



CAractérisation des pollutions diffuses sur le bassin de la CHArenteétat des Lieux et mOdélisation [CACHALO] Phase 3: Etude des possibilités de couplage SWAT/MARTHE en s'appuyant sur la modélisation du bassin de la Boutonne

Marion Chatelier, Odile Leccia-Phelpin, Francis Bichot, Françoise Vernier

► To cite this version:

Marion Chatelier, Odile Leccia-Phelpin, Francis Bichot, Françoise Vernier. CAractérisation des pollutions diffuses sur le bassin de la CHArenteétat des Lieux et mOdélisation [CACHALO] Phase 3: Etude des possibilités de couplage SWAT/MARTHE en s'appuyant sur la modélisation du bassin de la Boutonne. [Rapport de recherche] BRGM/RP-64681-FR, BRGM; IRSTEA, UR ETBX. 2015, 112 p. hal-03638474v2

HAL Id: hal-03638474

<https://hal.science/hal-03638474v2>

Submitted on 16 May 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



CAractérisation des pollutions diffuses sur le bassin de la CHArente – état des Lieux et mOdélisation [CACHALO]

Phase 3 : Etude des possibilités de couplage
SWAT/MARTHE en s'appuyant sur la modélisation du
bassin de la Boutonne

Rapport final

BRGM/RP-64681-FR
Août 2015

CAractérisation des pollutions diffuses sur le bassin de la CHArente – état des Lieux et mOdélisation [CACHALO]

Phase 3 : Etude des possibilités de couplage
SWAT/MARTHE en s'appuyant sur la modélisation du
bassin de la Boutonne
Rapport final

BRGM/RP-64681-FR
Août 2015

**CHATELIER M. (BRGM),
LECCIA O. (IRSTEA), F. BICHOT (BRGM), VERNIER F. (IRSTEA)**

Vérificateur :

Nom : Nicolas DEVAU
Fonction :
Hydrogéologue/Géochimiste
Date : 18/03/2015
Signature : 

Approbateur :

Nom : Nicolas PEDRON
Fonction : Directeur du Goupement
inter-régional Sud-Ouest (*p.i.*)
Date : 08/08/2015
Signature : 

Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots-clés : Modélisation, SWAT, MARTHE, nitrates, Boutonne, Charente, pratiques agricoles

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

CHATELIER M. (BRGM), LECCIA O. (IRSTEA), BICHOT F. (BRGM), VERNIER F. (IRSTEA) (2015) – CAractérisation des pollutions diffuses sur le bassin de la CHArente – état des Lieux et mOdélisation [CACHALO]. Phase 3 : Etude des possibilités de couplage SWAT/MARTHE en s'appuyant sur la modélisation du bassin de la Boutonne. Rapport final. BRGM/RP-64681-FR, 113 p., 69 ill., 1 ann.

Synthèse

Le projet « **CA**ractérisation des pollutions diffuses sur le bassin de la **CH**arente – état des **L**ieux et **mO**délisation [**CACHALO**] » comprend plusieurs phases successives réalisées sur plusieurs années.

La première phase¹ a permis de faire un état des lieux (2009) assez détaillé de l'état des nappes vis à vis des nitrates dans le bassin versant de la Charente à partir des données disponibles et de nouvelles analyses de terrain sur des sources et forages. Parallèlement, 4 sources ont été équipées (Sompt, St-Fraigne, Mouthiers et Touvre) de manière à faire un suivi quantitatif et qualitatif. Ce premier état des lieux confirme le caractère particulièrement dégradé de la ressource souterraine dans ce bassin versant, avec toutefois des disparités fortes.

La seconde phase² a principalement consisté à faire le même état des lieux (2011) mais vis-à-vis des pesticides.

Parallèlement, l'IRSTEA conduisait avec le soutien de l'Agence de l'eau Adour-Garonne un travail sur les pratiques agricoles du bassin de la Charente, dans le cadre notamment du projet MODCHAR. Ce travail a conduit l'IRSTEA à utiliser le logiciel SWAT couplé à un module GENLU2 développé par l'IRSTEA.

Afin de faire converger ces différents travaux et de bénéficier des compétences complémentaires d'IRSTEA et du BRGM, un premier travail exploratoire³ a été mené en 2012 par le BRGM, avec le soutien de l'Agence de l'eau et en collaboration avec l'IRSTEA, pour examiner la possibilité de coupler SWAT(GENLU2) et MARTHE (modèles hydrodynamiques BRGM des nappes du Jurassique et du Crétacé de la région Poitou-Charentes).

Les résultats encourageant de ce premier travail exploratoire ont conduit à mettre en place une nouvelle opération, CACHALO3, visant, toujours à partir de la modélisation du bassin de la Boutonne, à mieux cerner les difficultés d'un couplage SWAT/MARTHE. L'objectif était aussi d'aboutir au cahier des charges d'un projet recherche, permettant de poursuivre le partenariat IRSTEA/BRGM et avec comme finalité la mise au point d'une modélisation intégrée du bassin de la Charente, associant les pratiques agricoles et les traitements azotés des cultures, le transfert des nitrates vers les nappes et les cours d'eau, le transport et le stockage de ces nitrates dans les nappes.

Le présent rapport rend compte de cette nouvelle phase, CACHALO3, conduite en 2013/2014 et qui a permis d'améliorer la modélisation sur différents points concernant en premier abord, les données d'entrée et de forçage, les données agronomiques, ensuite, la discrétisation spatiale et enfin les processus de calibration.

¹ Bichot F., Marchais E., Chatelier M (2011) – Bassin de la Charente : recherche d'une méthodologie pour prévoir l'évolution des teneurs en nitrates et produits phytosanitaires en fonction des pratiques anthropiques. Phase 1 : Etat des lieux par rapports aux nitrates. Rapport final. BRGM/RP-59154-FR, 194 p., 8 ill.

² Chatelier M avec la collaboration de Subra Ph et Durand J. (2013) – Bassin de la Charente : recherche d'une méthodologie pour prévoir l'évolution des teneurs en nitrates et produits phytosanitaires en fonction des pratiques anthropiques. Phase 2 : Etat des lieux par rapports aux phytosanitaires. Rapport final. BRGM/RP-62254-FR, 290 p., 263 fig., 3 tabl., 7 ann.

³ Douez O., Chatelier M., Cussey S. (2012) – Faisabilité d'une modélisation du transfert azoté du sol vers les nappes et les rivières. BRGM/RP-61823-FR, 70 p., 45 ill., 3 ann.

En premier lieu, il y a eu intégration des données hydrométéorologiques mobilisées dans MARTHE et analyse de leur contribution à l'intégration plus avancée des deux modèles. Le jeu de données agronomiques modélisées dans SWAT (occupation agricole/pratiques) a été enrichi.

L'analyse des données hydrométéorologiques d'entrée (précipitations, températures minimum et maximum), des méthodes de calcul de l'évapotranspiration potentielle a été faite.

Les systèmes de cultures et leurs pratiques associées ont été modélisés de façon dynamique avec l'adaptation évolutive de l'application GENLU2.

En second lieu, la discrétisation hydrographique affinée du bassin de la Boutonne en 9 sous-bassins a permis une confrontation avancée avec les stations virtuelles de sortie de débit et de qualité des eaux de MARTHE. Les bilans de flux hydriques et de nitrates sont en effet restitués par SWAT à chaque exutoire, seul point possible de confrontation quantité et qualité.

Enfin, les processus de calibration sur les paramètres hydrométriques de SWAT pour évaluer la valeur prédictive du modèle à l'aide d'une méthode d'optimisation semi-automatique ont été étendus.

Les analyses de sensibilité menées à l'échelle du bassin et des sous bassins monitorés ont permis d'identifier les paramètres les plus influant dans la réponse hydrologique.

Les processus de calibration / validation aux débits de la banque hydro se sont enrichis de points de confrontation aux points virtuels de restitution des débits MARTHE aux nouveaux exutoires SWAT (apport de nouveau découpage hydrographique).

Une optimisation a été faite sur certains paramètres de qualité de l'eau liés au routage et au devenir de l'azote dans le milieu modélisé (sols et eaux) afin de caler les concentrations simulées sur les mesures en rivières de l'agence de l'eau Adour Garonne.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Rappels : le bassin versant de la Boutonne	13
2.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	13
2.2. OCCUPATION DU SOL	13
2.3. CONTEXTE GEOLOGIQUE, HYDROGEOLOGIQUE ET PEDOLOGIQUE	16
2.3.1. Géologie	16
2.3.2. Hydrogéologie.....	17
2.3.3. Les échanges nappe/rivière	21
2.4. PEDOLOGIE.....	21
2.5. QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES.....	23
3. Méthodologie.....	25
3.1. LE MODELE BOUTONNE SOUS SWAT	25
3.1.1. Le modèle SWAT.....	25
3.1.2. Premier modèle Boutonne (2012)	25
3.2. LE MODELE BOUTONNE SOUS MARTHE	26
3.2.1. Le logiciel MARTHE.....	26
3.2.2. Le modèle Boutonne : extraction du modèle hydrodynamique régional...27	
3.3. LES OBJECTIFS ET LA METHODOLOGIE SUIVIE	28
3.3.1. Résultats de la première étude exploratoire (2012).....	28
3.3.2. Méthodologie suivie dans le présent travail.....	29
4. Optimisation du modèle Boutonne sous SWAT.....	33
4.1. PARAMETRISATION DU MODELE SWAT-BOUTONNE	33
4.1.1. Agronomie et pédologie	34
4.1.2. Géométrie du modèle	36
4.1.3. Météorologie	37
4.1.4. Prélèvements hydriques.....	41
4.1.5. HRU.....	43
4.2. COMPARAISON DES RESULTATS DES 2 MODELES EN TERME DE FLUX.....	44
4.2.1. Analyse de sensibilité	44
4.2.2. Calibration/calage sur les stations hydrométriques	46
4.2.3. Comparaison des bilans entrée/sortie	53
4.2.4. Comparaison des flux de recharge	60

4.3. CONFRONTATION DES RESULTATS DE SWAT AUX TENEURS MESUREES EN RIVIERE	63
5. Modélisation des transferts de nitrates sous MARTHE.....	67
5.1. PARAMETRISATION DU MODELE	67
5.1.1. Emprise géographique	67
5.1.2. Conditions aux limites.....	67
5.1.3. Conditions initiales.....	69
5.1.4. Données d'intrants d'IRSTEA	69
5.1.5. Méthode de calcul, pas de temps	73
5.2. RESULTATS	73
5.2.1. Chroniques observées/simulées.....	73
6. Suivi en continu de 4 sources.....	85
7. Conclusion, propositions	99
8. Bibliographie	103

Liste des illustrations

Illustration 1 : Modelé topographique du bassin versant de la Boutonne (source MNT)	13
Illustration 2 : Occupation du sol modélisée sur le bassin versant de la Boutonne (source : Irstea Bordeaux, unité ETBX, équipe projet MODCHAR)	15
Illustration 3 : Tableau des rotations par type de sols simplifié utilisé pour la modélisation du bassin de la Boutonne (source : Irstea Bordeaux, unité ETBX, équipe projet MODCHAR et chambre régionale d'agriculture Poitou Charentes)	16
Illustration 4 : Géologie et réseau hydrographique sur le bassin versant de la Boutonne	19
Illustration 5 : le réseau hydrographique et les relations nappes rivières (Bichot. et al., 2005 ; Lemordant, 1998).....	20
Illustration 6 : Types de sols simplifiés sur le bassin versant de la Boutonne (source : Irstea Bordeaux , unité ETBX, équipe projet MODCHAR et CRA Poitou Charentes, 2012)	22
Illustration 7 : Unités cartographiques de sol (UCS) présentes sur le bassin de la Boutonne et utilisées dans la modélisation SWAT (source : données IGCS, traitement Irstea Bordeaux, unité ETBX, équipe projet MODCHAR 2012)	23
Illustration 8 : Zonage des teneurs en nitrates sur le bassin versant de la Boutonne (Domez, 2008).....	24
Illustration 9 : Représentation spatiale d'un système multicouche sous MARTHE.....	26
Illustration 10 : Système de réseau de rivière connecté à la grille	27
Illustration 11 : Extension du modèle sur la Boutonne par rapport à l'emprise du modèle hydrodynamique régional	28
Illustration 12 : Flux entrée/sortie sous MARTHE matérialisés par les flèches.....	31
Illustration 13 : Bilan simplifié des flux entrée/sortie sous SWAT (matérialisés par les flèches) pour la configuration retenue pour le projet SWAT-Boutonne. Pour une description détaillée se référer à (Neitsch et al. 2011).	31
Illustration 14 : Schéma synoptique de la méthodologie générale suivie pour la modélisation SWAT (IRSTEA) (source : Irstea Bordeaux, unité ETBX, équipe projet MODCHAR)	33
Illustration 15 : Caractérisation du Landuse 2014 du modèle SWAT « Boutonne » avec les successions culturales modélisées. (source IRSTEA, unité ETBX, équipe projet MODCHAR et CRA Poitou-Charentes).....	35
Illustration 16 : Délimitation du bassin versant de la Boutonne avec la zone hydrographique restreinte au barrage de Carillon (source Irstea Bordeaux, unité ETBX, Equipe Projet Modchar). ..	37
Illustrations 17 a & b : Réseau hydrographique plus fin et calage facilité avec les stations de mesure des débits (a) et des concentrations de NO3 (b) (source : Irstea Bordeaux, unité ETBX)	39
Illustration 18 : Confrontation des réseaux hydrographiques des modèles SWAT et MARTHE (source : Irstea Bordeaux, unité ETBX, équipe projet MODCHAR)	40
Illustration 19 : Affectation des stations météorologiques aux sous bassins SWAT et aux mailles MARTHE (source : Irstea Bordeaux, unité ETBX, équipe projet MODCHAR)	40
Illustrations 20 a & b : Spatialisation des données de prélèvement au sous-bassin versant (source : Irstea Bordeaux, unité ETBX, équipe projet MODCHAR)	42
Illustration 21 : Discrétisation en combinaisons uniques sols * occupations du sol (HRU) / SBV (source Irstea Bordeaux unité ETBX, Equipe Projet Modchar)	43
Illustrations 22 a et b : Analyses de sensibilité des paramètres gérant les flux hydriques pour les SBV 8 (a) et SBV-1 (b).....	45
Illustration 23 : Chroniques de débit de cours d'eau mesurées sur le terrain ou fictives (MARTHE)	46

Illustrations 24 a et b : Calage et analyse d'incertitude aux stations de Carillon (a) et de St Séverin (b) sur la période 2001 à 2005	47
Illustration 25 : Sous bassins versants du projet Boutonne –SWAT dans les environs de St-Jean-d'Angély	48
Illustration 26 : Correspondance entre les chroniques de débit aux exutoires des modèles MARTHE et SWAT. La localisation des exutoires MARTHE et SWAT sont consultables sur l'illustration 27.	49
Illustration 27 : Sous bassins versants du projet Boutonne -SWAT et données hydrométriques disponibles	50
Illustration 28 : Débits simulés par les modèle SWAT et MARTHE : exemples des exutoires des sous bassins 1, 5, 7 et 4.	51
Illustration 29 : Débits simulés par les modèles SWAT et MARTHE : exemples des exutoires des sous bassins 2, 3 et 8.	52
Illustration 30 : Bilans entrées/sorties sur les sous bassins de la Trézence : comparaison MARTHE/SWAT (avec la méthode de prélèvement au sous-bassin).	56
Illustration 31 : Bilans entrées/sorties sur les sous bassins de la Boutonne amont/médiane : comparaison MARTHE/SWAT(avec la méthode de prélèvement au sous-bassin).	57
Illustration 32 : Bilans entrées/sorties sur les sous bassins de la Nie et de la Boutonne aval : comparaison MARTHE/SWAT (avec la méthode de prélèvement au sous-bassin).	58
Illustration 33 : Bilans entrées/sorties sur le sous-bassin de la Boutonne terminal : comparaison MARTHE/SWAT (avec la méthode de prélèvement au sous-bassin).	59
Illustration 34 : Exemple de chroniques de recharge comparées à l'échelle du sous bassin 1.	60
Illustration 35 : Exemple du rapport des flux de recharge simulés par les modèle MARTHE et SWAT à l'échelle du sous bassin 1.	61
Illustration 36 : Rapport des flux de recharge MARTHE/SWAT pour différentes périodes et sur l'extension du domaine modélisé	62
Illustrations 37 a b et c : Concentrations en NO ₃ mesurées (2000 – 2007) aux stations AEAG du bassin de la Boutonne : a) exemple de 3 chroniques, b) carte des stations, c) concentrations moyennes et nombre d'analyses par station (source Irstea Bordeaux unité ETBX, Equipe Projet Modchar)	64
Illustration 38 : confrontation des concentrations moyennes mensuelles simulées à l'exutoire du SBV 1 aux concentrations ponctuelles observées sur la station de Pont-des-Loges.....	65
Illustration 39 : Conditions limites du modèle Boutonne sous MARTHE (charges et concentrations en nitrates)	68
Illustration 40 : Concentrations initiales en nitrates au début de la simulaion.....	69
Illustration 41 : Flux massiques azotés cumulés rejoignant la nappe en 2006 (sorties SWAT agrégées)	71
Illustration 42 : Flux massique azoté rejoignant la nappe en août 2006 (sorties SWAT agrégées).....	71
Illustration 43 : Flux massique azoté rejoignant la nappe en février 2006 (sorties SWAT agrégées)	72
Illustration 44 : Flux massiques rejoignant la rivière par ruissellement pour l'année 2006 (base SURQ) .	73
Illustration 45 : Résultat du re-calage des piézomètres à la nappe du Jurassique supérieur.....	75
Illustration 46 : Résultat du re-calage des piézomètres à la nappe du Dogger.....	76
Illustration 47 : Résultat du re-calage des piézomètres à la nappe de l'Infra-Toarcien	77
Illustration 48 : Cartographie des qualitomètres en nappe utilisés pour le calage sous MARTHE (désignés par leur indice BSS)	78

Illustration 49 : Comparaison des chroniques issues du modèle (trait vert) aux analyses de terrain réalisées sur les qualitomètres (point rouge) à la nappe du Jurassique supérieur	79
Illustration 50 : Comparaison des chroniques issues du modèle (trait vert) aux analyses de terrain réalisées sur les qualitomètres (point rouge) à la nappe du Dogger	80
Illustration 51 : Comparaison des chroniques issues du modèle (trait vert) aux analyses de terrain réalisées sur les qualitomètres (point rouge) à la nappe de l'Infra-Toarcien	81
Illustration 52 : Comparaison des chroniques issues du modèle (trait vert) aux mesures réalisées en rivière (points rouge) (cf. localisation des stations sur illustration 37)	82
Illustration 53 : Propriétés physico-chimiques suivies, matériels utilisés pour réaliser ces mesures et pas de temps d'acquisition.	86
Illustration 54 : Evolution des débits à la source de Sompt et comparaison avec les pluies à la station de Melle (les données ETP ne sont pas disponibles sur la totalité de la période considérée). Trait plein : moyenne mobile sur 48h, graphe du haut : comparaison des débits restitués par la sonde avec les mesures de jaugeage sur le terrain.	87
Illustration 55 : Evolution des températures à la source de Sompt. Trait plein : moyenne mobile sur 48h.	88
Illustration 56 : Evolution de la conductivité (violet) et du pH (gris) sur la source de Sompt	88
Illustration 57 : Evolution des teneurs en nitrates et des débits à la source de Sompt.....	89
Illustration 58 : Débit de la Touvre à la station de Foulpougne et pluviométrie décadaire de la station de la Couronne-Angoulême.....	90
Illustration 59 : Température des eaux à l'émergence du Bouillant, sources de la Touvre.	91
Illustration 60 : Conductivité électrique et pH des eaux de l'émergence du Bouillant, source de la Touvre.....	91
Illustration 61 : Evolution des teneurs en nitrates et des débits à l'émergence du Bouillant, source de la Touvre.....	92
Illustration 62 : Evolution du débit de la source de Moulin Neuf (Trait plein:moyenne mobile sur 48h) sur l'histogramme des pluies décadaires de la station météorologique de Tusson.	93
Illustration 63 :Température de l'eau de la source de Moulin Neufcomparée aux débits	94
Illustration 64 : Conductivité électrique mesurée à la source de Moulin Neuf	94
Illustration 65 : Corrélation positive entre le débit et les teneurs en nitrates de la source de Moulin Neuf.	95
Illustration 66 : Débit estimé de la source de Forge et pluviométrie décadaire. Le trait plein représente la moyenne mobile sur 48 h, graphe du haut : comparaison des débits mesurés par la sonde avec les mesures de jaugeage ponctuelles.....	96
Illustration 67 : Température de l'eau de la source de Forge entre 2009 et 2014. Le trait plein représente la moyenne mobile sur 48 h.	97
Illustration 68 : Conductivité électrique et pH mesurés sur les eaux de la source de Forge entre 2009 et 2014. Le trait plein représente la moyenne mobile sur 48 h.	97
Illustration 69 : Débit estimé et teneurs en nitrates mesurées sur les eaux de la source de Forge entre 2009 et 2014. Le trait plein représente la moyenne mobile sur 48 h.	98

Liste des annexes

Annexe 1 Mesures et interventions de terrain sur les 4 sources suivies	107
--	-----

1. Introduction

La Directive Cadre sur l'Eau suppose d'approcher au plus près les tendances d'évolution des polluants en fonction de plusieurs scénarios de pratiques anthropiques et fixe des objectifs de qualité à court terme (horizon 2017) pour les eaux souterraines comme pour les eaux superficielles. De récents états des lieux réalisés par le BRGM sur le bassin versant de la Charente soulignent le caractère particulièrement dégradé des nappes de ce bassin que ce soit vis-à-vis des nitrates ou des produits phytosanitaires (Domez, 2008 ; Bichot *et al.*, 2011 ; Chatelier *et al.*, 2013). La forte pression agricole exercée sur le bassin et les pratiques inhérentes aux principales cultures (maïs, oléagineux etc.) sont à l'origine de cette dégradation. Dans ce contexte, environnemental et législatif, l'AEAG a sollicité le BRGM pour engager une réflexion autour de la modélisation des flux d'azote de la surface des sols vers les nappes. Cette sollicitation témoigne du besoin pressant de disposer d'outils pour évaluer l'impact de modifications des pratiques agricoles sur la qualité des eaux souterraines. Sur le bassin de la Charente, ces besoins sont relayés par l'EPTB en charge de conduire le SAGE.

Le BRGM Poitou-Charentes est attaché à cette problématique et envisage depuis quelques années l'adaptation des modèles hydrodynamiques existants, notamment ceux des nappes du Jurassique et du Crétacé supérieur en Charente développés sous MARTHE, à la modélisation des transferts azotés.

De son côté, l'Irstea travaille depuis 2002 dans le bassin versant de la Charente sur les relations entre systèmes agricoles et pratiques culturales et le transfert d'azote ou de pesticides vers les eaux superficielles. Pour cela, l'IRSTEa utilise une méthode de qualification des activités agricoles sur des territoires à enjeu eau intégrée avec des modèles, agro-hydrologique (SWAT) et économique (optimisation avec Gams)

Cette méthode développée au cours de plusieurs projets de recherche permet l'évaluation environnementale des scénarios de pratiques agricoles. Couplée au modèle SWAT, une application informatique, GENLU2, développée spécifiquement à IRSTEa permet de prendre en compte la complexité des systèmes et des pratiques décrits par la modélisation des systèmes agricoles spécifiques à chaque zone d'étude (Vernier *et al.* 2009) (Bordenave *et al.* 2009, Leccia *et al.* 2012, Lescot *et al.* 2013)

De ces objectifs communs est donc née, en 2012, une collaboration entre le BRGM et l'IRSTEa, collaboration soutenue par l'Agence de l'Eau Adour Garonne (AEAG). La force de cette démarche réside dans la synergie entre l'expertise de l'IRSTEa en agronomie et environnement (relations agriculture-ressource en eau, qualification de l'agriculture, etc.), leurs relations privilégiées avec les acteurs du monde agricole et l'expertise du BRGM sur la modélisation des flux d'eau en nappe et en rivière couplée à l'existence de modèles reconnus pour leur fiabilité sur des questions de gestion quantitative. Ce partenariat doit s'inscrire dans la durée en permettant à ces organismes de recherche de mettre au point des outils ayant ensuite une vocation d'appui aux politiques publiques.

En 2012, Cusset *et al.* ont réalisé une synthèse bibliographique des couplages possibles entre modèles de transfert et MARTHE. A la suite de ce travail, un travail exploratoire a été conduit pour examiner la faisabilité d'une modélisation couplée MARTHE/SWAT sur le bassin versant de la Charente. Pour cerner la méthodologie, ce premier travail a pris comme site pilote le bassin versant de la Boutonne. Ce bassin a le triple intérêt d'être bien connu quant à son fonctionnement hydrogéologique, de témoigner d'une dégradation contrastée de la qualité des

eaux souterraines et de faire l'objet de caractéristiques agronomiques/pédologiques approchés par l'IRSTEA.

Dans le cadre de ce premier travail, les données d'intrants rejoignant la nappe dans SWAT ont été implémentées en entrée du modèle MARTHE. Les simulations conduites ont montré la sensibilité des concentrations simulées sous MARTHE aux chroniques d'intrants fournis par l'IRSTEA. Des routines de transfert de données ont été développées pour faciliter l'implémentation des données SWAT sous MARTHE.

Ces échanges ont montré l'intérêt d'un partenariat entre IRSTEa, qui dispose de l'expertise sur les pratiques agricoles et le BRGM qui apporte son expérience sur le domaine hydrogéologique. Si ces premiers échanges et développements restent embryonnaires, ils ont néanmoins contribué à développer plusieurs pistes de réflexions et d'améliorations collaboratives afin aboutir à une représentation satisfaisante de la réalité (calage sur les chroniques et cartographies existantes), en particulier :

- besoin de confronter les flux sortant des 2 modèles, notamment de comparer les répartitions entre ruissellement et infiltration,

- besoin d'ajuster les paramètres coté SWAT (notamment préciser les pratiques culturales) comme coté BRGM (paramètres du transport...),

- besoin de mettre au point des procédures automatiques permettant de transférer les données d'un modèle à l'autre, de manière notamment à faciliter (pour des scénarios à simuler) des modifications des HRU ou du maillage dans MARTHE (modèle gigogne).

Ce programme de travail « CACHALO3 » vise donc à poursuivre le partenariat IRSTEa/BRGM avec comme objectif un meilleur ajustement des modèles basés sur SWAT d'une part et sur MARTHE d'autre part, en s'appuyant sur le cas du bassin de la Boutonne.

Le programme de travail prévisionnel se décomposait comme suit (pour le BRGM) :

1. Poursuite des échanges avec IRSTEa à qui le BRGM communiquera les flux sortant du modèle MARTHE sur la Boutonne pour les comparer aux flux sortant de SWAT.
2. Intégration de nouveaux jeux de données communiqués par IRSTEa ; ceci suppose qu'IRSTEA ajuste de son côté les paramètres en précisant notamment les pratiques agricoles sur ce bassin versant.
3. Phase de calage du modèle « Boutonne » sur les chroniques nitrates disponibles avec test de sensibilité sur les paramètres.
4. Parallèlement suivi des 4 sites installés sur le terrain (Sompt, Touvre, St-Fraigne, Mouthiers) qui serviront de points de référence pour les modélisations ultérieures : maintien du matériel, relevés périodiques des données...
5. Rapport de synthèse et réunion de présentation des résultats

Ce rapport rend compte de ces derniers travaux BRGM/IRSTEA. Il met en avant les pistes d'amélioration possibles et les développements méthodologiques nécessaires à la mise en place d'une modélisation des transferts d'azote, à l'aide des modèles couplés MARTHE et SWAT, à l'échelle du bassin versant de la Charente.

2. Rappels : le bassin versant de la Boutonne

Le rappel du contexte géographique, géologique et hydrogéologique du bassin de la Boutonne s'appuie sur les rapports BRGM de Douez, 2008 et de Bichot et *al.*, 2011.

2.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE

Le bassin versant de la Boutonne, d'une superficie d'environ 1300 km², est situé à cheval sur les départements des Deux-Sèvres, pour sa partie amont, et sur celui de la Charente-Maritime pour son tronçon aval. De quelques mètres d'altitude à la confluence de la Boutonne et de la Charente, les hauteurs peuvent atteindre +190 mètres NGF dans la zone amont du bassin versant (Illustration 1)

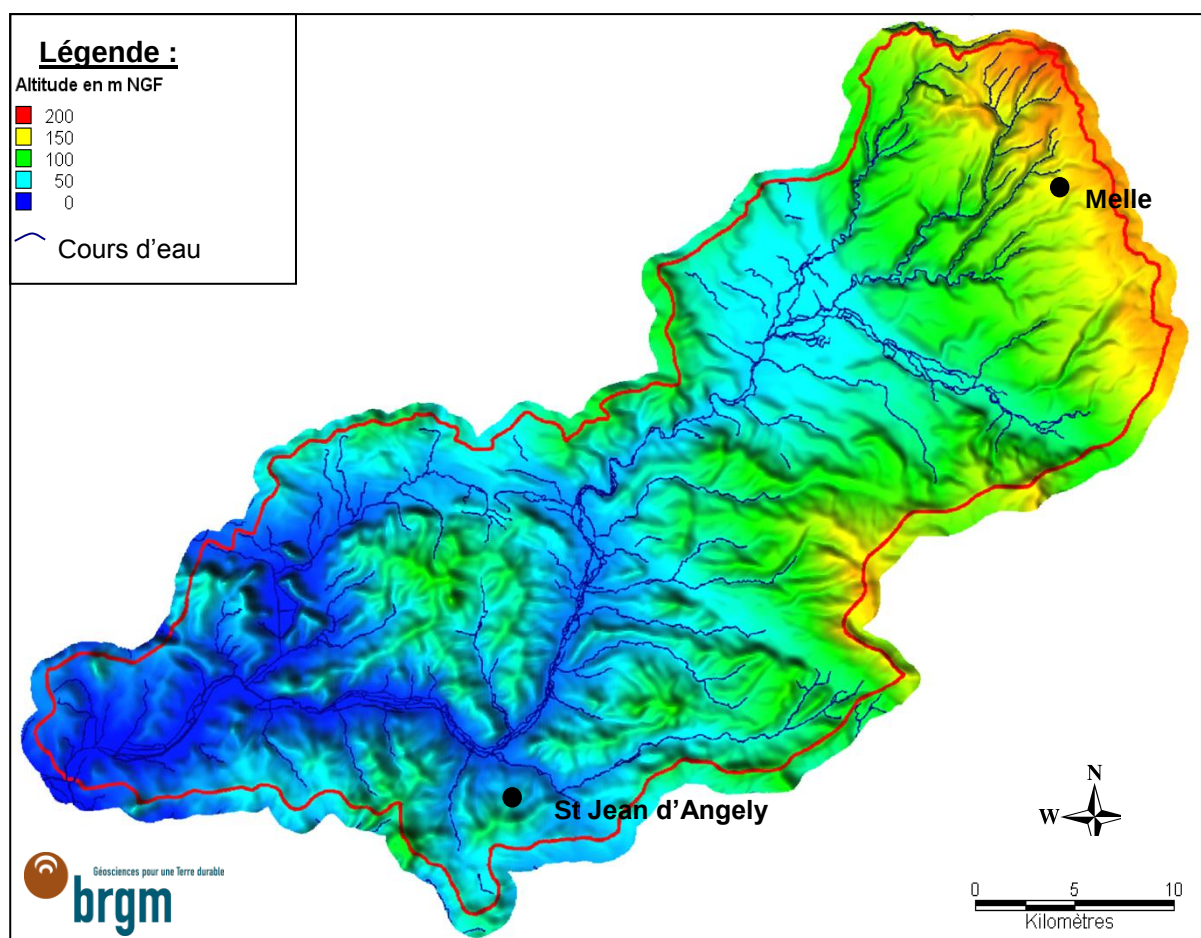


Illustration 1 : Modelé topographique du bassin versant de la Boutonne (source MNT)

2.2. OCCUPATION DU SOL

L'occupation des sols agricole est obtenue avec une démarche typologique type de sol/rotation/culture développée dans le cadre des projets Eccoter (Vernier et al, 2014) et Modchar

(Vernier et al, 2012). Il s'agit donc d'une vision « modélisée » de l'agriculture, réalisée en partie à dire d'expert avec les acteurs agricoles et par traitement SIG puisque cette typologie des rotations par type de sol est ensuite réaffectée aux ilots du RPG en respectant les surfaces de chaque culture. En revanche, les cultures minoritaires ne sont pas intégrées au modèle. L'occupation du sol non présente dans le RPG (zones urbanisées ou végétalisées, forêts etc...) est obtenue en utilisant la base de données Corine Land Cover. La couche finale d'occupation du sol obtenue et implémentée dans SWAT est présentée dans l'illustration 2.

Pour chaque culture dans chaque rotation pour chaque type de sol défini sur la zone d'étude (voir paragraphe sur la pédologie), un itinéraire complet est décrit : semis, tous types de travaux, fertilisation, traitements phytosanitaires et récolte. Les rotations principales modélisées sur la zone d'étude avec leur surface respective sont présentées dans l'illustration 3. Les ITK correspondant à chaque culture présente dans les rotations (Maïs irrigué, blé, orge, tournesol et colza, prairies temporaires) sont implémentés dans SWAT grâce au programme GENLU développé à cet effet.

Cette démarche permet de simuler dans le modèle SWAT une vision dynamique de l'agriculture où la même culture ne se repère pas à l'infini dans les simulations mais où au contraire les rotations culturales sont intégrées avec une succession de cultures sur l'ilot RPG au cours de la simulation.

