cours d'eau, la charge imposée correspond à la cote de l'eau dans la rivière. Sur la portion 4, l'Iton est perché. Il n'y a donc pas de charge imposée (flux nul).

Sur la portion 6, la limite de la zone modélisée est une crête piézométrique au Nord de l'Iton, présente sur les cartes piézométriques de hautes-eaux en 2001 et basses-eaux en 2006 (Illustration 10). Il est donc considéré qu'il n'y a aucun flux entre la zone modélisée et l'extérieur.

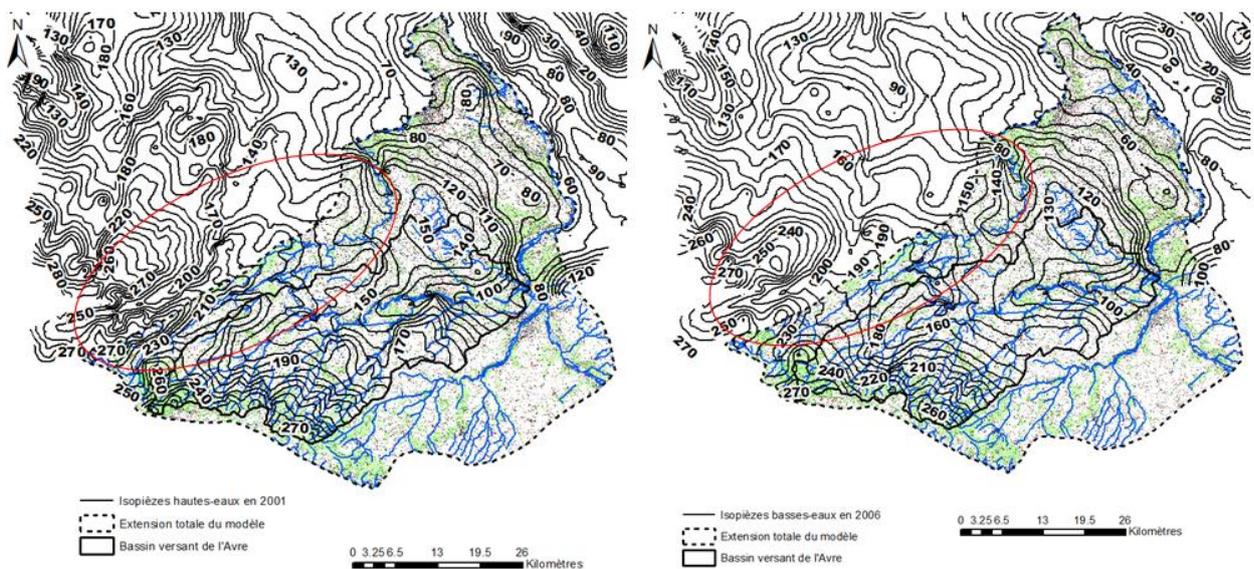


Illustration 10 : Conditions aux limites - portion 6

Sur la portion 7, la limite de la zone modélisée correspond à la faille de l'Eure. Les cartes piézométriques mettent en effet en évidence un dôme entre la faille de l'Eure et la faille de Senonches (cartes piézométriques de 1994 et 2003, Illustration 11). Il est donc considéré qu'il n'y a aucun flux entre la zone modélisée et l'extérieur au niveau de cette crête piézométrique.

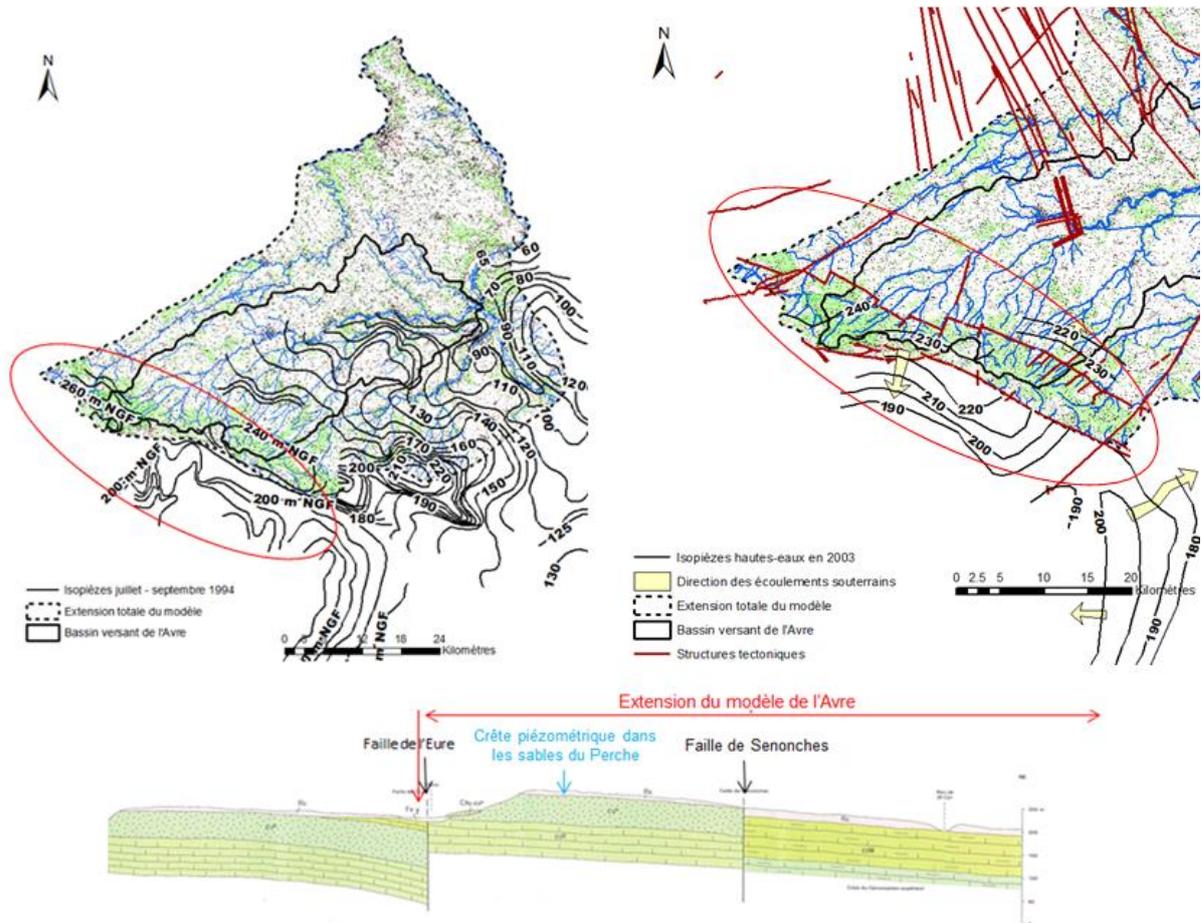


Illustration 11 : Conditions aux limites - portion 7

Sur la portion 8, la limite de la zone modélisée est une crête piézométrique présente sur les cartes piézométriques de 1994 et 2002 (Illustration 12 et Illustration 11). Il est donc considéré qu'il n'y a aucun flux entre la zone modélisée et l'extérieur.

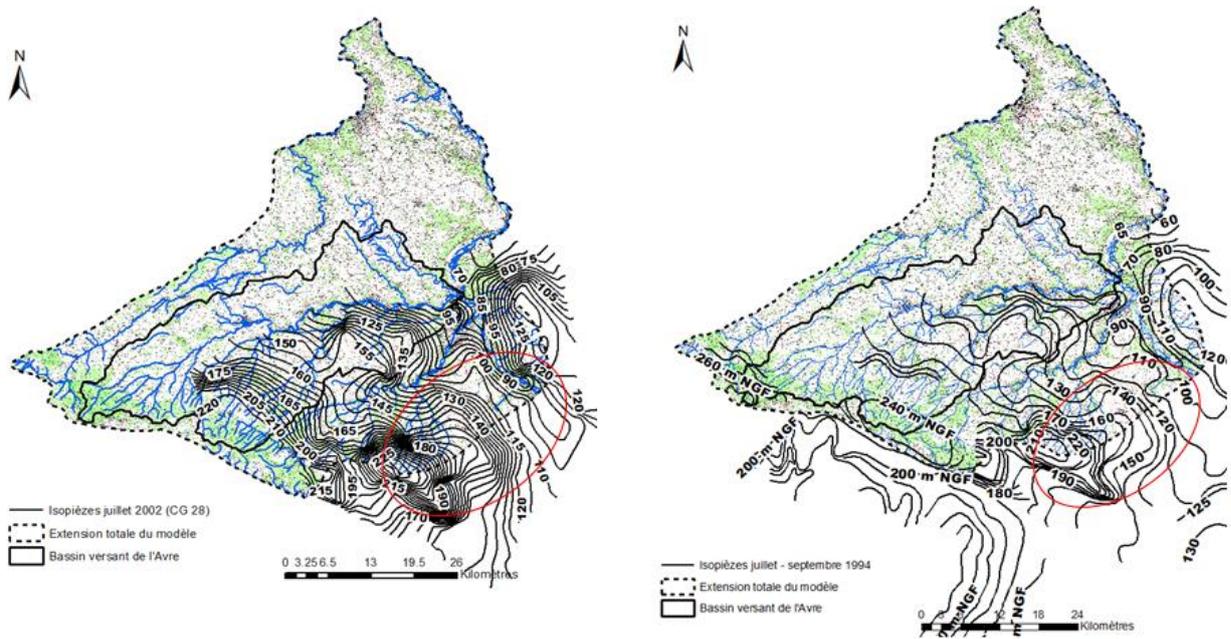


Illustration 12 : Conditions aux limites - portion 8

3.2.3. Discrétisation horizontale du modèle – maillage retenu

« Il n'existe pas de critère reconnu pour dimensionner un maillage de façon optimale. En pratique, les dimensions affectées aux mailles sont le fruit d'un compromis entre :

- Le pas et la variabilité spatiale des données de terrain disponibles,
- La taille et la complexité géométrique et hydrogéologique des aménagements à simuler,
- La précision de calcul recherchée et le degré d'intérêt du secteur,
- Un nombre de mailles compatible avec une durée de calcul « raisonnable » sur un micro-ordinateur courant,
- Pour le transport de masse, éventuellement, le respect de critères numériques assurant la représentativité des calculs (nombre de Péclet et nombre de Courant).

À titre indicatif, on utilise en général des mailles de 500 à 1000 mètres de côté pour les modèles régionaux, affinées à 200-250 m dans les zones d'un intérêt particulier. »³

Il a été choisi d'utiliser une discrétisation en mailles carrées de 500 m de côté sur la majeure partie de l'extension du modèle. Dans une partie de la zone d'étude, dans laquelle une plus grande précision était recherchée – notamment pour prendre en compte avec plus de finesse le réseau hydrographique et la géométrie des formations – la fonctionnalité de Marthe qui permet d'introduire un maillage gigogne constitué de mailles plus petites que celles du maillage principal a été utilisée. Il s'agit surtout de la vallée de l'Avre et de la portion aval de ses principaux affluents ; dans ces secteurs, les mailles mesurent 100 m de côté.

³ Barthélemy et Seguin, 2013

La zone discrétisée plus finement correspond à une étendue d'environ 2 km de part et d'autre de l'Avre, représentée sur l'illustration 13.

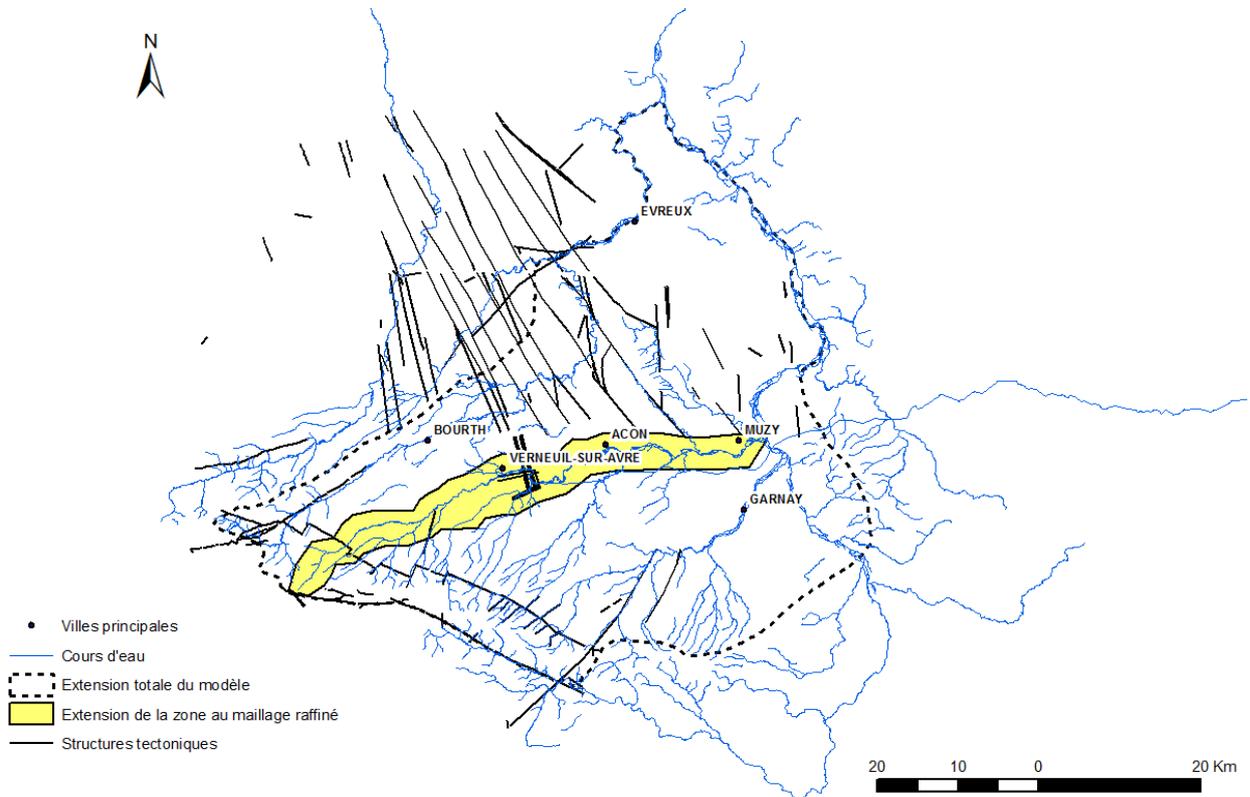


Illustration 13 : Extension du modèle globale et de la zone raffinée

Le modèle géologique a été élaboré avec une taille de maille de 100 m de côté. Le passage de la discrétisation en mailles de 100 m de côté aux mailles de 500 m de côté a été fait en choisissant, pour la topographie et l'altitude du toit des formations, la moyenne des valeurs des mailles de 100 m.

Le Tableau 4 et les illustrations suivantes récapitulent le nombre de mailles de chaque couche, ainsi que leur extension.

Formation	Nombre de mailles
Alluvions et formations à silex	37 672
Sables du Perche	3 904
Craie altérée	39 205
Craie du Sénonien et Turonien supérieur et moyen	23 015
Craie du Turonien inférieur et Cénomaniens	39185
Total	142 981

Tableau 4 : Caractéristiques du maillage du modèle

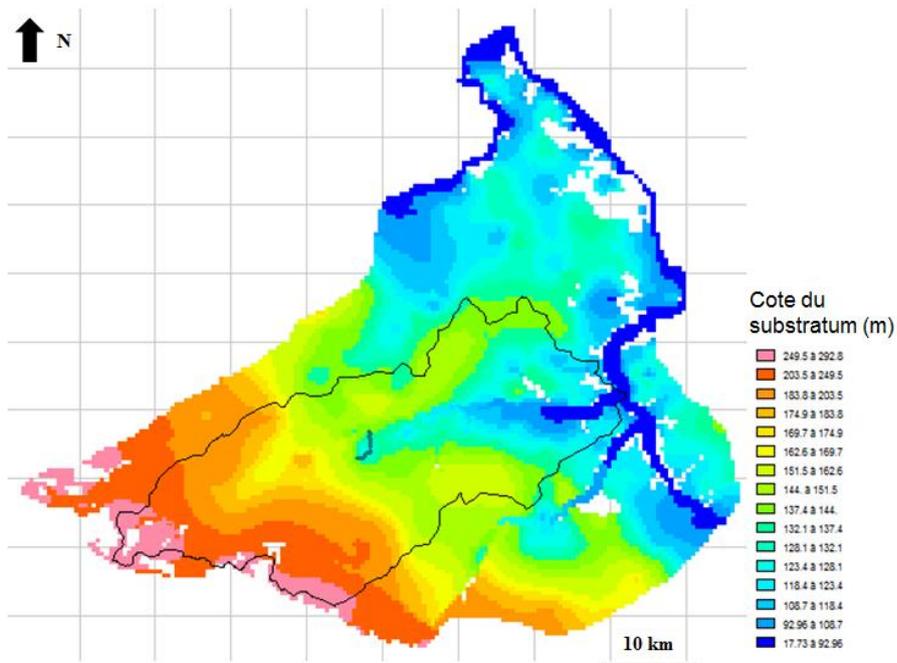


Illustration 14 : Extension de la couche 1 des alluvions et formations à silex

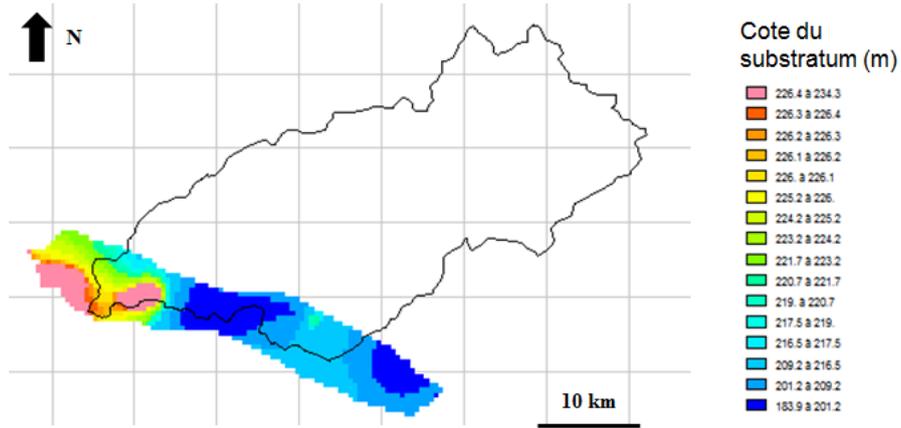


Illustration 15 : Extension de la couche 2 des sables du Perche

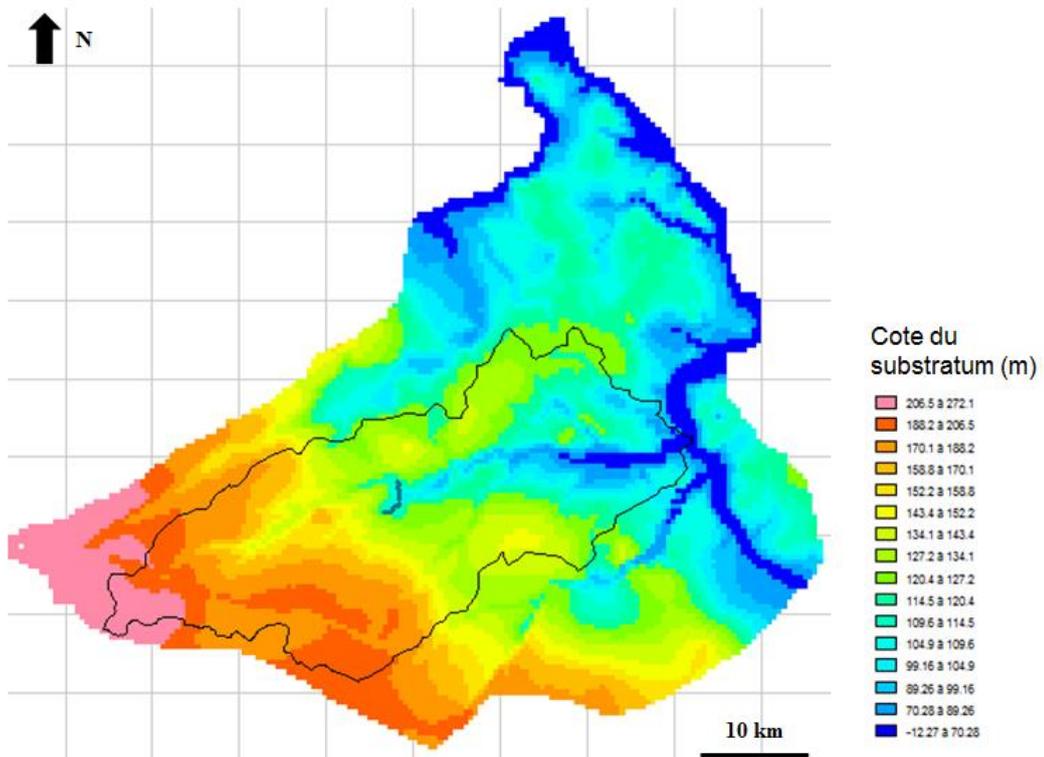


Illustration 16 : Extension de la couche 3 dite de craie altérée

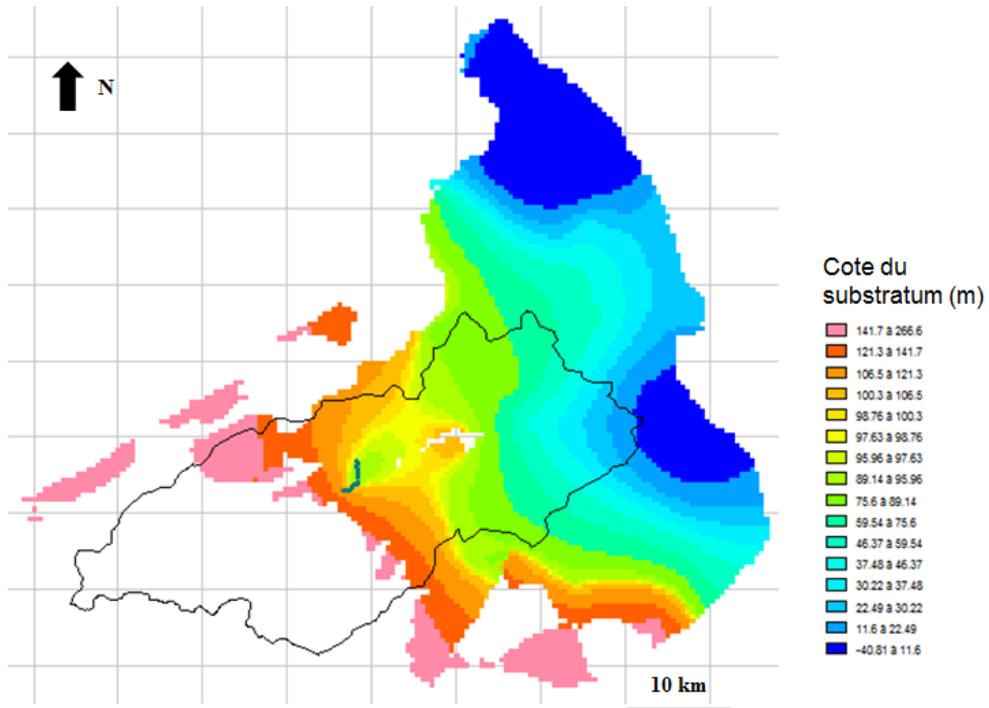


Illustration 17 : Extension de la couche 4 de la craie du Sénonien et Turonien supérieur et moyen

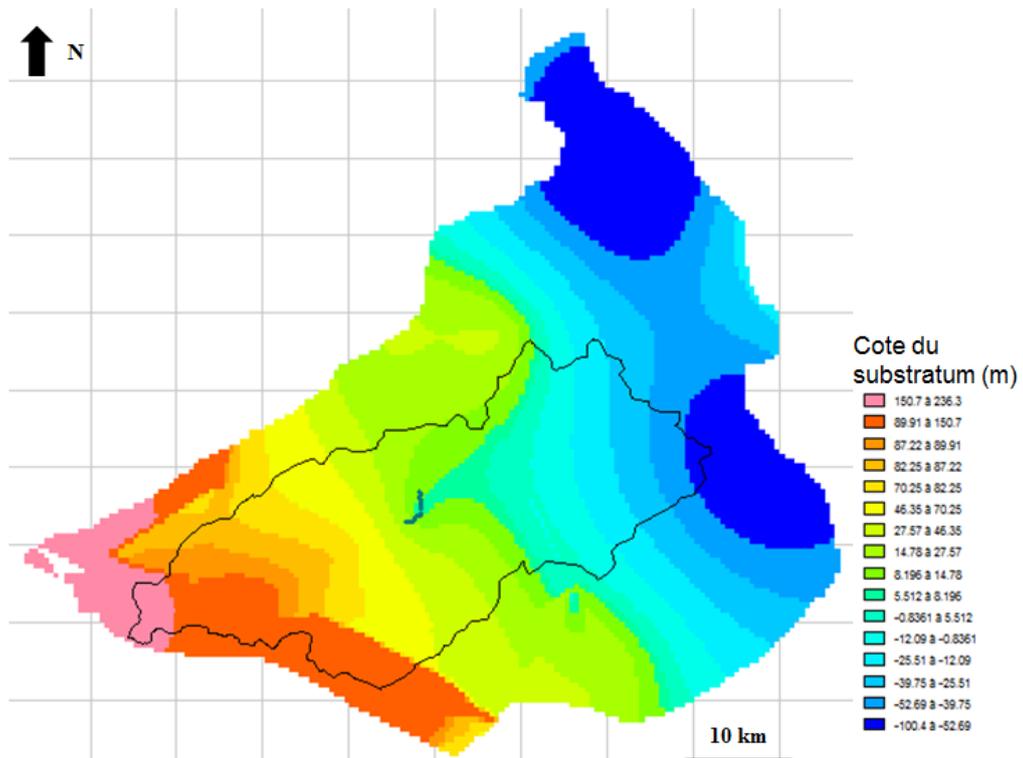


Illustration 18 : Extension de la couche 5 de la craie du Turonien inférieur et Cénomaniens

3.2.4. Traitement des failles

Les failles peuvent introduire une rupture de continuité des écoulements souterrains (barrière étanche ou très peu perméable), ou au contraire mettre en communication des aquifères normalement séparés par un horizon très peu perméable (zone faillée très conductrice), ou bien jouer un rôle intermédiaire entre ces deux situations extrêmes.

Le logiciel MARTHE permet de simuler des limites étanches verticales au sein d'une couche. Inversement, de fortes perméabilités peuvent être introduites dans une éponte pour simuler une circulation entre les couches séparées par cette éponte.

Ici, les failles ont été initialement supposées ne pas affecter les écoulements, hypothèse qui a dû être revue pour certaines failles pendant le calage. La carte des failles finalement considérées comme limites étanches est présentée au § 4.2.3 b.

3.3. RECHARGE ET RUISSELLEMENT

3.3.1. Paramètres nécessaires à la modélisation

La recharge et le ruissellement doivent être estimés pour chaque maille et à chaque pas de temps du modèle.

Pour estimer les flux de recharge des nappes et les flux de ruissellement, plusieurs paramètres ou variables sont nécessaires :

- La pluviométrie ;
- L'évapotranspiration potentielle ;
- Des paramètres associés au processus de recharge/ruissellement qui permettent, à partir des données de pluie et d'évapotranspiration potentielle, i) de calculer la pluie efficace, ii) de définir la distribution de la pluie efficace entre écoulements de surface et écoulements souterrains, et iii) de rendre compte du déphasage entre la pluie et la recharge effective de la nappe, associé à la traversée des sols et de la zone non saturée.

Pour chaque maille du modèle, la pluie et l'évapotranspiration sont extraites des chroniques météorologiques locales. Ces chroniques proviennent des données acquises par Météo France aux différentes stations météorologiques de la zone d'étude.

Le code de calcul Marthe réalise un bilan hydroclimatique couplé au calcul hydrodynamique de la nappe. Le bilan hydroclimatique réalisé par Marthe est similaire à celui réalisé par le logiciel GARDENIA (modèle global du type réservoirs emboîtés) : utilisation de 2 réservoirs Sol et H (H pour Hypodermique). Ce bilan permet de décomposer l'excédent de pluie en infiltration et ruissellement.

Le territoire modélisé est divisé en zones hydroclimatiques. Marthe réalise un bilan pluie/ETP suivant la méthode de Thornwaite dans chaque zone hydroclimatique. Il est donc nécessaire de définir pour chaque zone hydroclimatique :

- Le déficit en eau maximal du sol (RUMAX) (réserve utile des agronomes) (exprimé en « unité des hauteurs d'infiltrations et d'ETP » c'est-à-dire par défaut en mm) ; il peut aussi être utilisé en alternative, la capacité du sol progressive (CAP_SOL_PROGR) ;
- La durée de demi-percolation du réservoir H (exprimé en unité de temps des bilans hydroclimatiques) ;

- Niveau du réservoir H correspondant à 50% d'infiltration et 50% de ruissellement – donc EQUiRUissellement (exprimé en mm)

Si la capacité de stockage du sol RUMAX peut être appréhendée par les données des cartes pédologiques notamment, les deux autres paramètres (partition de la pluie efficace et le temps de demi-percolation) sont rarement connus car ils ne peuvent être déduits de mesures de terrain.

Afin d'initialiser le modèle MARTHE avec des valeurs les plus réalistes possibles pour ces deux derniers paramètres, des modèles globaux ont été réalisés pour chacun des sous-bassins de l'Avre avec GARDENIA. Cela a permis d'estimer ces deux paramètres par grands secteurs et de partir avec des jeux de valeurs initiales les plus réalistes possibles.

Ces paramètres ont par la suite été réévalués au cours du processus de calage afin de reproduire au mieux les fluctuations de la nappe.

3.3.2. Répartition spatiale des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

Dans le domaine modélisé, il n'existe qu'une seule station Météo-France d'ETP, celle d'Evreux-Huest. Sa chronique ETP couvre l'ensemble de la période modélisée. D'après le rapport BRGM/RP-60458-FR (David, 2012), l'ETP semble peu varier à l'échelle du bassin. Les données ETP mesurées à Evreux ont donc été appliquées sur l'ensemble de la zone modélisée.

Concernant les précipitations, la répartition spatiale a été faite sur la base d'un découpage en zones homogènes du domaine modélisé. A chacune des zones est associée une chronique pluviométrique représentative de la pluie. Quatre zones de pluie avaient été déterminées dans le rapport BRGM/RP-60458-FR (David, 2012) sur la base de la grille AURELHY de Météo - France de la pluviométrie moyenne entre 1972 et 2000. Ces zones ont été actualisées sur la base de la grille AURELHY de Météo - France actualisée, issues de la pluviométrie moyenne entre 1981 et 2010. Toutes les mailles appartenant à une même zone météorologique reçoivent les mêmes précipitations, dont les valeurs sont déterminées en rattachant une chronique pluviométrique à chacune des zones, respectivement Marcilly-la-Campagne pour la zone 1, Rueil pour la zone 2, Beaulieu pour la zone 3 et Soligny-la-Trappe pour la zone 4 (Illustration 19).

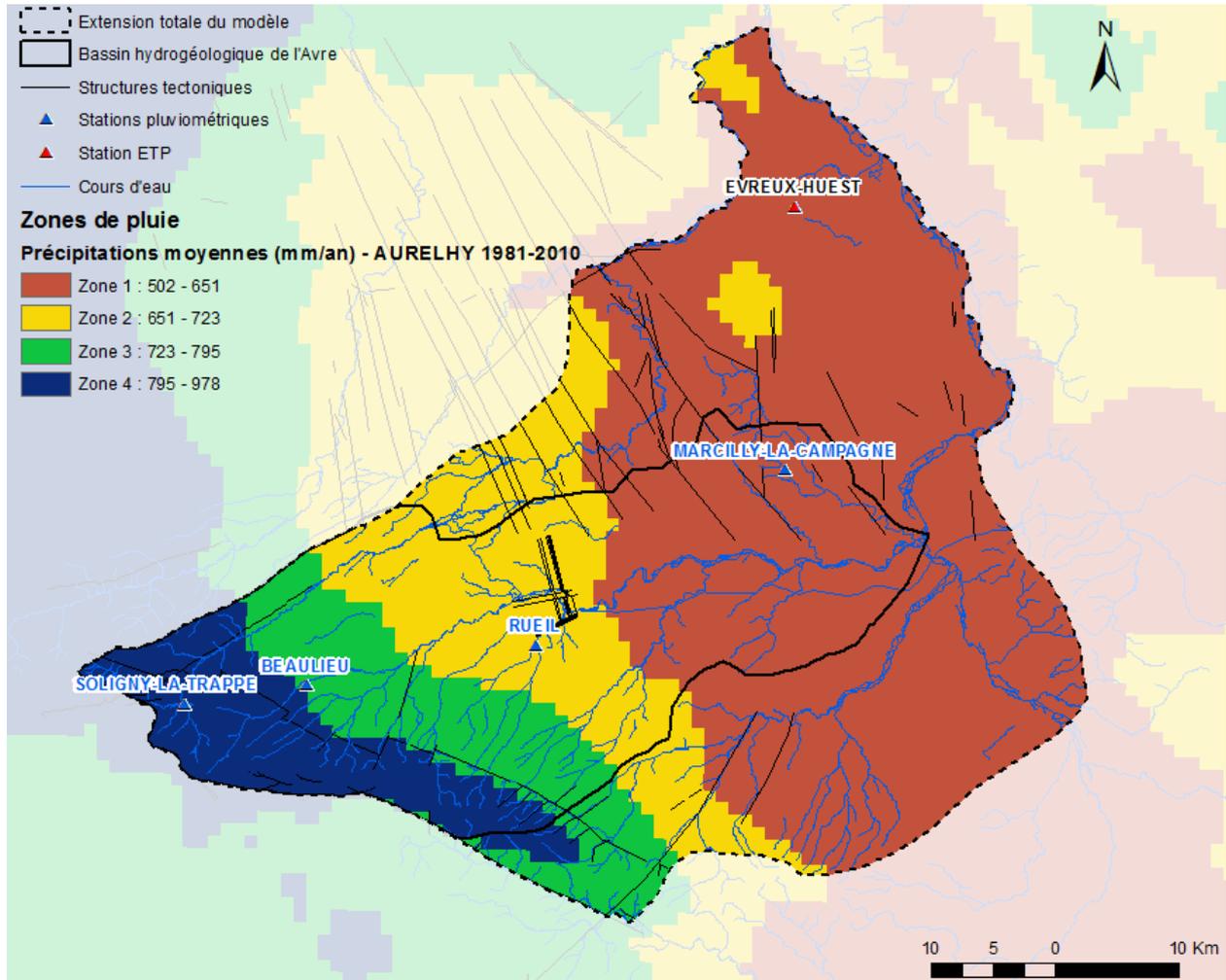


Illustration 19 : Zones climatiques et stations météorologiques de référence

3.3.3. Utilisation du modèle GARDENIA pour initialiser les paramètres de recharge du modèle spatialisé

a) Présentation du modèle GARDÉNIA

Principe

Le modèle hydrologique global GARDENIA est un code de calcul développé par le BRGM (Thiéry, 2003, 2014, 2015). Il simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant par des lois physiques simplifiées représentant un écoulement à travers une succession de réservoirs. À partir de chroniques météorologiques (précipitations, évapotranspiration potentielle) sur un bassin d'alimentation, GARDENIA permet de calculer le débit à l'exutoire d'un cours d'eau (ou celui d'une source) et / ou le niveau piézométrique en un point de la nappe libre sous-jacente. GARDENIA fournit également la pluie efficace et la recharge du système, les coefficients de répartition entre ruissellement et infiltration, les temps de demi percolation, etc....

On pourra se reporter à l'annexe 2 pour une description des équations utilisées dans ce logiciel.

Structure du modèle

Dans sa mise en œuvre la plus simple, GARDENIA simule le cycle de l'eau par un système de 3 réservoirs en cascade qui représentent successivement (Illustration 20) : les premières dizaines de centimètres du sol (siège des phénomènes d'évapotranspiration), une zone intermédiaire générant de l'écoulement rapide, et une zone aquifère générant de l'écoulement souterrain lent et retardé.

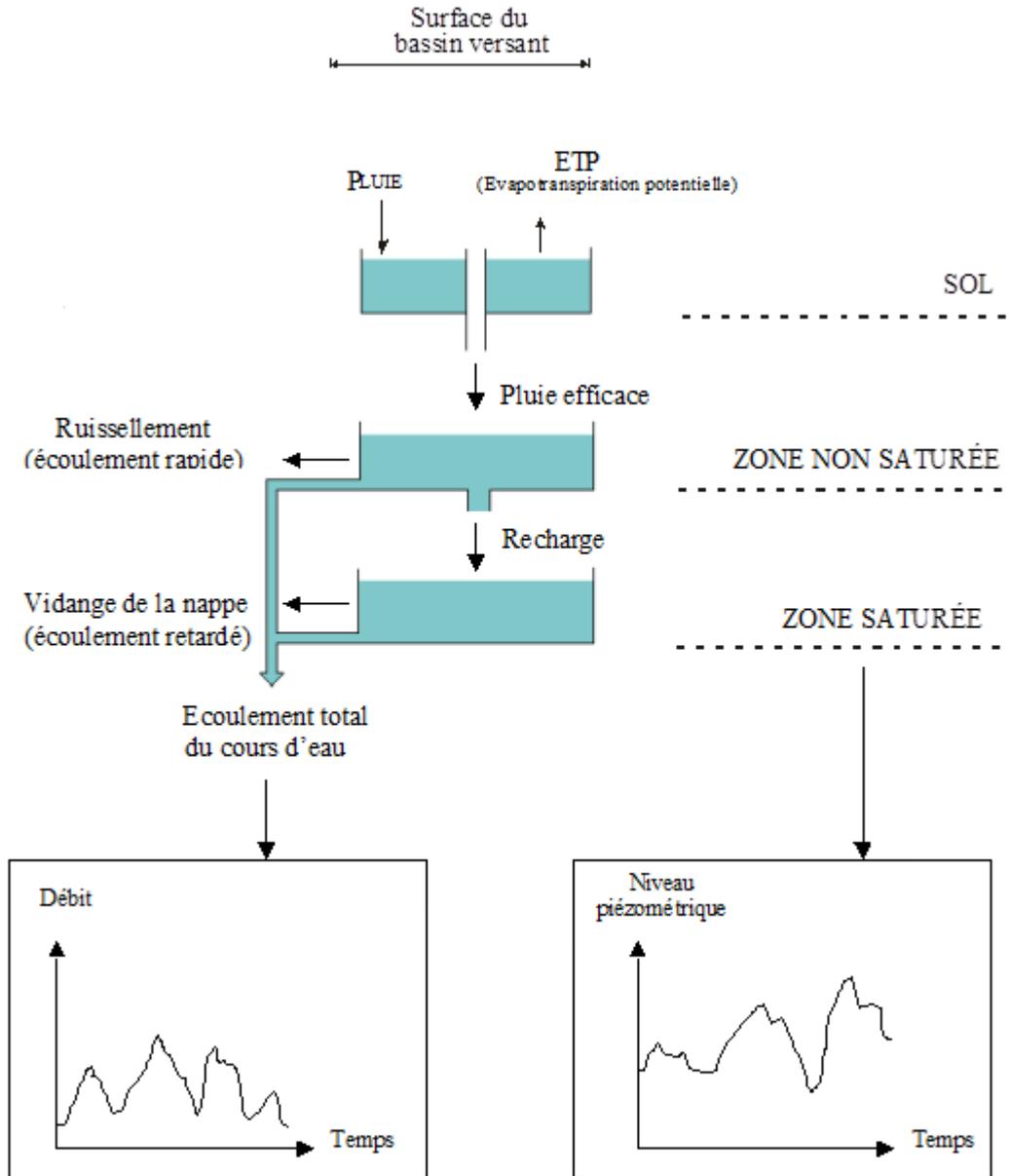


Illustration 20 : Structure du modèle GARDENIA utilisé pour simuler le débit en rivière ainsi que le niveau piézométrique de la nappe drainée (Thiéry, 2014)

La structure du réservoir SOL (Illustration 20) est de type « réserve utile » et permet de calculer la pluie nette (ALIMH) en fonction de l'évolution de la capacité du réservoir RU. Si la pluie est en excès par rapport à cette capacité, l'eau s'infiltre dans le système, sinon ce n'est pas le cas.

L'évapotranspiration réelle (ETR) est estimée à partir des données d'évapotranspiration potentielle (ETP) et du stock d'eau disponible dans le réservoir SOL.

Le réservoir qui représente la ZONE NON SATUREE (Illustration 20) a une hauteur d'eau notée H. Il est alimenté en eau par la pluie nette ALIMH provenant du réservoir superficiel, et est vidangé par deux exutoires :

- Une percolation dans le réservoir souterrain G, notée ALIMG, suivant une loi linéaire (vidange exponentielle) de constante de temps THG :

$$ALIMG = H \cdot dt / THG \text{ (dt = durée du pas de temps)}$$

- Un écoulement à l'extérieur du bassin, sous forme d'une composante rapide QH du débit, selon une loi non-linéaire contrôlée par le paramètre RUIPER. Ce paramètre RUIPER est en fait la hauteur d'eau dans le réservoir H pour laquelle la percolation ALIMG et l'écoulement QH sont égaux :

$$QH = H \cdot dt / (THG \cdot RUIPER / H)$$

Le ratio QH / ALIMG est égal au rapport H / RUIPER. Ce réservoir H sert uniquement au transfert. Le calcul s'effectue en réalisant une répartition de la Pluie Nette ALIMH en composantes ALIMG et QH.

Le réservoir de la ZONE SATUREE (Illustration 20) produit l'écoulement lent qui provient de l'aquifère et a une hauteur d'eau notée G. Il est alimenté par le réservoir intermédiaire H (ALIMG), et est vidangé vers l'exutoire du bassin sous forme de débit QG, suivant une loi de vidange exponentielle de constante de temps TG :

$$QG = G \cdot dt / TG$$

Le niveau piézométrique N est calculé en mm et transformé en niveau absolu en mètres par division par le coefficient d'emménagement global Coef_Emmag et ajout du niveau de base local Nbase :

$$N = G / Coef_Emmag + Nbase$$

Dans les bassins versants ayant une composante souterraine conséquente, il est fréquent que des ECHANGES SOUTERRAINS se produisent avec l'extérieur. Il peut arriver qu'une partie de la composante souterraine n'apparaisse pas dans le débit mesuré à l'exutoire. Cette partie de l'écoulement souterrain peut se propager dans la nappe souterraine latéralement vers l'extérieur du bassin, ou bien « sous » la section de jaugeage. On a donc une perte de débit (échange souterrain négatif). Ce débit perdu apparaîtra dans un bassin voisin. A l'opposé il peut arriver qu'un débit souterrain additionnel provienne d'un bassin versant voisin. On a alors un gain de débit (échange souterrain positif). Ces échanges souterrains sont modélisés avec un coefficient d'échange souterrain externe :

$$Q_Echang_Souterr = Fact_Echang \cdot QG_Avant_Echang$$

soit :

$$Q_Echang_Souterr = QG \cdot Fact_Echang / (1 + Fact_Echang)$$

Les échanges souterrains affectent la composante souterraine du débit calculé mais n'affectent pas le niveau du réservoir souterrain. Ils n'affectent donc pas le niveau de la nappe calculé.

Stratégie de calibration

Les paramètres du modèle pour calculer le débit sont au nombre de 5 :

- RU : Capacité du réservoir SOL de type « réserve utile » ou « réserve disponible pour l'évapotranspiration » : en mm,
- THG : Temps de demi-montée du réservoir H (temps de $\frac{1}{2}$ percolation) : en mois,
- RUIPER : Hauteur dans le réservoir H pour laquelle il y a répartition égale entre écoulement rapide et percolation : en mm,
- TG : Temps de demi-tarissement du réservoir G : en mois,
- Fact_Echang : Coefficient d'échange souterrain externe : en %,

Un paramètre supplémentaire est nécessaire pour exprimer le niveau d'eau en piézométrie :

- Coef_Emmag : Coefficient d'emménagement global de l'aquifère

La calibration du modèle est effectuée simultanément sur le débit à l'exutoire et le niveau piézométrique en donnant un poids relatif (alpha et 1-alpha) à chacune des deux variables simulées. Le critère d'ajustement F est alors :

$$F = (\alpha \times F_{\text{Débit}}) + (1-\alpha \times F_{\text{Niveaux}})$$

en retenant comme critères de performance pour $F_{\text{Débit}}$ et F_{Niveaux} respectivement le coefficient de Nash sur la racine carrée des débits Nash $Q^{0.5}$ et sur la racine carrée de la piézométrie Nash $h^{0.5}$.

La « capacité de stockage du sol » sert à générer la bonne quantité de pluie efficace à partir d'une pluie et d'une ETP données. La pluie efficace simulée par le modèle dépend donc à la fois de la capacité de stockage du sol et des chroniques météorologiques utilisées, et ce même si des coefficients d'ajustement sont appliqués à celles-ci. Les valeurs attribuées dans le modèle MARTHE à la capacité de stockage du sol à l'issue du calage ne sauraient donc être comparées à des données exclusivement relatives au sol (RU, RFU, ...).

Deux coefficients correctifs permettent d'ajuster si nécessaire les chroniques de pluie et d'ETP prises en compte pour la modélisation GARDENIA. Ces coefficients sont globaux, c'est-à-dire qu'ils portent sur l'ensemble de la chronique considérée. L'un porte sur la pluviométrie, l'autre sur l'ETP.

Il est à noter que seuls les trois premiers paramètres dimensionnels des modèles GARDENIA sont transférés au modèle maillé réalisé avec le logiciel MARTHE : capacité de stockage du sol (RU), hauteur d'équi-répartition (RUIPER) et temps de demi-percolation du réservoir ZNS (THG).

b) Choix des bassins versants à modéliser pour le calcul de la recharge

Les données d'entrée sont les précipitations, l'évapotranspiration potentielle et, le cas échéant, les prélèvements. Les données de calage sont de deux types : niveaux piézométriques et données de débit. La période de calage correspond aux années 1994-2013.

La variabilité spatiale des pluies au sein du bassin de l'Avre a été étudiée à partir de la grille des moyennes trentenaire de la grille AURELHY. Quatre zones climatiques ont été déterminées (Illustration 21, Tableau 5 et Illustration 22). Pour chacune de ces 4 zones, une station météorologique représentative a été retenue : Marcilly, Rueil, Beaulieu et Soligny (mêmes stations que précédemment 3.3.2.a.).

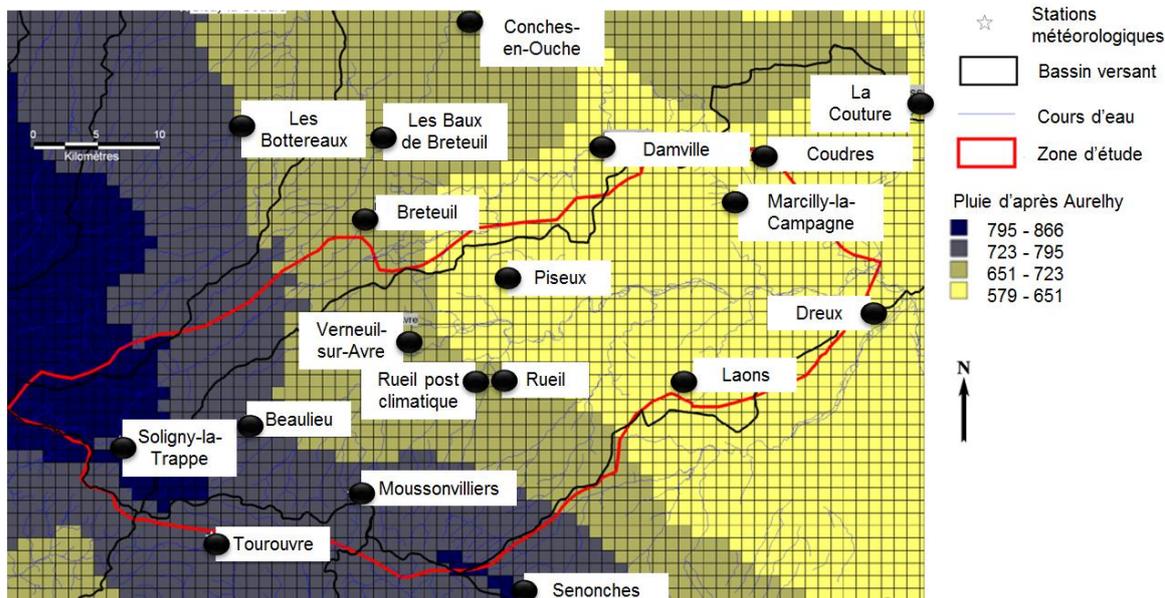


Illustration 21 : Pluviométrie moyenne annuelle selon la grille AURELHY établie par Météo France

Zones climatiques	Moyenne trentenaire (1970-2000) des précipitations	Station météorologie retenue	Code Météo-France de la station
ZONE 1	579-651 mm	Marcilly-la campagne	27390001
ZONE 2	651-723 mm	Rueil	28322003
ZONE 3	723-795 mm	Soligny remplace (Moussonvilliers)	61475001
ZONE 4	795-866 mm	Beaulieu	61034001

Tableau 5 : Détermination de quatre zones climatiques avec une station météorologique de référence affectée à chaque zone

L'illustration 22 représente les quatre stations de jaugeage de la zone d'étude ainsi que leur bassin versant.

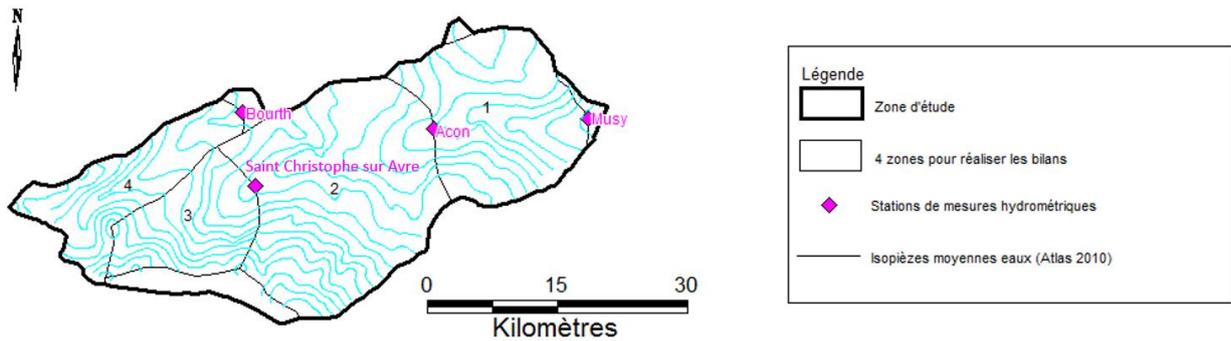


Illustration 22 : Définition des quatre secteurs sur lesquels seront effectuées les modélisations Gardenia

Pour chaque bassin versant, une station fictive de pluie a été créée par pondération des stations pluviométriques du secteur, pour prendre en compte la variabilité spatiale de la pluie (Tableau 6) :

- Station pluie fictive du BV Muzy = 2% Beaulieu + 50,5% Marcilly + 18,9% Moussonvilliers + 28,6% Rueil
- Station pluie fictive du BV Acon = 2,9% Beaulieu + 27,3% Marcilly + 27,8% Moussonvilliers + 42% Rueil
- Station pluie fictive du BV St Christophe = 11,4% Beaulieu + 52,6% Moussonvilliers + 36,0% Rueil
- Station pluie fictive du BV Bourth = 44,1% Beaulieu + 44,6% Moussonvilliers + 11,3% Rueil

	BV Muzy (secteurs 1+2+3)	BV Acon (secteurs 2+3)	BV St Christophe (secteur 3)	BV Bourth (secteur 4)
Zone météo BEAULIEU	2,0 %	2,9 %	11,4 %	44,1 %
Zone météo Marcilly	50,5 %	27,3 %	0,0 %	0,0 %
Zone météo Moussonvilliers	18,9 %	27,8 %	52,6 %	44,6 %
Zone météo Rueil	28,6 %	42,0 %	36,0 %	11,3 %
TOTAL	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Surface du BV (en km ²)	965,4	657,5	165,8	187,5

Tableau 6 : Détermination des stations fictives de pluie par pondération des stations pluviométriques

Concernant l'ETP, étant donné sa faible variabilité spatiale, l'ETP d'Evreux a été appliqué à tous les modèles Gardenia du bassin de l'Avre, avec ajustement automatique.

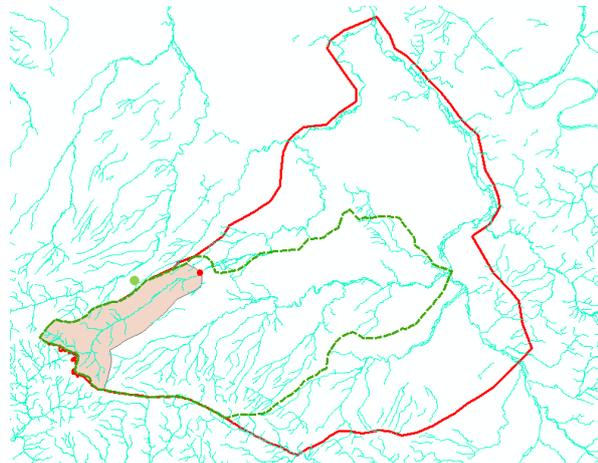
Une vérification des données d'entrées a été faite, pour vérifier que les données de pluie et d'ETP ne possédaient pas de trous. Seule la chronique de la station de Marcilly a posé un problème. En effet, sur 8918 valeurs, de nombreuses anomalies ont été détectées, puis ont dû être traitées (Tableau 7).

444 sont notées « traces »	444 données « traces » ont été remplacées par la valeur 0,05 mm
525 valeurs comportaient des astérisques	Les 525 astérisques ont été supprimés
31 valeurs sont des tirets	Les 31 tirets ont été remplacés par la valeur 0 mm
28 points au lieu de virgules	Les points ont été transformés en virgules
652 valeurs sont absentes	Les 652 valeurs absentes ont été remplacées par des valeurs au pas de temps décennales divisées par 10 pour obtenir un pseudo-journalier

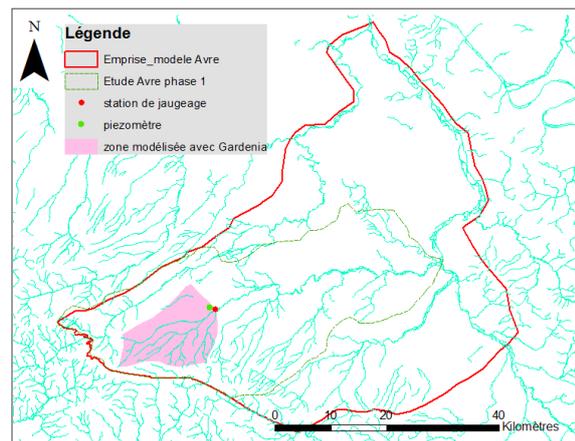
Tableau 7 : Anomalies traitées dans les chroniques de pluie

Les cinq sous-bassins modélisés sous Gardénia sont les suivants :

- Sous-bassin de l'Iton à Bourth
Station de jaugeage : Bourth
Piézomètre : l'Aigle (02144X0005)



- Sous-bassin de l'Avre à Saint-Christophe-Sur-Avre
Station jaugeage : Saint-Christophe-Sur-Avre
Piézomètre : Saint-Christophe-Sur-Avre (02152X0051)

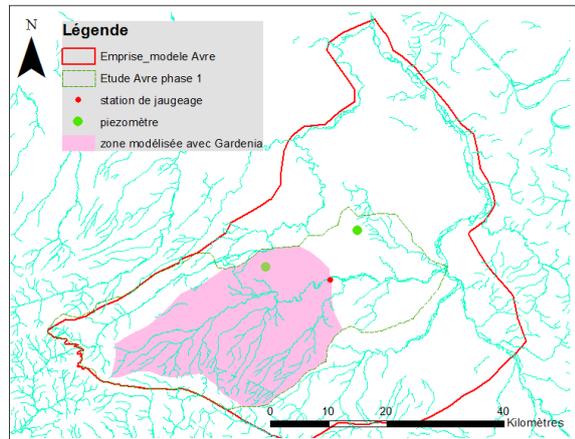


- Sous-bassin de l'Avre à Acon

Station de jaugeage : Acon

Piézomètres : Bâline
(02153X0023) et Moisville
(01805X0036)

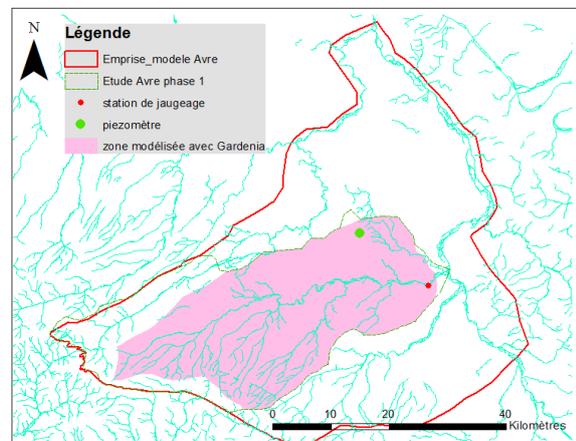
(les piézomètres même hors zones peuvent avoir une représentativité adéquate car ils reproduisent les mêmes variabilités régionales saisonnières et interannuelles)



- Sous-bassin de l'Avre à Muzy

Station de jaugeage : Muzy

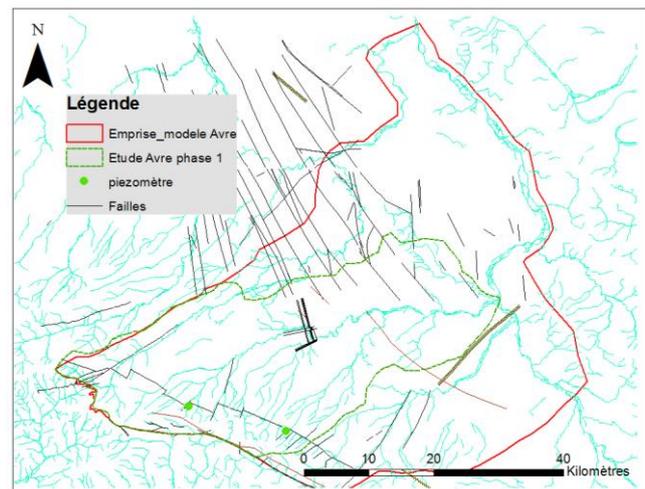
Piézomètre : Moisville



- Zone des sables du Perche

Simulation pluie / niveau uniquement

Piézomètres dans les sables du Perche : St-Maurice-les-Charencey (02155X1040) et Les Ressuintes (02533X2003)



La réalisation de ces modèles GARDENIA par sous-bassin versant permet (1) d'estimer la variabilité des deux paramètres au sein de la zone modélisée qui sont la partition de la pluie efficace et le temps de demi-percolation et (2) d'initialiser le modèle MARTHE avec des jeux de valeurs initiales les plus réalistes possibles par grands secteurs.

c) Résultats des simulations

Les calages réalisés sur les différents bassins sont de bonne qualité, avec un coefficient de corrélation global égal à 0.9 en moyenne. Les coefficients de corrélation sont égaux à la racine carrée du coefficient de Nash ; le coefficient de corrélation global est la moyenne des coefficients de corrélation sur les chroniques de débits et de niveaux piézométriques.

Pour rappel, si le critère de Nash est de 1, l'ajustement est parfait. On considère généralement que des critères de Nash supérieurs à 0,6-0,7 sont satisfaisants et que des critères supérieurs à 0,9 sont excellents.

Tous les résultats relatifs aux calculs réalisés avec GARDENIA pour estimer la recharge dans les différents sous-bassins retenus sont présentés en annexe 2.

Les résultats issus de ces simulations ont servi à définir un jeu de paramètres initiaux pour l'ensemble des mailles du modèle spatialisé. Les mailles du modèle spatialisé situées en dehors des sous-bassins ci-dessus, ont fait l'objet d'une extrapolation à partir des résultats obtenus dans les modélisations réalisées avec GARDENIA, en tenant compte des sols et des contextes géologiques. Les zones de recharge et les paramètres associés affectés initialement au modèle sont présentés dans le Tableau 8 ci-dessous. Ces paramètres de recharge ont ensuite été revus lors du processus de calage du modèle maillé.

Secteur	Capacité de la réserve superficielle progressive (mm)	Hauteur de répartition ruissellement-percolation (mm)	Temps de demi-percolation (jours)
Sous-bassin de l'Iton amont à Bourth	176	27	10
Sous-bassin de l'Avre à Saint-Christophe-sur-Avre (cas d'un modèle GARDENIA à simple réservoir souterrain)	250	18	10
Sous-bassin de l'Avre à Saint-Christophe-sur-Avre (cas d'un modèle GARDENIA à double réservoir souterrain)	322	>1000	4
Bassin de l'Avre à Acon	154	64	40
Bassin de l'Avre à Muzy	154	54	33
Secteur des sables du Perche	216	25	1.5

Tableau 8 : Valeurs initiales des paramètres de recharge affectés au modèle, issues des résultats des modélisations réalisées avec GARDENIA

3.3.4. Définition des zones de sols (zones hydroclimatiques)

Comme expliqué au § 3.3.1, la recharge et le ruissellement doivent être estimés pour chaque maille et à chaque pas de temps du modèle. Pour estimer les flux de recharge des nappes et les flux de ruissellement, plusieurs paramètres ou variables sont nécessaires : la pluviométrie, l'évapotranspiration potentielle ainsi que des paramètres associés au processus de

recharge/ruissellement. Les 3 paramètres associés au processus de recharge/ruissellement sont les suivants :

- Le déficit en eau maximal du sol (RUMAX) (réserve utile des agronomes) (exprimé en « unité des hauteurs d'infiltrations et d'ETP » c'est-à-dire par défaut en mm) ; il peut aussi être utilisé en alternative, la capacité du sol progressive (CAP_SOL_PROGR) ;
- La durée de demi-percolation du réservoir H (exprimé en unité de temps des bilans hydroclimatiques) ;
- Niveau du réservoir H correspondant à 50% d'infiltration et 50% de ruissellement – donc EQUiRUissellement (exprimé en mm)

Le code de calcul Marthe réalise un bilan hydroclimatique couplé au calcul hydrodynamique de la nappe. Ce bilan permet de décomposer l'excédent de pluie en infiltration et ruissellement.

Le territoire modélisé est donc divisé en zones hydroclimatiques (ou zones de sols). Il est donc nécessaire de définir pour chaque zone hydroclimatique, des valeurs pour les 3 paramètres associées (RUMAX, CAP_SOL_PROGR et EQUiRUi):

Les zones de sol (ou zone hydroclimatique) du modèle présentées à l'illustration 24 correspondent au croisement des contours de la carte des sols au 1/1 000 000 de l'INRA et des zones hydroclimatiques présentées précédemment.

Le BRGM a commandé auprès de l'unité INFOSOL de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) d'Orléans, la base de données géographique des sols de France à l'échelle 1/1.000.000^{ème} version 1.1 du 21/12/1998. Cette base de données distingue des unités de sols ou Soil Mapping Units (SMU), ayant des caractéristiques relativement homogènes. L'illustration 23 présente les différentes unités de sol distinguées par la carte des sols de l'INRA.

Légende

 Emprise du modele Avre

Unité de sols de la carte de l'INRA au millionième

SMU (Soil Mapping Units)

-  330084
-  330126
-  330139
-  330176
-  330179
-  330658
-  330681
-  330714
-  330734
-  336862
-  337242

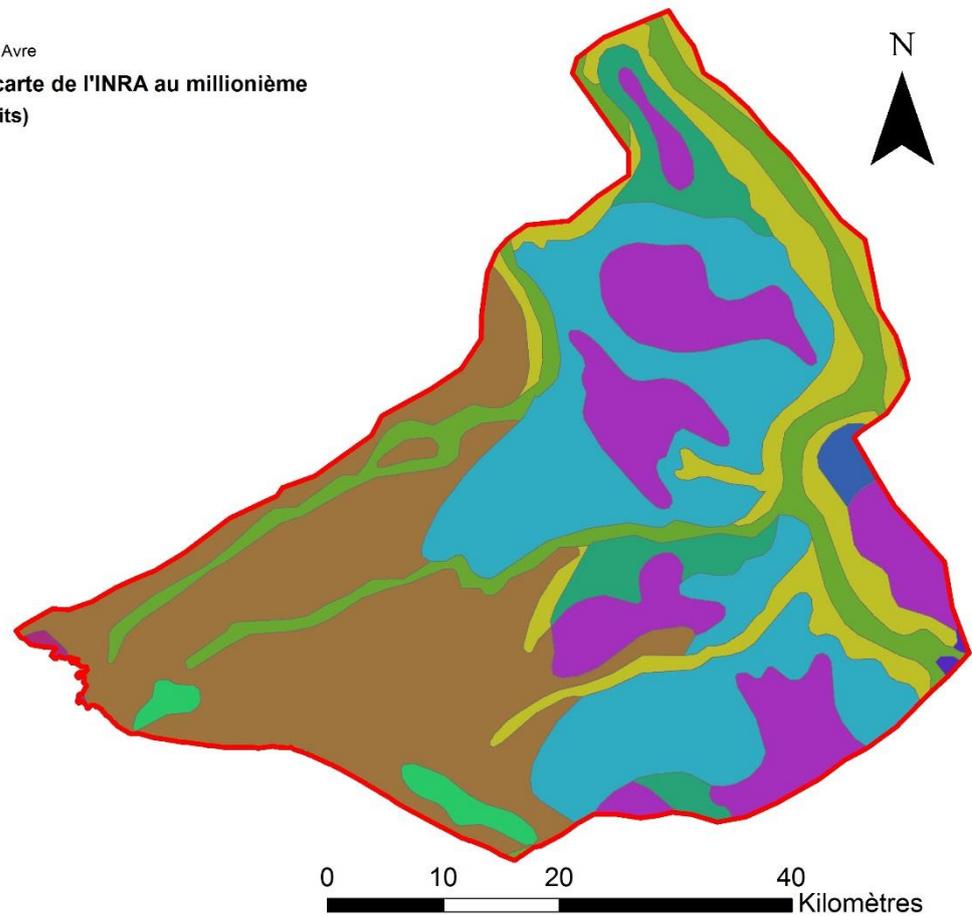


Illustration 23 : Unités de sol de la carte de l'INRA au millionième (source : base de données des sols de France INRA)

Le sous-bassin de l'Iton amont à Bourth comprend les zones de sol n°445, 455 et 465. Le sous-bassin de l'Avre à Acon et Muzy comprend les zones de sol n°401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416 et 417. Le sous-bassin de l'Avre à Saint-Christophe-sur-Avre comprend les zones n°300 et 301. Le secteur des sables du Perche comprend les zones n°435, 436, 438 et 439 (Illustration 24).

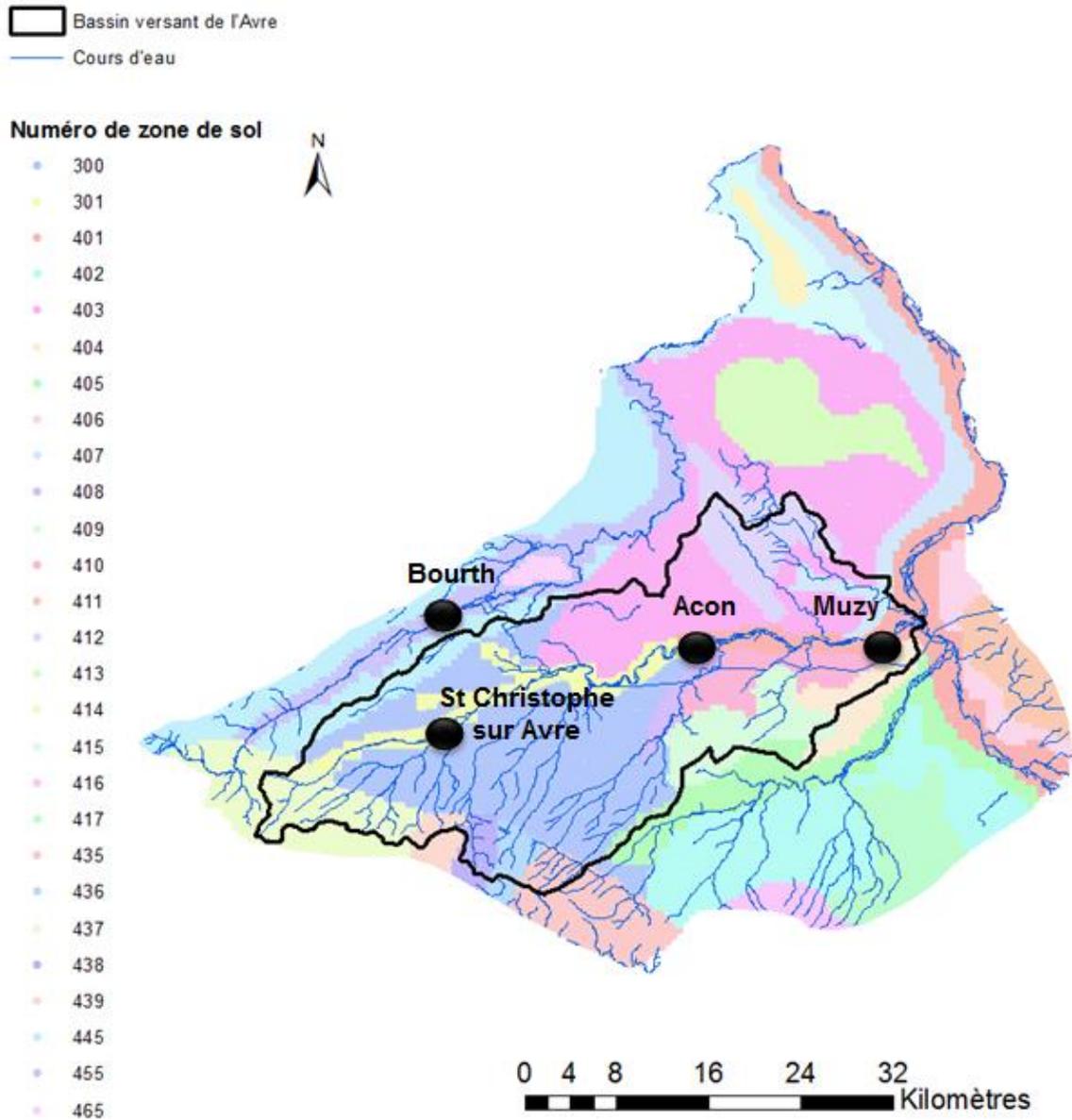


Illustration 24 : Zones de sol retenues pour le modèle maillé

3.4. RESEAU HYDROGRAPHIQUE

3.4.1. Représentation des écoulements de surface et des échanges nappe-rivière

Le réseau hydrographique de la zone modélisée est assez complexe. La zone d'étude est drainée par 4 cours d'eau principaux : l'Avre, l'Iton, la Blaise et l'Eure. L'Avre et la Blaise prennent leurs sources dans la zone d'étude. Seul le bassin versant amont de l'Iton (à l'amont de sa confluence avec le Rouloir) est inclus dans le modèle ; à l'aval, l'Iton constitue la limite du modèle. L'Eure ne prend pas sa source dans la zone modélisée ; le débit enregistré à Charpont, suivi en continu par la DREAL a donc été imposé à la première maille rivière de l'Eure.

L'Avre possède un réseau hydrographique très dense en rive droite avec de nombreux affluents (la Meuvette, la Pluche, le Lamblore, le Buternay, le Saint-Maurice, tandis qu'en rive gauche, l'Avre ne reçoit que deux affluents : le Ruet et la Coudanne). Toutefois, parmi ces affluents, seul la Meuvette est un cours d'eau permanent.