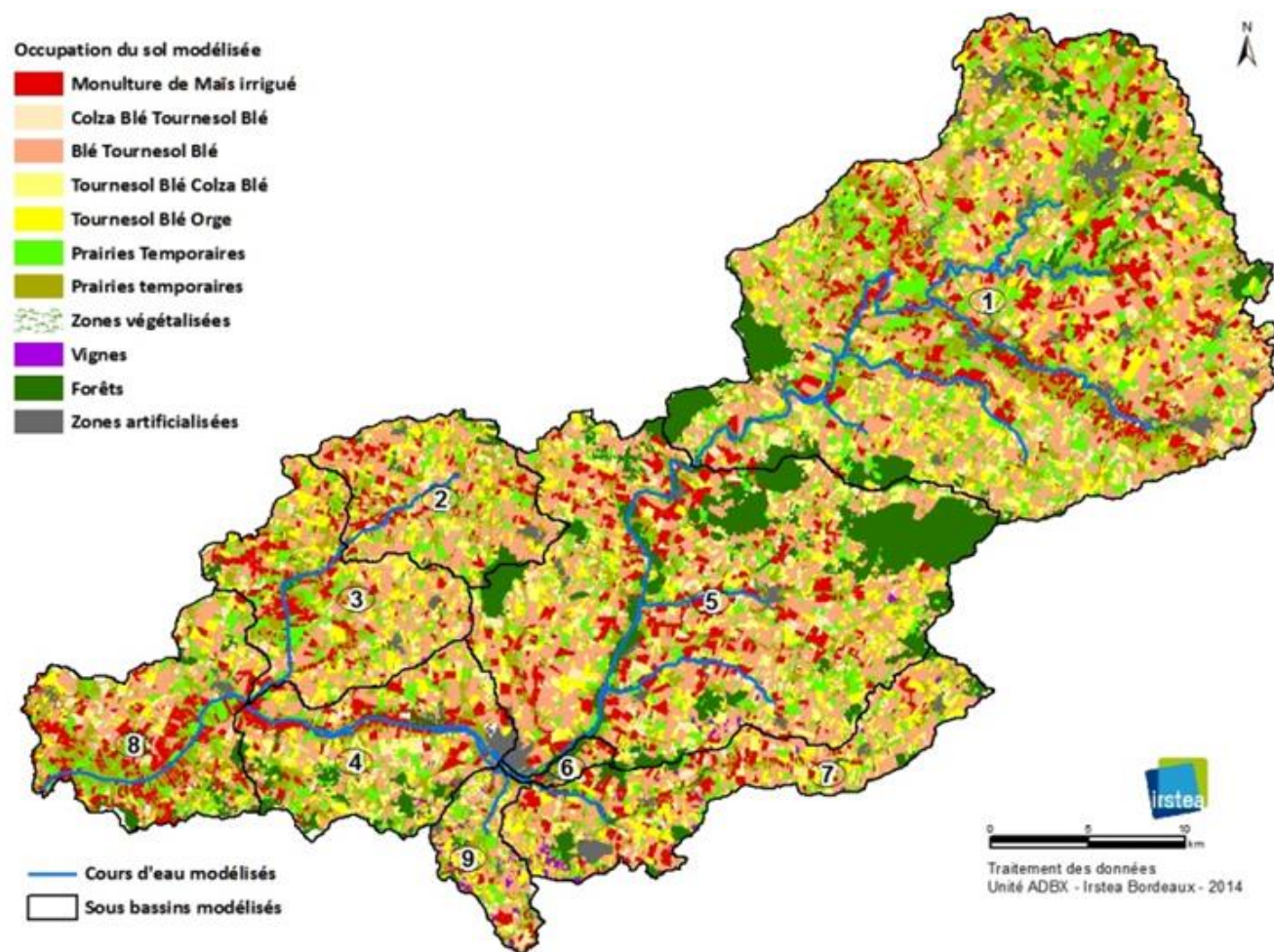


Illustration 2 : Occupation du sol modélisée sur le bassin versant de la Boutonne (source : Irstea Bordeaux, unité ETBX, équipe projet MODCHAR)

sol	rotation-type non irriguée	Code	% de répartition base - théorique par type de sol	rotation-type irriguée	Code	% de répartition base - théorique par type de sol
Groies superficielles	colza - bléT - bléT	CBBN	25	maïsG - maïsG - maïs G	MNNN	8
	colza - bléT - tournesol - bléT	TBCB	25			
	Tournesol - BléT - Orge Hiver	TBON	21			
	Tournesol - bléT - Tournesol - bléT	TBNN	19	maïsG - maïsG - maïsG - BléT	MMMB	3
groies moy à prof	ournesol - bléT - tournesol - bléT	TBNN	33	maïsG - maïsG - maïs G	MNNN	8
	ournesol - bléT - colza - bléT	TBCB	20	maïsG - maïsG - bléT	MMBN	2
	colza - bléT - orgeH - tournesol - bléT - orgeH	CBOT-BO	20			
	ournesol - bléT - bléT	TBNN	8			
	vigne	Vine	9			
groies marneuses	ournesol - bléT - tournesol - bléT	TBNN	31	maïs G - maïs G - maïs G - bléT	MMMB	1
	colza - bléT - orgeH - tournesol - bléT - orgeH	CBOT-BO	21	maïsG - maïsG - maïs G	MNNN	4
	Tournesol-BléT-BléT	TBNN	20	maïs G - tournesol - bléT - bléT	MTBB	1
	colza - bléT - tournesol - bléT	TBCB	20	maïs G - bléT - maïs G - bléT	MBNN	1
Sols battants des plateaux limoneux = "douxins limoneux" = "douxins argileux" = "limons argileux hydromorphes"	Prairie perm.	PraP	25			
	ournesol - bléT - tournesol - bléT	TBNN	15	maïsG - maïsG - maïsG	MNNN	11
	Prairie temp. (4 ans) - bléT	PraTB	10	maïsG - BléT - maïs G - BléT	MBNN	2
	ournesol - bléT - colza - bléT	TBCB	12	maïsG - maïsG - maïsG - bléT	MMMB	5
	vigne	Vine	21			
Champagnes superficielles Champagnes moy à prof.	vigne	Vine	27	maïsG - maïsG - maïsG - OrgeP	MMMO	2
	ournesol - bléT - Tournesol - bléT	TBNN	21	maïsG - maïsG - maïsG - bléD	MMMB	1
	ournesol - bléT - orge P	TBON	20	maïsG - maïsG - maïsG	MNNN	3
	maïs - maïs - Tournesol - BléD	FFTB	10	maïsG - bléD - maïsG - bléD	MBNN	1
	Tournesol-BléT-BléT	TBNN	15			
Vallées et marais Terrasses Collines et plateaux des massifs anciens	prairieP	PraP	53			
	maïs four - maïs four	FNNN	20	maïsG - maïsG - maïsG	MNNN	7
	Prairie temp (4 ans) - maïs four	PraTM	15	maïsG - BléT - maïs G - BléT	MBNN	4
Terres Rouges à Châtagniers	colza - bléT - bléT	CBBN	25	maïsG - maïsG - maïs G	MNNN	8
	colza - bléT - tournesol - bléT	TBCB	25	maïsG - maïsG - maïsG - BléT	MMMB	3
	Tournesol - BléT - Orge Hiver	TBON	21			
	Tournesol - bléT - Tournesol - bléT	TBNN	19			
Sables	Forêt	/	100	/	/	/
douxins sableux sols lessivés	Forêt	/	18	maïsG - maïsG - maïs G	MNNN	21
	Vigne	/	4	maïsG - maïsG - maïsG - BléT	MMMB	9
	prairieP	PraP	28			
	ournesol - bléT - tournesol - bléT	TBNN	14			
	Prairie temp. (4 ans) - bléT	/	7			
Sols argileux (argile à silex - Champagne-Mouton)	prairieP	PraP	23	maïsG - maïsG - maïsG - BléT	MMMB	2
	Prairie temp (4 ans) - maïs four	PraTM	19	maïsG - maïsG - maïs G	MNNN	3
	Prairie temp (4 ans) - bléT	PraTB	13	maïsG - BléT - maïs G - BléT	MBNN	1,5
	colza - bléT - tournesol - bléT	TBCB	6,5			
	maïsG - maïsG - maïs G	MNNN	2			

Illustration 3 : Tableau des rotations par type de sols simplifié utilisé pour la modélisation du bassin de la Boutonne (source : Irstea Bordeaux, unité ETBX, équipe projet MODCHAR et chambre régionale d'agriculture Poitou Charentes)

2.3. CONTEXTE GEOLOGIQUE, HYDROGEOLOGIQUE ET PEDOLOGIQUE

2.3.1. Géologie

Le bassin versant de la Boutonne, orienté globalement nord-est/sud-ouest et situé sur la marge septentrionale du Bassin Aquitain, se localise principalement sur les formations du Jurassique (Illustration 4). La moitié nord du bassin versant de ce cours d'eau est caractérisée par la présence de failles de direction dite « armoricaine », c'est-à-dire ONO-ESE, qui structurent le paysage.

Le socle, visible au nord dans les entailles fluviales de la vallée de la Béronne, s'ennoie progressivement vers le sud sous les formations sédimentaires du Jurassique puis du Crétacé. Ainsi, les formations les plus récentes affleurent au sud tandis que les plus anciennes sont visibles à l'affleurement au nord.

Le nord du bassin versant de la Boutonne correspond à la partie sud du dôme de Melle qui est caractérisé par les formations du Lias et du Dogger. Ce dôme est limité par deux failles importantes (rejets de plus de 100 m) qui encadrent la vallée de la Boutonne. Ces failles se prolongent d'Aiffres jusqu'à Brioux-sur-Boutonne et Chef-Boutonne, commune où la Boutonne prend sa source.

Au sud de ce système de failles, la Boutonne s'écoule sur des formations du Jurassique supérieur (Oxfordien et Kimméridgien inférieur).

Au sud de Dampierre, un autre accident de direction similaire aux précédentes (faille de direction ONO/ESE), qui marque très nettement le paysage, délimite la partie aval de la vallée de la Boutonne caractérisée par des affleurements de Kimméridgien supérieur (Jurassique supérieur), de Tithonien puis de Crétacé supérieur.

2.3.2. Hydrogéologie

Sur le bassin de la Boutonne, on dénombre quatre aquifères principaux :

- L'aquifère du Jurassique inférieur ou de l'Infra-Toarcien :

Ce réservoir est composé principalement par des faciès calcaires plus ou moins dolomitisés et gréseux de l'Hettangien, du Sinémurien et du Pliensbachien. Cet aquifère repose sur le socle qui constitue son mur. Il est essentiellement captif sous le niveau de marnes toarciennes dans le secteur d'étude. On le retrouve à l'affleurement dans le nord de la zone d'étude (Dôme de Melle) à la faveur de l'érosion fluviale, dans les vallées de la Béronne et de la Légère.

Le drainage de la nappe se fait selon une direction est-nord-est vers l'ouest-sud-ouest (Illustration 4).

- L'aquifère du Jurassique moyen ou du Dogger :

Cet aquifère est constitué de l'ensemble des étages stratigraphiques du Dogger. Le faciès réservoir est représenté essentiellement par des calcaires oolithiques et dans une moindre mesure par des calcaires en plaquettes. Cet aquifère repose sur les marnes toarciennes qui le séparent de l'aquifère sous-jacent de l'Infra-Toarcien. Il est essentiellement libre au nord de la zone d'étude. Il est souvent recouvert par les altérites argilo-sableuses du Tertiaire. Au sud du couloir de failles, où la Boutonne s'écoule d'est en ouest, cet aquifère est captif sous les formations marneuses de l'Oxfordien.

Les grandes directions de drainage de cet aquifère sont comparables à celles de l'aquifère infra-toarcien. Plus localement et sur sa partie libre, elle suit les directions d'écoulements du réseau hydrographique (Illustration 4).

- L'aquifère du Jurassique supérieur :

Situé au sud du couloir de failles Secondigné - Chef-Boutonne, cet aquifère, aux caractéristiques hétérogènes, est constitué de séries marno-calcaires altérées (et « décompressé ») en surface. Le mur de celui-ci est formé par un niveau caractéristique, appelé localement « banc bleu », qui désigne des calcaires marneux gris non altérés (limite entre la zone altérée et oxydée à fissuration ouverte et la zone réduite à fissuration fermée), situé vers 20 à 30 mètres de profondeur. Il s'agit donc ici d'un aquifère libre drainé par les cours d'eau dans certains secteurs ou qui draine les cours d'eau dans d'autres. Ces échanges nappes/rivières peuvent aussi s'inverser en fonction des saisons. La surface piézométrique de cette nappe se superpose donc plus ou moins au modelé topographique (Illustration 4).

- L'aquifère du Crétacé supérieur (Cénomanien) :

Situé à l'extrême sud de la zone d'étude dans le secteur de confluence entre la Boutonne et la Charente, l'aquifère du Cénomanien est formé de sables, de grès et de calcaires à niveaux argileux, ce qui se traduit par une multiplication de niveaux réservoir interconnectés ou

indépendants. Cette nappe est souvent libre mais peut être localement captive sous un niveau imperméable.

Localement, d'autres aquifères sont rencontrés sur ce bassin versant. Au nord de la faille de la Boutonne, les formations superficielles tertiaires, parfois réservoir, sont drainées sur les flancs des vallées par de petites sources ou par la nappe du Dogger sous-jacente. Les alluvions et colluvions quaternaires, de par leur faible épaisseur (quelques mètres au plus) et leur caractère argileux, ne présentent pas d'intérêt hydrogéologique. Ils constituent alors des horizons "relais" pour les grands aquifères sous-jacents qui sont drainés par les cours d'eau. Dans la partie la plus aval de la Boutonne, les alluvions anciennes peuvent contenir de petites nappes "captives" sous le Bri.

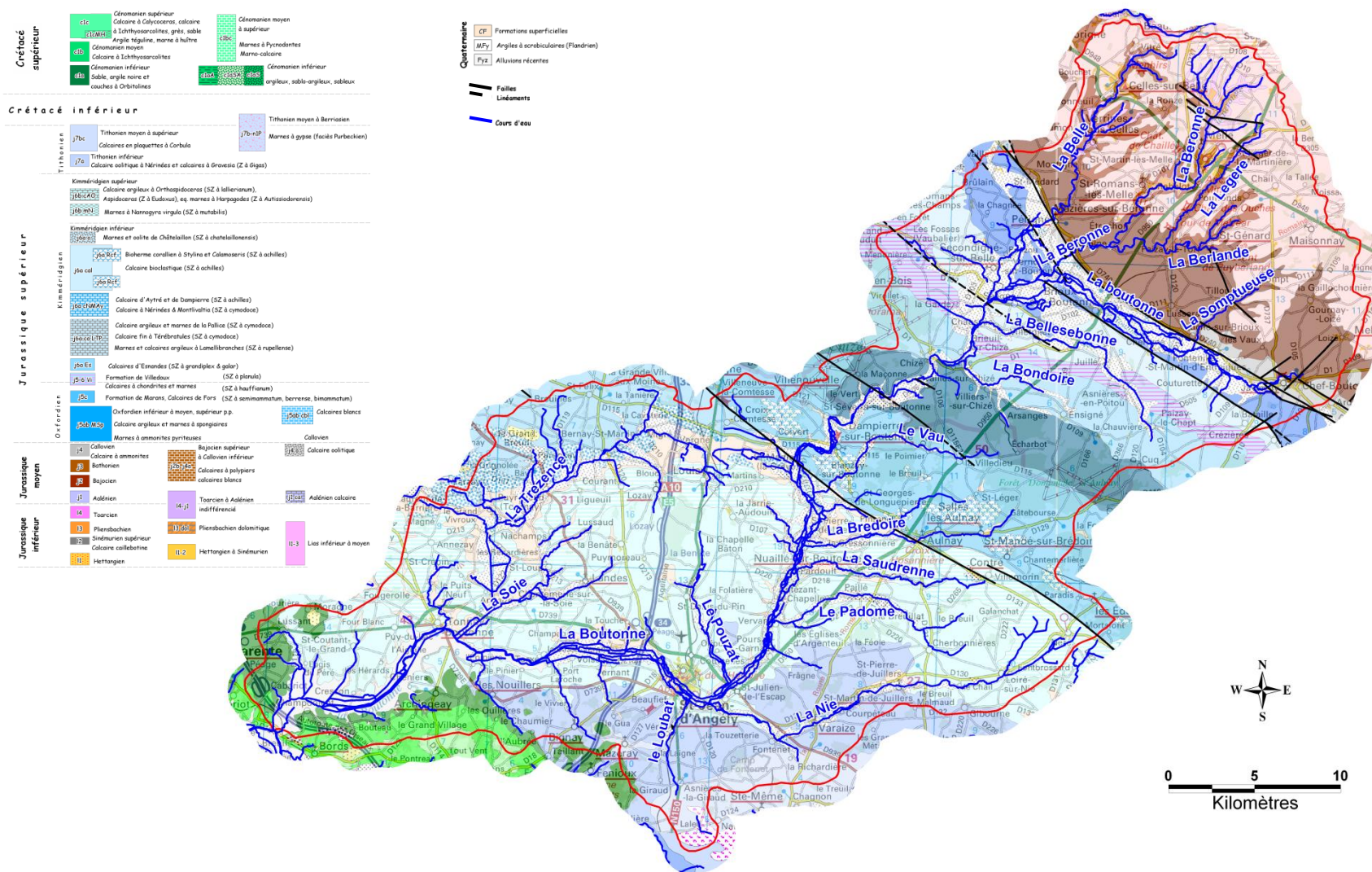


Illustration 4 : Géologie et réseau hydrographique sur le bassin versant de la Boutonne

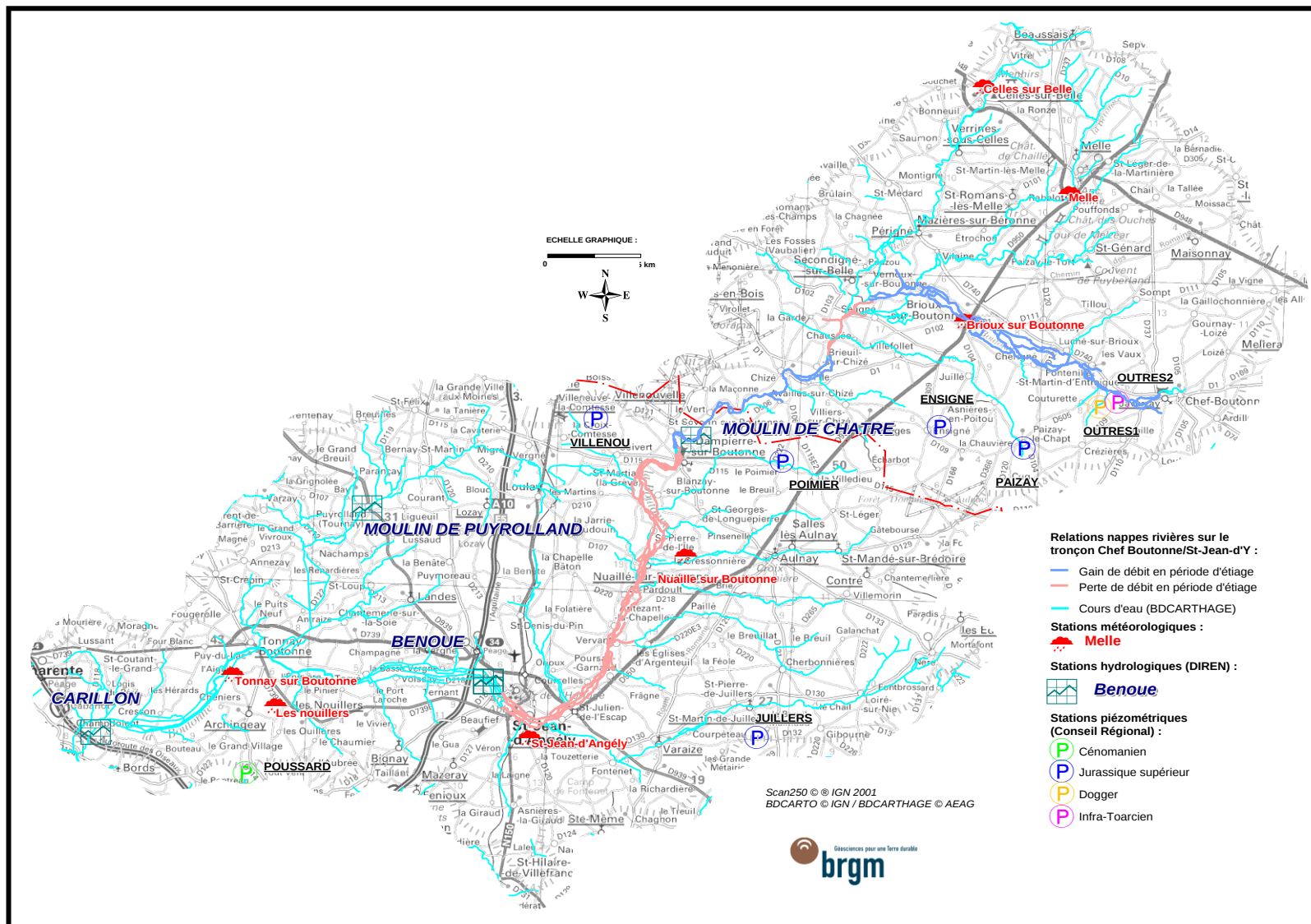


Illustration 5 : le réseau hydrographique et les relations nappes rivières (Bichot. et al., 2005 ; Lemordant, 1998)

2.3.3. Les échanges nappe/rivière

Les relations nappes-rivières dans ce secteur sont assez complexes et peuvent être schématisées de la façon suivante en période estivale (Illustration 5) (Bichot. et *al.*, 2005 ; Lemordant, 1998) :

- Entre la source de la Boutonne (Chef-Boutonne) et Secondigné, dans son trajet Sud-Est/Nord-Ouest correspondant à un couloir de failles, le débit s'accroît significativement du fait de l'apport de nombreuses sources (vallées sèches) sortant principalement du Dogger.
- Entre Secondigné et Chizé, lors de son parcours sur les calcaires de la base du Kimméridgien, des pertes de la rivière sont suspectées.
- Entre Chizé et Le Vert, la Boutonne s'écoule sur les marnes du Kimméridgien inférieur, ceci se traduit par un maintien voire une augmentation du débit par des apports latéraux.
- Entre le Vert et Dampierre, le débit de la rivière s'accroît également par la contribution de nombreuses sources issues des calcaires kimméridgiens.

A l'aval de la confluence avec le Vau, la Boutonne s'écoule sur les formations du Kimméridgien supérieur sur lesquelles le réseau hydrographique est bien développé.

Ainsi dans ce secteur aval, la Boutonne reçoit successivement et principalement les cours d'eau suivants :

- En rive Droite : La Bredoire (~14 km), La Saudrenne (~14 km), le Padome (~13 km), La Nie (~26 km).
- En Rive Gauche : Le Pouzat (~10 km), La Soie (~8 km), et la Trézence (~27 km), *via* le canal de Sainte Julienne.

Dans ce secteur, entre Dampierre et Saint Jean d'Angely, la Boutonne est, à l'étiage, en position perchée par rapport à la nappe libre et superficielle du Jurassique supérieur. La rivière a alors tendance à alimenter cet aquifère et voit donc son débit diminué.

A l'aval de Saint-Jean-d'Angely, le débit diminue également dans la zone où l'aquifère du Jurassique supérieur se met en charge sous les formations argileuses des alluvions du Quaternaire ["Bri"] [Lavie J. (2005)].

2.4. PEDOLOGIE

Dans le cadre du projet Modchar2 d'IRSTEA, une carte simplifiée des sols a été réalisée s'appuyant sur les dernières données IGCS⁴ mais également à dire d'expert. Les sols ont été regroupés pour obtenir une nomenclature simplifiée, pour laquelle il est possible d'associer à chaque type de sol des itinéraires culturels spécifiques (illustration 6).

⁴ IGCS : Inventaire, Gestion et Conservation des Sols, cartographies détaillées de secteurs représentatifs d'une petite région naturelle

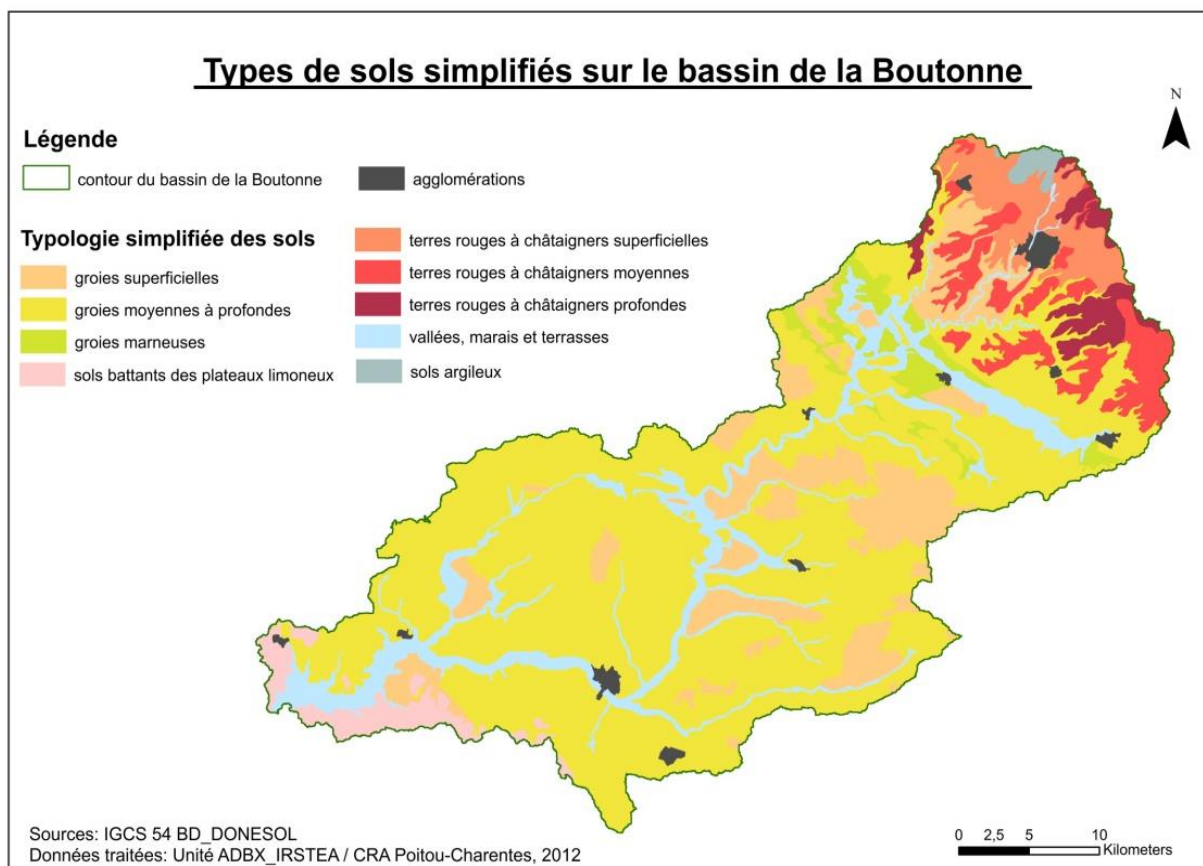


Illustration 6 : Types de sols simplifiés sur le bassin versant de la Boutonne (source : Irstea Bordeaux , unité ETBX, équipe projet MODCHAR et CRA Poitou Charentes, 2012)

Les sols de groies superficielles, moyennes ou profondes, (terres argilo-calcaires) sont très majoritaires puisqu'ils représentent 74% de la surface du bassin. Les terres rouges (sols limoneux, 11 % du bassin) sont situées au nord du bassin. Les sols caractéristiques des vallées, marais et terrasses sont présents à proximité des cours d'eau et représentent 11 % du bassin.

Un travail de caractérisation des différents sols (profondeur, texture, réserve utile, matière organique, etc...) en utilisant les informations disponibles dans la base de données Donesol ainsi que des documents locaux disponibles. De plus, ce travail a été mené en collaboration avec des représentants de la chambre d'agriculture du département afin de bénéficier de leur expertise de terrain.. Ces données ont permis de définir les données d'entrées du modèle SWAT ayant des valeurs réalistes. Ce travail va faire l'objet d'un guide méthodologique et d'une carte associée en cours de rédaction par IRSTEA. Pour le bassin versant de la Boutonne, compte-tenu des données disponibles pour cette étude, la partie « Deux Sèvres » reste à optimiser.

Le modèle SWAT peut utiliser aussi bien la base de données sols simplifiés que la nomenclature UCS (carte ci-dessous). Dans le cas où la nomenclature UCS est utilisée, une table de correspondance doit être établie pour faire le lien avec les types de sols utilisés pour décrire les pratiques agricoles.

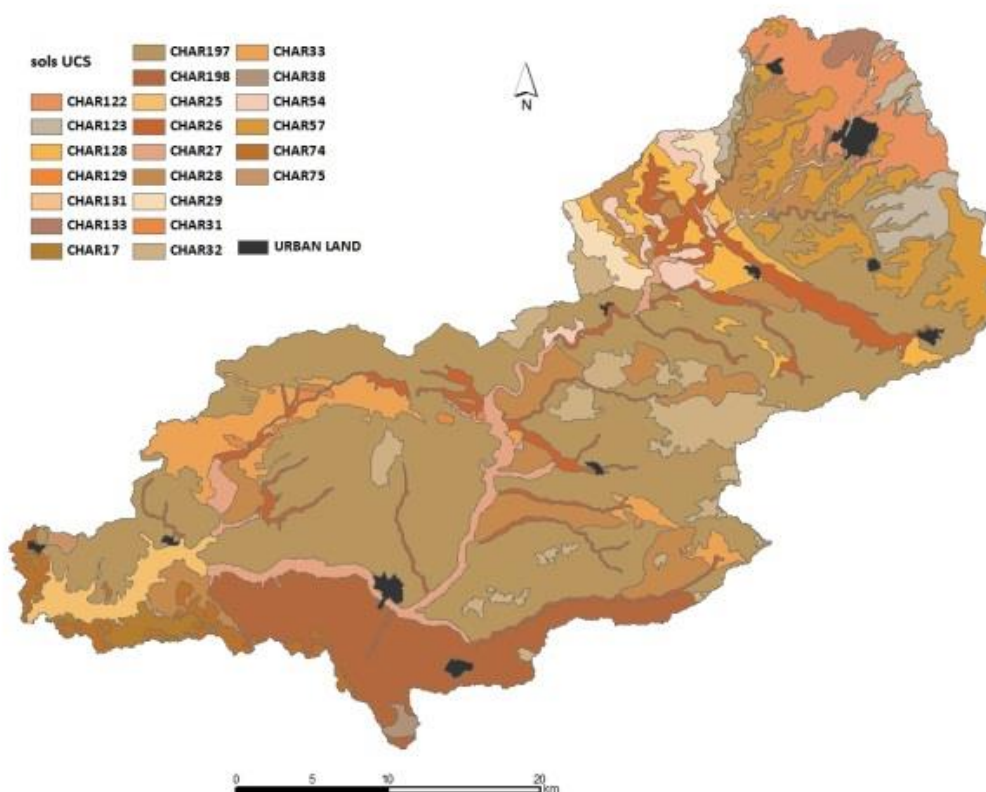


Illustration 7 : Unités cartographiques de sol (UCS) présentes sur le bassin de la Boutonne et utilisées dans la modélisation SWAT (source : données IGCS, traitement Irstea Bordeaux, unité ETBX, équipe projet MODCHAR 2012)

2.5. QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES

L'ensemble des nappes libres du bassin de la Boutonne est contaminé par les nitrates à des taux plus ou moins importants, souvent supérieurs au seuil de potabilité (50 mg/l). Seul l'aquifère infra-toarcien lorsqu'il est captif, montre des teneurs faibles voire nulle en nitrates, malheureusement à grande profondeur d'autres paramètres comme le fluor rendent ses eaux impropres à la consommation.

Douez O. (2008) détermine 4 zones de concentrations en nitrates (Illustration 8) :

- Un secteur nord qui correspond à la zone d'affleurement des formations du Dogger et du Lias. La concentration moyenne en nitrates est majoritairement inférieure, sur l'ensemble des points, à la concentration maximale autorisée pour les eaux de distribution (50 mg/l). Les eaux les moins contaminées sont issues de l'aquifère infra-Toarcien lorsque celui-ci est captif sous les marnes toarciennes. Ces dernières confèrent à ce réservoir une bonne protection vis-à-vis des pollutions anthropiques de surface.
- Un second secteur qui se localise le long de la vallée amont de la Boutonne entre le système de faille et juste au sud de cette partie de la vallée. Les concentrations médianes y sont

relativement importantes puisque celles-ci sont de l'ordre de 50 mg/l dans les nappes du Dogger et du Jurassique supérieur.

- Une troisième zone correspond aux formations Jurassiques de l'Oxfordien et du Kimméridgien inférieur entre Dampierre-sur-Boutonne et Chizé. Bien que les concentrations moyennes soient assez importantes, de l'ordre de 40 mg/l, elles restent inférieures au seuil de potabilité. Ce secteur bien qu'agricole est également recouvert sur de larges aires par des zones forestières. L'historique des chroniques de concentrations en nitrates autour de Chizé, montre une augmentation de la concentration de 1982 à 1990 suivie par une phase de stabilisation sur la période 2000-2005. Depuis 2005, les concentrations sont à nouveau en hausse.
- Une quatrième et dernière zone correspond à la moitié sud du bassin versant de la Boutonne. Les formations géologiques affleurantes appartiennent au Kimméridgien supérieur, au Tithonien et au Crétacé supérieur. Les concentrations en nitrates les plus élevées ont été mesurées au sein de cette zone. Sur l'ensemble des points de prélèvements de cette zone (22 points), 17 points localisés sur cette zone ont des concentrations en nitrates supérieures à 50 mg/l. Deux points (n° BSS 06606X0013 et 06606X0015), situés à l'est de ce secteur, se distinguent par leur faible concentration. L'examen des teneurs en magnésium, fluor et sulfates semble indiquer qu'une partie des eaux prélevées sur ces deux points a une origine profonde (une contribution externe via la remontée d'eaux profondes est soupçonnée).

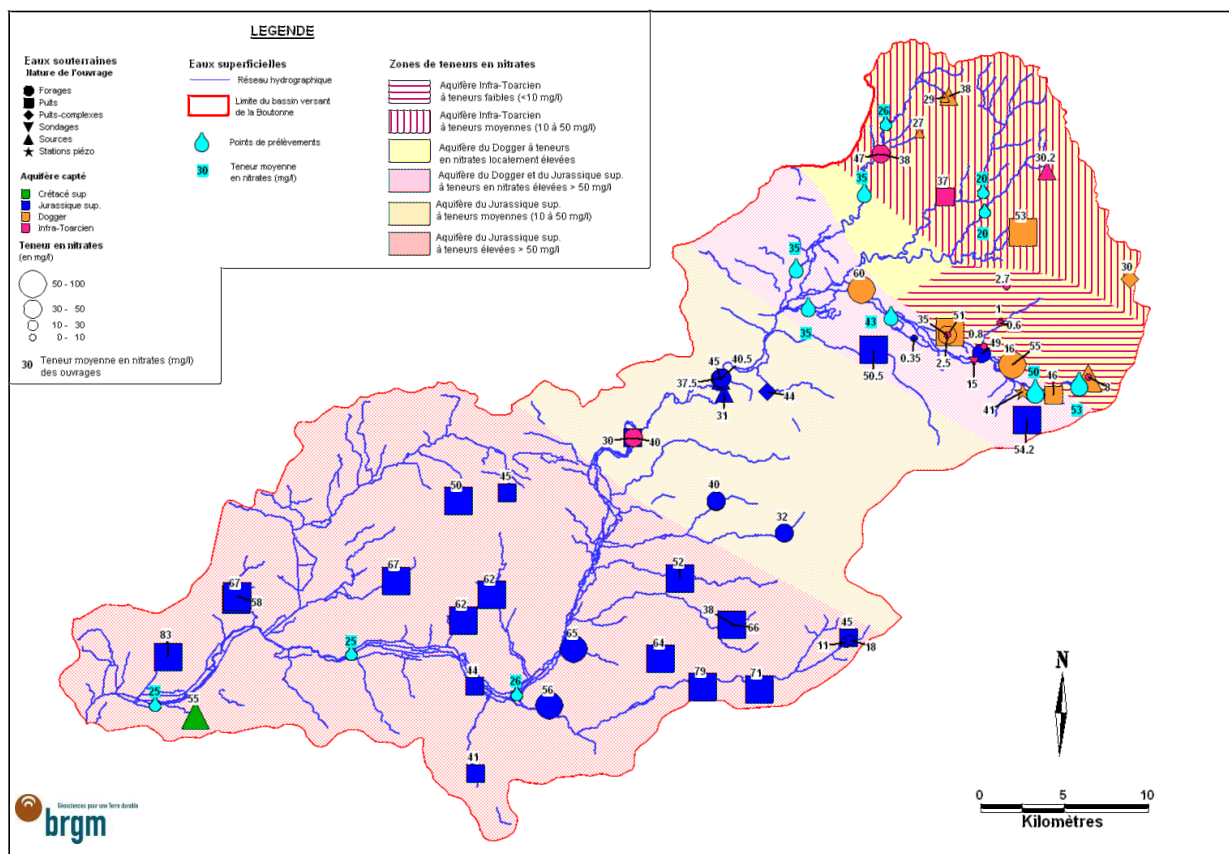


Illustration 8 : Zonage des teneurs en nitrates sur le bassin versant de la Boutonne (Doez, 2008)

3. Méthodologie

3.1. LE MODELE BOUTONNE SOUS SWAT

3.1.1. Le modèle SWAT

Le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) est un modèle de bassin versant à pas de temps continu journalier qui a pour but d'évaluer l'impact des pratiques agricoles et des usages urbains sur l'environnement en quantifiant les flux hydriques, de nutriments et de pesticides ainsi que leur devenir au sein de bassins versants (Neitsch et al. 2011). Ce modèle a été développé au département de recherche du ministère de l'Agriculture américain. SWAT a été construit sur la base d'un couplage entre différents modèles existants : les modèles "Simulator for Water Resources in Rural Basins" (SWRRB) et "Routing Outputs to Outlet (ROTO)". Des développements ultérieurs ont permis d'incorporer à SWAT des fonctionnalités supplémentaires. Pour ce faire, les modèles suivants ont été couplés à SWAT : "Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems" (CREAMS), "Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems" (GLEAMS), et le modèle de croissance des plantes "Erosion & Productivity Impact Calculator" (EPIC) (Gassman et al. 2007a).

Le modèle se base sur la conservation de la masse du bilan hydrique.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw})$$

où SW_t est la part d'eau finale stockée dans le sol (mm H_2O), SW_0 est la quantité initiale d'eau au jour i (mm H_2O), t est le temps (jours), R_{day} est la somme des précipitations au jour i (mm H_2O), Q_{surf} est la quantité de ruissellement de surface au jour i (mm H_2O), E_a est la quantité d'évapotranspiration au jour i (mm H_2O), w_{seep} est la quantité d'eau entrant en zone saturée provenant de l'horizon de sol au i (mm H_2O), et Q_{gw} est la quantité d'eau de retour nappe rivières au jour i (mm H_2O).

La maille de calcul de SWAT est la HRU (Hydrological Response Unit) qui correspond « à une réponse hydrologique homogène » définie en tant que combinaison unique par sous-bassin, obtenue par le croisement spatial des types de sols, d'occupations de sol et de pentes. Les applications de SWAT sont nombreuses et répandues au travers le monde. L'Irstea utilise le code de calcul SWAT depuis 2007.

3.1.2. Premier modèle Boutonne (2012)

Le principal objectif de l'étude exploratoire sur le bassin de la Boutonne était de mettre en commun un jeu de données simplifié afin d'initialiser une étude de faisabilité de modélisation en couplage externe entre les deux modèles, SWAT et MARTHE, présentant des spécificités très distinctes tant au niveau des échelles spatiales que des échelles temporelles, ainsi que des modes de calculs des différents types de transferts. Cette étude de faisabilité commune de 2012 a permis de dégager les échelles spatiales et temporelles de confrontation, de sérier les paramètres hydrodynamiques comparables entre les deux modèles (à des fins de confrontation des bilans hydrologiques), d'identifier le paramètre qualité d'azote lixivié entrant dans les nappes qui servira à MARTHE, et de confronter les ordres de grandeur des concentrations (à des fins de confrontation des bilans azote).

3.2. LE MODELE BOUTONNE SOUS MARTHE

3.2.1. Le logiciel MARTHE

Le code de calcul retenu dans le cadre la modélisation hydrogéologique est MARTHE (Modélisation d'Aquifères par un maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements). Ce code, développé par le BRGM, utilise la méthode des volumes finis, et permet le calcul des écoulements de fluides et de transferts de masse et d'énergie en milieux poreux bidimensionnels (plan ou coupe verticale) et tridimensionnel (Thiéry, 2006). Les schémas peuvent être simples ou complexes (zone saturée et/ou non saturée, écoulements multiphasiques, prise en compte de la densité du fluide, prise en compte de la végétation, interaction entre cours d'eau et nappes, etc.) en régime permanent ou transitoire. Il permet aussi de simuler des drains souterrains.

Les différentes fonctionnalités et leur mise en œuvre sont décrites par Thiéry D. (1990a et 1990b, 1993, 1994, 1995a et 1995b, 2004), Thiéry D. et Golaz C. (2002), Thiéry D. et al. (2002).

Le modèle tridimensionnel se présente sous la forme de grilles de calcul superposées avec un maillage parallélépipédique régulier ou irrégulier (Illustration 9). Les cellules sont hydrauliquement connectées, le « motif de base » étant constitué par une cellule en relation avec les six mailles voisines (nord, sud, est, ouest, haut et bas). Chaque maille est décrites à partir de propriétés hydrogéologiques (cote des toits et des murs des couches, paramètres hydrodynamiques, conditions aux limites...). Les données calculées par le modèle (cartographie des écoulements, chroniques de niveaux d'eau, de nitrates) sont comparées aux données observées sur le terrain. Pour reproduire au mieux les données observées, certains paramètres (particulièrement les caractéristiques hydrodynamiques) du modèle doivent être réajustés lors d'une phase de calibration. Une fois cette phase réalisée, le modèle peut être utilisé pour faire des simulations à partir de différents scénarii.

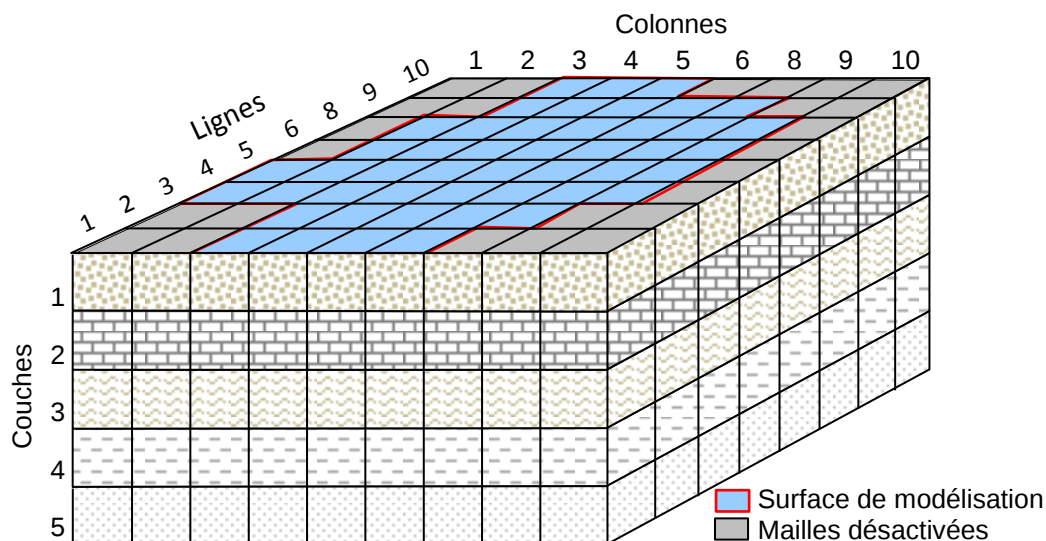


Illustration 9 : Représentation spatiale d'un système multicouche sous MARTHE

Le modèle hydrodynamique est couplé avec le réseau hydrographique. Le réseau hydrographique, qui se superpose au maillage de surface, est décrit sous la forme d'un système arborescent de tronçons de rivières organisés en affluents (Illustration 10). Chaque tronçon de rivière ne peut être connecté qu'à un seul tronçon aval et jusqu'à trois tronçons amont. Un tronçon est décrit par sa géométrie (longueur, largeur, et altitude du lit), par ses propriétés physiques (rugosité du lit, pente du lit, épaisseur et perméabilité du lit et des berges), par ses termes source (pompages ou injections) et par son état (hauteur d'eau dans la rivière) (Illustration 10).

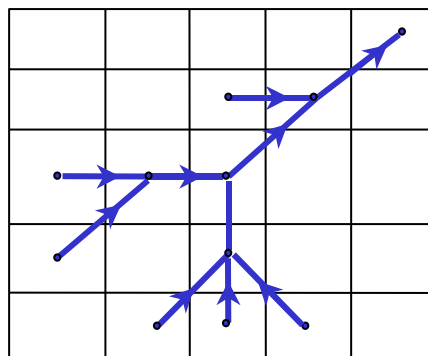


Illustration 10 : Système de réseau de rivière connecté à la grille

Selon la position relative de la hauteur d'eau dans la rivière et de la surface libre dans l'aquifère un débit peut être échangé depuis un tronçon de rivière vers l'aquifère ou réciproquement depuis l'aquifère vers la rivière. Le débit d'échange est contrôlé, d'une manière non linéaire, par le lit et les berges du cours d'eau en fonction de leur surface, épaisseur et perméabilité.

3.2.2. Le modèle Boutonne : extraction du modèle hydrodynamique régional

Le modèle du Jurassique, a été développé initialement dans le cadre du Contrat de Plan Etat-Région 2000-2006 sous Maîtrise d'Ouvrage de la Région Poitou-Charentes avec un partenariat entre l'Etat, la Région Poitou-Charentes et les Agences de l'Eau Adour-Garonne et Loire Bretagne (Putot et Bichot, 2007, Douez, 2010, Douez, 2011). Il englobe les zones d'extension des nappes du Dogger et de l'Infra-Toarcien dont la limite nord est une ligne Loudun/Châtelleraut et la limite sud est une ligne La Rochelle/Angoulême. Ces limites correspondent à de grandes failles caractéristiques du site. Les limites occidentales et orientales correspondent respectivement au socle armoricain et au socle du Massif Central.

Le modèle Boutonne est issu du découpage de ce modèle, découpage intégrant la totalité du bassin versant topographique de la Boutonne. La zone modélisée s'étend sur moins de 2500 km² (Illustration 11). Découpée en mailles kilométriques, il comprend huit couches qui retranscrivent les formations géologiques du socle aux recouvrements quaternaires.

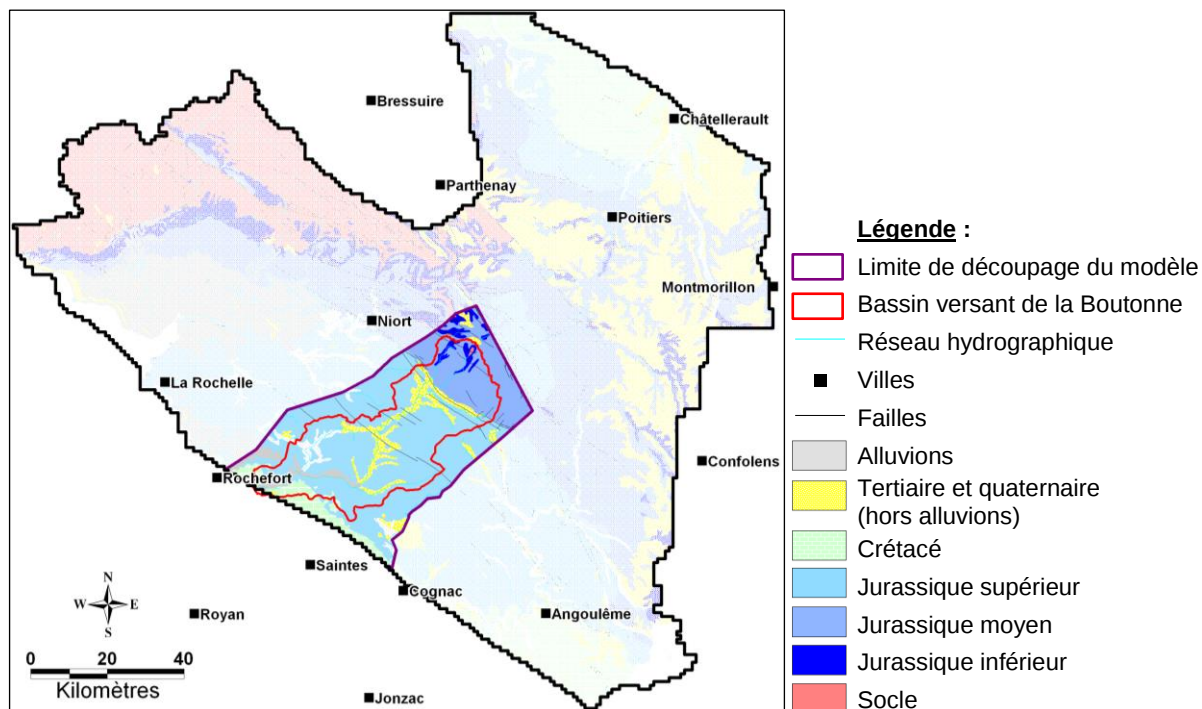


Illustration 11 : Extension du modèle sur la Boutonne par rapport à l'emprise du modèle hydrodynamique régional

Le calcul de la partition entre recharge et ruissellement fait appel au module GARDENIA couplée au modèle MARTHE. La pluie et l'ETP des stations de Niort, de Melle et de Saintes sont implémentées au pas de temps mensuel sur des zones d'emprise définies par la méthode des polygones de Thiessen.

Le calage hydrodynamique a été réalisé sur la période 2000 à 2007 à un pas de temps mensuel. Les 9 chroniques piézométriques observées sont relativement bien reproduites par le modèle, en particulier pour le Jurassique supérieur et le Dogger. Les débits en rivières observés sont également bien restitués (stations de Saint Séverin, de St Jean D'Angély et de Carillon). La confrontation observés/simulés obtenues en 2012 est consultable dans (Domez et al., 2012).

3.3. LES OBJECTIFS ET LA METHODOLOGIE SUIVIE

L'objectif de ce projet est de restituer les chroniques de concentrations en nitrates en nappe. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser les flux massiques d'azote rejoignant le compartiment aquifère de SWAT pour les intégrer en entrée du modèle MARTHE, dont le bilan hydrique reste quasiment inchangé (ruissellement/infiltration/échange nappe-rivière etc.).

Au regard des différences conceptuelles entre les deux modèles, cet objectif soulève plusieurs questions méthodologiques.

3.3.1. Résultats de la première étude exploratoire (2012)

En 2012, les points suivants ont été traités :

A) Quelle est la variable commune relative au flux d'azote à retenir ?

Le modèle SWAT permet d'obtenir un nombre important de variables de sortie. Suite à l'analyse de ces différentes variables, celle retenue comme correspondant à l'entrée dans la nappe est « NO3L », soit la quantité d'azote issu des nitrates lessivés en sortie du profil de sol. L'unité de ce paramètre est le kg(N)/ha/j pour chaque HRU⁵ (toutefois SWAT permet de consolider les données en moyennes mensuelles qui est le pas de temps du modèle des nappes du Jurassique). Dans MARTHE, les entrées azotées en nappe sont exprimées en flux massique, soit en quantité de nitrates par aire de maille (kilomètre carré dans le cas présent), soit en mg(NO₃)/km².

B) Comment spatialiser la donnée NO3L ?

Les chroniques d'intrants dans le logiciel MARTHE sont implémentées par maille, et donc spatialisées, tandis que les sorties de SWAT par HRU ne le sont pas. Une spatialisation des HRU est nécessaire. Elle peut être obtenue en croisant la carte de l'occupation du sol et la carte du type de sol (ce que fait automatiquement SWAT pour générer les HRU) sous un SIG. L'IRSTEA dispose de cette information et met à disposition une couche SIG des HRU spatialisés.

Une maille MARTHE pouvant correspondre à une ou plusieurs HRU, la surface de chaque HRU dans chaque maille est calculée (l'aire d'une maille étant égale à la somme des aires des HRU présentes dans la maille). La quantité d'intrants dans une maille MARTHE est déduite des quantités d'intrants des HRU dans cette maille pondérées par les superficies des HRU dans la maille.

3.3.2. Méthodologie suivie dans le présent travail

En 2013/2014, les travaux se sont organisés en deux étapes chacune déclinée en plusieurs pistes de travail, avec des échanges continus entre le modélisateur sous SWAT (IRSTEA Bordeaux) et celui sous MARTHE (BRGM Poitiers). Les « paramétrisations » des 2 modèles Boutonne ont été confrontées/comparées afin de mieux appréhender les difficultés et les pistes de travail d'un couplage SWAT/MARTHE.

Les nombreux échanges entre les 2 établissements de recherche (IRSTEA et BRGM) ont conduit les modélisateurs à se poser de nombreuses questions et à optimiser les paramètres des 2 modèles, basés sur SWAT et sur MARTHE.

A) L'optimisation du modèle Boutonne sous SWAT

- *Les itinéraires culturaux et les caractéristiques pédologiques sur le territoire de la Boutonne*

En 2012, le travail montrait notamment la forte dépendance des flux d'azote en entrée de nappe au type de fertilisants considéré.

Par ailleurs, afin d'améliorer la précision des sorties SWAT, l'IRSTEA s'est attaché à préciser les pratiques sur le bassin de la Boutonne, notamment en intégrant les principales rotations culturales et cultures associées (lors de la phase exploratoire, seules trois cultures avaient été modélisées).

⁵ HRU : Hydrologic Response Unit, unité de base correspondant à des zones homogènes en matière de sol et de pratiques agricoles.

En parallèle, les caractéristiques pédologiques du territoire ont été précisées et implémentées dans un nouveau projet de modélisation SWAT intégré dans MODCHAR.

- *La géométrie du modèle SWAT*

Le projet Boutonne-2012 sous SWAT a été modifié pour augmenter le nombre de sous-bassins versants et améliorer ainsi la définition du réseau hydrographique. Ces modifications permettent aussi un calage plus fin des paramètres de SWAT par sous-bassins et apportent de la précision sur les sorties de SWAT.

- *Le forçage des entrées SWAT par les données MARTHE et la confrontation des flux hydriques entre modèles*

Le transfert des nitrates entre les 3 compartiments (sol, nappes, rivières) du bassin implique l'existence de flux hydriques entre eux. L'utilisation interdépendante des deux modèles est susceptible d'être biaisée dès lors que les flux d'alimentation des compartiments cibles (nappe et/ou rivière) diffèrent d'un modèle à l'autre⁶. En conséquence, les différences entre les 2 modèles ont été analysées en comparant les ordres de grandeur des composantes du bilan hydrique.

Le modèle MARTHE étant calé en nappe et en rivière, le choix a donc été fait de considérer MARTHE comme le modèle de référence. Les composantes des flux d'eau entrée/sortie pour les rivières d'une part et les nappes d'autre part sont présentées sur l'illustration 12. Les paramètres régissant le bilan hydrique n'ont donc pas été modifiés mais des tests de sensibilité ont été réalisés.

Pour faciliter la convergence des flux entre MARTHE et SWAT, des tests de forçage ont été réalisés avec SWAT en imposant la valeur de certaines données (météorologiques, prélèvements, débits aux exutoires) sur la base des données implémentées ou simulées par MARTHE. A l'issue de cette phase d'optimisation de SWAT, la comparaison des flux hydrique entre MARTHE et SWAT a été effectuée et permet de proposer des pistes d'améliorations ultérieures du modèle SWAT. Pour la configuration de SWAT retenue, ces composantes sont présentées sur l'illustration 13.

⁶ Dans l'idéal, les flux alimentant la nappe, d'une part, et ceux alimentant les rivières, d'autre part, doivent être identiques. Cependant, les approches/développements méthodologiques nécessaire à une stricte égalité des flux sort du cadre de ce travail et fait l'objet de propositions méthodologiques pour un projet de plus grande ampleur.

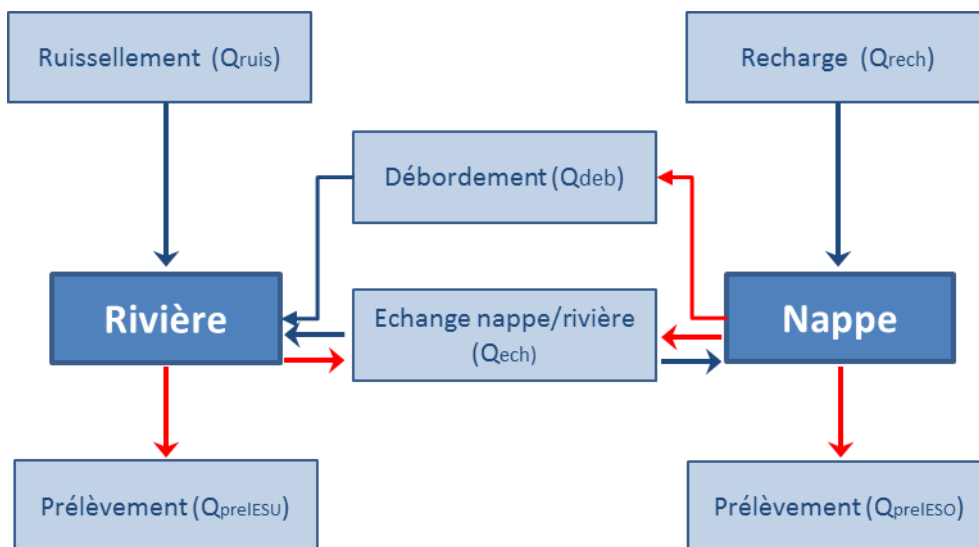


Illustration 12 : Flux entrée/sortie sous MARTHE matérialisés par les flèches

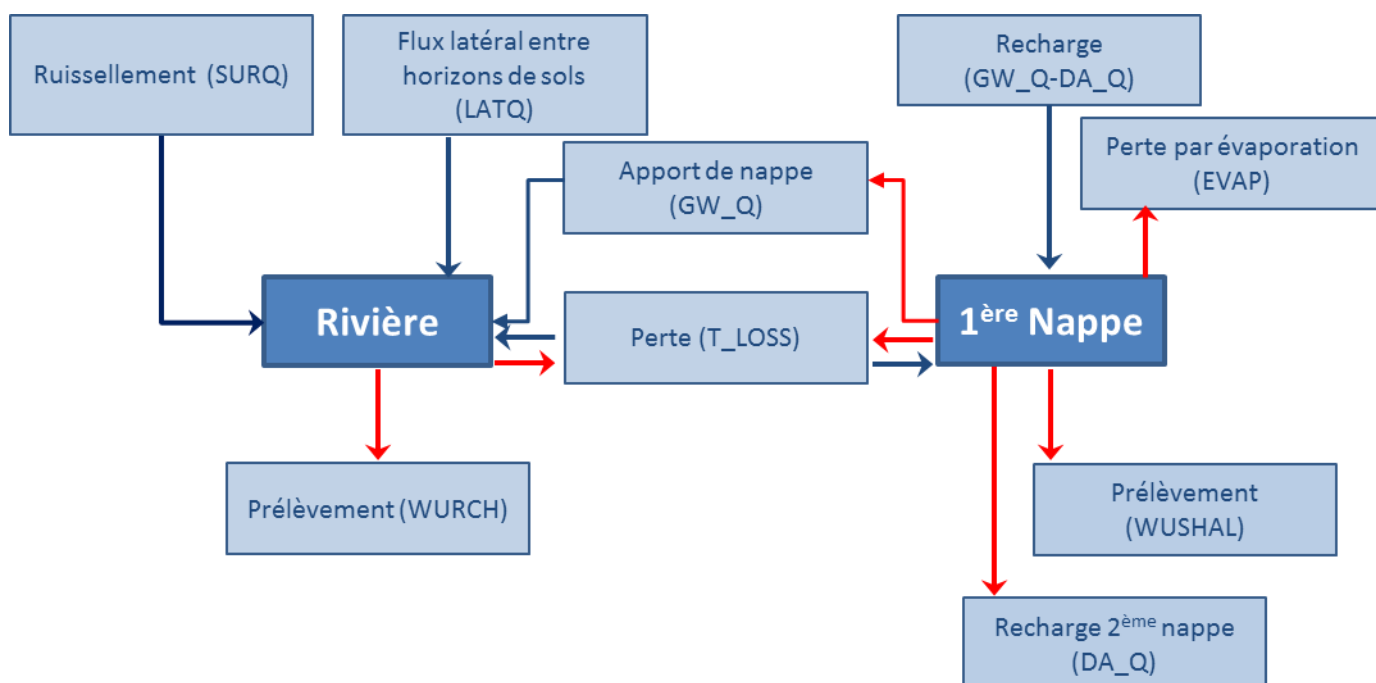


Illustration 13 : Bilan simplifié des flux entrée/sortie sous SWAT (matérialisés par les flèches) pour la configuration retenue pour le projet SWAT-Boutonne. Pour une description détaillée se référer à (Neitsch et al. 2011).

B) L'optimisation du modèle MARTHE

Parallèlement, au fur et à mesure des échanges entre IRSTEA et BRGM, le modèle de la Boutonne sous MARTHE a été adapté et des tests de sensibilité ont été réalisés pour plusieurs paramètres de manière à s'efforcer de reproduire les chroniques des nitrates, principalement en nappe mais aussi en rivière.

- *Révision des conditions limites, conditions initiales*

Le bassin de la Boutonne correspondant à une partie « découpée » dans le modèle régional des nappes du Jurassique, des conditions ont été imposées aux limites de ce « sous-modèle » du modèle régional, c'est-à-dire globalement aux limites du bassin versant (un peu étendue aux mailles voisines pour limiter les flux « externes » entrant. En particulier, des concentrations en nitrates ont été imposées sur ces mailles de bordure du modèle.

De la même manière, dans le temps, des conditions initiales en matière notamment de concentrations en nitrates doivent être imposées dans le modèle. Afin de limiter au mieux l'impact du stock initial d'azote sur le début de la période modélisée de référence (2000/2007), la modélisation a pris en compte la décennie antérieure à cette période de référence.

- *Intégration chroniques d'azote pour la nappe et le ruissellement*

Par rapport à la méthodologie développée dans la précédente étude exploratoire (2012), un travail a été nécessaire pour une meilleure intégration des données d'azote importées de SWAT et intégrées dans MARTHE, pour les nappes comme pour les rivières.

- *Nouveaux calage avec compromis entre hydrodynamique et transport*

Par rapport à une modélisation hydrodynamique, le transport en nappe des nitrates fait appel à d'autres paramètres, complexifiant d'autant le travail de modélisation. Plusieurs simulations ont ainsi été réalisées afin de déterminer la paramétrisation optimale permettant le meilleur compromis entre reproduction de la réalité hydrodynamique (piézométrie, débit de rivière) et des chroniques nitrates observées sur les points.

- *Sensibilité du modèle à la paramétrisation*

En résumé, alors que les travaux de 2012 se sont focalisés sur les pratiques et les paramètres de SWAT régissant le cycle de l'azote, ce nouveau travail (CACHALO3) s'est attaché à mieux faire converger les chroniques de débits aux exutoires de sous-bassins des modèles Boutonne SWAT et Boutonne MARTHE. Même si les bilans des flux entre les 2 modèles sont assez bien ajustés et la paramétrisation des 2 modèles mieux définie, la comparaison entre les chroniques de teneurs en nitrates simulées avec MARTHE et les observées, en nappe et en rivière, montre que les simulations ne permettent pas de reproduire explicitement les observations. Le contenu des différentes étapes du travail réalisé sur les modélisations SWAT et celles réalisées avec MARTHE, ainsi que les résultats associés sont détaillés dans les chapitres suivants.

4. Optimisation du modèle Boutonne sous SWAT

4.1. PARAMETRISATION DU MODELE SWAT-BOUTONNE

Le schéma synoptique ci-dessous résume d'une part les principales données d'entrée nécessaire au modèle SWAT et d'autre part les principales étapes de la modélisation.

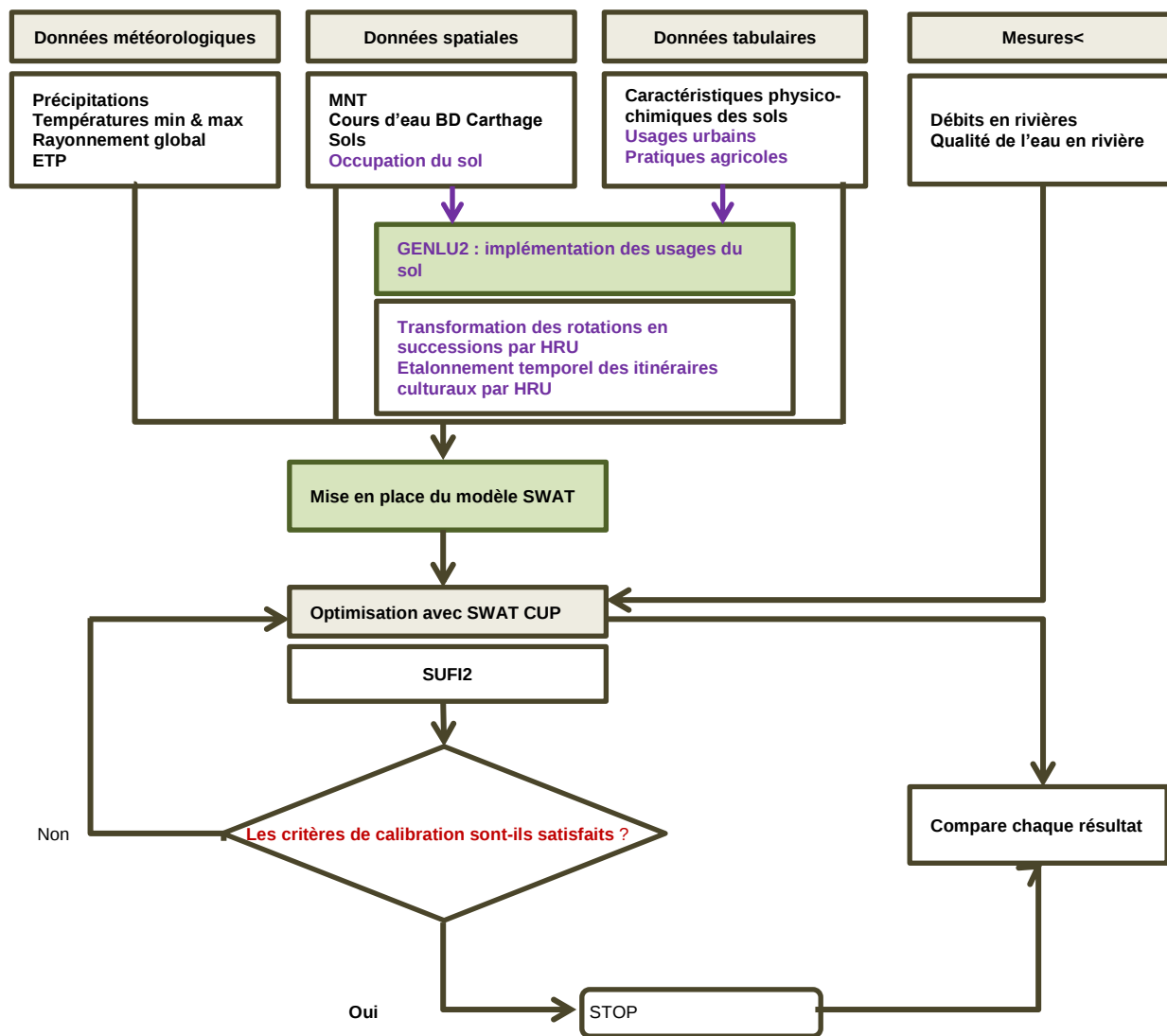


Illustration 14 : Schéma synoptique de la méthodologie générale suivie pour la modélisation SWAT (IRSTEA) (source : Irstea Bordeaux, unité ETBX, équipe projet MODCHAR)

4.1.1. Agronomie et pédologie

A) Intégration dans le modèle SWAT des données modélisées sur les pratiques agricoles

Parallèlement au travail du BRGM, en 2013/2014, une description plus fine de l'agriculture a été modélisée par IRSTEA, par rapport à la première version qui n'intégrait qu'une vision statique des cultures.