Par ailleurs, une partie de l'Iton est déviée dans l'Avre par l'intermédiaire du bras forcé de l'Iton qui a été construit au XII^{ème} siècle afin d'alimenter les fossés de la ville de Verneuil-sur-Avre. Il aurait été par la suite utilisé par des agriculteurs pour récupérer une partie de l'eau (Souchet, 1994).

L'aqueduc de l'Avre, inauguré en 1893, s'étend sur 102 km de long et permet l'alimentation en eau potable de la Ville de Paris. Il permet d'acheminer vers Paris les eaux des sources de la Vigne et du Breuil (Illustration 25) et celles du champ captant de Vert-en-Drouais.

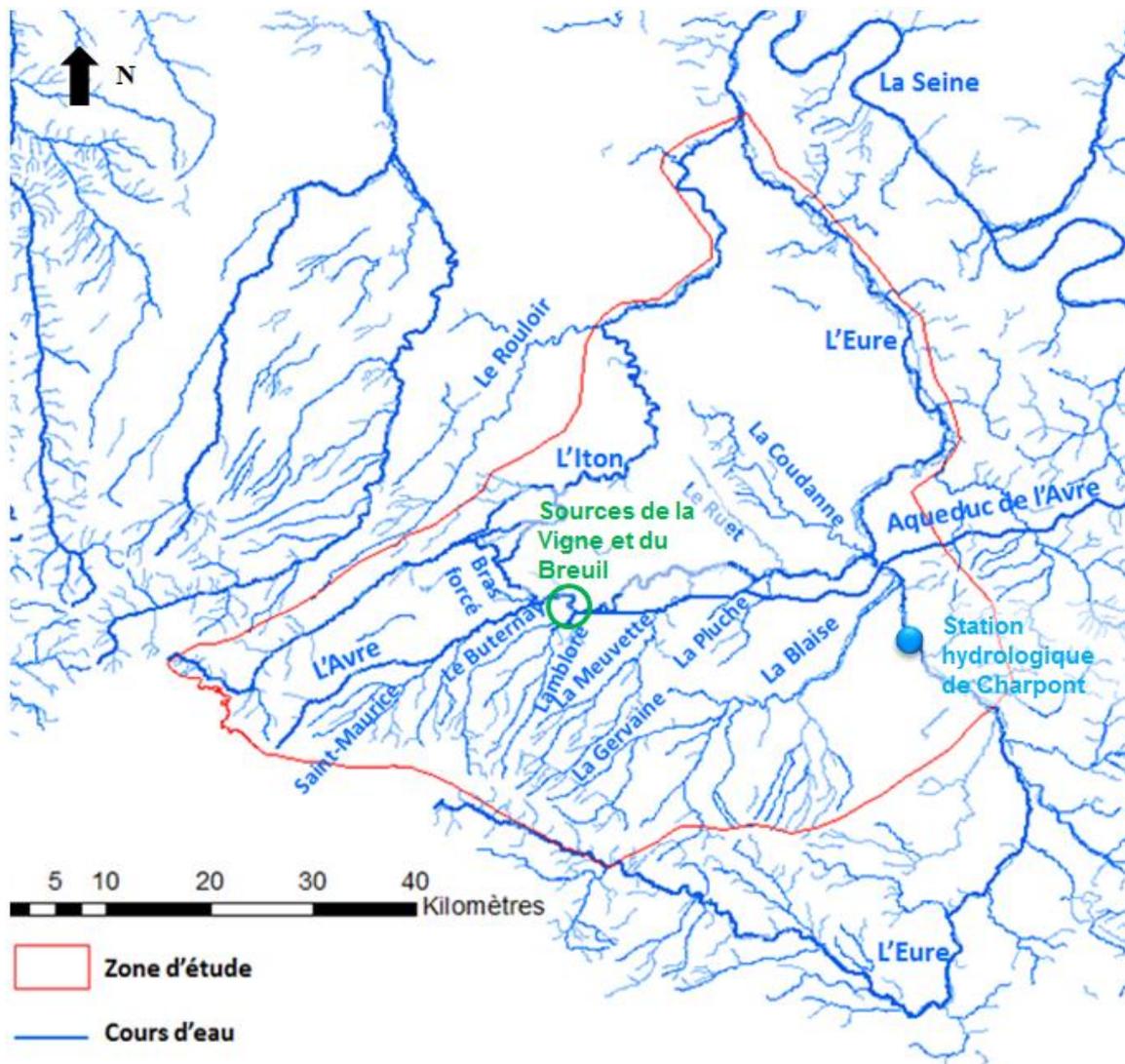


Illustration 25 : Réseau hydrographique de la zone d'étude

Plusieurs méthodes de représentation des relations nappe-rivière sont classiquement utilisées dans les modèles d'écoulements souterrains. Deux sont utilisées pour le modèle hydrogéologique de l'Avre :

- Prise en compte de manière explicite du réseau hydrographique principal en tant qu'entité hydraulique bien individualisée. Les cours d'eau simulés de cette manière ont été sélectionnés à partir de la base de données BD Carthage. Le réseau hydrographique ainsi modélisé est représenté à l'illustration 25. Pour ces cours d'eau, chaque maille du réseau hydrographique se voit assigner plusieurs paramètres régissant les échanges nappe-rivière et les écoulements superficiels.
- Utilisation de « mailles de débordement ». Avec cette approche, les cours d'eau sont simulés par une succession de mailles dans lesquelles la nappe peut déborder. En pratique, chaque maille située sous un cours d'eau se voit attribuer une cote de débordement correspondant à la cote du fond du lit. Si le niveau piézométrique calculé dans la maille dépasse cette cote, le niveau piézométrique est ramené à la cote de débordement attribuée à la maille et la hauteur d'eau excédentaire est traduite par un débit de débordement qui rejoint le tronçon aval le plus proche du réseau hydrographique.

En pratique, la nappe de la craie étant libre dans le bassin de l'Avre, toutes les mailles affleurantes ont été définies comme des mailles à débordement. Il a été vérifié après calage du modèle que la localisation des débordements simulés par le modèle était cohérente avec la localisation des sources, des zones humides ou de petits cours d'eau non pris en compte de façon explicite.

3.4.2. Les paramètres définissant le réseau hydrographique

Dans le logiciel MARTHE, le réseau hydrographique est organisé en affluents. Chaque affluent est découpé en un ensemble linéaire de tronçons. Un tronçon de rivière est défini par son numéro d'affluent et par son numéro de tronçon. Une maille rivière du modèle ne peut appartenir qu'à un seul tronçon (et donc un seul affluent).

Le débit de la rivière dans chaque tronçon est calculé de manière itérative à partir du débit provenant du tronçon amont, du débit sortant dans le tronçon aval, du débit échangé avec l'aquifère, et éventuellement d'un terme source (pompage ou injection dans la rivière).

Les interactions entre la nappe et la rivière dépendent de la différence entre la hauteur d'eau dans la rivière et le niveau piézométrique. Les données nécessaires à la définition du réseau hydrographique sont pour chaque tronçon : la largeur, la longueur et la cote du fond de lit de la rivière.

Une campagne de mesures de seize sections de rivières a été réalisée les 24 et 25 juin 2014 afin de collecter un minimum de données relatives au réseau hydrographique de l'Avre et de les intégrer ensuite au modèle (Illustration 26). Celles-ci ont permis de compléter les données disponibles par ailleurs (BD TOPO, BD Carthage, photos satellites, ...).

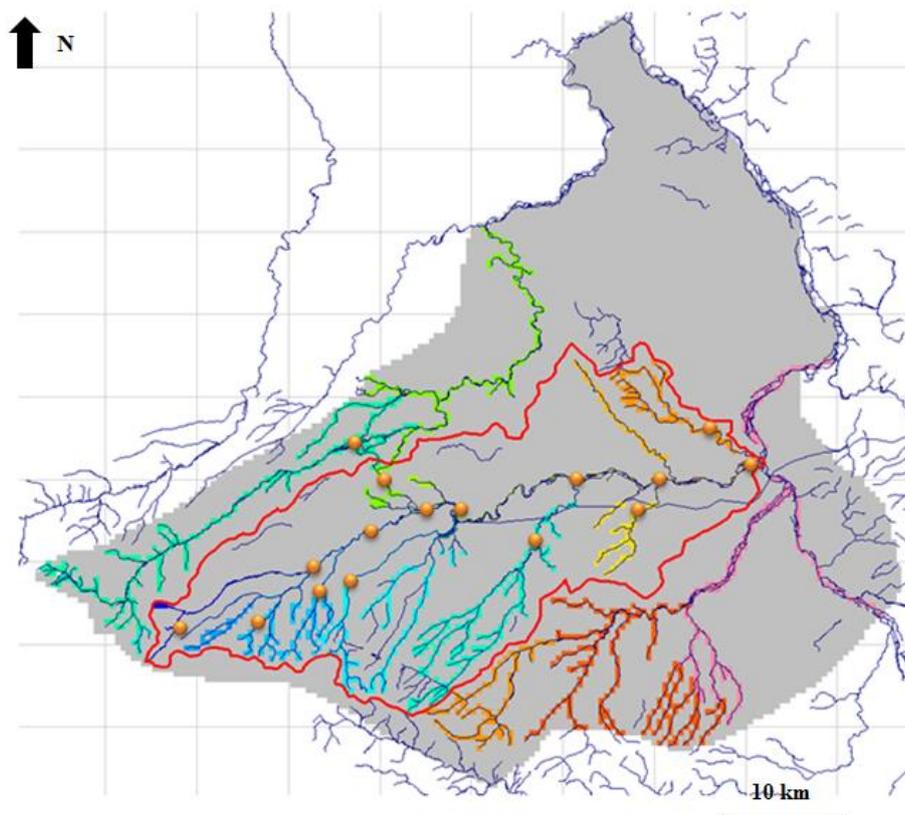


Illustration 26 : Acquisition sur le terrain de données relatives au réseau hydrographique en juin 2014

La cote absolue du fil d'eau, la cote absolue du fond de la rivière, ainsi que la largeur du tronçon ont été nivelées à cette occasion (Illustration 27). Des échantillons du lit des rivières ont également été collectés.

Commune	Cours d'eau	Largeur (m)	Altitude de l'eau (m)	Altitude du fond (m)	Profondeur d'eau (m)	X L93	Y L93	Altitude du point de mesure
Courdemanche	Coudanne	2,00	114,71	114,59	0,12	575413,68	6857881,40	116,87
Saint-George-Motel	Avre	15,78	73,46	72,74	0,72	579785,68	6854939,80	76,14
Saint-Remy-sur-Avre	Avre	8,70	96,05	95,16	0,89	571045,90	6853274,90	98,77
Escorpain	Pluche	2,30	127,26			568726,24	6849844,79	131,06
Dampierre-sur-Avre	Avre	16,45	114,81	113,55	1,26	562877,54	6852929,70	117,32
Saint-Lubain-de-Cravant	Meuvette	16,90	141,95	141,81	0,14	559512,25	6847327,32	144,67
Vermeuil-sur-Avre	Avre	9,70	147,68	147,38	0,30	551401,62	6850300,29	149,07
cintray	Iton forcé	7,80	179,65	179,18	0,47	543278,96	6857674,74	181,32
Vermeuil-sur-Avre	Iton forcé	5,10	180,19	179,43	0,76	545014,46	6852821,94	181,98
Vermeuil-sur-Avre	Avre	8,05	157,70	156,77	0,93	548325,07	6850128,71	160,18
Saint-Victor-sur-Avre	Avre	3,50	168,32	167,93	0,39	543815,12	6848270,00	170,19
Rohaire	Butemay	1,30	191,40	191,04	0,36	541667,25	6843539,93	193,35
Moussonvilliers	Gohière	0,65	191,97	191,93	0,04	538774,36	6842933,85	193,38
Saint-Christophe-sur-Avre	Avre	5,90	185,36	185,29	0,07	538292,50	6844838,18	187,04
Poterie-au-Perche	Saint-Maurice	1,80	218,09	217,77	0,32	533259,07	6839574,73	218,81
Bresolette	Avre	2,70	251,65	251,38	0,27	525340,86	6839525,06	253,30

Illustration 27 : Données relatives au réseau hydrographique

La perméabilité du lit de la rivière au droit de ces tronçons a été estimée en toute première approche à partir de l'observation visuelle des échantillons prélevés dans le fond de ces cours d'eau (Illustration 28).

Commune	Cours d'eau	Nature du fond	Description précise du fond	Commentaires générales sur le cours d'eau
Courdemanche	Coudanne	graviers	vase brune à grise présente essentiellement sur les bords. Au centre du cours d'eau, présence de graviers centimétriques et débris de végétaux (bois de bois)	Lit plus creusé en amont du pont, pas de variations importantes de la largeur du cours d'eau
Saint-George-Motel	Avre	sables et graviers	Sables fins sur les bords avec de petits graviers centimétriques, sables grossiers et graviers centimétriques à pluricentimétriques entre le bord et le centre du cours d'eau, cailloux et blocs pluricentimétriques au centre du cours d'eau. Présence importante de végétation (plantes aquatiques) et présence de poissons. Le sable est composé de petits fragments de roches (en majorité du silice) et de coquilles.	Lit plus profond au centre.
Saint-Remy-sur-Avre	Avre	blocs	Présence de blocs sur le fond, les plus petits étant à l'intérieur du virage et les plus gros à l'extérieur. Présence de végétation au fond.	Pont au niveau d'un virage du cours d'eau donc le fond n'est pas droit (min 3,06 et max 3,59 m) et le cours d'eau a été canalisé.
Escorpain	Pluche	vase et sables	Vase plutôt grise présente sur tout le cours d'eau. Présence de débris de végétaux (branchage, débris de feuille). Présence de blocs au niveau du pont et de sable après le seuil sous la vase.	Présence de seuils en amont et en aval du pont, mesure prise en amont car le seuil est moins important. Largeur variable car les berges sont très végétalisées.
Dampierre-sur-Avre	Avre	sables et blocs	Fond compact, blocs centimétriques à pluricentimétriques avec des sables grossiers entre les blocs. Nature de blocs : silice essentiellement.	Fond assez homogène, augmentation du courant après le pont.
Saint-Lubain-de-Cravant	Meuvette	sables et graviers	Fond compact, cailloux centimétriques avec du sable grossier entre eux. Vase sur les berges.	Fond homogène, berges végétalisées (donc largeur avec plus ou moins 1 à 1,50m).
Vemeuil-sur-Avre	Avre	sables et blocs	Gros blocs décimétriques et alluvions sableux. Formations de "current cast".	Eaux troubles on ne voit pas le fond
cintray	Iton forcé	sables et graviers	Très vaseux sur les bords et par endroits dans le cours d'eau (plaques de vase). Sables grossiers et cailloux de 2-3 cm. Présence de végétaux sur le fond (surtout vers le centre).	Eaux troubles, très difficile de voir le fond. Berges abruptes, l'eau a creusé le talus. Courant très faible.
Vemeuil-sur-Avre	Iton forcé	vase	Fond très vaseux (au minimum 10cm) avec de très nombreux débris de végétaux (branches) et quelques plantes aquatiques.	Eaux très troubles, très peu de courant. Bordures végétalisées.
Vemeuil-sur-Avre	Avre	vase	Présence importante de vases mais c'est une hypothèse car non vérifiable	Pas d'accès au fond du cours d'eau et eau très troubles donc très difficile de connaître la nature du fond. Courant faible.

Illustration 28 : Acquisition de données relatives à la nature du lit des cours d'eau

Le réseau hydrographique est composé de tronçons superposés aux mailles aquifères. Chaque tronçon est défini par les paramètres suivants :

- Sa largeur et sa longueur. La longueur des tronçons correspond à l'intersection entre le cours d'eau et la maille du modèle. La largeur des rivières a été déterminée à l'aide de mesures prises sur le terrain en juin 2014 et à l'aide de photos satellites.
- La cote absolue du fil d'eau dans le tronçon. Elle a été définie par interpolation entre les points mesurés en juin 2014. Concernant les autres tronçons, à l'extérieur du bassin de l'Avre, elle a été définie arbitrairement comme se situant à 0.50 m au-dessus du point le plus bas du MNT au pas de 50 m. Cette cote a été vérifiée et, le cas échéant, corrigée pour garantir qu'une maille située à l'aval hydraulique d'une autre se voit bien attribuer une cote de fil d'eau inférieure à celle de la maille amont.
- La cote absolue du fond de la rivière. La hauteur d'eau dans la rivière a été fixée arbitrairement à 0,5 m. La cote du fond de la rivière est donc calée sur la cote du fil d'eau dans la rivière diminuée de 0,5 m.
- L'épaisseur du lit de la rivière. Une épaisseur uniforme de 0,2 m a été retenue pour l'ensemble du domaine modélisé.
- La perméabilité du lit de la rivière. La perméabilité du lit de la rivière n'étant généralement pas connue, elle a été fixée à 10^{-6} m/s (avant calage) sur tous les cours d'eau modélisés. Ce paramètre a ensuite été ajusté et revu en cours de calage, notamment pour restituer les fluctuations observées sur certains piézomètres situés en bordure de cours d'eau.

Comme mentionné dans le rapport des phases 1 et 2 (BRGM/RP-60458-FR -David, 2012), l'Avre est rejoint par l'Iton grâce au Bras Forcé de Verneuil, construit au XII^{ème} siècle afin d'alimenter en eau les fossés de la ville de Verneuil. Par la suite, deux dérivations supplémentaires ont été creusées pour reprendre une partie de ces eaux.

Le bras forcé de l'Iton ne fait l'objet d'aucun suivi de débit en continu. Quelques données de jaugeages volants ont permis de réaliser une corrélation entre les débits du bras forcé en amont de Verneuil et les débits de l'Iton à Bourth, en amont des dérivations. L'incertitude relative à l'estimation des débits du bras forcé est donc très forte.

Les quantités d'eau dérivées de l'Iton vers l'Avre ont été estimées au mieux sur ces données existantes et intégrées au modèle par le biais de dérivations de débits du réseau hydrographique (Illustration 27).

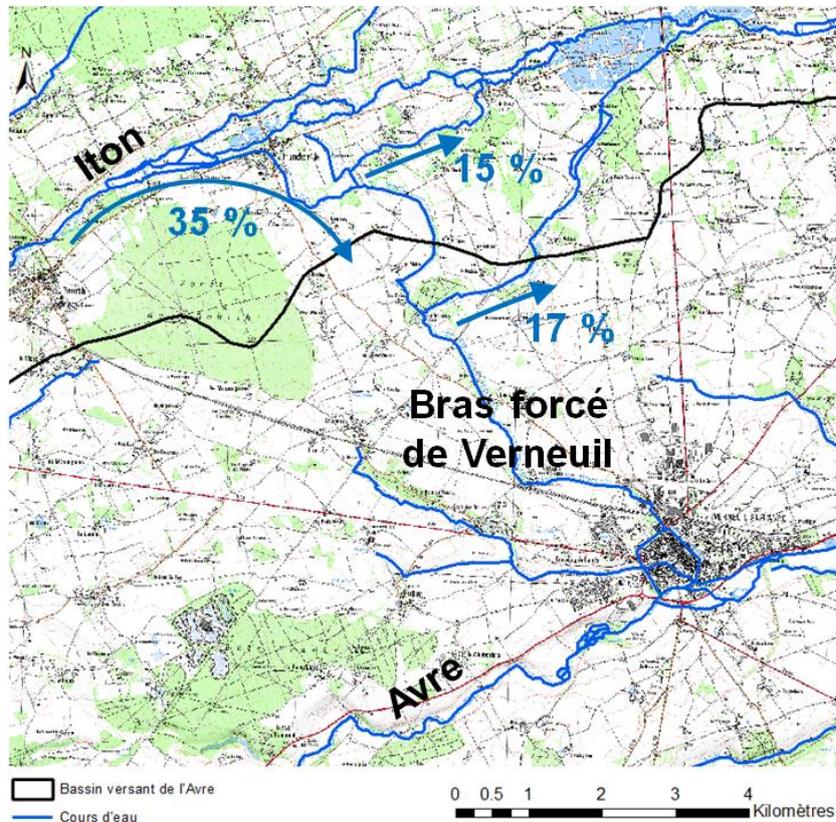


Illustration 29 : Estimation des dérivations de l'Iton vers l'Avre (schéma utilisé dans le modèle spatialisé)

3.5. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES INITIAUX

Des paramètres initiaux ont été attribués à chaque couche du modèle sur la base des données issues de la littérature, des différents pompages d'essai réalisés et des connaissances mises à disposition par les experts locaux. Ces paramètres ont été ajustés et réévalués lors de la phase de calage afin de restituer au mieux les niveaux et débits observés dans la zone modélisée.

3.5.1. Perméabilités

Comme indiqué dans le rapport BRGM/RP-58587-FR (BRGM, 2010), la perméabilité est plus élevée dans les vallées principales que dans les vallées secondaires, elles-mêmes présentant une perméabilité supérieure à celle des zones de plateaux. Cette approche correspond à la connaissance de la répartition de la perméabilité du sous-sol en domaine crayeux, et plus généralement au modèle conceptuel classique de la craie normande.

Cependant, très peu de valeurs de perméabilité ou transmissivité ont été rendues disponibles au sein de la zone d'étude. Localement, il existe quelques données utiles dans des rapports traitant de l'exploitation ou la production d'eau, de la définition de périmètres de protection ou de la délimitation de bassins de captages (et très souvent les valeurs contenues dans les deux derniers proviennent des premiers).

Comme indiqué dans le chapitre 2, en l'absence de valeurs de perméabilité ou de transmissivité, le débit spécifique peut apporter une première approximation de la capacité d'un aquifère à laisser l'eau circuler en son sein. Ce paramètre, exprimé en $m^3/h/m$, est calculé comme le ratio entre un débit de pompage et le rabattement mesuré dans le forage pour ce débit.

Des valeurs initiales de perméabilité ont donc été estimées pour le plupart à partir des valeurs de débits spécifiques disponibles dans la zone d'étude (Illustration 30) et des quelques valeurs de transmissivité qui existent pour le secteur (Illustration 31) ainsi que, pour ces dernières, de l'épaisseur moyenne des différentes couches. La connaissance de l'hydrogéologie locale a permis d'élaborer des premières hypothèses de spatialisation de la perméabilité, notamment en se basant sur la morphologie des terrains (plateau / vallée).

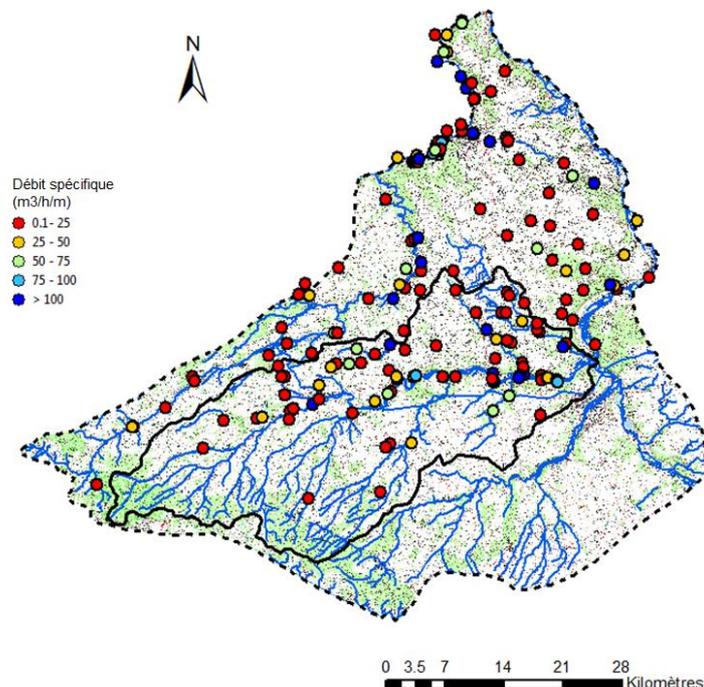


Illustration 30 : Valeurs de débits spécifiques disponibles dans la zone d'étude

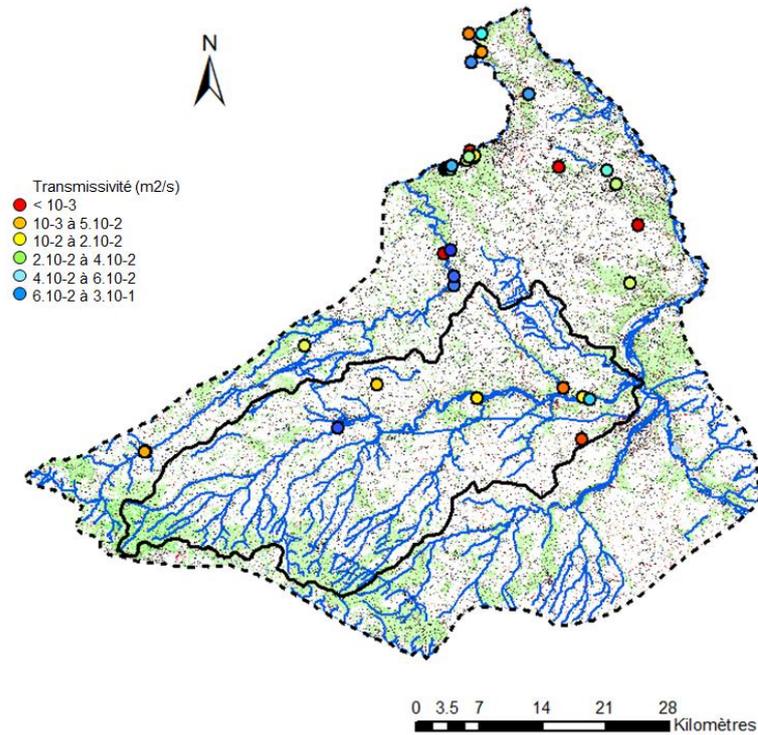


Illustration 31 : Valeurs de transmissivités disponibles dans la zone d'étude

Selon les connaissances des experts locaux, dans la vallée de l'Avre, la perméabilité des alluvions est de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} m/s, celle des argiles à silex varie entre 10^{-6} et 10^{-5} m/s. Le réseau hydrographique en chevelus est le résultat de terrains très peu perméables.

Dans la craie altérée, la perméabilité peut atteindre 10^{-3} voire 10^{-2} m/s et même plus dans les secteurs fortement fracturés. Enfin, dans la craie saine, la perméabilité fluctue entre 10^{-5} et $5 \cdot 10^{-7}$ m/s, voire moins.

3.5.2. Coefficient d'emmagasinement

Le coefficient d'emmagasinement traduit la capacité d'un aquifère à stocker et déstocker de l'eau : il affiche des valeurs différentes suivant que la nappe est libre ou captive (cf. 2.3.1).

La nappe de la craie est considérée comme libre sur l'ensemble de la zone d'étude. Son coefficient d'emmagasinement est assimilable à la porosité efficace.

Le coefficient d'emmagasinement peut être déduit d'un pompage d'essai si les rabattements ont été mesurés dans un piézomètre voisin du puits de pompage. Compte tenu du faible nombre de valeurs disponibles (Illustration 32), la spatialisation de ce paramètre a été effectuée en concertation avec les experts locaux.

Dans les alluvions et les argiles à silex, il est compris entre 1 et 5 %. Dans la craie, il varie entre 0.1% et 5 % mais peut atteindre près de 10 % par endroits, notamment dans les secteurs fracturés. Dans la craie plus profonde et moins perméable, il est plus faible.

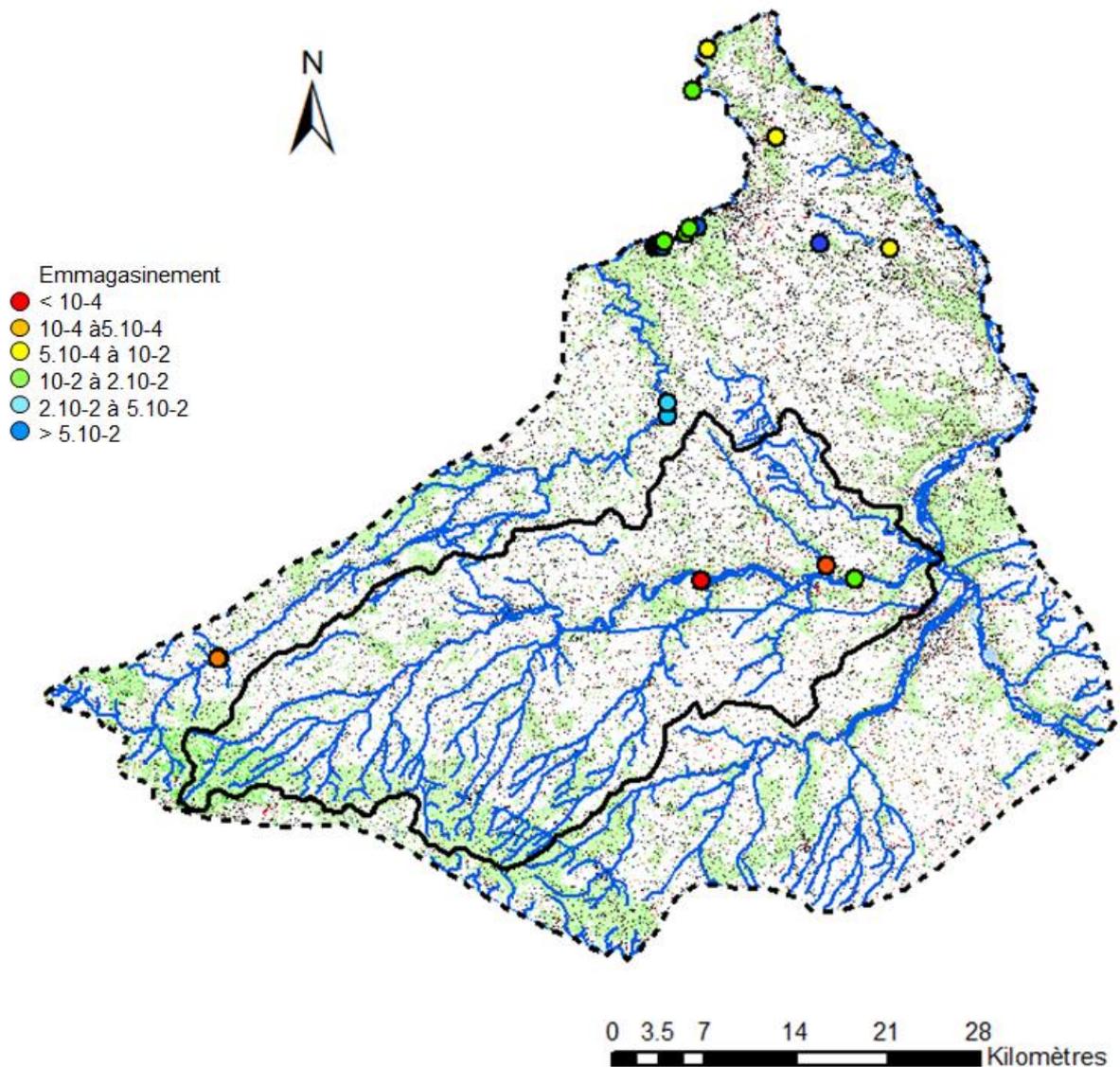


Illustration 32 : Valeurs de coefficient d'emmagasinement disponibles dans la zone d'étude

3.6. PRELEVEMENTS

Les volumes annuels prélevés par les collectivités, les industries et les irrigants entre 2000 et 2009 figurent dans le rapport de phases 1 et 2 du projet.

Ces données ont dû être complétées pour couvrir la période de simulation. Celles-ci ont été transmises par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie pour la période allant de 1994 à 2012 sous forme de prélèvements annuels. Les prélèvements de Vert-en-Drouais et des sources du Breuil et de la Vigne ont été transmis par Eau de Paris pour la période 1990 - 2012, au pas de temps mensuel.

3.6.1. Prélèvements pour l'alimentation en eau potable et l'industrie

Les prélèvements pour l'alimentation en eau potable et l'industrie constituent l'essentiel des prélèvements dans la zone d'étude.

Entre 92 et 98 % de ces prélèvements s'effectuent dans la nappe de la Craie pour l'essentiel (Illustration 33).

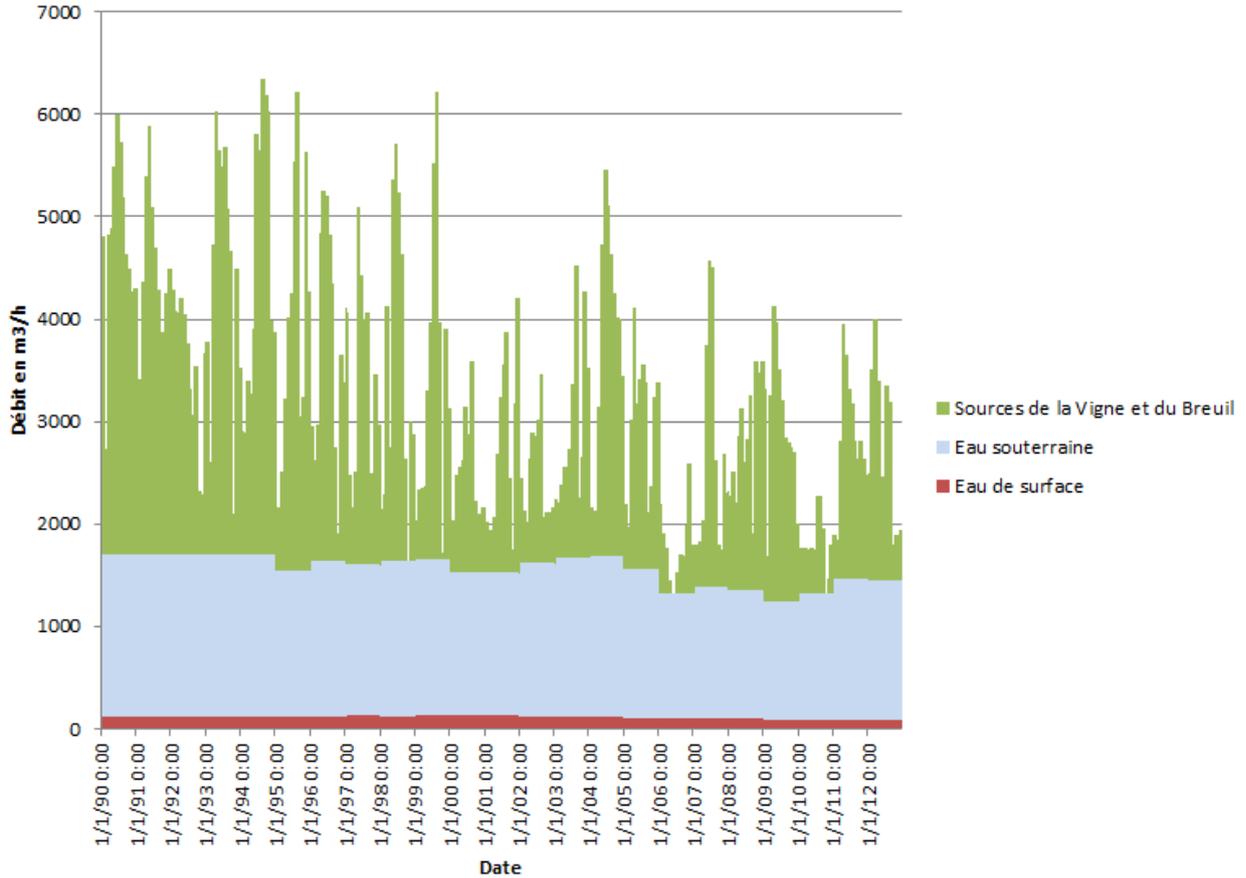


Illustration 33 : Prélèvements (en m3/h) pour l'alimentation en eau potable et l'industrie dans les eaux de surface (en rouge) et dans les eaux souterraines (en bleu et en vert).

Les prélèvements industriels et pour l'eau potable sont supposés peu varier au cours de l'année dans ce secteur. Concernant les prélèvements d'Eau de Paris, ils ont été transmis au pas de temps mensuel.

3.6.2. Prélèvements pour l'irrigation

Les données de prélèvement pour l'irrigation sont issues du fichier des volumes annuels déclarés à l'Agence de l'Eau Seine-Normandie au titre de la redevance « prélèvement ».

Selon le rapport de phases 1 et 2, les cultures dominantes dans la zone d'étude sont dans l'ordre le blé tendre, le colza et l'orge. En terme de superficie, elles représentent respectivement 37 %, 22 % et 19 %, soit 78 % de la superficie totale des cultures. Parmi ces trois cultures, celles pouvant nécessiter une irrigation d'après la Chambre d'Agriculture de l'Eure, sont le blé et l'orge.

Un coefficient de mensualisation avait été calculé pour le blé et l'orge entre 2000 et 2010 (David, 2012). Leur coefficient de mensualisation moyen entre 2000 et 2010 a été calculé (Illustration 34). Le détail de ces calculs figure en annexe 3.

Mois	Pourcentage d'irrigation pour le blé et l'orge
Janvier	0 %
Février	0 %
Mars	0,8 %
Avril	14,1 %
Mai	17,6 %
Juin	45,2 %
Juillet	9,1 %
Août	7,5 %
Septembre	5,3 %
Octobre	0,4 %
Novembre	0 %
Décembre	0 %

Illustration 34 : Répartition mensuelle des prélèvements pour l'irrigation du blé et de l'orge sur le bassin versant de l'Avre (David, 2012)

Ces coefficients de mensualisation des prélèvements pour l'irrigation ont été appliqués sur l'ensemble de la chronique de 1994 à 2012 pour les prélèvements en eau de surface (Illustration 35) et pour les prélèvements en eau souterraine (Illustration 36).

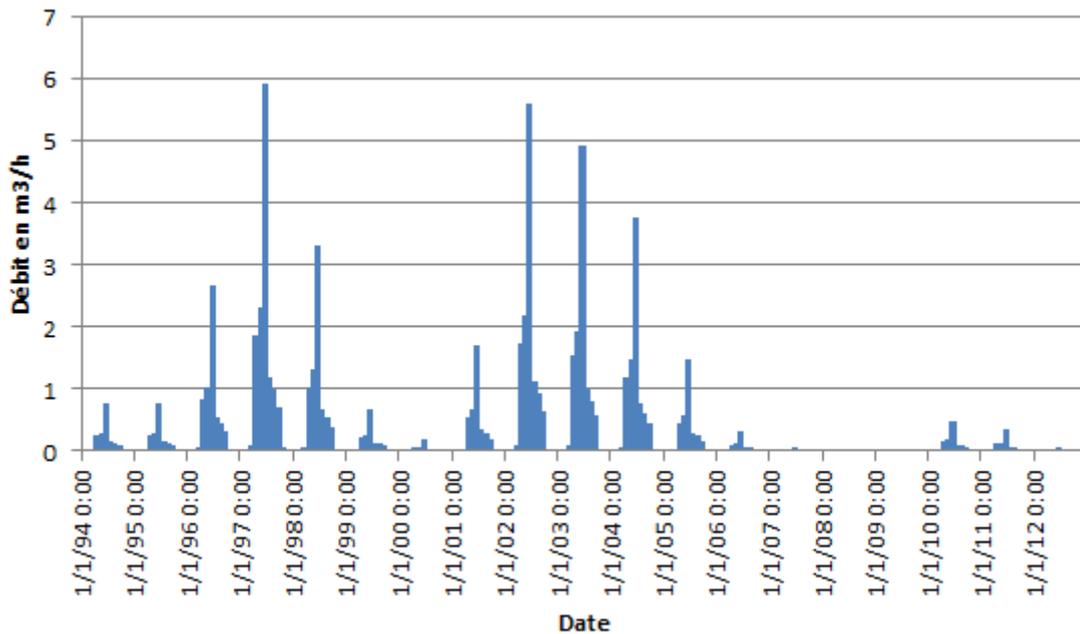


Illustration 35 : Prélèvements (en m3/h) pour l'irrigation dans les eaux de surface (1994 – 2012)

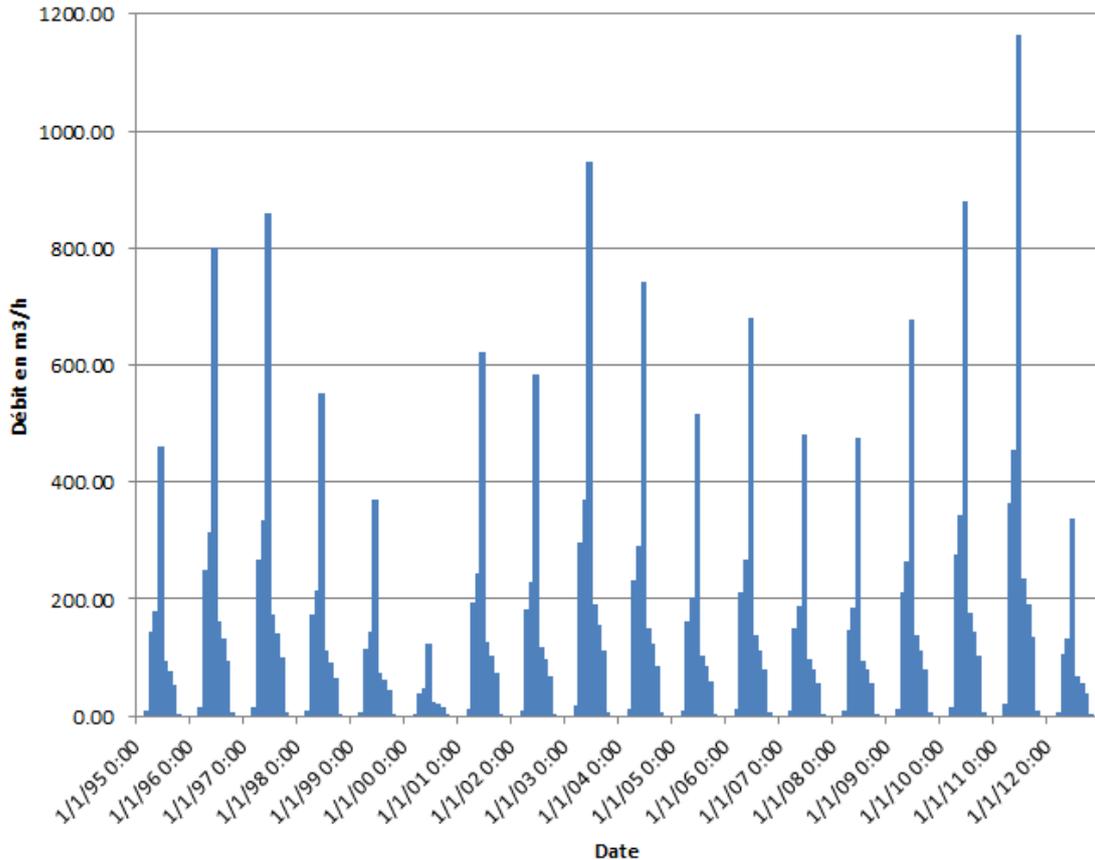


Illustration 36 : Prélèvements (en m3/h) pour l'irrigation dans les eaux souterraines (1994 – 2012)

Les prélèvements d'eau ont été répartis dans les différentes couches du modèle. L'attribution des prélèvements par couche a été réalisée en fonction de la profondeur des forages et du positionnement des horizons hydrogéologiques retenus pour le modèle à leurs emplacements.

3.7. REJETS EN RIVIERE

On dénombre 42 rejets significatifs en rivière sur l'ensemble de la zone modélisée. La localisation géographique précise des rejets dans le bassin de l'Avre a été vérifiée par le Syndicat Intercommunal de la vallée de l'Avre (SIVA).

En ce qui concerne les stations d'épuration du bassin versant de l'Avre, les données de débits moyens de rejets avaient été récupérées lors des phases 1 et 2 de l'étude auprès des DDT 27, 28 et 61 ; ces données ont été compilées avec celles disponibles dans l'état des lieux du SAGE. Les données concernant les stations à l'extérieur du bassin de l'Avre ont été récupérées dans le cadre de la modélisation. Concernant les stations pour lesquelles aucune donnée de débit n'était disponible, des estimations ont été réalisées à partir de la courbe établie issue de la corrélation faite entre les débits moyens connus des stations du secteur et leurs capacités fonctionnelles correspondantes en équivalents habitants.

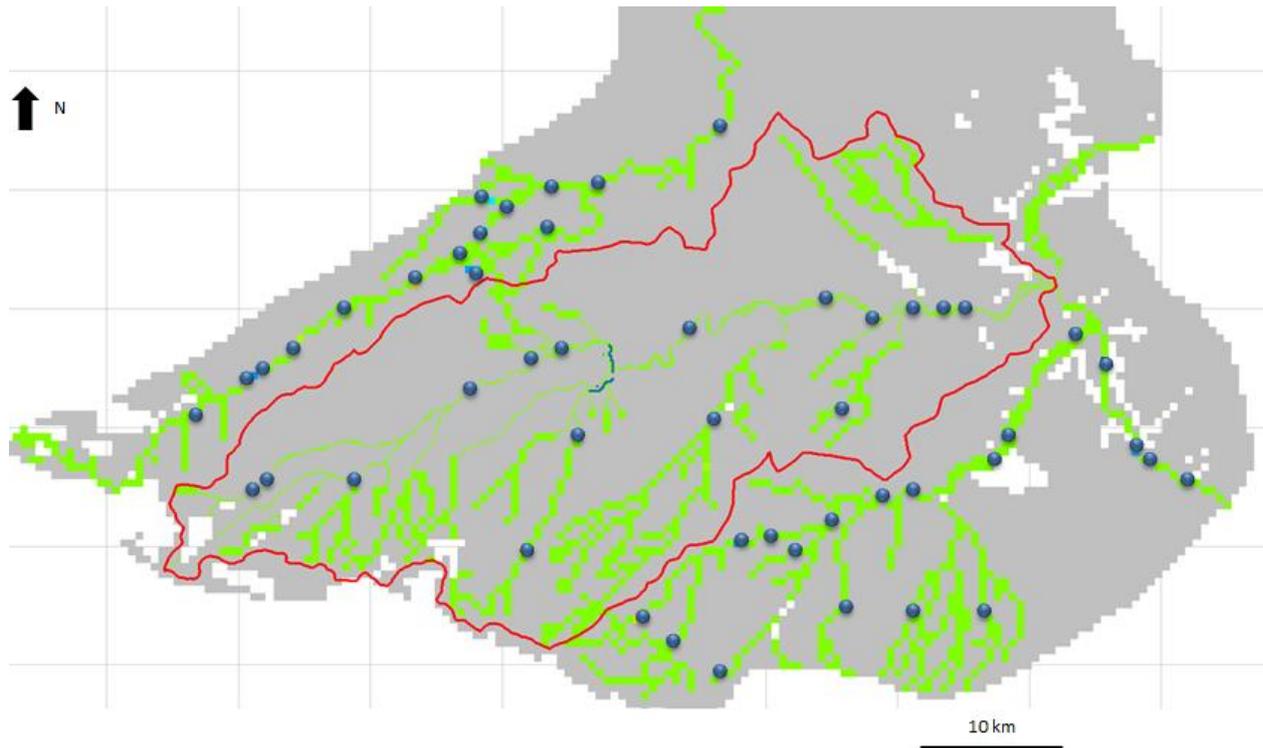


Illustration 37 : Localisation des rejets en rivière dans la zone modélisée

3.8. INTEGRATION DES PRELEVEMENTS ET REJETS EN RIVIERE DES SOURCES DU BREUIL ET DE LA VIGNE DANS LE MODELE

Les sources de la Vigne et du Breuil sont des émergences de la nappe de la craie, au droit de mailles rivières. Une partie de l'eau captée au niveau de ces sources s'écoule dans l'aqueduc pour l'alimentation en eau potable de l'agglomération parisienne. L'autre partie est rejetée dans les canaux de Foisys et de Launay et rejoint l'Avre en aval. Ces sources sont captées et non pas pompées. Il n'y a pas de pompage, et donc pas de rabattement de la nappe au droit de ces captages.

Les prélèvements de ces sources ont dans le modèle maillé, été considérés comme des prélèvements d'eau de surface dans des mailles « rivière ». Seuls les prélèvements nets sont pris en compte dans le modèle pour ces 2 sources (volume prélevé total – volume rejeté à Foisys et Launay).

Les chroniques mensuelles de rejet dans les canaux de Launay et de Foisys n'étaient pas disponibles avant janvier 2002. Elles ont donc été reconstituées entre janvier 1990 et décembre 2001 en corrélant les chroniques de débit des sources de la Vigne et du Breuil avec la chronique piézométrique du piézomètre de l'Aigle (02144X0005/S1). Ceci a nécessairement engendré des incertitudes et du fait de celles-ci, la restitution des débits au cours d'eau pourrait être partiellement entachée d'erreurs sur la période 1990-2001.

4. Calage du modèle hydrodynamique

4.1. PROCEDURE DE CALAGE

4.1.1. Les objectifs du calage et les différentes étapes

a) Objectifs

Cette phase correspond au réglage des différents paramètres impliqués dans le mode opérationnel du modèle afin qu'il puisse in fine reproduire le plus fidèlement possible le fonctionnement de l'hydro-système qu'il est censé représenter. Il s'agit ici de rechercher la meilleure adéquation possible entre les observations faites sur le terrain pour les paramètres de contrôle et les valeurs calculées issues du modèle pour ces mêmes paramètres lors des simulations d'ajustement de l'outil. Ces paramètres de contrôle sont pour l'essentiel dans le cas présent les chroniques de charges hydrauliques disponibles pour les différents horizons aquifères, les chroniques de débits connues des sources et celles connues pour les rivières en un point donné de l'hydro-système.

Pour les modèles spatialisés du type nappe-rivières, les principaux paramètres à ajuster sont généralement les paramètres descriptifs du milieu hydrogéologique et hydrologique (ex. ; perméabilités, coefficients d'emmagasinement des formations, perméabilité du lit des cours d'eau, ...), ainsi que ceux liés à la recharge par les précipitations et aux ruissellements induits en surface vers les rivières et plans d'eau.

Le calage d'un modèle de bassin comme celui de l'Avre, est une procédure itérative lourde pendant laquelle on procède par une technique d'« essais – erreurs », en faisant des hypothèses successives sur la distribution des valeurs des paramètres intervenant dans l'ajustement de l'outil. Cette phase permet au modélisateur d'apprécier les réactions du modèle, d'identifier les secteurs critiques, de mesurer le poids relatif des différentes composantes hydrauliques, d'apprécier leurs interactions, et d'évaluer leur contribution au fonctionnement du système aquifère. Autant que possible, les paramètres sont modifiés par couches ou par grande zone.

La qualité du calage et son évolution sont appréciées visuellement par superposition des chroniques de charge et de débit mesurées et calculées (paramètres de contrôle).

Compte tenu des objectifs de l'étude et des simulations envisagées, **les priorités assignées au calage du modèle de l'Avre ont été de restituer le mieux possible les chroniques de débits et de niveaux piézométriques aux points de contrôle retenus, particulièrement en période d'étiage.**

b) Les différentes étapes

Deux étapes sont nécessaires pour étalonner un modèle spatialisé : dans un premier temps, un calage en régime et, dans un second temps, un calage en régime transitoire.

La première étape du calage en régime permanent porte sur un état hydraulique stabilisé, n'induisant ni stockage, ni déstockage d'eau dans l'hydro-système, c'est-à-dire sans prendre en compte la capacité d'emmagasinement du milieu souterrain. Cette phase de calage est par conséquent circonscrite à la seule distribution spatiale des perméabilités et des paramètres liés à la recharge. Les objectifs de cette première étape sont de :

- Valider la géométrie du modèle spatialisé ;

- Reproduire un état hydrodynamique stabilisé de l'hydro-système ;
- Ajuster les choix et hypothèses du modèle conceptuel par des validations quantifiées ;
- Vérifier la cohérence des données, nombreuses et indépendantes, qui régissent le comportement hydraulique du système aquifère (recharge, perméabilités, niveaux piézométriques, débits...).

Une fois le calage en régime permanent mené à bien, il est complété par une phase de calage en régime transitoire pour déterminer la distribution spatiale des coefficients d'emmagasinement dans toutes les formations modélisées, et plus encore pour affiner la distribution des perméabilités et des paramètres qui régissent la recharge du système aquifère et le ruissellement superficiel.

En pratique, de nombreux allers-retours sont nécessaires entre le calage en régime permanent - pour dégrossir la distribution des perméabilités et calculer un état piézométrique stabilisé fournissant les charges initiales nécessaires aux simulations en transitoire - et le calage en régime transitoire pour ajuster à la fois les perméabilités, les coefficients d'emmagasinement et les paramètres recharge/ruissellement.

- **Régime permanent**

Pour le modèle de l'Avre, le calage en régime permanent porte sur la situation d'octobre 2006. Il s'agit d'une période d'étiage, assimilée à une situation proche d'un régime d'équilibre. Les valeurs de prélèvement sont celles d'octobre 2006, et les recharges correspondent à la recharge moyenne sur l'année hydrologique 2005-2006.

Pour les simulations en régime permanent, il est nécessaire d'appliquer un flux de recharge et un flux de ruissellement moyen dans chacune des mailles. En octobre 2006, période d'étiage marqué, il a été considéré qu'il n'y avait pas de ruissellement, aussi un flux nul a été imposé à toutes les mailles du modèle. Les valeurs initiales des flux moyens de recharge utilisées pour les simulations en régime permanent ont par ailleurs été déterminées à partir des données du rapport de phases 1 et 2 (BRGM/RP-60458-FR, David, 2012), et appliquées dans le modèle par zone climatique (Illustration 19). Ces valeurs ont ensuite été revues au cours de la procédure de calage ou d'ajustement du modèle.

Le temps de calcul nécessaire pour les simulations en régime permanent en partant d'une situation proche du régime d'équilibre est de quelques minutes, ce qui a permis d'effectuer un grand nombre de simulations durant la phase de calage.

- **Régime transitoire**

Le calage en régime transitoire a été mené sur la période 1990-2012, période pour laquelle les données de prélèvement sont disponibles ou ont été reconstituées, pour certaines entre 1990 et 1994.

La comparaison des débits simulés et observés dans les cours d'eau a permis de vérifier la cohérence des pluies efficaces, leur répartition entre ruissellement et recharge, et la mécanique de restitution des échanges nappe-rivière.

Le pas de temps des calculs hydrodynamiques est mensuel. Pour les calculs hydroclimatiques (calcul des flux de recharge et de ruissellement), le pas de temps est par contre journalier.

Le temps de calcul nécessaire pour une simulation en régime transitoire sur la période 1990-2012 a été d'environ 3h15 (calcul réalisé sur un ensemble d'environ 143 000 mailles).

c) Convergence numérique du modèle

La convergence des calculs itératifs est contrôlée par plusieurs critères, principalement les écarts de charge moyens et maximaux entre deux itérations successives et les débits résiduels d'erreur (global sur l'ensemble du modèle et ponctuel dans chacune des mailles). En pratique, l'état de convergence d'un modèle est principalement évalué par des indicateurs portant sur le bilan hydraulique des différentes couches, et plus particulièrement sur le déséquilibre de bilan dans chaque maille, chaque couche, et pour l'ensemble du modèle.

4.1.2. Paramètres de calage du modèle

Les paramètres de calage sont des paramètres non mesurables, non mesurables sur l'ensemble des mailles ou pour lesquels les données disponibles présentent une certaine incertitude que le processus de calage sert à évaluer.

a) Paramètres hydrodynamiques

Les valeurs de perméabilité et de coefficient d'emménagement des différentes formations, connues ponctuellement ou inconnues pour certaines formations, sont des valeurs essentielles à ajuster durant le calage.

b) Recharge

Les paramètres de recharge, déterminés par grandes zones, doivent être ajustés pour permettre de restituer les débits des cours d'eau et les fluctuations piézométriques.

c) Echanges nappe-rivière

Les paramètres influençant les échanges nappe-rivière, notamment l'épaisseur et la perméabilité du lit de la rivière, sont inconnus. La perméabilité du lit a été utilisée comme paramètre de calage pour restituer les fluctuations piézométriques observées sur les ouvrages situés en bordure de cours d'eau, ainsi que les chroniques de débit des cours d'eau, notamment en étiage.

4.1.3. Données utilisées pour le calage du modèle

Les observations de terrain utilisées comme références de calage ou données de contrôle sont de différentes natures :

- Mesures ponctuelles (dans le temps et dans l'espace) du niveau piézométrique d'une nappe ;
- Localisation d'une source, traduisant une émergence de nappe ;
- Cartes piézométriques indiquant les niveaux pour un état hydrodynamique donné du système aquifère, ainsi que les directions et gradients d'écoulement, voire les évolutions temporelles lorsque plusieurs cartes ont été levées au fil du temps ;
- Chroniques de débit de rivières et de niveaux piézométriques.

a) Mesures piézométriques ponctuelles

Pour le calage en régime permanent, les données piézométriques disponibles pour octobre 2006 ont été recherchées sur l'ensemble de la zone d'étude, afin de cerner sur une extension la plus large possible les niveaux piézométriques de l'époque. La plupart des données ponctuelles sont

issues des campagnes de terrain réalisées en octobre 2006 dans le cadre de la réalisation d'une carte piézométrique en basses-eaux de la région Haute-Normandie. Pour les points dont la chronique piézométrique couvre le mois d'octobre 2006, une valeur a été extraite pour compléter les mesures ponctuelles réalisées lors de la campagne de 2006. Au total, des mesures sont disponibles sur plus de 80 points de la zone modélisée, dont une quarantaine dans le bassin versant de l'Avre (Illustration 38). On constate toutefois, la quasi-absence de données disponibles à cette date à l'aval du bassin en rive droite de l'Avre.

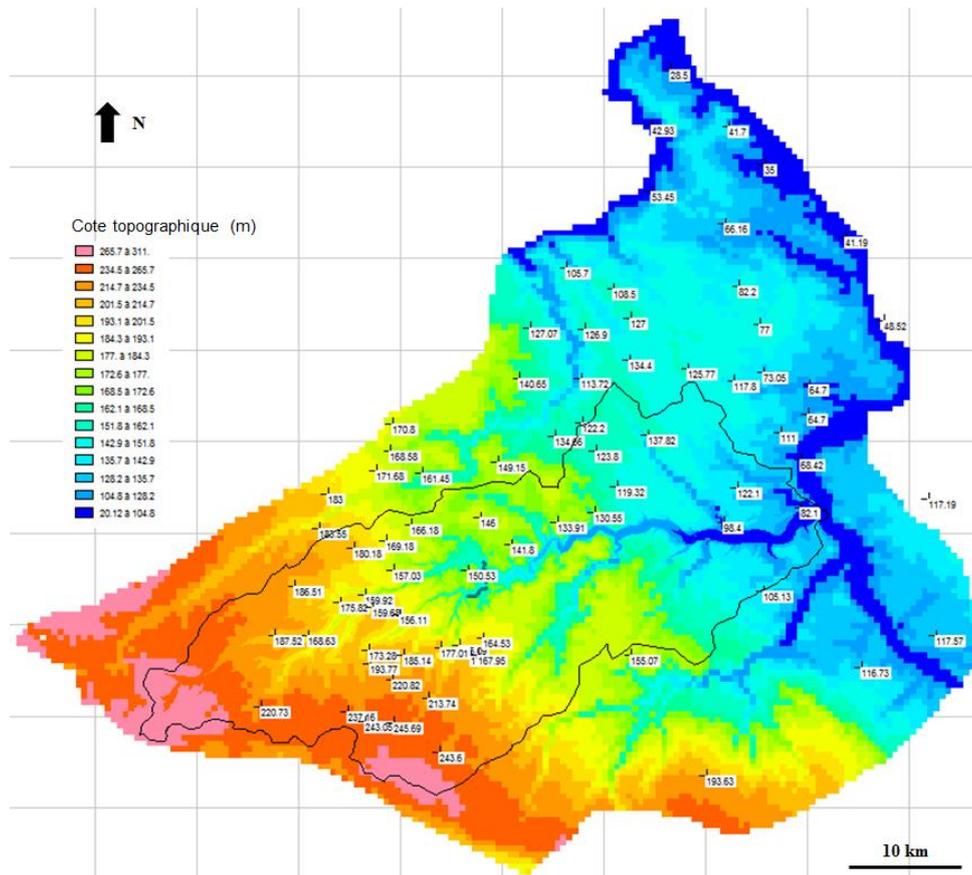


Illustration 38 : Localisation des mesures ponctuelles piézométriques d'octobre 2006

b) Cartes piézométriques

Plusieurs cartes piézométriques couvrent au moins partiellement la zone d'étude.

A la demande d'Eau de Paris (anciennement SAGEP), des cartes piézométriques de la craie indifférenciée à l'étiage en novembre 1990 (Illustration 39) et en hautes-eaux en mars 1991 (Illustration 40) ont été réalisées par le BURGEAP dans le cadre d'une étude hydrogéologique du système aquifère des sources de la Vigne et du Breuil (secteur amont du bassin de l'Avre).

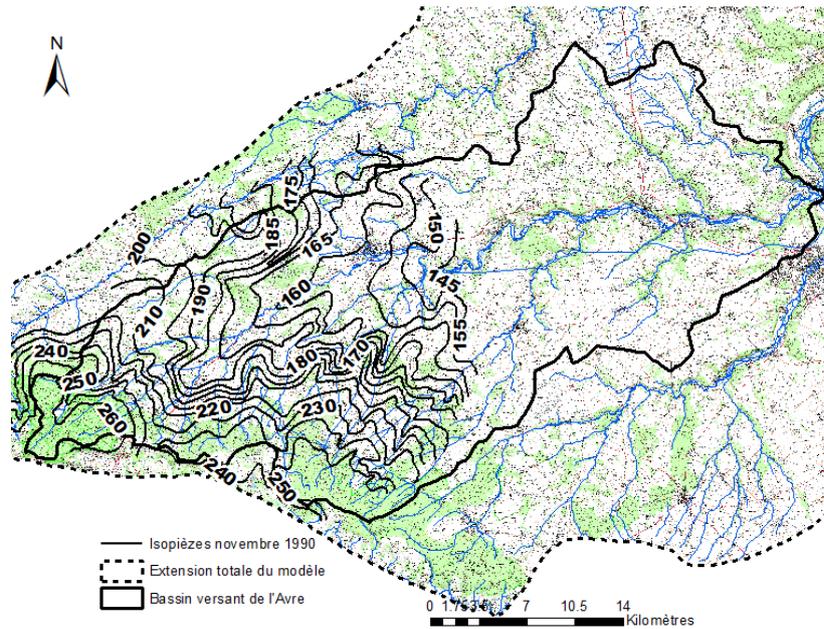


Illustration 39 : Carte piézométrique de novembre 1990 (Planche B, BURGEAP, 1991)

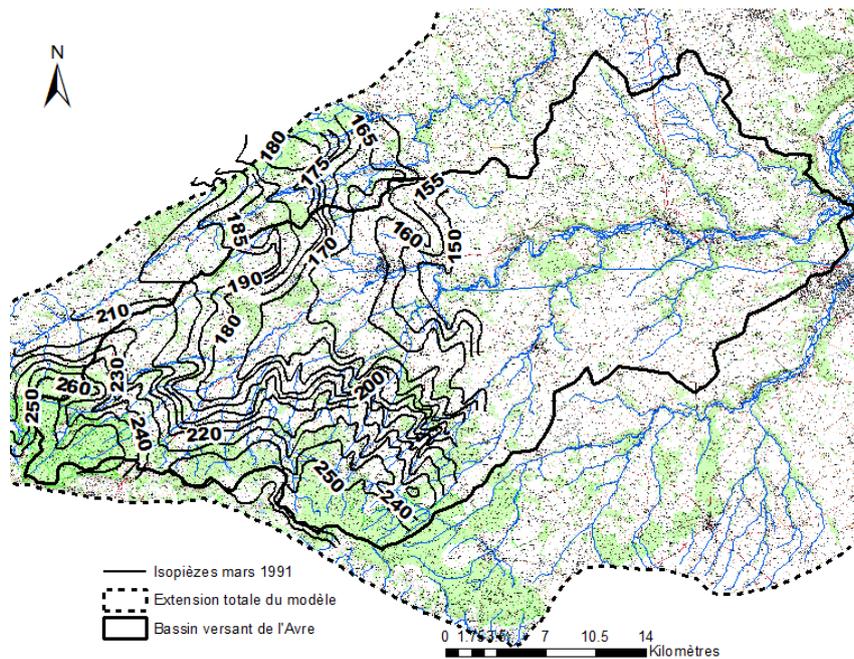


Illustration 40 : Carte piézométrique de mars 1991 (Planche C, BURGEAP, 1991)

D'autre part, à la demande du Ministère de l'Industrie, des Postes et Télécommunications et du Commerce Extérieur et de l'Agence de l'Eau Loire Bretagne, le BRGM a réalisé une carte piézométrique du Cénomaniens en mars 1994 (Illustration 41) (BRGM/RR-38582-FR, 1995).

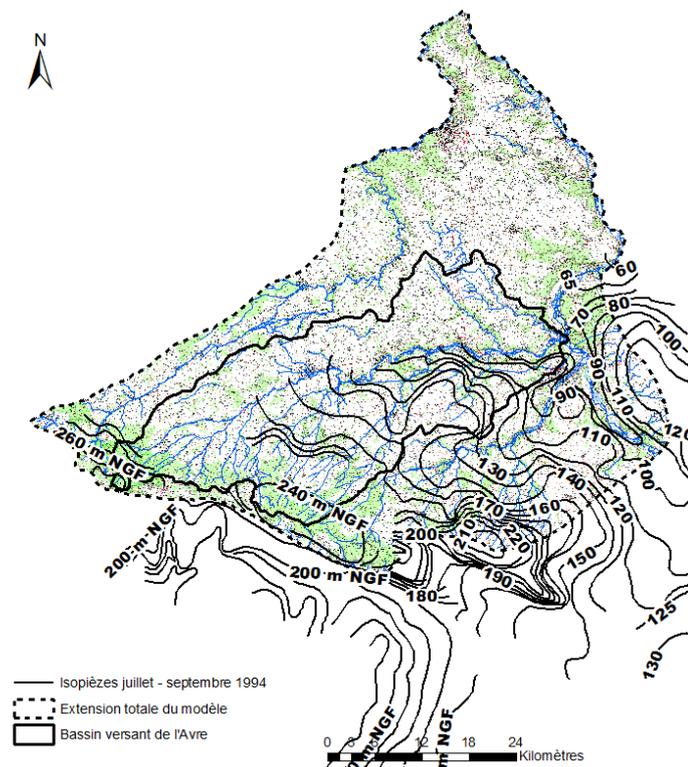


Illustration 41 : Carte piézométrique du Cénomani en mars 1994 (BRGM/RR-38582-FR)

Plus tard, à la demande de l'Agence de l'Eau Seine Normandie (AESN), au vu du caractère exceptionnel des niveaux dans l'aquifère de la craie, le BRGM a coordonné un ensemble de mesures de piézométrie en Haute-Normandie en mai-juin 2001 (BRGM/RP-51153-FR, 2001). Par ailleurs, la DREAL (anciennement DIREN) de Haute-Normandie et le BRGM se sont associés pour la réalisation d'une campagne de mesures piézométriques de la nappe de la craie en Haute-Normandie. La campagne de mesures a été menée en septembre - octobre 2006 et a permis la collecte de niveaux piézométriques synchrones représentatifs d'un état d'étiage sévère de la nappe de la craie en Haute-Normandie (BRGM/RP-55028-FR, 2006).

Les cartes piézométriques de 2006 (Illustration 43) et de 2001 (Illustration 42) sont issues de l'atlas hydrogéologique de Haute-Normandie (BRGM/RP-59301-FR, 2011), qui a eu pour objectif de valoriser ces deux campagnes piézométriques.

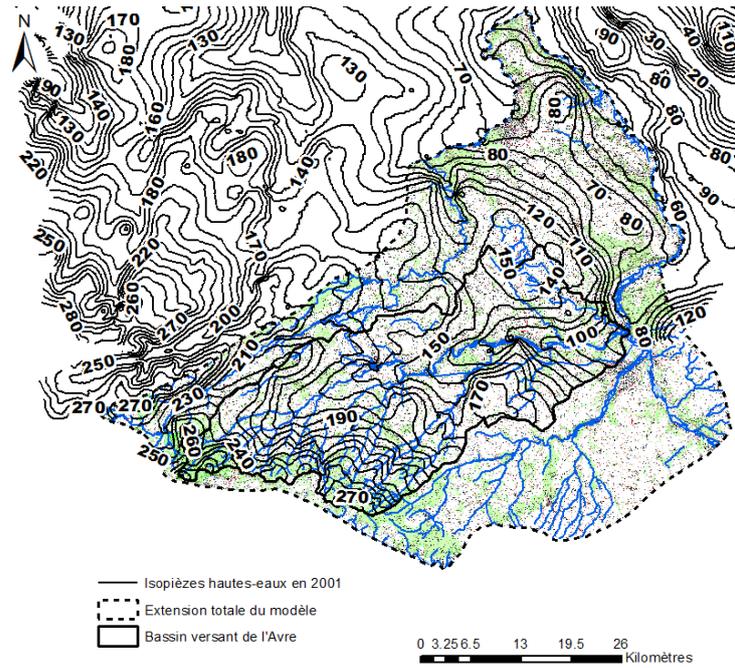


Illustration 42 : Atlas hydrogéologique de Haute-Normandie - piézométrie hautes-eaux en 2001 (BRGM/RP-59301-FR, 2011)

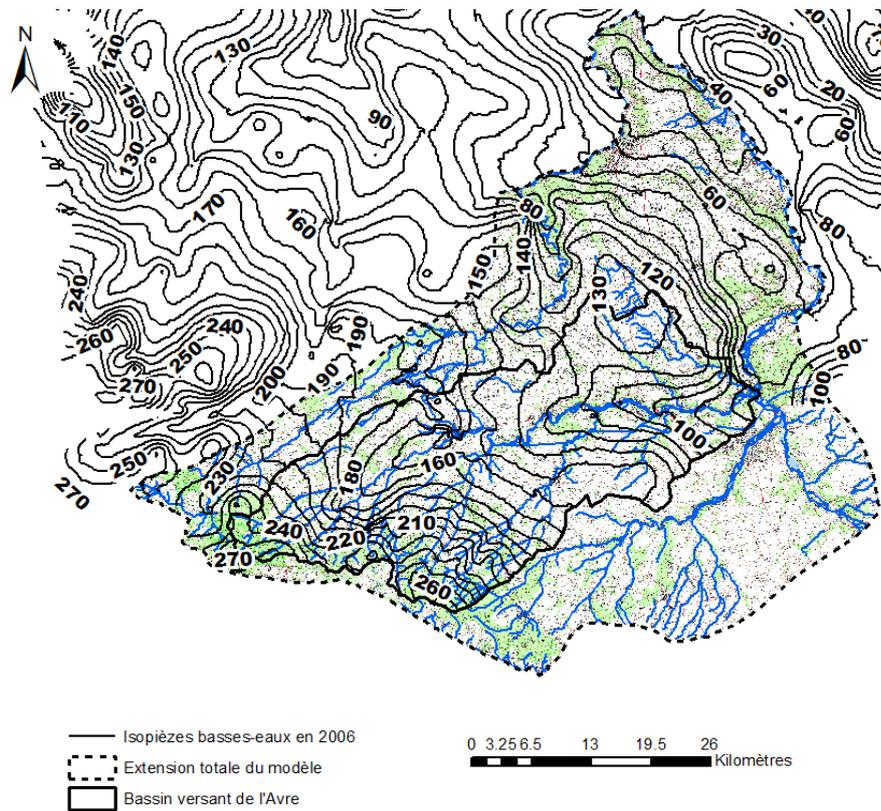


Illustration 43 : Atlas hydrogéologique de Haute-Normandie - piézométrie basses-eaux en 2006 (BRGM/RP-59301-FR, 2011)

Une carte piézométrique de la craie (Illustration 44) a par ailleurs été réalisée en 2001 à la demande du Conseil Départemental d'Eure et Loir.

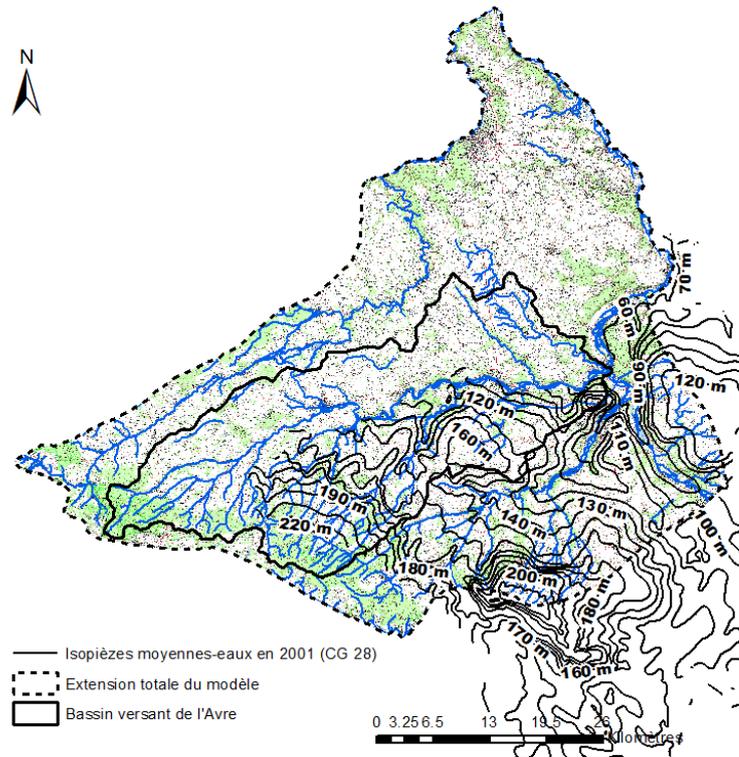


Illustration 44 : Carte piézométrique des moyennes eaux en 2001 pour le département d'Eure-et-Loir (CD28)

La carte piézométrique a également été réalisée en juillet 2002 à la demande de ce même Conseil Départemental dans le département d'Eure-et-Loir (Illustration 45).

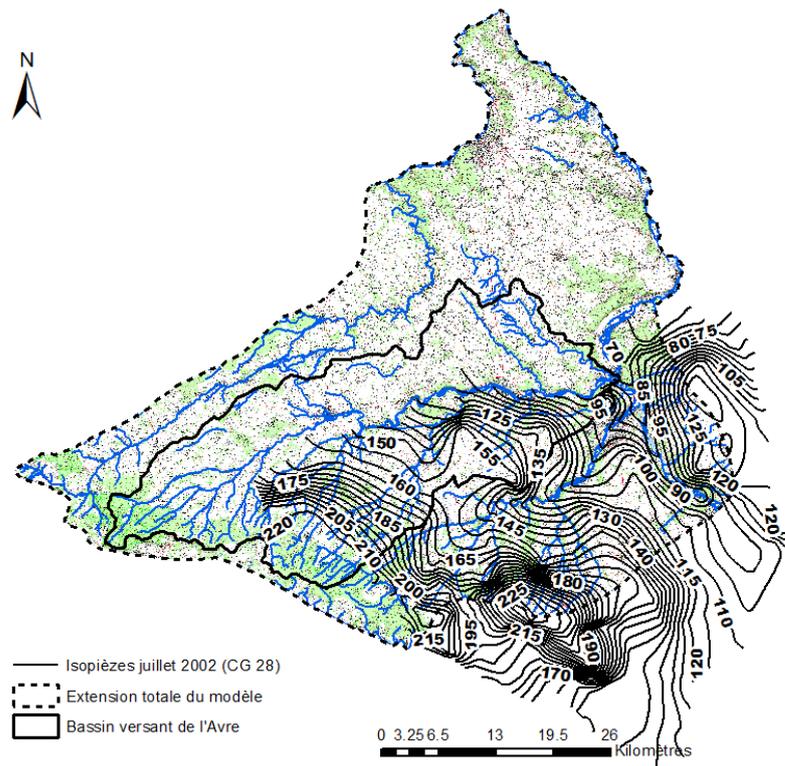


Illustration 45 : Carte piézométrique en juillet 2002 dans le département d'Eure-et-Loir (CD28)

En 2003, une carte piézométrique du Cénomaniens a aussi été réalisée par Sogreah pour les mois d'octobre et novembre (Illustration 46).

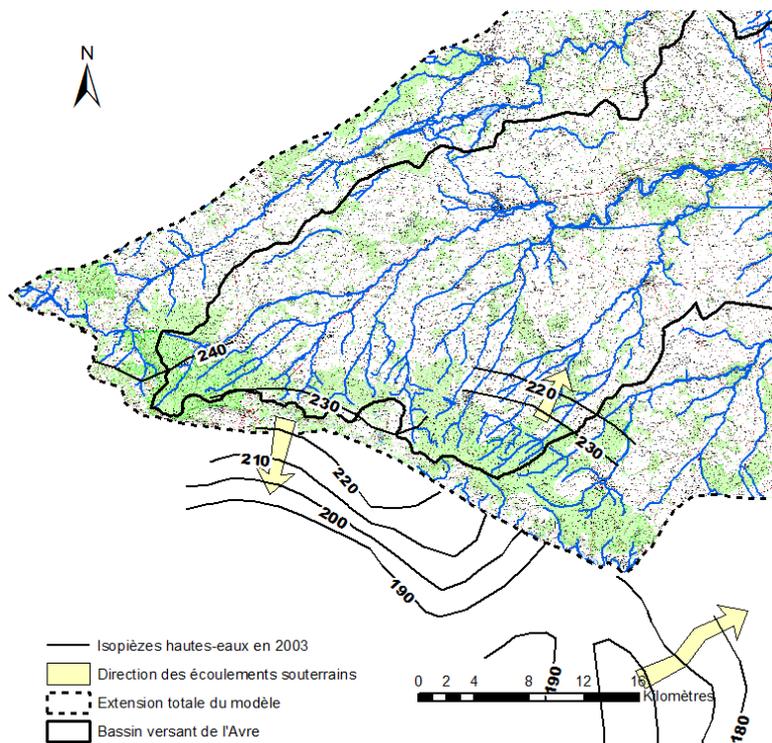


Illustration 46 : Carte piézométrique du Cénomanién en octobre - novembre 2003 (Sogreah)

Enfin, deux campagnes piézométriques en 2009, menées à la demande d'Eau de Paris, dans le cadre de la délimitation des bassins d'alimentation de captages de Montreuil-sur-Eure et Vert-en-Drouais (BRGM/RP-58587-FR, 2010), ont permis la réalisation des cartes piézométriques de mars 2009 (Illustration 47) et octobre 2009 (Illustration 48).

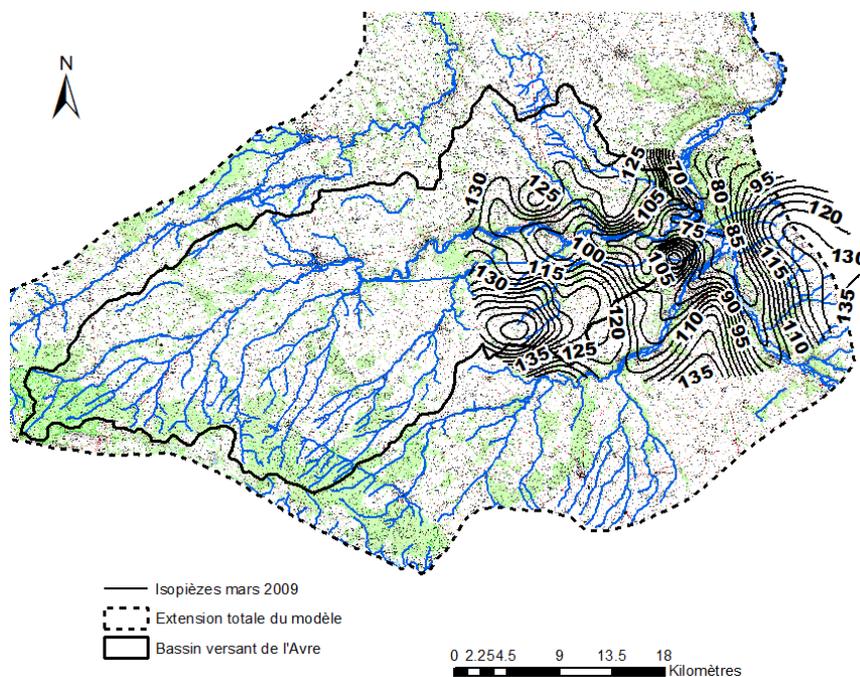


Illustration 47 : Carte piézométrique en mars 2009 sur le secteur aval de la vallée de l'Avre (BRGM/RP-58587-FR, 2010)

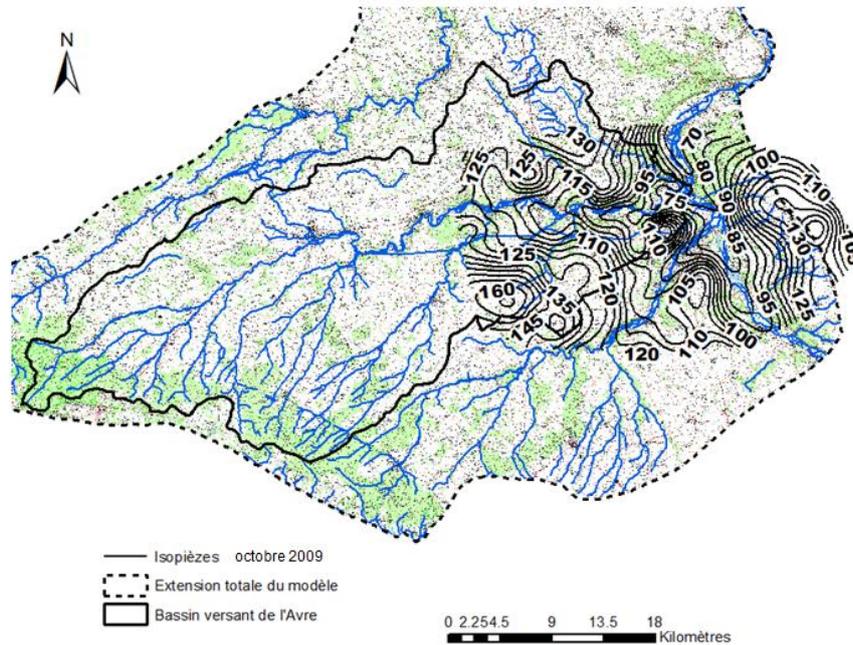


Illustration 48 : Carte piézométrique en octobre 2009 sur le secteur aval de la vallée de l'Avre (BRGM/RP-58587-FR, 2010)

c) Localisation des sources

La localisation des sources est un élément de calage intéressant car une source est un exutoire de nappe qui contraint ses écoulements. Les sources doivent être prises en compte pour vérifier que le modèle restitue correctement (1) les niveaux piézométriques au droit de la source et (2) lorsqu'ils sont connus, les débits de la source. Dans le territoire modélisé, les débits des sources de la Vigne et du Breuil sont connus. En ce qui concerne les autres sources, elles sont avant tout un paramètre de contrôle de la piézométrie. En effet, au droit des sources, la côte piézométrique doit être supérieure ou égale à la côte topographique.

Les sources inventoriées à partir des données disponibles dans la Banque du Sous-Sol sont présentées à l'illustration 49.

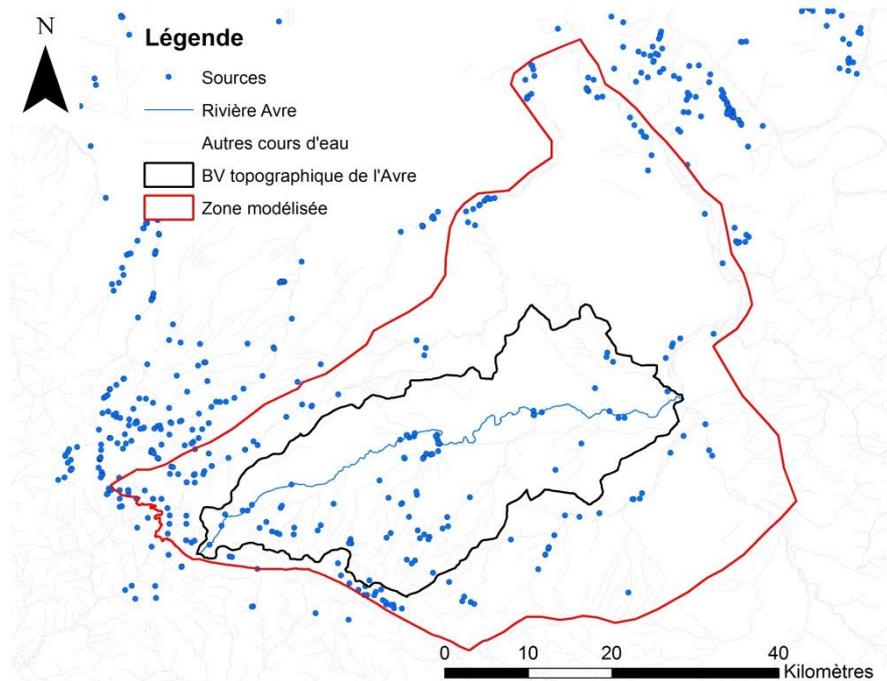


Illustration 49 : Localisation des sources sur le secteur d'étude (source BSS et Base de données Karst de Haute-Normandie⁴)

d) Chroniques de débit

L'Avre, l'Iton et la Blaise disposent de mesures de débits bancarisées dans la banque HYDRO. Cinq stations de mesure sont réparties sur les principaux cours d'eau de la zone modélisée, dont trois sur le cours d'eau de l'Avre : Saint-Christophe-sur-Avre en amont, Acon et Muzy en aval du bassin versant (Illustration 50). Les stations hydrométriques utilisées pour le calage du modèle sont situées sur les cours d'eau modélisés de façon explicite et disposent de données sur au moins une partie de la période de calage (1990-2012).

⁴ <http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article112>

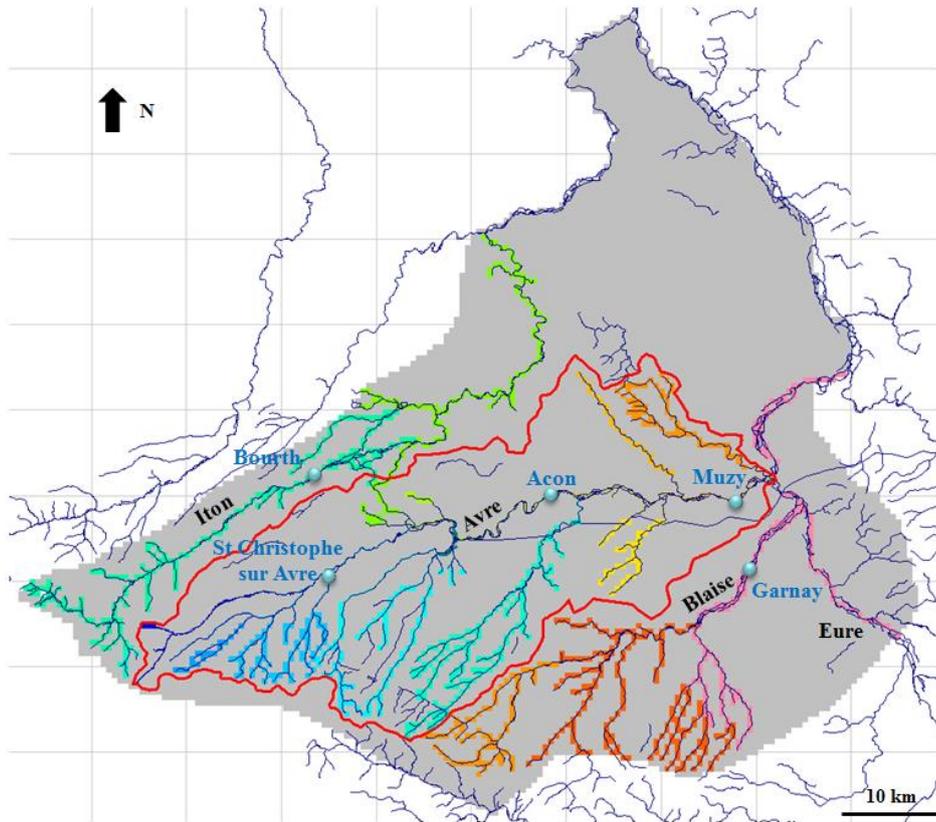


Illustration 50 : Stations de jaugeage disposant de chroniques de débits utilisées pour le calage du modèle en régime transitoire

Les chroniques des stations hydrologiques d'Acon (Illustration 51) et Muzy (Illustration 52) sur l'Avre couvrent l'ensemble de la période de calage, de 1990 à 2012.

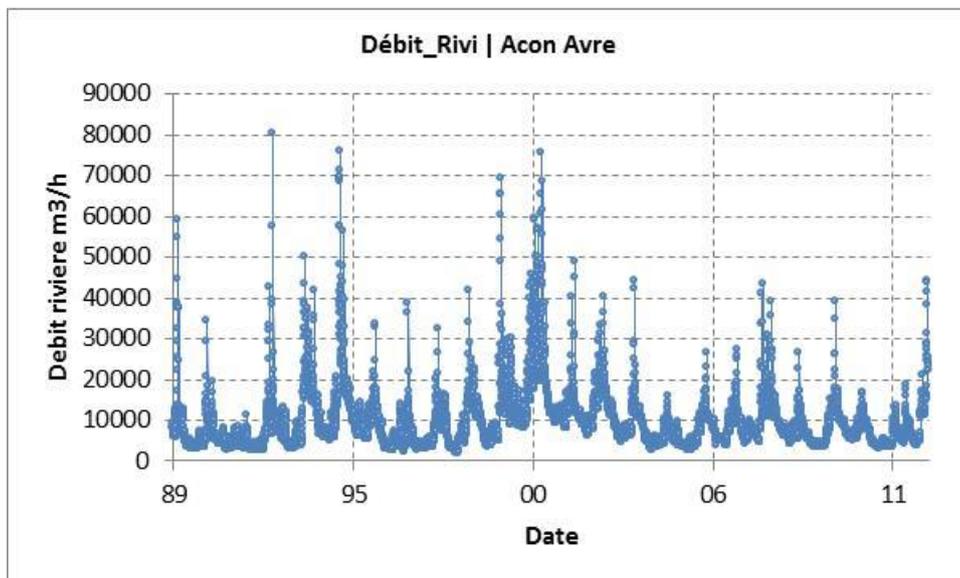


Illustration 51 : Chronique de débits journaliers à Acon (H4230410) sur l'Avre entre 1990 et 2012

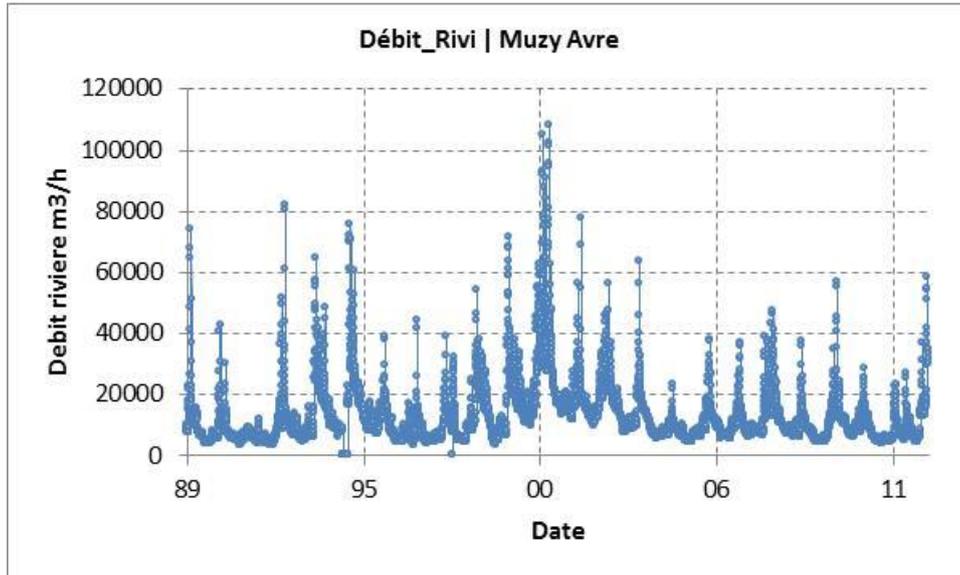


Illustration 52 : Chronique de débits journaliers à Muzy (H4250420) sur l'Avre entre 1990 et 2012

Les chroniques des stations hydrologiques de Saint-Christophe-sur-Avre sur l'Avre (Illustration 53) et Bourth (Illustration 54) sur l'Iton débutent respectivement en décembre 2004 et en décembre 1999. Elles s'étendent par contre jusqu'à la fin de la période simulée (2012).

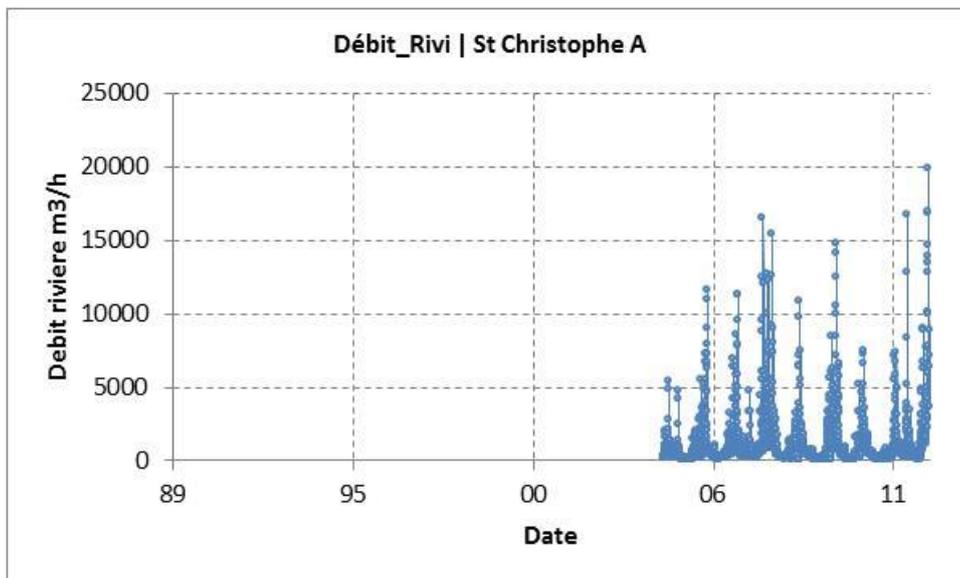


Illustration 53 : Chronique de débits journaliers à Saint-Christophe-sur-Avre (H4210410) sur l'Avre entre décembre 2004 et 2012

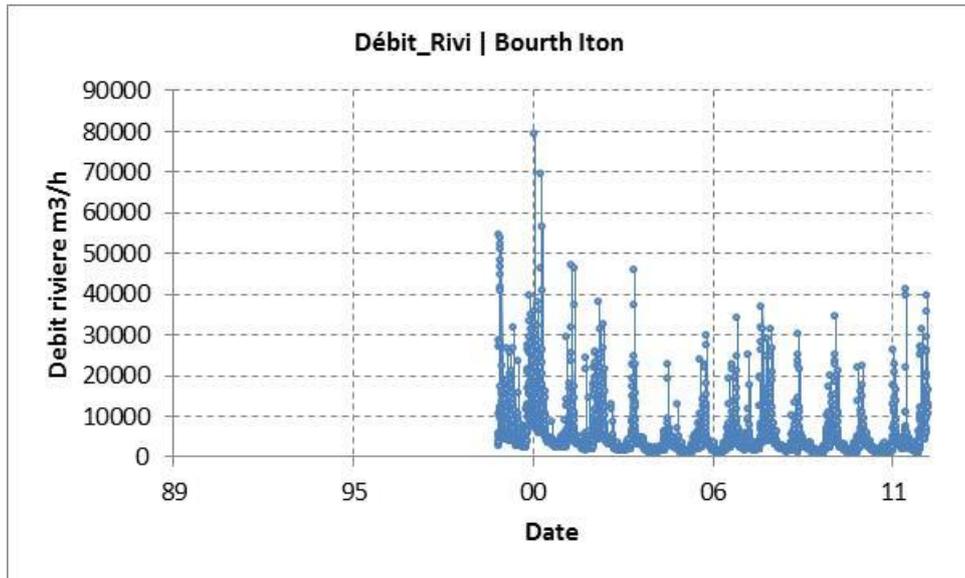


Illustration 54 : Chronique de débits journaliers à Bourth (H4330430) sur l'Iton entre décembre 1999 et 2012

La chronique de la station hydrologique de Garnay (Illustration 55) sur la Blaise couvre la période 1990 à juillet 2003.

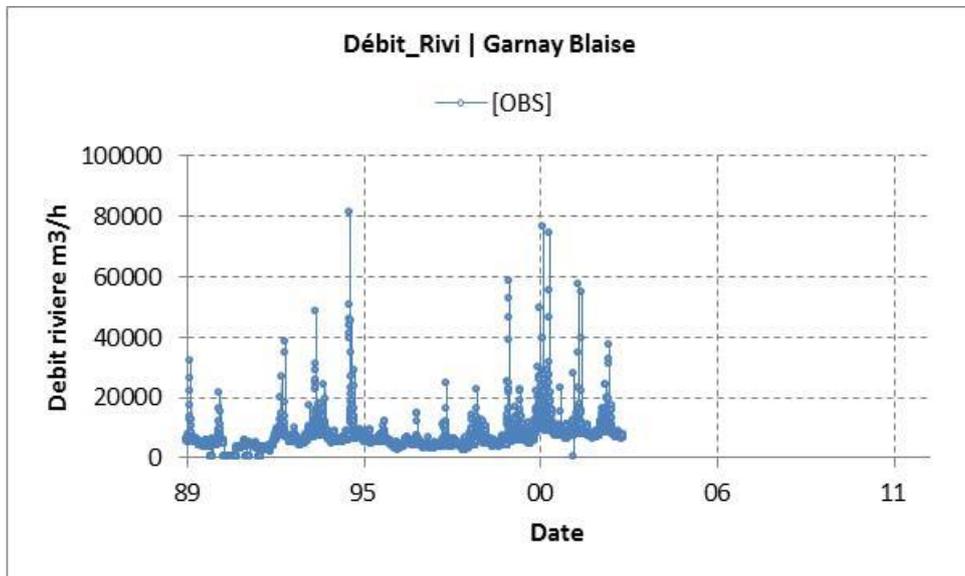


Illustration 55 : Chronique de débits journaliers à Garnay (H4180410) sur la Blaise entre 1990 et juillet 2003

Par ailleurs, de nombreuses campagnes de jaugeages ponctuels (« jaugeages volants ») des cours d'eau ont été réalisées dans le secteur étudié. Les données ont été bancarisées par la DREAL de Haute-Normandie. Les jaugeages volants acquis au cours de ces campagnes ont pu apporter des éléments de calages ponctuels complémentaires (Illustration 56) (cf. § 6.1.1).

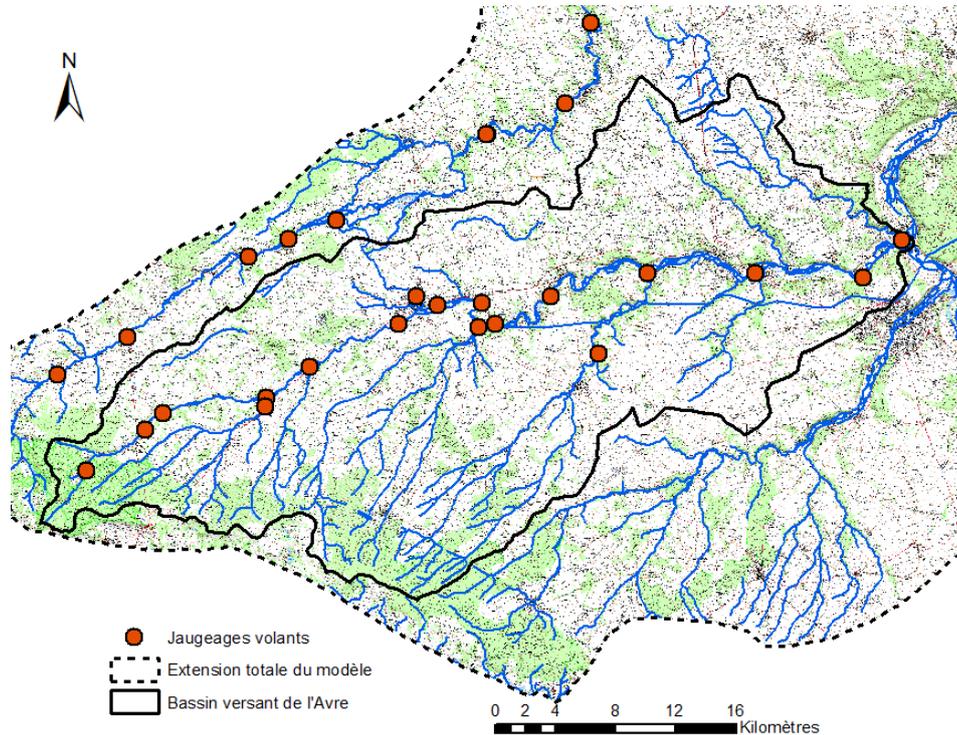


Illustration 56 : Localisation des jaugeages volants réalisés par la DREAL durant la période de calage du modèle (1990 – 2012)

e) Chroniques piézométriques

De nombreuses chroniques piézométriques, rattachées à différents réseaux (suivi piézométrique d'Eau de Paris, suivi patrimonial des eaux souterraines du BRGM, suivi piézométrique de la DREAL Centre, suivi effectué par le Syndicat Départemental de l'Eau de l'Orne, ...) sont disponibles sur le domaine d'étude.

Pour le calage du modèle, plus de trente chroniques piézométriques de la nappe de la craie indifférenciée, dont une vingtaine dans le bassin de l'Avre, disposant de données pendant au moins une partie de la période de calage ont été utilisées. Elles sont positionnées sur l'illustration 57. On peut constater que la répartition spatiale n'est pas homogène (peu de chroniques sont disponibles à l'aval du bassin et en vallée de l'Avre).

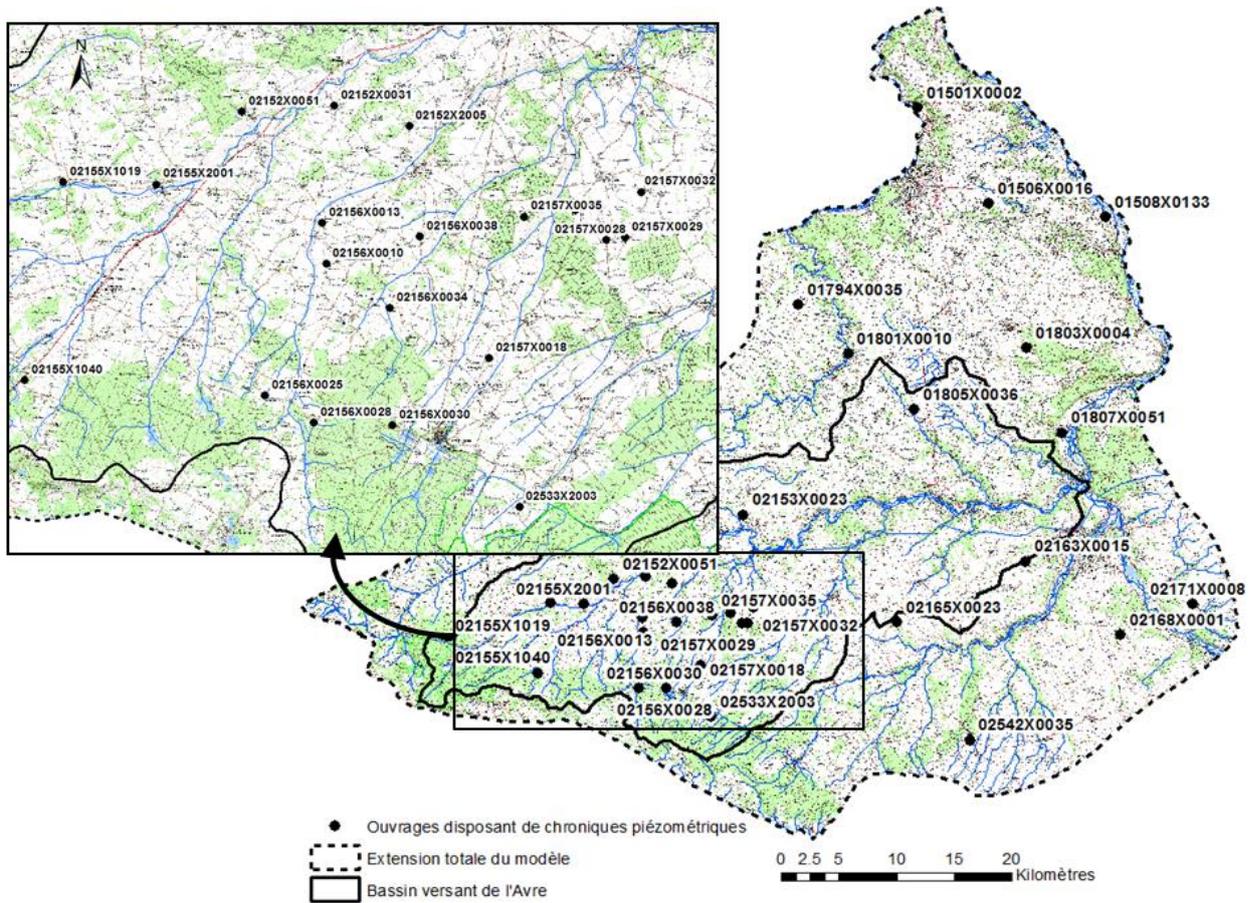


Illustration 57 : Ouvrages disposant de chroniques piézométriques utilisées pour le calage du modèle.

4.1.4. Déroulement du calage

Les deux étapes de calage du modèle ont conduit à modifier parfois significativement les répartitions de valeurs initiales introduites dans le modèle pour les paramètres impliqués dans son fonctionnement, et à imprimer une certaine forme d'hétérogénéité à l'hydro-système qui, certes, reste compatible avec le modèle conceptuel général de la craie en Normandie.

Plusieurs centaines de simulations ont ainsi été réalisées en variant de manière organisée et ciblée la distribution des valeurs pour une dizaine de paramètres, dans les différents horizons aquifères (perméabilités, coefficients d'emménagement, paramètres liés à la recharge, aux échanges nappe-rivières, ...). Des contrastes marqués dans la distribution des valeurs des paramètres ont été rendus nécessaires en particulier pour reproduire les évolutions des débits et niveaux dans les zones karstiques en amont du bassin, ainsi que dans les zones ayant fait l'objet d'accidents tectoniques significatifs (ex. : systèmes faillés des sources de la vignes).

4.2. RESULTATS DU CALAGE

4.2.1. Résultat du calage en régime permanent : carte piézométrique et diagramme de dispersion

La qualité du calage a été évaluée en comparant pour octobre 2006 les niveaux piézométriques simulés aux données piézométriques correspondantes collectées sur le terrain et rendues disponibles pour cette étude. L'adéquation entre niveaux piézométriques simulés et observés est analysée à la fois par le biais d'un diagramme de dispersion où sont reportés les niveaux simulés en fonction des niveaux observés correspondants, et d'une carte piézométrique calculée par le modèle sur laquelle figurent également les données issues du terrain.

Le diagramme de dispersion présenté dans l'illustration 58 comporte plus de 80 valeurs de niveaux piézométriques simulés et observés reportés par ailleurs dans l'illustration 59. On observe en général une bonne correspondance entre niveaux simulés et niveaux observés, avec un coefficient de corrélation R très proche de 1. En effet, R^2 vaut dans le cas présent 0,988, donc R affiche une valeur de 0,99.

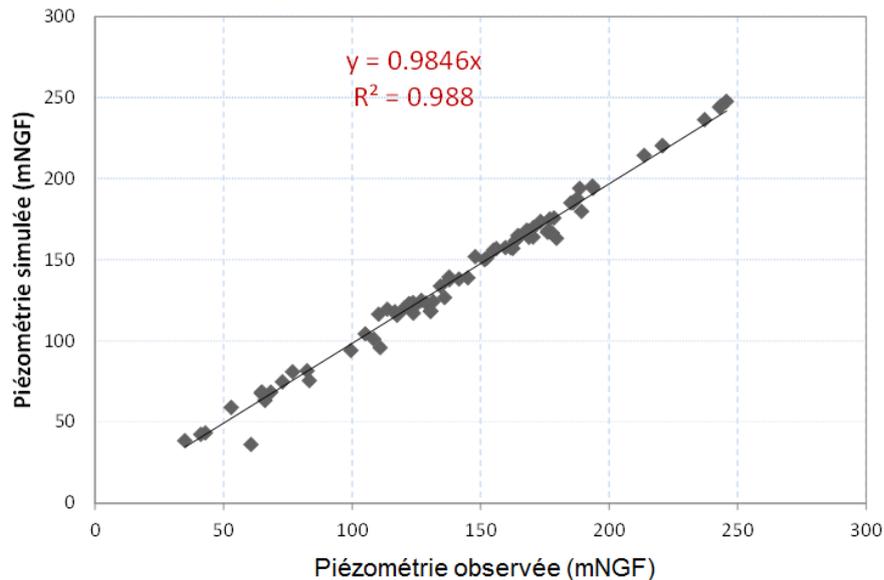


Illustration 58 : Diagramme de dispersion du calage piézométrique du modèle en régime permanent pour octobre 2006

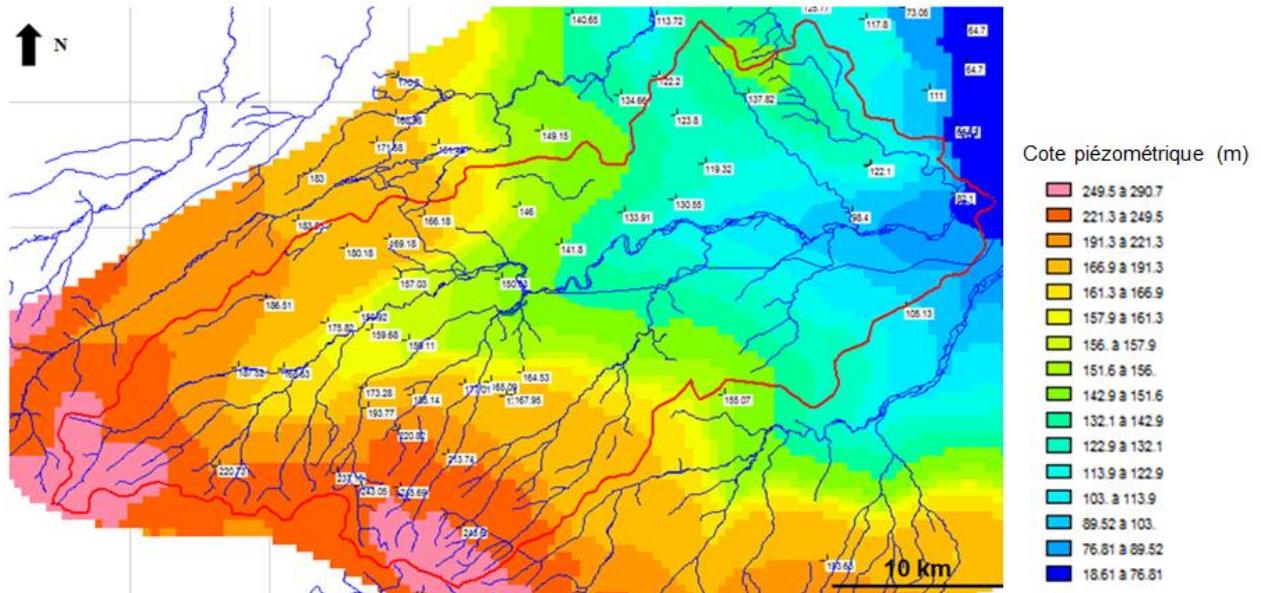


Illustration 59 : Carte piézométrique simulée par le modèle à l'issue du calage en régime permanent et mesures piézométriques ponctuelles relevées en octobre 2006

La carte piézométrique simulée en régime permanent est également comparée à la carte piézométrique de 2006, issue de l'atlas hydrogéologique de Haute-Normandie (Illustration 60). La comparaison des isopièzes « observées » et des niveaux simulés montre globalement une bonne adéquation entre niveaux calculés et observés, avec des gradients de nappe pour les principaux correctement restitués, voire affinés compte-tenu de la précision de l'atlas hydrogéologique, qui est à considérer à une échelle régionale et non pas à celle du bassin versant de l'Avre.

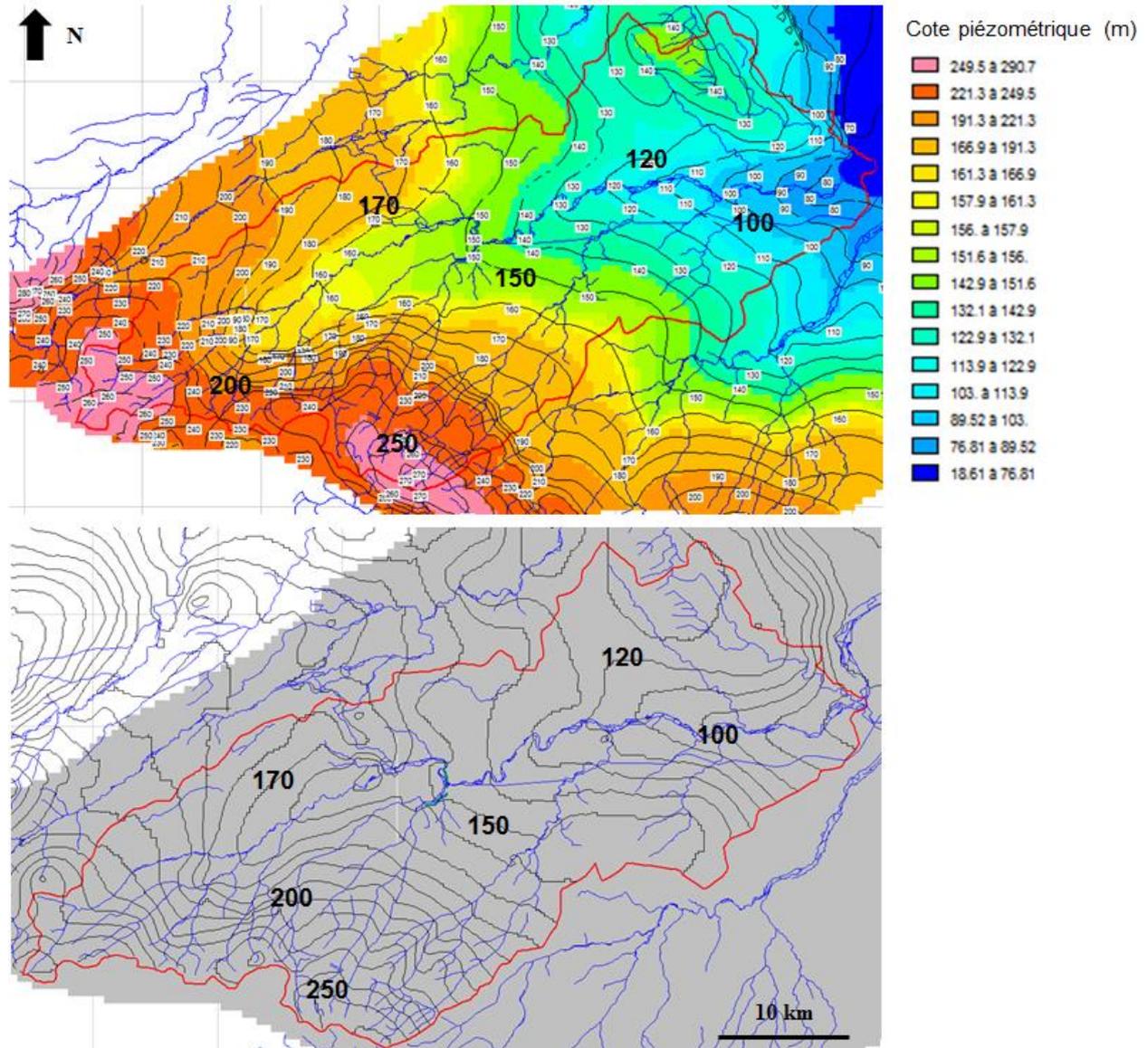


Illustration 60 : Cartes piézométriques simulées issues du calage en régime permanent (en haut) et établies sur la base de données observées (en bas) pour le mois d'octobre 2006 (équidistance de 10 m entre les courbes de niveaux)

L'illustration 61 ci-dessous représente les directions des écoulements souterrains simulés. La crête topographique coïncide globalement avec la crête piézométrique. Il est cependant intéressant de remarquer qu'il existe des échanges entre le bassin de l'Iton et le bassin de l'Avre en particulier dans la zone encadrée (apport souterrain provenant du bassin de l'Iton). Cela

confirme les hypothèses émises lors de la synthèse hydrogéologique du bassin de l'Avre (David, 2012).

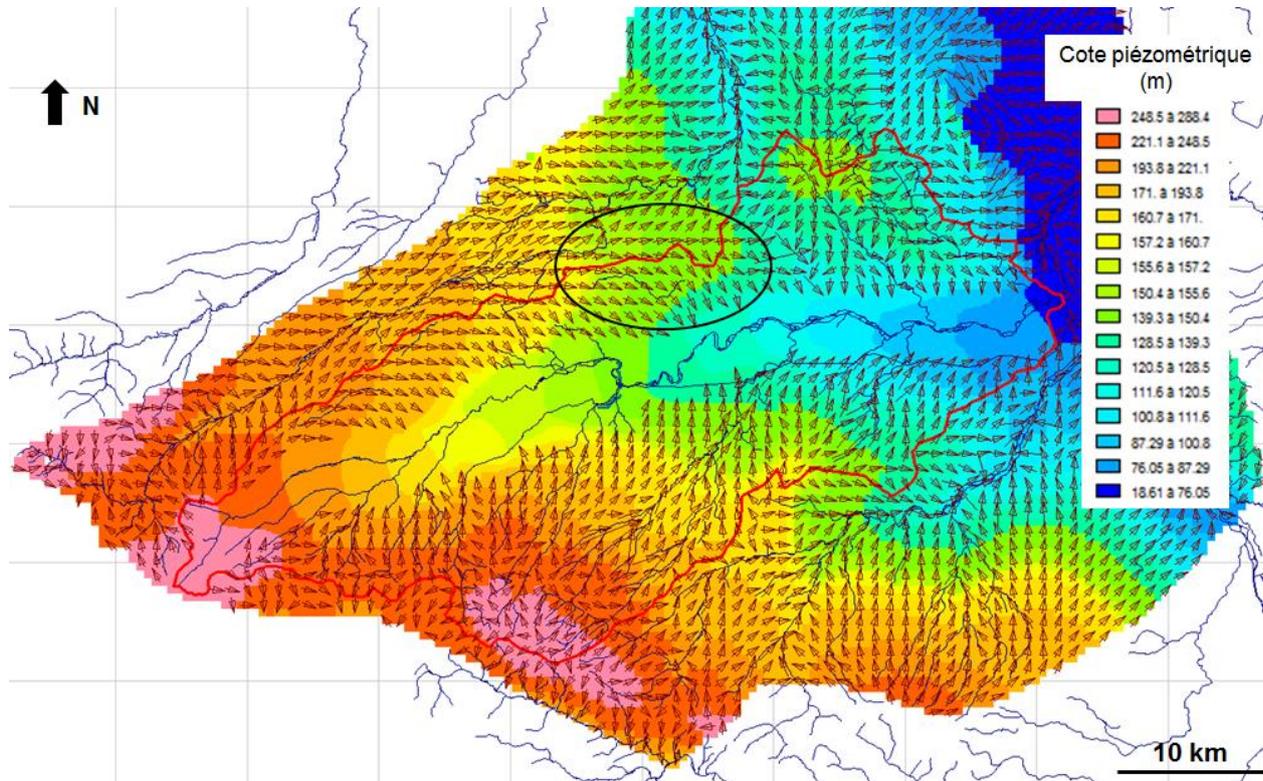


Illustration 61 : Direction des écoulements souterrains

4.2.2. Résultats du calage en régime transitoire : chroniques de débit et chroniques piézométriques

a) Comparaison des niveaux simulés en régime transitoire aux niveaux mesurés en octobre 2006

Comme cela avait été fait pour le calage en régime permanent, la qualité du calage en régime transitoire a été évaluée en comparant les niveaux piézométriques simulés aux données piézométriques mesurées lors de la campagne de mesure de 2006. L'adéquation entre niveaux piézométriques simulés et observés est analysée au travers d'un diagramme de dispersion où sont reportés les niveaux simulés en fonction des niveaux observés (Illustration 62). Une carte sur laquelle figurent les niveaux simulés par le modèle et observés sur le terrain pour le mois d'octobre 2006 est également produite (Illustration 63).

Le diagramme de dispersion présenté à l'illustration 62 comporte plus de 80 valeurs de niveaux piézométriques simulés/observés. On observe comme précédemment lors du calage en régime permanent une bonne correspondance entre niveaux simulés et niveaux observés, avec un coefficient de corrélation R très proche de 1. En effet, R^2 vaut 0,992.

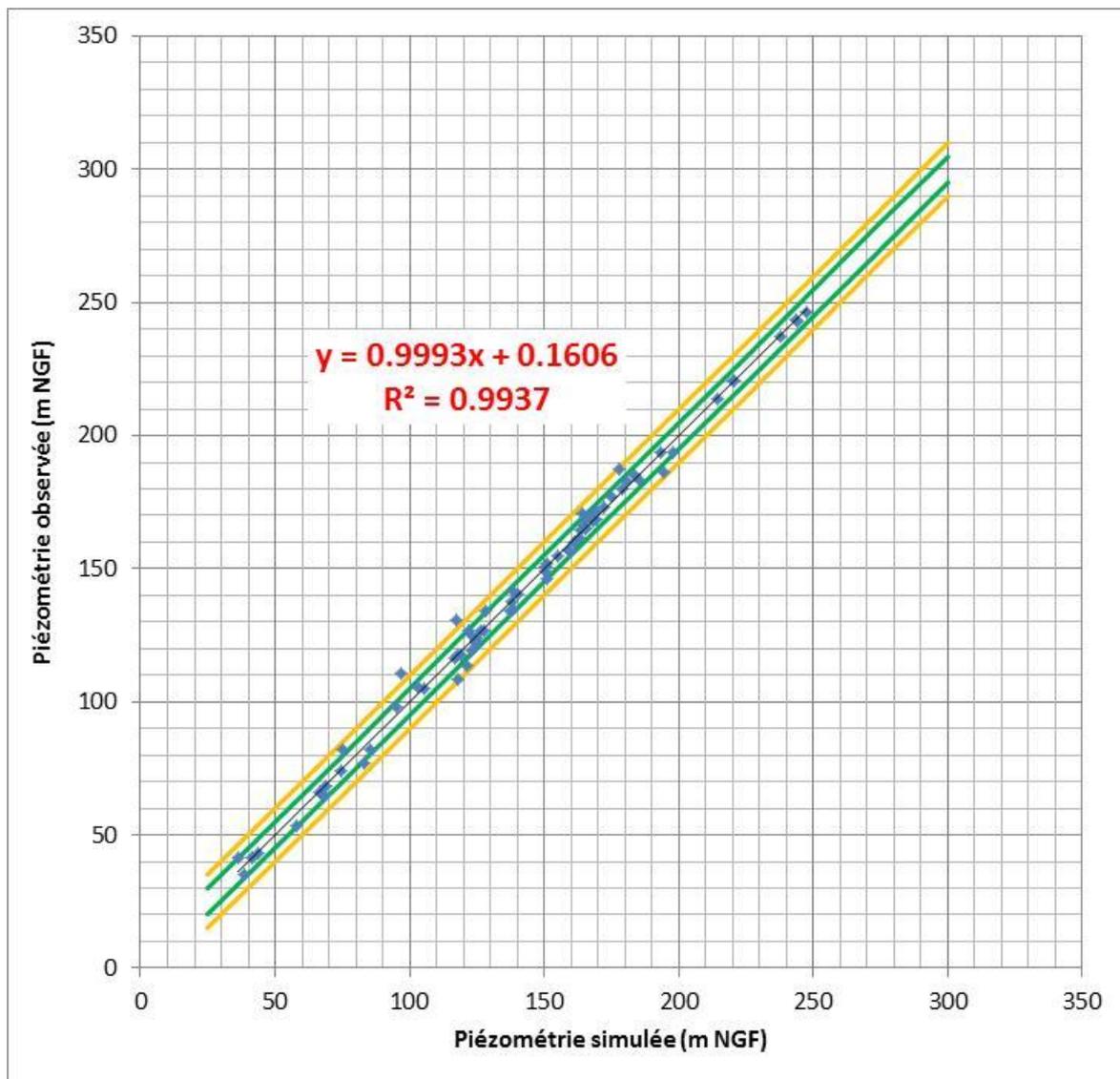


Illustration 62 : Diagramme de dispersion du calage piézométrique en octobre 2006 (piézométrie observée : données ponctuelles issues de la campagne de mesure d'octobre 2006 ; piézométrie simulée : piézométrie moyenne du mois d'octobre 2006).
(Intervalle orange : +/-10m ; Intervalle vert : +/- 5m)

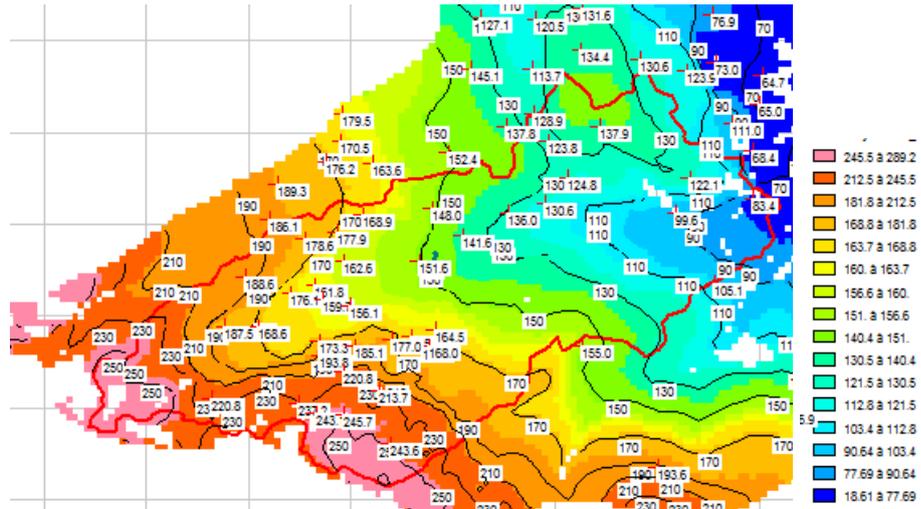
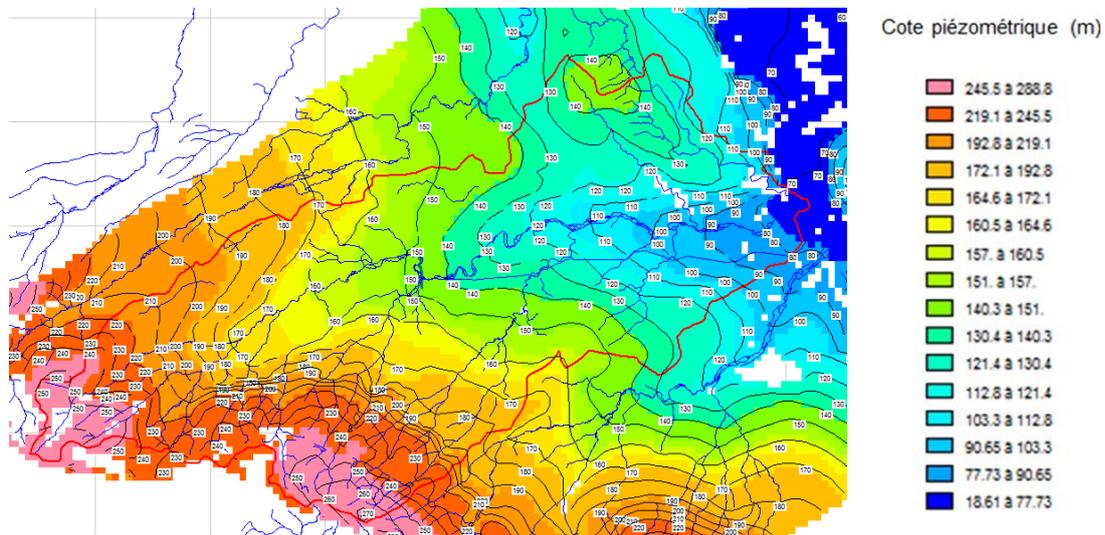


Illustration 63 : Carte piézométrique simulée en régime transitoire (isopièzes tous les 20 mètres) et mesures piézométriques ponctuelles observées en octobre 2006 (valeurs en m NGF)

b) Résultat du calage en régime transitoire : cartes piézométriques

La carte piézométrique simulée en régime transitoire est comparée à la carte piézométrique d'octobre 2006, issue de l'atlas hydrogéologique de Haute-Normandie (Illustration 64). La comparaison des isopièzes « observées » et « simulées » montre une bonne adéquation entre niveaux calculés et observés, avec des gradients de nappe correctement restitués, et même affinés. L'amélioration de la carte piézométrique d'octobre 2006 obtenue après le calage en régime transitoire est notable par rapport à celle obtenue après le calage en régime permanent, ce qui est d'ailleurs tout-à-fait normal, le calage en régime permanent n'étant qu'un ajustement préliminaire du modèle.



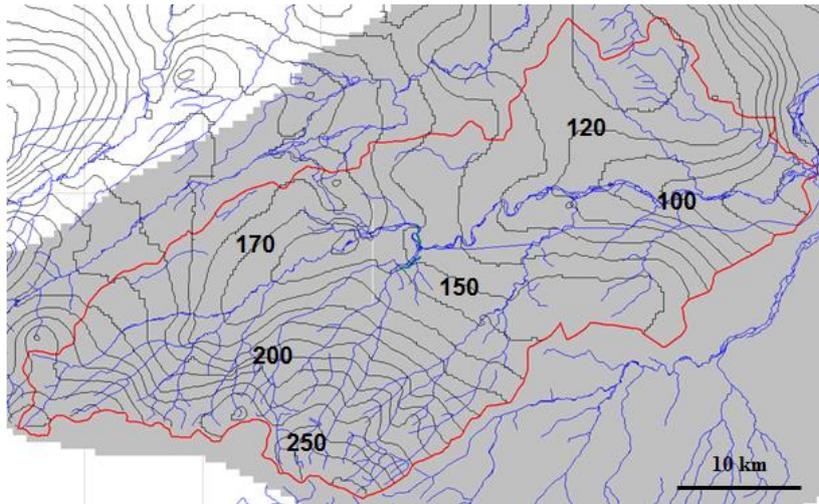


Illustration 64 : Cartes piézométriques simulées en régime transitoire (en haut) et issues des valeurs relevées sur le terrain (en bas) pour le mois d'octobre 2006 (équidistance de 10 m des courbes de niveaux)

c) Représentation des chroniques piézométriques

Pour le calage du modèle, une vingtaine de chroniques dans le bassin de l'Avre, disposant de données pendant au moins une partie de la période de calage ont été utilisées.

L'ensemble des chroniques piézométriques simulées et observées dans le bassin de l'Avre est présenté dans ce rapport. Quelques chroniques piézométriques représentatives sont commentées ci-après ; les autres graphiques comparant les niveaux piézométriques observés et simulés sont regroupés dans l'Annexe 5.

Quasiment tous les piézomètres montrent des cycles annuels bien marqués. Les cycles pluriannuels ont une amplitude variable selon les piézomètres. Pour certains piézomètres, les fluctuations interannuelles ont été difficiles à évaluer, les chroniques observées étant très courtes (notamment dans le secteur karstique à l'amont).

Dans le secteur amont karstique, les chroniques piézométriques en rive gauche de l'Avre (Illustration 65) présentent des cycles saisonniers très marqués, assez réguliers, dont l'amplitude peut atteindre une quinzaine de mètres. L'amplitude et la dynamique des fluctuations piézométriques sont relativement bien reproduites par le modèle.

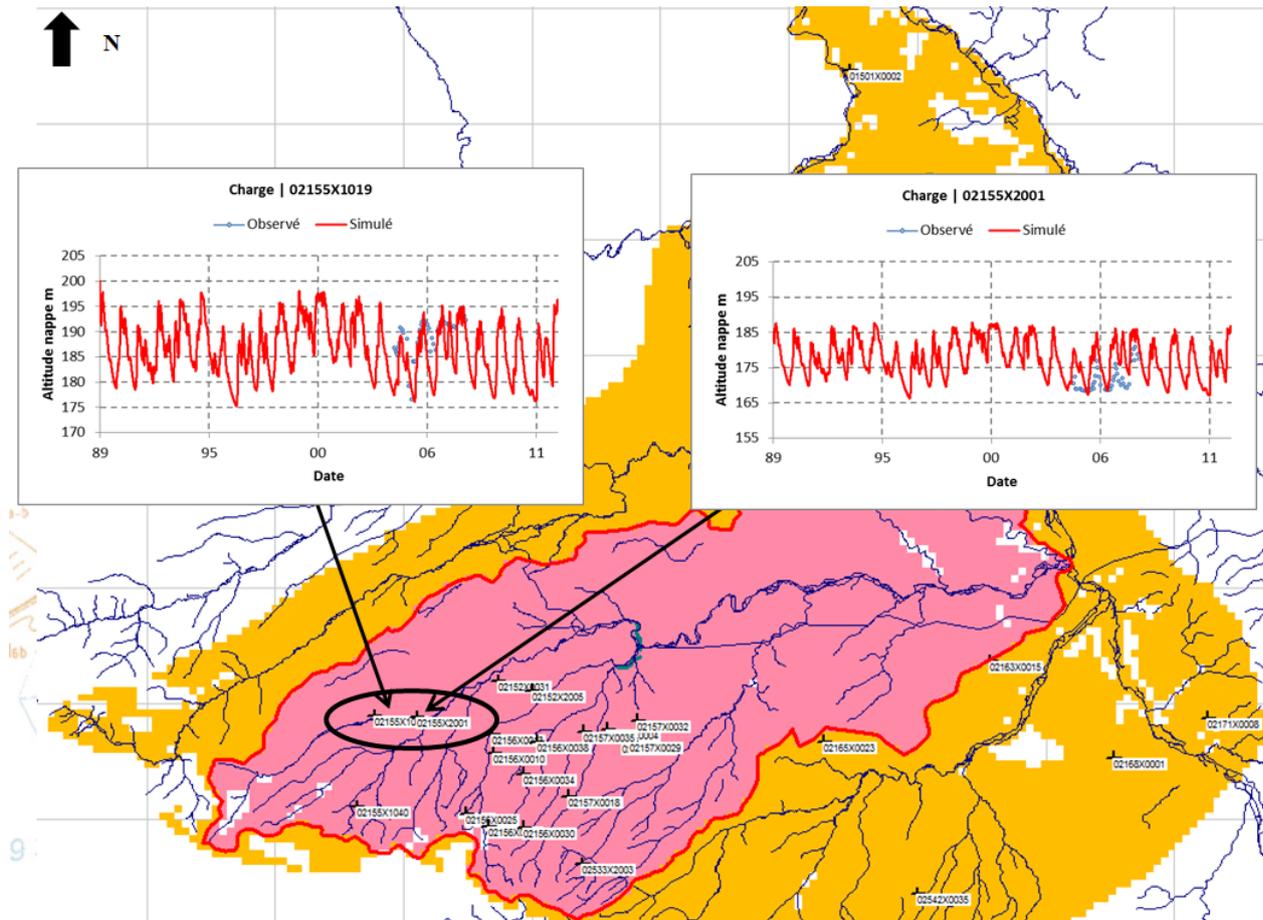


Illustration 65 : Chroniques piézométriques observées (bleu) et simulées (rouge) en rive gauche de l'Avre dans le secteur karstique (pas de temps journalier simulé et observé)

Les chroniques dans le secteur amont en rive droite de l'Avre (Illustration 66) montrent des comportements très hétérogènes d'un piézomètre à l'autre, ce qui laisse supposer une forte variabilité spatiale des différentes porosités de la craie dans ce secteur (matricielle, fissurale et karstique). La forte densité de chroniques piézométriques disponibles dans ce secteur, associée aux variabilités spatiales importantes du comportement de la nappe de la craie dans ce secteur, a nécessité d'intégrer dans le modèle un émiettement des champs de perméabilité et de coefficient d'emmagasinement dans ce secteur. *In fine*, les fluctuations annuelles bien marquées semblent globalement bien reproduites par le modèle qui en restitue globalement bien la dynamique, même si les amplitudes sont, sur certains piézomètres, légèrement sur-estimées ou sous-estimées selon les cas. La comparaison des niveaux simulés et observés montre qu'ils sont pour l'ensemble en bonne adéquation, aussi bien en termes de niveaux moyens que de dynamique d'évolution. Ces suivis n'étaient pas continus, mais ponctuels et non nivelés. Ils ont été rapportés au référentiel NGF d'après le MNT. Il y a donc une forte incertitude sur l'altitude précise de ces niveaux mesurés dans le bassin d'alimentation du captage des sources de la Vigne. Lors de la comparaison des niveaux observés et simulés sur ce secteur, il convient surtout de vérifier que le modèle reproduit la dynamique des fluctuations sans pour autant que l'altitude soit strictement respectée. La cyclicité pluriannuelle est notamment bien reproduite.

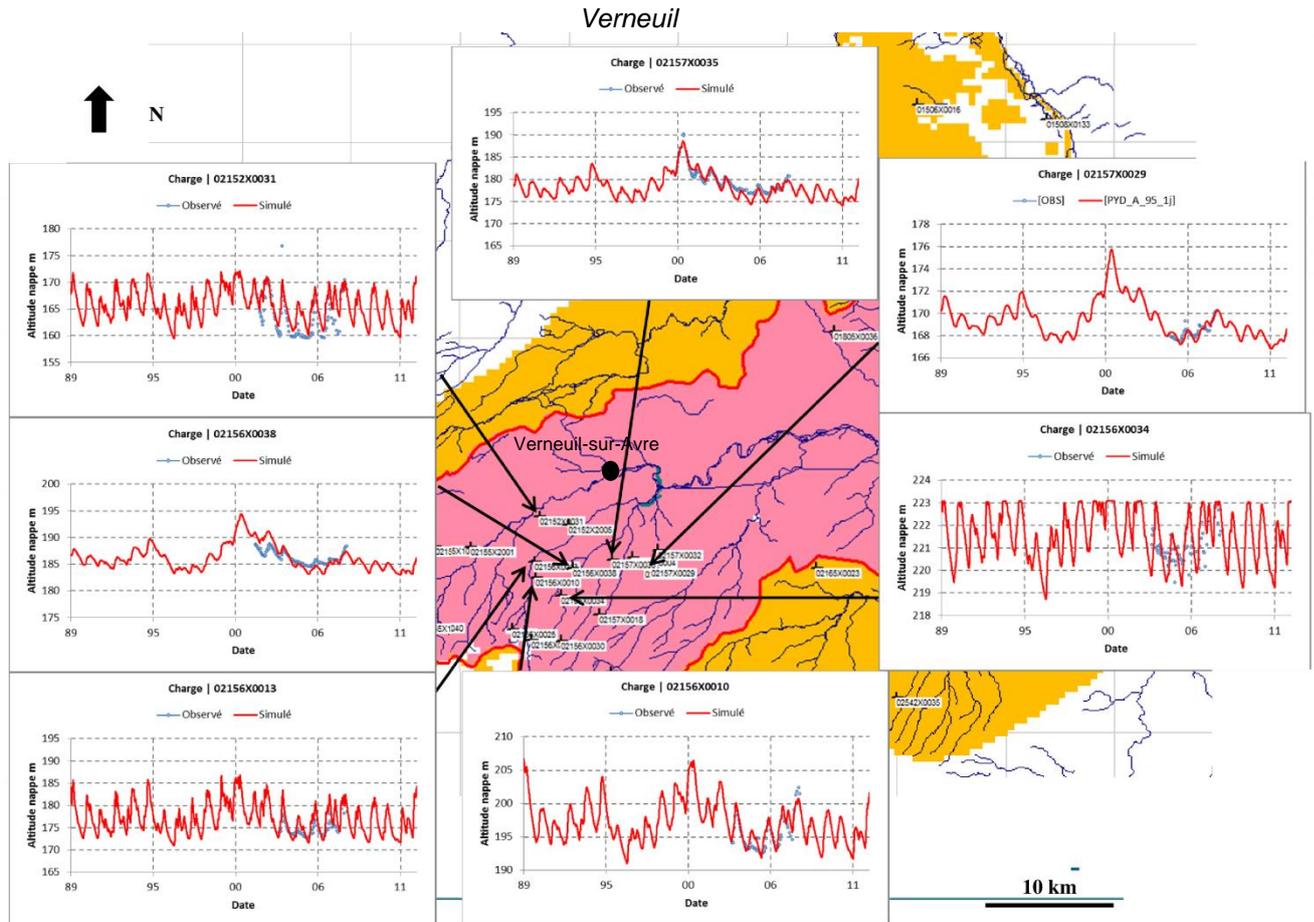


Illustration 66 : Chroniques piézométriques observées (bleu) et simulées (rouge) en rive droite de l'Avre dans le secteur karstique (pas de temps journalier simulé et observé)

A l'aval du bassin versant, peu de chroniques piézométriques sont disponibles. Les piézomètres sont situés sur les plateaux en rive gauche et en rive droite. Ces piézomètres présentent des fluctuations pluriannuelles plus importantes que les piézomètres situés à l'amont du bassin. Ces fluctuations sont pour l'ensemble relativement bien reproduites par le modèle sur l'illustration 67 et dans une moindre mesure sur l'illustration 68, mais cela reste globalement satisfaisant au regard des données disponibles actuellement et du positionnement.