Cette nouvelle approche permet de rendre compte de manière plus fine de l'usage des sols. L'identification de l'usage des sols est issue du traitement du Recensement Parcellaire Graphique (RPG) des années 2006 à 2011 (Cf.

Illustration 15) et de la typologie des systèmes et pratiques par type de sol simplifié (IRSTEA en collaboration avec la chambre régionale d'agriculture).

Une attention particulière a été portée à la description des pratiques de fertilisation. Une description plus fine des formes d'azotes continues dans les fertilisants ainsi que leur fractionnement a été réalisée, en particulier pour les fertilisants de type ammonitrate. Ce type de fertilisant, non disponible dans la version standard de SWAT, a été introduit dans la base de fertilisation du modèle américain. Cette amélioration a permis d'améliorer la simulation des flux d'azote lixivié. Toutefois, il n'est pas tenu compte du précédent de la culture pour moduler la fertilisation.

Il est alors possible d'intégrer dans SWAT de façon innovante, les successions culturales et les pratiques associées sous forme de calendriers de pratiques, en utilisant le logiciel GENLU2 (GENerator of LandUse), développé à l'IRSTEA. Le logiciel GENLU2 permet de construire et fournir les paramètres (dates d'application des fertilisants, dates des semis, des labours, applications des pesticides, etc.) décrivant les successions culturales à l'échelle de la maille de calcul de SWAT, la HRU. Afin d'introduire une variabilité temporelle effective, il est possible de faire varier la date d'une action au sein d'un itinéraire technique de plus ou moins 8 jours autour de la date de référence. Similairement, une variabilité spatiale est prise en compte en ne faisant pas débuter une rotation par la même culture.

Les rendements simulés par le modèle SWAT pour les différentes cultures sont confrontés aux données d'enquête et à la typologie réalisée.

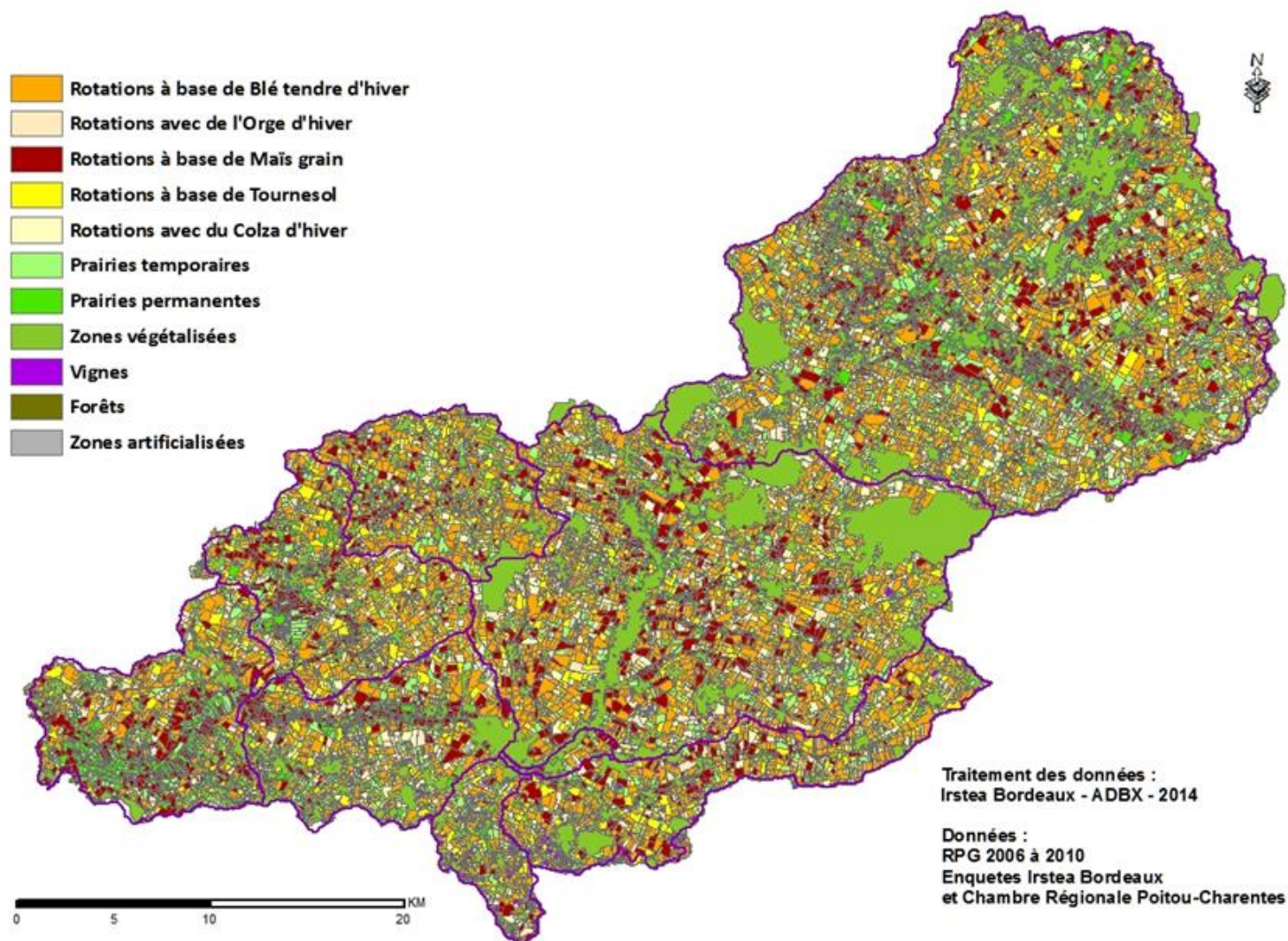


Illustration 15 : Caractérisation du Landuse 2014 du modèle SWAT « Boutonne » avec les successions culturales modélisées. (source IRSTEA, unité ETBX, équipe projet MODCHAR et CRA Poitou-Charentes)

B) Intégration des données pédologiques

Comme cela a été décrit au paragraphe 2.4, les pratiques agricoles sont définies en fonction de types de sols simplifiés, mais une table de correspondance a été établie avec les unités de sols (UCS) utilisées par le modèle SWAT pour ce projet. Les paramètres des horizons proviennent de la base Donesol, lorsqu'ils sont disponibles. Cela permet au modèle agro-hydrologique SWAT de simuler plus finement les transferts en fonction des caractéristiques physico-chimiques des sols.

4.1.2. Géométrie du modèle

La délimitation SWAT du bassin suit bien les unités et les zones hydrographiques de référence. Le choix a été fait initialement de ramener l'exutoire du bassin SWAT à la station hydrométrique de Carillon pour permettre une meilleure calibration. De ce fait, le tracé aval modélisé en ce point diffère légèrement de celui de la zone hydrographique. Le bassin versant modélisé a ainsi une surface de 1317 km². Cette surface est proche de la surface définie pour l'unité hydrologique Boutonne, 1324 km². Cette dernière est subdivisée en 17 zones hydrographiques du bassin versant de la Boutonne (Cf.

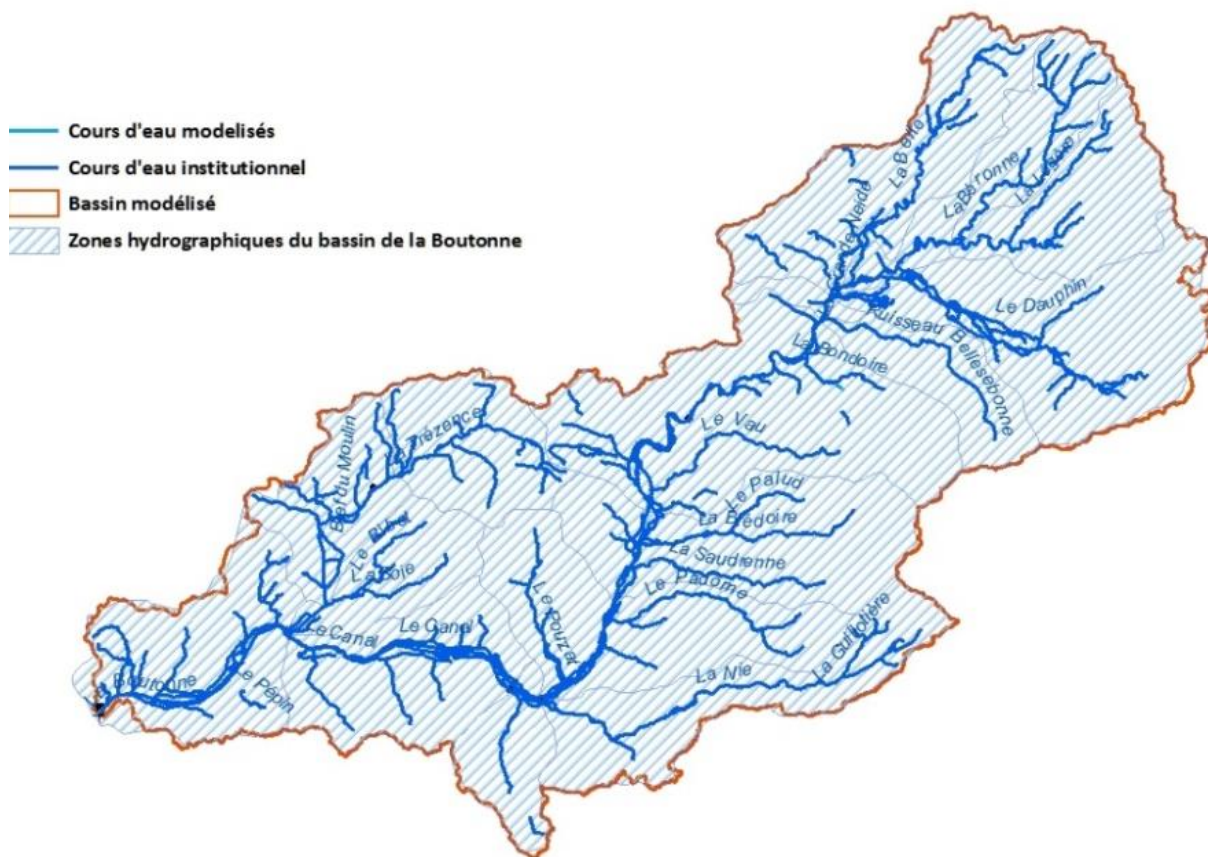


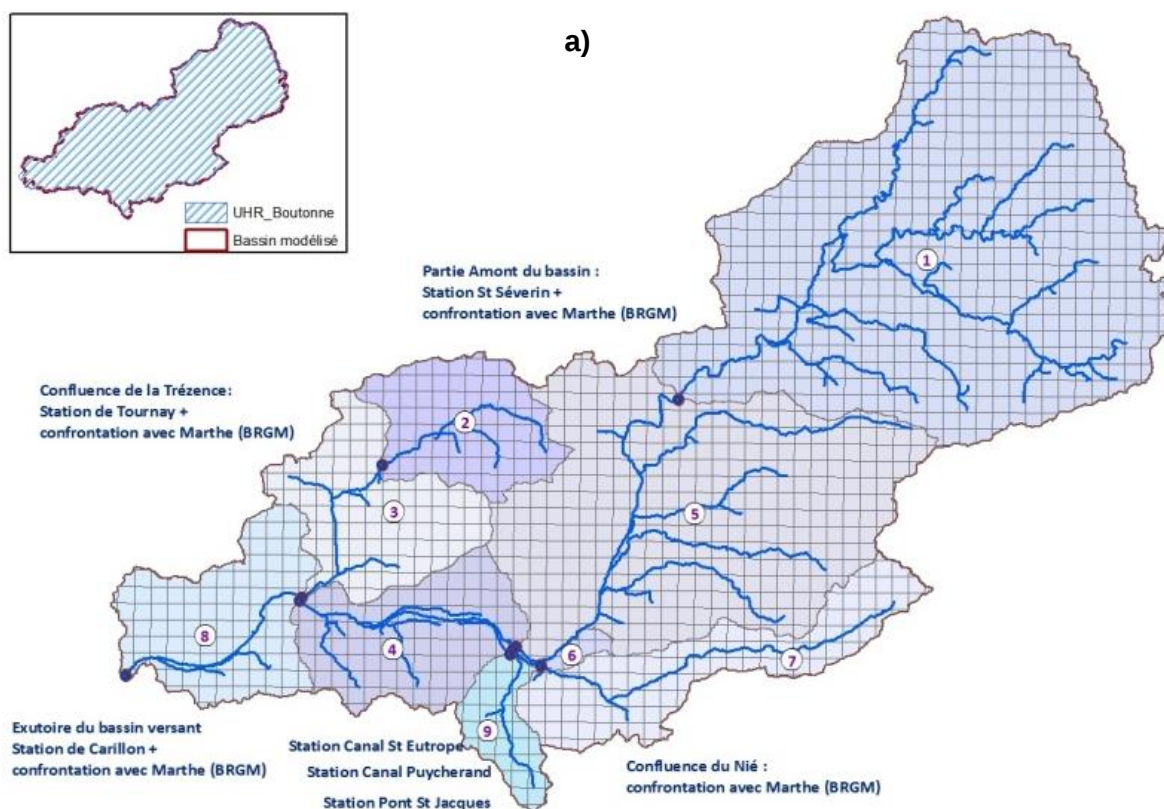
Illustration 16).

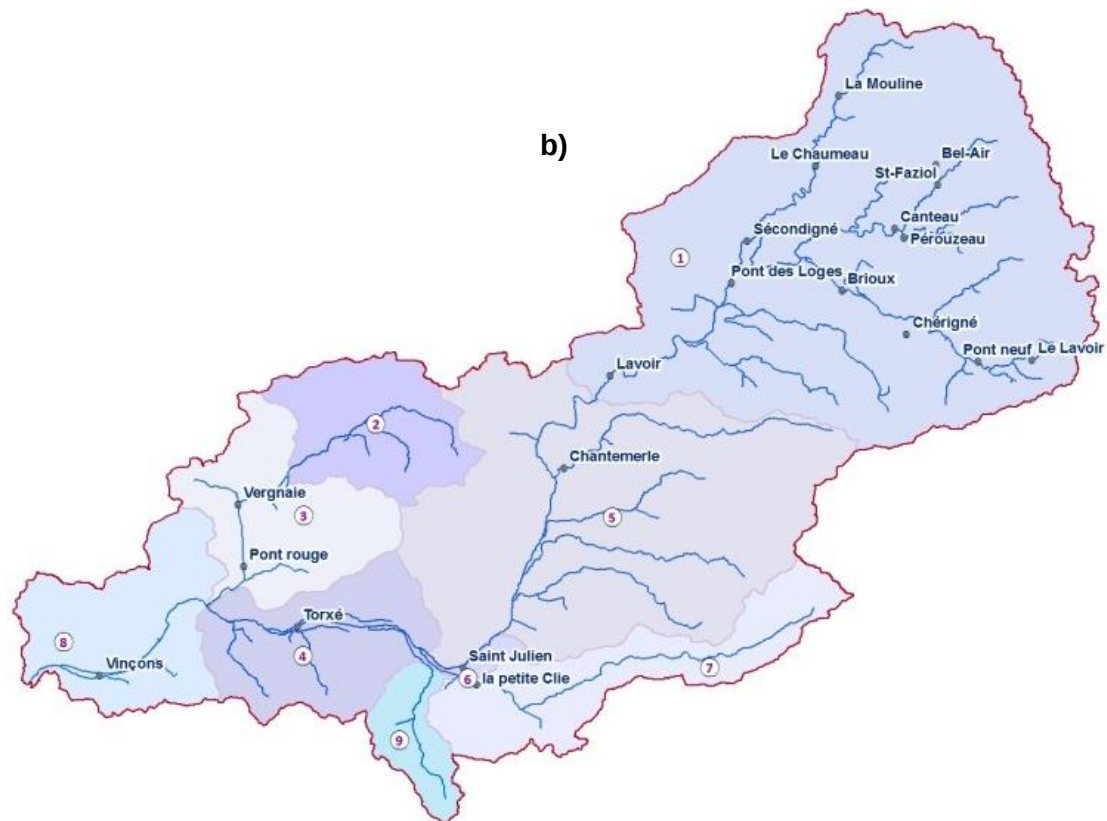
en maille carré d'un kilomètre de côté, ce sont les données de la station météorologique la plus proche (en fonction d'un découpage de l'espace en utilisant la méthode des polygones de Thiessen) qui est affecté dans chaque maille (dans la version actuelle du modèle). L'illustration

Illustration 19 compare les données des stations météorologiques rentrées dans les 2 modèles.

Afin de reproduire au mieux les données météorologiques utilisées par MARTHE au sein de SWAT, l'emprise des stations météo MARTHE a été utilisée pour constituer le « weather generator », qui détermine la valeur et la distribution des paramètres météorologiques dans SWAT. Les résultats de cette modélisation ont été peu concluants, un meilleur calage SWAT étant obtenu en prenant une répartition des données météorologiques par sous bassin.

Toutefois, dans la version en cours d'actualisation du modèle des nappes du Jurassique sous MARTHE, le calcul de la recharge se fait à présent en utilisant la grille de MétéoFrance SAFRAN (8 km de côté) pour les données pluie-ETP. En ce qui concerne ces données, chaque maille du modèle MARTHE sera donc rattachée à la maille SAFRAN correspondante, ce qui améliorera sensiblement la précision des données météorologiques rentrées dans le modèle.





Illustrations 17 a & b : Réseau hydrographique plus fin et calage facilité avec les stations de mesure des débits (a) et des concentrations de NO3 (b) (source : Irstea Bordeaux, unité ETBX)

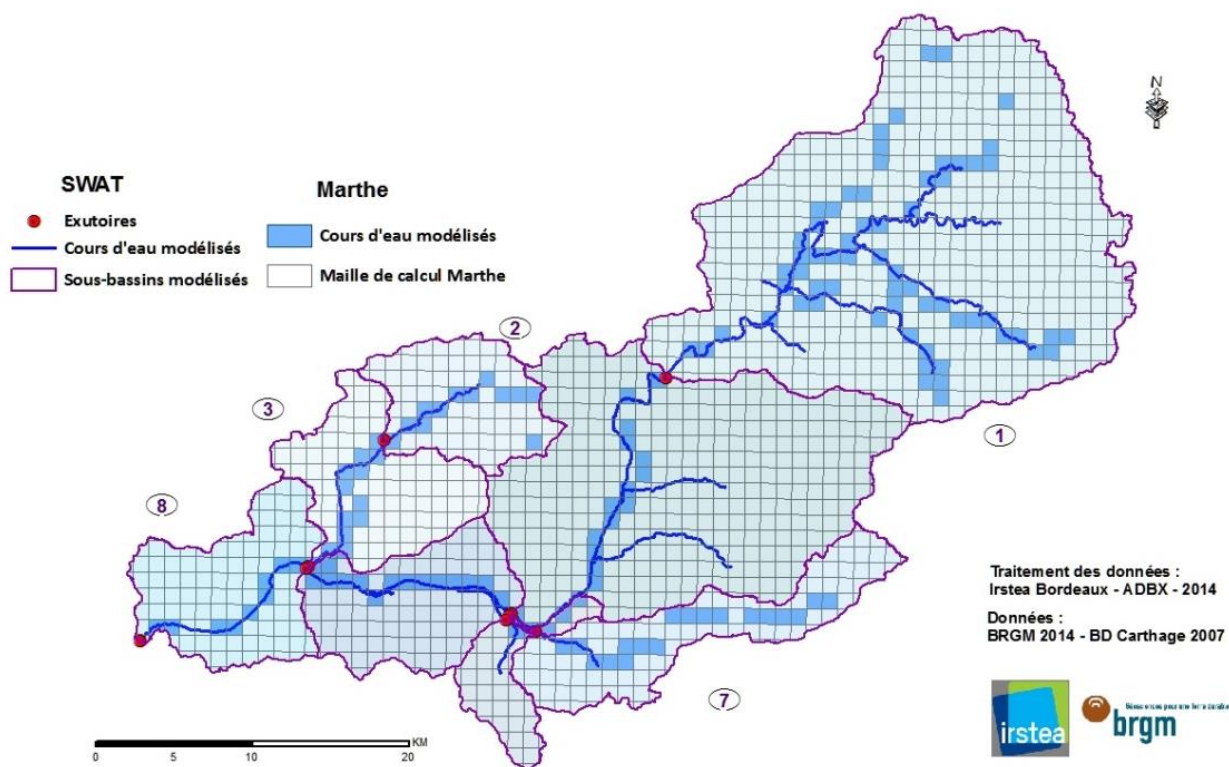


Illustration 18 : Confrontation des réseaux hydrographiques des modèles SWAT et MARTHE (source : Irstea Bordeaux, unité ETBX, équipe projet MODCHAR)

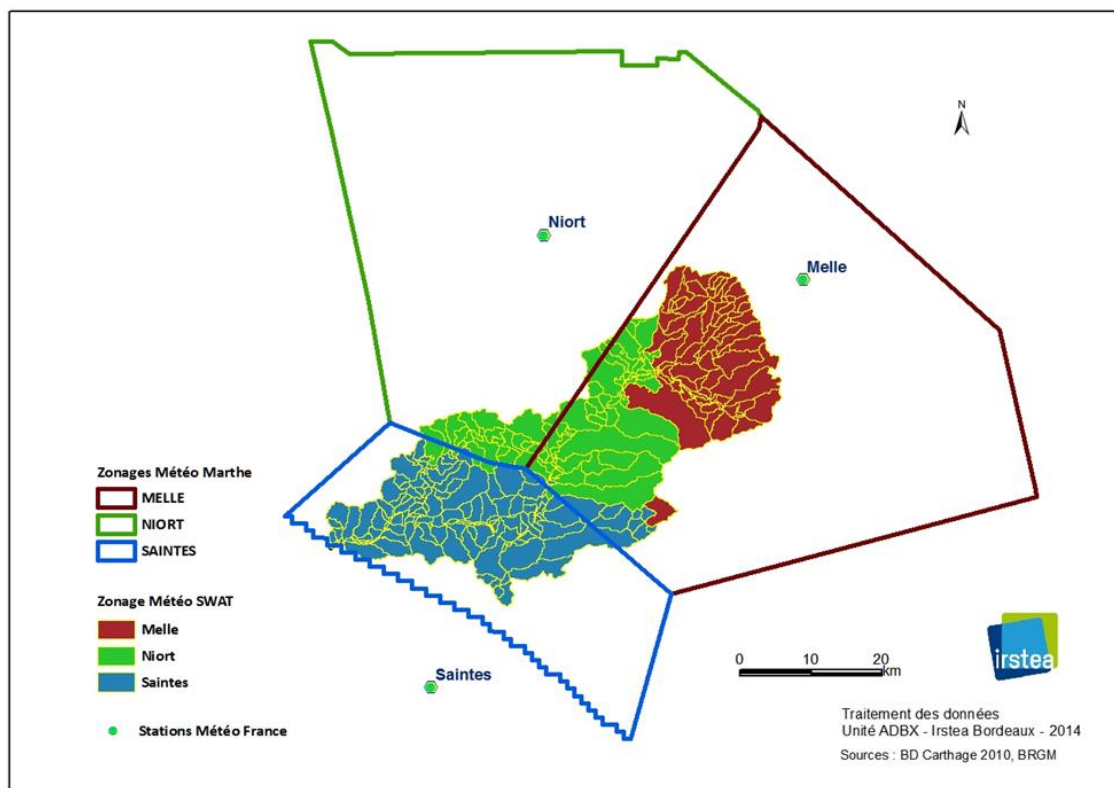


Illustration 19 : Affectation des stations météorologiques aux sous bassins SWAT et aux mailles MARTHE (source : Irstea Bordeaux, unité ETBX, équipe projet MODCHAR)

4.1.4. Prélèvements hydriques

L'intégration des prélèvements anthropiques d'eau est très différente entre les 2 modèles.

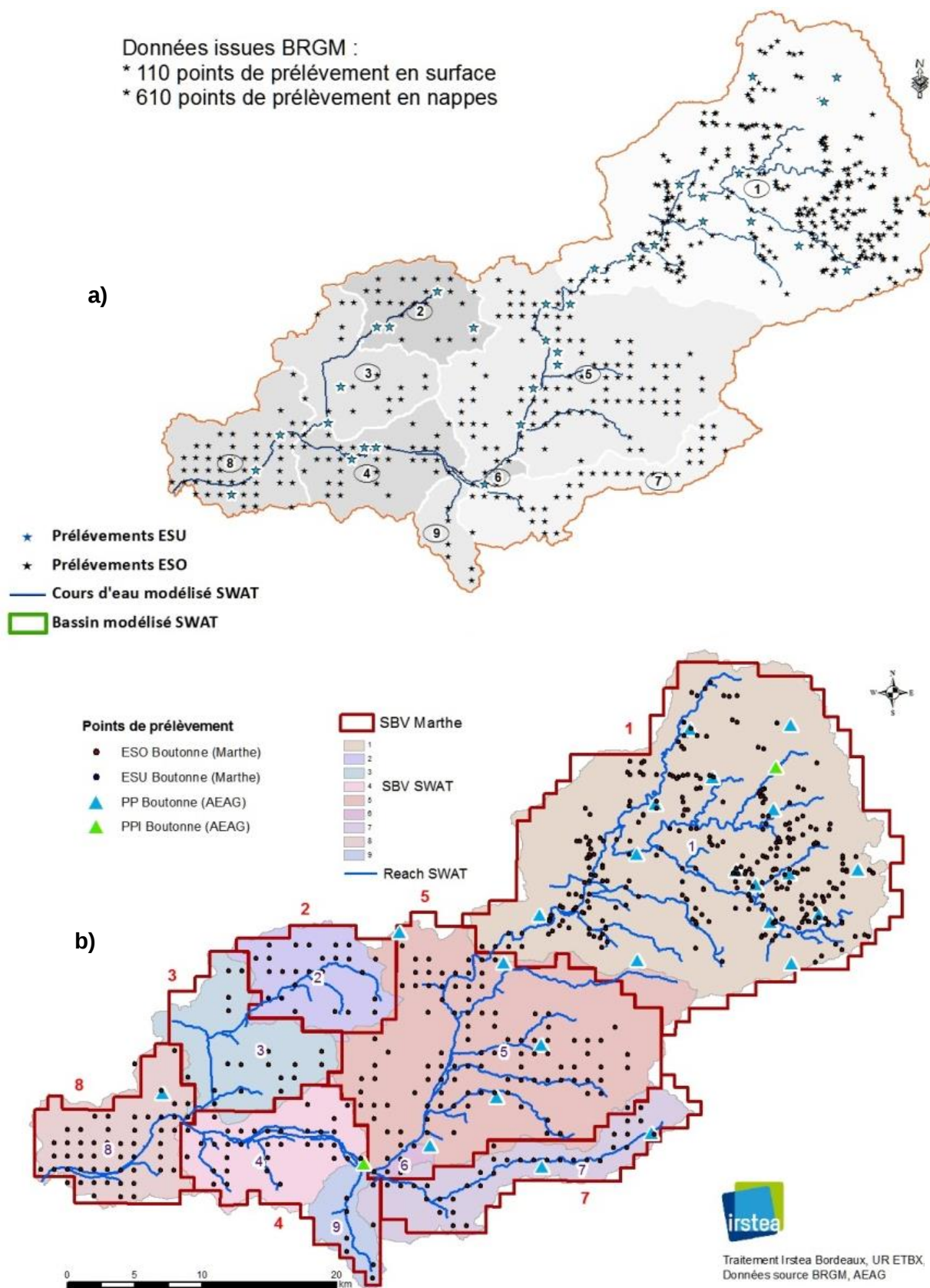
Sous MARTHE, les prélèvements sont introduits à l'échelle du pas de temps du modèle (le mois dans le modèle Boutonne) au sein des mailles concernées. Les chroniques (sur 2000/2007 pour le modèle Boutonne) sont reconstituées à partir de données réelles collectées sur le terrain (Agences de l'eau, DDT, Chambres d'agriculture et associations d'irrigants, distributeur d'eau potable, industriels...) et affectées à un point d'eau. La création de ces chroniques est un point clé dans la création du modèle hydrodynamique.

Dans SWAT, dans l'option qui a été prise pour ce travail, les prélèvements sont attribuées à chaque sous-bassins en considérant deux types de prélèvements : ceux qui retournent au bassin versant, qui est assimilé à une entité systémique dans le modèle, et ceux qui en sortent définitivement.

Les prélèvements pour des usages industriels et pour la consommation humaine, en eau souterraine et en eau de surface, correspondent au second cas. Au niveau d'un sous-bassin, on intègre dans le modèle sous SWAT des volumes mensuels moyens constants sur toute la durée de la simulation, quelles que soient les conditions climatiques. Les données proviennent de l'Agence de l'eau.

En revanche, les prélèvements destinés à l'irrigation sont implémentés directement au niveau de la HRU en considérant les pratiques agricoles calendaires, que l'on peut faire varier en fonction des années, du climat... Dans le cadre des simulations réalisées pour le projet, seule la culture de maïs grain est décrite comme nécessitant une irrigation. Toutefois, les chroniques d'irrigation ainsi considérées restent globalisées au niveau d'un sous-bassin et ne sont pas basées sur des données réelles de prélèvements en eau.

Afin de rapprocher les 2 modèles, des essais de modélisation sous SWAT ont été réalisés en utilisant les chroniques de prélèvements de MARTHE. Toutefois, la gestion très différente des prélèvements sous SWAT (avec l'option qui a été retenue pour ce travail) n'a pas permis d'aboutir à des résultats très concluants. Sous SWAT, ce paramètre est considéré comme relativement marginal alors que dans MARTHE c'est un paramètre important (surtout sur le bassin de la Boutonne) du bilan hydrique. L'illustration Illustrations 20 présente les données de prélèvements en croisant les 2 modèles.

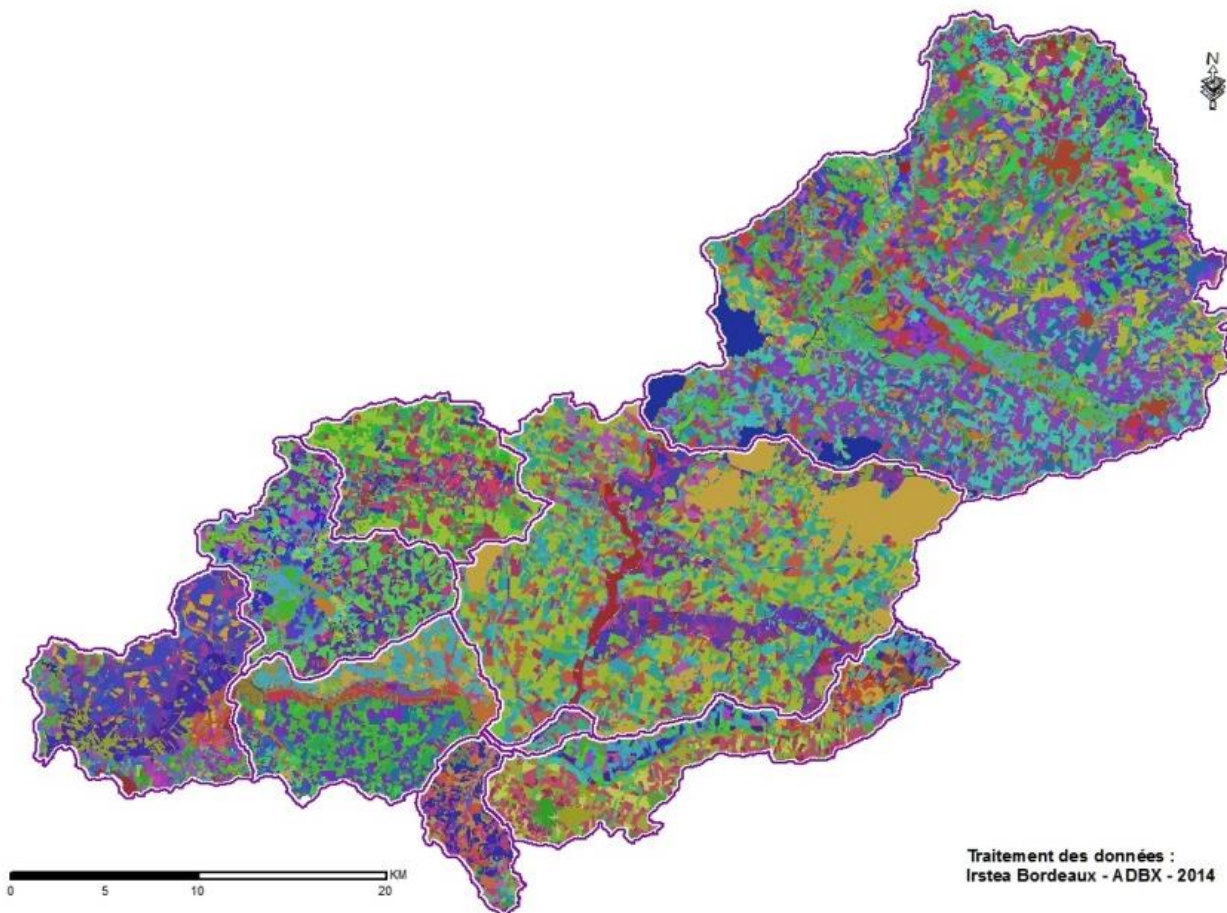


Illustrations 20 a & b : Spatialisation des données de prélèvement au sous-bassin versant (source : Irstea Bordeaux, unité ETBX, équipe projet MODCHAR)

4.1.5. HRU

La discrétisation hydrographique en 9 sous bassins n'a pas changé significativement le nombre de HRUs, du fait que les types de sols et que le découpage spatial de l'ilot RPG pour l'agricole et des polygones Corine Land Cover pour le non agricole sont demeurés inchangés.