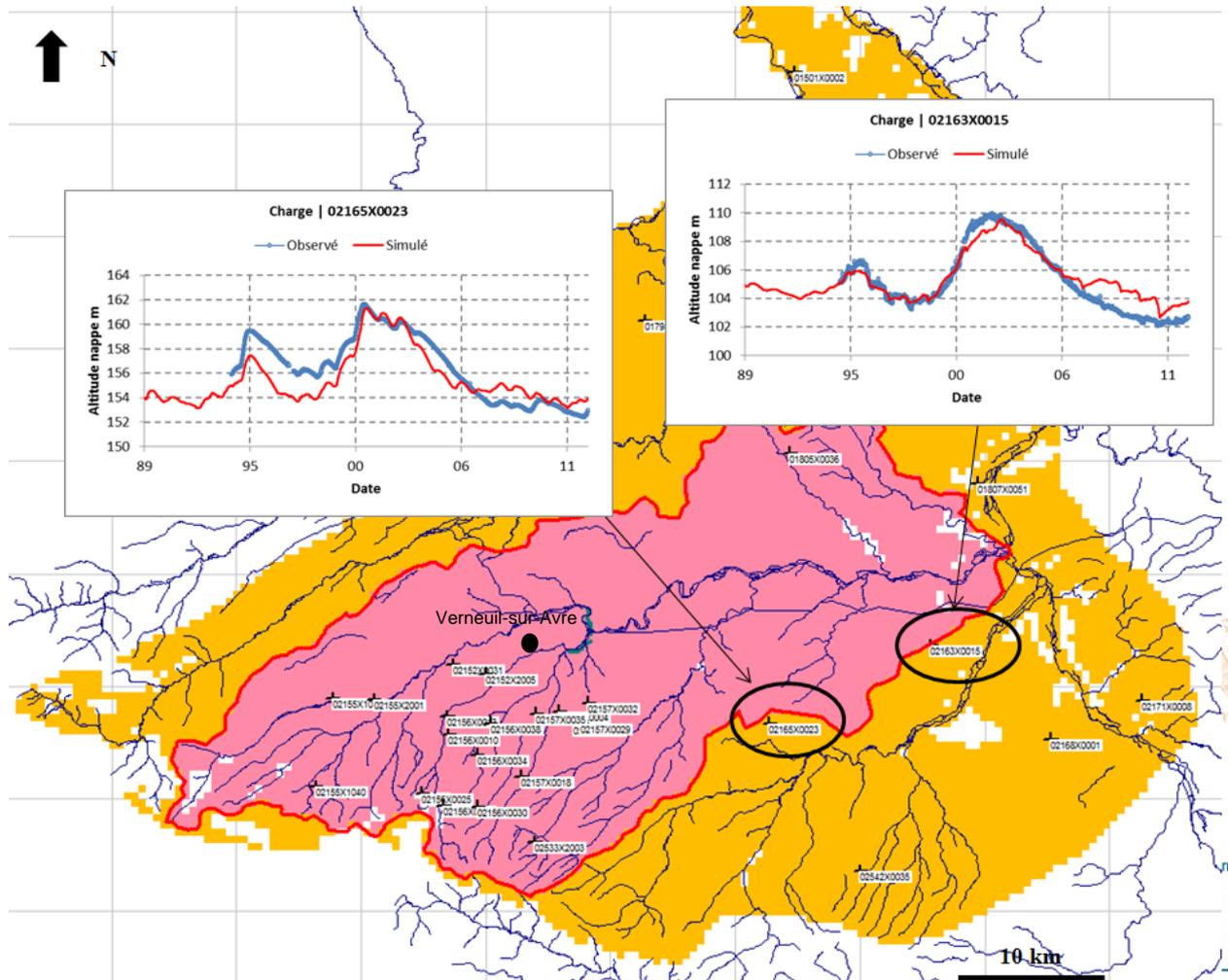


Illustration 67 : Chroniques piézométriques observées (bleu) et simulées (rouge) en rive droite de l'Avre à l'aval du bassin (pas de temps journalier simulé et observé)

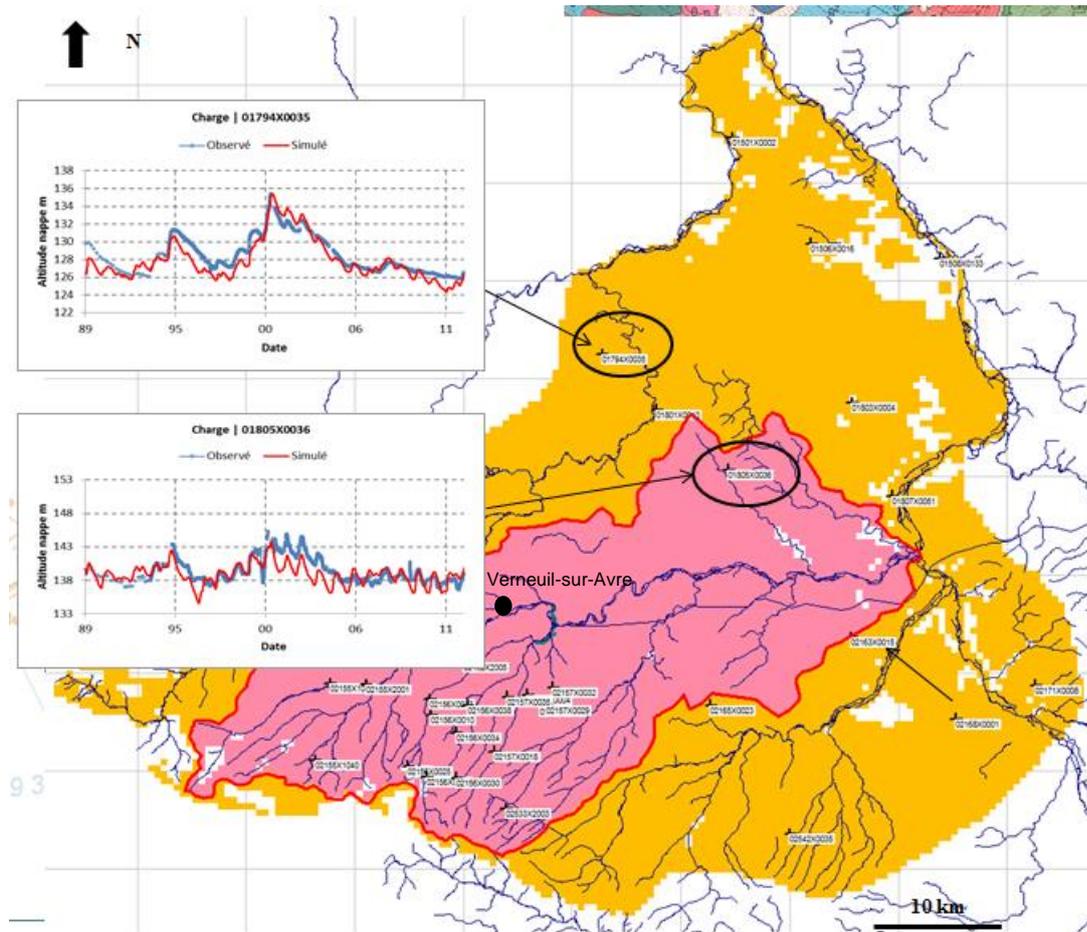


Illustration 68 : Chroniques piézométriques observées (bleu) et simulées (rouge) en rive gauche de l'Avre à l'aval du bassin (pas de temps journalier simulé et observé)

Les chroniques dans le secteur des sables du Perche (Illustration 69) présentent des dynamiques différentes. Le piézomètre 02155X1040 présente des fluctuations de faible ampleur bien restituées par le modèle. Les chroniques piézométriques 02156X0028 et 02156X0030 présentent des cycles saisonniers très marqués, assez réguliers, dont l'amplitude est d'environ cinq mètres. Le modèle en restitue relativement bien la dynamique.

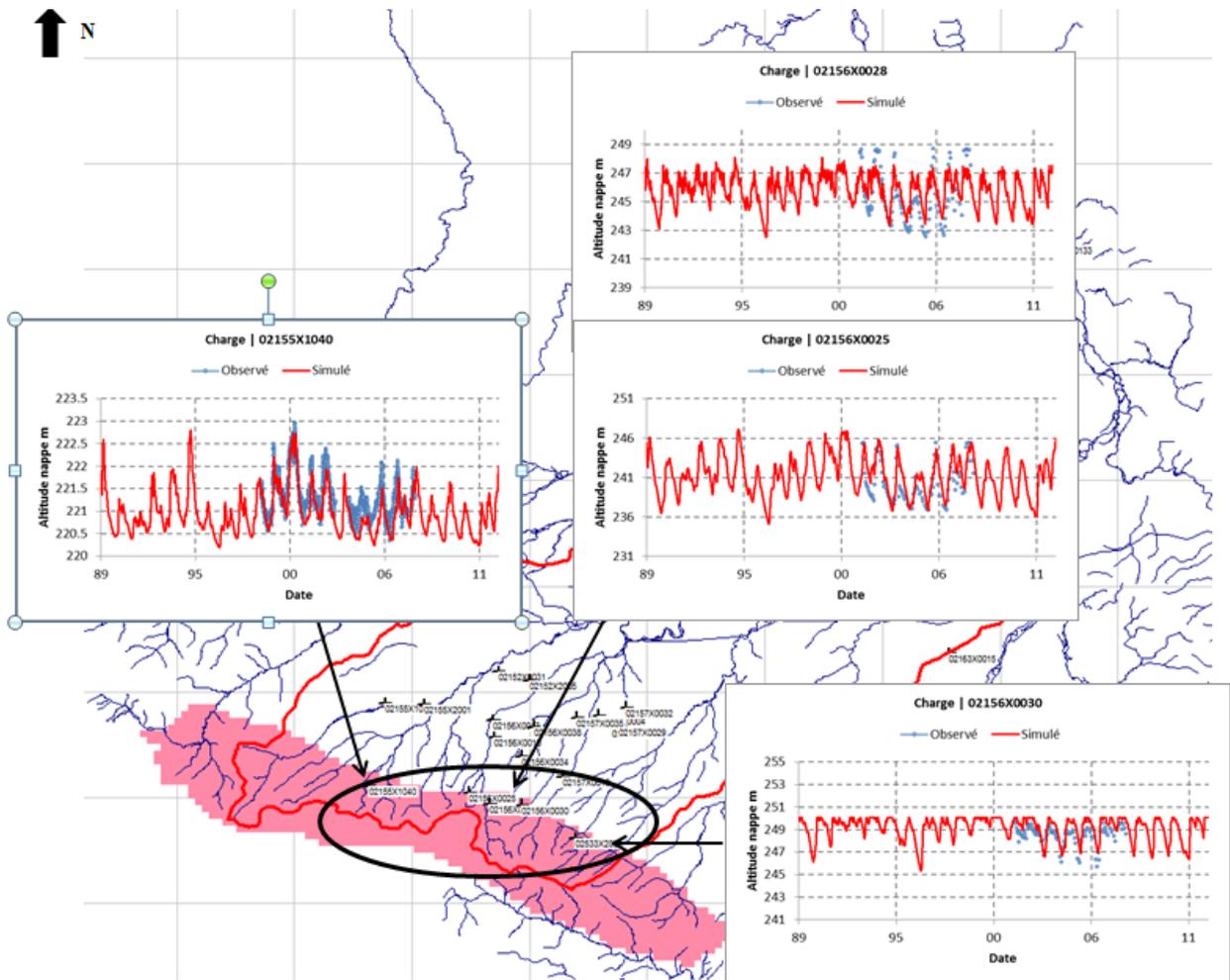


Illustration 69 : Chroniques piézométriques observées (bleu) et simulées (rouge) en amont du bassin dans le secteur des sables du Perche (pas de temps journalier simulé et observé)

Il convient de souligner qu'aucune chronique piézométrique n'était disponible à l'aval dans la vallée de l'Avre et sur les versants du bassin pour caler le modèle.

Par ailleurs, il n'existait pas au moment de la réalisation du modèle de suivi piézométrique réalisé dans au droit des sources de la Vigne et du Breuil.

Le modèle n'est donc, dans cette première version de calage, probablement pas très précis dans ces secteurs. Il conviendra de préciser le calage du modèle dans ces secteurs dès que de nouvelles chroniques piézométriques seront disponibles.

d) Représentation des chroniques de débit mesurées aux stations hydrométriques

Pour les trois stations de débits disposant de données sur la période modélisée dans le bassin versant de l'Avre, Saint-Christophe-sur-Avre, Acon et Muzy (Illustration 70), les graphiques de comparaison des débits observés et simulés sont présentés dans ce rapport et en annexe 4.

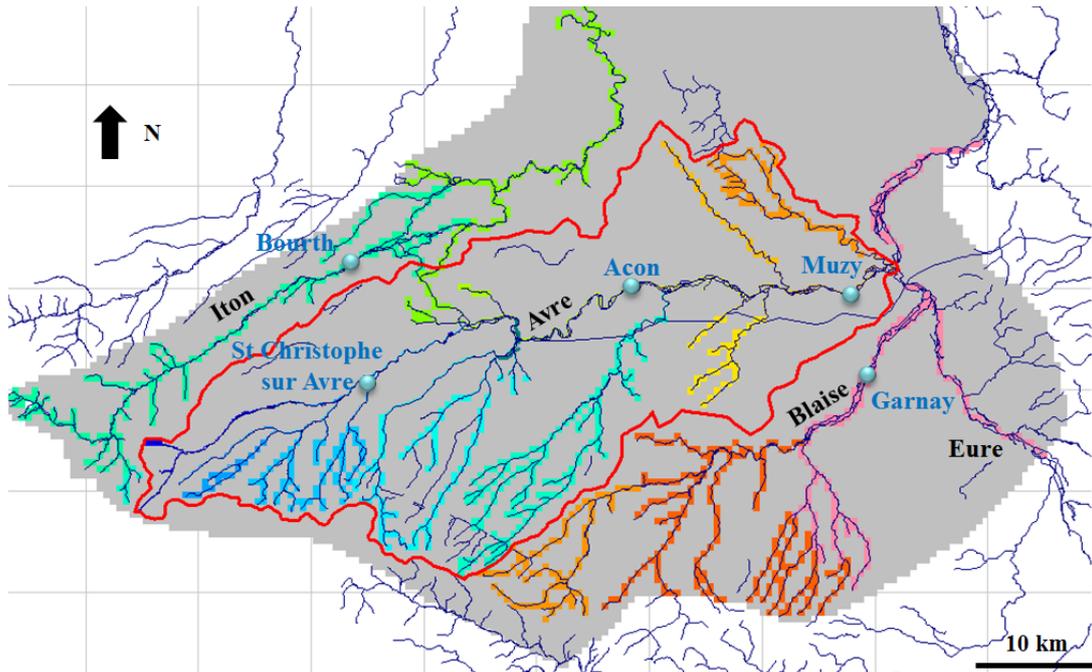


Illustration 70 : Stations hydrométriques dont les chroniques de débit ont été utilisées pour le calage dans le bassin versant de l'Avre

- **Saint-Christophe-sur-Avre**

Le calage du modèle dans ce secteur a été réalisé de manière conjointe sur la chronique de débit à Saint-Christophe et sur les chroniques piézométriques du secteur.

La comparaison des débits écoulés et simulés dans l'Avre à la station de Saint-Christophe-sur-Avre (Illustration 71 (a)) montre que les dynamiques (mise en charge et vidanges) sont restitués de façon synchrone. Les débits de pointe calculés par le modèle sont parfois légèrement sous-estimés par rapport aux débits mesurés sur le terrain, par contre les débits d'étiages sont souvent un peu plus sévères sur la chronique simulée : lorsque le débit mesuré dans la rivière devient faible (autour de 0.025 à 0.060 m³/s), le modèle simule souvent des assecs (Illustration 71 (b)). Cette station de jaugeage a en effet la particularité de se situer dans le compartiment karstique de l'aquifère. La rivière perd du débit régulièrement au profit de la nappe. Le calage est très sensible dans ce secteur. Le modèle est pour le moment donc plus sévère que la réalité en étiage pour cette station.

Le coefficient de Nash obtenu est de 0.60, ce qui correspond à un coefficient d'ajustement R de 0.77 (coefficient satisfaisant).

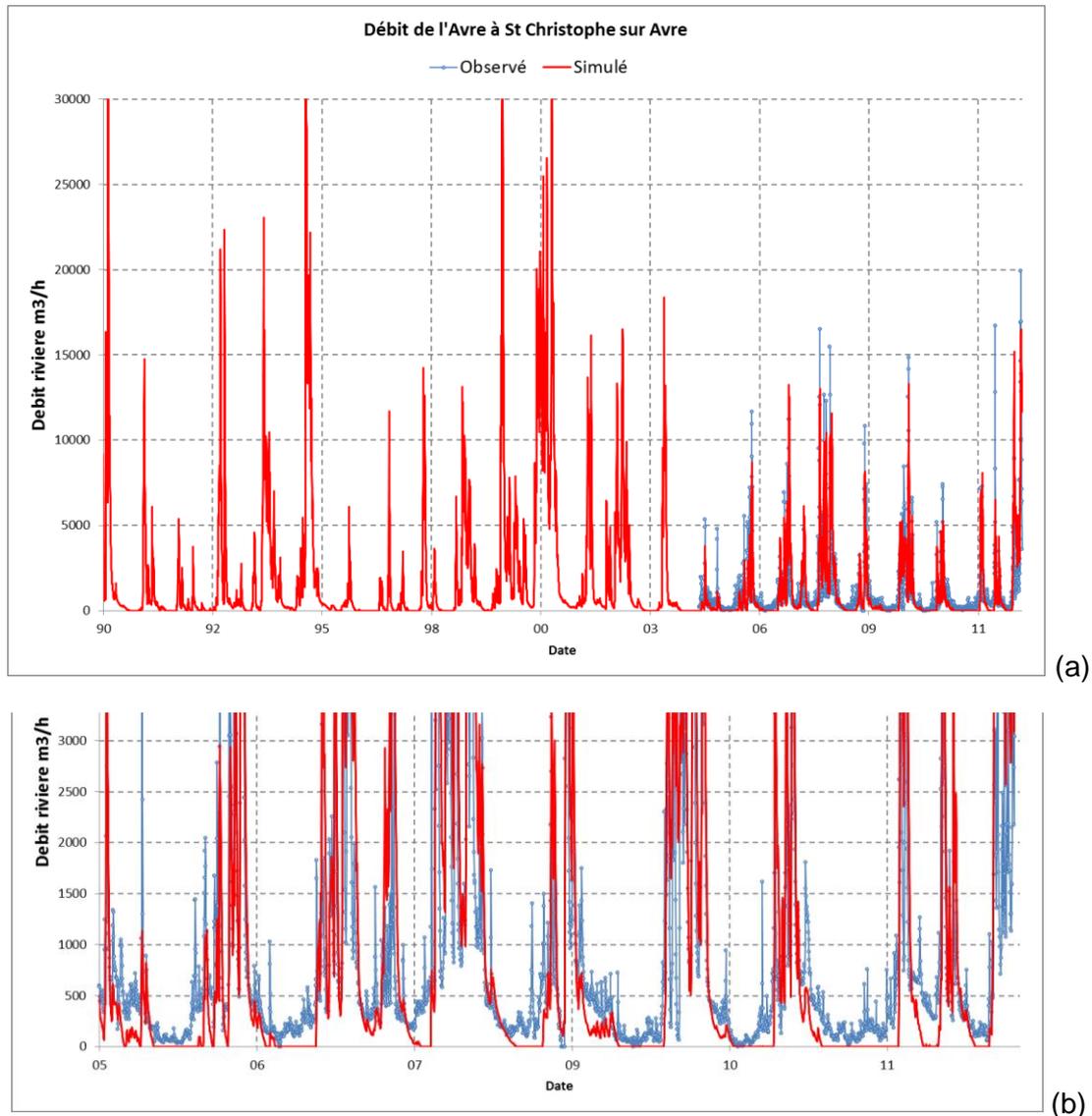


Illustration 71 : Débit de l'Avre à Saint-Christophe-sur-Avre.

(a) Comparaison des chroniques simulée (rouge) et observée (bleue) (pas de temps journalier simulé et observé) ; (b) zoom sur les débits d'étiages

- **Acon et Muzy**

La comparaison des débits mesurés et simulés dans l'Avre à la station d'Acon (Illustration 72) et à la station de Muzy (Illustration 73) montre que les débits de crue sont parfois surestimés, mais quand même globalement bien reproduits. En revanche, les débits d'étiage et les dynamiques sont globalement bien restitués, en particulier les dynamiques de vidange et le soutien d'étiage par les nappes.

Les coefficients de Nash obtenus pour Acon et Muzy sont respectivement de 0.56 et 0.61 (coefficients moyens à satisfaisants), ce qui correspond à un coefficient d'ajustement R de 0.75 et 0.78 respectivement.

L'absence de mesures piézométriques en rive droite de l'Avre et plus généralement dans la vallée de l'Avre en aval des sources de la Vigne et du Breuil, a contribué à rendre délicat le calage dans ce secteur.

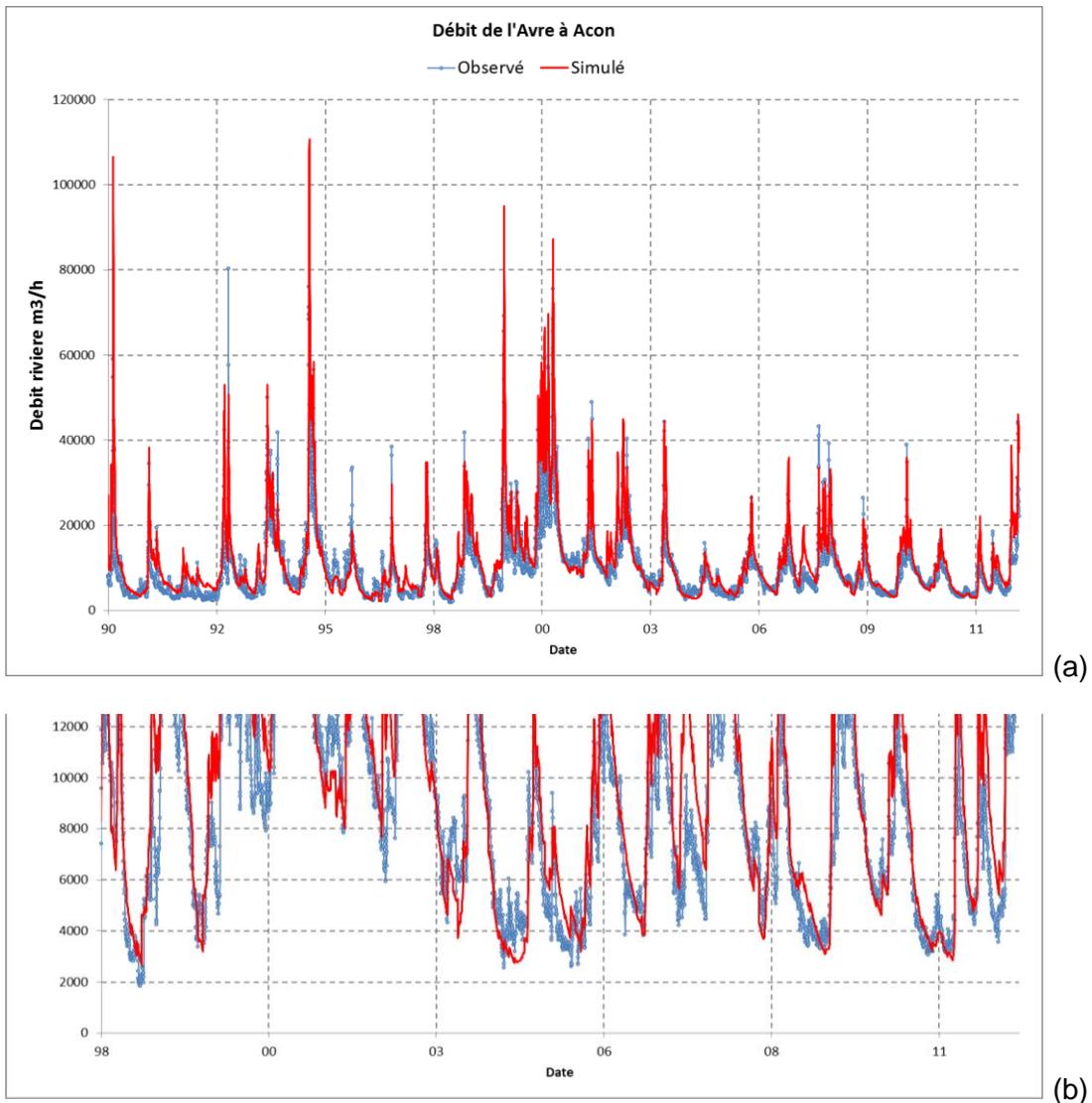


Illustration 72 : Débit de l'Avre à Acon.

(a) Comparaison des chroniques simulée (rouge) et observée (bleue). (pas de temps journalier simulé et observé) ; (b) zoom sur les débits d'étiages

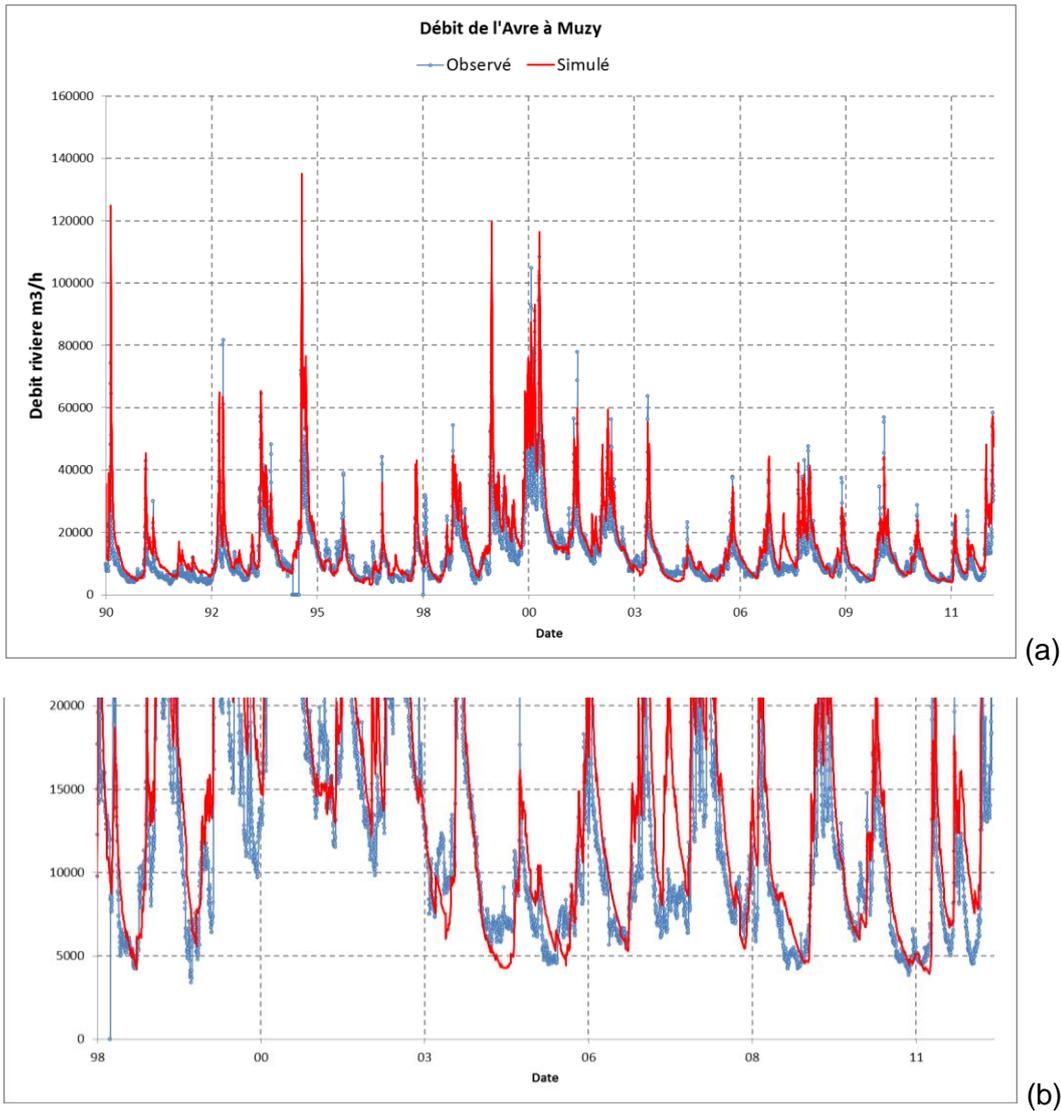


Illustration 73 : Débit de l'Avre à Muzy.

(a) Comparaison des chroniques simulée (rouge) et observée (bleue). (pas de temps journalier simulé et observé) ; (b) zoom sur les débits d'étiages

4.2.3. Paramètres ajustés à l'issue du calage.

a) Paramètres hydrodynamiques

- Perméabilités

Le Tableau 9 synthétise les valeurs de perméabilité et de coefficients d'emmagasinement affectées dans chaque couche du modèle à l'issue du processus de calage en régime transitoire. Les cartes illustrant la distribution spatiale des perméabilités et des coefficients d'emmagasinement sont présentées en Annexe 6.

	Perméabilité m/s	Emmagasinement libre
Alluvions et formations à silex	1.10 ⁻⁷ à 8.10 ⁻⁴ (moyenne : 2,2.10 ⁻⁴)	0.1% à 20% (moyenne : 3,4%)
Sables du Perche	1.10 ⁻⁵ à 5.10 ⁻⁵ (moyenne : 4,6.10 ⁻⁵)	0.09% à 20% (moyenne : 4,7%)
Craie dans la zone altérée (y compris secteur karstique)	1.10 ⁻⁶ à 1.10 ⁻¹ (moyenne : 2,7.10 ⁻³)	0.001% à 20% (moyenne : 3.8%)
Craie du Sénonien et du Turonien moyen et supérieur	1.10 ⁻⁶ à 8.10 ⁻³ (moyenne : 9,2.10 ⁻⁴)	0.1% à 20% (moyenne : 4,8%)
Craie du Turonien inférieur et du Cénomanién	1.10 ⁻⁷ à 6.10 ⁻³ (moyenne : 7,9.10 ⁻⁴)	0.1% à 20% (moyenne : 2.6%)

Tableau 9 : Perméabilités et emmagasinement libres ajustés à l'issue du calage

b) Failles

Le calage du modèle en régime transitoire a permis de tester le rôle hydraulique de plusieurs failles. Ainsi, à l'issue des opérations de calage, il est ressorti clairement que la faille de Verneuil joue le rôle de limite étanche, mise en évidence également par les investigations géophysiques, alors que la faille de Damville-Nonancourt au contraire joue un rôle de drain.

Comme mentionné dans le rapport de phase 3 (BRGM/RP-64817-FR, 2015), dans le secteur de Verneuil/Avre les profils VSA-A, B et C mettent en évidence des zones de fracturation et d'argilisation marquées par la présence d'anomalies conductrices sub-verticales qui constitueraient un barrage à l'écoulement de l'aquifère et expliqueraient la présence des sources en amont de cette barrière étanche. Dans le modèle, cette limite étanche a été représentée au droit des profils géophysiques et a été légèrement étendue de part et d'autre au fil du calage (Illustration 74).

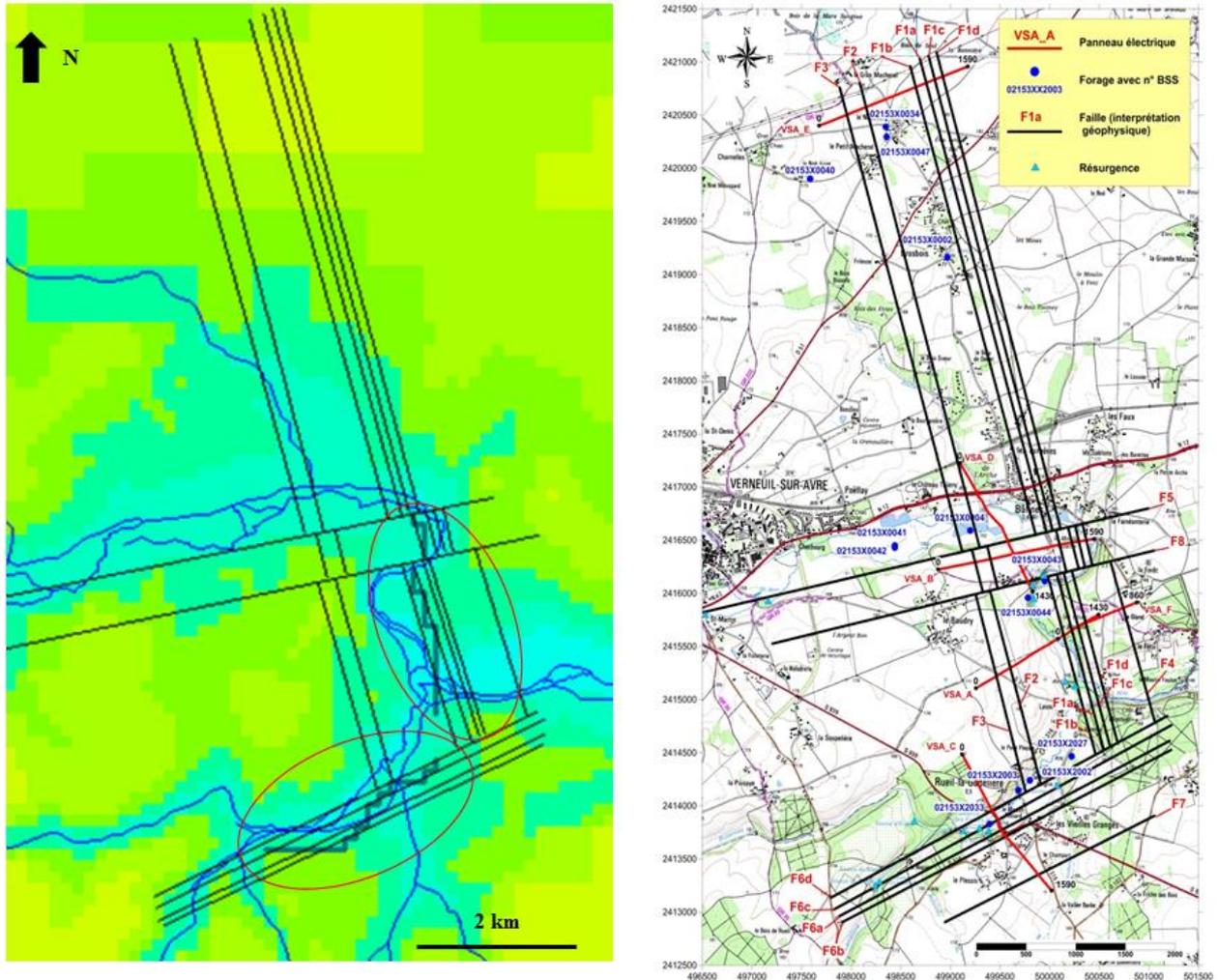


Illustration 74 : Système faillé étanche de Verneuil

La faille de Nonancourt-Damville est définie dans le rapport de phase 3 (BRGM/RP-64817-FR, 2015), comme faisant partie d'un ensemble de linéaments NE direction 165° . Selon G. Kuntz, il peut s'agir d'alignements de gisements sableux piégés dans les dépressions karstiques de la craie. Cette faille joue un rôle de drain qui a été mis en évidence par les mesures piézométriques ponctuelles d'octobre 2006. En effet, plusieurs points le long de cet axe ont un niveau piézométrique proche de 120 m NGF, alors que de part et d'autre de cet axe, les niveaux piézométriques sont dix à quinze mètres plus élevés (Illustration 75). Ce fait a été confirmé lors de l'ajustement du modèle, notamment lors des analyses de sensibilités qui ont été réalisées en marge du calage. Dans le modèle de l'Avre, elle a donc finalement été représentée par un axe de perméabilité élevée recoupant les trois couches crayeuses.

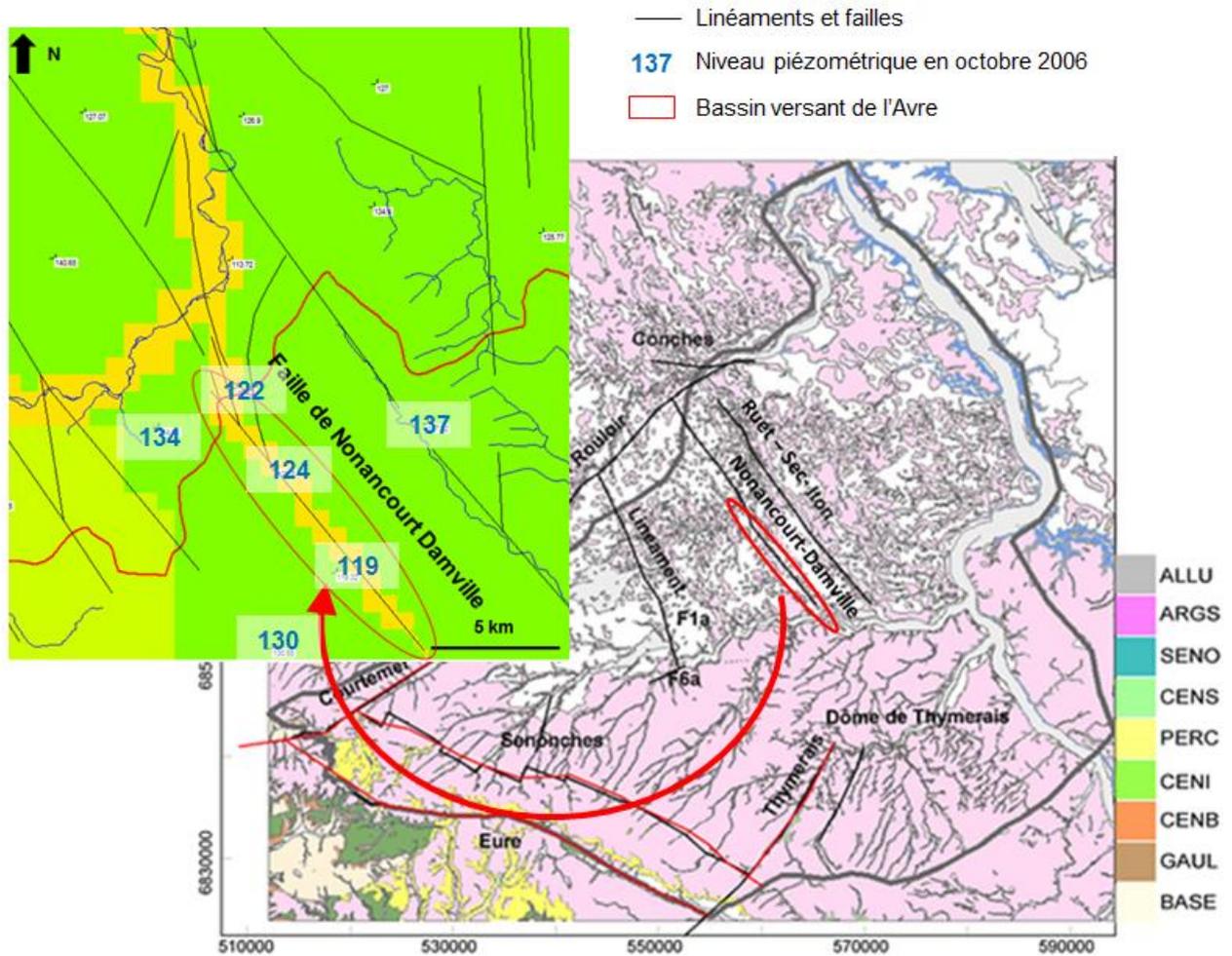


Illustration 75 : Faïlle drainante de Nonancourt – Damville

A l'extérieur du bassin de l'Avre, au niveau du linéament au Sud-Est de Saint-André-sur-Eure, il existe probablement une faille étanche. En effet, on observe un saut piézométrique de 45 mètres de part et d'autre de cet axe. Cette faille a été représentée dans le modèle par un axe de très faible perméabilité (Illustration 76).

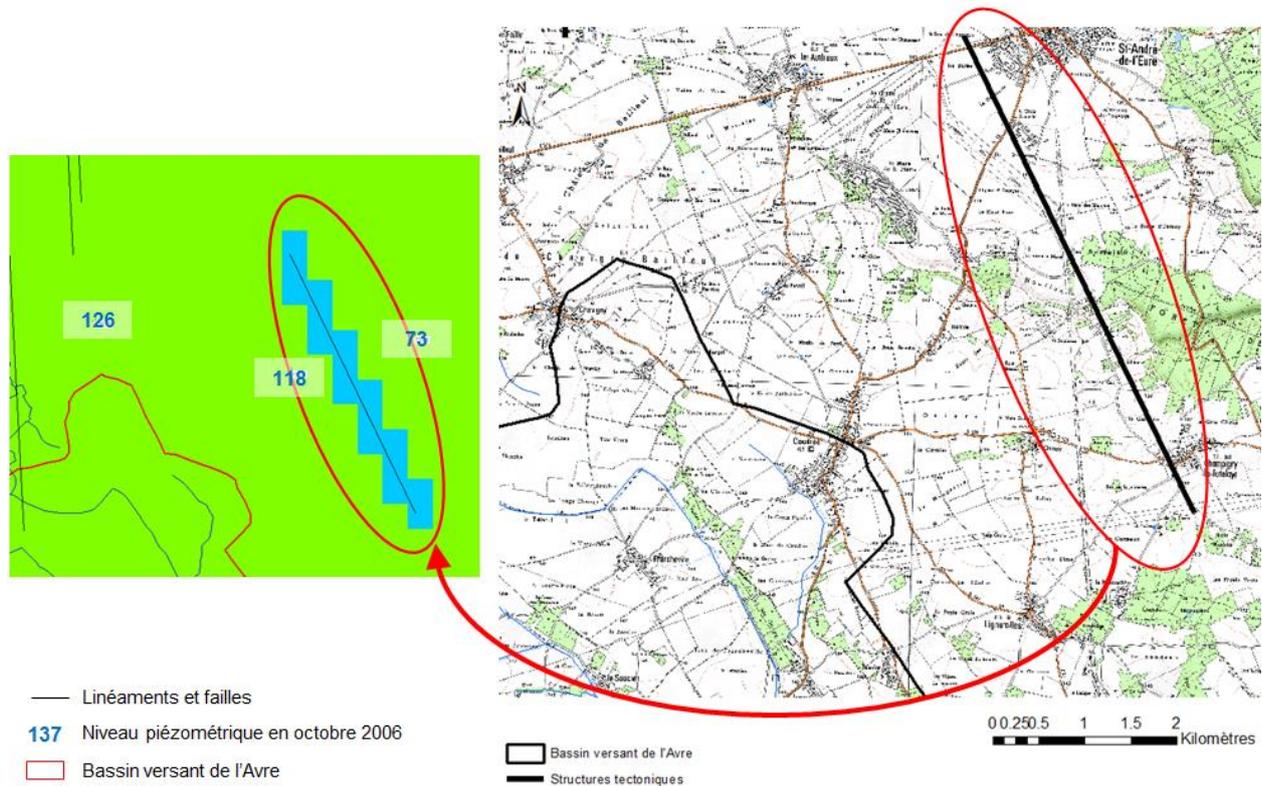


Illustration 76 : Linéament jouant un rôle étanche au Sud-Ouest de Saint-André-sur-Eure

c) Réseaux karstiques

Comme indiqué au § 3.2.1, nous disposons, pour les secteurs karstiques des sources de la Vigne et de Verneuil-sur-Avre, d'une carte des réseaux karstiques supposés dressée sur la base des résultats de traçages et d'une analyse de la fracturation par le Bureau d'études Télusia en 2009 (Illustration 7). Cette carte reste à prendre avec précaution mais en l'absence de connaissance plus approfondie à ce stade, elle a été utilisée pour prendre en compte ces linéaments karstifiés ou très fissurés dans le modèle. Des perméabilités fortes (de 1.10^{-2} à 0.1 m/s) ont été affectées dans la couche « craie altérée » le long de certains de ces linéaments présentés à l'illustration 7 pour représenter des écoulements préférentiels de type « axes fracturés » voir « karstique (Illustration 77).

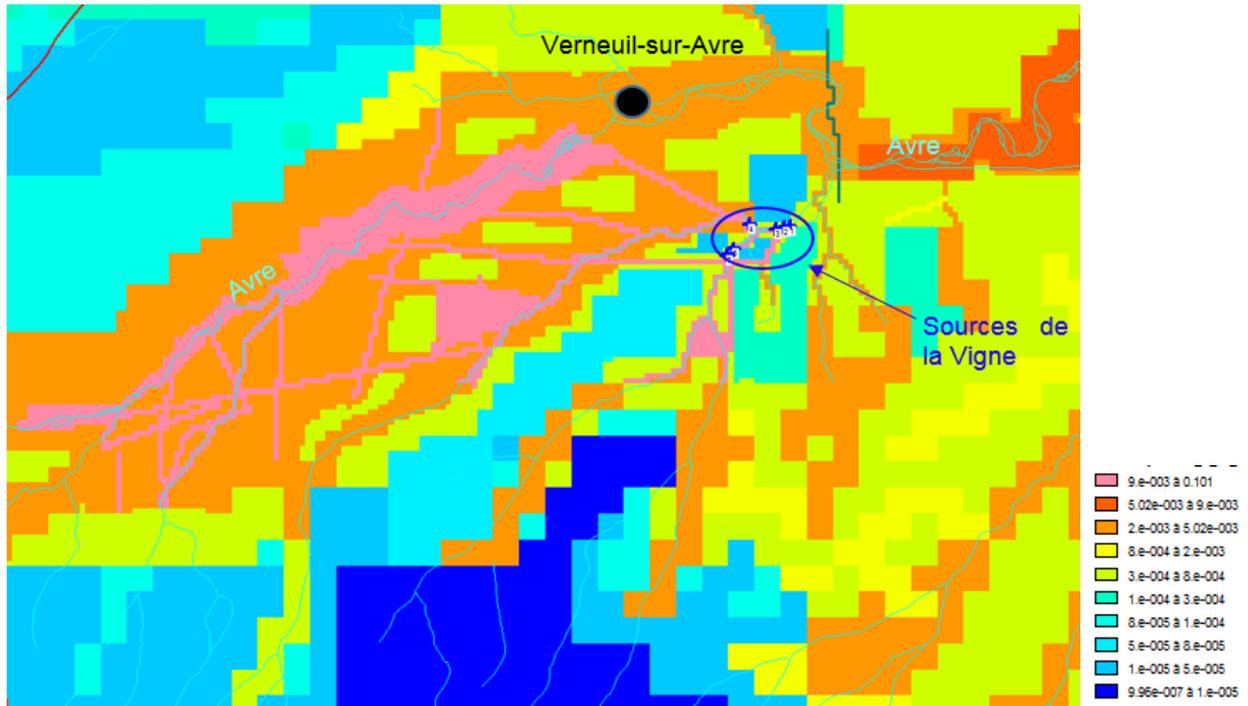


Illustration 77 : Perméabilités (m/s) de la couche 3 (« craie altérée ») du modèle dans le secteur amont des sources de la Vigne et de Verneuil-sur-Avre. Des perméabilités fortes (de 1.10^{-2} à 0.1 m/s) ont été affectées le long de certains des linéaments présentés à l'illustration 7 pour représenter des écoulements préférentiels de type « axes fracturés » voir « karstique »

d) Recharge

Les paramètres de recharge associés aux zones de sols (Illustration 24) ajustés à l'issue du calage en régime transitoire sont présentés dans le Tableau 10 ci-après.

Numéro de zone	Capacité de stockage (mm)	Hauteur d'équipartition ruissellement/infiltration RUIPER (mm)	Temps de demi-percolation (jour)
300	50	900	10
301	220	30	10
302	220	200	10
401	220	400	40
402	154	900	40
403	200	900	40
404	154	80	100
405 à 410 et 413 à 417	154	900	40
435	216	30	10
436	216	200	5
437	250	30	7
438	216	200	10
439	216	200	30
445	220	60	10
455	220	60	10
465	200	60	10

Tableau 10 : Paramètres de recharge ajustés à l'issue du calage

4.3. BILANS QUANTITATIFS DANS LE BASSIN DE L'AVRE

4.3.1. Bilan des flux globaux au niveau du système aquifère dans le bassin de l'Avre

Les différents termes des flux (entrant et sortant) permettent de calculer le stockage et le déstockage de l'eau dans le système aquifère. Globalement, la nappe se recharge entre octobre, novembre ou décembre et mars, avril ou mai avec un maximum en décembre, janvier ou février en fonction des années. La vidange de la nappe se fait entre avril, mai ou juin et octobre, novembre ou décembre. Le détail sur la période 1992-2012 est présenté à l'illustration 78.

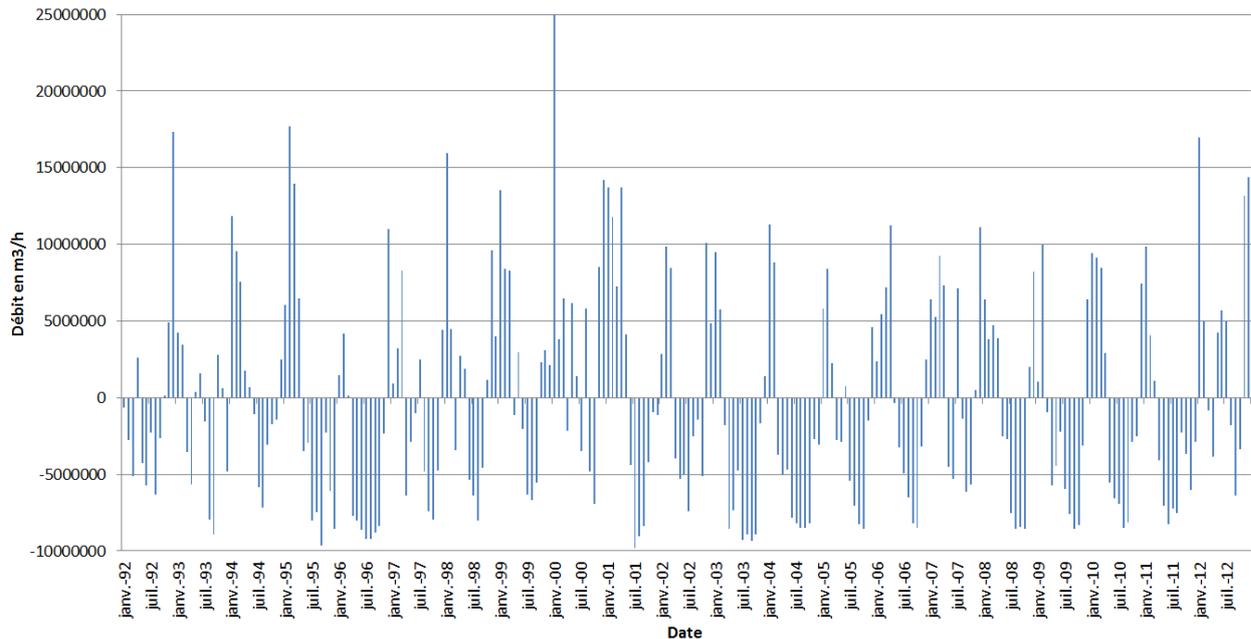


Illustration 78 : Périodes de recharge (Stockage, débits positifs) et de vidange (déstockage, débits négatifs) de la nappe de la craie dans le bassin de l'Avre entre 1992 et 2012

L'illustration 79 présente les bilans quantitatifs réalisés pour le système aquifère à partir des résultats de la modélisation réalisée sur la période 1990-2012 au niveau de l'emprise du bassin versant topographique de l'Avre. Quatre bilans de nappe sont présentés ci-dessous :

- Bilan sur le cycle hydrologique d'une année climatique sèche - 2003/2004
- Bilan sur le cycle hydrologique d'une année climatique moyenne - 2009/2010
- Bilan sur le cycle hydrologique d'une année climatique humide - 2000/2001
- Bilan moyen sur toute la période de simulation -1990-2012.

Les bilans du cycle hydrologique de 2009/2010 ou du cycle hydrologique moyen sur la période des 22 années simulées (1990-2012) sont équilibrés. Les volumes entrées et sorties sont similaires et le stockage/déstockage de la nappe est proche de zéro. En revanche lors du cycle de 2003/2004 (année sèche), la nappe s'est destockée et à l'inverse lors du cycle de 2000/2001 (année humide) la nappe a stocké de l'eau.

Lors du cycle hautes eaux 2000/2001, les volumes en jeu dans le bilan étaient 75% supérieurs à ceux d'une année moyenne.

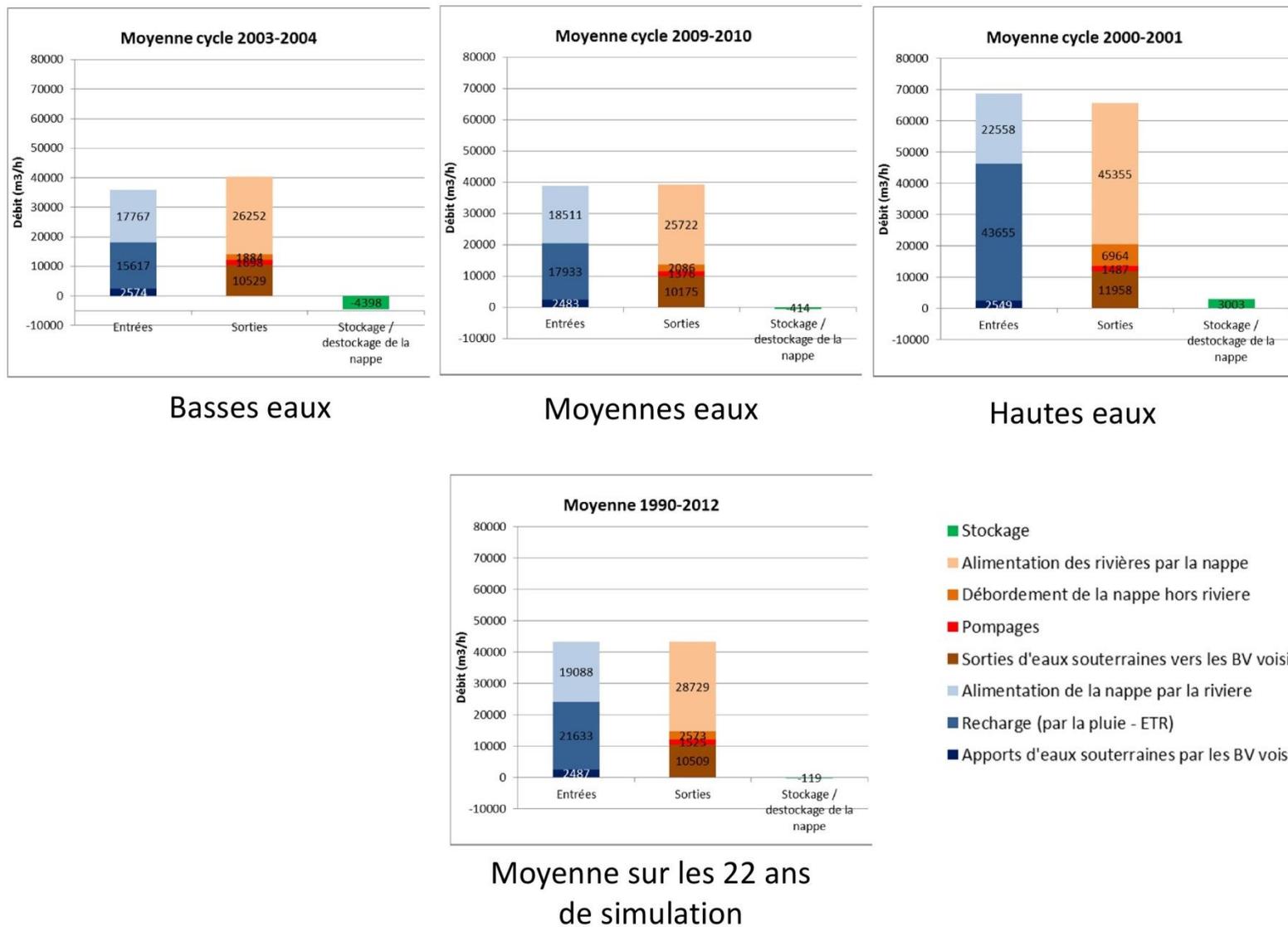


Illustration 79 : Bilans quantitatifs réalisés pour le système aquifère dans le bassin versant topographique de l'Avre (d'après les résultats de la modélisation sur la période 1990-2012)

Les termes d'entrée et de sortie des bilans présentés à l'illustration 79 sont commentés de manière plus approfondie ci-dessous :

Concernant les flux de sorties du système aquifère :

Le tableau ci-dessous présente, pour chaque cycle considéré, la part respective de chaque type de flux de sortie, en m³/s et termes de % par rapport au flux total de sortie du système aquifère :

Débit en m3/s	Basses eaux (2003/2004)	Moyenne eaux (2009/2010)	Hautes eaux (2000/2001)	Moyenne (1990/2012)
Sorties d'eaux souterraines vers les BV voisins	2.92	2.83	3.32	2.92
Pompages	0.47	0.38	0.41	0.42
Débordement de la nappe hors rivière	0.52	0.58	1.93	0.71
Alimentation des rivières par la nappe	7.29	7.15	12.60	7.98

% par rapport au flux total de sortie du système aquifère	Basses eaux (2003/2004)	Moyennes eaux (2009/2010)	Hautes eaux (2000/2001)	Moyenne (1990/2012)
Sorties d'eaux souterraines vers les BV voisins	26%	26%	18%	24%
Pompages	4%	3%	2%	4%
Débordement de la nappe hors rivière	5%	5%	11%	6%
Alimentation des rivières par la nappe	65%	65%	69%	66%

- L'essentiel des flux de sortie de la nappe dans le bassin correspondent à l'alimentation du réseau hydrographique : cela représente 65% environ des flux totaux de sortie de la nappe en année sèche ou moyenne et cela peut atteindre 70% en année humide (66% en moyenne sur 22 ans, soit 7.98 m³/s),
- La part des prélèvements en nappe est faible : elle ne représente que 3% du total des flux de sortie en année moyenne (4% en année sèche et 2% en année humide et 4% en moyenne sur 22 ans, soit 0.42 m³/s),
- En période de très hautes-eaux, la part des flux de sortie vers les bassins versants voisins diminue, passant de 26% en année moyenne à 18% en année humide (24% en moyenne sur 22 ans, soit 2,92 m³/s) et la part des flux de sortie par débordement de la nappe en surface double, passant de 5% en année moyenne à 10% en année humide (6% en moyenne sur 22 ans, soit 0.71m³/s). Pour ces deux composantes, les flux en termes de % du total en année moyenne et sèche restent semblables.

Concernant les flux d'entrées dans le système aquifère :

Le tableau ci-dessous présente, pour chaque cycle considéré, la part respective de chaque terme de flux d'entrée dans le système aquifère, en m³/s et termes de % par rapport au flux total d'entrée :

Débit en m ³ /s	Basses eaux (2003/2004)	Moyenne eaux (2009/2010)	Hautes eaux (2000/2001)	Moyenne (1990/2012)
Apports d'eaux souterraines par les BV voisins	0.72	0.69	0.71	0.69
Recharge (par la pluie - ETR)	4.34	4.98	12.13	6.01
Alimentation de la nappe par la rivière	4.94	5.14	6.27	5.30

% par rapport au flux total d'entrée	Basses eaux (2003/2004)	Moyennes eaux (2009/2010)	Hautes eaux (2000/2001)	Moyenne (1990/2012)
Apports d'eaux souterraines par les BV voisins	7%	6%	4%	6%
Recharge (par la pluie - ETR)	43%	46%	63%	50%
Alimentation de la nappe par la rivière	49%	48%	33%	44%

- L'essentiel des flux d'entrée de la nappe dans le bassin est constitué par la recharge et l'alimentation par les rivières. Leurs proportions sont équivalentes en année moyenne (respectivement 46 et 48%). Toutefois, cette proportion varie en basses eaux et en hautes eaux. En basses eaux, l'entrée majoritaire est l'alimentation par les rivières (49%), la recharge ne représentant alors que 43%. En hautes eaux, c'est l'inverse, la recharge est prépondérante : 63% alors que l'alimentation par les rivières ne représente que 33%. En moyenne sur 22 ans, la recharge représente 50% des flux d'entrées dans le système aquifère (soit 6.0 m³/s), et l'alimentation de la nappe par les rivières 44% (soit 5,3 m³/s).
- Les apports d'eaux souterraines provenant des bassins versants voisins représentent une part limitée des entrées totales de flux dans le système aquifère : 6% en moyennes eaux, 7 % en basses eaux et 4% en eaux hautes (6% en moyenne sur 22 ans, soit 0,7 m³/s).

Cas des échanges nappes/rivières (prise en compte d'une contribution nette de ce paramètre dans le bilan des flux) :

Les échanges nappes/rivières apparaissent à la fois dans les termes d'entrée et de sortie du bilan quantitatif réalisé sur la nappe. Cela vient du fait que les relations entre la nappe et les rivières (l'Avre et ses affluents) varient selon les secteurs, et dans le temps en fonction des saisons.

Les variabilités spatiales des échanges de flux entre les eaux souterraines et superficielles sont mises en évidence dans les Illustration 81 à Illustration 83 qui présentent les débits d'échange

nappes/rivières simulés lors des étiages de 2006, 2011 et 2012. Ces cartes permettent de visualiser les secteurs où la rivière alimente la nappe et ceux où ces échanges s'inversent ; toutefois, il convient de souligner que ces cartes sont à analyser en prenant une approche par grands secteurs, et non pas par maille individuelle, faute de précision suffisante de l'outil liée à un manque de données dans la Vallée de l'Avre.

L'analyse ci-dessus a été refaite cette fois en prenant en compte la contribution nette des échanges de flux entre les eaux souterraines et superficielles pour le système aquifère du bassin topographique de l'Avre ; les résultats apparaissent dans l'illustration 80 et font l'objet des commentaires ci-dessous :

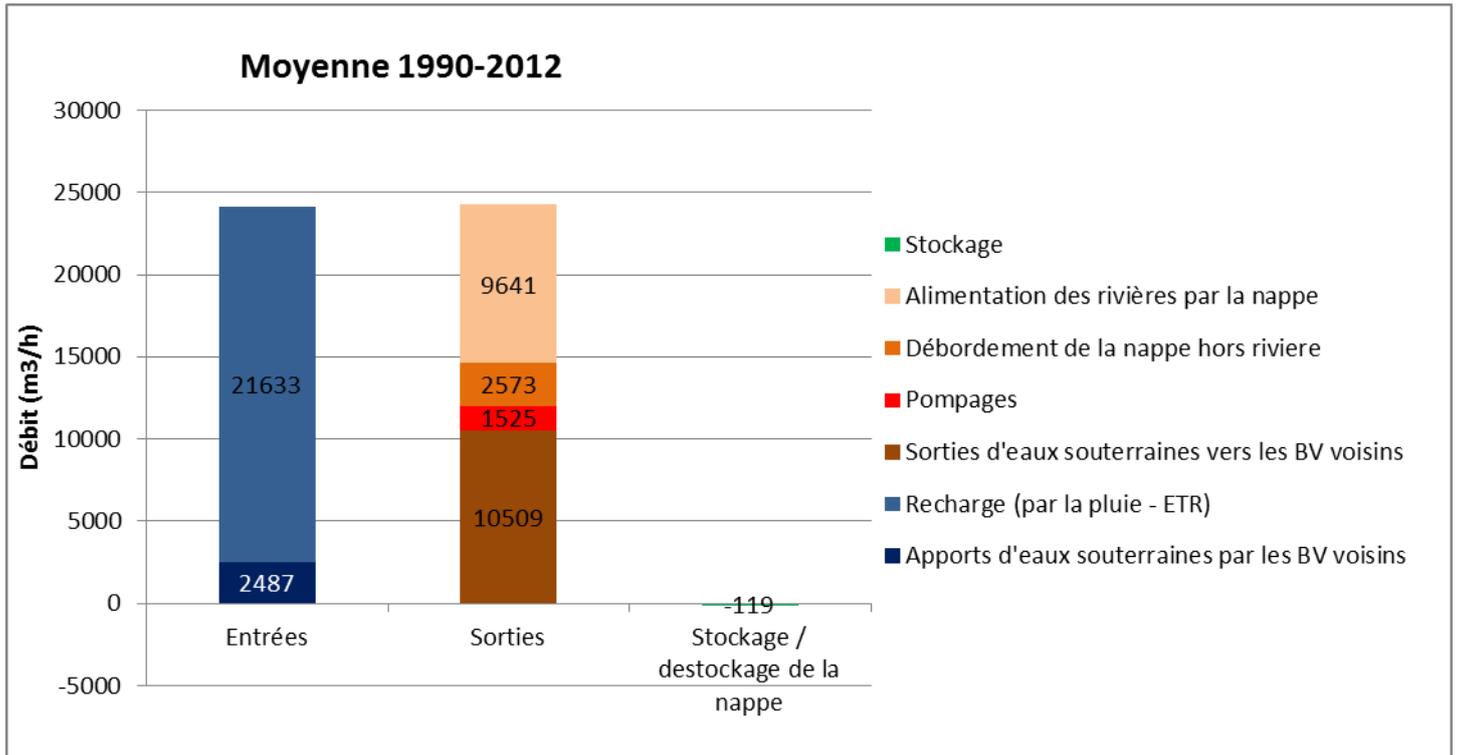


Illustration 80 : Bilan quantitatif moyen réalisé pour la nappe dans le bassin versant topographique de l'Avre (d'après les résultats de la modélisation sur la période 1990-2012) – prise en compte de la contribution nette des échanges nappes/rivières

La contribution nette en moyenne des échanges nappes/rivières se traduit par un débit moyen d'alimentation des rivières par la nappe de l'ordre de 2,7 M³/s dans le bassin de l'Avre. Avec la prise en compte de la contribution nette des échanges nappes/rivières, les parts respectives des termes des sorties et des entrées sont les suivantes :

Le tableau ci-dessous, présente, pour chaque cycle hydrologique étudié, la part respective de chaque terme ou flux de sortie :

Débit en m ³ /s	Basses eaux (2003/2004)	Moyenne eaux (2009/2010)	Hautes eaux (2000/2001)	Moyenne (1990/2012)
Sorties d'eaux souterraines vers les BV voisins	2.92	2.83	3.32	2.92
Pompages	0.47	0.38	0.41	0.42
Débordement de la nappe hors rivière	0.52	0.58	1.93	0.71
Alimentation des rivières par la nappe	2.36	2.00	6.33	2.68

% par rapport au flux total de sortie du système aquifère	Basses eaux (2003/2004)	Moyenne eaux (2009/2010)	Hautes eaux (2000/2001)	Moyenne (1990/2012)
Sorties d'eaux souterraines vers les BV voisins	47%	49%	28%	43%
Pompages	8%	7%	3%	6%
Débordement de la nappe hors rivières	8%	10%	16%	11%
Alimentation des rivières par la nappe	38%	35%	53%	40%

Avec la prise en compte des contributions nettes des échanges nappes/rivières, en période de basses eaux, près de la moitié des flux de sortie (2.92 m³/s, soit 47% du total) se font vers les bassins versants voisins et 38% des débits sortant de la nappe (soit 2.36 m³/s) alimentent les rivières. En moyenne sur les 22 années simulées, les flux de sortie vers les bassins versants voisins (2.92 m³/s) et vers les rivières (2.68 m³/s) sont toutes deux proches de 40% du total des flux de sortie.

Le tableau ci-dessous, présente, pour chaque cycle hydrologique étudié, la part respective de chaque flux d'entrée dans le système aquifère :

Débit en m ³ /s	Basses eaux (2003/2004)	Moyenne eaux (2009/2010)	Hautes eaux (2000/2001)	Moyenne (1990/2012)
Apports d'eaux souterraines par les BV voisins	0.72	0.69	0.71	0.69
Recharge (par la pluie - ETR)	4.34	4.98	12.13	6.01

% par rapport au flux total d'entrée	Basses eaux (2003/2004)	Moyenne eaux (2009/2010)	Hautes eaux (2000/2001)	Moyenne (1990/2012)
Apports d'eaux souterraines par les BV voisins	14%	12%	6%	10%
Recharge (par la pluie - ETR)	86%	88%	94%	90%

Avec la prise en compte des contributions nettes des échanges nappes/rivières, l'essentiel des flux d'entrée dans la nappe (90% en moyenne, soit 6.0 m³/s) est assuré par la recharge liée à la pluie. Toutefois 10% des débits entrants en moyenne (soit 0.69m³/s), proviennent d'apports en eaux souterraines des bassins versant voisins.

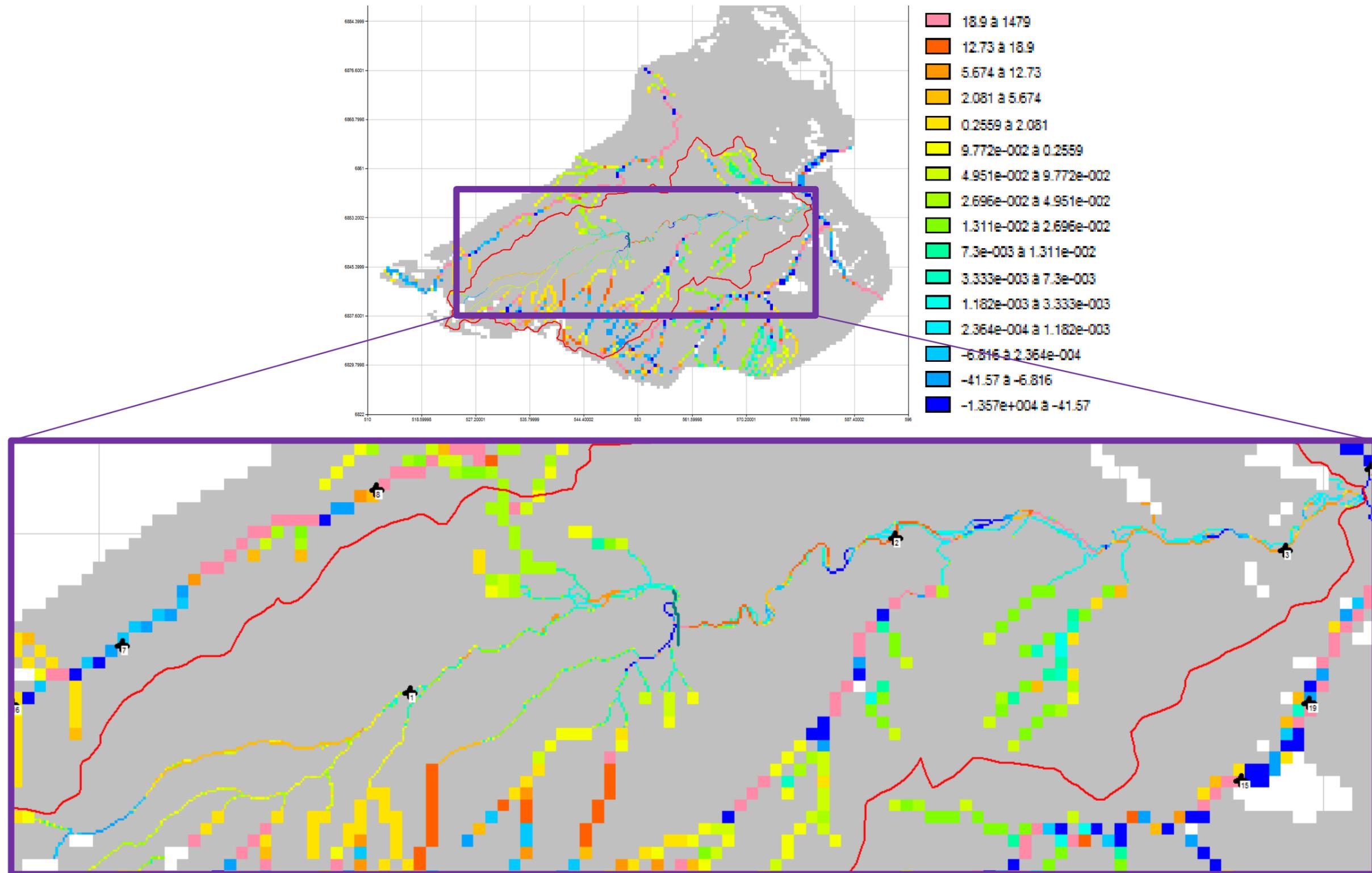


Illustration 81 : Débit d'échange nappes/rivières simulé au pas de temps 6148 (31/10/2006) – Débit positif = la rivière alimente la nappe ; Débit négatif = la nappe alimente la rivière – croix noire n°1 = station de jaugeage de Saint-Christophe-sur-Avre, croix noire n°2 = station de jaugeage d'Acon ; croix noire n°3 = station de jaugeage de Muzy

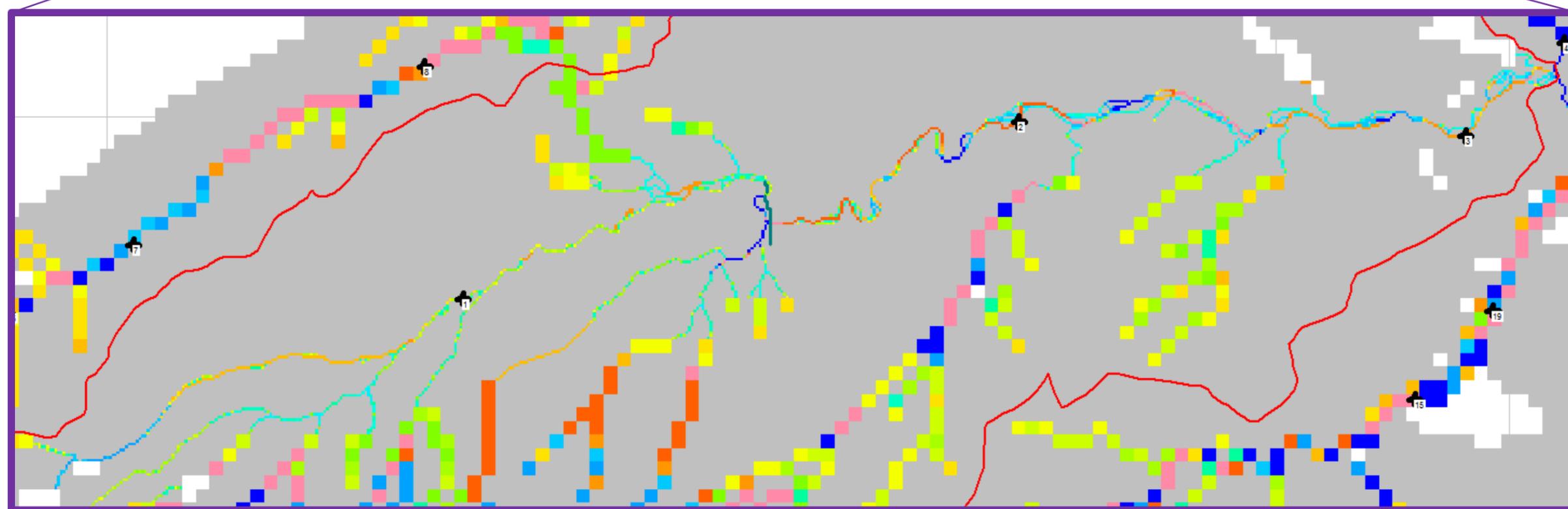
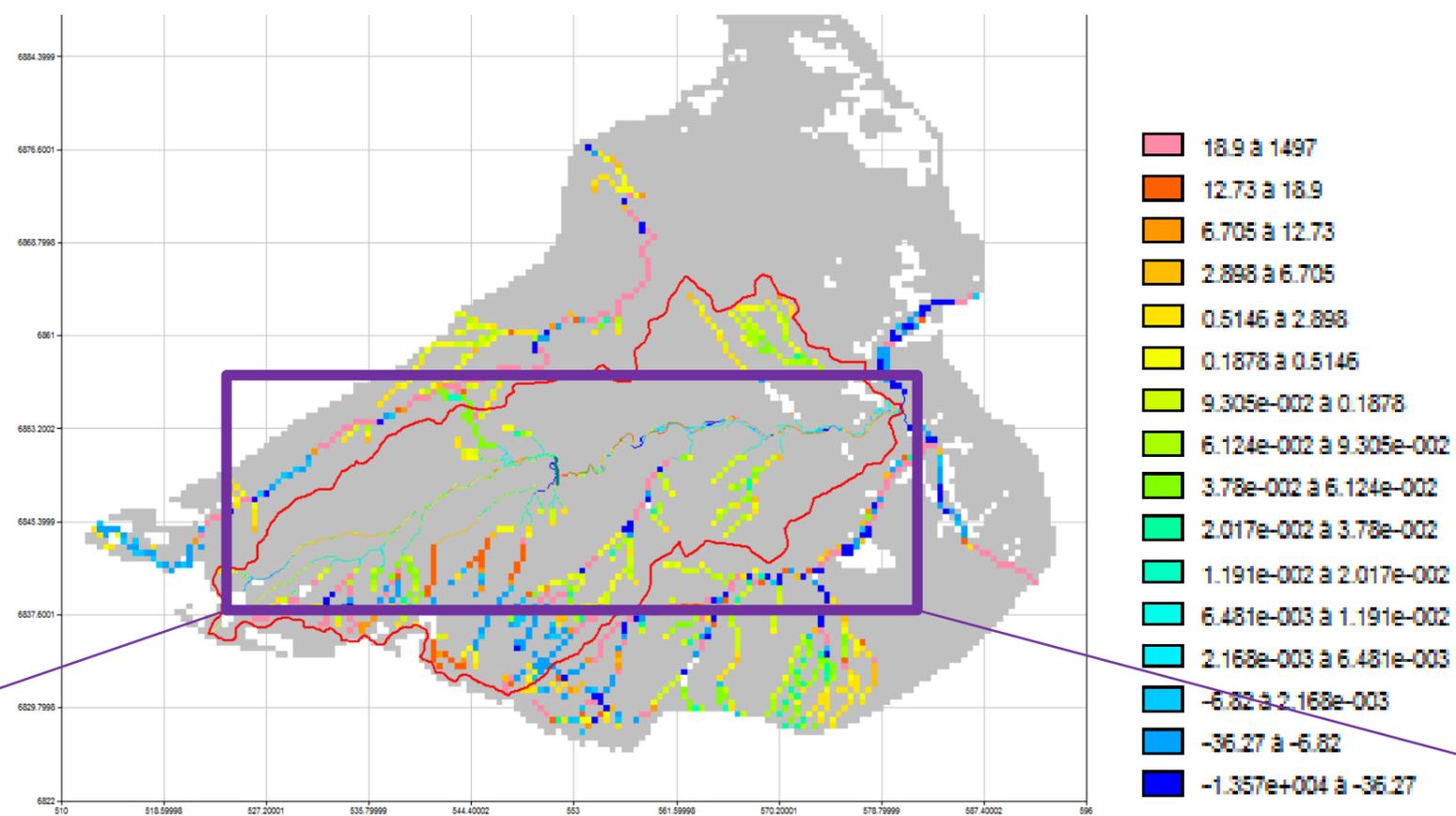


Illustration 82 : Débit d'échange nappes/rivières simulé au pas de temps 7921 (08/09/2011) – Débit positif = la rivière alimente la nappe ; Débit négatif = la nappe alimente la rivière – croix noire n°1 = station de jaugeage de Saint-Christophe-sur-Avre, croix noire n°2 = station de jaugeage d'Acon ; croix noire n°3 = station de jaugeage de Muzy

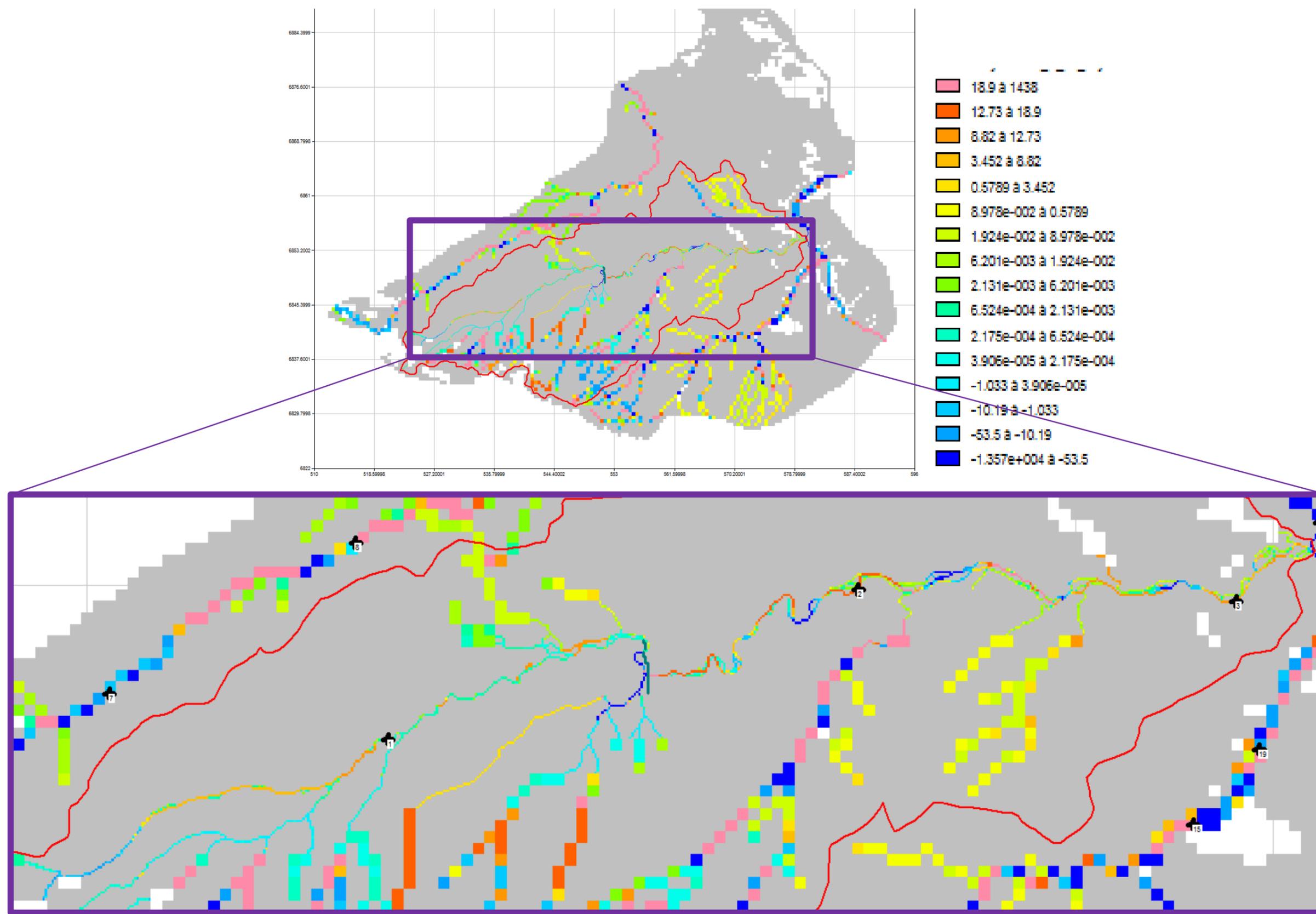


Illustration 83 : Débit d'échange nappes/rivières simulé au pas de temps 8281 (02/09/2012) – Débit positif = la rivière alimente la nappe ; Débit négatif = la nappe alimente la rivière – croix noire n°1 = station de jaugeage de Saint-Christophe-sur-Avre, croix noire n°2 = station de jaugeage d'Acon ; croix noire n°3 = station de jaugeage de Muzy

4.3.2. Bilan sur les rivières de l'ensemble de la zone modélisée

L'illustration 84 présente les bilans quantitatifs réalisés pour les rivières de l'ensemble de la zone modélisée (Avre, Blaise et partiellement Iton et Eure) à partir de résultats de la modélisation sur la période 1990-2012. Quatre bilans des flux sont présentés comme précédemment, mais cette fois uniquement au niveau du réseau hydrographique :

- Bilan des flux sur le cycle hydrologique de 2003/2004 (année climatique sèche)
- Bilan des flux sur le cycle hydrologique de 2009/2010 (année climatique moyenne)
- Bilan des flux sur le cycle hydrologique de 2000/2001 (année climatique humide)
- Bilan moyen des flux sur toute la période de simulation (1990-2012)

Lors du cycle de très hautes eaux 2000/2001, les volumes en jeu dans le bilan des flux sont deux fois supérieurs à ceux de l'année sèche 2003/2004.

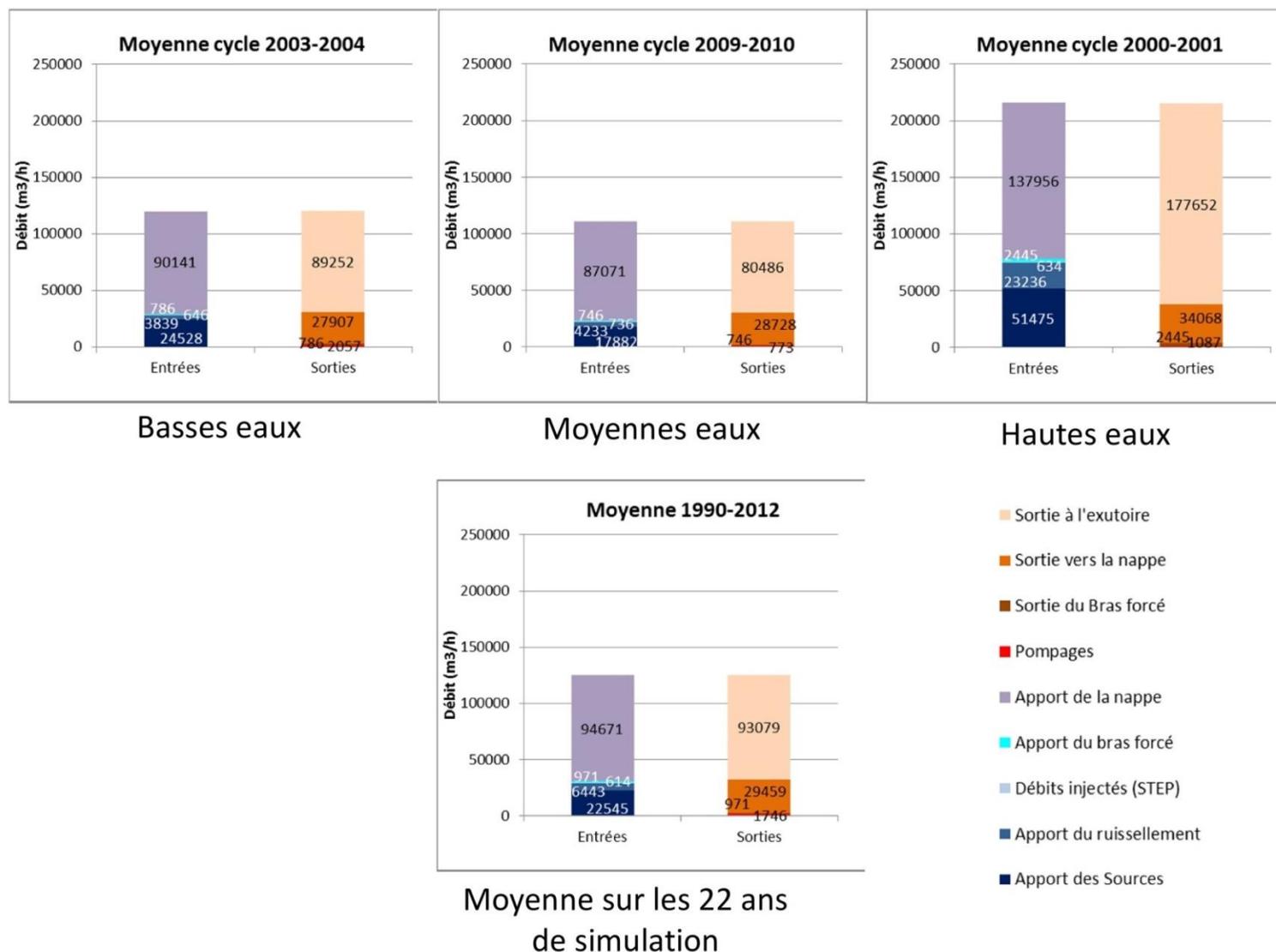


Illustration 84 : Bilans quantitatifs réalisés pour les différentes rivières de la zone modélisée (Avre, Blaise, et partiellement Iton et Eure) (d'après les résultats de la modélisation sur la période 1990-2012)

Concernant les flux de sortie dans le bilan réalisé au niveau des rivières :

Le tableau ci-dessous présente, pour chaque cycle hydrologique considéré, la part respective de chaque terme des flux de sortie :

Débits en m ³ /s	Basses eaux (2003/2004)	Moyenne eaux (2009/2010)	Hautes eaux (2000/2001)	Moyenne 1990-2012
Pompages	0.57	0.21	0.30	0.48
Sortie du Bras forcé	0.22	0.21	0.68	0.27
Sortie vers la nappe	7.75	7.98	9.46	8.18
Sortie à l'exutoire	24.79	22.36	49.35	25.86

% par rapport au flux total de sortie	Basses eaux (2003/2004)	Moyenne eaux (2009/2010)	Hautes eaux (2000/2001)	Moyenne 1990-2012
Pompages	2%	1%	1%	1%
Sortie du Bras forcé	1%	1%	1%	1%
Sortie vers la nappe	23%	26%	16%	24%
Sortie à l'exutoire	74%	73%	83%	74%

- L'essentiel des flux de sorties des rivières correspond au flux à l'exutoire des rivières (écoulement de surface) : ce terme représente 74% en moyenne sur les 22 années modélisées (soit 25,9 m³/s), mais peut atteindre 83% sur le cycle de hautes eaux (2000/2001),
- La part des prélèvements en rivières paraît faible : elle représente entre 1 et 2% du total des flux de sortie selon les cycles hydrologiques considérés (soit entre 0.2 m³/s et 0.57 m³/s). **Il est toutefois important de noter que la quasi-totalité de ces prélèvements sont réalisés sur la rivière Avre alors que le bilan est lui réalisé sur l'ensemble des rivières de la zone modélisée, ce qui peut fausser l'interprétation. La part des prélèvements serait significativement plus importante dans un bilan « rivière » réalisé uniquement pour la rivière Avre.**

Concernant les flux d'entrée dans le bilan réalisé au niveau des rivières :

Le tableau ci-dessous, présente pour chaque cycle hydrologique considéré, la part respective de chaque terme des flux d'entrées :

Débits en m3/s	Basses eaux (2003/2004)	Moyenne eaux (2009/2010)	Hautes eaux (2000/2001)	Moyenne 1990-2012
Apport des Sources	6.81	4.97	14.30	6.26
Apport du ruissellement	1.07	1.18	6.45	1.79
Débits injectés (STEP)	0.18	0.20	0.18	0.17
Apport du bras forcé	0.22	0.21	0.68	0.27
Apport de la nappe	25.04	24.19	38.32	26.30

% par rapport au flux total d'entrée	Basses eaux (2003/2004)	Moyennes eaux (2009/2010)	Hautes eaux (2000/2001)	Moyenne 1990-2012
Apport des Sources	20%	16%	24%	18%
Apport du ruissellement	3%	4%	11%	5%
Débits injectés (STEP)	1%	1%	0%	0%
Apport du bras forcé	1%	1%	1%	1%
Apport de la nappe	75%	79%	64%	76%

L'essentiel des flux d'entrée est constitué par les apports de nappe qui, sommés aux apports des sources, représentent 94% du total des apports en moyenne sur les 22 ans modélisés (soit 32.6 m³/s). Ce chiffre chute toutefois à 88% en période de hautes eaux (cycle 2000/2001), cycle durant lequel les ruissellements atteignent 11% (au lieu de 5% en moyenne sur les 22 ans modélisés).

Prise en compte d'une contribution nette des échanges nappes/rivières :

En ne prenant en compte dans le bilan que la contribution nette des échanges nappes/rivières, on obtient le bilan suivant (Illustration 85) :

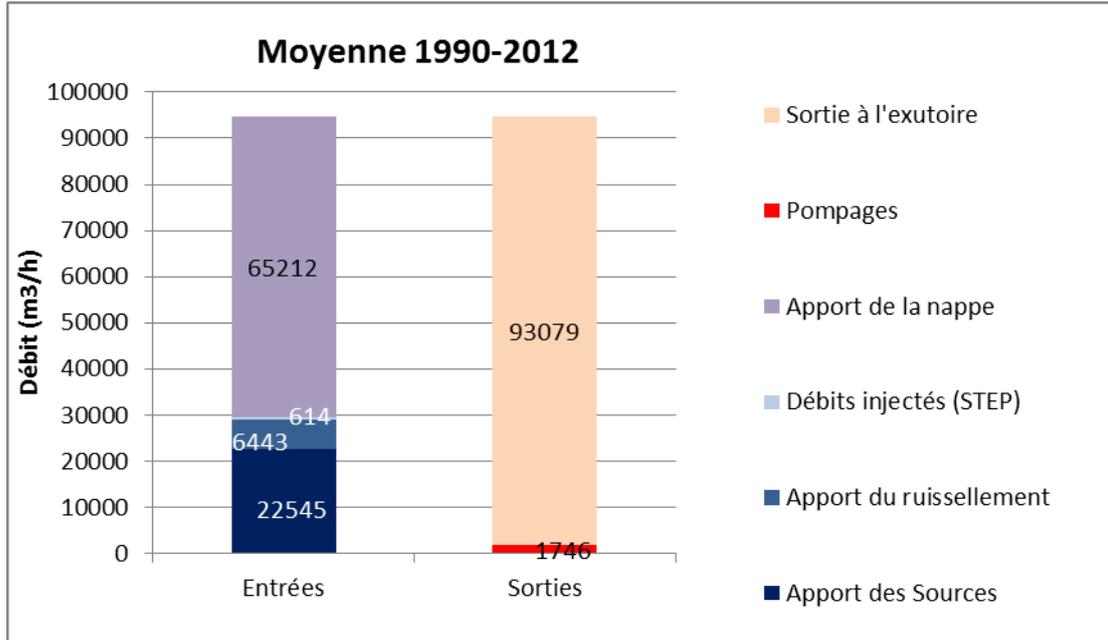


Illustration 85 : Bilan des flux (quantitatif) réalisé pour **les différentes rivières de la zone modélisée (Avre, Blaise, et partiellement Iton et Eure)** (d'après les résultats de la modélisation sur la période 1990-2012) – prise en compte de la contribution nette des échanges nappes/rivières

La contribution nette des échanges nappes/rivières se traduit comme précédemment pour le seul bassin de l'Avre par une alimentation nette des rivières par la nappe. Avec la prise en compte de la contribution nette des échanges nappes/rivières, les parts respectives des termes des flux de sortie et d'entrée sont les suivantes :

Le tableau ci-dessous présente, pour chaque cycle hydrologique considéré, la part respective de chaque terme concernant les flux de sortie :

Débits en m ³ /s	Basses eaux (2003/2004)	Moyenne eaux (2009/2010)	Hautes eaux (2000/2001)	Moyenne 1990-2012
Pompages	0.57	0.21	0.30	0.48
Sortie à l'exutoire	24.79	22.36	49.35	25.86

% par rapport au flux total de sortie	Basses eaux (2003/2004)	Moyenne eaux (2009/2010)	Hautes eaux (2000/2001)	Moyenne 1990-2012
Pompages	2%	1%	1%	2%
Sortie à l'exutoire	98%	99%	99%	98%

Il ressort qu'avec la prise en compte de la contribution nette des échanges nappes/rivières :

- L'essentiel des flux de sorties des rivières correspond comme précédemment à l'exutoire des rivières (écoulement de surface) : ce terme représente cette fois 97% en moyenne sur les 22 années modélisées (soit 25.86 m³/s),

- La part des prélèvements en rivières paraît faible : elle représente en moyenne 2% du total des sorties selon les cycles étudiés (soit 0.48 m³/s). **Il est toutefois important de noter que la quasi-totalité de ces prélèvements sont réalisés sur la rivière Avre alors que le bilan est lui réalisé sur l'ensemble des rivières de la zone modélisée, ce qui peut fausser l'interprétation du bilan. La part des prélèvements serait beaucoup plus importante dans un bilan « rivière » réalisé uniquement pour la rivière Avre.**

Le tableau ci-dessous présente, pour chaque cycle hydrologique considéré, la part respective de chaque terme des flux d'entrées :

Débits en m ³ /s	Basses eaux (2003/2004)	Moyenne eaux (2009/2010)	Hautes eaux (2000/2001)	Moyenne 1990-2012
Apport des Sources	6.81	4.97	14.30	6.26
Apport du ruissellement	1.07	1.18	6.45	1.79
Débits injectés (STEP)	0.18	0.20	0.18	0.17
Apport de la nappe	17.29	16.21	28.86	18.11

% par rapport au flux total d'entrée	Basses eaux (2003/2004)	Moyenne eaux (2009/2010)	Hautes eaux (2000/2001)	Moyenne 1990-2012
Apport des Sources	27%	22%	29%	24%
Apport du ruissellement	4%	5%	13%	7%
Débits injectés (STEP)	1%	1%	0%	1%
Apport de la nappe	68%	72%	58%	69%

Avec la prise en compte des contributions nettes des échanges nappes/rivières, l'essentiel des entrées des flux d'entrée est constitué par les apports de nappe qui représentent en moyenne 69% du total des apports (soit 18.11 m³/s). En rajoutant les apports liés aux sources, les eaux souterraines constituent en moyenne 93% des entrées des rivières (24.37 m³/s), les ruissellements ne représentant en moyenne que 7% (1.79 m³/s).

5. Exploitation du modèle : réalisation de scénarii et calcul des impacts

Après cette première phase de calage et de validation, le modèle intégré nappes-rivières a été utilisé comme outil d'aide à la décision, et dans ce cadre a fourni des premiers éléments en vue de mettre en place une gestion durable des ressources en eau dans le bassin de l'Avre.

Cet outil permet en effet de produire des éléments de réponse à divers objectifs posés tels que :

- Améliorer la connaissance du fonctionnement hydrodynamique du système aquifère dans le bassin de l'Avre ;
- Déterminer les zones en tension quantitative ;
- Evaluer la ressource en eau souterraine exploitable tout en respectant un débit d'étiage acceptable (débit de référence).

Le « débit de référence » des cours d'eau, qui constituait une des clefs d'entrée pour déterminer des volumes prélevables, n'a toutefois pas pu être déterminé pour cette étude ; celui-ci devait en effet être établi dans un cadre indépendant de la présente étude, et devait porter sur les contraintes biologiques (débit biologique), mais un manque de données n'a pas permis d'aboutir. Le SIVA⁵ a en effet tenté de déterminer les Débits Minimum Biologiques (DMB) en différents points de l'Avre en se basant sur une méthodologie définie par l'ONEMA (aujourd'hui Agence Française pour la Biodiversité- AFB). Toutefois, le groupe de travail « rivière » composé de l'AESN, du SIVA, de la DREAL et de l'ONEMA, en charge notamment de valider les débits de référence, a jugé que la méthodologie utilisée n'était pas satisfaisante en l'état et qu'une étude complémentaire était nécessaire pour les définir (cf. § 5.1).

En l'absence de débit de référence, le Comité de pilotage s'est appuyé sur le retour d'expérience de l'étude quantitative conduite sur l'aquifère du Bajocien/Bathonien (« ZRE BAJOCIEN-BATHONIEN ») en Basse-Normandie (Wuilleumier A. et al., 2014). En effet, dans le cas de l'étude « ZRE BAJOCIEN-BATHONIEN », les DMB n'étaient pas disponibles pour tous les bassins versants modélisés. Le Comité de pilotage (COFIL) de cette étude avait alors utilisé le ratio entre le QMNA5 impacté et le QMNA5 naturel simulé (calculé par le modèle hydrogéologique) et avait fixé un seuil maximum d'impact des prélèvements sur le débit naturel des cours d'eau (seuil fixé à 30%). Les volumes prélevables avaient ensuite été calculés pour assurer le maintien de 70% du QMNA5 naturel dans la rivière.

Cette approche a été retenue par le Comité de pilotage (COFIL) de la présente étude (étude Avre) pour quantifier les impacts des prélèvements sur le débit de la rivière. Toutefois, l'objectif de « non dépassement d'une dégradation de 30% du QMNA5 naturel » n'a pas été retenu pour le moment car le COFIL considère qu'il n'a pas de signification biologique ; cet indicateur ne paraît pas être le plus adapté pour répondre à l'objectif recherché de préservation du milieu aquatique. Il a été convenu, qu'une étude complémentaire sera menée par le SIVA et l'ONEMA (AFB) pour définir les débits de référence.

En définitive, le cahier des charges prévoyait l'exploitation du modèle par la réalisation de 5 scénarii. Le comité de pilotage (décisions prises aux réunions n°5 et 7 du COFIL) a in fine demandé au BRGM de tester à l'aide du modèle les 7 scénarii, dont les détails sont donnés dans le tableau ci-après (Illustration 86) :

⁵ Syndicat Intercommunal de la Vallée de l'Avre

Scénario	Définition	Objectif	Données utilisées (pluie / etp / prélèvements)
Scénario 1 (cf. § 5.2)	Scénario de référence sans pompage sur la période 1994-2012	<ul style="list-style-type: none"> Déterminer le débit naturel de l'Avre et déterminer le Qmna5 naturel ; Calculer le nombre d'occurrences de situations naturelles (absence de tout pompage dans le bassin) pour lesquelles le débit biologique n'est pas atteint dans la rivière. 	<u>Chronique hydroclimatique utilisée</u> : Pluie et ETP enregistrées sur la période 1994-2012 <u>Prélèvements</u> : aucun
Scénarii 2a, 2b et 2c (cf. § 5.3)	Scénarii prenant en compte une situation de prélèvements considérée comme « actuelle ». Lors de cette simulation, une « année type » en terme de niveau de prélèvements est reconstituée, puis est répétée pour chaque année de la période de simulée (même période que le scénario 1 : 1994-2012).	Quantifier l'impact des prélèvements pris en compte dans les différents scénarii (2a, 2b et 2c) sur le Qmna5 naturel simulé (au scénario 1)	<u>Chronique hydroclimatique utilisée</u> : Pluie et ETP enregistrées sur la période 1994-2012 <u>Prélèvements</u> : prélèvements « actuels » déterminés par un groupe de travail. 3 variantes de prélèvements « actuels » sont testés au scénarii 2a, 2b et 2c
Scénario 3 (cf. § 5.4)	Scénario correspondant au scénario 2c auquel tous les prélèvements agricoles ont été retirés	Evaluer l'impact des prélèvements agricoles (ceux recensés dans la base de données de l'AESN) sur le débit de l'Avre (par comparaison des résultats des scénarii 1, 2c et 3)	<u>Chronique hydroclimatique utilisée</u> : Pluie et ETP enregistrées sur la période 1994-2012 <u>Prélèvements</u> : prélèvements du scénario 2c auxquels sont retirés les prélèvements agricoles
Scénario 4 (cf. § 5.5)	Scénario correspondant au scénario 2c modifié par la prise en compte de la fourchette haute des estimations des prélèvements agricoles	Evaluer l'incertitude concernant les impacts des prélèvements agricoles sur le débit de l'Avre (par comparaison des résultats des scénarii 1, 2c, 3 et 4)	<u>Chronique hydroclimatique utilisée</u> : Pluie et ETP enregistrées sur la période 1994-2012 <u>Prélèvements</u> : prélèvements du scénario 2c avec remplacement des prélèvements agricoles de la base de données AESN par ceux estimées lors la phase 1 de l'étude AVRE (cf. rapport BRGM/RP-60458-FR)
Scénario 5 (cf. § 5.6)	Scénario correspondant au scénario 2c modifié par la prise en compte du projet de prélèvement envisagé par l'agglomération du pays de Dreux (captage de secours des Prés Hauts à Vert-en-Drouais)	Evaluer l'impact sur les débits de l'Avre de ce projet de prélèvement	<u>Chronique hydroclimatique utilisée</u> : Pluie et ETP enregistrées sur la période 1994-2012 <u>Prélèvements</u> : prélèvements du scénario 2c avec ajout du prélèvement envisagé par Dreux Agglomération.

Illustration 86 : Synthèse des éléments concernant les 7 scénarii testés sur le modèle nappe-rivière du bassin de l'Avre

5.1. TENTATIVE D'ESTIMATION DES DEBITS MINIMUM BIOLOGIQUES (DMB)

Le Syndicat Intercommunal de la Vallée de l'Avre (SIVA) a tenté de déterminer les Débits Minimum Biologiques (DMB) en appliquant une méthode simplifiée définie par l'ONEMA. Cette méthode est notamment utilisée par la DDTM27 pour définir le débit réservé dans le cadre de l'application de l'article L214.18 du code de l'environnement. Elle peut être utilisée sur tout le linéaire d'un cours d'eau puisqu'elle repose sur la reconnaissance de faciès courants (radiers ou plats courants). Elle nécessite de mesurer la largeur en pied de berge de ce faciès. Le calcul du DMB consiste ensuite à multiplier la largeur mesurée par un DMB unitaire qui est fonction du type de population piscicole recherché dans le cours d'eau (0.170 m³/s/m pour les rivières à grands migrateurs et 0.120 m³/s/m pour les autres cours d'eau). L'Avre entre dans la catégorie des « autres cours d'eau », les espèces cibles étant l'ombre et la truite fario (cf. support de la présentation du SIVA en annexe 7).

Suite au premier groupe de travail « rivière » du 03 juillet 2014, il avait été décidé de faire appliquer cette méthode par le SIVA sur l'Avre lors de l'étiage 2014. Des mesures ont ainsi été réalisées par le SIVA sur 52 points, dont 16 sur le cours principal de l'Avre, et dont 3 sur les 16 à proximité des stations hydrométriques de St-Christophe, Acon et Muzy. Les points de mesures ont été choisis avec l'aide de l'ONEMA (AFB), sur des zones représentatives des différents tronçons de l'Avre, à la fois sur des faciès de type radiers et plats courants. Le calcul du DMB consistant donc à multiplier la largeur moyenne en pied de berge par 0.120 m³/s/m.

Comme décidé par le groupe de travail, aucune mesure de DMB n'a été réalisée sur le tronçon amont (sur lequel se trouve notamment la station de jaugeage de Saint-Christophe-sur-Avre) au vu du déficit naturel en eau sur ce tronçon, celui-ci présentant un caractère atypique.

Les valeurs de DMB ainsi obtenues sont listées dans le tableau ci-dessous pour les points de mesure se situant à proximité des 3 stations de jaugeage de l'Avre. Pour comparaison, ce tableau fait état également des débits correspondant au module, au 1/10 du module et au QMNA5 (débit quinquennal sec).

Largeur pied de berge (m)	DMB calculé (m ³ /s)	Station à proximité	QJM (m ³ /s)	Module (m ³ /s)	10% du module (m ³ /s)	QMNA5 statistique (m ³ /s)
4.2	0,48	St-Christophe	0,181	0,27	0.027	0.019
12.5	1.5	Acon	3.28	2.56	0.256	0.95
23.6	2.86	Muzy	4.15	3.49	0.349	1.3

Son examen montre que les valeurs de DMB obtenues sont très largement supérieures aux QMNA5 statistiques des stations hydrométriques, et même du module.

Le groupe de travail « rivière » composé de l'AESN, du SIVA, de la DREAL et de l'ONEMA a donc jugé que la méthodologie utilisée n'était pas satisfaisante en l'état pour pouvoir déterminer des volumes prélevables et qu'une étude complémentaire était nécessaire pour définir les débits de référence. Il a été convenu que cette étude complémentaire serait menée par le SIVA et l'ONEMA (cf. compte-rendu de réunion du COPIL n°7 en Annexe 7).

5.2. SCENARIO 1

Le scénario 1 est un scénario de référence qui a pour objectif de simuler les débits naturels de l'Avre (débits sans impact des pompages en nappe et en rivière). Il a également pour objectif de calculer le nombre d'occurrences de situations naturelles pour lesquelles les débits biologiques définis par le SIVA ne sont pas atteints dans la rivière.

Ce scénario a été simulé sur la période 1994-2012 (pas de temps de simulation : 7 jours).

Les débits naturels simulés sont présentés à l'illustration 87 pour les trois stations de l'Avre (Acon, Muzy et Saint-Christophe-sur-Avre). Sur ces mêmes illustrations, les débits naturels sont comparés :

- aux DMB calculés par le SIVA à titre informatif, car comme expliqué au § 5.1 ces DMB ont été jugés insatisfaisants par le groupe de travail « rivière »,
- aux débits simulés avec prise en compte des prélèvements connus (base AESN) sur la période simulée.

Remarque : afin de s'affranchir des écarts entre les débits simulés et les débits mesurés, les résultats sont comparés d'un scénario simulé à l'autre ; le travail est donc effectué en relatif avec une approche comparative entre débits simulés dans les scénarii d'intérêt.

Les résultats (Illustration 87) montrent :

- L'absence d'impact significatif des prélèvements sur les débits de l'Avre à la station amont de Saint-Christophe (les courbes rouges et vertes sont confondues). A noter toutefois, et pour rappel, que dans le secteur « perché » de l'Avre à l'amont (dans lequel se situe la station de Saint-Christophe-sur-Avre), le modèle est plus pessimiste que la réalité, car il simule des assecs à des périodes où des faibles débits étaient encore mesurés sur le terrain,
- Des impacts significatifs aux stations d'Acon et Muzy (ces impacts seront quantifiés dans le cadre du scénario 2, cf. §5.3.4).

La comparaison des débits naturels de l'Avre aux DBM calculés par le SIVA montre que :

- à Saint-Christophe sur Avre, le débit naturel ne respecte pas le DMB 75% du temps ;
- à Acon, le débit naturel ne respecte pas le DMB 6% du temps ;
- à Muzy, le débit naturel ne respecte pas le DMB 20% du temps.

Enfin, le scénario ayant simulé les chroniques de débit naturel de l'Avre, les Qmna5 naturels ont été déterminés. Ces Qmna5 ont été calculés selon deux méthodes : (1) de façon empirique⁶ et (2) par ajustement à une loi de Galton. Les résultats de ces calculs sont présentés aux Illustration 88 et Illustration 89.

Ces données de Qmna5 naturels vont servir à la quantification des impacts des prélèvements, pris en compte dans les différents scénarii suivants (2a, 2b, 2c, 3, 4 et 5).

La quantification de l'impact des prélèvements sur le débit du cours d'eau sera en effet effectuée pour chacun des scénarii (sc. 2 à sc. 5) en calculant l'impact des différents scénarii de prélèvements sur le Qmna5 naturel simulé (scénario 1). Ainsi, pour chaque station hydrométrique

⁶ Calculé à partir de la distribution empirique des débits mensuels minimaux de chaque année civile (QMNA5 correspond à la fréquence de 20%) ; par opposition à un calcul des Qmna5 par ajustement à une loi de Galton

et pour chaque scénario, le QMNA5 empirique sera calculé à partir des débits simulés et le ratio suivant sera calculé :

$$(QMNA5_{\text{naturel}} - QMNA5_{\text{avec prélèvement}}) / QMNA5_{\text{naturel}}$$

Il convient toutefois de rester prudent sur l'utilisation de ces débits naturels simulés. En effet, le calage n'est pas parfait, et des écarts parfois significatifs peuvent exister entre les débits calculés et observés lors de certains étiages – cf Illustration 71 à Illustration 73).

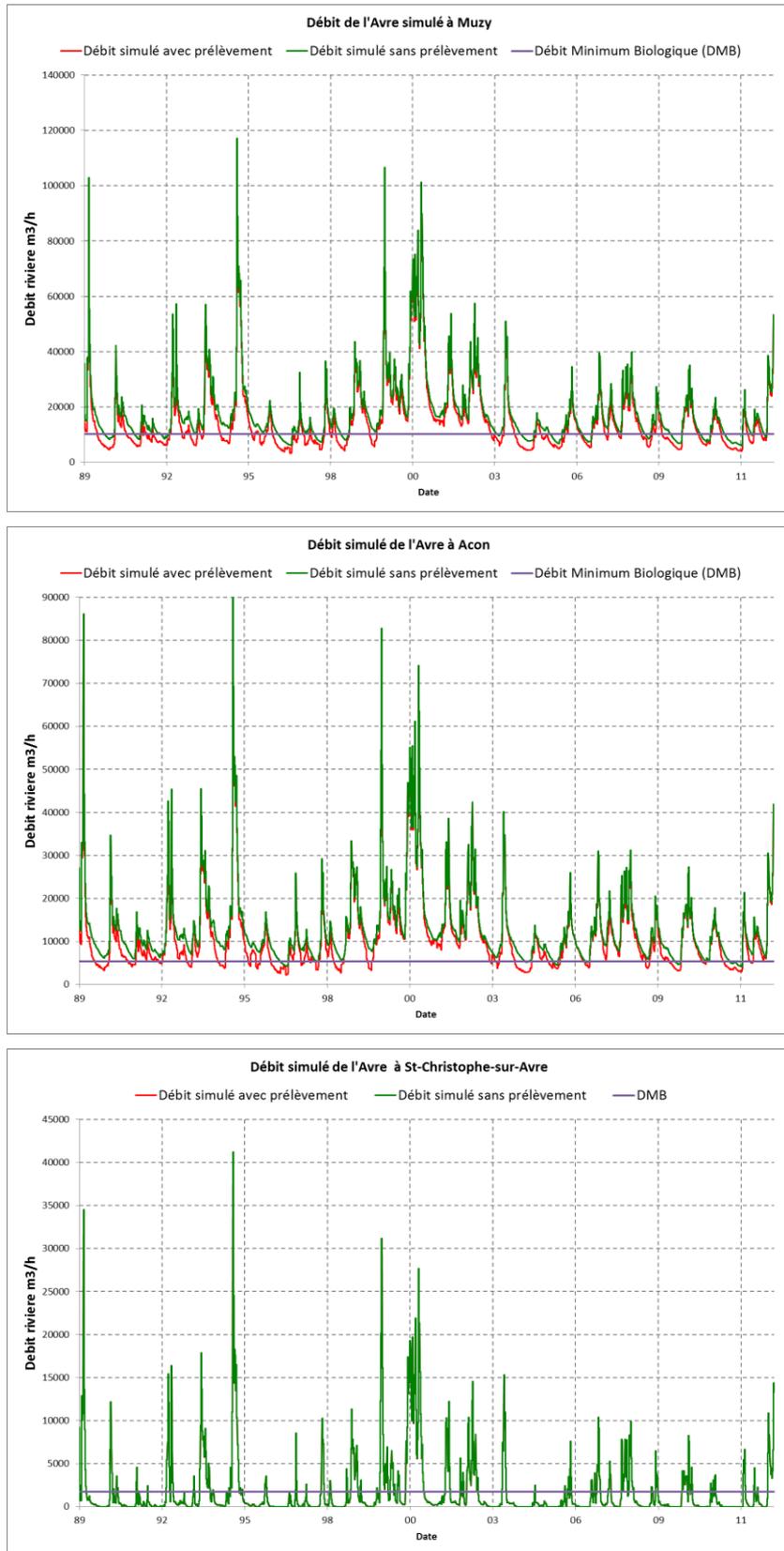


Illustration 87 : Comparaison des débits de l'Avre simulés avec et sans prélèvements (réels pour la période 1990-2012) aux trois stations hydrologiques de Saint-Christophe-sur Avre, Acon et Muzy – période : 1990 -2012

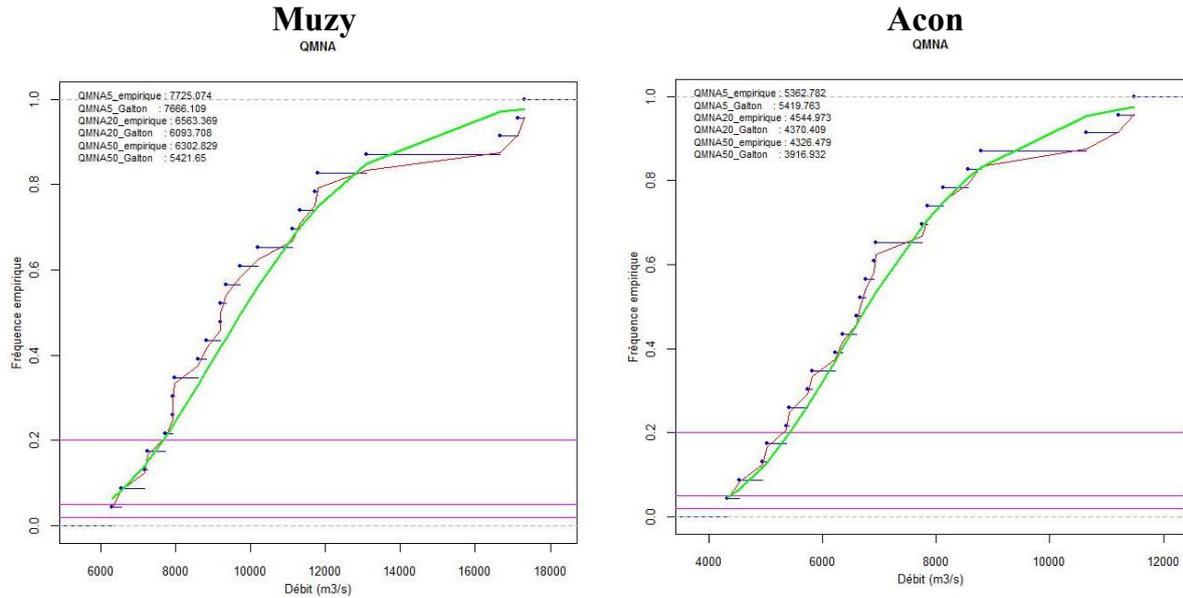


Illustration 88 : Calcul des Qmna naturels par ajustement à une loi de Galton pour les stations d'Acon et de Muzy (valeurs en m³/h)

		ACON	MUZY					ACON	MUZY
(ajustement à une loi de galton sur 23 valeurs et 23 années)	Qmna5	1.51	2.13			(Qmna empirique)	Qmna5	1.49	2.09
	Qmna10	1.32	1.88				Qmna10	1.29	1.90
	Qmna20	1.21	1.69				Qmna20	1.26	1.82
	Qmna50	1.09	1.51				Qmna50	1.20	1.75

Illustration 89 : Résultats des calculs des Qmna naturels simulés (en m³/s) pour les stations d'Acon et de Muzy (calculés sur les 23 années simulées : 1990 à 2012)

5.3. SCENARII 2A, 2B ET 2C

Les objectifs du scénario 2 sont définis à l'illustration 86.

Conformément à la décision du COPIL n°6, les prélèvements considérés comme actuels ont été définis par un groupe de travail SIVA-AESN accompagné par le BRGM lors de différentes réunions (le 25/01/2016 et le 24/02/2016). Il a été décidé que les prélèvements « actuels » seraient calculés sur la base d'une moyenne réalisée sur les 5 dernières années de prélèvements disponibles dans le modèle à savoir de 2008 à 2012.

Toutefois, du fait de la forte variabilité temporelle des prélèvements réalisés sur les sources de la Vigne, le scénario 2 a été décomposé en 3 scénarii : 2a, 2b et 2c (décision de la réunion du 24/02/2016 à laquelle a participé Eau de Paris) :

- Scénario 2a, les prélèvements pris en compte sont :
 - la moyenne réalisée pour chaque mois : moyenne réalisée sur les 5 dernières années (2008-2012) des prélèvements du bassin de l'Avre ainsi que ceux réalisés sur le champ captant de Vert-en-Drouais par Eau de Paris (EDP) (localisation à l'illustration 91) ;
 - le minimum (pour chaque mois) des prélèvements mensuels réalisés aux sources du Breuil et de la Vigne (EDP) (localisation à l'illustration 91) sur la période 2006-2012 (les périodes d'arrêt de l'aqueduc ayant pu avoir lieu sur cette période sont exclues du calcul).
- Scénario 2b, les prélèvements pris en compte sont :
 - la moyenne réalisée pour chaque mois : moyenne réalisée sur les 5 dernières années (2008-2012) des prélèvements du bassin de l'Avre ainsi que ceux réalisés sur le champ captant de Vert-en-drouais par EDP ;
 - le maximum autorisé pour les sources du Breuil et de la Vigne (EDP) soit 110 000 m³/j (répartis comme suit : 100 000 m³/j pour les sources de la Vigne et 10 000 m³/j pour la source du Breuil) ;
- Scénario 2c, les prélèvements pris en compte sont :
 - la moyenne réalisée pour chaque mois : moyenne réalisée sur les 5 dernières années (2008-2012) des prélèvements du bassin de l'Avre ainsi que ceux réalisés sur le champ captant de Vert-en-drouais par EDP ;
 - la médiane (pour chaque mois) des prélèvements mensuels réalisés aux sources du Breuil et de la Vigne (Eau de Paris) sur la période 2006-2012.

Les prélèvements ainsi calculés sont présentés dans le tableau ci-dessous pour les 3 scénarii (en m³/an) :

	Scénario 2a	Scénario 2b	Scénario 2c
Prelevement agricole	1 167 199	1 167 199	1 167 199
Prelevement AEP et Industrie bassin	4 138 288	4 138 288	4 138 288
Prelevement AEP EDP Vert-en-drouais	7 788 600	7 788 600	7 788 600
Prelevement ESU EDP Breuil+Vigne	1 067 000	40 150 584	9 853 500

Les proportions relatives des différentes catégories de prélèvement sont présentées à l'illustration 90 pour les 3 scénarii.

Ces 3 scénarii ont été simulés sur la période 1994-2012 (pas de temps de simulation : 7 jours). Les résultats des scénarii 2a, 2b, 2c sont présentés aux § 5.3.1 à 5.3.3 de manière synthétique. La quantification de l'impact des prélèvements sur le débit du cours d'eau est présentée plus en détails au §5.3.4.

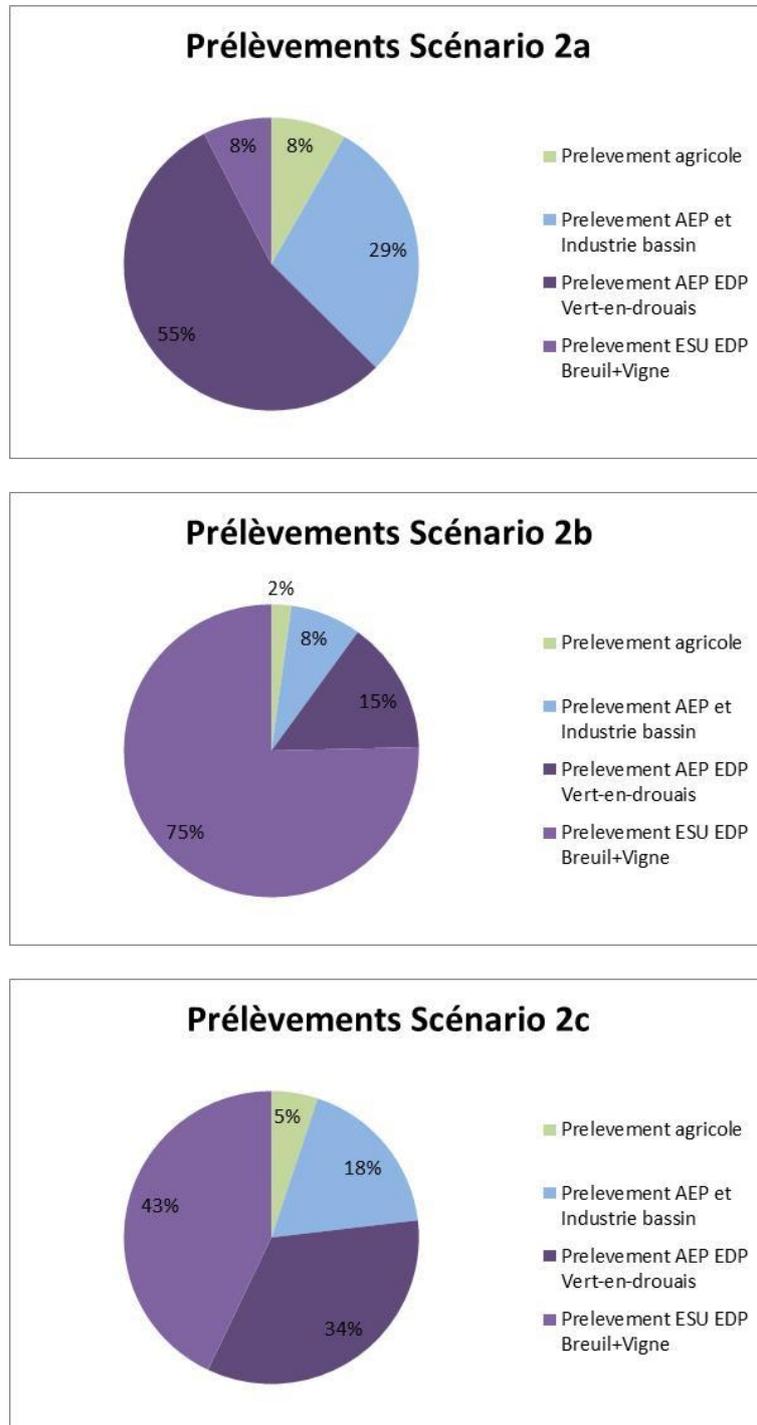


Illustration 90 : Hypothèse des prélèvements « actuels » retenus pour les scénarii 2a, 2b et 2c

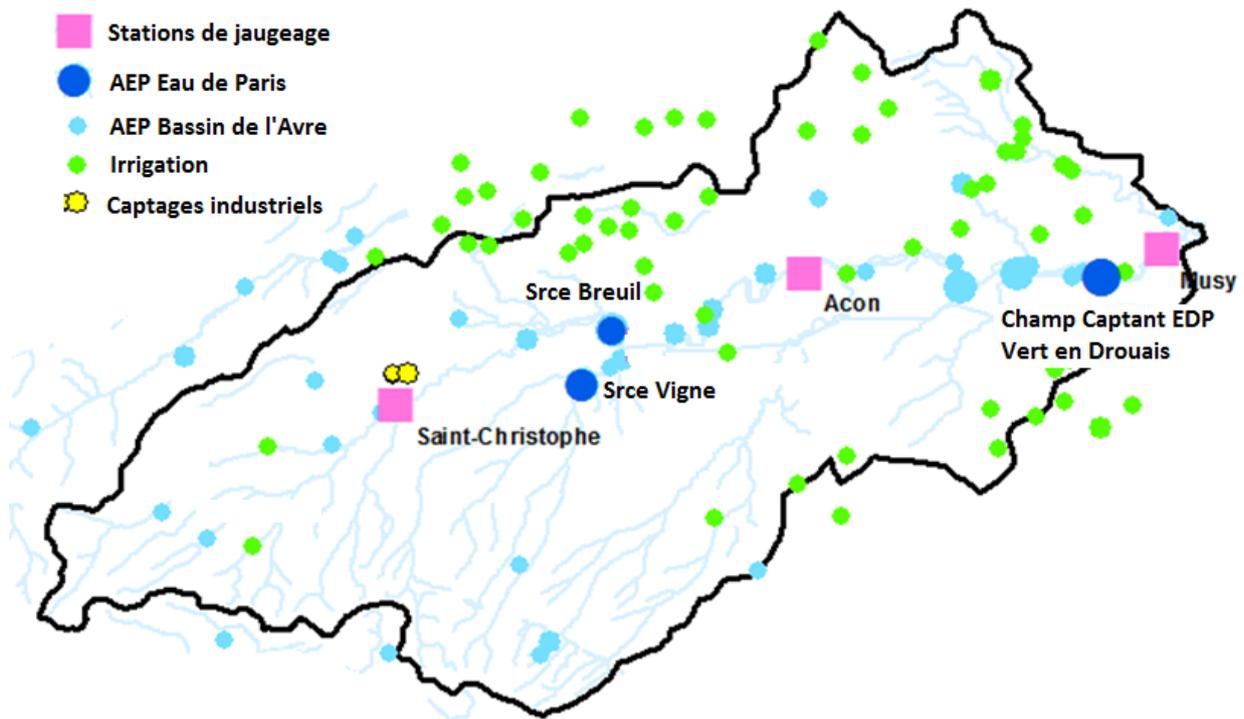


Illustration 91 : Localisation des principaux champs captants faisant l'objet des prélèvements « actuels » retenus pour les scénarii 2a, 2b et 2c

5.3.1. Scénario 2a

Les résultats des débits simulés au scénario 2a sont présentés à l'illustration 92 pour les trois stations de l'Avre (Acon, Muzy et Saint-Christophe-sur-Avre). Sur ces mêmes illustrations, les débits simulés au scénario 2a sont comparés aux débits simulés dans le cadre du scénario 1 (débits naturels)

Les résultats (Illustration 92) montrent :

- l'absence d'impact significatif des prélèvements sur les débits de l'Avre à la station de Saint-Christophe (résultat attendu dans la mesure où les zones de prélèvements principales sont situées bien à l'aval de cette station) ;
- des impacts significatifs aux stations d'Acon et Muzy. On constate par exemple une diminution de 16% du Q_{mna5} naturel simulé à la station de Muzy (- Q_{mna5} naturel Muzy : $1,99 \text{ m}^3/\text{s}^7$) ; Q_{mna5} scénario 2a à Muzy : $1,66 \text{ m}^3/\text{s}^7$)

Les quantifications des impacts sont étudiées de façon plus systématique dans le paragraphe suivant (§ 5.3.4).

5.3.2. Scénario 2b

Les résultats des débits simulés au scénario 2b sont présentés à l'illustration 93 pour les trois stations de l'Avre (Acon, Muzy et Saint-Christophe-sur-Avre). Sur ces mêmes illustrations, les

⁷ Q_{mna5} empirique calculé sur la période 1994-2012

débits simulés au scénario 2b sont comparés aux débits simulés dans le cadre du scénario 1 (débits naturels).

Les résultats (Illustration 93) montrent :

- l'absence d'impact significatif des prélèvements sur les débits de l'Avre à la station de Saint-Christophe (résultat attendu dans la mesure où les zones de prélèvements principales sont situées bien à l'aval de cette station),
- des impacts très importants aux stations d'Acon et Muzy. On constate par exemple une diminution de 67% du Q_{mna5} naturel à la station de Muzy - Q_{mna5} naturel Muzy : $1,99 \text{ m}^3/\text{s}$; Q_{mna5} scénario 2b à Muzy. : $0,66 \text{ m}^3/\text{s}$).

Les quantifications des impacts sont étudiées de façon plus systématique dans le paragraphe suivant (§ 5.3.4).

5.3.3. Scénario 2c

Les résultats des débits simulés au scénario 2c sont présentés à l'illustration 94 pour les trois stations de l'Avre (Acon, Muzy et Saint-Christophe-sur-Avre). Sur ces mêmes illustrations, les débits simulés au scénario 2c sont comparés aux débits simulés dans le cadre du scénario 1 (débits naturels).

Les résultats (Illustration 94) montrent :

- l'absence d'impact significatif des prélèvements sur les débits de l'Avre à la station de Saint-Christophe (résultat attendu dans la mesure où les zones de prélèvements principales sont situées à l'aval de cette station),
- des impacts significatifs aux stations d'Acon et Muzy. On constate par exemple une diminution de 30% du Q_{mna5} naturel à la station de Muzy - Q_{mna5} naturel Muzy : $1,99 \text{ m}^3/\text{s}$; Q_{mna5} scénario 2c à Muzy : $1,40 \text{ m}^3/\text{s}$ -

Les quantifications des impacts sont étudiées de façon plus systématique dans le paragraphe suivant (§ 5.3.4).

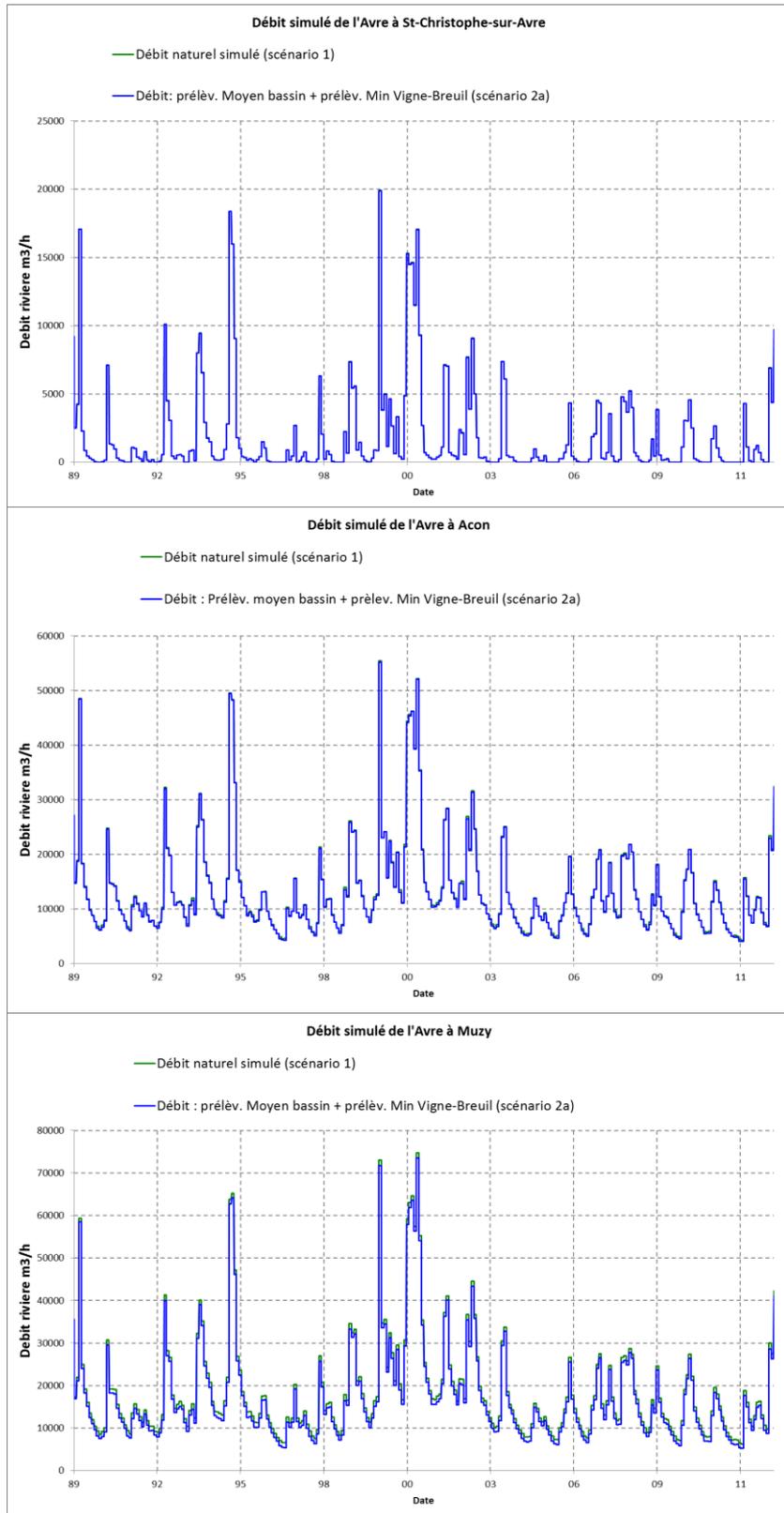


Illustration 92 : Comparaison des débits de l'Avre simulés dans le cadre des scénarii 1 et 2a aux trois stations de Saint-Christophe-sur-Avre, Acon et Muzy

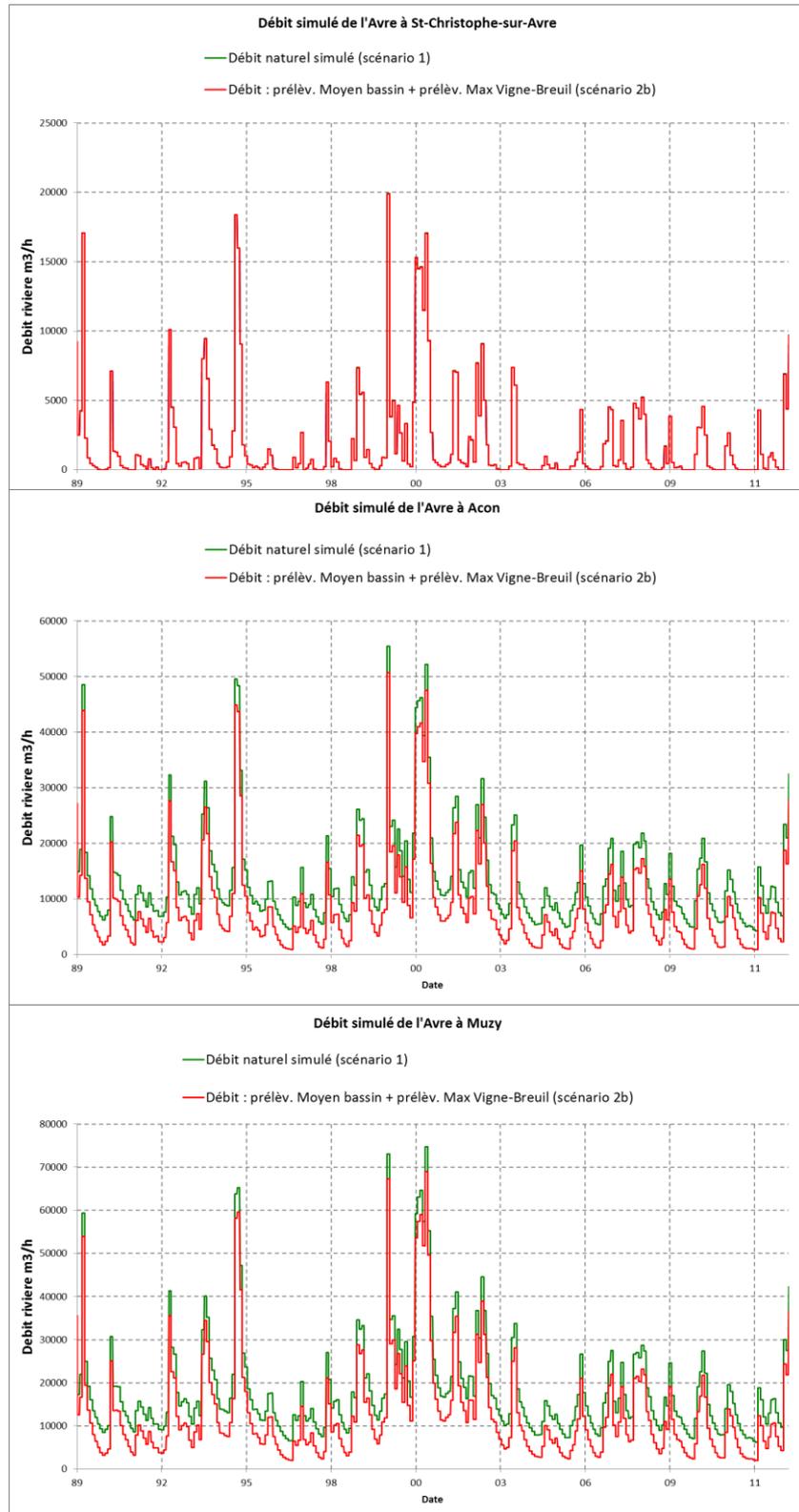


Illustration 93 : Comparaison des débits de l'Avre simulés dans le cadre des scénarii 1 et 2b aux trois stations de Saint-Christophe-sur-Avre, Acon et Muzy

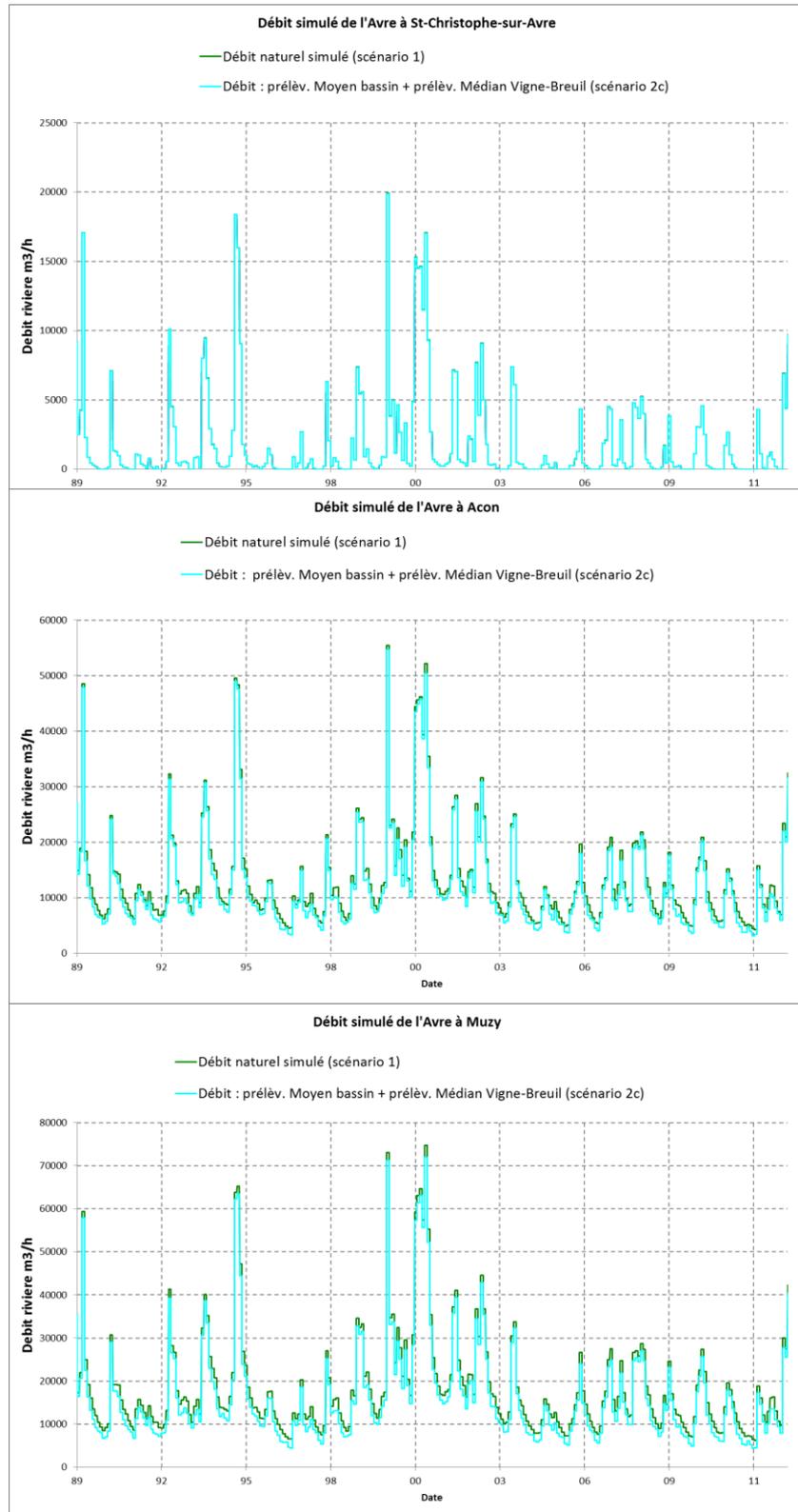


Illustration 94 : Comparaison des débits de l'Avre simulés dans le cadre des scénarii 1 et 2c aux trois stations de Saint-Christophe-sur-Avre, Acon et Muzy

5.3.4. Quantification de l'impact des 3 scénarii de prélèvements « actuels » sur le Qmna5 naturel

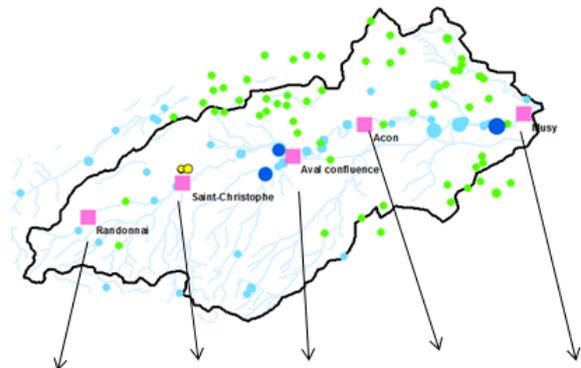
La quantification de l'impact des prélèvements sur le débit du cours d'eau est effectuée en calculant l'impact des différents scénarii de prélèvements sur le Qmna5 naturel simulé (scénario 1).

Ainsi pour chaque station hydrométrique et pour chaque scénario, le QMNA5 empirique a été calculé à partir des débit simulés et le ratio suivant a été calculé :

$$(QMNA5_{\text{naturel}} - QMNA5_{\text{avec prélèvement}}) / QMNA5_{\text{naturel}}$$

Les Qmna5 ont chaque fois, dans tous les scénarii, été calculés sur la période 1994-2012 selon la méthode empirique⁸ comme indiqué ci-dessus.

Les résultats sont synthétisés à l'illustration 95 :



	Randonnai	St Christophe	Aval confluence	Acon	Muzy
Influence prélèvements S c2a sur QMNA5 naturel	0.2%		5%	6%	16%
Influence prélèvements S c2b sur QMNA5 naturel	0.2%		92%	79%	67%
Influence prélèvements S c2c sur QMNA5 naturel	0.2%		27%	25%	30%
Influence prélèvements historiques sur QMNA5 naturel (=> prélèvements utilisés pour le processus de calage du modèle)	0.6%		36%	33%	36%

<u>Diminution du Qmna5 naturel simulé (m3/s)</u>	Randonnai	St Christophe	Aval confluence	Acon	Muzy
Influence pompage S c2a sur QMNA5 94-2012	0.00	-	0.07	0.08	0.33
Influence pompage S c2b sur QMNA5 94-2012	0.00	-	1.13	1.08	1.33
Influence pompage S c2c sur QMNA5 94-2012	0.00	-	0.33	0.34	0.59

Illustration 95 : Quantification de l'impact des différents scénarii de prélèvements « actuels » sur le Qmna5 naturel. Réduction du Qmna5 naturel simulé en % dans le tableau du haut et en débit (m3/s) dans le tableau du bas

⁸ Calculé à partir de la distribution empirique des débits mensuels minimaux de chaque année civile (QMNA5 correspond à la fréquence de 20%) ; par opposition à un calcul des Qmna5 par ajustement à une loi de Galton

Remarque : La chronique de débit simulé à Saint-Christophe comporte de nombreux assecs et conduit à un calcul de Q_{mna5} naturel nul. Ainsi le ratio n'a pas pu être calculé pour cette station. Ce ratio a en revanche été calculé en un point de mesure de jaugeages volants parfois réalisés sur la commune de Randonnai.