Le nombre de HRUs a donc simplement varié à la marge en fonction de la distribution des nouvelles combinaisons uniques (sols * occupation du sol) par nouveau sous bassin (Cf. Illustration 21).



*Illustration 21 : Discretisation en combinaisons uniques sols * occupations du sol (HRU) / SBV (source Irstea Bordeaux unité ETBX, Equipe Projet Modchar)*

Les temps de calculs ont cependant triplé car le nombre d'opérations culturales par HRU agricole est passé d'une année calendaire à 2, 3, 4 voire 5 années calendaires du fait du passage de pratiques de « monoculture » à des pratiques liées à des « successions culturales ». (Cf. chapitre 4.1.1)

Une période d'initialisation de 5 ans (1995 à 1999) permet au modèle de mettre en place ses stocks hydriques, de nutriments, etc.... Mais, la calibration sur des données hydrométriques mesurées disponibles sur le bassin de la Boutonne ne commence qu'en 2000, ce qui est en adéquation avec la période simulée avec le modèle MARTHE.

4.2. COMPARAISON DES RESULTATS DES 2 MODELES EN TERME DE FLUX

4.2.1. Analyse de sensibilité

Avant l'étape de calibration proprement dite, une étape dite d'analyse de sensibilité a été menée. Il s'agissait d'identifier, parmi les centaines de paramètres du modèle SWAT, les paramètres dont les variations de valeurs impactaient le plus les résultats de la modélisation. Ce sont ces paramètres, une fois identifiés, qui seront plus particulièrement ajustés dans la phase de calibration et de validation (Gassman et al. 2007b).

La méthode du SUFI2 (Sequential Uncertainty Fitting vers. 2) (Abbaspour et al. 2004, Abbaspour 2005) a permis d'identifier les principaux paramètres impactant les débits à calibrer sur le bassin de la Boutonne. Les Illustrations 22 a et b présentent les 19 paramètres les plus impactants pour le sous bassin 8, dont l'exutoire correspond à la station de Carillon (a), ainsi que les 14 paramètres les plus importants pour le SBV 1 correspondant à la station de St Séverin (b).

La validation du modèle s'appuie sur le calcul d'une part du critère de Nash Sutcliffe et d'autre part du coefficient de détermination (r^2)

Cette analyse de sensibilité montre que les paramètres fixés au niveau du comportement « nappes » dans SWAT influencent le plus les résultats des simulations. En particulier, le GWQMN, ou seuil de contribution de la nappe souterraine à l'écoulement en chenal (mm), le REVAPMN, ou seuil d'évaporation à partir de la nappe souterraine (mm), le GW_DELAY, ou délai de recharge de l'aquifère (j), le REVAPMN et enfin le RCHRG_DP, ou coefficient de percolation vers la nappe profonde.

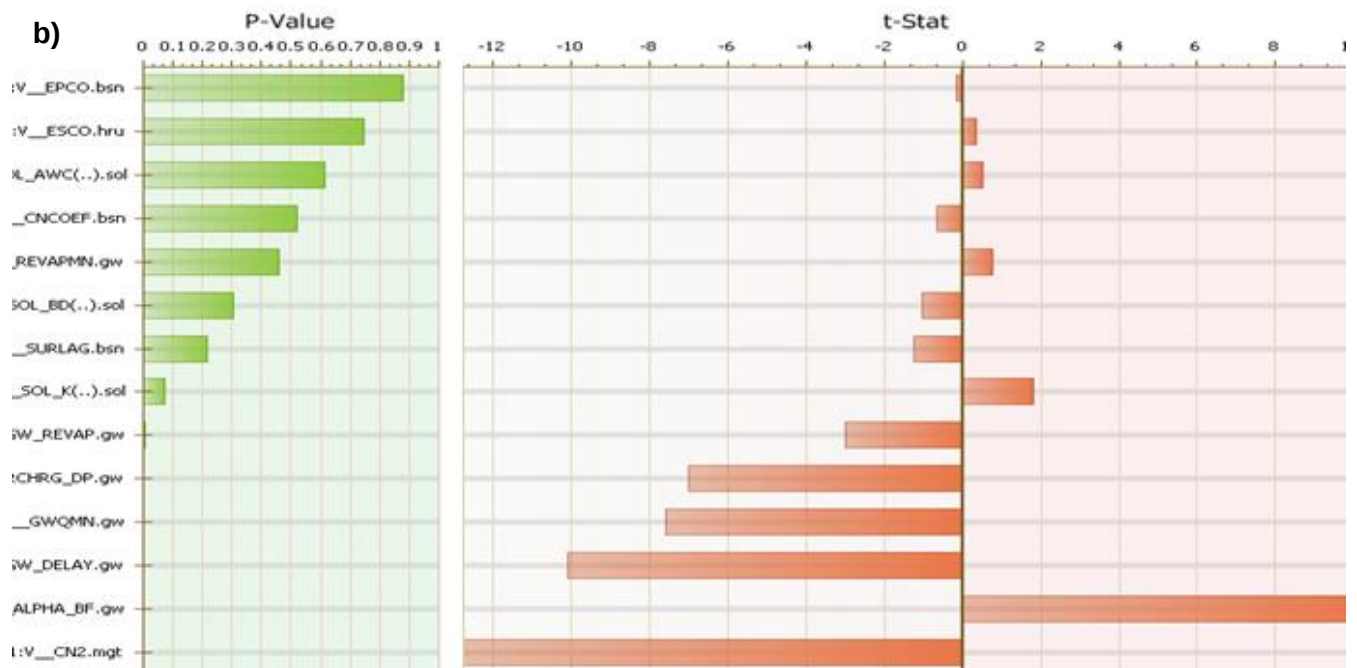
Ces résultats montrent aussi les limites de l'outil SWAT en ce qui concerne la prise en compte de l'hydrodynamisme des nappes, qui s'appuie sur la paramétrisation complexe de compartiments, paramètres dont la valeur est physiquement difficile à appréhender. Ceci montre aussi l'intérêt de coupler l'outil SWAT à un véritable outil de modélisation hydrodynamique.

Dans le cadre de ce projet, le calage du modèle SWAT repose essentiellement sur la restitution des chroniques de débit des cours d'eau aux stations de mesure et à l'exutoire de chaque sous bassin, de manière à les comparer aux chroniques en sortie de MARTHE. Des contraintes supplémentaires ont cependant été ajoutées à la validation de la paramétrisation du modèle SWAT en vérifiant la cohérence des composantes du bilan hydrique entre chaque modèle.

a)

Rank	Par Name	File	Min	Max	SBV
1	CN2	.mgt	62.53	91.6	8
2	GWQMN	.gw	0.92	1754	8
3	ESCO	.hru	0.35	0.47	8
4	SOL_AWC	.sol	0.22	0.61	8
5	CANMX	.hru	0.00	19.3	8
6	SOL_Z	.sol	2452.82	4819	8
7	ALPHA_BF	.gw	0.28	0.69	8
8	GW_REVAP	.gw	0.08	0.21	8
9	CH_K2	.rte	0.00	133	(All)
10	SOL_K	.sol	0.00	529	8
11	GW_DELAY	.gw	132.96	390	8
12	CH_N2	.rte	93.36	280	(All)
13	BIOMIX	.mgt	0.00	0.39	(All)
14	SURLAG	.bsn	0.30	7.22	8
15	EPCO	.bsn	0.39	0.75	8
16	SOL_BD	.sol	2.03	2.82	8
17	REVAPMN	.gw	0.00	204	8
18	RCHRG_DP	.gw	2.41	7.45	8
19	CNCOEF	.bsn	1.28	2.17	8

b)



Illustrations 22 a et b : Analyses de sensibilité des paramètres gérant les flux hydriques pour les SBV 8 (a) et SBV-1 (b)

4.2.2. Calibration/calage sur les stations hydrométriques

Les sorties de SWAT ont été comparées aux chroniques de valeurs de débits mesurées sur le terrain et aux chroniques fictives issues du modèle Boutonne sous MARTHE (cf. Illustration 23).

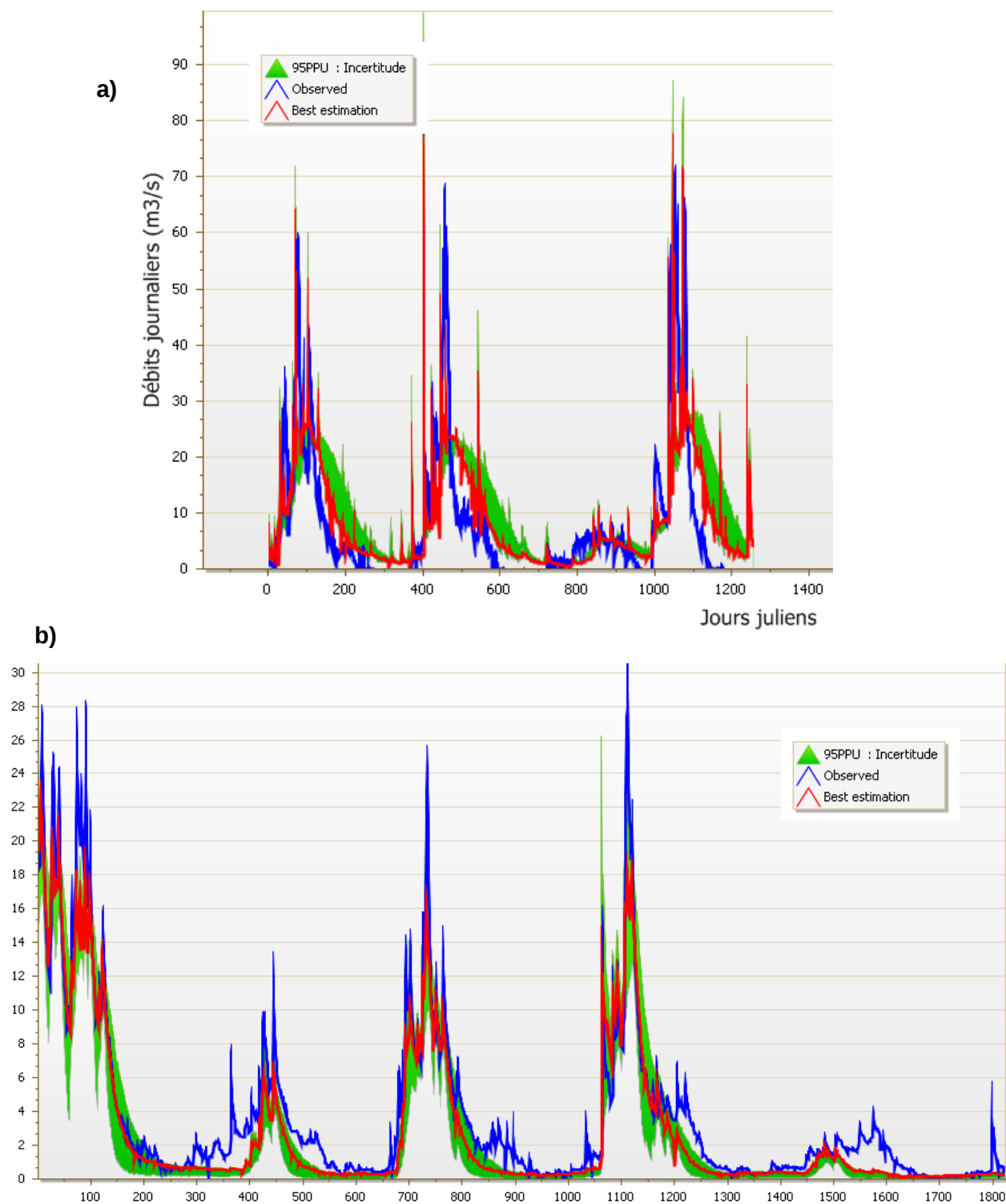
Les débits issus de MARTHE sont au pas de temps mensuel alors que les débits de la banque hydro sont au pas de temps en général journalier (avec des variations dans les durées des chroniques pour une même station de mesure).

SBV	Station à l'exutoire	Code Station	Type de station	Commentaires	Période chroniques
1	St Séverin		Fictive		1995 - 2007
J	Moulin de Chatre / St Severin	R6092920	Physique		02_03_04_08_09_10_11
2	Trézence SWAT		Fictive		
2	Tournay	R6164610	Physique		93- 96 - 98 - 00 - 03
3	Trézence fictif		Fictive		
4	Boutonne avant confluence Trézence		Fictive	Pb de traçage de la Trézence / Carthage	
5	Canal St Eutrope	R6142926	Physique	Bras de la Boutonne	2010 2011
6	Canal Puycherand	R6142925	Physique	Bras de la Boutonne	2011
7	Nié		Fictive	Confluence Nié	
8	Exutoire BV à barrage de Carillon	R6182910	Physique		2003-2004-DOUTEUX
9	Pont St Jacques	R6142924	Physique	Bras de la Boutonne	2011

Illustration 23 : Chroniques de débit de cours d'eau mesurées sur le terrain ou fictives (MARTHE)

A) Calage sur les chroniques des stations de mesures de terrain

La calibration du modèle SWAT donne de très bons résultats (Nash Suttcliffe de 0.79, $r^2 = 0.89$) à St Séverin Moulin de Châtre pour la période de 2001 à 2005 (Cf. illustration 24 b) et une bonne calibration à l'exutoire du bassin (SBV-8) à la station de Carillon (Nash Suttcliffe de 0.67, r^2 de 0.7) (Cf. Illustrations 24 a) ; en revanche, il n'a pas été possible de calibrer aux stations trop anthropisées dont les chroniques sont aussi très récentes (canal St Eutrope, Puycherand...). La question de la fiabilité de la mesure se pose également (relation hauteur/débit qui n'est plus régie par des lois simples).



Illustrations 24 a et b : Calage et analyse d'incertitude aux stations de Carillon (a) et de St Séverin (b) sur la période 2001 à 2005

B) Calage aux stations fictives MARTHE

Pour calibrer les exutoires de l'ensemble des sous bassins, compte tenu de l'absence de stations de terrain ou de l'influence des aménagements (canalisation, manœuvre d'écluses...), les chroniques restituées par MARTHE à des points « virtuels » ont été utilisées. Ces chroniques reproduisent assez bien le fonctionnement naturel du cours d'eau.

Les points de ces chroniques fictives sont reportés sur l'illustration 27 sous l'appellation M-SBV. A chacune de ces chroniques de sortie MARTHE correspond un bassin versant amont défini par tous les écoulements rejoignant le point de mesure fictif. A l'exception des sous bassins SWAT (S-SBV) 6 et 9, les distorsions géographiques entre sous bassins topographiques SWAT et MARTHE sont faibles, le plus souvent dues à la discrétisation géographique de l'espace dans le modèle MARTHE (moyenne topographique à la maille kilométrique). Les distorsions les plus importantes (S-SBV-6, S-SBV-9) trouvent leur origine dans la définition du réseau hydrographique de chaque modèle. Sous SWAT, le réseau hydrographique peut être pris en compte au plus près de la BD Carthage, avec notamment l'intégration de tronçons canalisés, donc anthropisés (« le Grand Canal », « le canal de Puycherand » « le canal de Saint Eutrope », cf. SBV6). Sous MARTHE, une partie seulement des cours d'eau du bassin de la Boutonne (les affluents principaux) est intégrée dans le modèle, c'est notamment le cas du Loubat non-intégré dans MARTHE mais pris en compte dans le modèle sous SWAT (SBV9). En conséquence, ce sous bassin ne sera pas pris en compte pour la calibration du modèle SWAT. Ces différences conduisent, pour certains bassins, à considérer la comparaison des débits sur la base de données agrégées (Illustration 26).

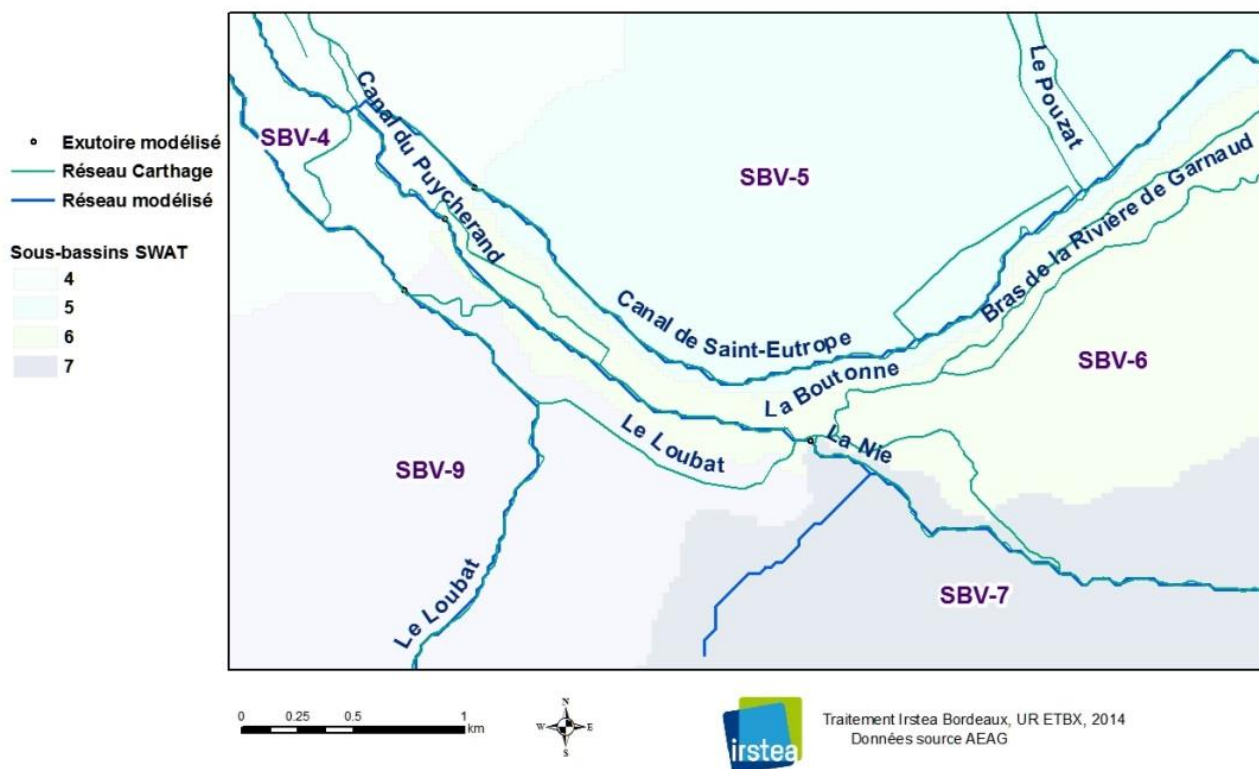


Illustration 25 : Sous bassins versants du projet Boutonne –SWAT dans les environs de St-Jean-d'Angély

MARTHE	SWAT
M-SBV-1	S-SBV-1
M-SBV-2	S-SBV-2
M-SBV-3	S-SBV-3
M-SBV-4	S-SBV-4
M-SBV-5	(S-SBV-5) + (S-SBV-6) – (S-SBV-7)
M-SBV-7	S-SBV-7
M-SBV-8	S-SBV-8

Illustration 26 : Correspondance entre les chroniques de débit aux exutoires des modèles MARTHE et SWAT. La localisation des exutoires MARTHE et SWAT sont consultables sur l'illustration 27.

Les illustrations Illustration 28 et Illustration 29 comparent les chroniques de débit simulées à l'aide du modèle MARTHE (modèle de référence) et celles calculées avec SWAT au niveau de (stations physiques et fictives). Les critères de Nash-Sutcliffe sont compris entre 0,74 et 0,85, indiquant une bonne concordance entre les chroniques de sorties de SWAT et celles de MARTHE. Cette première étape de comparaison permet d'apprécier la cohérence du flux global d'alimentation des rivières entre chaque modèle.

Plus précisément, des différences peuvent apparaître en lien avec la saisonnalité recharge/étiage. Ainsi, le rapport entre les débits calculés avec MARTHE et ceux obtenus avec SWAT, $Q_{\text{MARTHE}}/Q_{\text{SWAT}}$, varie en moyenne de 0,5 à 1,5 selon le mois considéré. Des différences plus importantes sont toutefois observées sur les mois de juillet 2000, août 2003 et juillet 2006 où le débit Q_{MARTHE} est le plus souvent inférieur à Q_{SWAT} . A l'inverse, les mois de juin, août et septembre des années 2001, 2002, 2004, 2005, 2007 présentent très souvent des débits Q_{MARTHE} supérieurs aux Q_{SWAT} .

Ces écarts viennent essentiellement des différences de représentations conceptuelles et mathématiques des relations nappes/rivières dans SWAT comparées à MARTHE. Ainsi, les chroniques issues du modèle MARTHE (à pas de temps mensuel) présentent à l'étiage des courbes de « vidange » assez régulières qui soulignent l'intervention essentielle de la nappe dans le débit du cours d'eau (circulations souterraines relativement lentes faisant intervenir des calculs entre mailles). En revanche les chroniques issues de SWAT sont plus erratiques, notamment à l'étiage, réagissant rapidement à une pluie par exemple, traduisant des calculs basés sur des bilans entre compartiments.

Légende

Chronique hydrométrique

- Institutionnelle
- Fictive - sortie simulée MARTHE
- Exutoire SBV SWAT

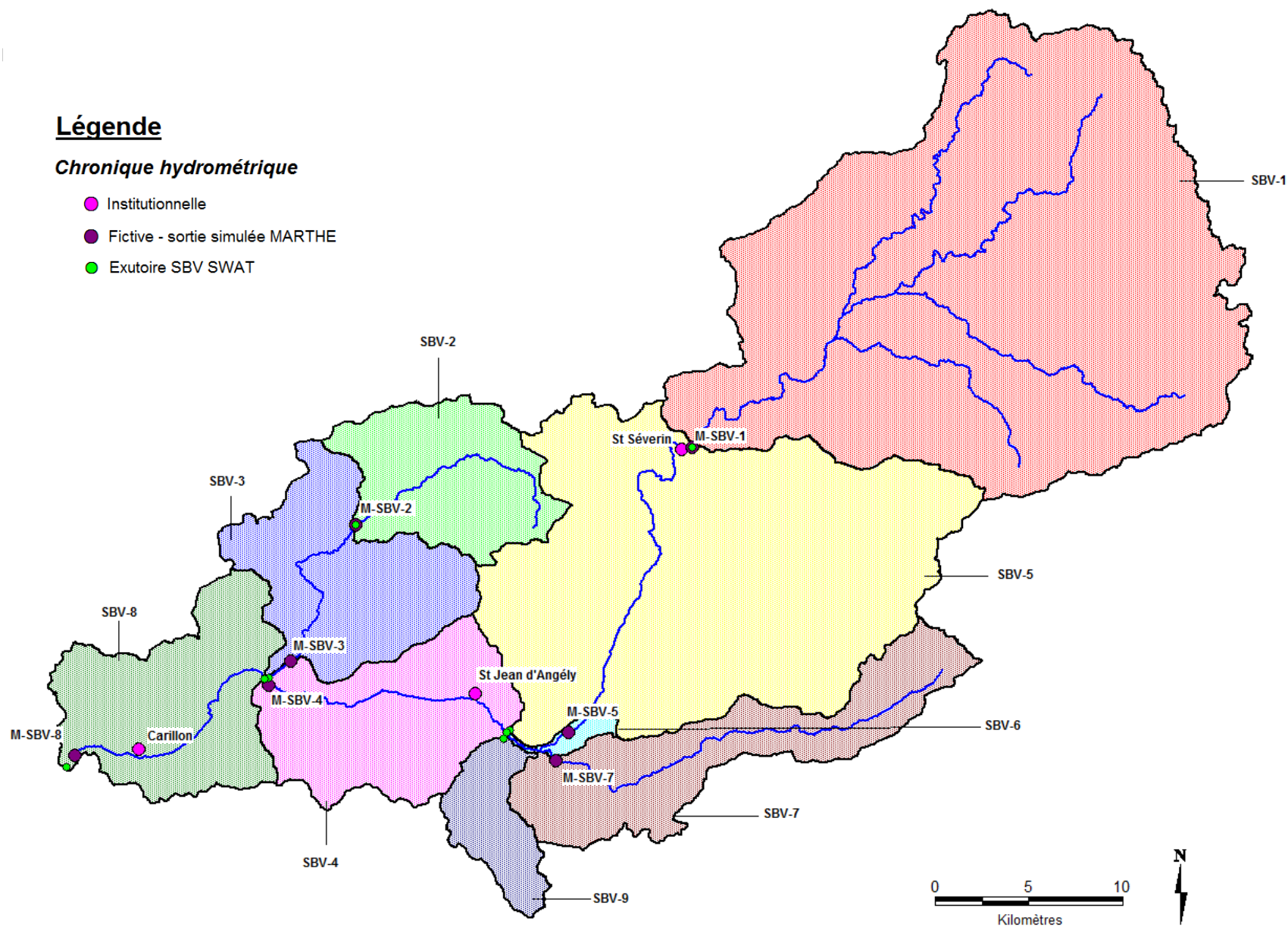


Illustration 27 : Sous bassins versants du projet Boutonne -SWAT et données hydrométriques disponibles

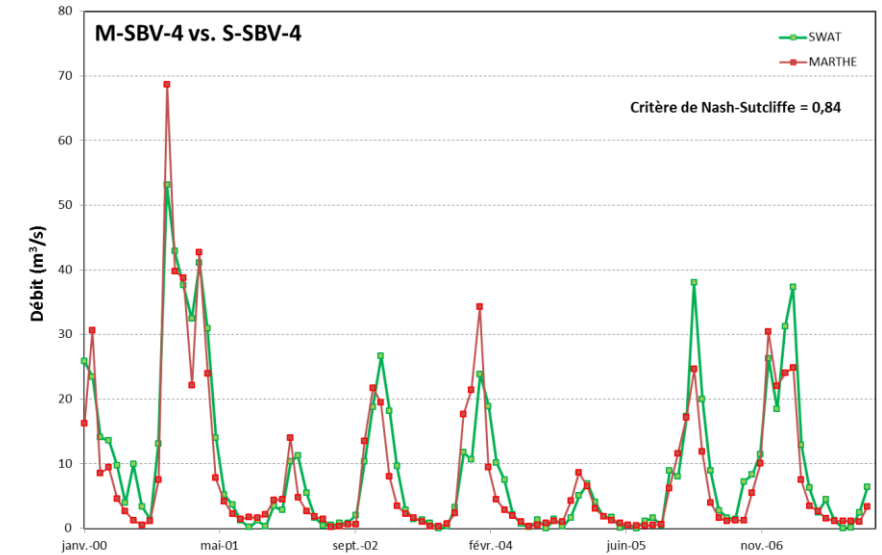
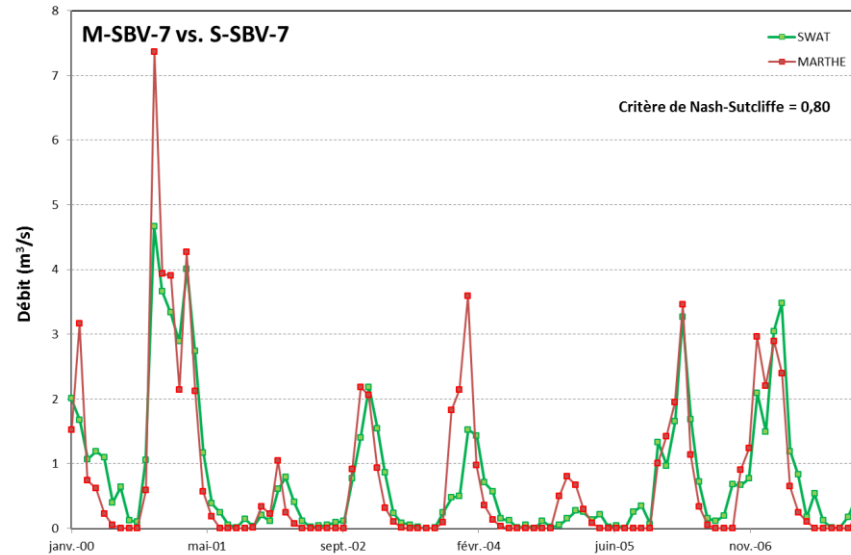
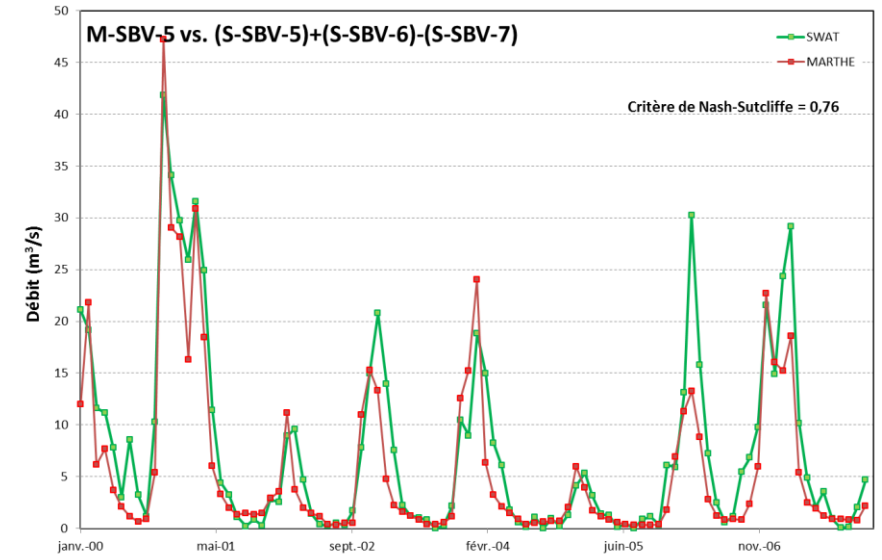
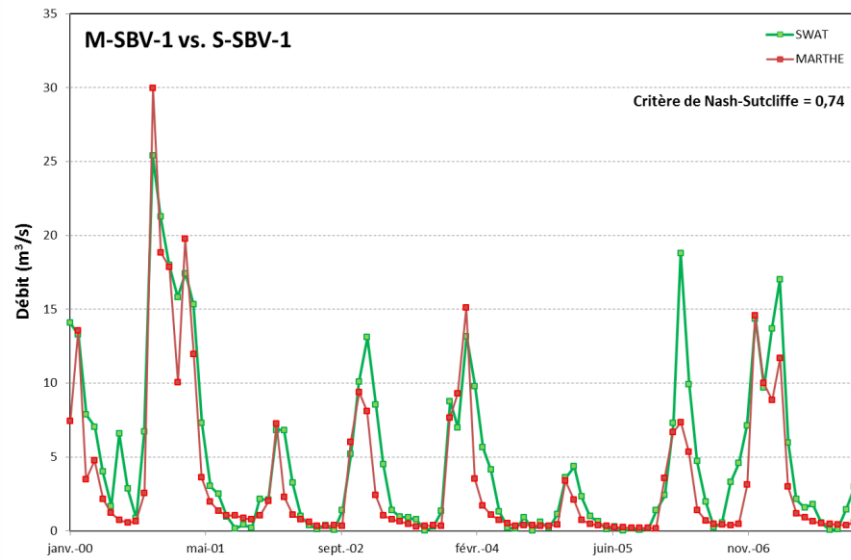


Illustration 28 : Débits simulés par les modèle SWAT et MARTHE : exemples des exutoires des sous bassins 1, 5, 7 et 4.