Ces résultats montrent que :

- Quel que soit le scénario de prélèvement envisagé, l'impact sur le débit naturel à l'étiage est faible à l'amont du bassin (le Q_{mna5} naturel est altéré de 0,2% (soit $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$) à Randonnai quel que soit le scénario envisagé 2a, 2b ou 2c) ;
- L'exploitation des sources de la Vigne et du Breuil au débit maximum autorisé (scénario 2b) provoque un impact très fort sur le débit naturel : le Q_{mna5} naturel est diminué de 79% ($1,08 \text{ m}^3/\text{s}$) et 67% ($1,33 \text{ m}^3/\text{s}$) respectivement aux stations d'Acon et Muzy ;
- Le scénario d'exploitation « médian » des sources de la Vigne et du Breuil (scénario 2c), provoque un impact significatif sur le débit naturel, mais qui reste inférieur ou égal à 30%: le Q_{mna5} naturel est diminué de 25% ($0,34 \text{ m}^3/\text{s}$) et 30% ($0,59 \text{ m}^3/\text{s}$) respectivement aux stations d'Acon et Muzy

Il convient de rappeler que ce calcul d'impact des prélèvements sur le Q_{mna5} naturel, n'a pas de signification biologique pour le milieu aquatique. Lorsque les débits de référence auront été définis, des simulations pourront être testées dans un objectif de calcul des volumes prélevables.

A titre d'information, les dixièmes du module de chaque station ont été calculés et sont comparés aux DMB et aux Q_{mna5} de chaque scénario en Annexe 8.

5.4. SCENARIO 3

Les objectifs du scénario 3 sont définis à l'illustration 86. Les hypothèses de travail pour ce scénario sont les mêmes que celles utilisées dans le scénario 2c, modifiées uniquement par le retrait de tous les prélèvements agricoles (qui s'effectuent essentiellement par pompage dans la nappe).

Ce scénario a donc pour objectif d'évaluer l'impact des prélèvements agricoles (ceux recensés dans la base de données de l'AESN) sur le débit de l'Avre, en comparant les résultats obtenus dans ce scénario (scénario 3) avec ceux obtenus précédemment dans les scénarii 1 et 2c).

Les résultats des débits simulés dans le scénario 3 sont présentés à l'illustration 96 pour les trois stations de l'Avre (Acon, Muzy et Saint-Christophe-sur-Avre). Ces débits simulés sont comparés aux débits naturels simulés (scénario 1) et aux débits simulés dans le scénario 2c.

L'observation visuelle de ces graphiques semble indiquer un impact faible des prélèvements agricoles quelque soit la station étudiée.

Il convient toutefois de noter que les données de prélèvements agricoles utilisées dans le modèle sont celles de la base de données de l'AESN, connues au pas temps annuel uniquement. Or pour les besoins du modèle, un coefficient de mensualisation a été appliqué pour répartir mensuellement ces volumes annuels en fonction des besoins de l'agriculture (cf. Illustration 34).

Ainsi, avec la répartition utilisée, presque la moitié du volume annuel est prélevée au mois de juin.

Un zoom des résultats a été réalisé dans les gammes de valeurs de débits d'étiage (Illustration 97). On remarque que les écarts entre les débits des scénarios 2c et 3 sont présents tous les mois de l'année et pas uniquement au mois de juin. Une analyse de l'impact des pompages agricoles par le calcul de l'impact de ces prélèvements sur le Qmna5 naturel peut donc s'avérer pertinent et instructif malgré la répartition temporelle inhomogène de ces prélèvements.

Le ratio suivant a été calculé :

$$(QMNA5_{\text{naturel}} - QMNA5_{\text{avec prélèvement}}) / QMNA5_{\text{naturel}}$$

Comme précédemment avec les Qmna5 empiriques calculés sur la période 1994-2012.

Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

	Randonnai	St Christophe	Aval confluence	Acon	Muzy
Influence prélèvements Sc3 sur QMNA5 naturel	0.2%		26.4%	24.6%	28.7%
Influence prélèvements Sc2c sur QMNA5 naturel	0.2%		26.6%	25.0%	29.5%

<u>Diminution du Qmna5 naturel simulé (m3/s)</u>	Randonnai	St Christophe	Aval confluence	Acon	Muzy
Influence pompage Sc2c sur QMNA5 94-2012	0.000	-	0.327	0.341	0.586
Influence pompage Sc3 sur QMNA5 94-2012	0.000	-	0.324	0.336	0.571

Ainsi, il apparait que l'impact des prélèvements agricoles reste très faible et ne représente que (1) moins d'un ½ point (soit 0.06 m³/s) des 25% (0.341 m³/s) de dégradation du Qmna5 naturel constatée à Acon dans le Scénario 2c, et (2) moins d'un point (0.015 m³/s) des 29.5% (0.556 m³/s) de dégradation du Qmna5 naturel constatée à Muzy dans le scénario 2c.

Ces résultats sont valables avec les hypothèses de prélèvements agricoles retenues.

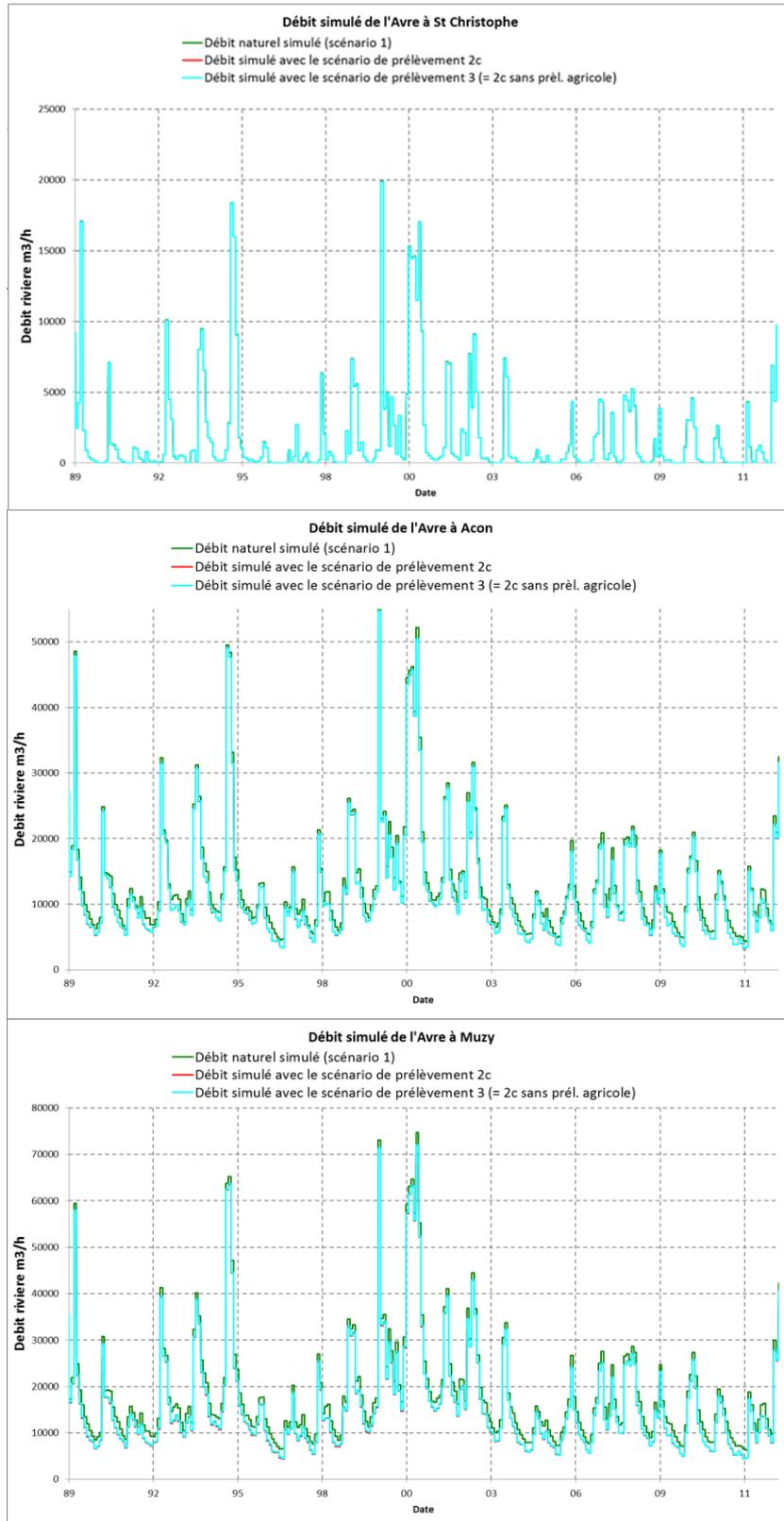


Illustration 96 : Comparaison des débits de l'Avre simulés dans le cadre des scénarii 1,2c et 3 aux trois stations de Saint-Christophe-sur-Avre, Acon et Muzy

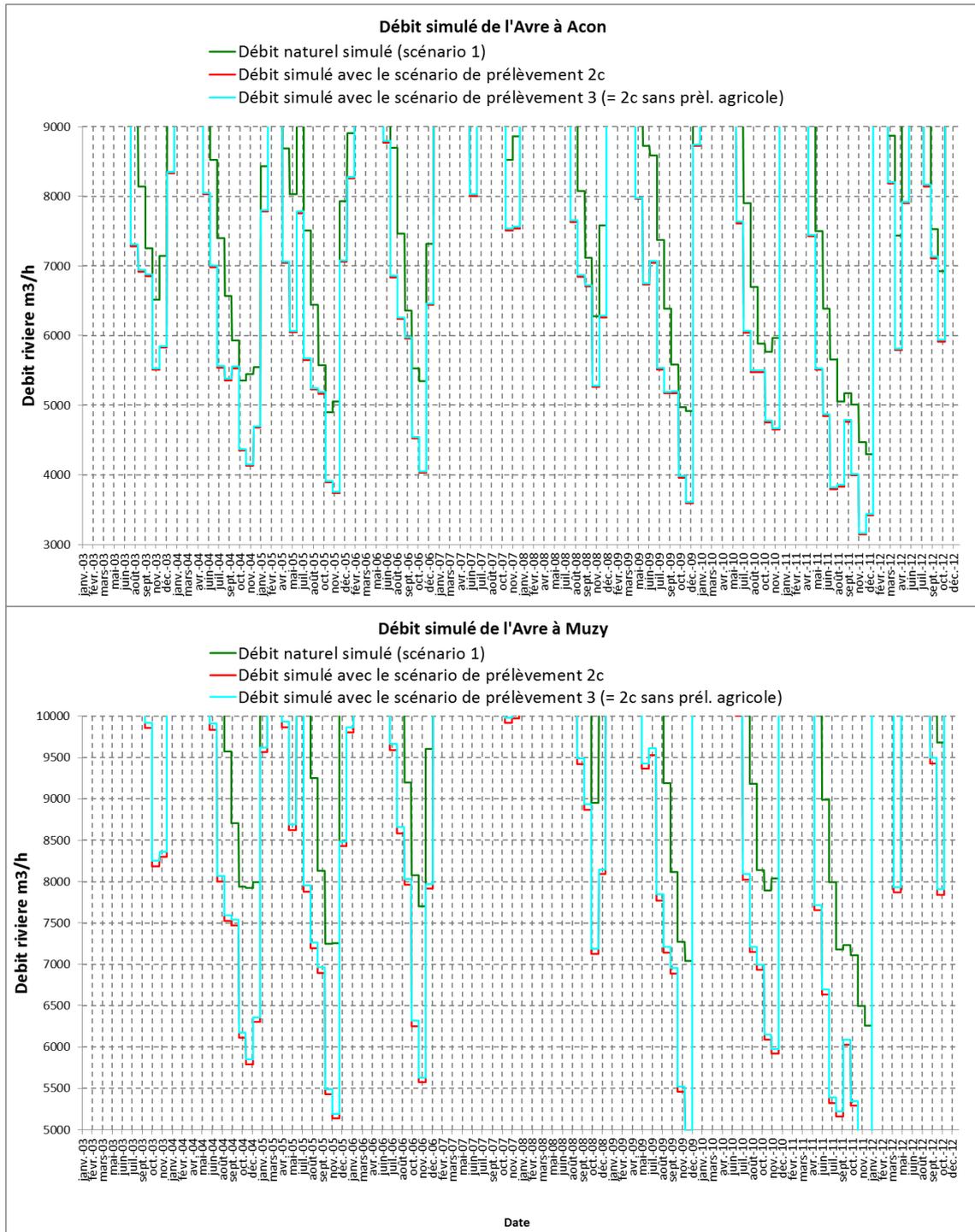


Illustration 97 : Comparaison des débits de l'Avre simulés dans le cadre des scénarii 1,2c et 3 aux trois stations de Saint-Christophe-sur- Avre, Acon et Muzy – zoom sur les gammes de débits d'été

5.5. SCENARIO 4

Il existe une incertitude forte concernant la connaissance des prélèvements agricoles. En effet la seule base de données existante concernant les volumes prélevés est celle de l'AESN (volumes annuels disponibles). Les données recueillies par ailleurs auprès des DDT ou des études d'environnement sont le plus souvent des données partielles, de débit horaire principalement (respectivement des débits autorisés et des débits d'équipement de pompes). La comparaison des données collectées auprès de l'AESN, de la DDT ou des forages agricoles déclarés (BSS) montre qu'aucune base de données n'est vraiment exhaustive.

Aussi, lors de la phase 1 de la présente étude (David, 2012 ; rapport BRGM/RP-60458-FR), une estimation d'une fourchette haute des prélèvements agricoles a été réalisée en estimant les besoins en irrigation par la méthode de l'Evapo-Transpiration Maximale (cf § 5.5.1 ci-dessous).

Les objectifs du scénario 4 sont définis à l'illustration 86. Les hypothèses de ce scénario sont celles du scénario 2c modifiées par la prise en compte de la fourchette haute des estimations des prélèvements agricoles.

Ce scénario a ainsi pour objectif d'évaluer l'incertitude concernant les impacts des prélèvements agricoles sur le débit de l'Avre.

5.5.1. Rappel de l'estimation de la fourchette haute des prélèvements pour l'irrigation (extrait du rapport RP-60458-FR)

Principe de la méthode

La méthode retenue consiste à estimer la dose d'irrigation nécessaire en fonction de la pluie et de l'Evapo-Transpiration Maximale (ETM⁹) de façon décadaire pour la période 2000-2010 (méthode utilisée par la Chambre d'Agriculture de l'Eure pour calculer la dose d'irrigation préconisée dans leurs bulletins envoyés aux agriculteurs).

Cette dose d'irrigation est ensuite appliquée à chaque parcelle (prise en compte de sa surface) ayant une culture nécessitant de l'irrigation et se situant à moins de 100 m d'un ouvrage d'irrigation recensé.

Données utilisées

- inventaire des points de prélèvement réalisé dans le cadre de l'étude de phase 1 ;
- données SIG du registre parcellaire graphique de 2009 (îlots PAC et groupe de cultures associées en 2009) ;
- données de pluie et d'ETP de la station de Rueil pour le calcul de l'ETM ;
- données des coefficients culturaux Kc pour le blé, l'orge, les pois et le Maïs (cf. valeurs en Annexe 5 du rapport RP-60458-FR) ;

⁹ L'ETM est l'évapotranspiration tenant compte de l'espèce considérée et de son stade végétatif. L'ETM corrige l'ETP à l'aide d'un coefficient Kc calculé expérimentalement pour chaque espèce en fonction de son stade végétatif.

Groupes de cultures présentes dans le bassin de l'Avre

Les différents groupes de cultures pratiquées dans la zone d'étude ainsi que leurs surfaces respectives sont présentées par les Illustration 98 et Illustration 99.

Cinq groupes de cultures comprenant le Blé tendre, le Colza, l'Orge, les prairies permanentes et le Maïs représentent en superficie 90% du total des cultures pratiquées dans la zone d'étude. Les cultures dominantes étant le blé tendre (37%), le colza (22%) et l'orge (18%).

Il est à noter que les prairies permanentes sont plutôt situées à l'amont du bassin, alors que les cultures de blé, d'orge et de colza plutôt dans les parties centrales et aval (Illustration 99).

Groupe de cultures	Surface (hectare)	% en surface
Blé tendre	29206,39	36,92%
Colza	17290,57	21,86%
Orge	14292,96	18,07%
prairies permanentes	7767,8	9,82%
Maïs grain et ensilage	2275,05	2,88%
gel (surfaces gelées sans production)	2030,34	2,57%
prairies temporaires	1784,5	2,26%
autres céréales	1046,36	1,32%
Protéagineux	728,14	0,92%
plantes à fibres	678,93	0,86%
gel industriel	536,92	0,68%
Divers	498,62	0,63%
Semences	411,17	0,52%
légumes-fleurs	207,71	0,26%
Fourrage	112,16	0,14%
autres gels	75,58	0,10%
autres cultures industrielles	72,53	0,09%
Vergers	63,13	0,08%
estives landes	19,74	0,02%
autres oléagineux	10,92	0,01%
Tournesol	0,63	0,00%
TOTAL	79110,15	100,00%

Illustration 98 : Groupes de cultures pratiquées dans la zone d'étude de la phase 1 de l'étude Avre ainsi que leurs surfaces respectives (données RPG 2009, ASP) (extrait du rapport BRGM/RP-60458-FR)

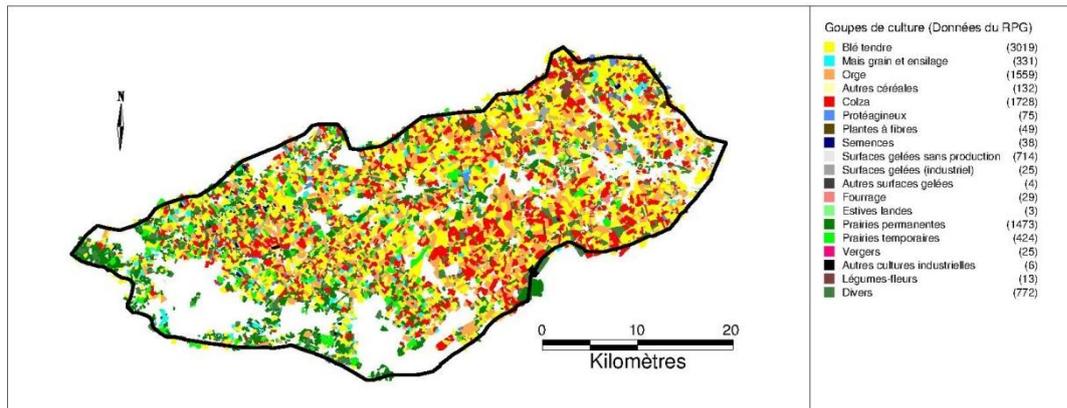


Illustration 99 : Cartographie des groupes de cultures pratiquées dans la zone d'étude (données RPG 2009, ASP) (extrait du rapport BRGM/RP-60458-FR)

D'après la chambre d'agriculture de l'Eure, les cultures pouvant nécessiter une irrigation sont le blé, l'orge, le pois et le maïs.

Calcul décadaire de la dose d'irrigation nécessaire par groupe de culture

Un bilan hydrique a ensuite été réalisé pour chaque groupe de culture (blé, orge, maïs et pois) en prenant en compte l'ETM (pluie et ETP de la station de Rueil, coefficients Kc de l'Annexe 4 du rapport RP-60458-FR, RU de 70 mm) afin de calculer la dose d'irrigation nécessaire pour assurer les besoins en eau des cultures.

Les doses ainsi calculées au pas décadaire pour la période 2000-2010 ont été sommées au pas de temps mensuel et sont présentées en Annexe 5 du rapport RP-60458-FR.

Calcul des volumes prélevés pour l'irrigation

Une sélection des îlots de blé, d'orge, de maïs et de pois situés à moins de 100 mètres des ouvrages d'irrigation a été réalisée par SIG (Illustration 100).

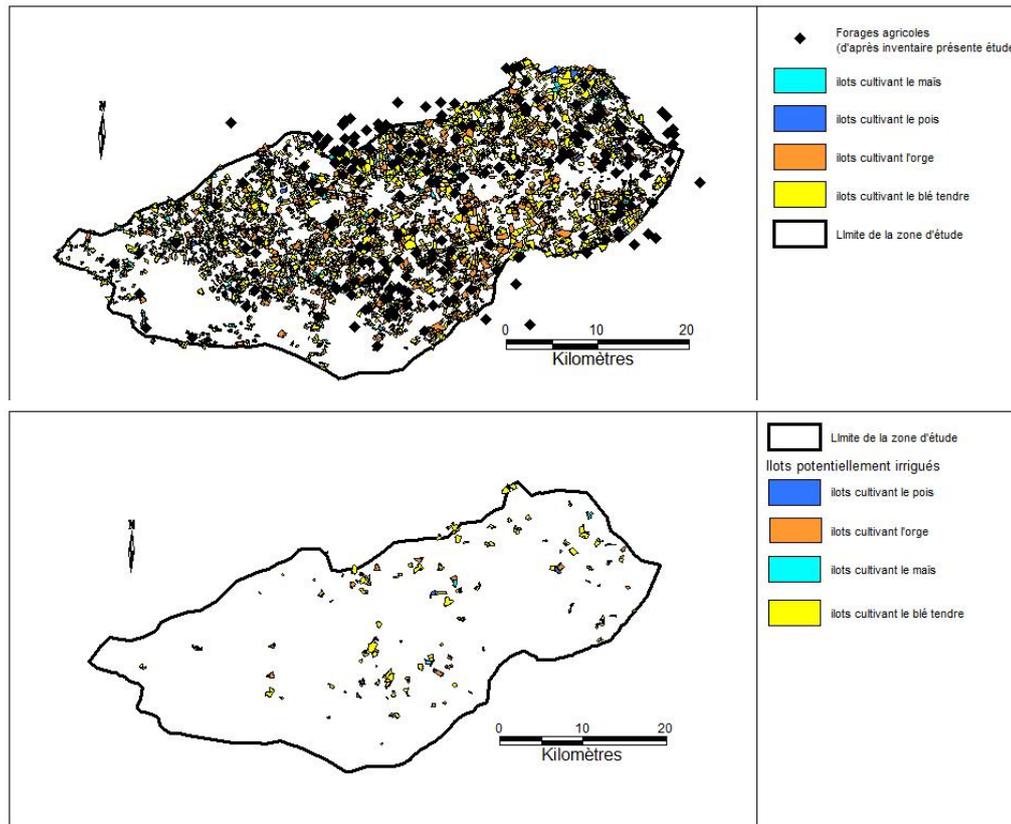


Illustration 100 : Extraction des parcelles potentiellement irriguées par recouplement SIG de la position des ouvrages de prélèvements agricoles (tampon de 100m autour de chaque ouvrage de prélèvement) et des ilots du RPG¹⁰ sur lesquels sont cultivées des cultures nécessitant de l'irrigation (blé, orge, pois et maïs) (extrait du rapport BRGM/RP-60458-FR)

Pour chacune de ces parcelles, les volumes prélevés pour l'irrigation ont été calculés mensuellement sur la période 2000-2010 (surface de la parcelle x dose).

Les volumes de chaque parcelle ont ensuite été rattachés au forage de prélèvement (1 forage pouvant servir à l'irrigation de plusieurs parcelles).

Le résultat est un fichier compilant les chroniques de prélèvements estimées au pas de temps mensuel pour 105 forages. Les sommes annuelles obtenues sont présentées dans l'illustration 101. L'estimation « haute » des prélèvements liés à l'irrigation varie ainsi autour d'une moyenne de 5 millions de m³/an environ.

¹⁰ Registre parcellaire Graphique : <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/registre-parcellaire-graphique-rpg-contours-des-ilots-culturaux-et-leur-groupe-de-cultures-majoritaire/>

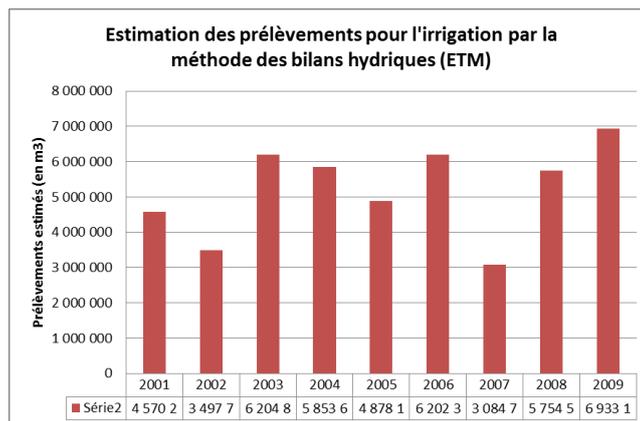


Illustration 101 : Estimation de la fourchette haute des prélèvements liés à l'irrigation (extrait du rapport BRGM/RP-60458-FR)

5.5.2. Utilisation de cette estimation dans le cadre du scénario 4

La fourchette haute des prélèvements agricoles a été estimée dans le rapport de phase 1 sur la période 2001-2010 (cf. § 5.5.1 précédant). Or le modèle simule la période 1990-2012. Les prélèvements n'étant ainsi pas calculés sur la période 1990-2000 et 2010-2012, une année médiane sur les 5 années 2006-2010 a été calculée. Ainsi, dans le scénario 4, cette année médiane (représentant un volume de prélèvement en nappe de 5,6 Mm³/an) a été répétée sur l'ensemble de la période 1990-2012. Les prélèvements de cette centaine de forages agricoles retenus pour le scénario 4, ont été affectés à chacune des 5 couches du modèle, en fonction de la profondeur de chaque forage.

Les prélèvements agricoles en nappe retenus pour le scénario 4 sont présentés à l'illustration 102 et comparés à ceux du scénario 2c.

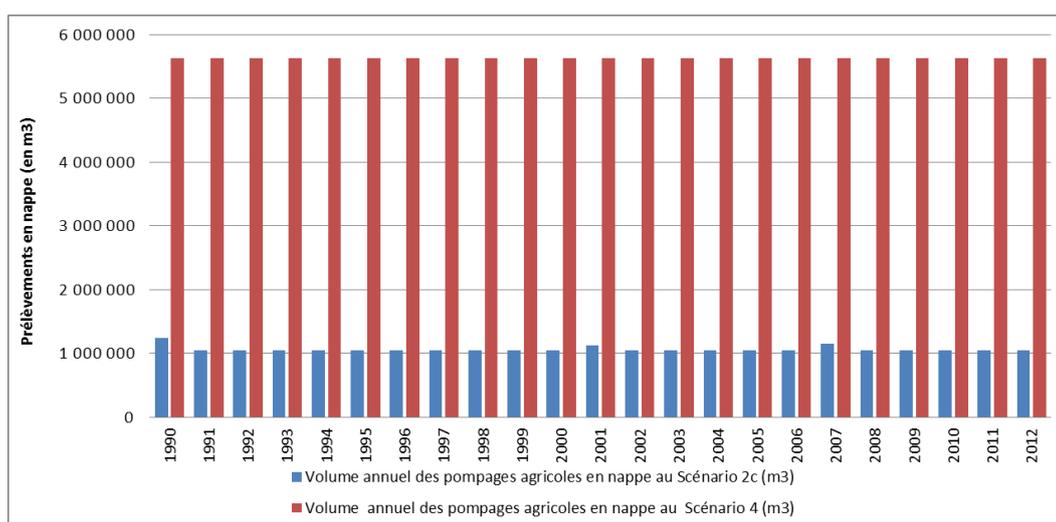


Illustration 102 : Comparaison des prélèvements agricoles en nappe pris en compte dans les scénarii 2c et 4

5.5.3. Résultats du scénario 4

Les résultats des débits simulés au scénario 4 sont présentés aux Illustration 103 et Illustration 104 pour les trois stations de l'Avre (Acon, Muzy et Saint-Christophe-sur-Avre). Ces débits simulés sont comparés aux débits naturels et aux débits simulés aux scénario 2c et scénario 3.

L'observation visuelle de ces graphiques semble indiquer un impact significatif sur les stations d'Acon et de Muzy.

Une analyse quantitative de l'impact des pompages agricoles du scénario 4 a été effectuée comme précédemment par le calcul du ratio suivant :

$$(QMNA5_{\text{naturel}} - QMNA5_{\text{avec prélèvement}})/QMNA5_{\text{naturel}}$$

en utilisant les Qmna5 empiriques calculés sur la période 1994-2012.

Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

	Randonnai	St Christophe	Aval confluence	Acon	Muzy
Influence pompage Sc3 sur QMNA5 naturel	0.2%		26.4%	24.6%	28.7%
Influence pompage Sc2c sur QMNA5 naturel	0.2%		26.6%	25.0%	29.5%
Influence pompage Sc4 sur QMNA5 naturel	0.3%		30.5%	29.6%	33.7%

<u>Diminution du Qmna5 naturel simulé (m3/s)</u>	Randonnai	St Christophe	Aval confluence	Acon	Muzy
Influence pompage Sc3 sur QMNA5 94-2012	0.00		0.32	0.34	0.57
Influence pompage Sc2c sur QMNA5 94-2012	0.00		0.33	0.34	0.59
Influence pompage Sc4 sur QMNA5 94-2012	0.00		0.38	0.40	0.67

Par rapport au scénario 2c, la prise en compte de la fourchette haute des estimations des prélèvements agricoles (scénario 4) dégrade le Qmna5 naturel de :

- 0.1 point (8.10^{-05} m3/s) supplémentaire à Randonnai,
- 4.6 points (0.06 m3/s) supplémentaires à Acon
- 4.2 points (0.08 m3/s) supplémentaires à Muzy

Ainsi, il apparait que l'incertitude de la connaissance des prélèvements agricoles peut avoir une incidence forte sur la gestion du milieu en période d'étiage. En effet, l'impact des prélèvements agricoles sur le débit du cours d'eau, dans le cas d'une prise en compte de la fourchette haute des prélèvements agricoles, est significatif (l'altération du Qmna5 naturel est augmentée de plus de 4 points supplémentaires aux stations d'Acon et de Muzy).

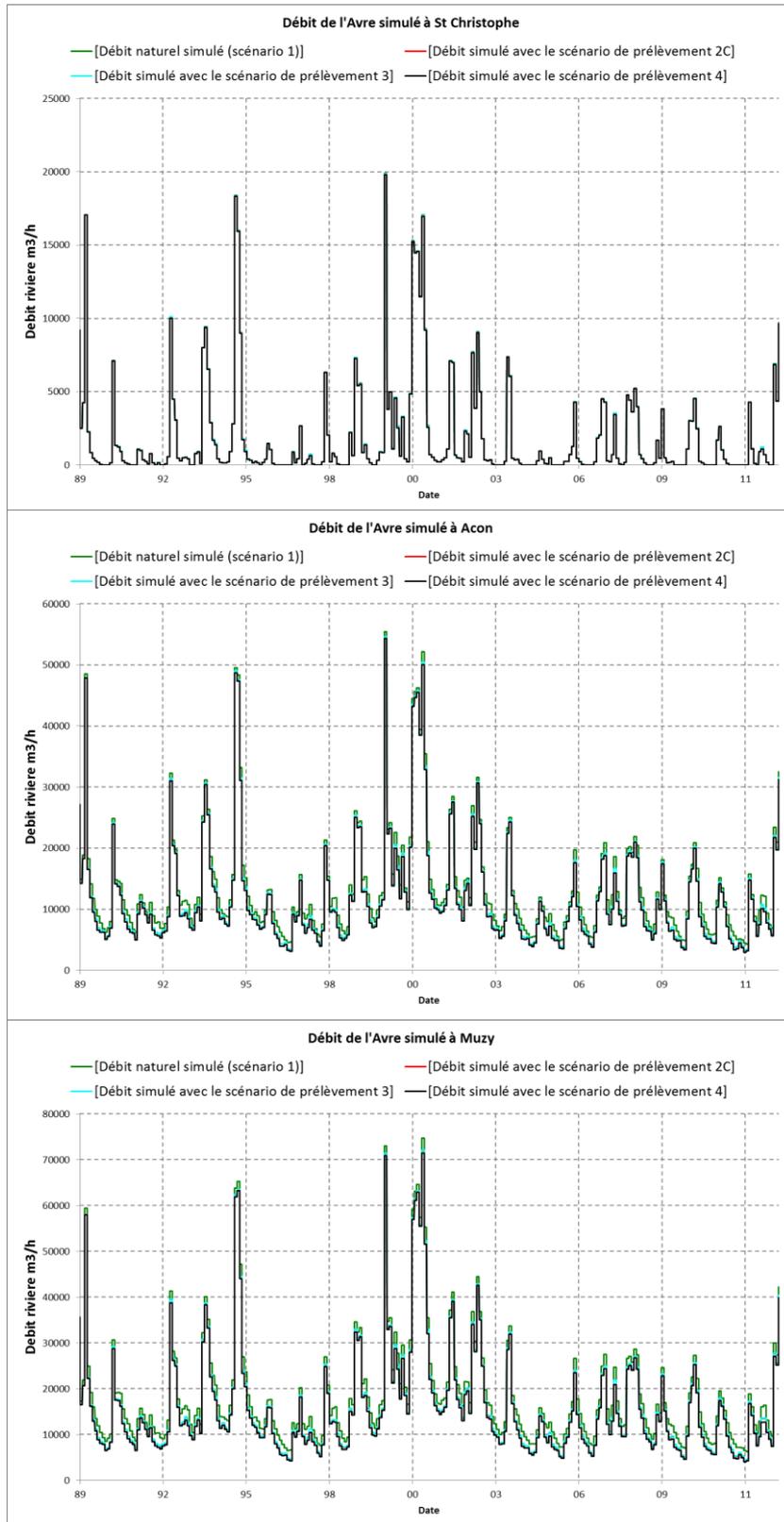


Illustration 103 : Comparaison des débits de l'Avre simulés dans le cadre des scénarii 1,2c,3 et 4 aux trois stations de Saint-Christophe-sur-Avre, Acon et Muzy

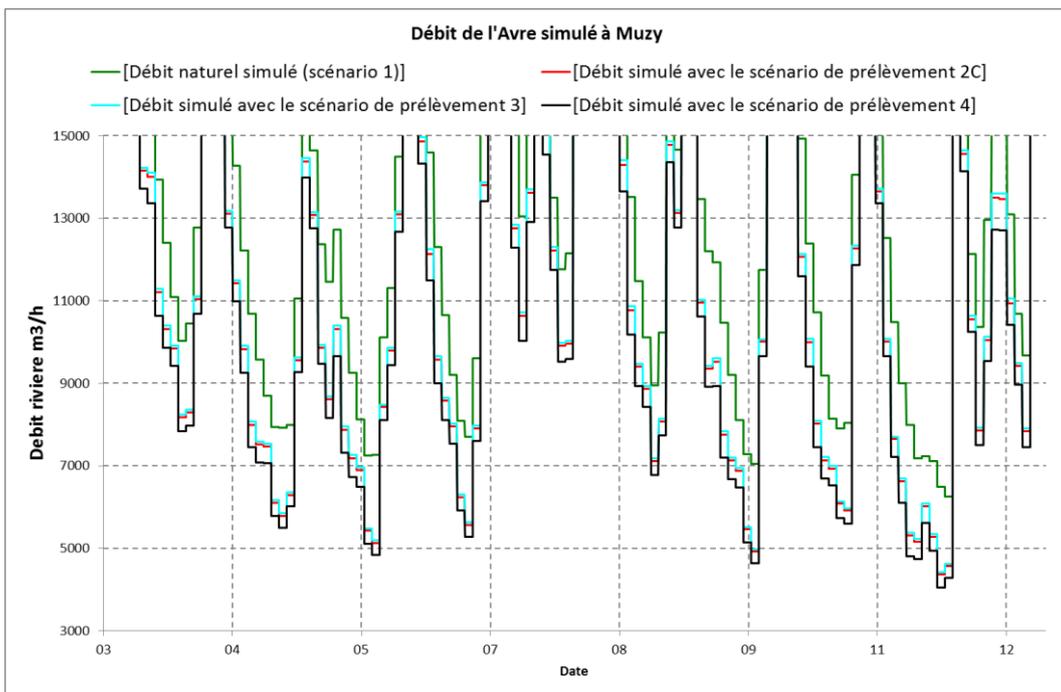
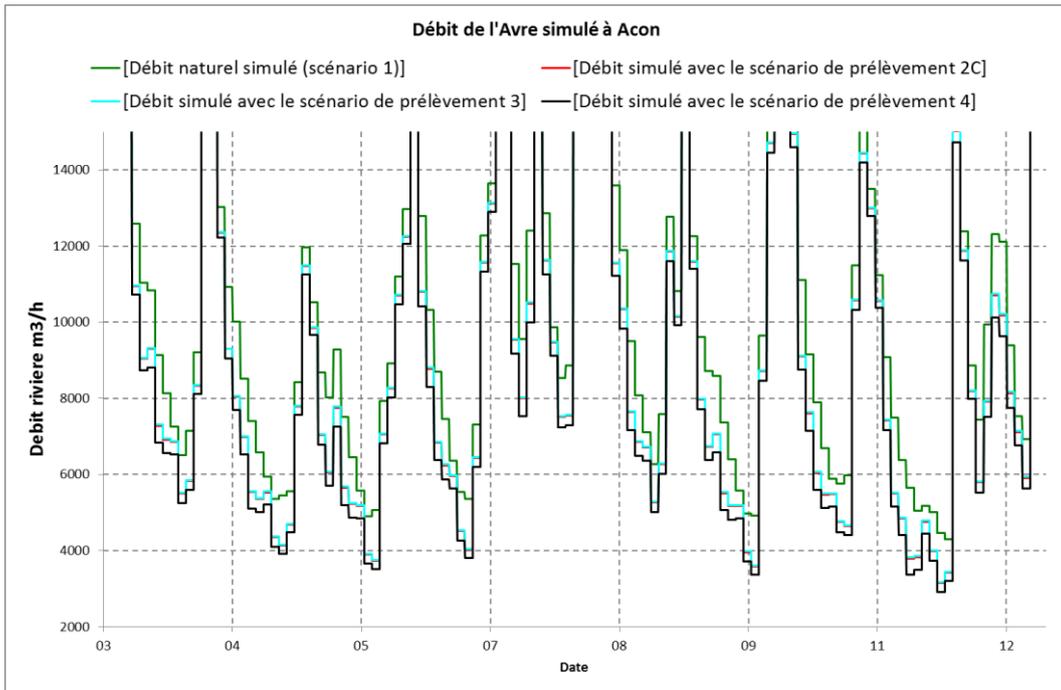


Illustration 104 : Comparaison des débits de l'Avre simulés dans le cadre des scénarii 1, 2c, 3 et 4 aux trois stations de Saint-Christophe-sur-Avre, Acon et Muzy – zoom sur les gammes de débits d'étiage

5.6. SCENARIO 5

La commune de Vernouillet, située dans la vallée de la Blaise, est équipée de 6 forages alimentant 12 communes. En cas de défaillance des forages de Vernouillet, l'Agglomération du Pays de Dreux dispose de 2 forages de secours situés sur le site des Prés Hauts, dans la vallée de l'Avre à Vert-en-Drouais.

Les captages des Prés Hauts sont équipés chacun d'une pompe de 250 m³/h et d'une pompe de 40 m³/h. La ressource mobilisable sur l'ensemble des 2 forages est de 500 m³/h pour un volume journalier maximum de 10 000 m³/j, sur la base d'un pompage de 20 h par jour (Setec, 2014). Les caractéristiques des forages sont les suivantes :

	F1	F2
Indice BSS	02163X0035	02163X0038
Altitude	88 m	87 m
Profondeur	30 m	31 m
Date de création	1990	1995

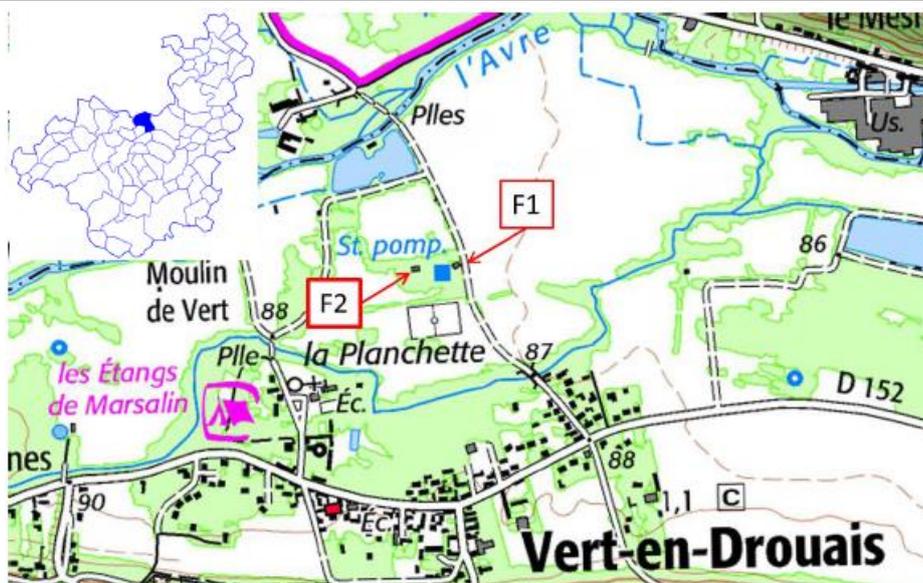


Illustration 105 : Caractéristiques des captage des Prés Hauts (Setec, 2014)

Ce champ captant est situé à 14 km en aval de la station de jaugeage d'Acon et à 4 km en amont de celle de Muzy (distances à vol d'oiseaux).

L'étude d'impact (Hydratec, 2014), prévoit 2 scénarii d'exploitation de ces forages :

Fonctionnement normal	170 m ³ /h pendant 1h (soit 8 m ³ /h en moyenne sur une journée) 40 m ³ /h pendant 1h (soit 2 m ³ /h en moyenne sur une journée) soit 10 m³/h au total en moyenne
Fonctionnement de secours	500 m³/h

Pour mémoire, les Illustration 106 et Illustration 107 présentent les prélèvements retenus pour ces deux forages respectivement pour le calage du modèle et pour le scénario 2c :

	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
02163X0035	14.4	14.4	17.2	15.3	22.1	20.4	17.7	15.9	7.7	9.7	7.9	5.6	6.9	6.3	6.9	6.5	3.8	3.7	0.0
02163X0038	0.0	0.0	11.2	12.1	10.8	17.4	13.3	2.4	10.0	9.3	8.9	7.7	7.1	6.2	7.4	5.8	7.4	5.3	0.0

Illustration 106 : Prélèvements (m³/h) utilisés pour le calage du modèle pour les forages 02163X0035 et 02163X0038

	Prélèvements (m ³ /h) utilisés pour le scénario 2c
02163X0035	4.2
02163X0038	5.2

Illustration 107 : Prélèvements (m³/h) utilisés au scénario 2c pour les forages 02163X0035 et 02163X0038

L'historique des prélèvements réalisés sur ces deux forages entre 1994 et 2011 représente un débit variant entre 9 et 37 m³/h.

Le débit « actuel » retenu pour le scénario 2c pour la somme de ces 2 forages est de 9,4 m³/h.

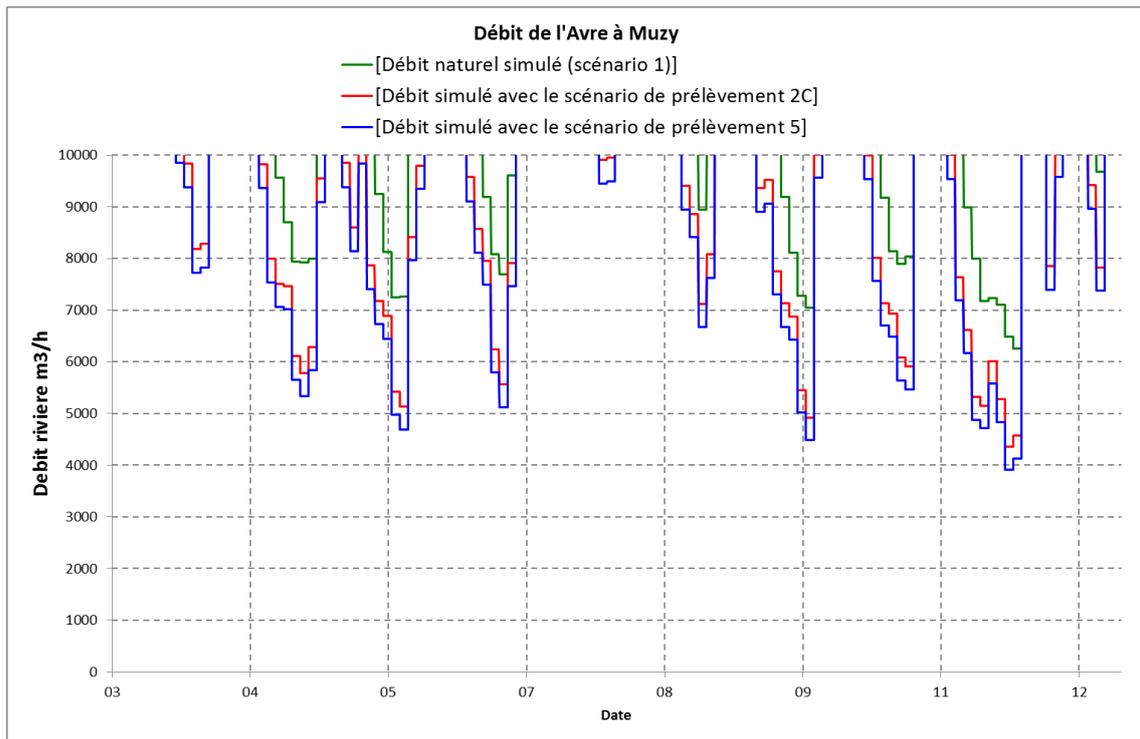
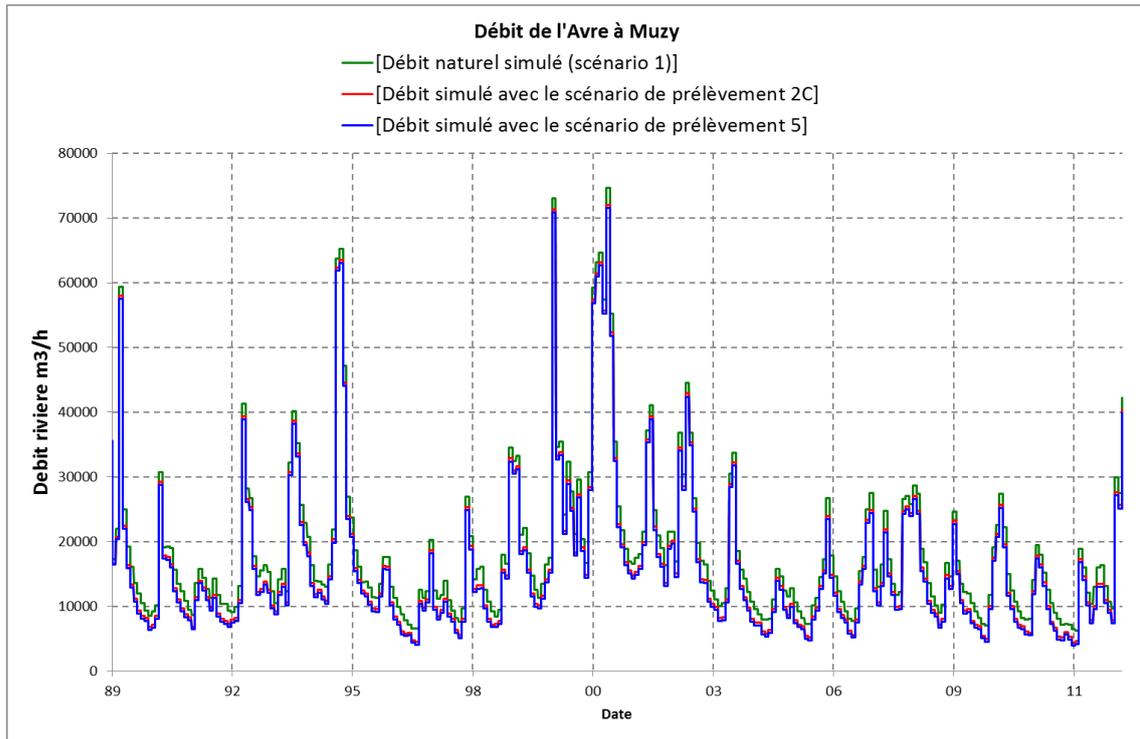
Le fonctionnement normal de ces deux forages a ainsi été pris en compte dans le scénario 2c. L'objectif du scénario 5 est donc d'évaluer l'impact sur les débits de l'Avre du « fonctionnement en mode secours » de ces deux forages (soit 500m³/h). Pour cela, le scénario 2c a été modifié au niveau du prélèvement effectué dans les deux forages des Haut-Prés, en prenant en compte cette fois un prélèvement de 250m³/h sur chacun, soit 500 m³/h sur les deux (au lieu de 9,4 m³/h) (Illustration 108).

	Prélèvements (m ³ /h) utilisés pour le scénario 5
02163X0035	250.0
02163X0038	250.0

Illustration 108 : Prélèvements (m³/h) utilisés pour au scénario 5 pour les forages 02163X0035 et 02163X0038

Les résultats des débits simulés dans le scénario 5 sont présentés à l'illustration 109 pour la station de Muzy. Ces débits simulés sont comparés aux débits naturels et aux débits simulés au scénario 2c. L'observation visuelle de ces graphiques semble indiquer un impact significatif sur le débit de l'Avre dû à l'augmentation des prélèvements sur ces deux forages.

Comme précédemment, pour quantifier cet impact, le ratio suivant a été calculé : $QMNA5_{naturel} - QMNA5_{avec\ prélèvement} / QMNA5_{naturel}$ avec un $Qmna5$ empirique calculé sur la période 1994-2012.



(zoom à l'été)

Illustration 109 : Comparaison des débits de l'Avre simulés dans le cadre des scénarii 1,2c et 5 à la station de Muzy

Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

	Randonnai	St Christophe	Aval confluence	Acon	Muzy
Influence pompage Sc2c sur QMNA5 naturel	0.2%		26.6%	25.0%	29.5%
Influence pompage Sc5 sur QMNA5 naturel	0.2%		26.6%	25.0%	35.7%

<u>Diminution du Qmna5 naturel simulé (m3/s)</u>	Randonnai	St Christophe	Aval confluence	Acon	Muzy
Influence pompage Sc2c sur QMNA5 naturel	0.00		0.33	0.34	0.59
Influence pompage Sc5 sur QMNA5 naturel	0.00		0.33	0.34	0.71

Par rapport au scénario 2c, la prise en compte d'un pompage de secours au lieu du pompage normal dans le champ captant des Hauts-Prés à Vert-en-Drouais (scénario 5) dégrade le Qmna5 naturel de plus de 6 points (0.13 m³/s) supplémentaires à la station de Muzy : en effet le Qmna5 naturel est dégradé de 29,5% (0.59 m³/s) dans le scénario 2c et de 35,7% (0.71 m³/s) dans le scénario 5.

Aucun impact supplémentaire n'est en revanche visible au niveau des stations situées à l'amont du projet de prélèvement (Acon, St Christophe, Randonnai).

6. Incertitudes et recommandations

6.1. INCERTITUDES

Les résultats du calage semblent satisfaisants dans l'ensemble au regard de données disponibles servant au contrôle de son étalonnage (ex : piézométrie, débits des rivières, sources, ...). En effet, les coefficients de nash obtenus pour les débits de l'Avre à St Christophe, Acon et Muzy sont respectivement de 0.60, 0.56 et 0.61, ce qui correspond à des coefficients d'ajustement R respectivement de 0.77, 0.75 et 0.78.

Les débits d'étiages semblent relativement bien reproduits à Acon et Muzy comme le montre les Illustration 71 et Illustration 73, ainsi que la comparaison des QMna5 mesurés et simulés dans le tableau ci-dessous :

	Acon	Muzy
QMNA5 des débits mesurés par la DREAL (ajustement loi de Galton sur 44 années)	0.95	1.32
QMNA5 des débits mesurés par la DREAL (QMNA5 empirique)	0.935	1.322
QMNA5 des débits simulés par le modèle (à l'issue du calage) (QMNA5 empirique)	0.918	1.27

Les écarts sur les QMNA5 empiriques mesurés et simulés sont de 1.76% pour Acon et 3.95% pour Muzy. C'est un peu moins le cas à Saint-Christophe, situé dans une partie plus complexe de l'hydro-système, où le modèle dans sa forme actuelle semble trop pessimiste (faute de données en suffisance pour pouvoir mieux le caler).

Les débits semblent pour le moment également moins bien reproduits en situation de crue. Ainsi la comparaison des modules calculés à partir des chroniques mesurées et simulées montre des écarts plus importants :

	St Christophe	Acon	Muzy
MODULE (débit mesuré par la DREAL)	0.332 (calcul sur 13 ans)	2.56 (calcul sur 46 ans)	3.48 (calcul sur 47 ans)
MODULE (débit simulé à l'issue du calage)	0.485 (calcul sur 23 ans)	3.16 (calcul sur 23 ans)	4.28 (calcul sur 23 ans)

La reproduction parfaite des débits et des niveaux piézométrique, même si elle est illusoire, est parfois assez loin d'être atteinte du fait du comportement hydrodynamique complexe (notamment karstique) dans certains secteurs et d'incertitudes liées à des lacunes de connaissances ou de données. On peut noter en particulier :

- La répartition spatiale des chroniques piézométriques disponibles pour le calage qui n'est pas homogène (peu de chroniques disponibles à l'aval du bassin et en vallée de l'Avre et plus de chroniques disponibles à l'amont) ;
- L'absence de données de calage des niveaux piézométriques dans le fond de la vallée de l'Avre à l'aval et au niveau de la zone de résurgences. Les niveaux simulés par le modèle autour du cours d'eau ne peuvent ainsi pas être contrôlés. Le suivi de quelques points bien placés sur ce tronçon permettrait de vérifier et d'affiner les échanges nappes/rivières ;
- Très peu de piézomètres suivis en continu disponibles pour le calage des niveaux à l'aval du bassin sur les plateaux ;
- L'absence de piézomètres suivis en continu pour le calage des niveaux à l'aval du bassin sur les versants ;
- L'absence, au moment de la réalisation du modèle, de suivis piézométriques en continu au droit des sources de la Vigne et du Breuil ;
- Le peu de connaissance des perméabilités et des coefficients d'emmagasinement dans le bassin (peu de données disponibles) ;
- Les nombreuses hypothèses non vérifiées qui ont dû être formulées au niveau :
 - de la position supposée des drains karstiques à l'amont des sources de la Vigne,
 - du fonctionnement du bras forcé de l'Iton (le débit du bras forcé de l'Iton n'étant pas suivi, il n'est pas possible à l'heure actuelle de contrôler le débit simulé par le modèle),
 - de la reconstitution des chroniques de rejets de Eau de Paris de 1990 à 2002,
 - de l'historique des rejets des STEP, non connus (débit de rejet constant pris en compte dans le modèle),
 - de la reconstitution des données de prélèvement pour beaucoup de prélèvements entre les années 1990 et 1994.
- L'absence de contrôle du débit des affluents de l'Avre ; les débits simulés sur les affluents de l'Avre ne sont actuellement pas contrôlés (et donc pas nécessairement calés) ;
- La connaissance limitée des prélèvements agricoles notamment.

S'ajoutent à cela les limites inhérentes à la modélisation : dans chaque maille sont intégrées des données moyennées à l'échelle de la maille : géométrie (topographie, profondeur des couches géologiques), caractéristiques hydrodynamiques (perméabilité et emmagasinement), etc. Les calculs (charge hydraulique) sont également réalisés à l'échelle de chaque maille. Le modèle régional ne peut donc pas prendre en compte toute la complexité naturelle et reste une simplification de la réalité. Des approximations doivent donc être réalisées. En fonction de l'échelle de travail, on ne pourra pas demander la même précision aux résultats, notamment sur le calage. L'écart relatif acceptable entre le calage et la réalité sera donc très différent d'un secteur à l'autre, en fonction de la complexité de l'hydro-système et de la discrétisation adoptée.

Ainsi pour toutes ces raisons, il est important de souligner que le modèle dans sa version actuelle est satisfaisant dans les secteurs qui disposent de suffisamment de données de calage (suivi piézométrique et débitmétrique en continu) au regard de la complexité et de l'hétérogénéité de l'hydro-système ; ailleurs les résultats simulés sont plus incertains (un paragraphe est rédigé ci-dessous pour expliciter les incertitudes liées aux débits simulés en dehors des 3 stations suivies et mesurées par la DREAL, cf. 6.1.1).

Toutefois il s'agit d'un premier niveau de calage élaboré sur la base des données disponibles. Ce modèle pourra bien évidemment être affiné dans le futur au gré des acquisitions nouvelles de données (piézométriques, débitmétriques, etc...) et des besoins rencontrés pour la gestion et la protection de la ressource. Des recommandations sont données à cet effet au § 6.2.

6.1.1. Contrôle des débits de l'Avre simulés en dehors des 3 stations de jaugeage de la DREAL

S'il est vrai que le débit à Acon et Muzy semblent relativement bien calés, des zones d'incertitudes demeurent concernant la répartition des gains de débits de l'Avre entre la zone de sources de Verneuil / Rueil la Gadelière et Acon.

Il n'existe en effet pas de chronique de débit à l'aval du ruisseau du Buternay avant sa confluence avec l'Avre, ni même de chronique de débit après la confluence de l'Avre et du Buternay (secteur de Courteilles). Ainsi, les résultats du modèle ne peuvent pas être contrôlés par des données mesurées précises.

En revanche, un des contrôles réalisés a consisté à vérifier que le débit simulé à Courteilles (lieu-dit Montuel) était supérieur au débit des sources de la Vigne et du Breuil restitué par Eau de Paris (cf. Illustration 110).

Sur l'illustration 110 ont été reportées deux mesures de jaugeage ponctuelles de l'Avre à Courteilles réalisées en septembre 2011 et 2012. Si ces mesures journalières ne sont pas directement comparables aux moyennes mensuelles, elles semblent toutefois montrer que le débit de l'Avre à Courteilles (lieu-dit Montuel) est bien supérieur au débit restitué par Eau de Paris, allant ainsi dans le sens des résultats du modèle. Elles semblent montrer par ailleurs que le débit simulé par le modèle serait surestimé (la courbe bleue passe au-dessus des 2 triangles verts sur l'illustration 110). Toutefois, en l'absence de suivi régulier du débit à Courteilles, les résultats du modèle sur ce tronçon ne peuvent pas être calés plus précisément pour le moment.

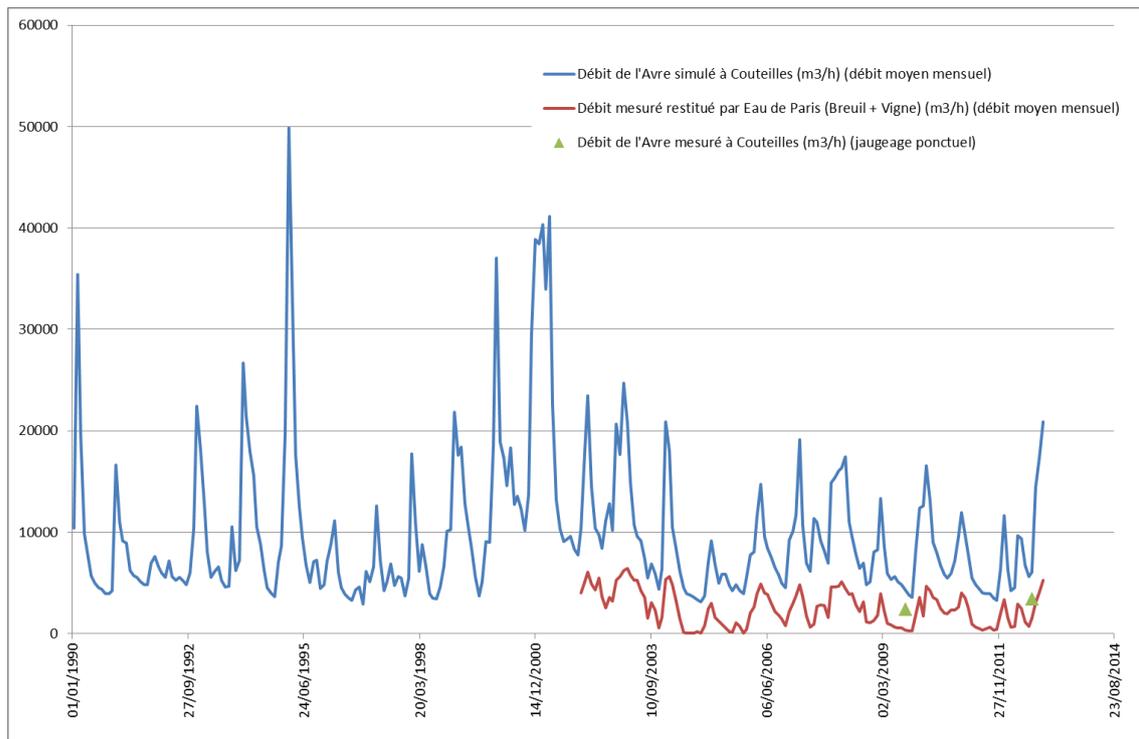


Illustration 110 : Comparaison entre les débits moyens mensuels restitués par Eau de Paris à l'Avre (part du débit non capté des sources du Breuil et de la Vigne), les débits moyens mensuels de l'Avre simulés à Courteilles et les débits mesurés sur cette même commune lors des deux jaugeages réalisés en septembre 2011 et 2012 par la DREAL Normandie

Une seconde vérification a consisté à comparer les débits simulés à Montigny-sur-Avre aux débits mesurés lors de jaugeages ponctuels (données de jaugeage transmises par la DREAL et l'AESN) au niveau de la D102. Montigny-sur-Avre se situe à 1,8 km à l'aval du lieu-dit Montuel à Courteilles et à 8 km à l'amont d'Acon. Le résultat de la comparaison est présenté à l'illustration 111. Les débits simulés semblent ici extrêmement bien reproduits par le modèle.

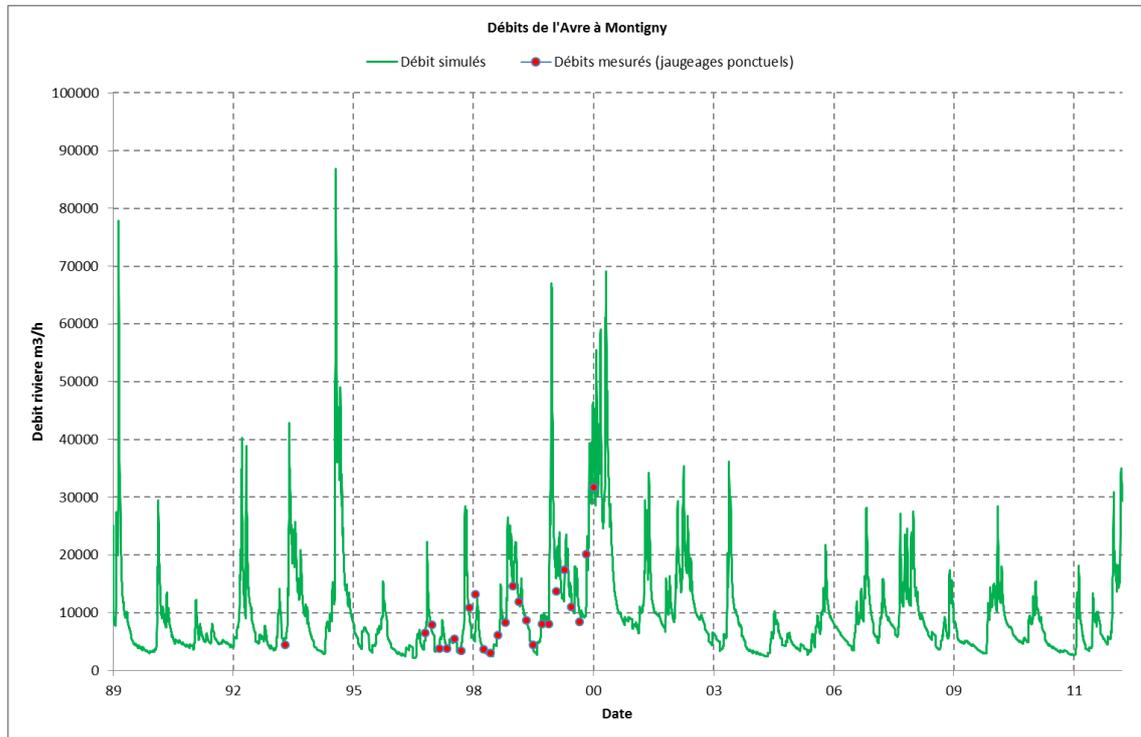


Illustration 111 : Comparaison entre les débits de l'Avre simulés à Montigny-sur-Avre et les débits ponctuels mesurés (jaugeages ponctuels de la DREAL et de l'AESN)

Dans l'état actuel de calage, 85% du débit de l'Avre à Acon serait déjà acquis à Courteilles (lieu-dit Montuel) après la confluence de l'Avre et du Buternay (cf. Illustration 112). Le débit simulé à Montigny-sur-Avre semble validé par les jaugeages ponctuels et est en moyenne équivalent au débit simulé à Courteilles (lieu-dit Montuel).

Cette hypothèse serait à vérifier par des jaugeages mensuels a minima :

- à l'aval du bras forcé de l'Iton,
- à l'aval de la source du Breuil,
- à l'aval du ruisseau du Buternay avant la confluence avec l'Avre,
- sur l'Avre à l'amont immédiat de la confluence avec le Buternay,
- sur l'Avre à Courteille.

Ces données acquises pourront être confrontées aux résultats des simulations du modèle. Si besoin, le calage du modèle pourra être affiné sur ce secteur de manière à représenter plus finement la réalité.

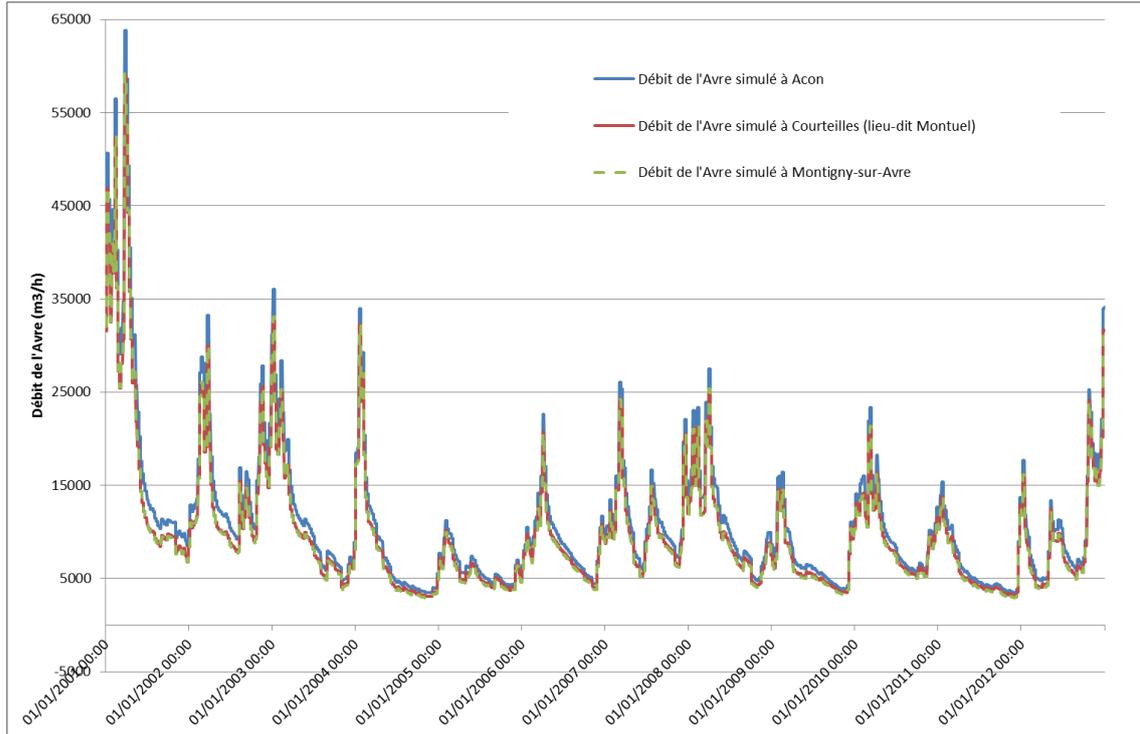


Illustration 112 : Comparaison entre les débits de l'Avre simulés à Courteilles (lieu-dit Montuel), Montigny-sur-Avre et à Acon

6.2. RECOMMANDATIONS

Afin d'affiner le calage du modèle à l'avenir et de lever certaines des incertitudes détaillées au §6.1, nous recommandons de mettre en œuvre les actions suivantes :

1. **La mise en place d'un réseau de suivi piézométrique au sein du bassin de l'Avre**, en complément du réseau patrimonial.
 La mise en place de ce réseau a été anticipée ; des échanges entre le SIVA et le BRGM ont eu lieu dès 2015 pour définir les puits/forages déjà existants dans le bassin versant pouvant potentiellement faire l'objet d'un suivi. Le SIVA s'est chargé d'effectuer les recherches de puits/forages existants et des demandes d'autorisation auprès des propriétaires. Une liste de 33 points (Illustration 113) a ainsi pu être établie. Le SIVA a démarré le suivi à l'automne 2015 qui est réalisé au pas de temps mensuel. Un retour sera réalisé sur la pertinence des chroniques acquises. Des points complémentaires seraient toutefois encore à rechercher dans le fond de la vallée de l'Avre.
2. **La mise en place de suivi piézométrique au sein des principaux champs captants du bassin de l'Avre :**
 Deux actions sont recommandées à ce titre :
 - Mise en place de suivis en continu des niveaux dans les secteurs des sources du Breuil et de la Vigne,

- Mise en place de suivis en continu dans des piézomètres situés dans les principaux champs captants du fond de la vallée de l'Avre (si possible, le plus éloigné possible des puits en pompage)
- 3. La mise en place d'un suivi débitmétrique et limnimétrique sur les principaux affluents**
- L'amélioration du calage des débits des affluents passera nécessairement par :
- La mise en place d'un suivi débitmétrique sur les principaux affluents,
 - Le nivellement des affluents et le suivi de leur ligne d'eau (Buternay, Lamblore, Meuvette, Ruet, Coudane...) pour améliorer dans le modèle la prise en compte de leur géométrie (cote du fil de l'eau, du fond de rivière, largeur des tronçons, etc..)
- 4. L'amélioration du calage des débits de dérivation du bras forcé de l'Iton par :**
- La mise en place d'une station de jaugeage sur le bras forcé de l'Iton qui permettrait de vérifier l'hypothèse faite au niveau des pourcentages de dérivations de l'Iton vers l'Avre,
 - Son nivellement comme pour les affluents pour améliorer dans le modèle la prise en compte de sa géométrie (cote du fil de l'eau, du fond de la rivière, largeur tronçon, etc.)
- 5. La réalisation de deux cartes piézométriques locales, synchrones avec une forte densité de points de mesure sur l'ensemble de la zone modélisée :**
- Cette action doit être menée au moins sur une situation de basses eaux et sur une situation de moyennes à hautes eaux sur l'ensemble de la zone modélisée. Ces mesures doivent porter à la fois sur les vallées, les coteaux et les plateaux de manière à pouvoir affiner sans ambiguïté les échanges nappes-rivières
- 6. La mise en place de suivis débitmétriques journaliers dans la vallée de l'Avre et de ses affluents :**
- Au niveau de tous les rejets des stations d'épuration,
 - Au niveau de tous les rejets industriels,
 - Au niveau de tous les rejets des producteurs d'eaux
- 7. L'amélioration de la connaissance des prélèvements par :**
- La déclaration de tous les prélèvements y compris agricoles,
 - La mise en place de compteurs sur tous les ouvrages de prélèvements y compris agricoles,
 - Le suivi a minima mensuel (idéalement journalier) des volumes prélevés quel que soit le type de prélèvement.
- 8. La réalisation de jaugeages différentiels réguliers (mensuels) le long de l'Avre entre les trois stations suivies en continu avec notamment une densité de points importante à l'aval des zones de résurgence de Verneuil/Rueil, en réalisant des points de jaugeage :**
- A l'aval du bras forcé de l'Iton,
 - A l'aval de la source du Breuil,
 - A l'aval du ruisseau du Buternay avant la confluence avec l'Avre,
 - Sur l'Avre à l'amont immédiat de la confluence avec le Buternay,
 - Sur l'Avre à Courteille

Ces jaugeages devront être réalisés a minima de manière synchrone avec la collecte de données pour établir les cartes piézométriques.