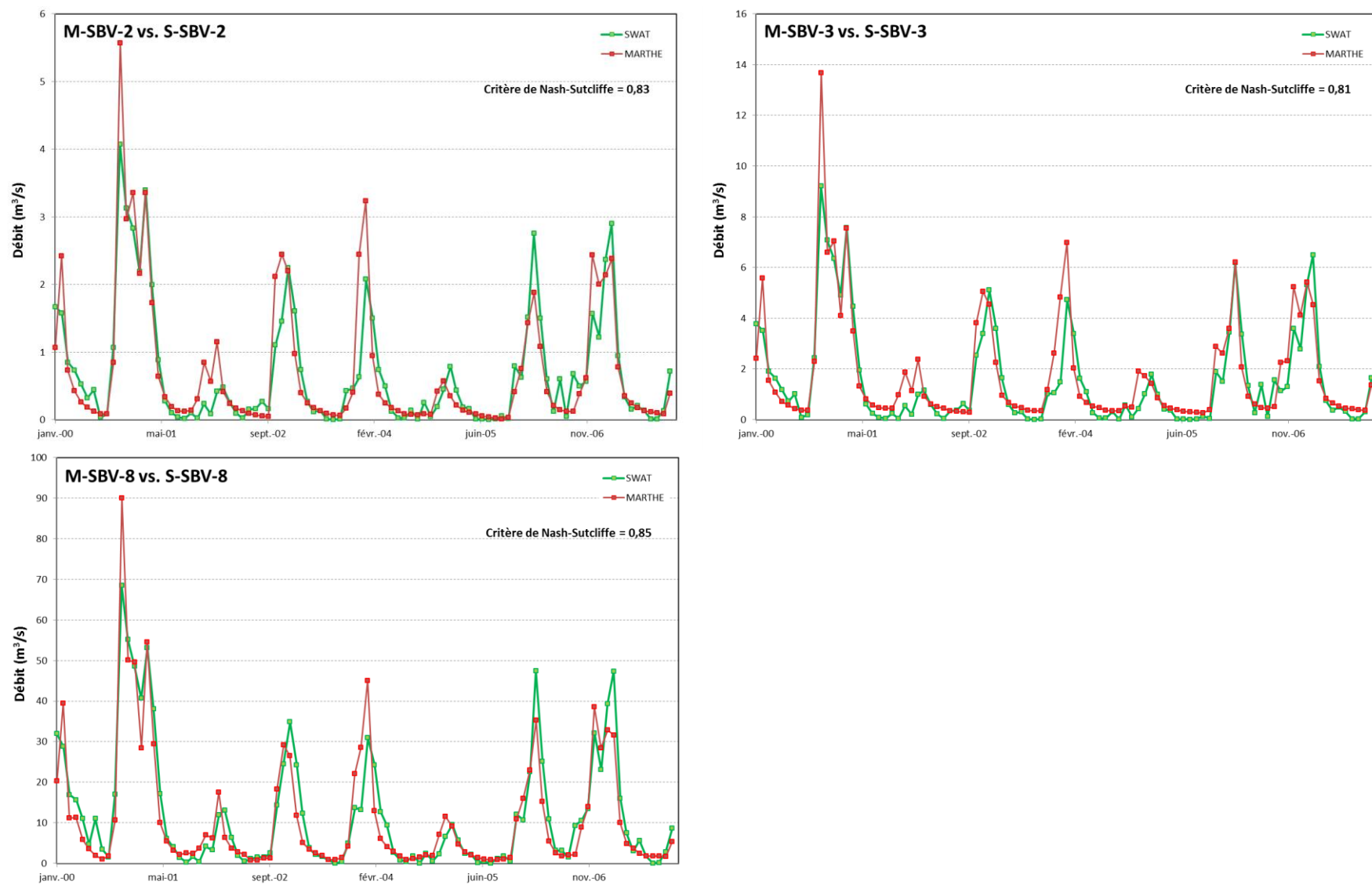


Illustration 29 : Débits simulés par les modèles SWAT et MARTHE : exemples des exutoires des sous bassins 2, 3 et 8.

4.2.3. Comparaison des bilans entrée/sortie

Les illustrations Illustration 30 à Illustration 33 présentent le bilan calculées par MARTHE et par SWAT, pour chaque sous-bassin, des différentes composantes constituant le débit du cours d'eau le traversant. Les simulations sont présentées en fonction d'un pas de temps trimestriel comme suivant : trimestre 1 (T1, janvier-mars), trimestre 2 (T2, avril-juin), trimestre 3 (T3, juillet-septembre) et trimestre 4 (T4, octobre-décembre). Le graphique du haut correspond aux composantes qui alimentent le cours d'eau (ruissellement superficiel, débordement de la nappe au niveau de chaque maille, apports directs des nappes aux rivières). Le graphique du bas montre les composantes « prélèvements » (hors prélèvements pour l'irrigation dans le modèle SWAT) et « pertes des rivières vers les nappes » qui viennent soustraire du débit à la rivière. Cette représentation permet de confronter les participations aux débits des « compartiments » propres à chaque modèle, bien que les équations et paramètres associés présents dans SWAT ne permettent pas un détail aussi fin des relations nappes/rivières que MARTHE. Ainsi, il n'est pas possible de distinguer les apports de nappe au travers du lit de la rivière et les apports de nappe par débordement dans SWAT alors que cette distinction est réalisée sous MARTHE. En conséquence, les paramètres définis dans SWAT ne sont pas exactement identique à ceux disponibles dans MARTHE. Les simulations réalisées avec MARTHE montrent que l'importance des processus contrôlant le débit du cours d'eau traversant le sous bassin varie selon le sous bassin considéré :

- **Sur le bassin versant de la Trézence** (SBV-2, SBV-3), les gains par apports de nappe vers la rivière constituent un processus clé. Ils représentent en moyenne 45 % des gains hivernaux (trimestres T1 et T4) et 100 % des gains estivaux (trimestres T3) pour l'ensemble des années étudiées. Pour les 7 années simulées, les gains de nappe vers la rivière diminuent durant les trimestres T1 et T4. Le ruissellement devient ainsi le second facteur de gain en tête de bassin (SBV-2, 16 à 49 %), tandis qu'à l'aval les flux de débordement prennent une part plus conséquente (SBV-3, 12 à 25 %). Sur ces sous bassins, les pertes sont uniquement dues aux prélèvements.
- **Sur le bassin versant de la Nie** (SBV-7), les gains par apports de nappe à la rivière sont majoritaires (> 62 %) de janvier à juin de 2000 à 2007 (trimestres T1 et T2). Durant les trimestres T3 des 7 années étudiées, lorsque le débit de la Nie est faible à nul, les apports sont uniquement constitués de flux de débordement de la nappe ; mais ces flux sont inférieurs aux pertes par la rivière. En dehors des trimestres T3, aucune perte n'est recensée sur le sous bassin. D'octobre à décembre (T4), le ruissellement devient égal ou supérieur aux gains nappe vers rivière (45 à 84 %).
- **Sur la partie amont du bassin de la Boutonne** (SBV-1), les gains par débordement dominent les gains nappe vers rivière et ceux par ruissellement durant les trimestres T2 et T3 durant l'ensemble des années simulées. Ce comportement est aussi observé en hiver (trimestres T4) pour les années 2001, 2004, 2005 et 2007. De janvier à mars (trimestres T1) pour les 7 années étudiées, les gains par ruissellement s'équilibrent avec le débordement pour une contribution moyenne de 40 %. Quel que soit le trimestre considéré, les gains « apports de la nappe à la rivière » ne dépassent pas 27,5 %. Sur ce sous bassins, les pertes sont essentiellement dues aux prélèvements. Durant les trimestres T3 des années sèches (par exemple 2003 et 2005), des pertes par échange rivière vers nappe s'ajoutent aux pertes par prélèvement. La totalité des pertes est généralement de 1 à 3 ordres de grandeur inférieurs aux gains. A l'étiage cette différence diminue.

- **Plus en aval du bassin** (SBV-5), la contribution des apports de la nappe à la rivière prend de l'importance. Elle est généralement comprise entre 30 et 60 %. Sur ce secteur, les pertes, qui restent largement inférieures aux gains, sont uniquement dues aux prélèvements.
- Enfin, **sur les parties médiane** (SBV-4) **et aval** (SBV-8), lorsque le relief s'aplanit, les gains correspondent essentiellement à des flux de débordement. Les pertes par échange nappe-rivière, limitées aux mois d'étiage des années 2000 à 2004 sur SBV-4, deviennent plus fréquentes sur le sous bassin aval. Ajoutées aux prélèvements, sur les mois d'étiage, les pertes sont comparables aux gains sur SBV-8.

La même analyse conduite à partir des bilans de la modélisation SWAT indique que :

- **Sur le bassin de la Trézence** (SBV-2 et SBV-3), les apports de la nappe à la rivière sont prédominants de janvier à juin de 2000 à 2007 (trimestres T1 et T2). Sur cette période, les gains représentent en moyenne 64 % du gain total. Aux trimestres T3 (juillet-septembre) des 7 années étudiées, ces apports chutent au profit des gains par ruissellement de surface. Les apports par sous-écoulement latéral sont globalement faibles et compris entre 5 et 10 %, à l'exception des étiages 2001, 2003 et 2005 où leur contribution augmente. La contribution des différents processus entre les SBV-2 et 3 est sensiblement la même. Sur ces sous bassins, les pertes sont uniquement dues aux prélèvements en rivière.
- **Sur le bassin versant de la Nie**, les gains par apports de nappe à la rivière sont majoritaires (en moyenne 68 %) de janvier à juin pour l'ensemble des années étudiées (trimestres T1 et T2). Aux trimestres T3 de ces années, lorsque le débit de la Nie devient faible, les apports sont principalement constitués par les flux de ruissellement superficiel (contribution moyenne de 70 %). Pendant cette période, la nappe contribue toujours à alimenter la rivière à hauteur de 8 à 25 %. De 2000 à 2007 (T4), la contribution relative des différents processus durant le trimestre T4 varie selon l'année. Les pertes sont dues aux prélèvements en rivière et sont maximums entre octobre et décembre.
- **Sur le bassin de la Boutonne hors affluent** (SBV-1, SBV-5, SBV-4 et SBV-8), la contribution des différents processus aux gains et pertes est identique. Les gains par apports de nappe à la rivière sont le plus souvent majoritaires durant le trimestre T1 et parfois durant le trimestre T2 (compris entre 50 et 91 %) pour l'ensemble des années étudiées. Durant ces trimestres, le ruissellement devient le second facteur de gain. A l'étiage (trimestre T3 pour les 7 années étudiées), la participation des apports de nappe diminue (2 à 20 %) au profit du ruissellement de surface et du sous écoulement latéral. Ce dernier processus explique alors 15 à 90 % du gain total. Le bilan des échanges nappe/rivière ne conduit à aucune perte, quels que soit l'année et le trimestre considérés. Les pertes sont uniquement dues aux prélèvements qui se concentrent d'octobre à mars.

La paramétrisation du modèle SWAT conduit donc à une certaine homogénéité de la contribution des processus d'un bassin à l'autre avec i) des apports de nappe à la rivière prédominants sur les mois de janvier à juin, ii) l'absence de pertes nettes de la rivière vers la nappe à toute période de l'année, iii) une contribution du ruissellement de surface et des sous écoulements latéraux majoritaires à l'étiage et iv) des prélèvements concentrés sur les mois d'octobre à décembre.

Cette répartition de la contribution de chaque processus aux gains/pertes trimestriels diffère notablement de celle obtenue à partir de la modélisation MARTHE. Les principales différences sont reprises dans les illustrations Illustration 30 à Illustration 33.

Ainsi bien que les débits de rivière simulés aux points nodaux concordent assez bien entre SWAT et MARTHE, les contributions des différents processus aux débits des rivières diffèrent entre les 2 modèles. Hors le rôle exercé par chacun des processus de gain/perte d'eau en rivière conditionne le calcul de la distribution des quantités d'azote distribuées dans chaque compartiment (sol/nappe/rivière). En conséquence, les données de sorties du modèle SWAT utilisées comme données d'entrées de MARTHE peuvent potentiellement être sources d'erreur. Ce constat conduit à proposer des pistes d'amélioration.

	Bilan entrées/sorties MARTHE	Bilan entrées/sorties SWAT ⁷	Comparaison SWAT/MARTHE
SBV2 - Trézence			- Forte contribution des apports de la nappe à la rivière pour les deux modèles - Décalage temporelle pour les périodes de contribution majoritaires des apports de la nappe à la rivière : d’avril à septembre sous MARTHE et de janvier à juin sous SWAT - Ruissellement prédominant entre juillet et septembre sous SWAT mais inexistant de mars à septembre sous MARTHE - Variation inter-annuelle des volumes prélevés sous MARTHE / aucune variation sous SWAT
SBV3 - Trézence			- Prélèvements majoritairement répartis entre mars et septembre sous MARTHE / prélèvements répartis sur les mois d’octobre à mars sous SWAT - Volumes prélevés sous SWAT d’au moins un ordre de grandeur inférieurs à ceux implémentés sous MARTHE - Contribution identique des processus en tête et queue de bassin sous SWAT / Contribution variable des processus entre l’amont et l’aval sous MARTHE

Illustration 30 : Bilans entrées/sorties sur les sous bassins de la Trézence : comparaison MARTHE/SWAT (avec la méthode de prélèvement au sous-bassin).

⁷ Hors irrigation

	Bilan entrées/sorties MARTHE	Bilan entrées/sorties SWAT ⁸	Commentaires
SBV1 – Boutonne amont			- Contribution des gains par apports de nappe < 30 % sous MARTHE quel que soit le trimestre / Contribution supérieure à 60 % sous SWAT sur les trimestres T1 et T2 - Aucun ruissellement sous MARTHE aux trimestres T3 / Contribution du ruissellement aux gains de 37 à 83 % sur le trimestre T3 avec SWAT - Perte vers la nappe lors des étés secs sous MARTHE / Aucune perte vers la nappe sous SWAT - Variation inter-annuelle des volumes prélevés sous MARTHE / aucune variation sous SWAT - Prélèvements majoritairement répartis entre mars et septembre sous MARTHE / prélèvements répartis sur les mois d'octobre à mars sous SWAT - Volumes prélevés sous SWAT d'au moins un ordre de grandeur inférieurs à ceux implémentés sous MARTHE
SBV5 – Boutonne médiane			- Fort contraste de contribution des apports de nappe selon le trimestre : - T3 : Contribution par apports de nappe compris entre 20 et 60 % sous MARTHE / Contribution inférieure à 10 % sous SWAT - T1 : Contribution par apports de nappe < 48 % sous MARTHE / Contribution > 50 % sous SWAT - Aucun ruissellement sous MARTHE aux trimestres T3 (voir T2 des années sèches) / Contribution du ruissellement aux gains de 36 à 87 % sur le trimestre T3 - Pertes vers la nappe lors des étés secs sous MARTHE / Aucune perte vers le nappe sous SWAT - Variation inter-annuelle des volumes prélevés sous MARTHE / aucune variation sous SWAT, - Prélèvements majoritairement répartis entre mars et septembre sous MARTHE / prélèvements répartis sur les mois d'octobre à mars sous SWAT - Volumes prélevés sous SWAT d'au moins un ordre de grandeur inférieurs à ceux implémentés sous MARTHE

Illustration 31 : Bilans entrées/sorties sur les sous bassins de la Boutonne amont/médiane : comparaison MARTHE/SWAT(avec la méthode de prélèvement au sous-bassin).

	Bilan entrées/sorties MARTHE	Bilan entrées/sorties SWAT ⁹	Commentaires
SBV7 – Nie			- Contribution majoritaire des apports de nappe à la rivière de janvier à juin pour les deux modèles, contribution relative comparable supérieure à 60 % - En période d'étiage (T3), le ruissellement contribue majoritairement à alimenter la rivière sous SWAT tandis que sous MARTHE, le flux de débordement de nappe assure ce rôle - Le bilan des échanges nappe/rievière sous SWAT ne conduit à aucune perte de la rivière vers la nappe / Sous MARTHE, des pertes sont enregistrées à l'étiage (T3), perte supérieures aux gains - Aucun prélèvement en rivière implémenté sous MARTHE / prélèvements répartis sur les mois d'octobre à mars sous SWAT
SBV4 – Boutonne aval			- Sur les trimestres T3, contribution majoritaire du débordement sous MARTHE / Sous SWAT, apports majoritaires par ruissellement - Le bilan des échanges nappe/rievière sous SWAT ne conduit à aucune perte de la rivière vers la nappe / Sous MARTHE, des pertes sont enregistrées à l'étiage (T3) - Variation inter-annuelle des volumes prélevés sous MARTHE / aucune variation sous SWAT - Prélèvements majoritairement répartis entre mars et septembre sous MARTHE / prélèvements majoritaires sur les mois d'octobre à décembre sous SWAT - Volumes prélevés sous SWAT inférieurs à ceux implémentés sous MARTHE

Illustration 32 : Bilans entrées/sorties sur les sous bassins de la Nie et de la Boutonne aval : comparaison MARTHE/SWAT (avec la méthode de prélèvement au sous-bassin).

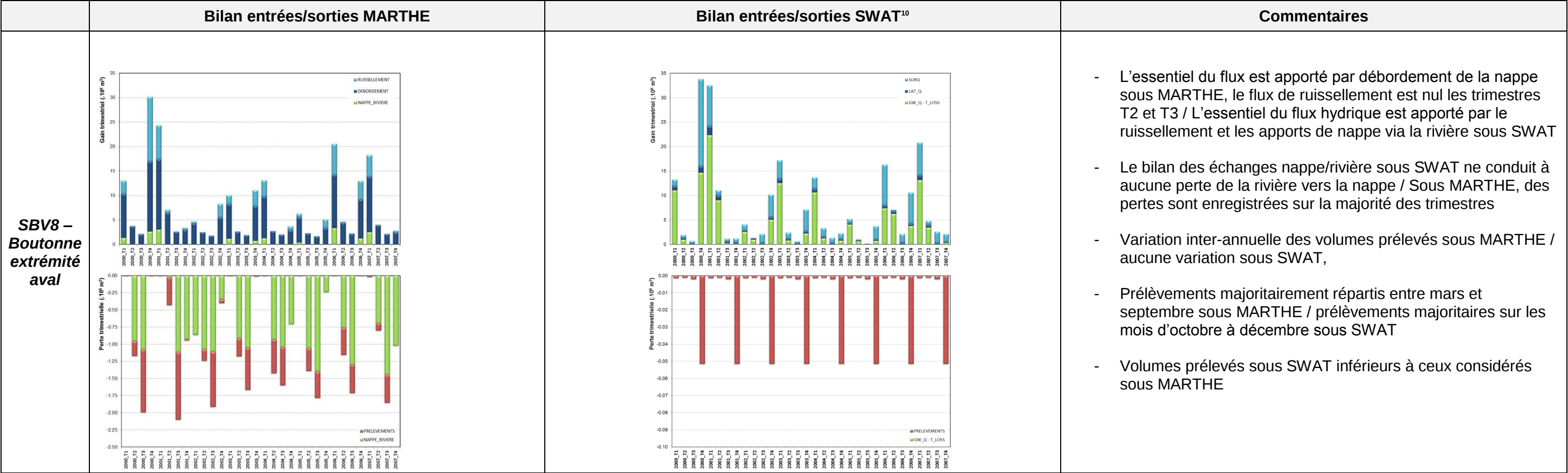


Illustration 33 : Bilans entrées/sorties sur le sous-bassin de la Boutonne terminal : comparaison MARTHE/SWAT (avec la méthode de prélèvement au sous-bassin).

4.2.4. Comparaison des flux de recharge

On compare ici les flux d'eau qui alimentent la nappe à un pas de temps donné, pour chacun des modèles et à l'échelle d'un sous bassin versant.

La comparaison des chroniques temporelles de flux de recharge montre qu'il existe un décalage temporel sur la recharge et la vidange des aquifères (Illustration 34). La recharge et la vidange interviennent plus tôt sous MARTHE. Ce décalage est d'environ 1 à 2 mois. Il s'expliquerait par :

- l'origine différente des données météorologiques utilisées pour les deux modèles,
- la différence du pas de temps de calcul des modèles : journalier pour SWAT, mensuel pour MARTHE.
- les approximations de paramétrage du modèle SWAT pour les variables de transfert vers la nappe ; ces dernières n'étant pas contraintes par une chronique piézométrique à reproduire.

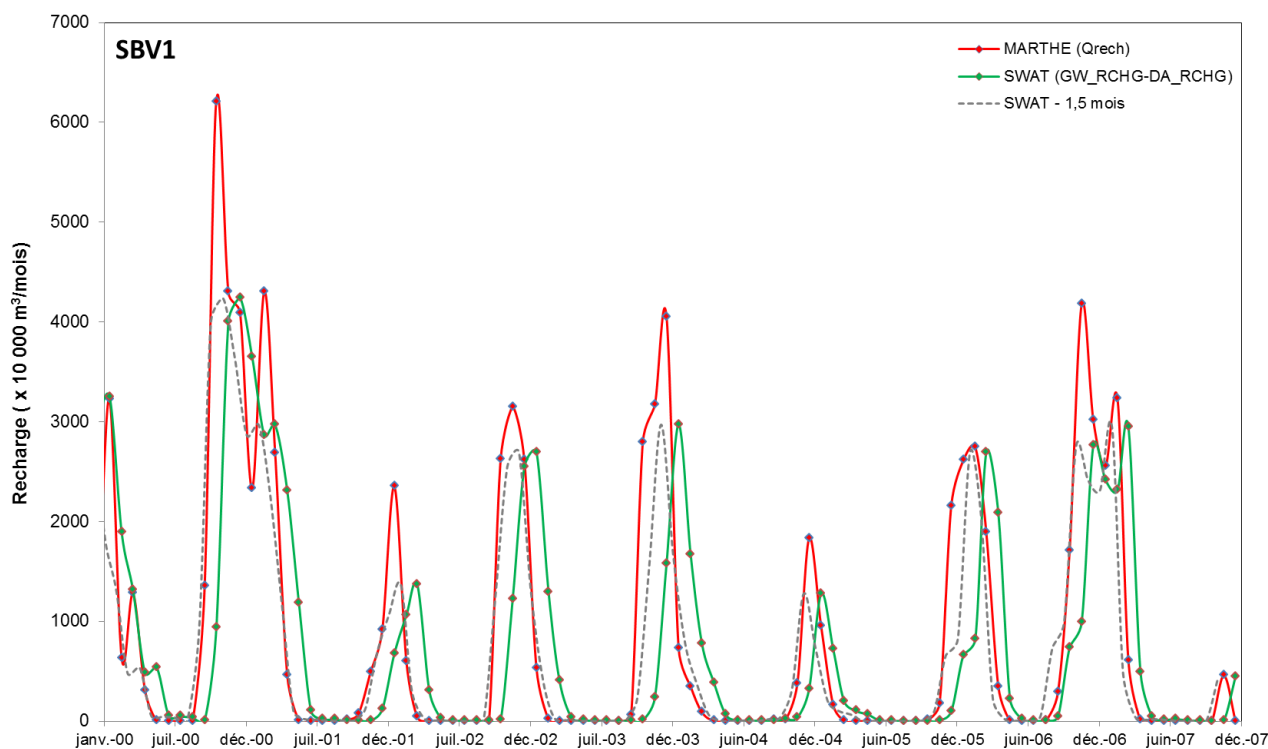


Illustration 34 : Exemple de chroniques de recharge comparées à l'échelle du sous bassin 1.

Quel que soit le sous bassin considéré, les rapports de flux mensuels (pour un décalage appliqué au flux SWAT de 1,5 mois) indiquent que (Illustration 35) :

- les flux de recharge de la nappe simulés sous MARTHE entre octobre et janvier sont le plus souvent supérieurs à ceux du modèle SWAT. Le rapport des flux $Q_{\text{MARTHE}}/Q_{\text{SWAT}}$ est majoritairement compris entre 1 et 4. Ponctuellement ce rapport peut atteindre de 30 à 350.
- Les flux de recharge de la nappe simulés par SWAT entre avril et août sont supérieurs à ceux simulés par MARTHE. De juin à septembre, le rapport tend vers zéro car la

recharge de la nappe sous MARTHE, sur cette période, est généralement proche de zéro.

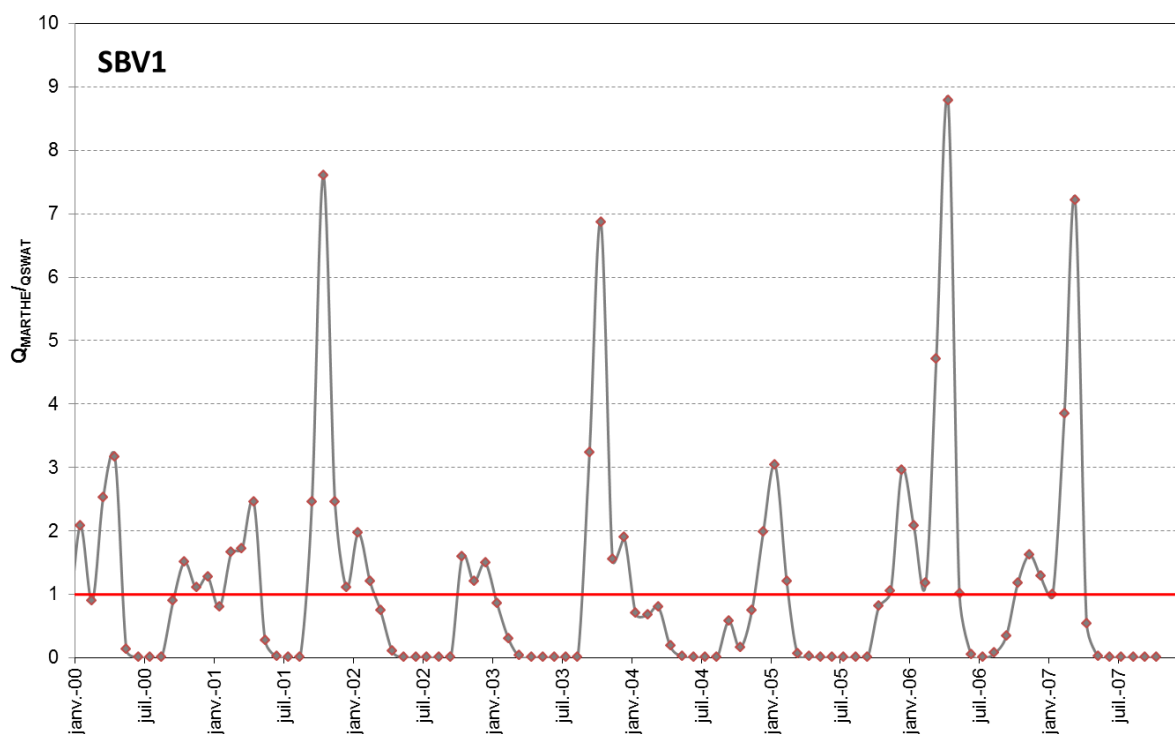


Illustration 35 : Exemple du rapport des flux de recharge simulés par les modèles MARTHE et SWAT à l'échelle du sous bassin 1.

Enfin, l'illustration Illustration 36 fournit la répartition géographique de ces écarts de flux de recharge entre les 2 modèles pour les mois de décembre des années simulées (2000-2007). Le rapport $Q_{\text{MARTHE}}/Q_{\text{SWAT}}$ varie en fonction des années considérées. Toutefois, de vastes zones du bassin de la Boutonne montrent des flux cohérents entre les modèles ($0,5 < Q_{\text{MARTHE}}/Q_{\text{SWAT}} < 2$) pour l'ensemble des années étudiées. Il est à noter que, les secteurs qui présentent des rapports élevés (hors artefacts de bordure) varient selon l'année. Par exemple, ce rapport est plus élevée pour le sous bassin, Boutonne moyenne et aval en décembre 2001 comparativement aux autres sous bassins tandis que le rapport le plus élevée est obtenu pour le sous bassin de la Boutonne amont, en décembre 2005.

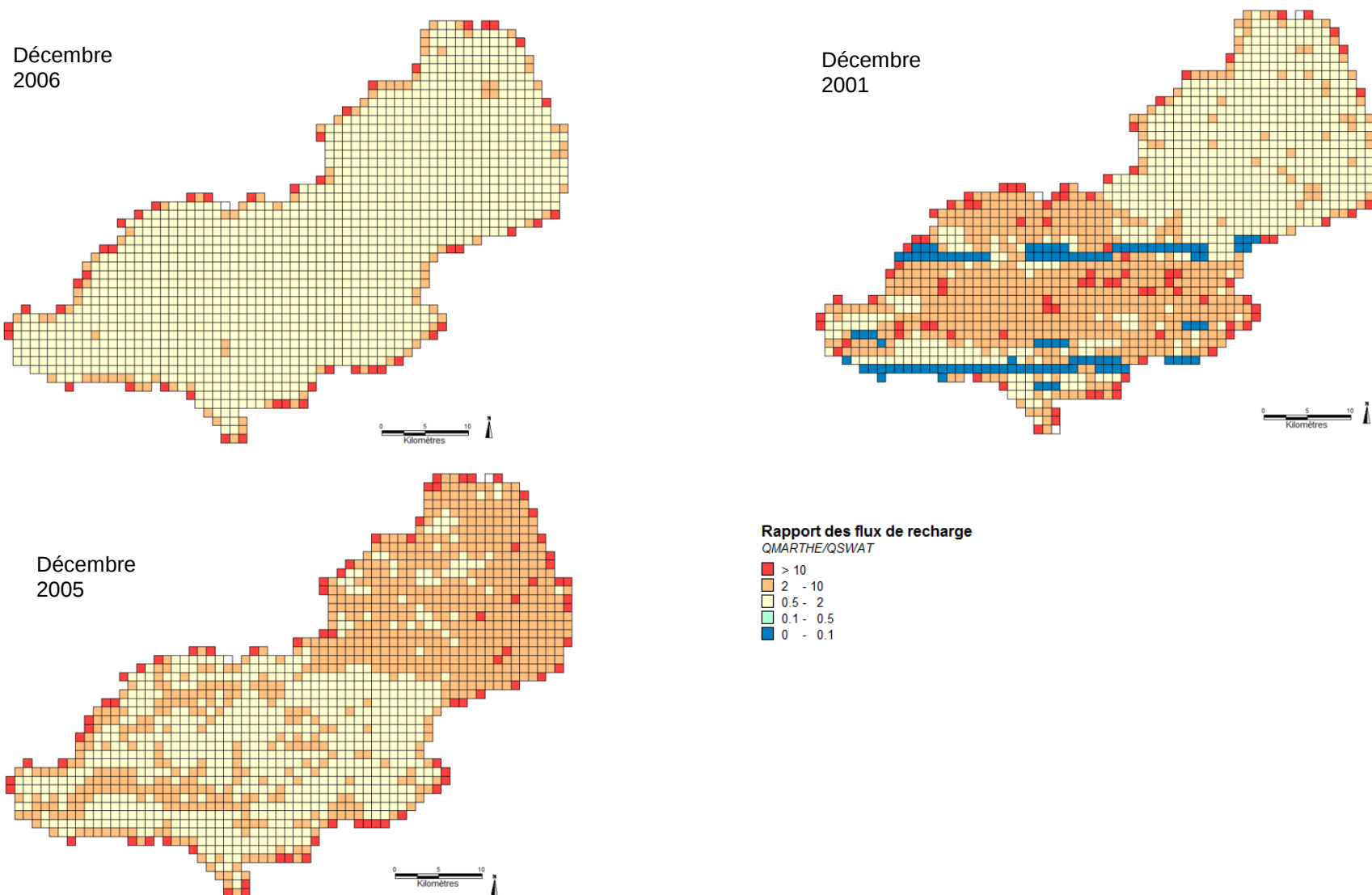


Illustration 36 : Rapport des flux de recharge MARTHE/SWAT pour différentes périodes et sur l'extension du domaine modélisé

4.3. CONFRONTATION DES RESULTATS DE SWAT AUX TENEURS MESUREES EN RIVIERE

Sur le bassin de la Boutonne, les stations de suivi de la qualité des eaux de surface sont assez nombreuses. L'illustration Illustrations 37 résume les données existantes dans la base de données de l'Agence de l'eau Adour-Garonne.

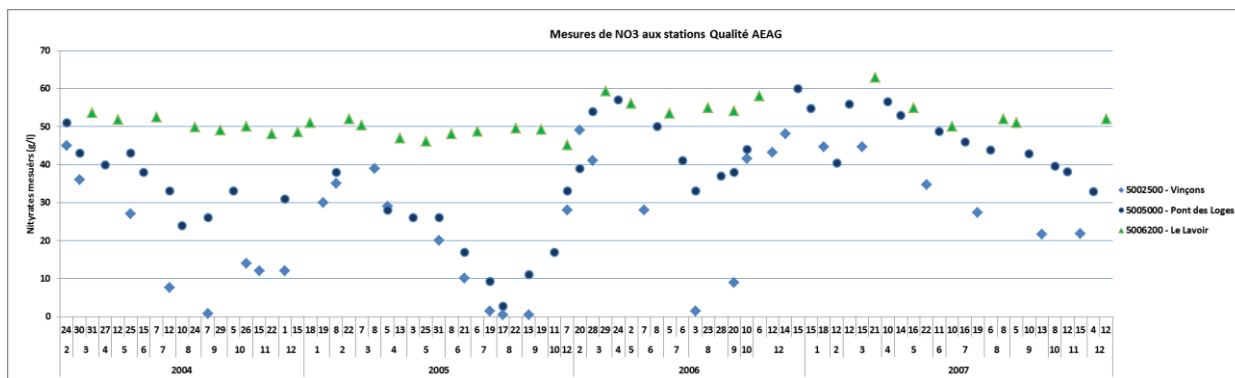
La comparaison entre les concentrations en nitrates en rivière simulées avec le modèle Boutonne SWAT et les mesures réalisées au niveau des stations de suivi montre globalement une mauvaise corrélation pour les sous bassins en aval. Il faut souligner toutefois que les stations ne sont pas placées à l'exutoire des sous-bassins, ce qui peut expliquer le décalage entre concentrations en nitrate simulées et mesurées. Le placement de nouveaux exutoires dans un projet Boutonne futur pourra enlever cet artefact et permettre un meilleur calage qualité en eaux de surface.

En revanche, pour le sous bassin en amont (SBV 1), la corrélation entre la chronique restituée par le modèle à l'exutoire et la station de Pont-des-Loges servant de référence est satisfaisante (Cf. Illustration 38). Ainsi, la simulation reproduit correctement l'ordre de grandeur des concentrations en nitrates mesurées au niveau de la station. De plus, la variation temporelle des flux de nitrates est également simulée même si les chroniques simulées sont décalées par rapport aux chroniques observées. Par exemple, les valeurs les plus élevées mesurées sur le terrain au printemps alors que le modèle restitue les valeurs les plus fortes en période estivale. Ce décalage s'explique par une mauvaise prise en compte de la recharge sous SWAT (cf. chapitre précédent).

Toutefois, dans le modèle SWAT, les paramètres gérant le cycle du nitrate restent encore à calibrer. Le paramètre de dénitrification a été calé au vu de mesures *in situ* (référence CEMAGREF, (Torre et al. 1992)°. Il reste à caler les taux de solubilité en rivière, les taux d'absorption de l'azote par les plantes, etc, notamment en spatialisant les paramètres et en s'appuyant sur des procédures d'optimisation et d'analyse d'incertitude à l'aide de la méthode Sequential Uncertainty Flitting V2 (SUFI2) (Abbaspour et al. 2007a, Abbaspour et al. 2007b, Akhavan et al. 2010).

D'une manière générale, la confrontation des deux modèles souligne l'importance de bien reproduire en premier lieu les phénomènes en termes de flux pour arriver à bien reproduire les chroniques observées sur le terrain. SWAT a été développé en priorité pour évaluer l'impact environnemental des usages du sol (en particulier les pratiques agricoles) sur les flux d'eau, de pesticides, de nutriments, de bactéries et de métaux lourds, dans les eaux et les sols à l'échelle physique du bassin versant topographique de tailles variées ; son atout principal est son module agronomique dont les aménagements agro-environnementaux (rypisilve, bandes enherbées, etc). De fait, SWAT est utilisé dans le monde entier dans des contextes hydro climatiques et anthropisés très divers [pour la France, citons les travaux sur la modélisation de l'azote avec SWAT, d'un ancien d'Irstea, P. Bordenave (Bioteau et al. 2002, Laurent 2007)] En revanche son caractère « semi-spatialisé », sa représentation simplifiée des phénomènes hydrodynamiques, sans la contrainte de reproduire les chroniques piézométriques, en font deux antonymes de MARTHE. La calibration de ce modèle de type réservoirs fait appel à de nombreux paramètres qu'il convient de régler en faisant appel à des algorithmes de calibration qui permettent d'optimiser la fonction objectif en calant la valeur de chaque paramètre identifié comme « sensible » dans une plage de valeurs issue « à dire d'expert » ou issue de la bibliographie. Inversement, MARTHE est spatialisé et reproduit fidèlement (dans le cas du modèle des nappes du Jurassique) les chroniques piézométriques et de débits en rivière.

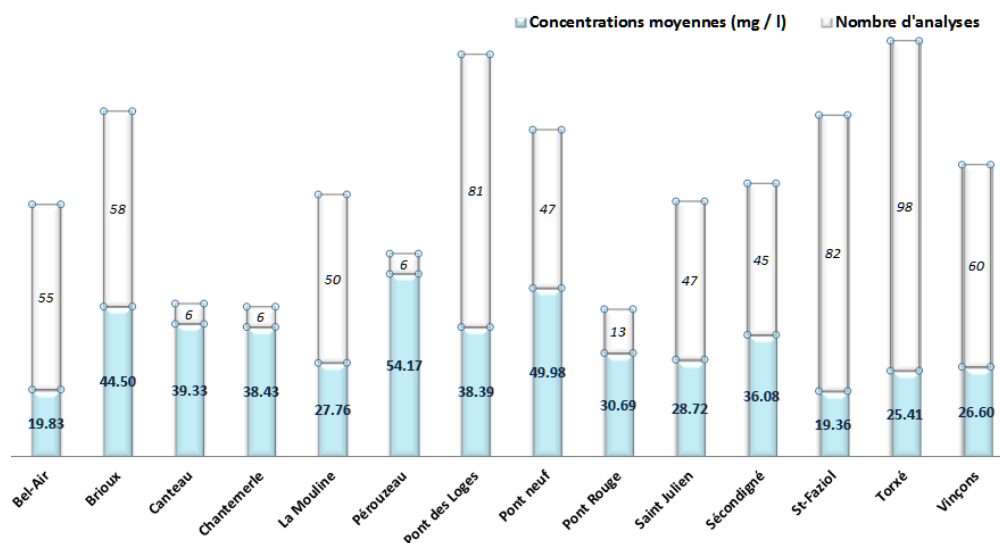
a)



b)



c)



Illustrations 37 a b et c : Concentrations en NO₃ mesurées (2000 – 2007) aux stations AEAG du bassin de la Boutonne : a) exemple de 3 chroniques, b) carte des stations, c) concentrations moyennes et nombre d'analyses par station (source Irstea Bordeaux unité ETBX, Equipe Projet Modchar)

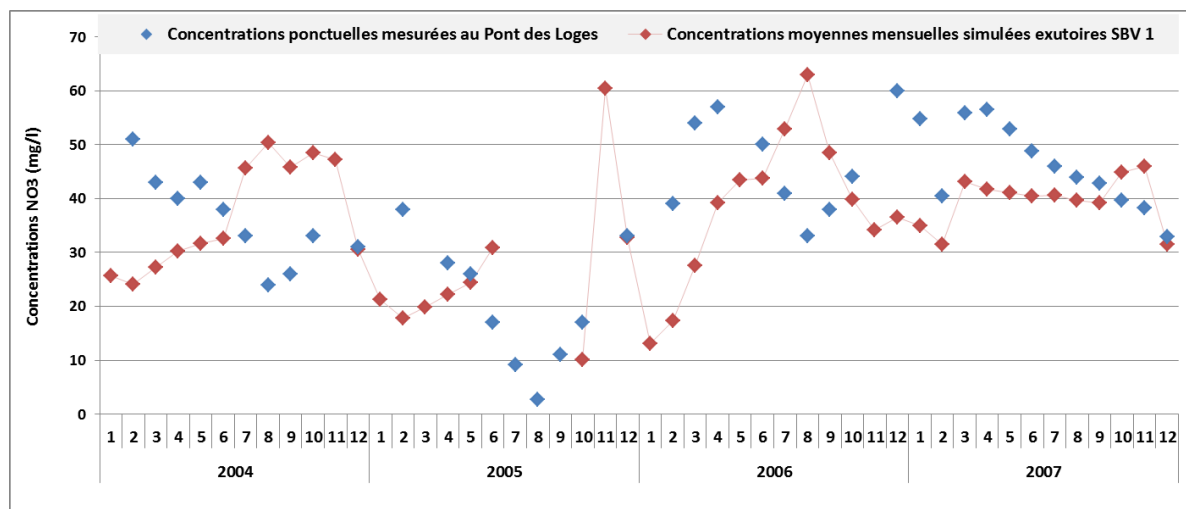


Illustration 38 : confrontation des concentrations moyennes mensuelles simulées à l'exutoire du SBV 1 aux concentrations ponctuelles observées sur la station de Pont-des-Loges

5. Modélisation des transferts de nitrates sous MARTHE

5.1. PARAMETRISATION DU MODELE

5.1.1. Emprise géographique

En 2012, la modélisation était bornée au domaine aquifère du Jurassique supérieur, limité au nord est par le couloir de failles joignant Chef-Boutonne à Aiffres. Pour cette nouvelle modélisation, le bassin amont de la Boutonne, situé au nord du couloir de failles, et les formations géologiques ainsi que les aquifères (Infra-Toarcien et Dogger) qui lui sont attachées ont été prises en compte.

5.1.2. Conditions aux limites

Charges

En limite du modèle, les potentiels sont imposés sur la base de ceux calculés initialement par le modèle régional (Illustration 39). Afin de limiter les effets de bordure, les mailles à charges imposées sont situées en dehors du bassin hydrographique de la Boutonne. Ces potentiels, imposés pour chaque couche, varient à chaque pas de temps.

Concentrations

Les données d'intrants de SWAT couvrent uniquement le bassin versant topographique de la Boutonne. En l'absence de données à l'extérieur du bassin topographique, les concentrations ont été imposées sur le pourtour du bassin versant.

Les chroniques de l'ensemble des qualitomètres de la banque de données ADES (réseau RCS/RCO géré par l'Agence de l'eau, réseau complémentaire régional, suivi sanitaire des captages pour l'eau potable (ARS)...) bordant le bassin ont été analysées pour juger de l'évolution temporelle des concentrations sur la période de simulation 2000-2007. La majorité des chroniques ne permet pas de mettre en avant une tendance. Pour nombre d'entre elles, la fréquence d'analyses est insuffisante pour déceler des variabilités intra-annuelles. En première approche, une concentration moyenne a donc été attribuée à chaque qualitomètre pour la période 2000-2007, partant de l'hypothèse que les concentrations n'ont pas évolué après 2007. Les analyses de 2009 conduites dans le cadre des opérations CACHALO1 (Bichot *et al.*, 2011) et CAMERA (Petelet Giraud *et al.*, 2010) ont aussi été prises en compte dans les secteurs où les qualitomètres faisaient défaut ou étaient trop éloignés des limites.

Afin de définir les bassins versants d'appartenance de chaque qualitomètre et la concordance géographique entre qualitomètres et maille à concentration imposée, un croisement a été effectué entre les piézomètres disponibles, la topographie et l'occupation du sol. L'emprise de chaque qualitomètre sur les bordures à concentrations imposées est représentée sur l'illustration Illustration 39. Cette illustration montre la concentration imposée pour les mailles affleurantes. En zone boisée, les concentrations sont imposées à 15 mgNO₃⁻/L.

Pour les mailles de bordure des formations non-affleurantes (aquifère captif et formation imperméables), les concentrations sont imposées à 0 mgNO₃⁻/L.

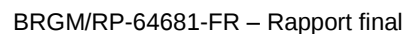


Illustration 39 : Conditions limites du modèle Boutonne sous MARTHE (charges et concentrations en nitrates)

5.1.3. Conditions initiales

Charges

Les charges appliquées en début de simulation correspondent à une moyenne des charges simulées par le modèle régional à la maille sur les mois d'août 2000 à 2007.

Concentrations

Les concentrations initiales dans les mailles affleurantes sont issues de l'interpolation spatiales des valeurs mesurées à l'étiage disponibles entre 1999 et 2007 (Illustration 40). Les concentrations initiales dans les mailles non-affleurantes sont fixées à zéro.

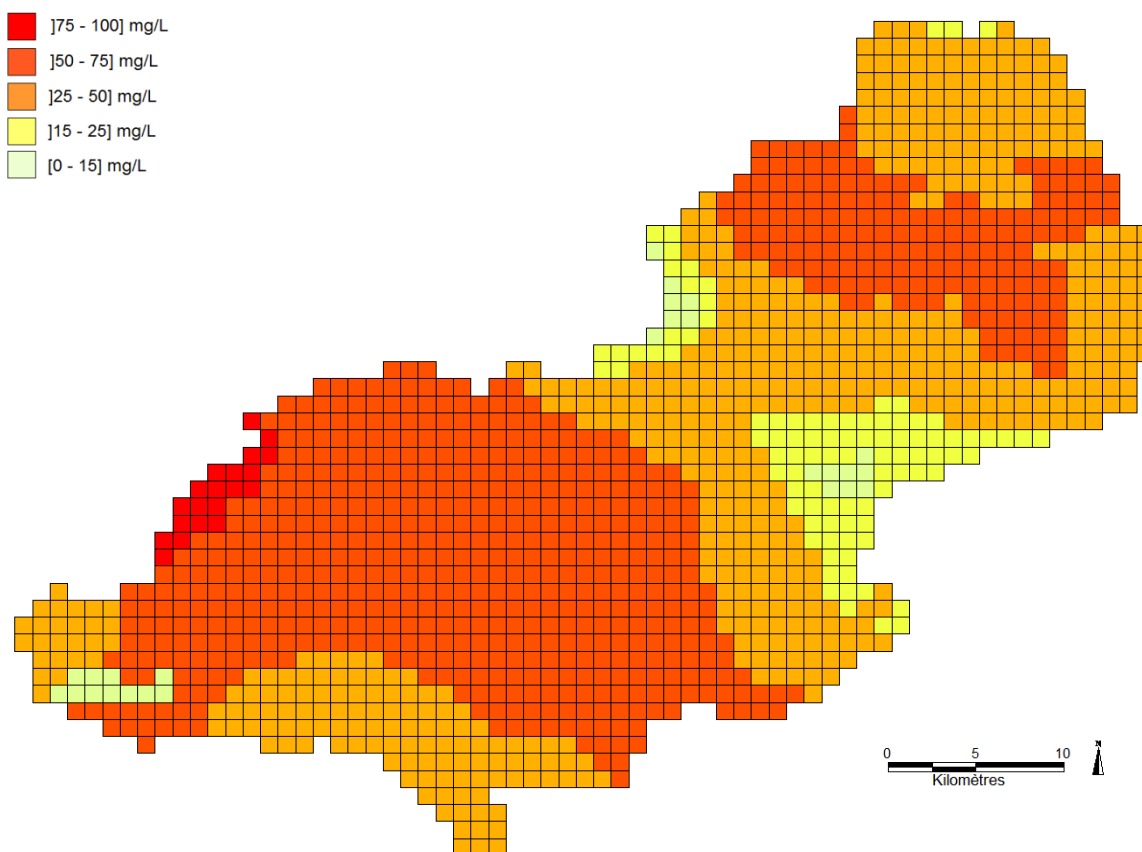


Illustration 40 : Concentrations initiales en nitrates au début de la simulation

5.1.4. Données d'intrants d'IRSTEA

Les données de sortie de SWAT utilisées comme données d'entrée dans le modèle MARTHE sont : les masses d'azote dans les flux de percolation (paramètre SWAT : NO3L), les masses d'azote dans le flux de ruissellement (NSURQ) et les masses d'azote dans le flux de sous écoulement latéral (NLATQ). Le premier terme rejoint la nappe alors que les deux autres alimentent la rivière. Les deux premiers paramètres ont été implémentés dans le modèle Boutonne sous MARTHE. NLATQ étant lié à un processus non pris en compte ou pouvant s'apparenter au

débordement de nappe sous MARTHE, cette variable n'a pas été pris en compte comme données d'entrée.

Flux d'azote rejoignant la nappe (NO3L)

L'IRSTEA fournit des chroniques d'intrants en kgN/ha pour chaque HRU (paramètre NO3L). Ces données sont traitées d'après la méthode décrite dans Douez *et al.*, 2012. La donnée est ainsi spatialisée pour obtenir en chaque maille du modèle MARTHE une chronique d'intrants au pas mensuel en kgNO₃⁻/km². En raison du décalage temporel entre le flux d'eau rejoignant la nappe et de leur différence d'intensité (cf. §4.2), deux corrections ont été apportées aux chroniques NO3L calculées à l'aide du modèle SWAT :

- Décalage des chroniques d'intrants SWAT d'un mois,
- Report des flux d'azote calculés (paramètre NO3L) sur le mois suivant lorsque le flux hydrique MARTHE est inférieur au mètre cube. Cette correction concerne le plus souvent les mois d'été juillet-septembre lorsque le flux de recharge MARTHE tend vers zéro.

Pour l'année 2006, que l'on peut qualifier de moyenne en termes de pluie-ETP, l'illustration 41 indique que les flux azotés sont majoritairement compris entre 25 et 100 kgN/ha/an, pour une recharge moyenne de 310 mm/an. Ces valeurs correspondent à un flux d'infiltration dont la concentration est comprise entre 36 et 143 mg/L en cohérence avec la gamme des concentrations mesurées *in situ*.

Les illustrations 42 et 43 illustrent que les flux d'azote lixiviés calculés avec SWAT sont ont une valeur proche de 0 pendant la période d'étiage (août 2006 pris en référence) et atteignent leurs valeurs maximums en période de recharge (février 2006).

La distribution géographique des flux massiques atteignant la nappe (Illustration 43) concorde avec les cartographies des concentrations établies à partir des analyses par Douez (2008) et Bichot *et al.* (2011). Les simulations montrent ainsi que le couloir de failles nord-Boutonne et le bassin aval de la Boutonne sont des secteurs où les flux sont les plus élevés tandis que la zone médiane du bassin, en partie occupée par des terrains boisés (forêt de Chizé), se singularise par de flux ayant une valeur plus faible.

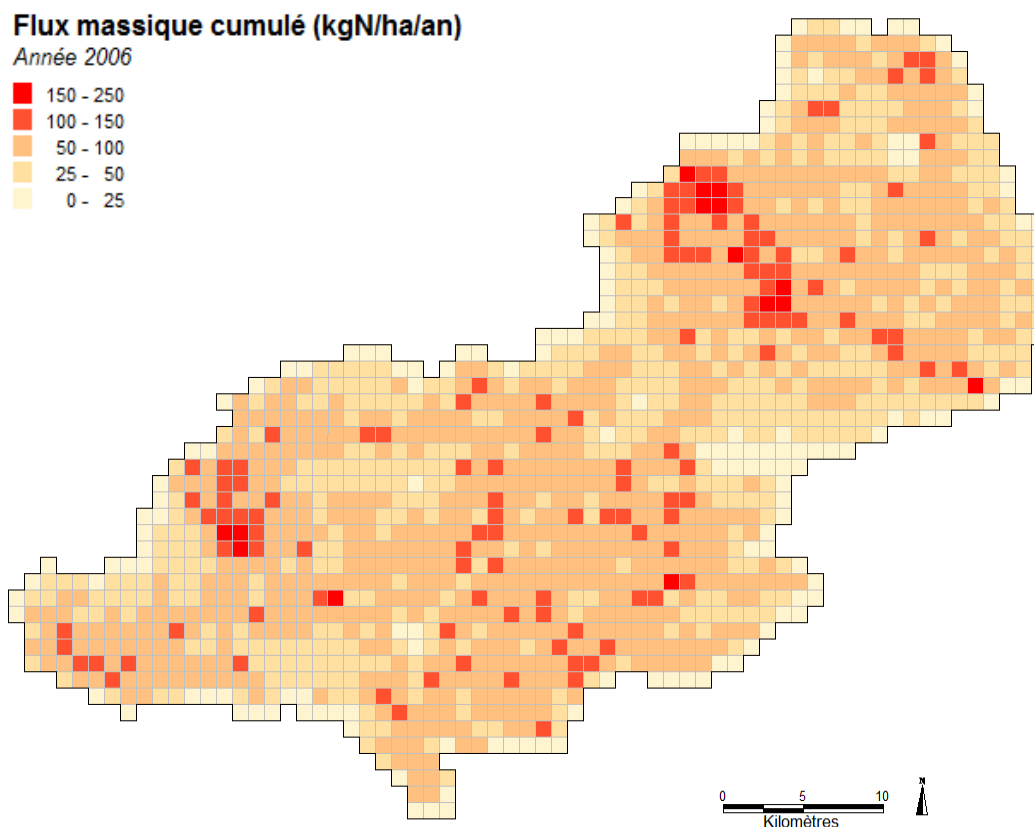


Illustration 41 : Flux massiques azotés cumulés rejoignant la nappe en 2006 (sorties SWAT agrégées)

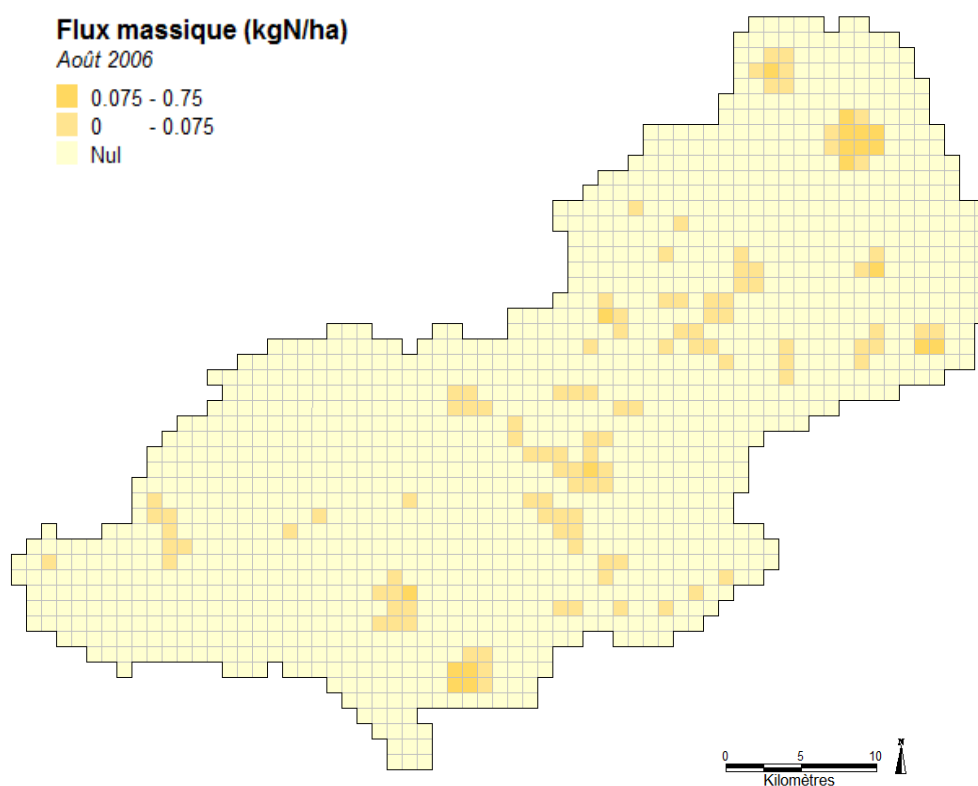


Illustration 42 : Flux massique azoté rejoignant la nappe en août 2006 (sorties SWAT agrégées)

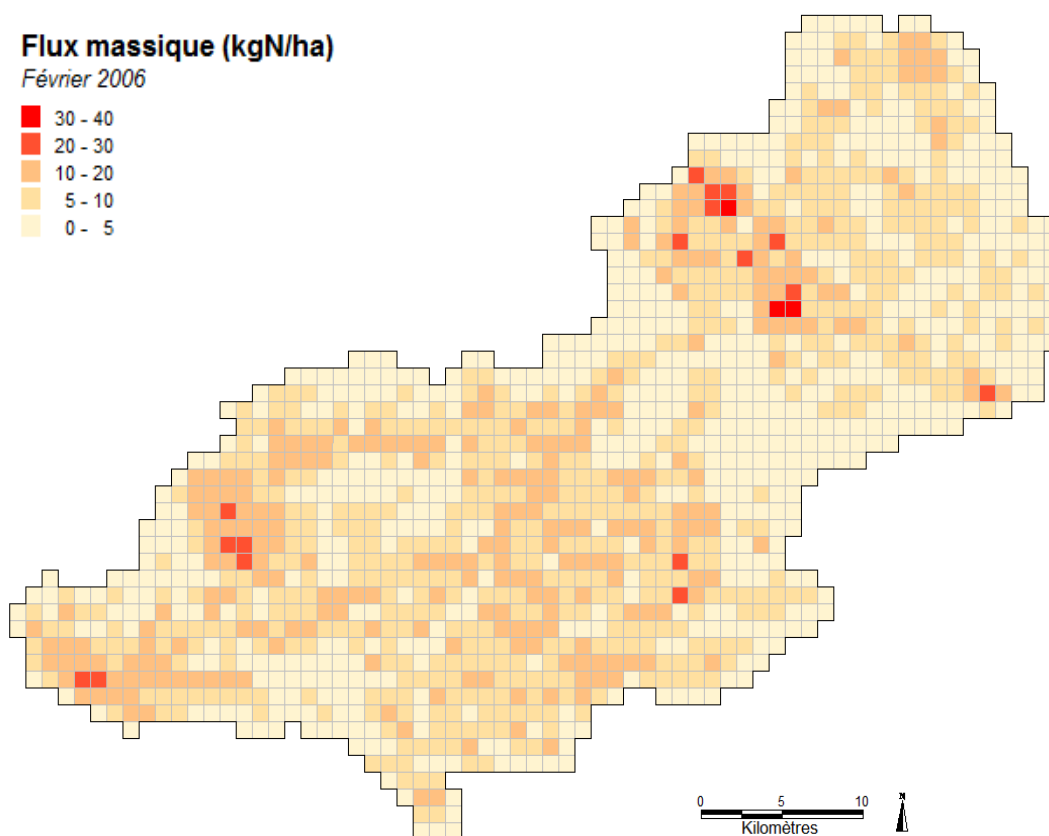


Illustration 43 : Flux massique azoté rejoignant la nappe en février 2006 (sorties SWAT agrégées)

Flux d'azote rejoignant les rivières (NSURQ)

Les flux d'azote rejoignant les rivières ont été pris en compte en utilisant les valeurs du paramètre de sortie NSURQ du modèle SWAT. Ces valeurs ont été distribuées sur les tronçons de rivière à partir des directions de ruissellement implémentées sous MARTHE. Pour l'année 2006, les valeurs sont majoritairement inférieures à 20 kgN/ha (Illustration 44).

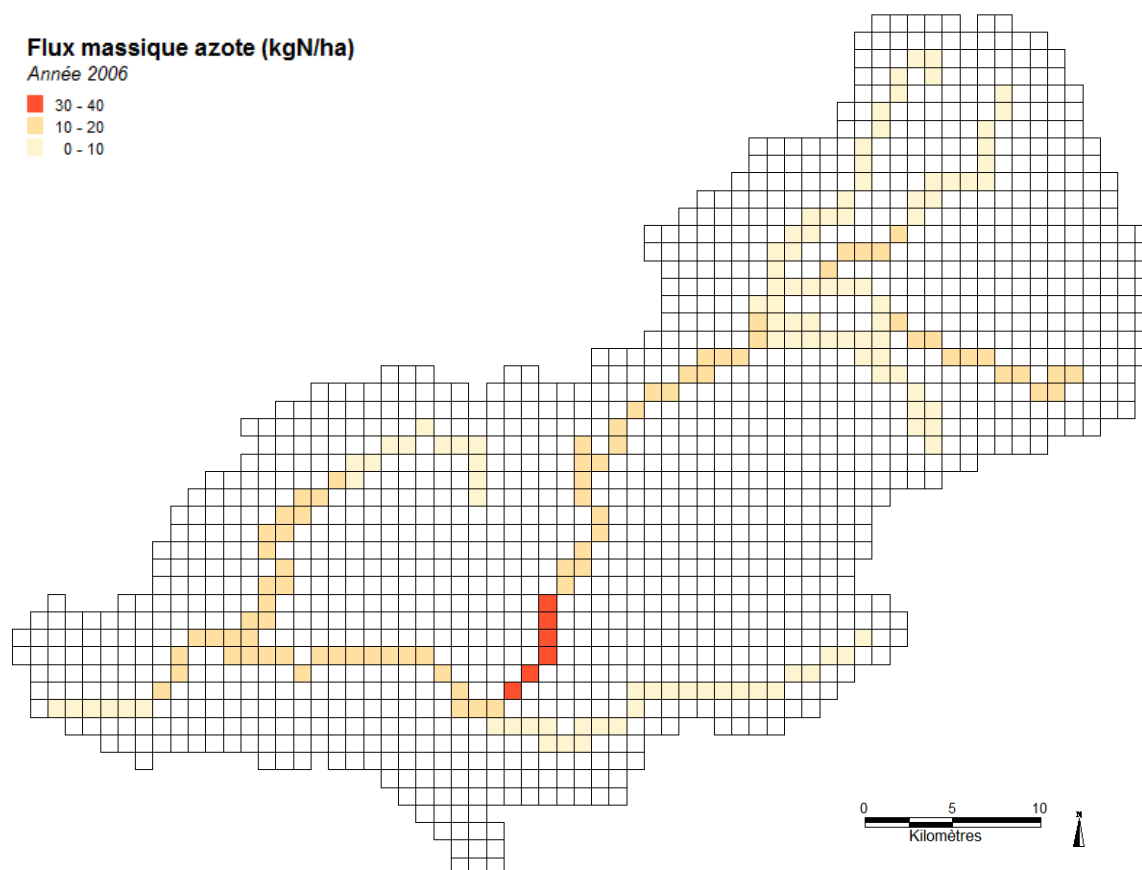


Illustration 44 : Flux massiques rejoignant la rivière par ruissellement pour l'année 2006 (base SURQ)

5.1.5. Méthode de calcul, pas de temps

Le calcul du transfert d'azote en nappe prend en compte les processus d'advection, de dispersion et de dégradation. La dégradation des nitrates (dénitrification) ne concerne que les aquifères captifs.

La résolution des équations du transfert de masse fait appel à la méthode TVD (Total Variation Diminishing) à limiteur de flux. Cette méthode présente les avantages des différences finies (pas d'aléas statistiques, facilité de traitement des concentrations imposées et des hétérogénéités), tout en ne générant quasiment pas de dispersion numérique, sans nécessité de respecter une quelconque condition sur le nombre de Péclet (donc la dimension des mailles).

Dans le modèle, le pas de temps de calcul est mensuel d'août 1999 à décembre 2007.

5.2. RESULTATS

5.2.1. Chroniques observées/simulées

Charges

Les paramètres perméabilité K et emmagasinement S intervenant d'une manière significative dans le calcul des concentrations en nitrates en nappe sous MARTHE, le calage hydrodynamique initial

du modèle des nappes du Jurassique a été revu sur le bassin de la Boutonne pour tenter de reproduire au mieux les teneurs en nitrates observées. Cette étape nécessaire a été nécessaire pour définir un compromis entre restitution par le modèle des chroniques piézométriques, de débits et de concentration en azote.

Le calage hydrodynamique initial (Domez et al, 2011) n'a pas été profondément modifié. Les illustrations Illustration 45, Illustration 46 et Illustration 47 donnent, par nappe, les résultats de ce re-calage pour les différents piézomètres du bassin de la Boutonne.

Concentrations en nappe

On dispose sur ce bassin versant de la Boutonne d'un certain nombre de qualimètres pour lesquels la concentration en nitrates des eaux a été analysée. Le positionnement de ces points (réseau régional, suivi sanitaire...) est présenté dans l'illustration Illustration 48.

Les illustrations Illustration 49, Illustration 50 et Illustration 51 montrent la comparaison entre les chroniques de concentration en nitrates simulées avec le modèle MARTHE et celles mesurées sur le terrain pour chacune des nappes étudiées.

Globalement, les simulations reproduisent le moins bien les chroniques d'évolution de la concentration en nitrate mesurée dans la nappe du Jurassique supérieur (Illustration 49). Les concentrations restituées par le modèle pour cette nappe sont ainsi supérieures à celles mesurées. On retrouve cependant sur plusieurs chroniques la variabilité saisonnière et les pics de concentration. Cependant, l'amplitude de ces variations est mal reproduite.

Les chroniques de nitrates de la nappe du Dogger (nord-Boutonne) sont mieux simulées. Ainsi, le modèle restitue assez fidèlement les teneurs moyennes et les amplitudes des variations saisonnières sur la majorité des points (Illustration 50). L'adéquation entre données mesurées et simulées est particulièrement élevée pour les captages de Coupeaume, Grand-Bois Battu et la Fontaine de Guiboux.

En ce qui concerne la nappe de l'Infra-Toarcien, qui est en règle générale captive et protégée sous les marnes imperméables du Toarcien, les très faibles concentrations en nitrates sont bien reproduites comme le montre les résultats obtenus pour les captages de Tillou, La Somptueuse et Gaterat (Illustration 51). Les concentrations élevées en nitrates sont bien restituées sur le captage des Ouches, et dans une moindre mesure sur celui de Montifault. Sur ces 2 captages, la possible diminution des concentrations en nitrates de 2000 à 2007 semble reproduite par le modèle. Toutefois, cette tendance est difficile à estimer du fait de la trop faible fréquence des mesures de terrain qui ne permet pas de statuer. Sur les captages de la Fontaine de Mareuil et de la Scierie, les teneurs élevées mesurées ne sont pas reproduites par le modèle. Ce décalage peut être expliqué par les incertitudes inhérentes aux données d'entrées utilisées en raison des problèmes associées aux modélisations SWAT. Une autre raison pouvant expliquer le décalage entre données simulées et mesurées est une représentation incomplète de singularités associées aux captages comme des échanges avec des nappes superficielles par failles ou le long d'un tubage mal isolé.