9. La réalisation de deux campagnes de mesures en basses et en moyennes à hautes eaux de la ligne d'eau de l'Avre, synchrones avec les mesures à réaliser pour les cartes piézométriques.

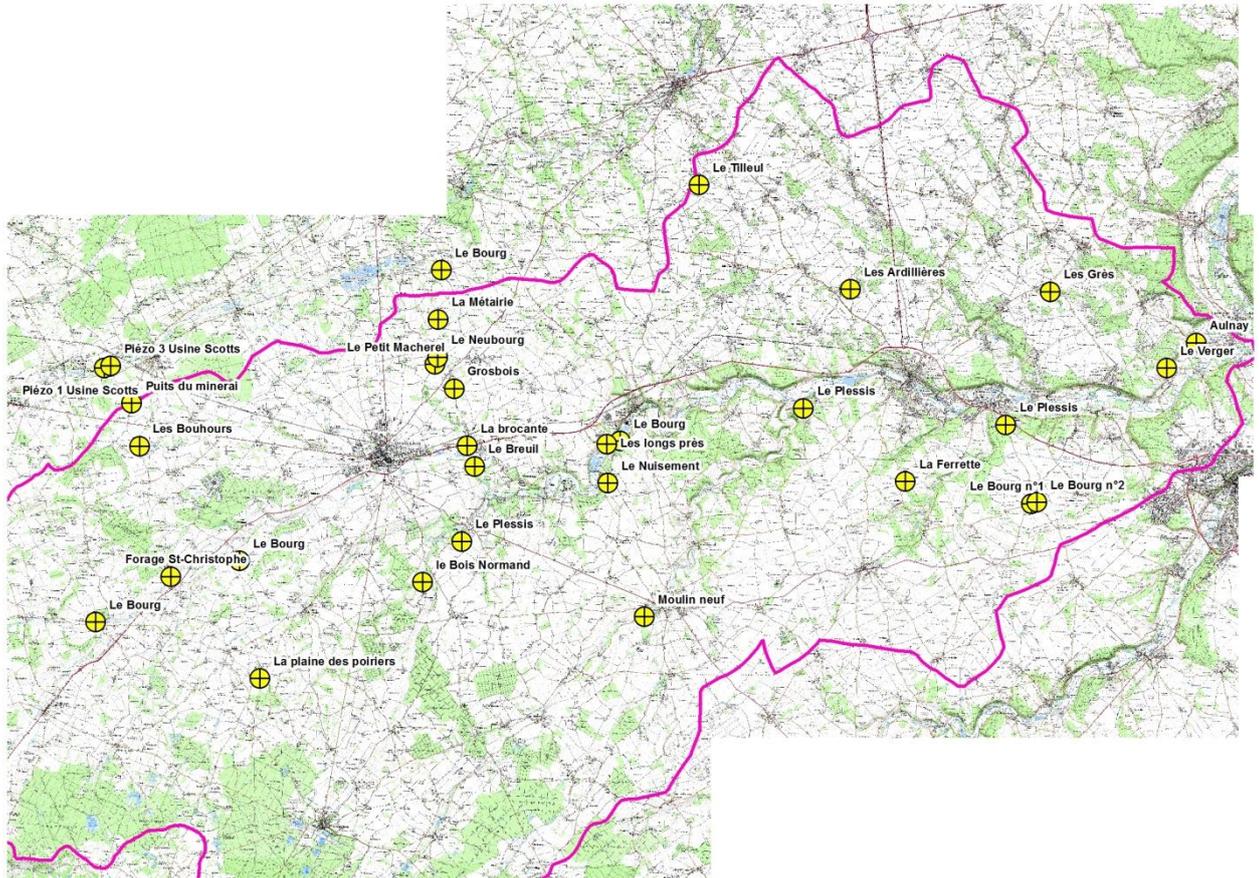


Illustration 113 : Réseau piézométrique complémentaire dont le suivi au pas de temps mensuel est réalisé par le SIVA depuis l'automne 2015 (source : SIVA)

7. Conclusions

Le présent rapport restitue le travail de construction, de calage et d'exploitation du modèle intégré nappes-rivières de l'Avre et les résultats obtenus. La géométrie du modèle de l'hydro-système est héritée de celle du modèle géologique élaboré durant la première phase de l'étude. Le modèle de l'hydro-système comporte cinq couches distinctes : les alluvions et formations à silex, les sables du Perche, la craie altérée, la craie du Sénonien et du Turonien supérieur et moyen et la craie du Turonien inférieur et Cénomaniens.

La recharge et le ruissellement ont été déterminés à partir de données spatialisées de pluie issues de la grille AURELHY de Météo-France et de quatre chroniques pluviométriques journalières. Les paramètres de recharge ont été évalués par le biais de modélisations hydrologiques globales réalisées avec le logiciel GARDENIA.

Le réseau hydrographique principal a été explicitement intégré dans le modèle d'écoulement. Les paramètres qui dimensionnent les échanges nappes/rivières ont été estimés sur la base d'avis d'expert, avant d'être ajustés pendant le calage du modèle.

Une première affectation des paramètres hydrodynamiques a été faite pour chaque couche du modèle à partir de données issues des pompages d'essai et des connaissances d'experts locaux.

Les caractéristiques des prélèvements en nappe et en rivière sont issues des données fournies par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie et Eau de Paris. Lorsque les données mensuelles n'étaient pas disponibles, les chroniques ont été reconstituées à partir des éléments disponibles.

Le calage du modèle, en régime permanent puis en régime transitoire sur plus de vingt ans (1990-2012) au pas de temps mensuel, s'est appuyé sur les cartes piézométriques régionales disponibles, ainsi que sur plus de 80 mesures piézométriques ponctuelles en octobre 2006, une trentaine de chroniques piézométriques et cinq chroniques de débit enregistrées aux stations hydrométriques implantées sur le réseau hydrographique. Le calage a principalement consisté à ajuster les paramètres hydrogéologiques (perméabilité et coefficients d'emmagasinement), les paramètres de recharge et du ruissellement, et les paramètres dimensionnant les échanges nappe-rivière.

Malgré la complexité du domaine modélisé et la présence de nombreux aquifères, localement karstiques, les résultats du calage en régime transitoire sont globalement satisfaisants à l'échelle du bassin de l'Avre. Les chroniques de débit simulées aux stations hydrométriques sont en bonne adéquation avec les mesures de terrain, ce qui valide le travail préalable réalisé pour l'estimation des pluies efficaces et de la recharge. Les niveaux piézométriques moyens, leurs fluctuations saisonnières et leurs évolutions pluriannuelles sont bien reproduits sur une majorité de piézomètres.

Une reproduction « parfaite » des débits et des niveaux piézométriques, même si elle est illusoire, est parfois assez loin d'être atteinte du fait du comportement hydrodynamique complexe (notamment karstique) dans certains secteurs et d'incertitudes liées à des lacunes de connaissances ou de données. Ces incertitudes ont été identifiées et listées au § 6.1. Le calage pourrait ainsi être encore amélioré dans certaines zones, sous réserve de disposer de davantage de données. Des recommandations ont été établies à cet effet au § 6.2.

Le modèle hydrogéologique ainsi construit apparaît toutefois pertinent pour répondre aux principaux objectifs de l'étude qui étaient de mettre en place un outil de gestion permettant d'aider

la structure en charge de gérer la ressource, d'établir des règles de gestion volumétrique sur le bassin de l'Avre, qui permettraient à la fois de satisfaire la demande en eau potable, de préserver les zones humides et de garder un débit réservé dans l'Avre, compatible avec les écosystèmes aquatiques en place.

Ainsi après cette première phase de calage et de validation, le modèle intégré nappes-rivières a commencé à ne plus être utilisé en tant qu'outil d'aide à la décision en fournissant des premiers éléments concernant les impacts des schémas de prélèvements. Le « débit de référence » des cours d'eau, qui constitue une des clefs d'entrée pour certaines simulations, n'a toutefois pas pu être déterminé pour cette étude (ce travail relevait d'un groupe de travail indépendant et aucun accord sur le sujet n'a pu être obtenu).

En attendant qu'il soit défini, le Comité de pilotage a retenu une approche différentielle pour quantifier les impacts des différents scénarios de prélèvements sur le débit de l'Avre. Cette approche a consisté à calculer le ratio entre le QMNA5 impacté (=QMNA5 déterminé sur la base d'une chronique simulée avec une hypothèse de prélèvement) et le QMNA5 naturel simulé (idem sans prélèvement) et à constater ensuite le pourcentage de dégradation du QMNA5 naturel. Il convient de rappeler que ce calcul d'impact des prélèvements sur le Qmna5 naturel, n'a pas de signification biologique pour le milieu aquatique. Lorsque les débits de référence ou débits dits « débits biologiques » auront été définis, des simulations pourront être relancées afin de déterminer des volumes prélevables (sous réserve avant de disposer de données complémentaires pour améliorer le calage du modèle –cf. §6).

7 scénarii ont été retenus par le COPIL et simulés :

- Scénario 1 : scénario de référence permettant de définir le débit naturel de l'Avre ;
- Scénarii 2a, 2b, 2c : permettant de déterminer l'impact des prélèvements « actuels » sur le débit de l'Avre ;
- Scénario 3 : permettant de déterminer l'impact des prélèvements agricoles sur le débit de l'Avre ;
- Scénario 4 : permettant de déterminer l'incidence de l'incertitude de la connaissance des prélèvements agricoles sur la gestion du milieu ;
- Scénario 5 : permettant de déterminer l'impact sur les débits de l'Avre du « fonctionnement en secours » (500m³/h) de deux forages de l'Agglomération du pays de Dreux.

Les résultats des simulations du scénarii 2a, 2b, 2c montrent que :

- quelque soit le scénario de prélèvement envisagé, l'impact sur le débit naturel à l'étiage est faible à l'amont du bassin ;
- l'exploitation des sources de la Vigne et du Breuil au débit maximum autorisé (scénario 2b) provoque un impact très fort sur le débit naturel : le Qmna5 naturel est diminué de 79% (soit 1.08 m³/s) et 67% (soit 1.33 m³/s) respectivement aux stations d'Acon et Muzy ;
- le scénario d'exploitation « médian » des sources de la Vigne et du Breuil (scénario 2c), provoque un impact significatif sur le débit naturel (hors prélèvements) de l'Avre, mais qui reste inférieur à 30% (moins de 30% de réduction du débit naturel de l'Avre) : le Qmna5 naturel est diminué de 25% (0.34 m³/s) et 30% (0.59 m³/s) respectivement aux stations d'Acon et Muzy.

Les résultats du scénario 3 indiquent que les prélèvements agricoles représentent ½ point (soit 0.06 m³/s) des 25% (0.341 m³/s) de dégradation du Qmna5 naturel constatée à Acon dans le Scénario 2c, et presque un point (0.015 m³/s) des 29.5% (0.556 m³/s) de dégradation du Qmna5 naturel constatée à Muzy dans le scénario 2c. Ainsi si les prélèvements agricoles connus dans

la base de données de l'AESN semblent avoir un impact limité sur le QMNA5 de la rivière, le scénario 4 a en revanche montré que l'incertitude de la connaissance des prélèvements agricoles peut avoir une incidence forte sur la gestion du milieu. En effet l'impact des prélèvements agricoles sur le débit du cours d'eau, dans le cas d'une prise en compte de la fourchette haute des prélèvements agricoles, est significatif : l'altération du Qmna5 naturel est augmentée de plus de 4 points supplémentaires aux stations d'Acon et de Muzy par rapport au scénario 2c (soit une diminution supplémentaire de 0.06 m³/s et 0.08 m³/s du débit naturel respectivement à ces deux stations).

Enfin le projet de pompage de secours par l'Agglomération du pays de Dreux dans le champ captant des Hauts-Prés à Vert-en-Drouais a été simulé dans le scénario 5. Par rapport au scénario 2c, la prise en compte de ces prélèvements de secours dégrade le Qmna5 naturel de plus de 6 points (0.13 m³/s) supplémentaires à la station de Muzy ; en effet le Qmna5 naturel est dégradé de 29,5% (0.59 m³/s) dans le scénario 2c et de 35,7% (0.71 m³/s) dans le scénario 5. Aucun impact supplémentaire n'est en revanche visible sur les stations amont (Acon, St Christophe, Randonnai).

Même si le modèle intégré nappes-rivières élaboré dans cette étude nécessite un affinage de son calage dans certains secteurs, il convient de souligner qu'il a permis d'approfondir beaucoup la connaissance des caractéristiques et du fonctionnement de l'hydro-système du bassin de l'Avre et, à ce niveau, de réaliser un grand pas en avant. Par ailleurs, même au stade de calage actuel, il a déjà permis de donner d'importants éléments de réponse qui pourront être utilisés dans le cadre d'une gestion durable de la ressource en eau, dans le bassin de l'Avre. Ce modèle pourra bien évidemment être affiné dans le futur au gré des acquisitions nouvelles de données (piézométriques, débitmétriques, etc...) et des besoins rencontrés pour la gestion et la protection de la ressource. Des recommandations sont données à cet effet au § 6.2.

En tout état de cause, il est peut-être utilisé pour beaucoup d'autres scénarii de gestion de la ressource, avec une précision dans les résultats qui dépendra de son degré de calage dans le ou les secteurs d'intérêt, moyennant sans doute, dans certains cas, un affinage préalable de son calage dans ce ou ces secteurs, voire d'adopter une approche relative ou différentielle.

8. Bibliographie

- Barthélemy Y., Seguin J.J. (2013). Modélisation maillée des écoulements souterrains – Principes, démarche et recommandations. Rapport BRGM/RP-62549-FR
- BURGEAP (1991). Etude hydrogéologique du système aquifère des sources de la Vigne et du Breuil.
- Castany G., Margat J. (1977). Dictionnaire français d'hydrogéologie – Editions du BRGM
- Croiset N., Wuilleumier A., Bessière H., Gresselin F. (2013). Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Phase 2 : Construction et calage du modèle hydrogéologique. Rapport BRGM/RP-62648-FR. 130 pages, 88 ill., 20 tab., 11 annexes.
- Dassibat C., Pascaud P., Roux JC (1980) – Hydrogéologie des calcaires jurassiques inférieur et moyen en Basse-Normandie. Bull. BRGM section III n°1, pp. 63-79.
- David P-Y. (2012) Elaboration d'un outil de gestion des prélèvements d'eau sur le bassin de l'Avre : phase 1 : Etat de la connaissance et phase 2 : Analyse des données – Rapport final. Rap. BRGM/RP-60458-FR, 204 p., 122 ill., 7 ann.
- David P-Y., Loiselet C., Lasseur E., Matthieu F., Pannet P., Servièrre M. (2015) - Modélisation hydrodynamique du bassin versant de l'Avre - Phase 3 : Acquisition de données complémentaires - Phase 4a : Construction du modèle géologique - Rapport BRGM/RP-64817-FR.
- Hydratec – Procédure de Déclaration d'Utilité Publique des captages des Prés Hauts à vert-en-Drouais –Agglo du Pays de Dreux. Rapport Hydratec n°01635408 v3 de novembre 2014
- Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (septembre 2004) - Guide d'application de l'arrêté interministériel du 11 septembre 2003 relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature eau.
- SETEC (2014) – Agglo du pays de Dreux - Procédure de déclaration d'utilité publique des captages des Prés Hauts à Vert-en-Drouais – Etude d'impact. Rapport n°01635408 v3 de novembre 2014
- Thiéry D. (2004). Logiciel MARTHE 6.4 : Couplage nappe – rivières et nappes – drains ; bilans hydroclimatiques, Note technique NT EAU 2004/19.
- Thiéry D. (1990). Logiciel MARTHE, Modélisation d'Aquifères par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements. Notice BRGM R-32210.
- Vernoux JF., Buscarlet E., Gourcy L., Wuilleumier A., (2010). Champs captant de Montreuil-sur-Eure et Vert-en-Drouais (28) : délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables. Rapport final BRGM/RP-58587-FR, 139 pages, 81 figures, 10 tableaux, 2 annexes.
- Wuilleumier A., Croiset N., Seguin J-J. (2014) – Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Phase 3 : Utilisation du modèle hydrogéologique pour la mise à jour de la ZRE et le calcul des volumes prélevables. Rapport BRGM/RP-62863-FR

Annexe 1

Présentation du logiciel MARTHE (Modélisation d'Aquifères avec maillage Rectangulaire, Transport et Hydrodynamique)

DOMAINE D'APPLICATION

Conçue et réalisée au groupe BRGM pour la modélisation hydrodynamique et hydrodispersive des écoulements souterrains en milieu poreux, la chaîne de logiciels MARTHE est destinée à modéliser les problèmes d'écoulement rencontrés dans des contextes variés :

- Gestion des ressources aquifères :
 - Évaluation des termes du bilan hydraulique d'un système aquifère : recharge par infiltration pluviale, apports latéraux par les bassins versants, circulations souterraines et flux associés, fluctuations annuelles, stockages-déstockages saisonniers ...
 - Impacts hydrodynamiques d'aménagements existants ou à créer : pompages, irrigation, drainage, gravières, bassins d'infiltration ...
 - Gestion et optimisation de champs captants.
- Génie civil :
 - Assèchement de fouilles.
 - Effets hydrauliques de parois étanches.
 - Travaux souterrains (métros, parking, tunnels, ...).
- Environnement :
 - Infiltration d'un polluant en zone non saturée, percolation jusqu'à la nappe, puis migration souterraine.
 - Simulation du panache de pollution s'échappant d'une zone contaminée : trajectoires, vitesses de déplacement, concentrations atteintes à l'aval. Modélisation de scénarios hydrauliques de confinement ou de décontamination.
 - Impacts de décharges domestiques et industrielles sur les eaux souterraines.
 - Etude du confinement de stockages souterrains.
- Exploitation minière :
 - Calcul de débits d'exhaures miniers et des rabattements associés.

REFERENCES

Au cours des 20 dernières années, MARTHE a été utilisé pour modéliser plus de 250 contextes aquifères répartis dans une vingtaine de pays, sur des financements français, nationaux et internationaux.

STRUCTURE DU LOGICIEL

Au module de calcul hydrodynamique et hydrodispersif (MARTHE proprement dit), sont associés des modules de préparation, gestion et représentation graphique des données et des résultats de modélisation ces modules sont centralisés dans l'interface WinMarthe.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Le domaine à modéliser est discrétisé selon un maillage rectangulaire de type "écossais" : chaque ligne et chaque colonne de mailles a une largeur constante, mais l'utilisateur est libre d'adapter la largeur de chacune de ces lignes et colonnes en fonction des hétérogénéités locales, de la densité des informations disponibles, et de la précision recherchée. Il est en outre possible d'affiner localement le maillage par des sous-maillages emboîtés (gigognes).

Les mailles du modèle sont automatiquement associées à des coordonnées géographiques (norme « Semis » élaborée au BRGM), ce qui permet de superposer les données initiales et les résultats des simulations à des fonds cartographiques préalablement digitalisés. Les données peuvent être définies maille par maille, ou bien par zones, par couches ou globalement pour tout le maillage. Toutes les données sont stockées dans des fichiers texte.

Les résultats de modélisation sont édités dans des fichiers texte. Ils peuvent être édités et représentés graphiquement. Les débits calculés (débits aux potentiels imposés, débits résiduels de convergence) peuvent être présentés maille par maille, ou bien par zones, par couches, ou encore pour tout le modèle.

La convergence des calculs est contrôlée par plusieurs critères : écarts de charge (moyen et maximal entre deux itérations successives) et débits résiduels d'erreur (global sur l'ensemble du modèle, et ponctuel dans chacune des mailles).

Calcul des écoulements

Les calculs hydrodynamiques sont effectués selon une méthode aux volumes finis. Plusieurs algorithmes de résolution par gradients conjugués sont proposés (gradients conjugués avec pré-conditionnement de Choleski, méthode Eisenstat).

Calcul du transport

Selon le type de problème posé (dominance de la convection ou de la dispersion), l'utilisateur peut choisir entre trois techniques de calcul pour optimiser le schéma de transport mis en œuvre :

- méthode TVD (Total Variation Diminishing) à limiteur de flux ;
- volumes finis ;
- méthode des caractéristiques (MOC) utilisant des particules ;
- méthode des déplacements aléatoires (Random Walk), dite aussi méthode des particules ;

Le transport en nappe est simulé sous ses composantes advective, diffusive et dispersive. Plusieurs options sont proposées pour le transport réactif :

- décroissance exponentielle de l'effluent en fonction du temps ;
- dégradation en chaîne ;
- facteur de retard avec coefficient de partage K_d (phénomènes d'adsorption-désorption) ;
- prise en compte de la double porosité (avec cinétique ou en équilibre) ;
- isothermes de Freundlich ou de Langmuir

Interactions géochimiques

Les interactions physico-chimiques entre eau, effluents et matrice peuvent être simulées par couplage entre MARTHE et un modèle chimique "dédié" au contexte géochimique d'écoulement.

MARTHE permet de simuler de nombreux types d'écoulement, en zones saturées et non saturées, en milieux monophasiques et diphasiques. Plusieurs niveaux d'utilisation sont distingués :

- Hydrodynamique classique :
 - Maillages 2D (en plan, en coupe verticale, en coordonnées cylindriques) ou 3D.
 - Aquifères monocouches ou multicouches (empilement d'aquifères séparés par des épontes semi-perméables).
 - Nappes libres, captives ou semi-captives en régime hydraulique permanent ou transitoire.
 - Prise en compte de discontinuités telles que plans d'eau à surface libre (lacs, gravières), assèchements locaux de nappe (et remise en eau), y compris en aquifères multicouches, débordements de nappe (cours d'eau, sources, drains), parois étanches (palplanches, ...).
 - Couplage avec un réseau hydrographique.
 - Bilan hydroclimatique couplé.
 - Anisotropies horizontale et verticale des perméabilités.
 - Calcul de trajectoires (directes et inverses) en régime hydraulique permanent ou transitoire.
- Transport hydrodispersif :
 - Migration hydro-dispersive d'un effluent dans la nappe et la zone non saturée.
- Zone Non Saturée, Densité, Température :
 - Traitement continu de la zone saturée et de la zone non saturée.
 - Effets densitaires induits par des salinités et/ou des températures hétérogènes.
 - Transferts d'énergie ;
 - Prise en compte des variations de viscosité avec la température.
- Calage automatique, Optimisation :
 - Calage automatique du modèle, selon des zones homogènes ou maille par maille.
 - Analyse de sensibilité aux paramètres de calage.
- Utilisations spéciales :
 - Fractures verticales par transmissivités équivalentes ; Réseaux de galeries.
 - Transport avec interactions physico-chimiques entre eau, effluents et matrice poreuse.
 - Écoulements diphasiques : eau douce et eau salée, eau et air, eau et "huile".
 - Écoulements de gaz.
 - Prise en compte du développement de la végétation.

Annexe 2

Principes et résultats de calage des modèles GARDENIA

1. Fonctionnement du logiciel GARDÉNIA
2. Limites et incertitudes des modélisations GARDENIA
3. Comparaison des paramètres de calage obtenus pour les différentes simulations, et observations pour chaque bassin versant

Le tableau résume les principaux paramètres qui pourront être utilisés lors du calage du modèle hydrodynamique.

Avec : Coef pluie : coefficient de correction de la pluie, Coef etp : coefficient de correction de l'ETP, RuMax Prog : réserve utile progressive et RuiPerc : hauteur dans la ZNS pour laquelle il y a égale répartition entre écoulement rapide et percolation

La colonne « pompage » renseigne si les pompages ont été pris en compte et le cas échéant s'ils influencent plutôt les débits ou les piézomètres. L'indice 2 qui figure entre parenthèse au niveau des débits indique que les débits pompés sont directement retranchés au débit du cours d'eau.

1. Fonctionnement du logiciel GARDÉNIA

GARDÉNIA (modèle Global À Réservoirs pour la simulation des DÉbits et des Niveaux Aquifères) est un modèle hydrologique global de bassins versants (Thiéry D., 2003). Il en réalise le bilan hydrologique à partir de chroniques de pluie et d'évapotranspiration potentielle (ETP), représentatives à l'échelle du bassin. Une fois calé sur les observations disponibles, le modèle permet de simuler l'évolution du débit à l'exutoire et/ou du niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente pour différentes chroniques de pluie et ETP.

Comme explicité sur l'illustration suivante, GARDÉNIA simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, ruissellement) par une succession de trois¹¹ réservoirs en cascade qui représentent respectivement :

- les premières dizaines de centimètres du sol (zone racinaire) dans lesquelles se produit l'évapotranspiration ;
- une zone intermédiaire qui répartit en deux composantes la pluie efficace provenant du réservoir sus-jacent : ruissellement et infiltration de l'eau dans la ZNS ;
- une ou deux zones aquifères qui correspondent aux écoulements lents.

Le modèle réalise un bilan entre les apports (précipitations) et les sorties (évapotranspiration ou écoulements) à chaque pas de temps.

Des prélèvements, injections, pertes ou apports de débits peuvent être introduits comme données d'entrée, sous forme de chroniques similaires à celles de la pluie et de l'ETP.

Les transferts d'un réservoir à l'autre sont régis par des lois simples, spécifiques à chaque réservoir (le tarissement des rivières et la baisse des niveaux de nappe sont rendus par des lois exponentielles décroissantes). Ces lois sont contrôlées par des paramètres (capacité de stockage du sol, temps de transfert, seuils de débordement, etc.) qui sont ajustés au cours d'une phase de calage semi-automatique (algorithme de Rosenbrook, 1960) afin d'assurer une bonne adéquation entre débits et/ou niveaux simulés et mesurés.

Les données nécessaires sont :

- des séries temporelles de données « d'entrée » du modèle : pluie et évapotranspiration ;
- une ou deux série(s) temporelle(s) de données d'observation - chroniques piézométriques et/ou chroniques de débit - non nécessairement continues, mais couvrant une période concomitante aux données d'entrée. La comparaison des « sorties » simulées par le modèle et des séries observées sur le terrain permet d'orienter et d'ajuster la phase de calage

¹¹ Un quatrième réservoir souterrain peut être utilisé lorsque deux dynamiques distinctes d'écoulement des eaux souterraines coexistent dans le bassin versant étudié.

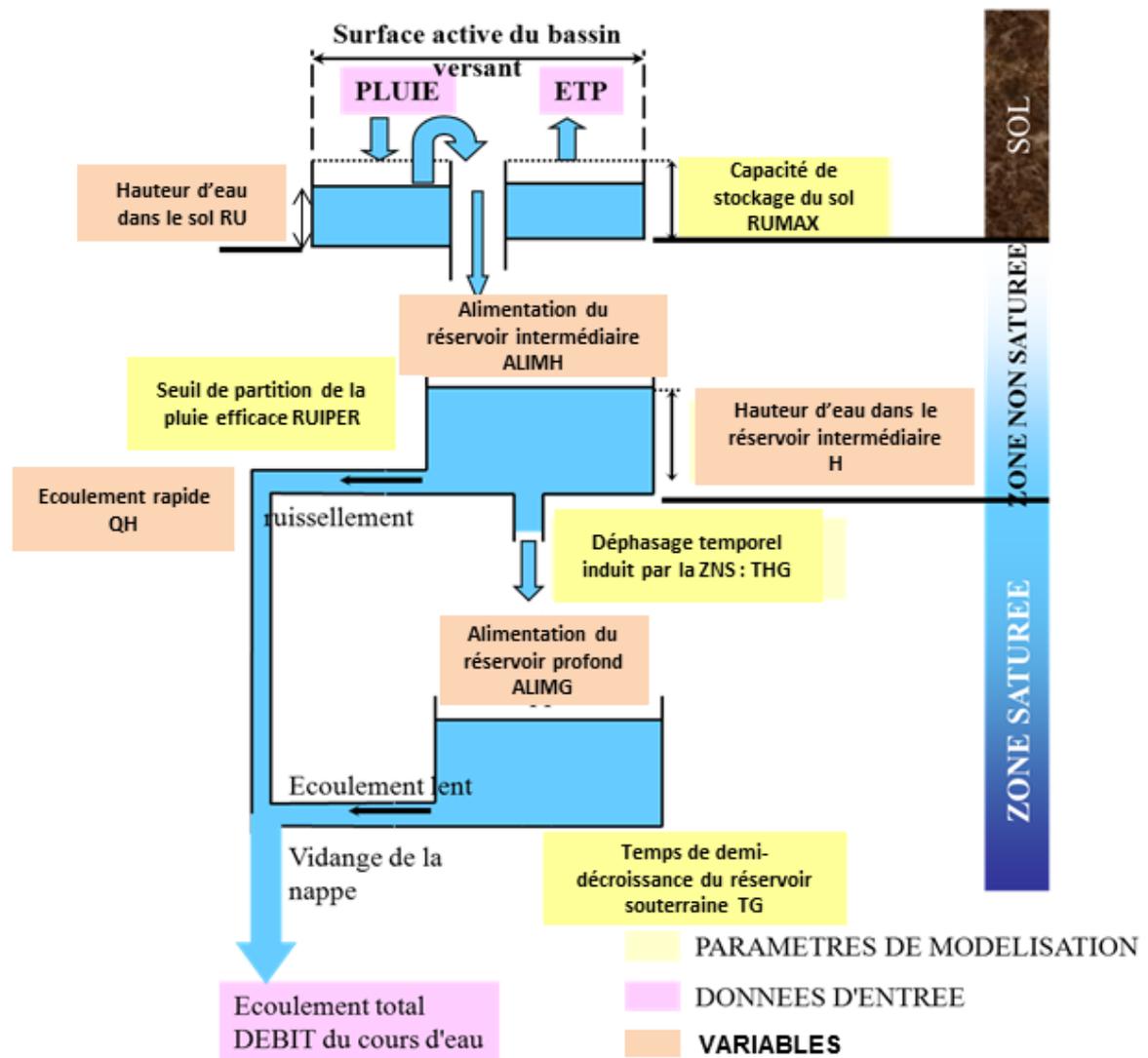


Schéma fonctionnel du modèle GARDENIA

- Vidange du réservoir superficiel

Si la hauteur d'eau du réservoir superficiel (RU) dépasse la valeur de rétention maximale (RUMAX) : $ALIMH = RU - RUMAX$, sinon $ALIMH = 0$

- Vidange du réservoir intermédiaire

Percolation dans le réservoir profond : $ALIMG = H \cdot dt / THG$

Écoulement à l'extérieur sous forme de composante rapide : $QH = H \cdot dt / (THG \cdot RUIPER \cdot H)$

- Vidange du réservoir profond

Écoulement vers l'exutoire : $QG = G \cdot dt / TG$

2. Limites et incertitudes des modélisations GARDENIA

Incertitudes liées à l'appréciation de la validité du calage

Comment décider qu'une simulation est « satisfaisante » ?

Il est difficile de répondre à cette question de façon générale. Rappelons tout d'abord qu'un modèle n'est, au mieux, qu'une représentation acceptable de la relation entre ses entrées et ses sorties.

La qualité d'une simulation est essentiellement basée sur des appréciations visuelles, et son évaluation dépend à la fois du but qu'on s'est fixé, de l'appréciation de la fiabilité des données, du bilan des différents flux et de la vraisemblance des paramètres de calage.

Il est illusoire de rechercher un très bon calage si la qualité des données est douteuse.

Le calage est optimisé par le modèle, mais ce dernier ne peut pas prendre en compte l'ensemble des informations dont dispose l'hydrogéologue. En pratique, le calage dépend du modélisateur et de sa capacité à exploiter les performances numériques de l'ordinateur.

Incertitudes liées au choix de la durée de modélisation

Pour identifier le fonctionnement d'un système, il faut en avoir observé plusieurs cycles hydrologiques. Si cinq ou six ans sont amplement suffisants pour un petit bassin à fort ruissellement, il faut souvent dix à quinze années de mesure, voire quelquefois plus, pour identifier des fluctuations piézométriques pluriannuelles dans un bassin à forte inertie.

Il est en outre très souhaitable de disposer de chroniques de données contrastées, associées à de situations hydroclimatologiques et hydrauliques variées (hautes eaux, basses eaux).

La règle d'usage veut qu'un modèle ne puisse être considéré comme correctement calé avant que toutes ses composantes aient fonctionné plusieurs fois et produit des contributions significatives, conformes aux observations de terrain.

Les modèles de recharge ont été calés sur une période d'une vingtaine d'années couvrant des conditions climatiques variées. Des calages sur des périodes plus courtes peuvent conduire à de meilleurs coefficients d'ajustement mais ils se révèlent en général moins robustes sur de longues périodes.

Interprétation des paramètres et choix des paramètres initiaux

Malgré les performances des méthodes d'optimisation utilisées par GARDÉNIA, le choix des valeurs initiales des paramètres de calage est essentiel. Il peut parfois arriver que plusieurs jeux de paramètres produisent des simulations quasi-équivalentes (non-unicité du calage). C'est alors la connaissance hydrogéologique du terrain qui guide le choix du jeu de paramètres le plus pertinent. En tout état de cause, le résultat d'une modélisation ne peut être dissocié du contexte hydrogéologique du bassin étudié.

3. Comparaison des paramètres de calage obtenus pour les différentes simulations, et observations pour chaque bassin versant

• Résultats pour le sous-Bassin de l'Iton Amont

Rappel des données d'entrée et des stations et piézomètres simulés :

- Pluie : station fictive de Bourth
- ETP : Evreux
- Débit : station de jaugeage de Bourth
- Niveaux : piézomètre de L'Aigle

Résultats :

21 simulations ont été réalisées en faisant varier les différents paramètres de calage.

Les meilleures corrélations sont obtenues avec un schéma à 2 réservoirs souterrains (sim16, 17 et 18). Cependant les bilans moyens de ces simulations ne semblent pas réalistes (%Q rapide proche de 0). Ce schéma conceptuel n'a donc pas été retenu.

Les simulations qui peuvent être retenues sont d'une part la simulation 4 (et ses variantes sim9 et sim10bis sur lesquels on augmente le coefficient de pondération des niveaux). Celles-ci donnent d'assez bonnes corrélations (mais la capacité de la réserve superficielle 'rés. utile' et la capacité de la réserve superficielle progressive (mm) ont été optimisées simultanément lors de ces simulations). Ces simulations ont été relancées en n'optimisant que la Capacité de la réserve superficielle progressive (mm) (capacité de la réserve utile alors non utilisée) :

- avec un BV de 159km² (BV de surface) : sim13quar (calage étiage en racine de débit)
- avec un BV de 187km² (BV hydrogeol) : sim14 (calage étiage en racine de débit) sim15 (calage étiage en log de débit)

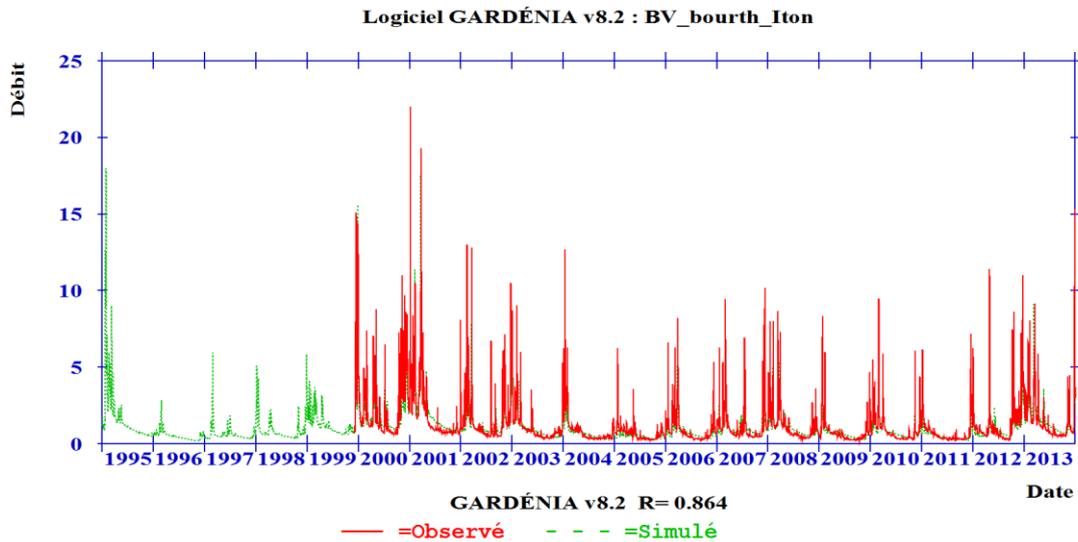
2 types de résultats différents se dégagent entre :

- les simulations où la Capacité de la réserve superficielle 'rés. utile' et la Capacité de la réserve superficielle progressive (mm) ont été optimisées simultanément (CAS 1)
- les simulations où seul la Capacité de la réserve superficielle progressive (mm) était optimisées (CAS 2)

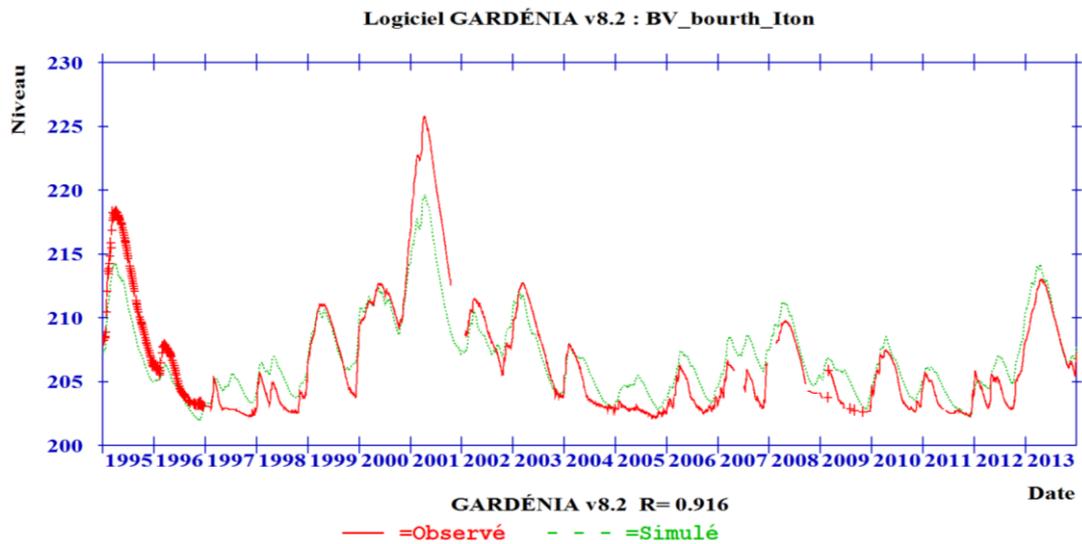
Les paramètres de calage et coefficients d'ajustement obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant :

		Cas1 (moyenne sim4 et 9)	Cas2 (moyenne sim13quar, 14 et15)
Coefficients d'ajustement	calage débit (R)	0.81	0.87
	calage niveau (R)	0.94	0.91
	moyenne CALAGE	0.88	0.89
Paramètres de calage	Coefficient d'emmagasinement équivalent de nappe	0.012	0.008
	Correction globale de l'ETP (%)	-7.5	20
	Capacité de la réserve superficielle 'rés. utile' (mm)	76	0
	Capacité de la réserve superficielle progressive (mm)	176	326
	Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm)	27	15
	Temps de 1/2 montée (temps de 1/2 percolation) (mois) Opti = 1	0.3	0.2
	Temps de 1/2 tarissement souterrain 1 (mois)	4.9	3.9
Termes du bilan calculés	Pluie	826	826
	ETR	633	633
	Reprise	0	0
	Pluie_Effice	193.1	192.4
	Q_rapide	71.4	70.4
	Q_souterr1	121.3	121.5
	Q_échange	0.0	0.0
	Dif_Stock	0.51	1.55
	%Q_souterr	63	63
	%Q_échange	0	0
	%Q_rapide	37	37
	Alim_sout1	121	122

Exemple : résultats de la simulation 14 : comparaison des débits mesurés et simulés (station de jaugeage de Bourth sur l'Iton) :



Exemple : résultats de la simulation 14 : comparaison des niveaux mesurés et simulés (piézomètre de l'Aigle) :



- **Résultats pour le bassin de l'Avre dans son ensemble (station de Muzy)**

Rappel des données d'entrée et des stations et piézomètres simulés :

- Pluie : station fictive de Muzy
- ETP : evreux
- Debit : station de jaugeage de Muzy (simulation 1 et 2) ; debit naturel reconstitués à Muzy (simulation 3 à 8)
- Niveaux : piézomètre de moisville 01805X0036

Résultats :

9 simulations ont été réalisées. Les 2 premières simulations ont été réalisées avec les débits rivières enregistrées à Muzy (pas de temps journaliers). Les simulations 3 à 8 ont été réalisées avec les débits naturels reconstitués à Muzy (pas de temps mensuels pour les débits et les niveaux).

De nombreux tests (simulations 4 à 8) ont été réalisés pour améliorer le calage de la simulation 3 en faisant varier les paramètres (facteur échange, débit ext, modèle à 2 réservoirs souterrain, calage des étiages, pondérations coef2 pour le calage des niveaux). Mais aucun changement de paramètres n'a permis de modifier significativement le calage qui est resté sensiblement identique au calage de la simulation n°3.

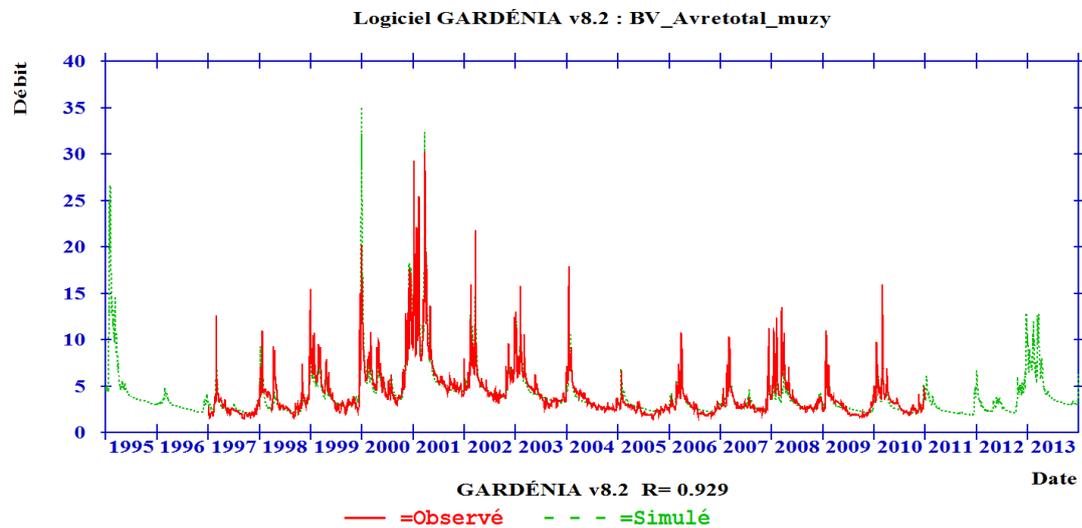
Une 9ième simulation a été réalisée en prenant en compte les prélèvements au pas de temps journalier.

Remarque : Toutes les simulations ont nécessité une augmentation de +20% de l'ETP d'Evreux pour caler au mieux (à l'exception de la simulation 7 dans laquelle on autorisait un facteur d'échange ; dans cette simulation l'augmentation de l'ETP nécessaire pour optimiser le calage n'a été que de 6%).

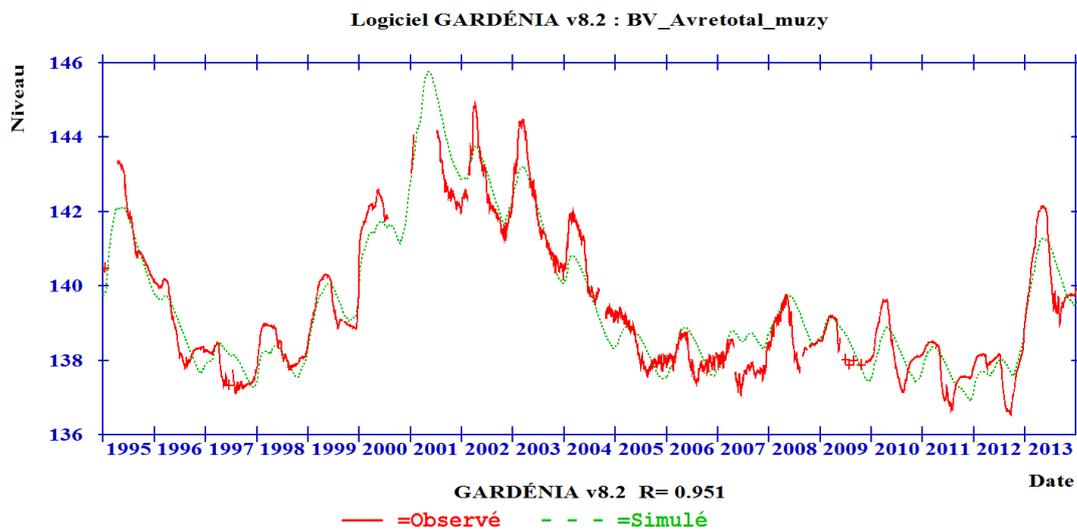
Les paramètres de calage et coefficients d'ajustement obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant :

		sim3	sim9
Coefficients d'ajustement	calage débit (R)	0.957	0.929
	calage niveau (R)	0.958	0.951
	CALAGE moyen	0.9575	0.94
Paramètres de calage	Pluie Eff. annuelle pour initialis. (0 = équil.) (mm/an)	200	200
	Débit extérieur éventuel (m3/s) Opti = 0	0	0
	Superficie du bassin versant (km2) Opti = 0	880	880
	Niveau de base local de la nappe (m NGF) Opti = 1	131.78929	132.2593
	Coefficient d'emménagement équivalent de nappe (-) Opti = 1	0.02274	0.02449
	Correction globale des Pluies (%) Opti = 0	0	0
	Correction globale de l'ETP (%) Opti = 1	19.78276	18.21711
	Capacité de la réserve superficielle 'rés. utile' (mm) Opti = 1	0	0
	Capacité de la réserve superficielle progressive (mm) Opti = 1	154.79248	163.5389
	Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm) Opti = 1	54.01651	46.13184
	Temps de 1/2 montée (temps de 1/2 percolation) (mois) Opti = 1	1.11	0.74844
	Temps de 1/2 tarissement souterrain 1 (mois) Opti = 1	14.60974	14.38094
	Temps de 1/2 transfert vers la nappe profonde (mois) Opti = 0	0	0
	Temps de 1/2 tarissement souterrain 2 (mois) Opti = 0	0	0
	Retard (propagation) des Débits (en pas de temps) Opti = 0	0	0
	Facteur d'échange externe (%) Opti = 0	0	0
	Déficit initial de la réserve super. 'rés. utile' (mm) Opti = 0	0	0
Déficit initial de la réserve superf. progressive (mm) Opti = 0	0	0	
Termes du bilan calculés	Pluie	679.236	679.236
	ETR	531.32	533.003
	Reprise	0	0
	Pluie_Effic	147.959	146.327
	Fonte_Neig	0	0
	Q_rapide	46.815	42.678
	Q_souterr1	101.119	103.644
	Q_souterr2	0	0
	Q_échange	0	0
	Dif_Stock	-1.78E-02	-8.95E-02
	%Q_souterr	68.354	70.833
	%Q_échange	0	0
	%Q_rapide	31.64	29.166
	Alim_sout1	100.95	103.429
Alim_sout2	0	0	

Exemple : résultats de la simulation 9 : comparaison des débits mesurés et simulés (station de jaugeage de Muzy sur l'Avre) :



Exemple : résultats de la simulation 9 : comparaison des niveaux mesurés et simulés (piézomètre de Moisville) :



- **Résultats pour le sous-bassin de l'Avre à la station d'Acon**

Rappel des données d'entrée et des stations et piézomètres simulés :

- Pluie : station fictive d'Acon
- ETP : evreux
- Débit : station de jaugeage à Acon H9202010 (simulation 1 et 2) ; débit naturel reconstitué à Acon (simulation 3 à 6)
- Niveaux : Aucun (excepté pour la simulation 2 : piézomètre de Baline 02153X0023 et la simulation 6 : piézomètre de Moisville 01805X0036)

Résultats :

8 simulations ont été réalisées. La modélisation pluie/débit/niveaux n'a pas été possible avec le piézomètre de Baline (simulation 2), ce piézomètre étant probablement très influencé par les pompages d'irrigation (coef de calage R médiocre pour les niveaux : 0.647).

La majorité des simulations (1, 1bis, 3, 4 et 5) ont donc été des simulations pluie/débit uniquement.

Pour finir, une simulation pluie/débit/niveau (simulation 7) a été tentée avec le piézomètre de Moisville même si celui-ci est situé à l'aval de ce sous-bassin versant. Il semble que les résultats soient néanmoins satisfaisants. Ce piézomètre semble en effet représentatif du remplissage de l'aquifère sous les plateaux.

Les simulations n°1 et 2 ont été réalisées avec les débits mesurés à Acon (pas de temps journalier) tandis que les simulations n°3, 4, 5 et 7 ont été réalisées avec les débits naturels reconstitués à Acon (pas de temps mensuels)

Remarque : toutes les simulations ont nécessité une augmentation de 15% de l'ETP d'Evreux pour optimiser le calage (à l'exception de la simulation 4 dans laquelle on autorisait un débit extérieur ; dans cette simulation l'augmentation de l'ETP n'a été que de 8%).

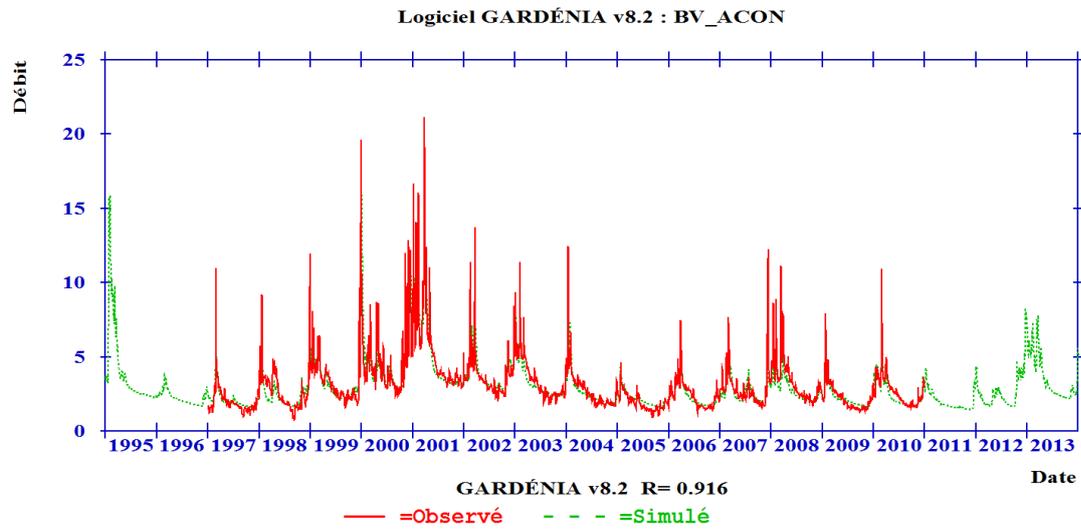
Une dernière simulation a été réalisée (simulation n°8) correspondant à la simulation 7 mais avec prise en compte des prélèvements au pas de temps journaliers (au lieu de mensuel dans la simulation 7). La correction de l'ETP n'est plus que de 4% dans la simulation 8.

Les résultats sont assez homogènes (cf. tableau ci-dessous), les résultats de la simulation 8 (simulation pluie/niveau/débit) peuvent être retenus.

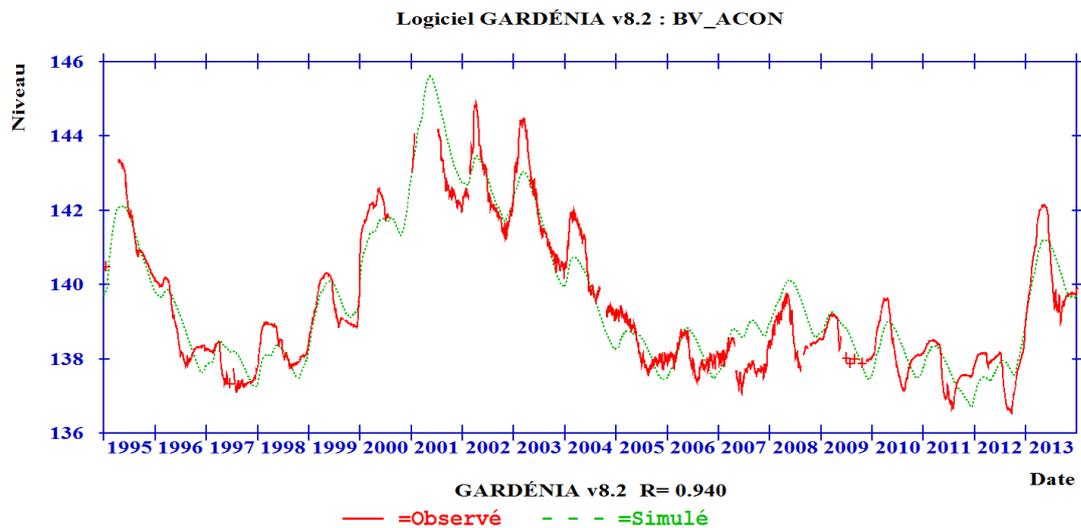
Les paramètres de calage et coefficients d'ajustement obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant :

	sim8
calage debit (R)	0.916
calage niveau (R)	0.94
CALAGE moyen	0.928
commentaire visuelle courbe simulé / observés	
Pluie Eff. annuelle pour initialis. (0 = équil.) (mm/an)	0
Débit extérieur éventuel (m3/s) Opti = 0	0
Superficie du bassin versant (km2) Opti = 0	495
Niveau de base local de la nappe (m NGF) Opti = 1	131.16525
Coefficient d'emmagasinement équivalent de nappe (-) Opti = 1	0.02873
Correction globale des Pluies (%) Opti = 0	0
Correction globale de l'ETP (%) Opti = 1	4.34239
Capacité de la réserve superficielle 'rés. utile' (mm) Opti = 1	0
Capacité de la réserve superficielle progressive (mm) Opti = 1	159.65533
Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm) Opti = 1	66.80191
Temps de 1/2 montée (temps de 1/2 percolation) (mois) Opti = 1	0.95656
Temps de 1/2 tarissement souterrain 1 (mois) Opti = 1	14.77379
Temps de 1/2 transfert vers la nappe profonde (mois) Opti = 0	0
Temps de 1/2 tarissement souterrain 2 (mois) Opti = 0	0
Retard (propagation) des Débits (en pas de temps) Opti = 0	0
Facteur d'échange externe (%) Opti = 0	0
Déficit initial de la réserve super. 'rés. utile' (mm) Opti = 0	0
Déficit initial de la réserve superf. progressive (mm) Opti = 0	0
Pluie	711.938
ETR	518.059
Reprise	0
Pluie_Effic	193.591
Fonte_Neig	0
Q_rapide	56.804
Q_souterr1	136.115
Q_souterr2	0
Q_échange	0
Dif_Stock	0.9602
%Q_souterr	70.556
%Q_échange	0
%Q_rapide	29.342
Alim_sout1	136.178
Alim_sout2	0

Exemple : résultats de la simulation 8 : comparaison des débits mesurés et simulés (station de jaugeage d'Acon sur l'Avre) :



Exemple : résultats de la simulation 8 : comparaison des niveaux mesurés et simulés (piézomètre de Moisville) :



- **Résultats pour le sous-bassin de l'Avre à la station de Saint-Christophe-sur-Avre**

Rappel des données d'entrée et des stations et piézomètres simulés :

- Pluie : station fictive de Saint Christophe
- ETP : Evreux
- Débit : station de jaugeage à St Christophe H9202020
- Niveaux : St Christophe 02152X0051

Résultats :

Le calage des modèles du sous-bassin de l'Avre à la station de Saint-Christophe-sur-Avre a été assez complexe. Le secteur étant karstique, l'essentiel du débit s'écoule en souterrain vers le groupe de résurgence de Verneuil-sur-Avre et Rueil-la-Guadeliere. Il a donc fallu autoriser un facteur d'échange pour simuler le débit qui s'échappe en sous-terrain.

Il s'est avéré que ce débit sous-terrain est très important. Il a donc fallu augmenter la limite fixée par défaut par Gardenia (-70% => -90%).

Le second problème rencontré a été que le modèle Gardenia ne reproduisait pas (par ajustement automatique) le niveau de base observé sur le piézomètre. Il a donc fallu imposer un niveau de base à 163,1m lors du calage.

Le coefficient de pondération a ensuite été augmenté progressivement pour donner plus de poids à la piézométrie afin d'en optimiser le calage.

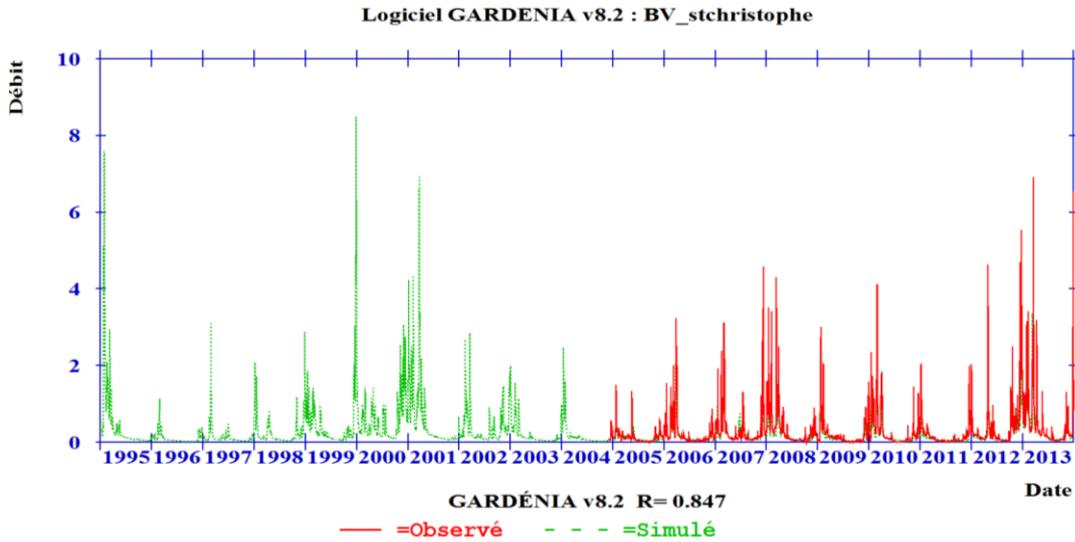
Des tests ont été faits pour estimer la part d'incertitude liée aux chroniques pluviométriques. La station pluviométrique fictive utilisée initialement a été remplacée par la station de Beaulieu (sim18) puis par la station de Soligny (sim 19). Ce changement peut améliorer la reproduction de certains pics de débits mais pas tous. Aucune chronique ne semble idéale.

Enfin, un dernier modèle a été tenté, en changeant la représentation conceptuelle de ce bassin de l'Avre amont par la prise en compte de deux réservoirs souterrains (au lieu d'un seul dans les modèles testés précédemment). D'un point de vue conceptuel, l'idée est de distinguer la craie altérée et karstifiée de la craie saine et plus inertielle sous-jacente. Différentes variantes ont été testées, il s'agit des simulations 8, 9 et 20.

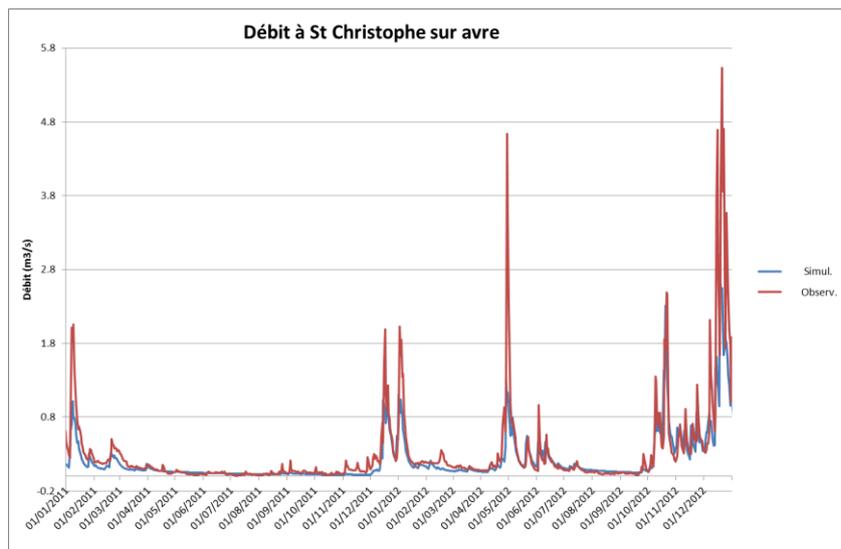
Les paramètres de calage et coefficients d'ajustement obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant :

	1 réservoir souterrain		2 réservoirs souterrain	
	sim6	sim7	sim8	sim9
calage debit (R)	0.847	0.82	0.868	0.737
calage niveau (R)	0.87	0.836	0.896	0.892
CALAGE moyen	0.8585	0.828	0.882	0.8145
Pluie Eff. annuelle pour initialis. (0 = équil.) (mm/an)	0	0	0	0
Débit extérieur éventuel (m3/s)	0	0	0	0
Superficie du bassin versant (km2)	109	109	109	109
Niveau de base local de la nappe (m NGF)	163.10001	163.10001	163.10001	163.10001
Coefficient d'emménagement équivalent de nappe (-)	8.43E-03	2.39E-03	1.34E-03	1.20E-03
Correction globale des Pluies (%)	0	0	0	0
Correction globale de l'ETP (%)	15	15	15	15
Capacité de la réserve superficielle 'rés. utile' (mm)	0	0	0	0
Capacité de la réserve superficielle progressive (mm)	251.82867	528.73474	322.83264	443.94659
Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm)	23.86605	13.09933	9998.60156	9999
Temps de 1/2 montée (temps de 1/2 percolation) (mois)	0.25359	0.42107	0.14261	0.09394
Temps de 1/2 tarissement souterrain 1 (mois)	2.32484	1	0.05	0.05
Temps de 1/2 transfert vers la nappe profonde (mois)	0	0	0.54731	0.4733
Temps de 1/2 tarissement souterrain 2 (mois)	0	0	2.68206	2.41153
Retard (propagation) des Débits (en pas de temps)	0	0	0	0
Facteur d'échange externe (%)	-83.02722	-72.15359	-60.97093	0
Pluie	785.884	785.884	785.884	785.884
ETR	592.226	641.275	611.939	632.523
Reprise	0	0	0	0
Pluie_Effic	192.695	143.789	172.937	152.448
Fonte_Neig	0	0	0	0
Q_rapide	56.576	55.785	0.1564	8.92E-02
Q_souterr1	22.982	24.416	60.526	134.819
Q_souterr2	0	0	17.211	17.252
Q_échange	-112.424	-63.266	-94.553	0
Dif_Stock	1.676	1.141	1.498	1.201
%Q_souterr	28.887	30.444	99.799	99.941
%Q_échange	-58.343	-43.999	-54.675	0
%Q_rapide	29.36	38.796	9.04E-02	5.85E-02
Alim_sout1	135.779	87.761	172.44	152.196
Alim_sout2	0	0	17.269	17.305

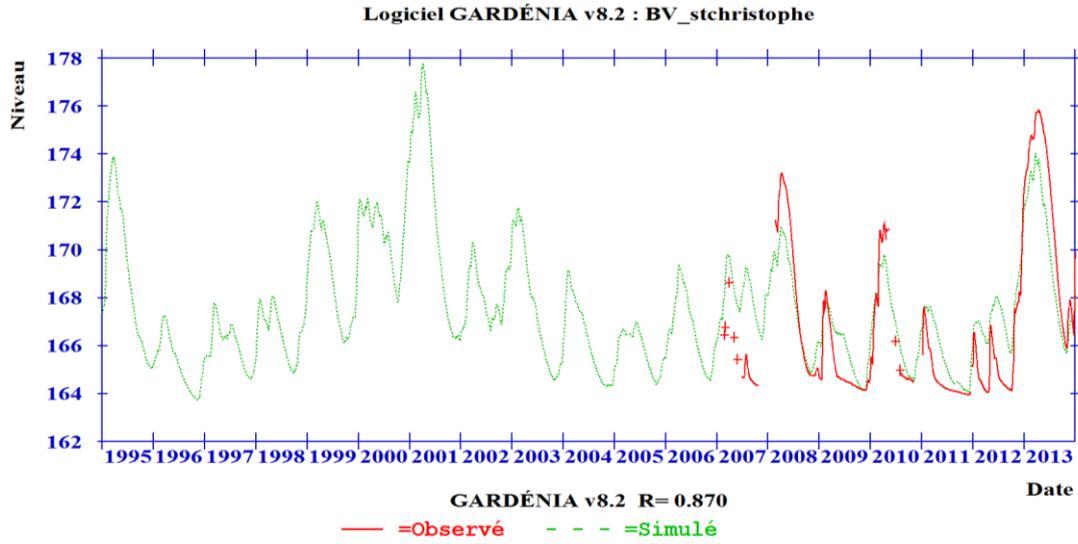
Exemple : résultats de la simulation 6 : comparaison des débits mesurés et simulés (station de jaugeage de Saint-Christophe-sur-Avre) :



Zoom sur une année :



Exemple : résultats de la simulation 8 : comparaison des niveaux mesurés et simulés (piézomètre de Saint-Christophe-sur-Avre) :



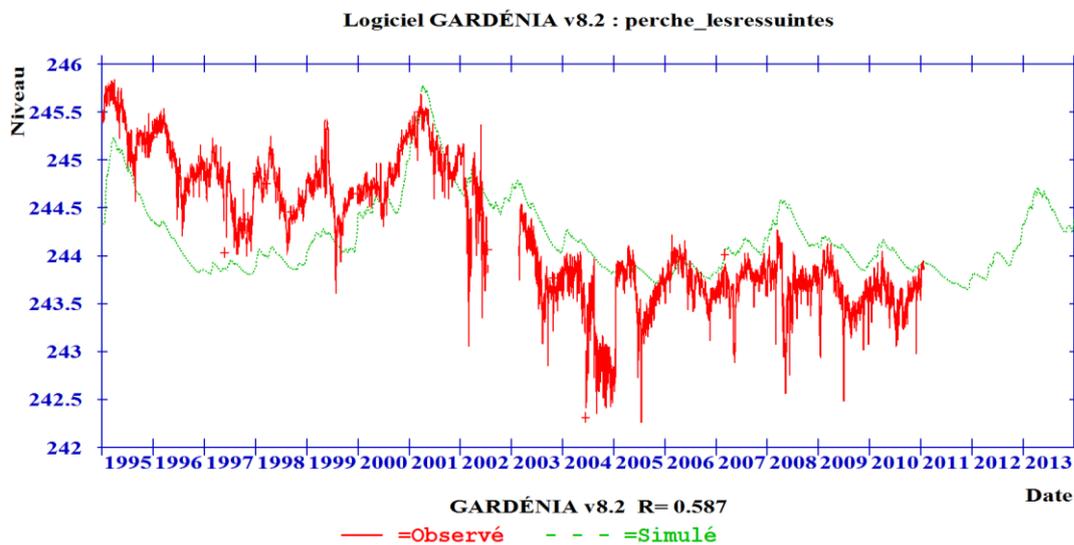
- **Résultats pour le secteur des sables du perche (compartiment amont surélevé entre la faille de l'Eure et la faille de Senonche)**

1^{er} modèle : Rappel des données d'entrée et des stations et piézomètres simulés :

- Pluie : station de Beaulieu
- ETP : Evreux
- Débit : AUCUN
- Niveaux : Les Ressuintes 02533X2003

Résultats du premier modèle:

Cette premier modèle pluie/niveaux avec le piézomètre de « Les Ressuintes » n'a donné aucun résultat satisfaisant. Le piézomètre est probablement influencé par des pompages. Le coefficient d'ajustement n'est que de 0,587.

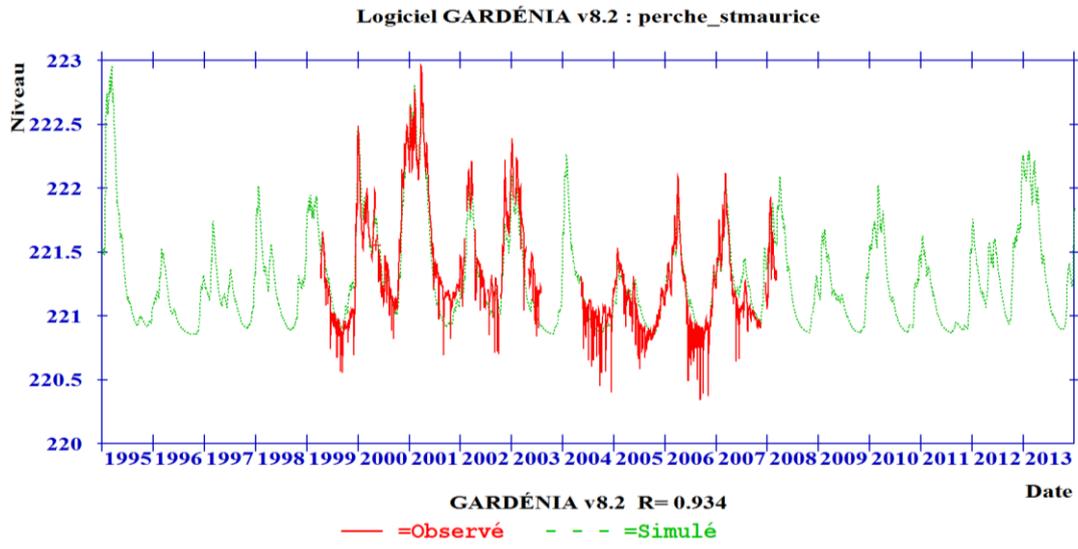


2^{ieme} modèle : Rappel des données d'entrée et des stations et piézomètres simulés :

- Pluie : station de Beaulieu
- ETP : evreux
- Debit : AUCUN
- Niveaux : St Maurice les charency 02155X1040

Résultats du second modèle:

Un second modèle a été tenté avec le piézomètre de Saint-Maurice-les-Charency. Un très bon calage a été obtenu pour ce piézomètre (R=0.934). Visuellement, les niveaux sont bien calés (excepté en étiage : pompage à proximité du piézomètre visiblement).



Les paramètres de calage et coefficients d'ajustement obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant :

	sim4
calage débit (R)	
calage niveau (R)	0.934
Pluie Eff. annuelle pour initialis. (0 = équil.) (mm/an)	0
Débit extérieur éventuel (m3/s)	0
Superficie du bassin versant (km2)	1
Niveau de base local de la nappe (m NGF)	220.84615
Coefficient d'emmagasinement équivalent de	0.04945
Correction globale des Pluies (%)	0
Correction globale de l'ETP (%)	15
Capacité de la réserve superficielle 'rés. utile' (mm)	0
Capacité de la réserve superficielle progressive (mm)	216.85977
Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm)	25.35999
Temps de 1/2 montée (temps de 1/2 percolation) (mois)	0.05
Temps de 1/2 tarissement souterrain 1 (mois)	0.90137
Temps de 1/2 transfert vers la nappe profonde (mois)	0.0501
Temps de 1/2 tarissement souterrain 2 (mois)	0.0501
Pluie	835.216
ETR	582.698
Reprise	0
Pluie_Effic	251.512
Q_rapide	45.505
Q_souterr1	205.039
Q_échange	0
Dif_Stock	1.973
%Q_souterr	81.838
%Q_échange	0
%Q_rapide	18.092
Alim_sout1	205.912

Annexe 3

Calcul de la répartition mensuelle des prélèvements pour l'irrigation

Dose irrigation (mm)	Coefficient de mensualisation du blé	Coefficient de mensualisation de l'orge	Somme des coefficients de mensualisation du blé et de l'orge	Pourcentage annuel de coefficients de mensualisation
janv.-00	0.0	0.0	0.0	0%
févr.-00	0.0	0.0	0.0	0%
mars-00	0.0	0.0	0.0	0%
avr.-00	0.0	0.0	0.0	0%
mai-00	0.8	0.0	0.8	1%
juin-00	71.4	63.6	135.0	99%
juil.-00	0.0	0.0	0.0	0%
août-00	0.0	0.0	0.0	0%
sept.-00	0.0	0.0	0.0	0%
oct.-00	0.0	0.0	0.0	0%
nov.-00	0.0	0.0	0.0	0%
déc.-00	0.0	0.0	0.0	0%
janv.-01	0.0	0.0	0.0	0%
févr.-01	0.0	0.0	0.0	0%
mars-01	0.0	0.0	0.0	0%
avr.-01	0.0	0.0	0.0	0%
mai-01	69.8	52.8	122.6	36%
juin-01	96.5	96.5	192.9	57%
juil.-01	15.0	6.5	21.5	6%
août-01	2.1	2.1	4.2	1%
sept.-01	0.0	0.0	0.0	0%
oct.-01	0.0	0.0	0.0	0%
nov.-01	0.0	0.0	0.0	0%
déc.-01	0.0	0.0	0.0	0%
janv.-02	0.0	0.0	0.0	0%
févr.-02	0.0	0.0	0.0	0%
mars-02	0.0	0.0	0.0	0%
avr.-02	53.8	21.9	75.7	31%
mai-02	21.5	0.2	21.6	9%
juin-02	69.2	68.8	138.0	57%
juil.-02	5.9	0.0	5.9	2%
août-02	0.0	0.0	0.0	0%

sept.-02	0.0	0.0	0.0	0%
oct.-02	0.0	0.0	0.0	0%
nov.-02	0.0	0.0	0.0	0%
déc.-02	0.0	0.0	0.0	0%
janv.-03	0.0	0.0	0.0	0%
févr.-03	0.0	0.0	0.0	0%
mars-03	15.1	0.0	15.1	4%
avr.-03	57.1	31.4	88.5	21%
mai-03	30.4	12.1	42.5	10%
juin-03	85.9	85.9	171.9	40%
juil.-03	29.6	0.0	29.6	7%
août-03	35.9	29.5	65.3	15%
sept.-03	7.0	7.0	13.9	3%
oct.-03	0.0	0.0	0.0	0%
nov.-03	0.0	0.0	0.0	0%
déc.-03	0.0	0.0	0.0	0%
janv.-04	0.0	0.0	0.0	0%
févr.-04	0.0	0.0	0.0	0%
mars-04	4.5	0.0	4.5	1%
avr.-04	20.8	0.0	20.8	5%
mai-04	98.1	58.7	156.8	38%
juin-04	99.4	99.4	198.8	48%
juil.-04	24.1	6.6	30.7	7%
août-04	0.0	0.0	0.0	0%
sept.-04	0.0	0.0	0.0	0%
oct.-04	0.0	0.0	0.0	0%
nov.-04	0.0	0.0	0.0	0%
déc.-04	0.0	0.0	0.0	0%
janv.-05	0.0	0.0	0.0	0%
févr.-05	0.0	0.0	0.0	0%
mars-05	0.0	0.0	0.0	0%
avr.-05	13.4	0.0	13.4	4%
mai-05	21.0	1.0	22.0	6%
juin-05	99.5	94.2	193.7	56%
juil.-05	5.3	0.8	6.1	2%
août-05	29.9	26.5	56.4	16%
sept.-05	24.0	24.0	48.0	14%
oct.-05	4.7	4.7	9.3	3%
nov.-05	0.0	0.0	0.0	0%
déc.-05	0.0	0.0	0.0	0%
janv.-06	0.0	0.0	0.0	0%
févr.-06	0.0	0.0	0.0	0%
mars-06	0.0	0.0	0.0	0%

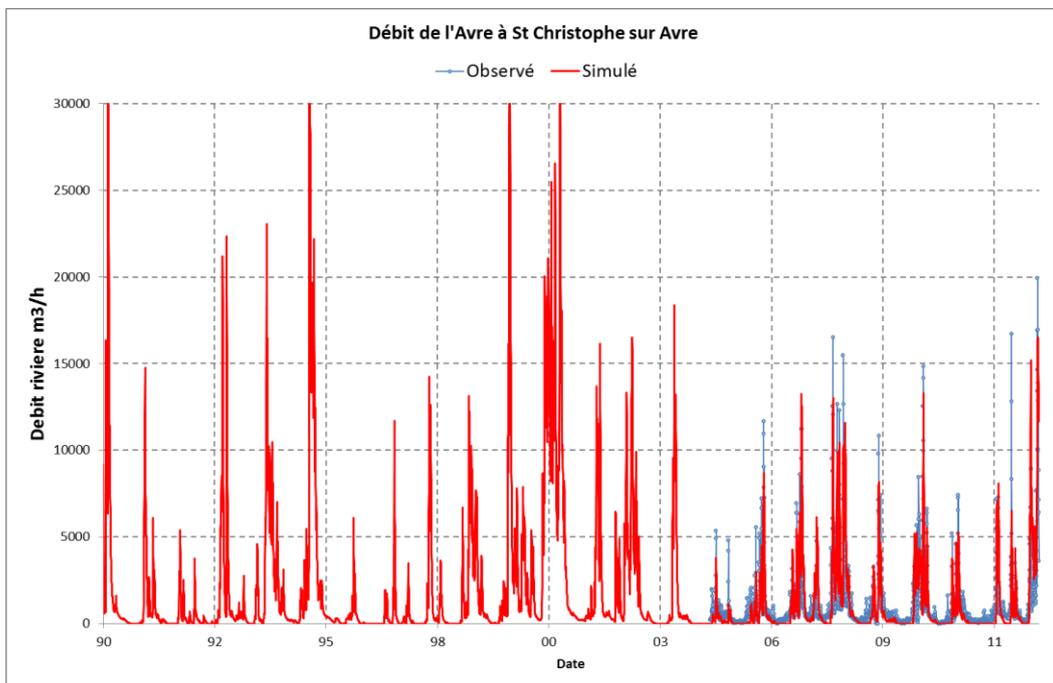
avr.-06	10.0	0.0	10.0	2%
mai-06	60.3	22.0	82.3	19%
juin-06	100.7	100.7	201.4	46%
juil.-06	53.0	27.6	80.6	18%
août-06	15.8	15.8	31.6	7%
sept.-06	16.2	16.2	32.4	7%
oct.-06	0.0	0.0	0.0	0%
nov.-06	0.0	0.0	0.0	0%
déc.-06	0.0	0.0	0.0	0%
janv.-07	0.0	0.0	0.0	0%
févr.-07	0.0	0.0	0.0	0%
mars-07	0.0	0.0	0.0	0%
avr.-07	58.3	34.8	93.1	44%
mai-07	49.6	9.6	59.3	28%
juin-07	31.5	25.8	57.3	27%
juil.-07	0.0	0.0	0.0	0%
août-07	0.0	0.0	0.0	0%
sept.-07	0.0	0.0	0.0	0%
oct.-07	0.0	0.0	0.0	0%
nov.-07	0.0	0.0	0.0	0%
déc.-07	0.0	0.0	0.0	0%
janv.-08	0.0	0.0	0.0	0%
févr.-08	0.0	0.0	0.0	0%
mars-08	0.0	0.0	0.0	0%
avr.-08	0.0	0.0	0.0	0%
mai-08	72.8	38.3	111.1	28%
juin-08	84.9	77.5	162.4	41%
juil.-08	57.3	20.5	77.7	19%
août-08	22.0	22.0	44.0	11%
sept.-08	2.1	2.1	4.1	1%
oct.-08	0.0	0.0	0.0	0%
nov.-08	0.0	0.0	0.0	0%
déc.-08	0.0	0.0	0.0	0%
janv.-09	0.0	0.0	0.0	0%
févr.-09	0.0	0.0	0.0	0%
mars-09	9.4	0.0	9.4	2%
avr.-09	37.9	7.2	45.1	9%
mai-09	45.1	7.6	52.7	11%
juin-09	84.0	84.0	168.0	35%
juil.-09	39.7	19.4	59.1	12%
août-09	45.7	35.1	80.8	17%
sept.-09	31.0	31.0	61.9	13%
oct.-09	0.0	0.0	0.0	0%

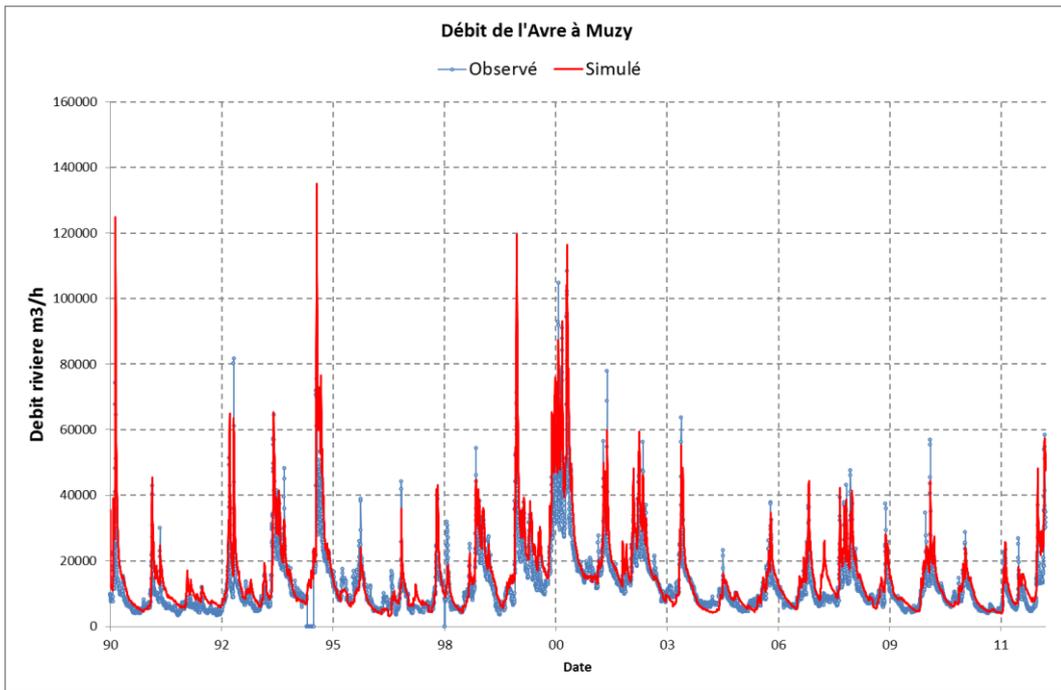
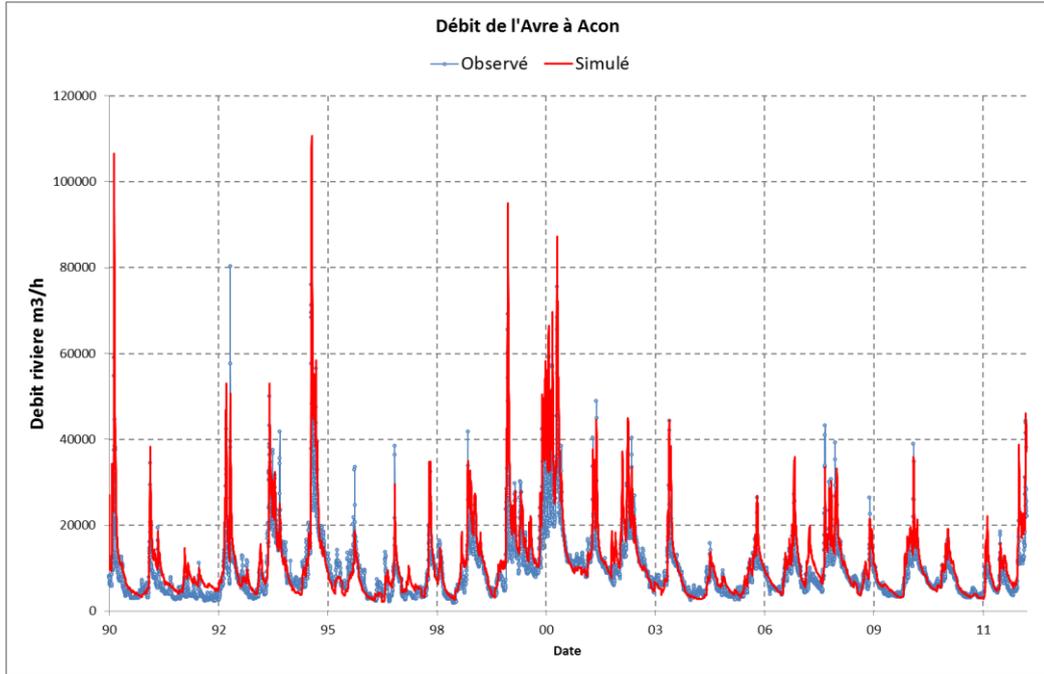
nov.-09	0.0	0.0	0.0	0%
déc.-09	0.0	0.0	0.0	0%
janv.-10	0.0	0.0	0.0	0%
févr.-10	0.0	0.0	0.0	0%
mars-10	1.7	0.0	1.7	0%
avr.-10	74.5	31.0	105.5	19%
mai-10	83.3	41.0	124.3	22%
juin-10	70.6	70.6	141.3	25%
juil.-10	80.6	45.0	125.6	22%
août-10	11.4	11.4	22.7	4%
sept.-10	18.9	18.9	37.8	7%
oct.-10	0.0	0.0	0.0	0%
nov.-10	0.0	0.0	0.0	0%
déc.-10	0.0	0.0	0.0	0%

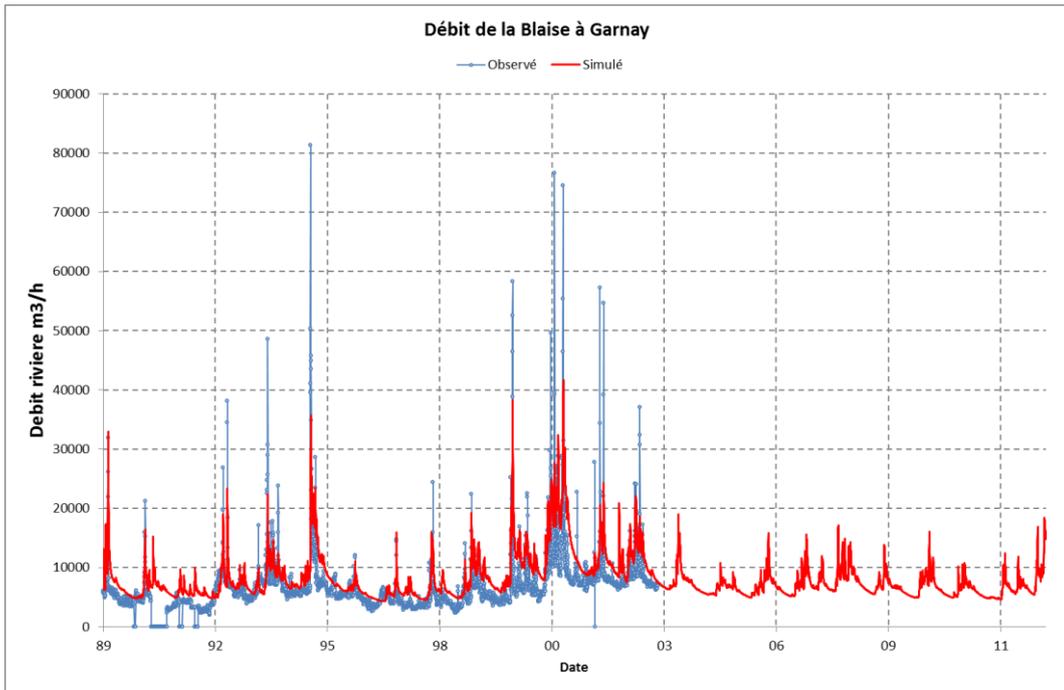
Annexe 4

Chroniques de débit simulées et observées aux stations hydrométriques (simulés au pas de temps journalier)

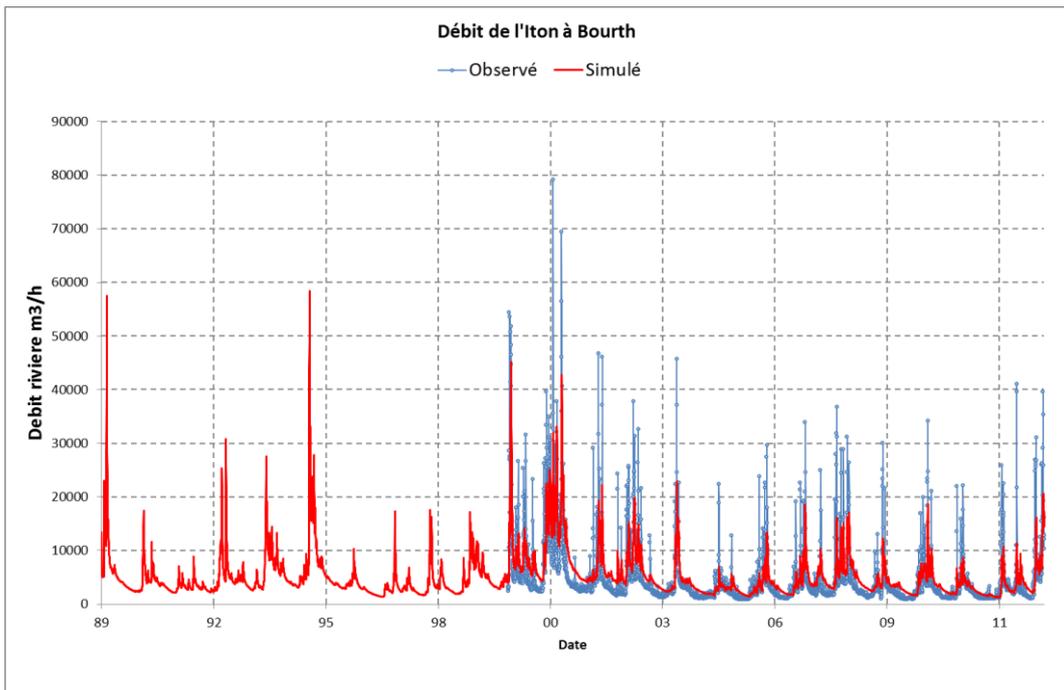
Les figures suivantes présentent la comparaison des chroniques simulée (en rouge) et observée (bleue) pour les stations de mesures disposant des données sur la période de calage.







(Hors bassin de l'Avre)



(Hors bassin de l'Avre)

Annexe 5

Chroniques piézométriques simulées et observées dans les ouvrages retenus pour le calage du modèle

Les figures suivantes présentent la comparaison des chroniques simulée (en rouge) et observée (bleue) pour des stations de mesures disposant des données sur la période de calage.

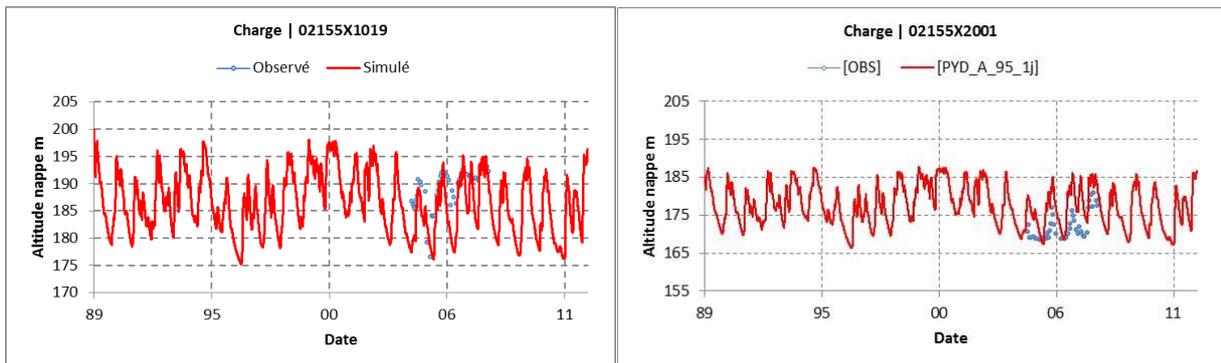
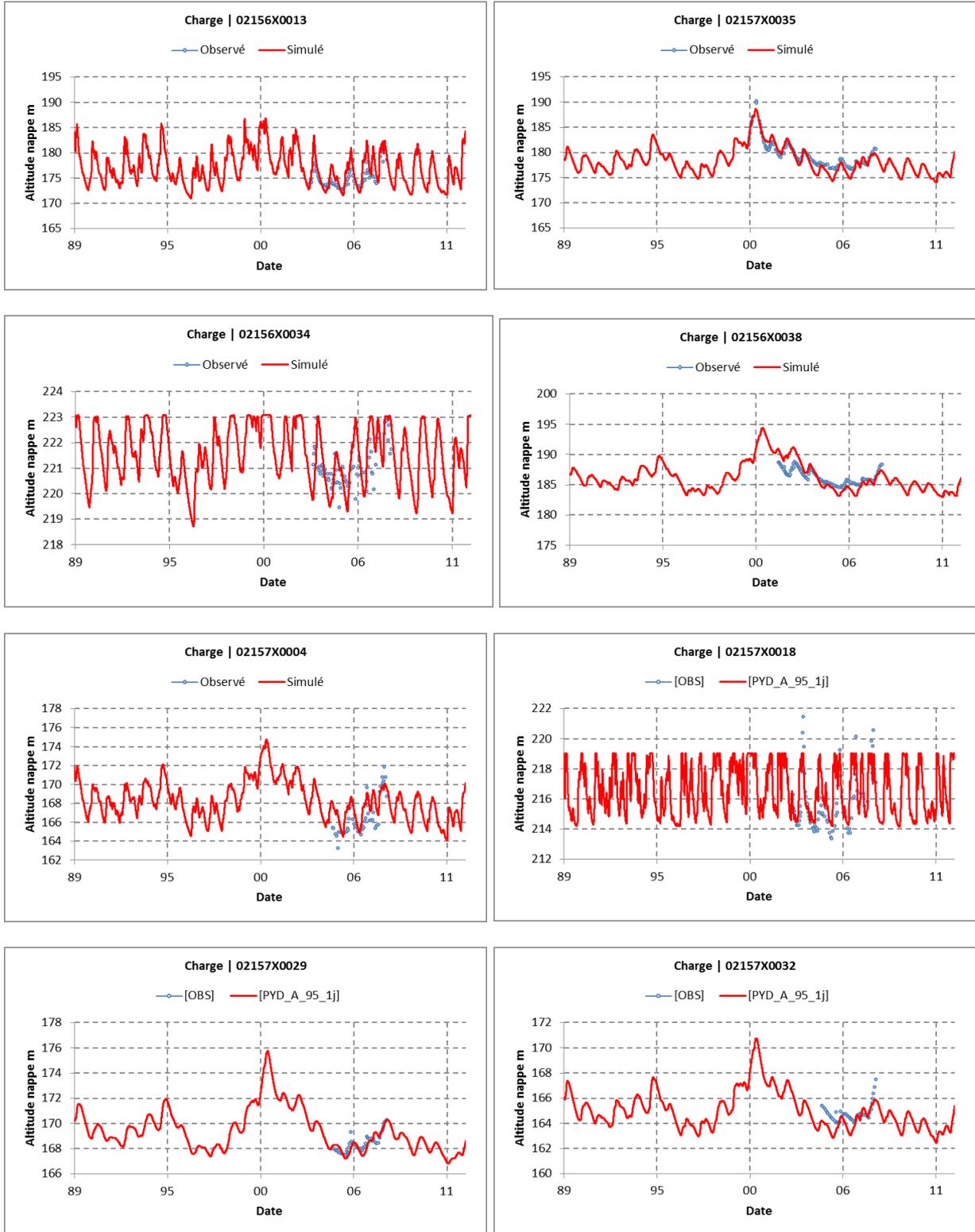


Illustration 114 : Chroniques piézométriques observées (bleu) et simulées (rouge) en rive gauche de l'Avre dans le secteur karstique



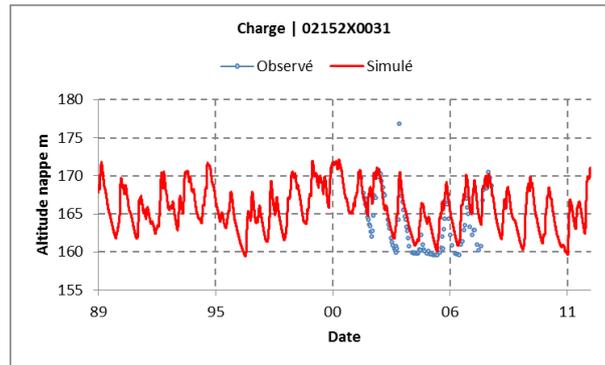


Illustration 115 : Chroniques piézométriques observées (bleu) et simulées (vert) en rive droite de l'Avre dans le secteur karstique

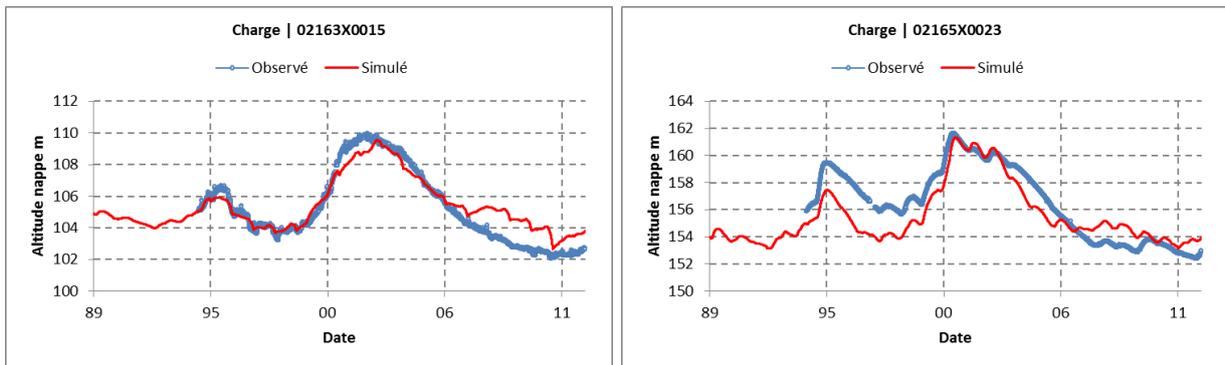


Illustration 116 : Chroniques piézométriques observées (bleu) et simulées (vert) en rive droite de l'Avre à l'aval du bassin

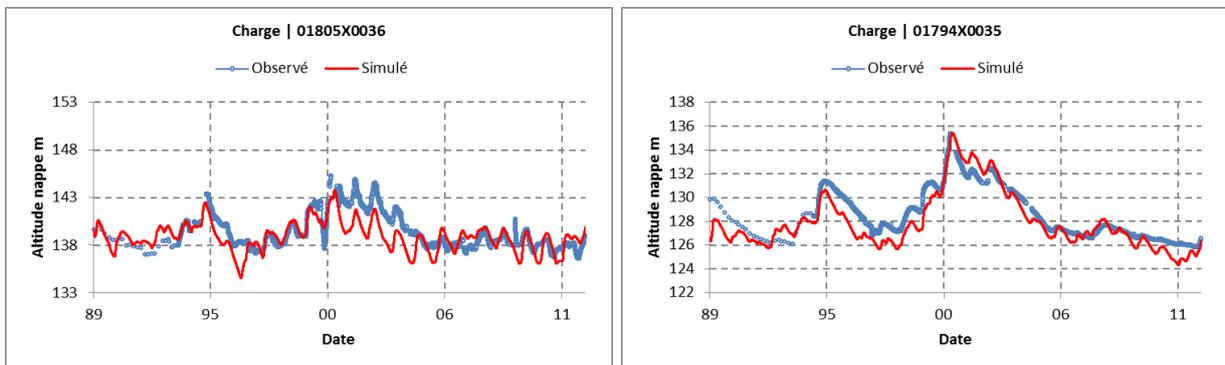
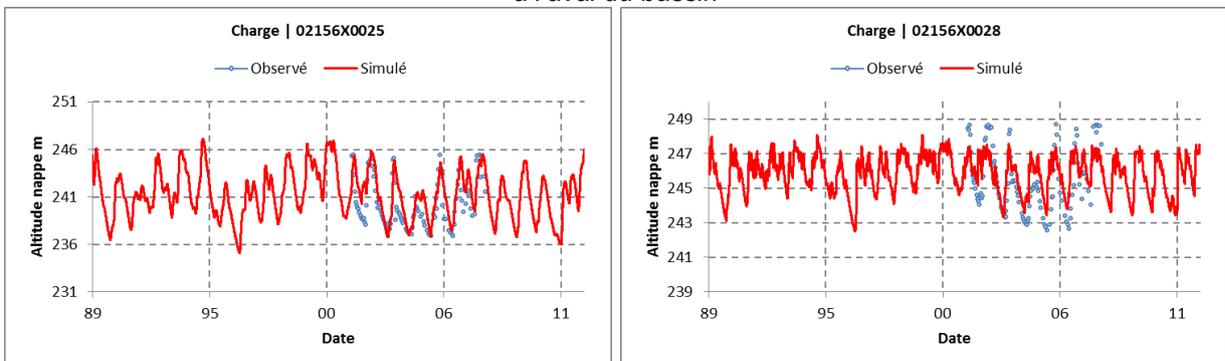


Illustration 117 : Chroniques piézométriques observées (bleu) et simulées (vert) en rive gauche de l'Avre à l'aval du bassin



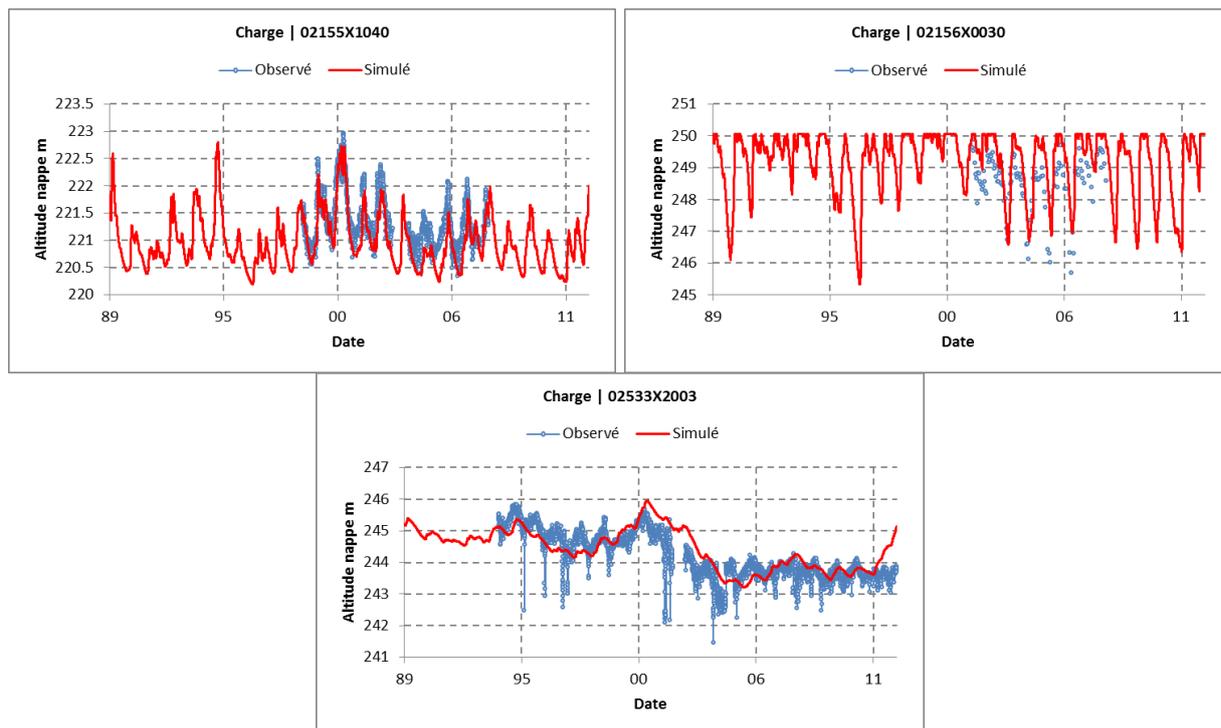
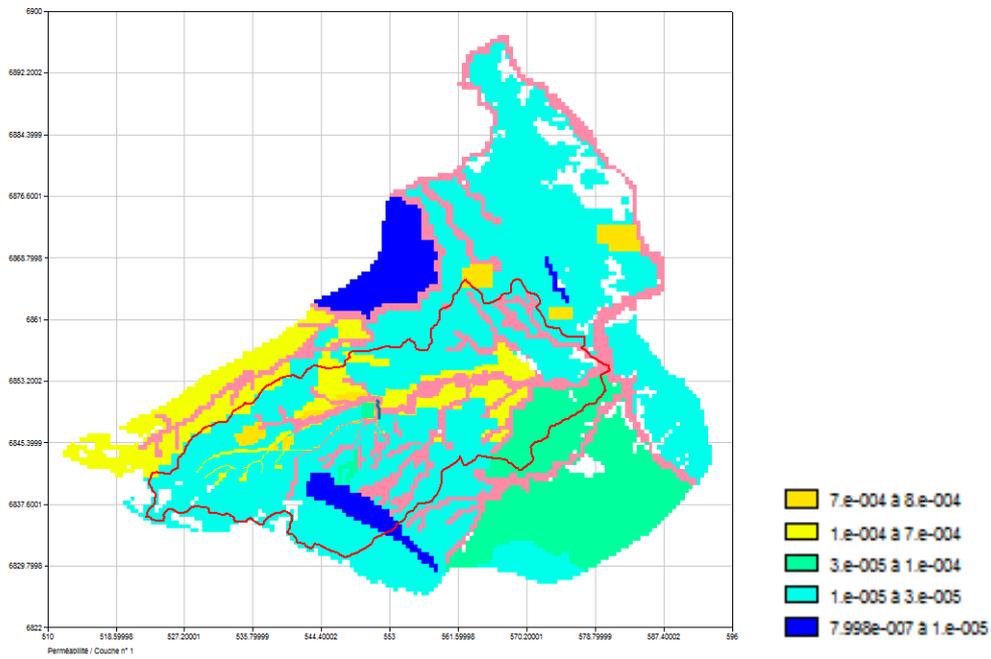


Illustration 118 : Chroniques piézométriques observées (bleu) et simulées (vert) en amont du bassin dans le secteur des sables du Perche

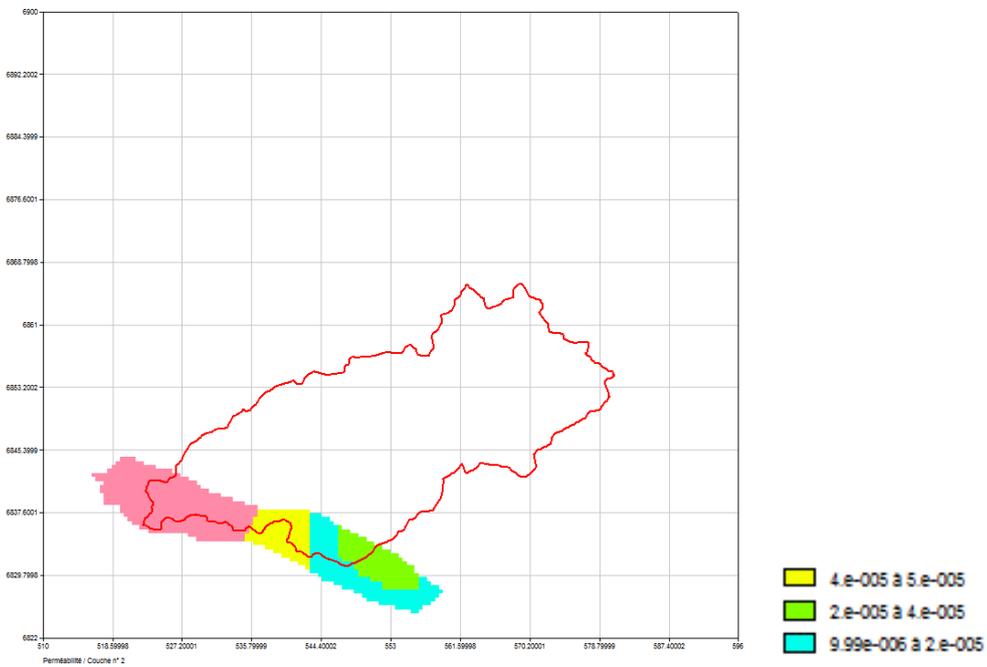
Annexe 6

Distribution des perméabilités et des coefficients d'emmagasinement à l'issue du calage

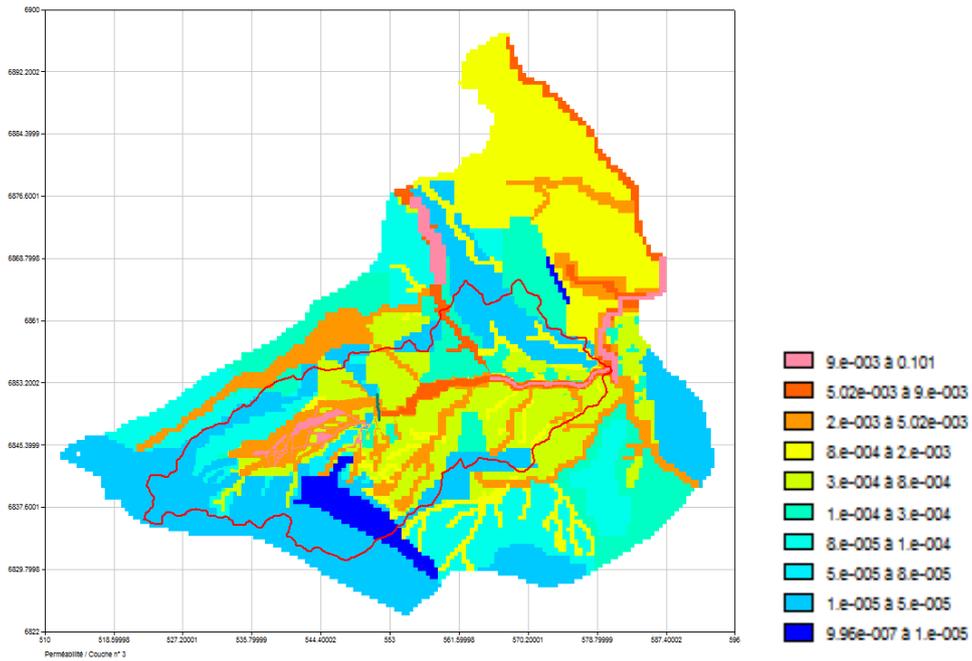
Perméabilités (m/s) à l'issue du calage en transitoire dans les alluvions et formations à silex



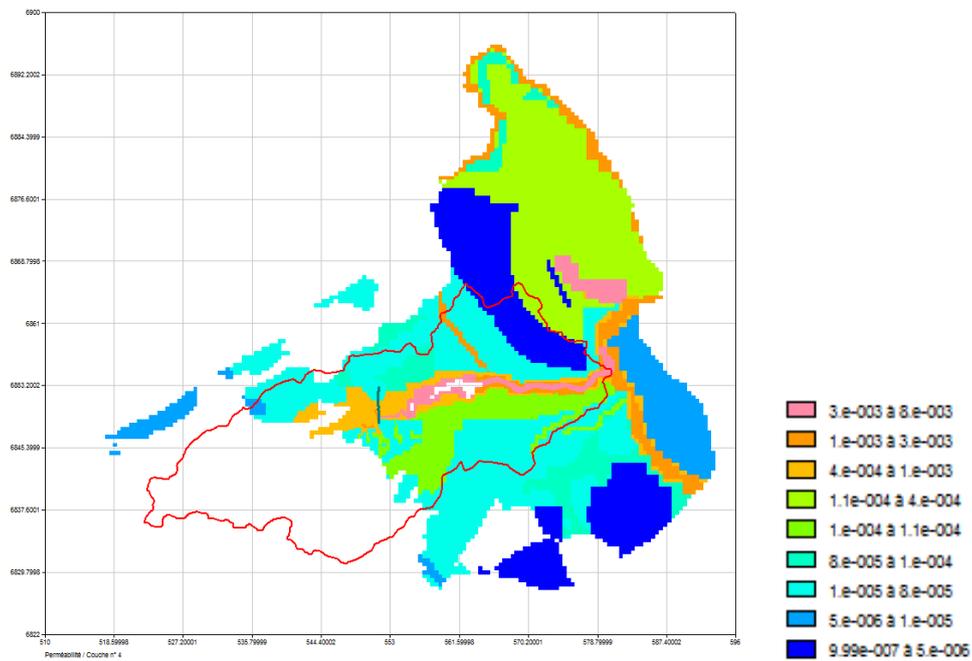
Perméabilités (m/s) à l'issue du calage en transitoire dans les sables du Perche



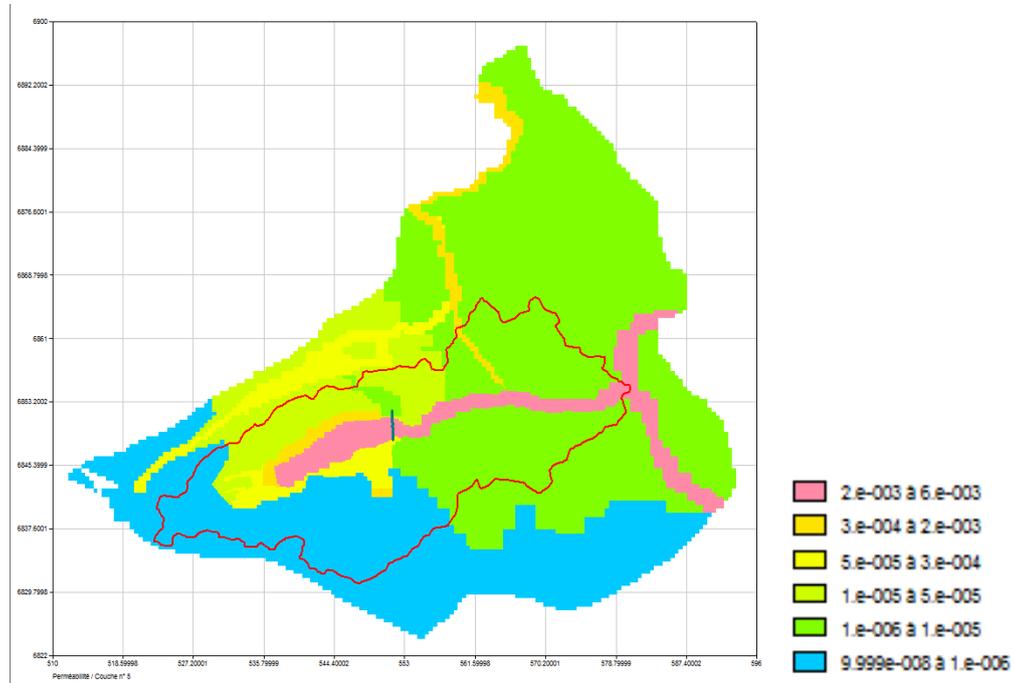
Perméabilités (m/s) à l'issue du calage en transitoire dans la craie altérée intégrant les karsts



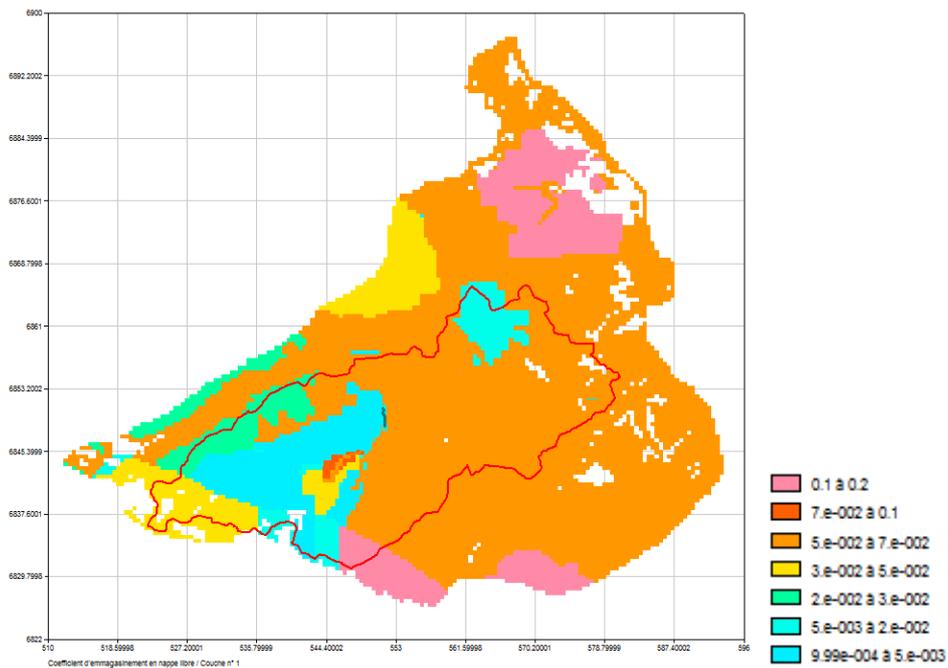
Perméabilités (m/s) à l'issue du calage en transitoire dans la craie du Sénonien et du Turonien moyen et supérieur



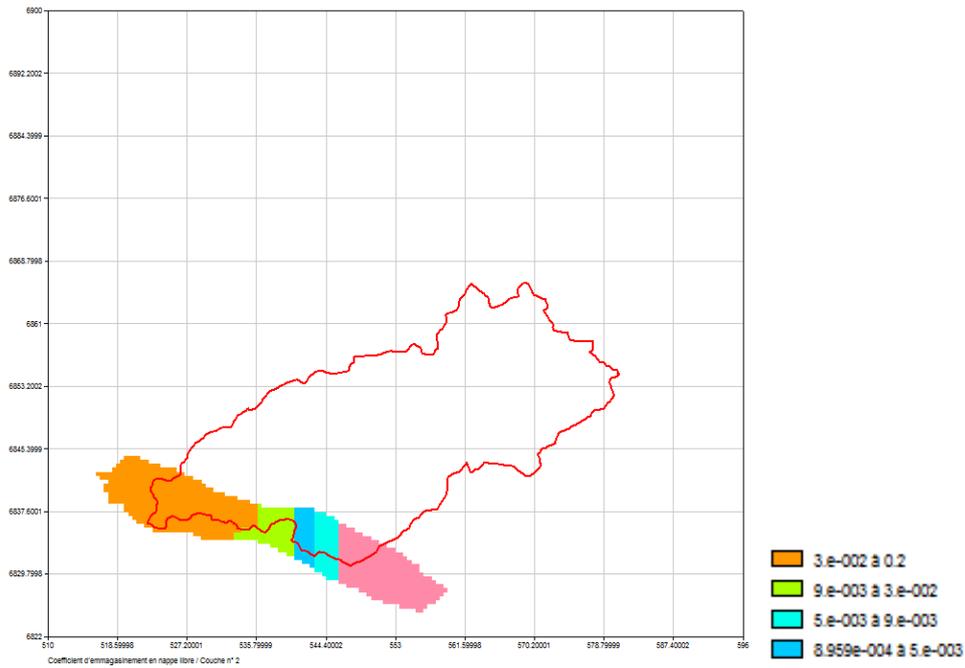
Perméabilités (m/s) à l'issue du calage en transitoire dans la craie du Turonien inférieur et du Cénomanién



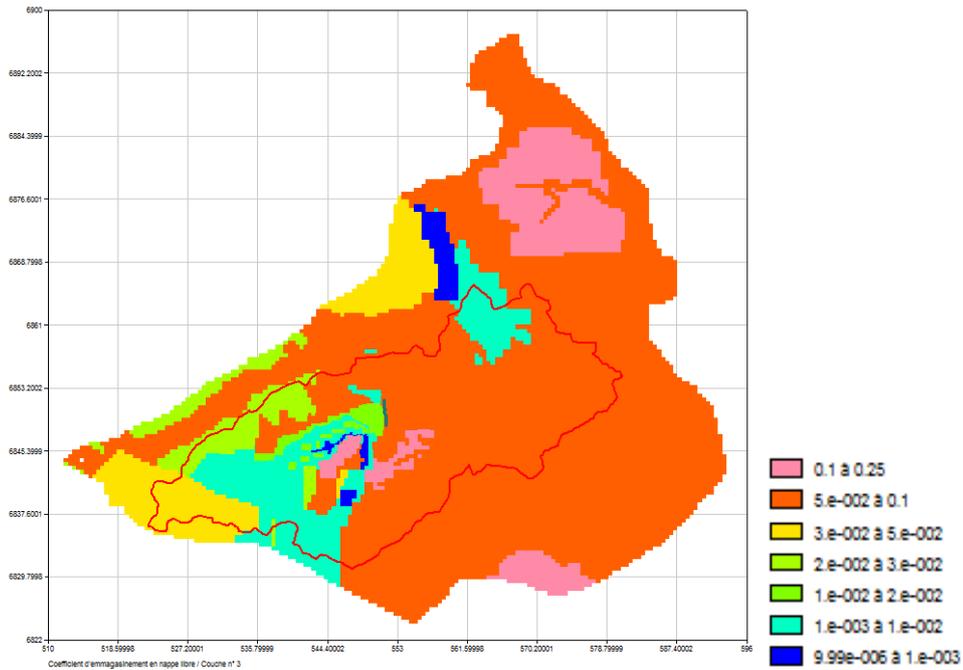
Coefficient d'emmagasinement en nappe libre à l'issue du calage en transitoire dans les alluvions et formations à silex



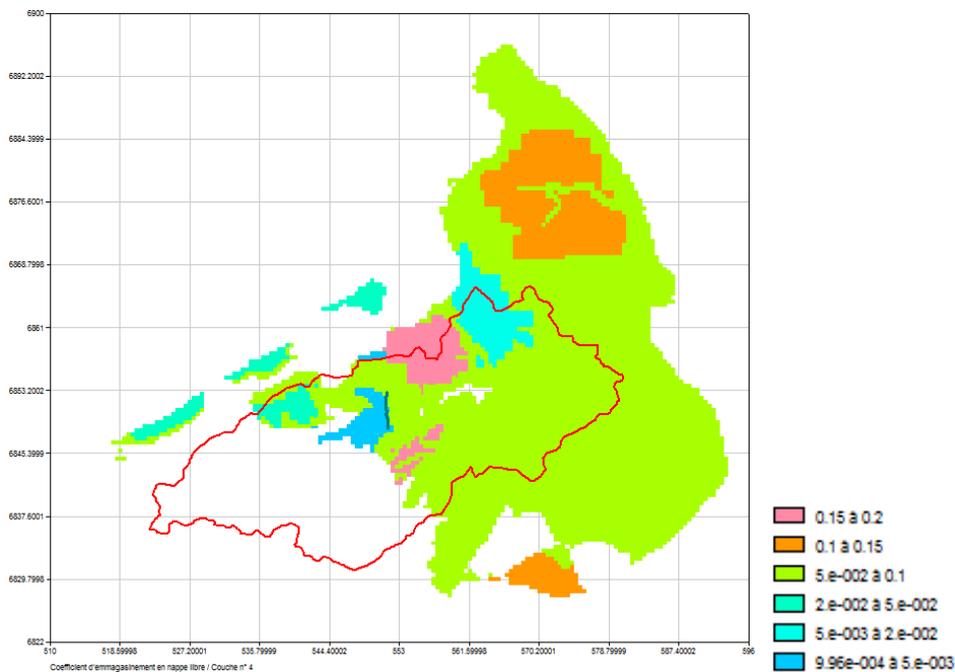
Coefficient d'emmagasinement en nappe libre à l'issue du calage en transitoire dans les Sables du Perche



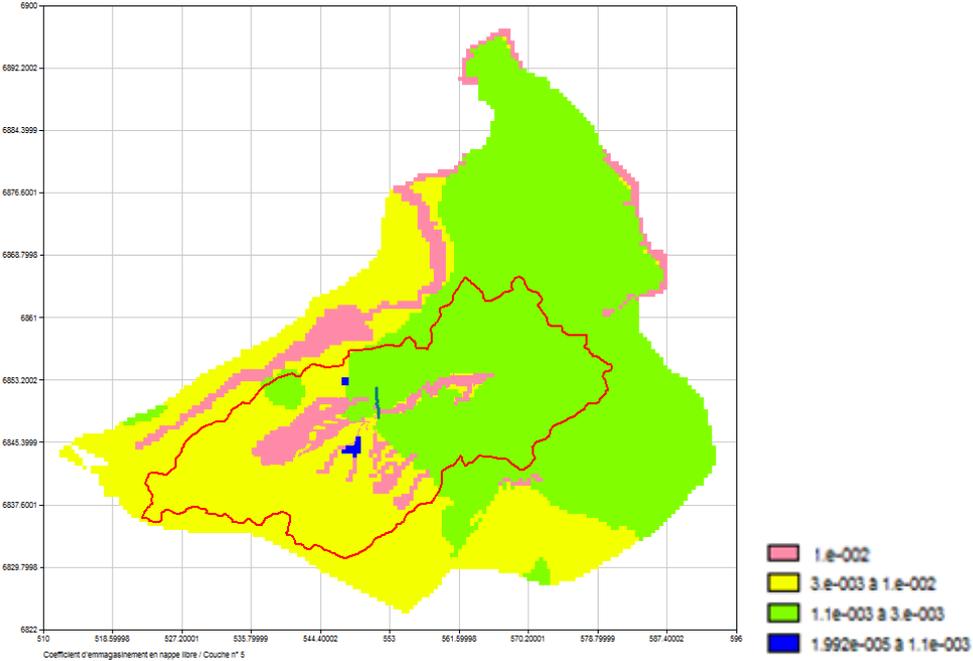
Coefficient d'emmagasinement en nappe libre à l'issue du calage en transitoire dans la craie altérée intégrant les karsts



Coefficient d'emménagement en nappe libre à l'issue du calage en transitoire dans la craie du Sénonien et du Turonien moyen et supérieur



Coefficient d'emménagement en nappe libre à l'issue du calage en transitoire dans la craie du Turonien inférieur et du Cénomanién



Annexe 7

Support de la présentation faite par le SIVA lors de la réunion du COPIL 7 le 05/07/2016

Etude quantitative Avre

Copil n°7

05 juillet 2016

Contexte

- ✓ Nappe de la craie 3211 identifiée en tension quantitative à l'échelle du bassin de l'Avre en lien avec un fonctionnement hydrogéologique particulier et des prélèvements importants,
- ✓ La DREAL et l'AESN ont donc missionné le BRGM pour réaliser une étude sur l'impact des prélèvements afin de définir des règles de gestion volumique de la ressource,

Contexte

Les différentes phases de l'étude

1. Etat de la connaissance
2. Analyse des données (rapport final Février 2012)
3. Acquisition de données complémentaires :
 - campagne multitraçages en **juillet 2013**,
 - campagne géophysique entre **février et avril 2013**,
 - suivi piézométrique depuis **septembre 2013**,
4. Construction du modèle
5. Exploitation du modèle pour établir des règles de gestion

Contexte

- ✓ OBJECTIF : Une gestion équilibrée prenant en compte les usages et la préservation des milieux aquatiques
- ✓ L'outil de gestion des prélèvements nécessite pour être exploité d'intégrer des valeurs minimales de débit à respecter, **DMB** ou **débits d'objectifs d'étiage** (constitution d'un groupe de travail rivière)

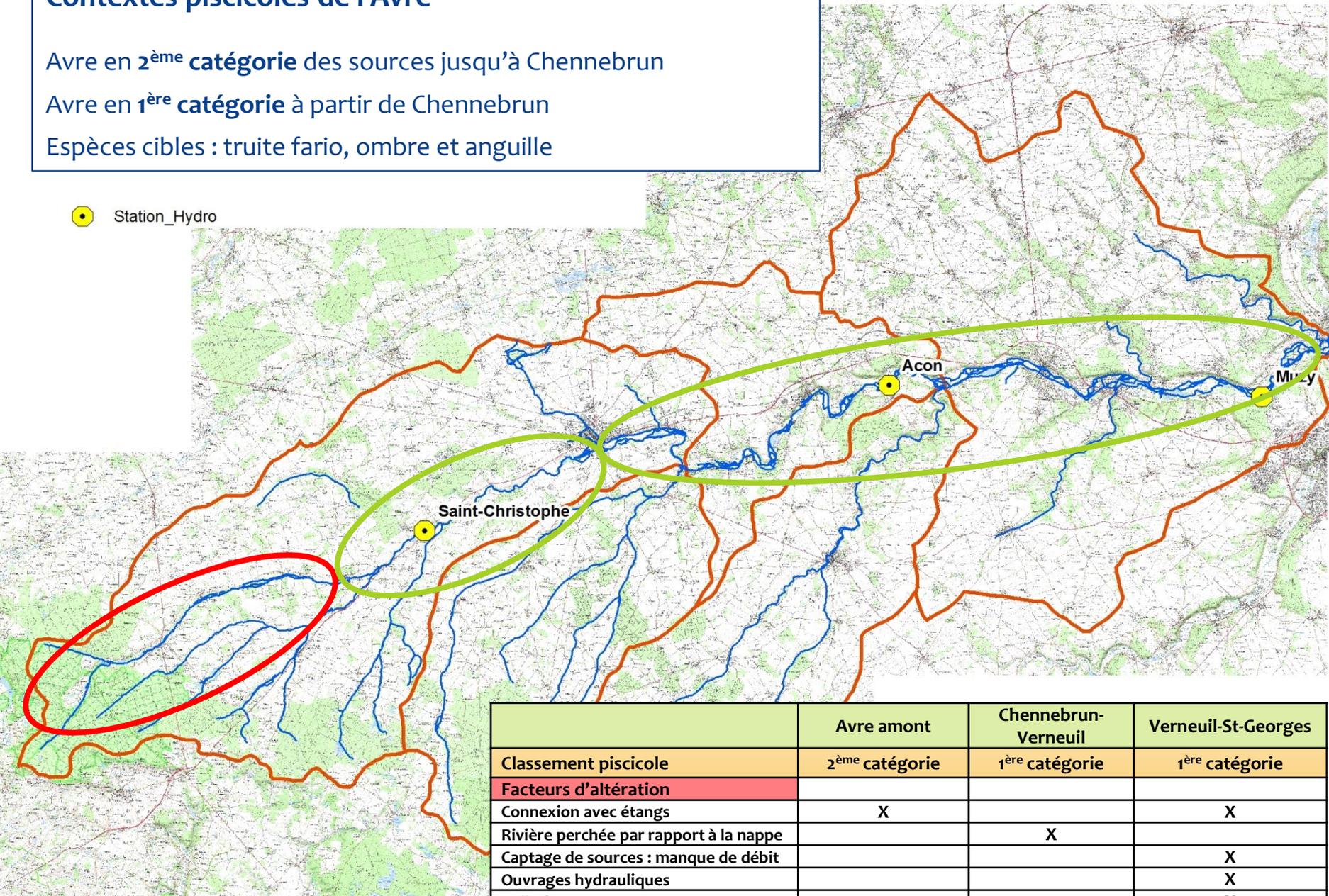
Contextes piscicoles de l'Avre

Avre en 2^{ème} catégorie des sources jusqu'à Chennebrun

Avre en 1^{ère} catégorie à partir de Chennebrun

Espèces cibles : truite fario, ombre et anguille

● Station_Hydro



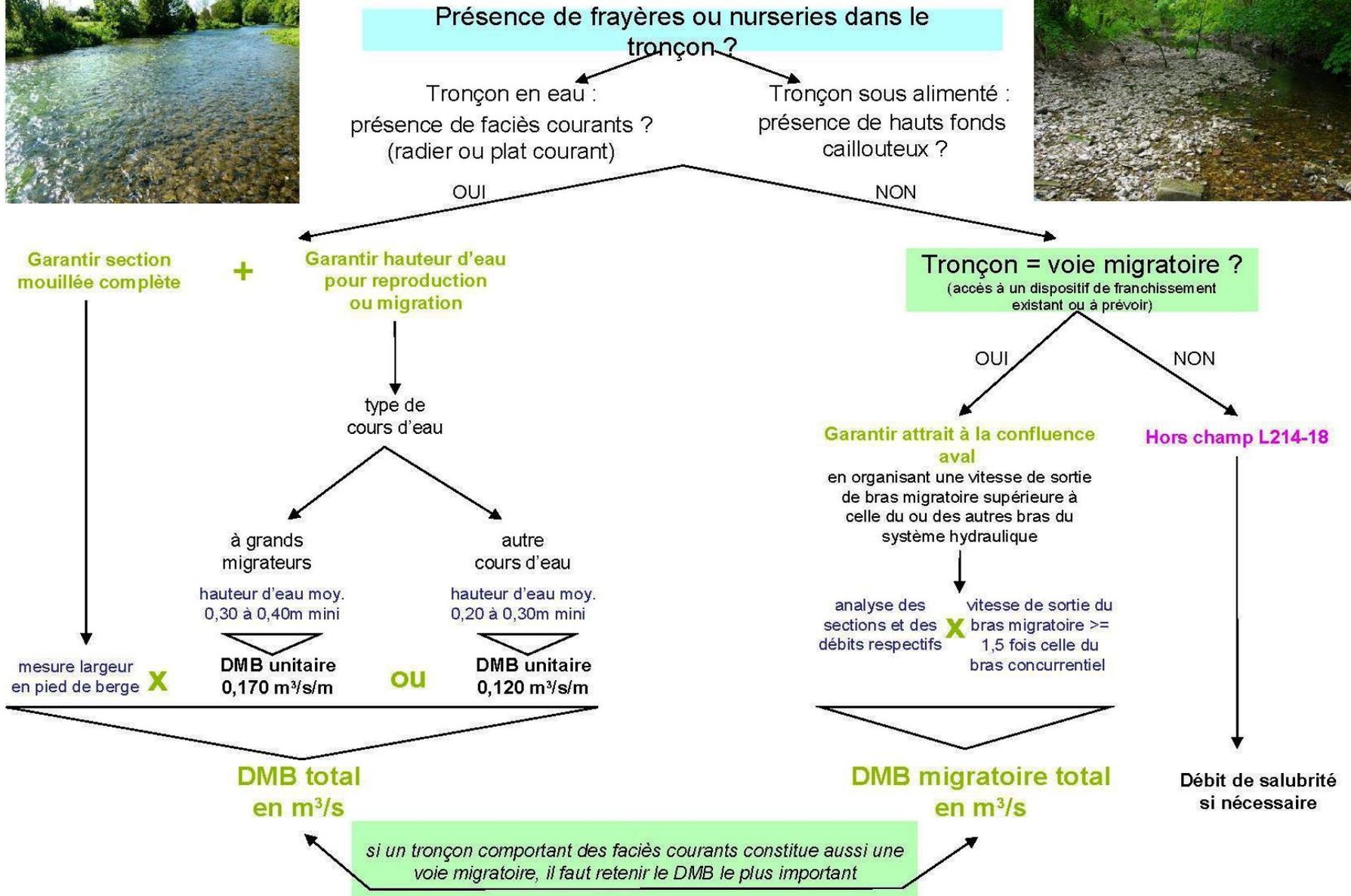
	Avre amont	Chennebrun-Verneuil	Verneuil-St-Georges
Classement piscicole	2 ^{ème} catégorie	1 ^{ère} catégorie	1 ^{ère} catégorie
Facteurs d'altération			
Connexion avec étangs	X		X
Rivière perchée par rapport à la nappe		X	
Captage de sources : manque de débit			X
Ouvrages hydrauliques			X
Pollutions			X

Définition du DMB

- ✓ Plusieurs méthodes existent pour définir ces Débits Minimum Biologiques (habitats, hydrologiques, hydrauliques) – en lien avec l'application de l'article L214-18 du C.E
- ✓ Suite au groupe de travail du 03 juillet 2014, le SIVA a appliqué la méthode simplifiée de l'ONEMA pendant l'étiage 2014

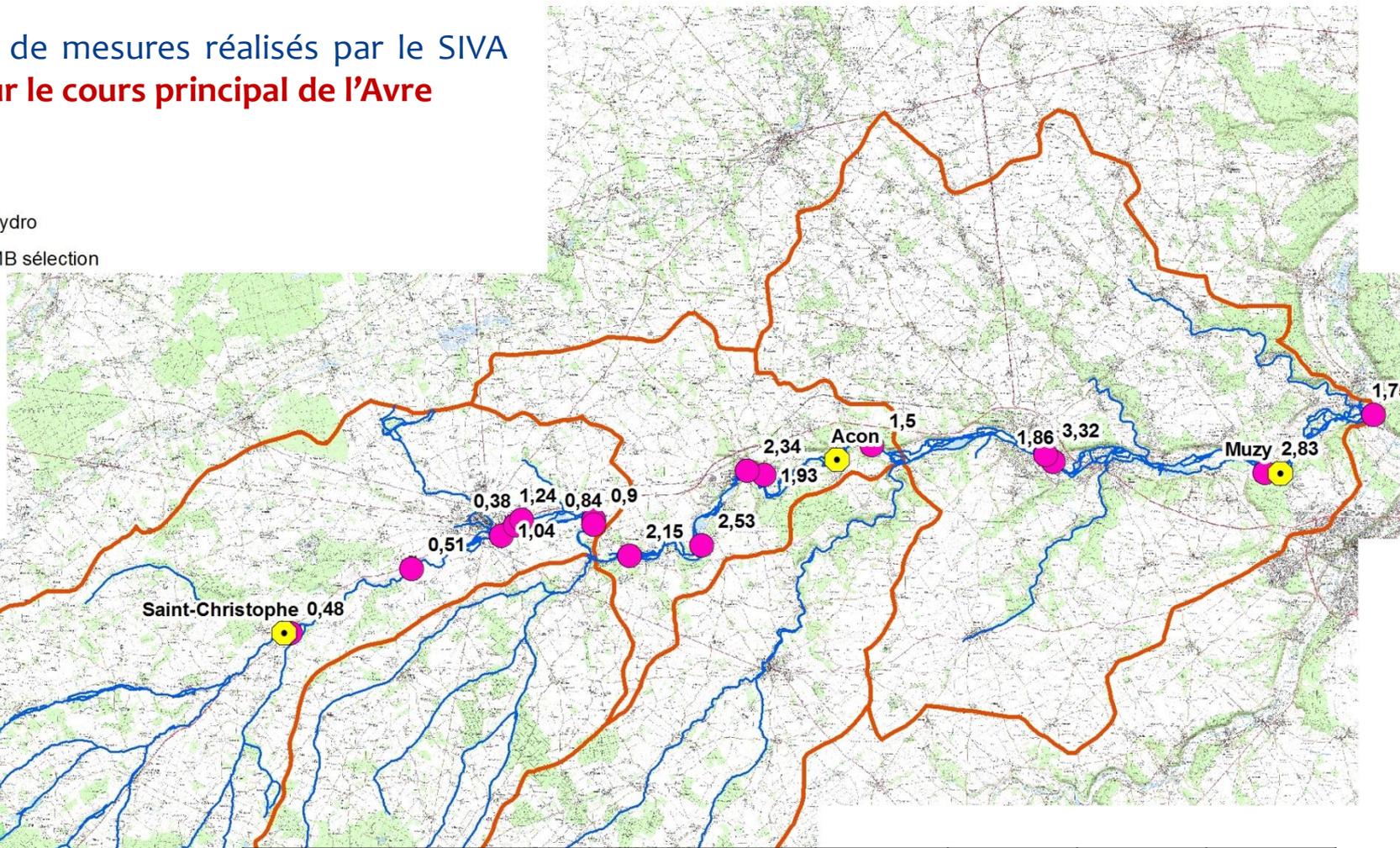
DMB = largeur en pieds de berges * 0,120 m³/s/m (sur faciès de type radier au plat courant)

Identification d'un débit minimum biologique (DMB) à maintenir en aval d'un ouvrage



52 points de mesures réalisés par le SIVA
dont 16 sur le cours principal de l'Avre

- Station_Hydro
- Points DMB sélection



Largeur pied de berge (m)	DMB calculé (m ³ /s)	Station à proximité	QJM (m ³ /s)	Module (m ³ /s)	10% du module (m ³ /s)	QMNA5 statistique (m ³ /s)
4.2	0,48	St-Christophe	0,181	0,27	0.027	0.019
12.5	1.5	Acon	3.28	2.56	0.256	0.95
23.6	2.83	Muzy	4.15	3.49	0.349	1.3

Comment faire sans DMB ?

Exemple de l'Aquifère du Bajocien /Bathonien en Basse-Normandie

- ✓ Utilisation du modèle pour obtenir :
 - les débits sans prélèvement (QMNA5 naturel simulé)
 - les débits avec prélèvements actuels (QMNA5 impacté simulé)
- ✓ Par tronçon homogène est calculé le rapport : $QMNA5_{\text{impacté}} / QMNA5_{\text{naturel}}$
- ✓ Les volumes prélevables sont calculés pour que dans chaque zone ce ratio ne dépasse pas les **30%** - c'est-à-dire qu'au minimum **70% du débit naturel simulé** soit maintenu dans les cours d'eau

Groupe de travail du 24 avril 2016

2 réflexions sur ces débits d'objectif d'étiage :

- Méthode ONEMA, le débit unitaire de $0.120 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ peut-il être ajuster pour la période d'étiage pour la truite fario ? NON
- Méthodologie du Bajocien-Bathonien, comment le seuil des 30% d'impact acceptable des prélèvements sur le débit des cours d'eau a-t-il été défini ?

Annexe 8

Comparaison des QMNA5 calculés pour chaque scénario avec les DMB et les 10ieme du module pour chaque station de jaugeage de l'Avre

	St Christophe	Randonnai	Acon	Muzy
QMNA5 simulé sans pompage (m3/s)	0.00	0.09	1.36	1.99
QMNA5 simulé avec pompage sc2a (m3/s)	0.00	0.09	1.28	1.66
QMNA5 simulé avec pompage sc2b (m3/s)	0.00	0.09	0.28	0.66
QMNA5 simulé avec pompage sc2c (m3/s)	0.00	0.09	1.02	1.40
QMNA5 simulé avec pompage historique (m3/s)	0.00	0.09	0.92	1.27
DMB (m3/s)	0.48		1.50	2.83
1/10 MODULE (module mesuré par la DREAL)	0.0332 (calcul sur 13 ans)		0.256 (calcul sur 46 ans)	0.348 (calcul sur 47 ans)
1/10 MODULE (module simulé à l'issue du calage)	0.0485 (calcul sur 23 ans)		0.316 (calcul sur 23 ans)	0.428 (calcul sur 23 ans)
1/10 MODULE naturel (module simulé sans pompage (scénario 1))	0.0488 (calcul sur 23 ans)		0.365 (calcul sur 23 ans)	0.505 (calcul sur 23 ans)



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale de Normandie
14 route d'Houpeville
76130 – Mont-Saint-Aignan
Tél. : 02 35 60 12 00