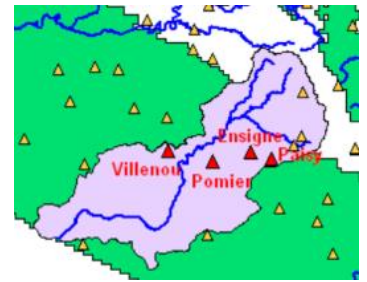
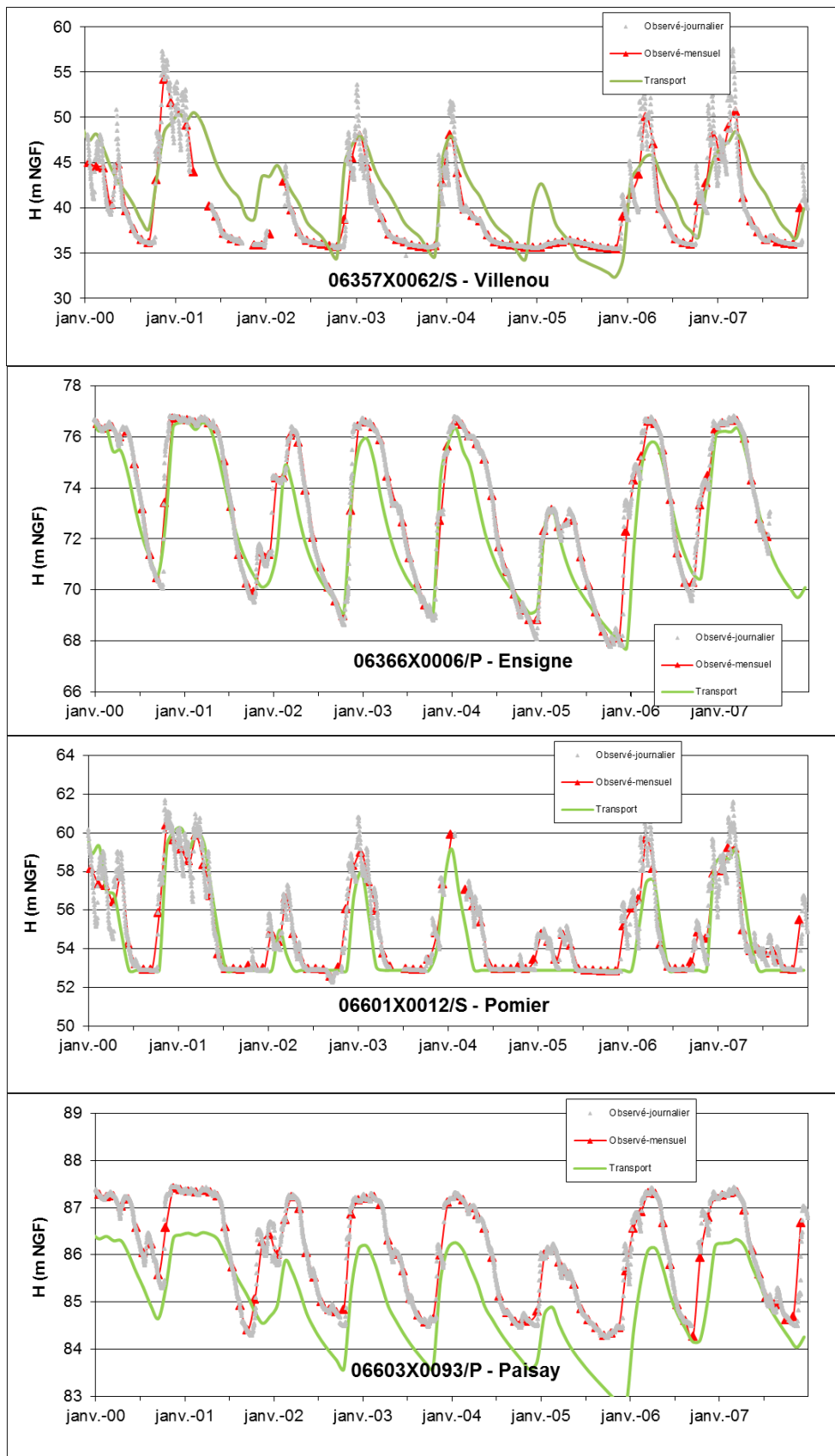


Illustration 45 : Résultat du re-calage des piézomètres à la nappe du Jurassique supérieur

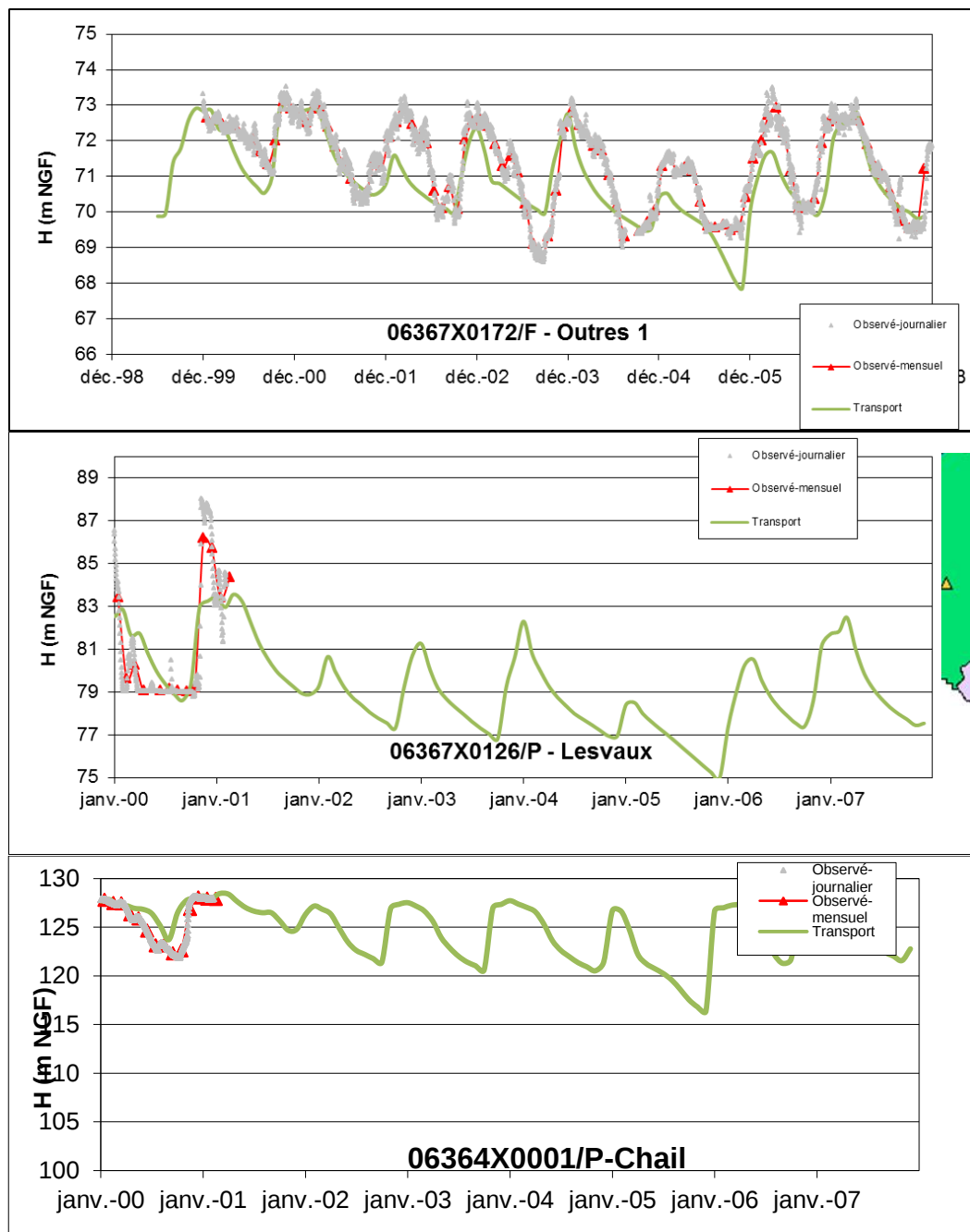


Illustration 46 : Résultat du re-calage des piézomètres à la nappe du Dogger

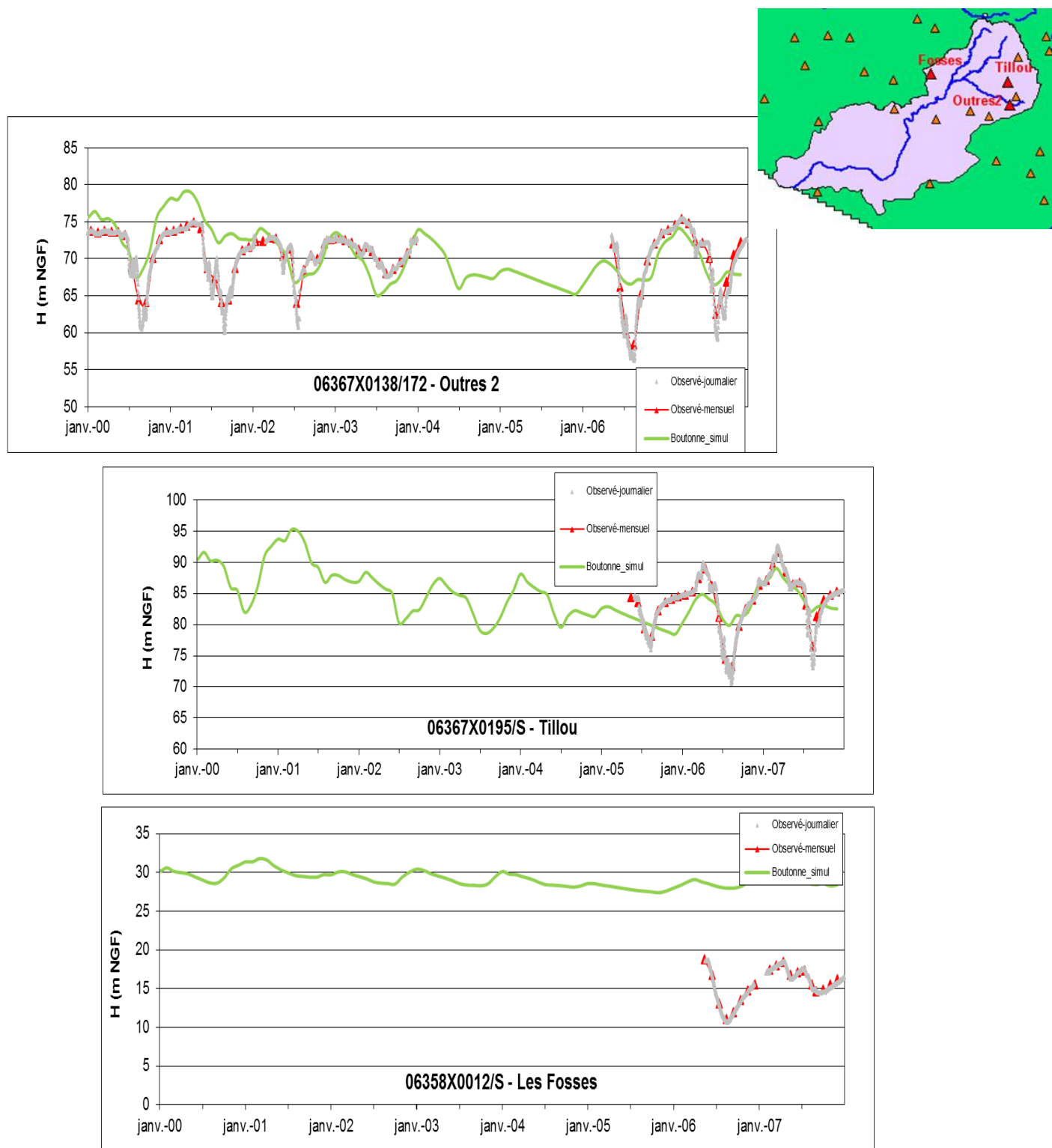


Illustration 47 : Résultat du re-calage des piézomètres à la nappe de l'Infra-Toarcien

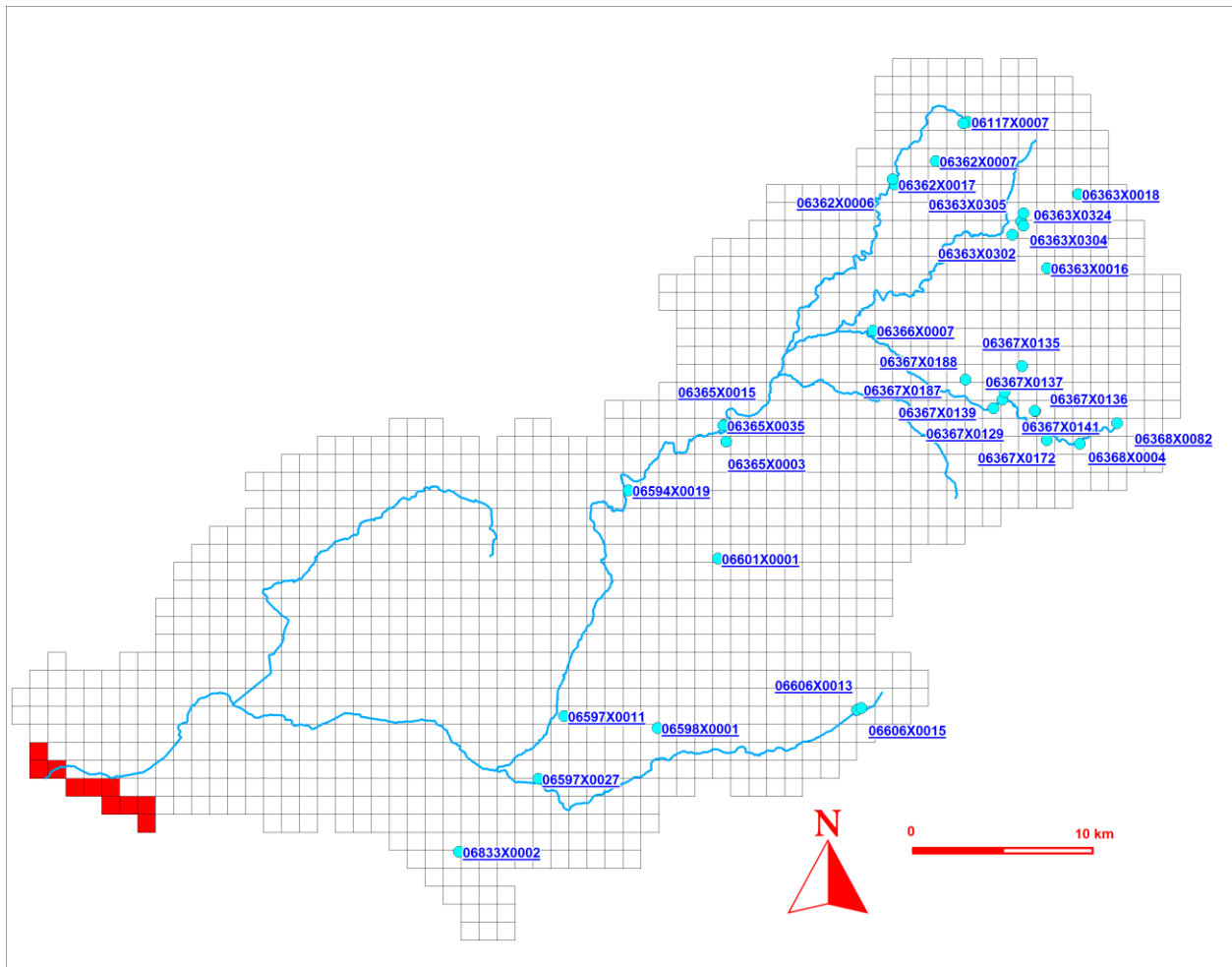


Illustration 48 : Cartographie des qualimètres en nappe utilisés pour le calage sous MARTHE (désignés par leur indice BSS)



Illustration 49 : Comparaison des chroniques issues du modèle (trait vert) aux analyses de terrain réalisées sur les qualimètres (point rouge) à la nappe du Jurassique supérieur

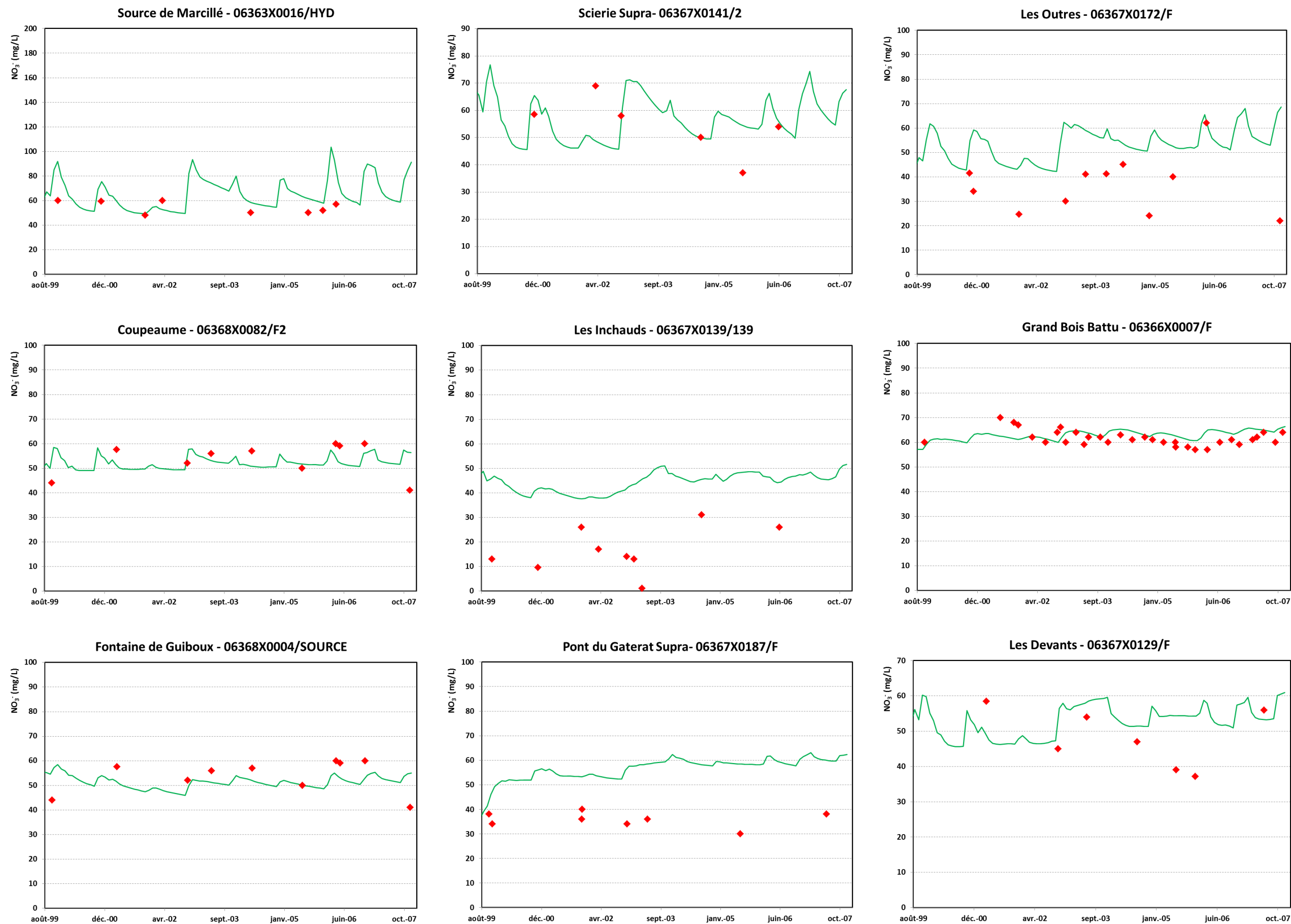


Illustration 50 : Comparaison des chroniques issues du modèle (trait vert) aux analyses de terrain réalisées sur les qualitomètres (point rouge) à la nappe du Dogger

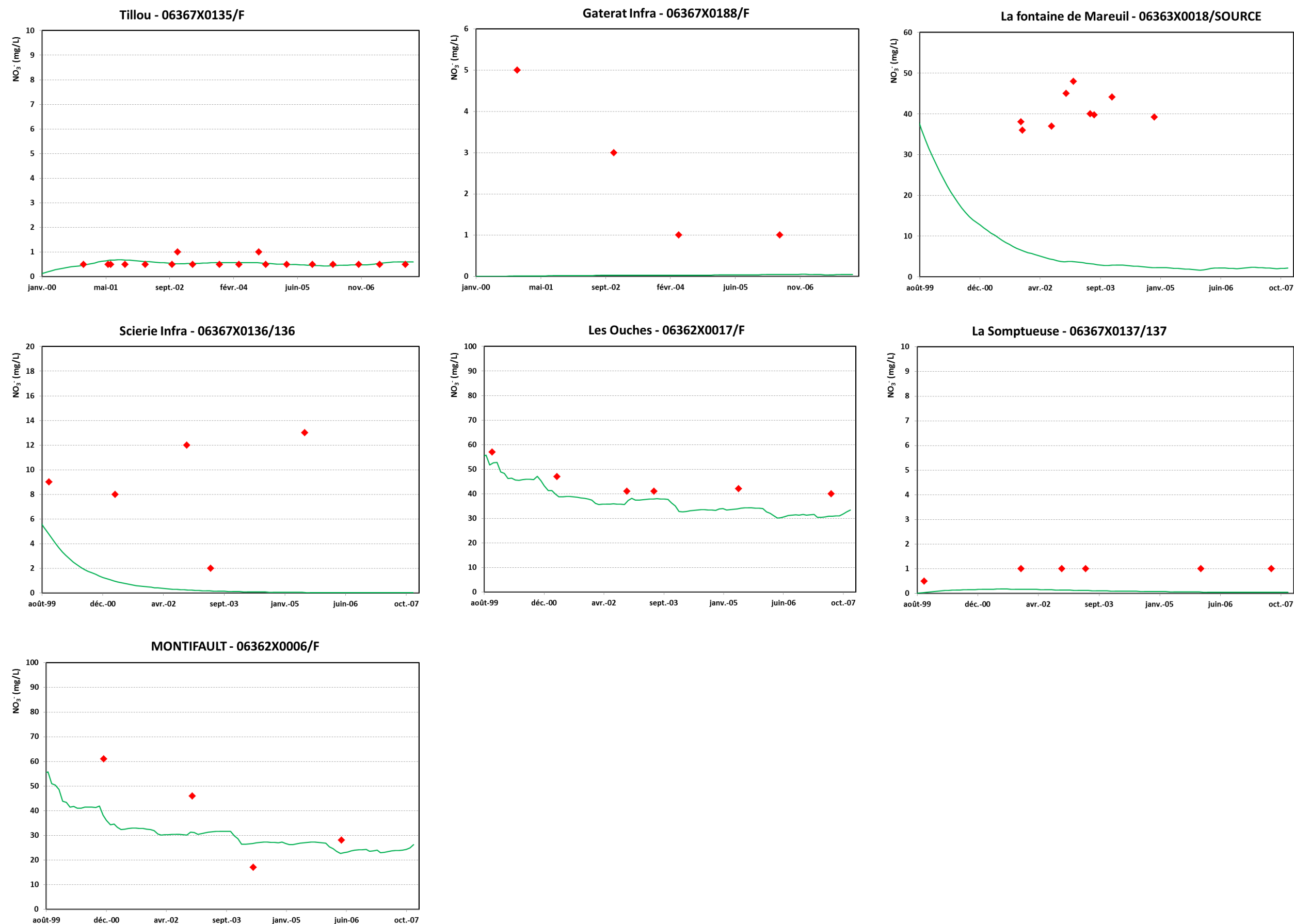


Illustration 51 : Comparaison des chroniques issues du modèle (trait vert) aux analyses de terrain réalisées sur les qualitomètres (point rouge) à la nappe de l'Infra-Toarcien

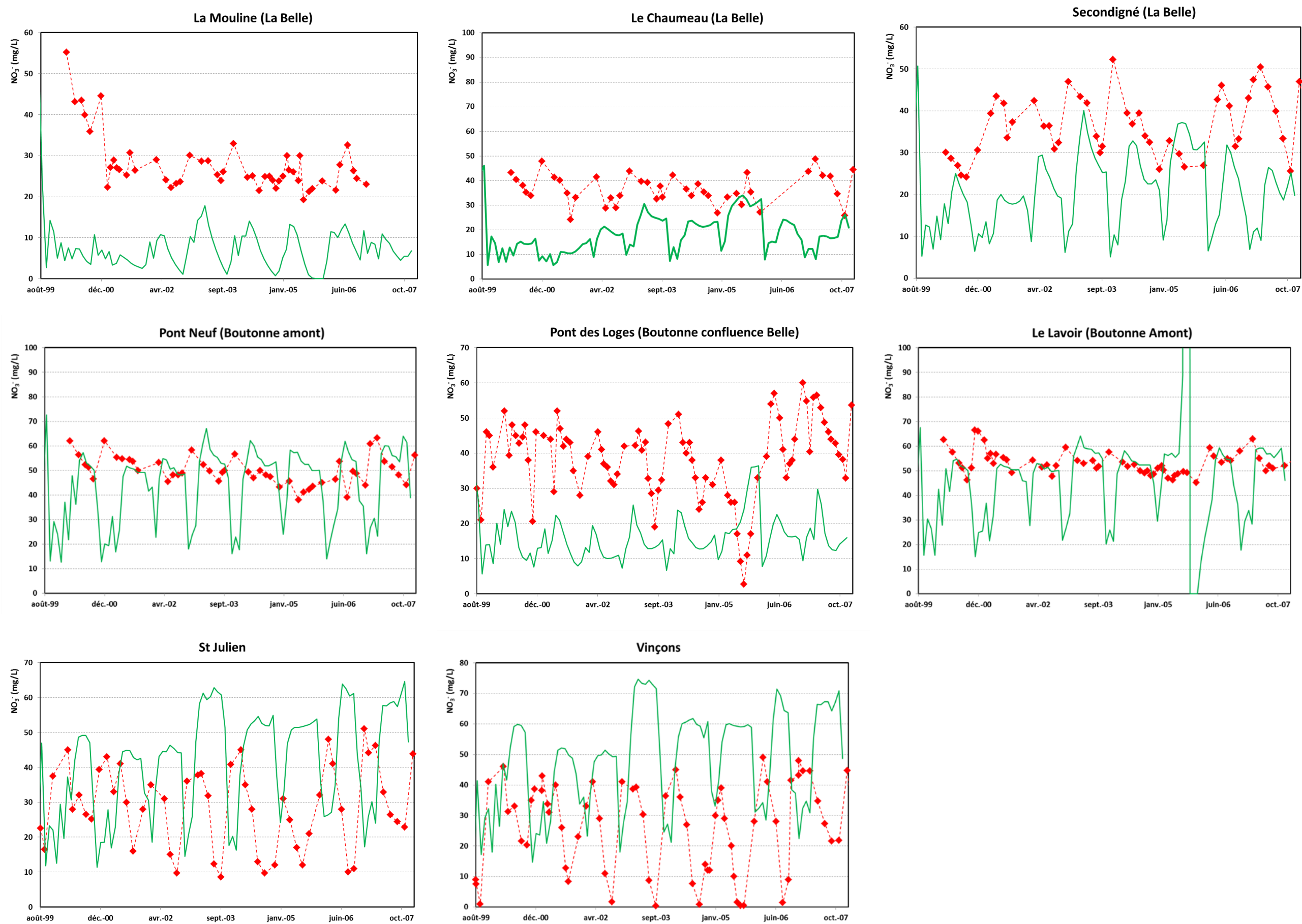


Illustration 52 : Comparaison des chroniques issues du modèle (trait vert) aux mesures réalisées en rivière (points rouge) (cf. localisation des station sur illustration 37)

Concentrations en rivière

Les simulations ne permettent de reproduire que partiellement l'évolution de la concentration en nitrates mesurée en rivière. Les simulations reproduisent moins bien les chroniques d'évolution de la concentration en nitrates mesurées en rivière que celles obtenues dans les qualitomètres en nappe. L'adéquation entre simulations et mesures est moins précise dans le cas des rivières. Les stations utilisées en référence sont localisées sur l'illustration Illustrations 37.

Les graphiques montrent que les simulations indiquent que les valeurs maximum de concentration en nitrates sont atteintes en été alors que les pics de concentration en nitrates ont été mesurés au printemps pour chacune des stations de mesure étudiées.

Sur la Belle, principalement alimentée par la nappe du Dogger, notamment en période de basses eaux, les concentrations mesurées sont élevées par rapport aux concentrations restituées par le modèle. A noter que pour ce cours d'eau, les amplitudes des variations annuelles sont assez cohérentes entre le modèle et les observations de terrain.

Sur la Boutonne amont, en dehors de Pont des Loges influencé par la Belle, les valeurs élevées restituées par le modèle sont du même ordre de grandeur que les valeurs moyennes mesurées. En revanche, l'amplitude des variations annuelles est élevée sur les chroniques restituées par le modèle (passant de 20 mg/l à 60 mg/l) comparativement aux mesures de terrain. Dans la réalité, ce tronçon de la Boutonne amont est alimenté par une série de grosses sources, aux débits soutenus, sortant principalement du Dogger. Il y a aussi une participation de la nappe de l'Infra-Toarcien au débit de la rivière. Cette prédominance des apports de nappe, qui module les débits, se matérialise aussi par des amplitudes plus faibles dans les variations des teneurs en nitrates (Pont-Neuf et Lavoir) ; ce que ne restitue pas le modèle malgré un calage assez correct des chroniques de la nappe du Dogger de la Boutonne amont. L'incertitude associée aux données d'entrée (sortie de SWAT vers MARTHE), notamment les concentrations et flux directs à la rivière, explique cette mauvaise restitution par le modèle de la réalité de terrain.

Sur la Boutonne aval (St-Julien, Vinçon) l'amplitude des variations saisonnières (en faisant abstraction du décalage dans le temps) est assez bien restituée par le modèle. En revanche, les teneurs découlant du modèle sont nettement plus élevées que celles mesurées sur le terrain.

6. Suivi en continu de 4 sources

6.1. METHODOLOGIE

Depuis 2009, le débit et les caractéristiques physico-chimiques de 4 sources font l'objet d'un suivi. Les sources étudiées présentent l'intérêt de représenter des contextes hydrogéologiques contrastés :

- la source de Sompt sur le bassin versant amont de la Boutonne, et exutoire d'une rivière souterraine bien connue circulant dans le Dogger,
- la source de St-Fraigne, sur le bassin de l'Aume-Couture, captée pour l'eau potable, faisant l'objet d'un programme Re Source, émergeant du Jurassique supérieur dans un contexte de plaine alluviale tourbeuse,
- les sources de la Touvre, exutoire du karst jurassique de la Rochefoucauld, seconde source de France de par son débit, dont une synthèse du fonctionnement est consultable dans Bichot *et al.*, 2003.
- la source de Forges à Mouthiers-sur-Boëme, sortant du Turonien et qui vient d'être abandonnée pour l'eau potable du fait de sa mauvaise qualité.

Les sources de Sompt, St-Fraigne, Mouthiers ont été sélectionnées du fait de leurs concentrations élevées en nitrates, de l'ordre de 50 mg/L. De plus, elles sont pérennes, à débit important et caractérisent chacune une nappe et un contexte hydrogéologique spécifique.

Par comparaison, les sources de la Touvre présentent des concentrations assez modérées en nitrates (de l'ordre de 15 mg/L). Le choix de leur étude est principalement lié au fait qu'elle soit la source d'alimentation principale en eau potable du Grand Angoulême. De plus, leur étude permet également de préciser le fonctionnement du karst de la Rochefoucauld.

Le contexte géologique détaillé ainsi que l'équipement propre à chaque source sont consultables dans Bichot *et al.*, 2011.

L'illustration 53 liste les propriétés physico-chimiques des eaux suivies pour chacune de ces sources ainsi que le matériel utilisé pour réaliser la mesure de ces paramètres. Le pas de temps d'acquisition est également mentionné. L'annexe 1 donne, pour chaque site, les interventions et les résultats des mesures de terrain.

Objectif	Matériel	Pas de temps acquisition
Débit		
<i>Hauteur d'eau</i>	Capteur de pression OTT mini-Orpheus Capteur de pression STS DLN/70	Automatisé : Toutes les 2 h
<i>Jaugeage</i>	Courantomètre acoustique OTT ADC	Ponctuel : tous les mois ½ ou 2 mois selon station
Physico-chimie		
<i>Température, pH, conductivité électrique</i>	Sonde Hydrolab MS-5	Automatisée : toutes les 2 h
<i>Nitrates</i>	Réflexomètre Qflex MERCK	Ponctuel : tous les mois ½ ou 2 mois selon station
<i>Nitrates (Moulin Neuf)</i>	Analyseur UV400 Thétys Instruments	Automatisée : toutes les 2 h

Illustration 53 : Propriétés physico-chimiques suivies, matériels utilisés pour réaliser ces mesures et pas de temps d'acquisition.

6.2. RESULTATS

6.2.1. La source de Sompt (06367X0134/S)

La source de Sompt est une importante résurgence de la nappe du Dogger au sein des plateaux calcaires au Nord de la vallée de la Boutonne. Cette source donne naissance à la rivière la Somptueuse et sort au toit des calcaires du Bajocien sous ceux du Bathonien, au pied d'un coteau calcaire en contrebas du village de Sompt (79). Il y a plusieurs points d'émergence aménagés en lavoir et bassins.

Son débit est soutenu et pérenne. L'ordre de grandeur de son bassin versant peut être estimé sommairement à 20 km². La qualité des eaux caractérise la nappe du Dogger (nettement bicarbonatée calcique, faible teneur en magnésium, vulnérabilité élevée de par les concentrations en nitrates...).

La source de Sompt présente toutes les caractéristiques d'une résurgence karstique : fluctuation rapide du débit avec des circulations souterraines très rapides (mis en évidence par le traçage), turbidité souvent élevée, forte vulnérabilité mise en lumière par les teneurs en nitrates et l'analyse bactériologique.

Depuis 2009, six épisodes d'étiage et 5 périodes hivernales (2009/2010, 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014) ont été suivis.

Sur la période considérée, le débit de la source a évolué entre 48 m³/h (octobre 2011) et 9200 m³/h (avril 2012) (Illustration 54). Ce débit maximum est à considérer avec précaution car la courbe de tarage souffre d'un manque de données pour les débits supérieurs à 800 m³/h. Les années humides 2013 et 2014 se marquent par des débits d'étiage plus importants et font remonter la moyenne des débits à 536 m³/h à comparer au 330 m³/h pour la période 2009/2012. La comparaison à la pluviométrie indique une réactivité importante du débit de la

source aux épisodes pluvieux hivernaux et printaniers (décembre 2009, novembre 2011, avril 2012, février 2013...).

D'août 2009 à juin 2011, la température est globalement stable de l'ordre de 12,9 °C avec toutefois de légères baisses au moment de la recharge de la nappe (début de l'hiver) (Illustration 55). Après juin 2011, les variations de température sont plus conséquentes avec des valeurs comprises entre 14 et 15 °C sur la période estivale. Ce changement est expliqué par le repositionnement de la sonde de mesure plus loin du point d'émergence de la source. Les valeurs estivales témoignent des variations de température de l'eau du bassin qui se renouvelle moins vite en été et sont ainsi sujettes au réchauffement.

La conductivité électrique moyenne (autour de 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$) est relativement stable (Illustration 56). En 2014, la sonde a momentanément dysfonctionné (palier au-dessus de 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$). En revanche, les données de la sonde pH ne sont pas exploitables.

Entre 2009 et 2014, les teneurs en nitrates varient de 24 à 55 mg/L (Illustration 57). Les concentrations les plus élevées sont associées à des épisodes pluvieux. On retiendra surtout la forte variabilité des teneurs en relation avec la réactivité de la source à la pluviométrie en contexte de conduits karstiques.

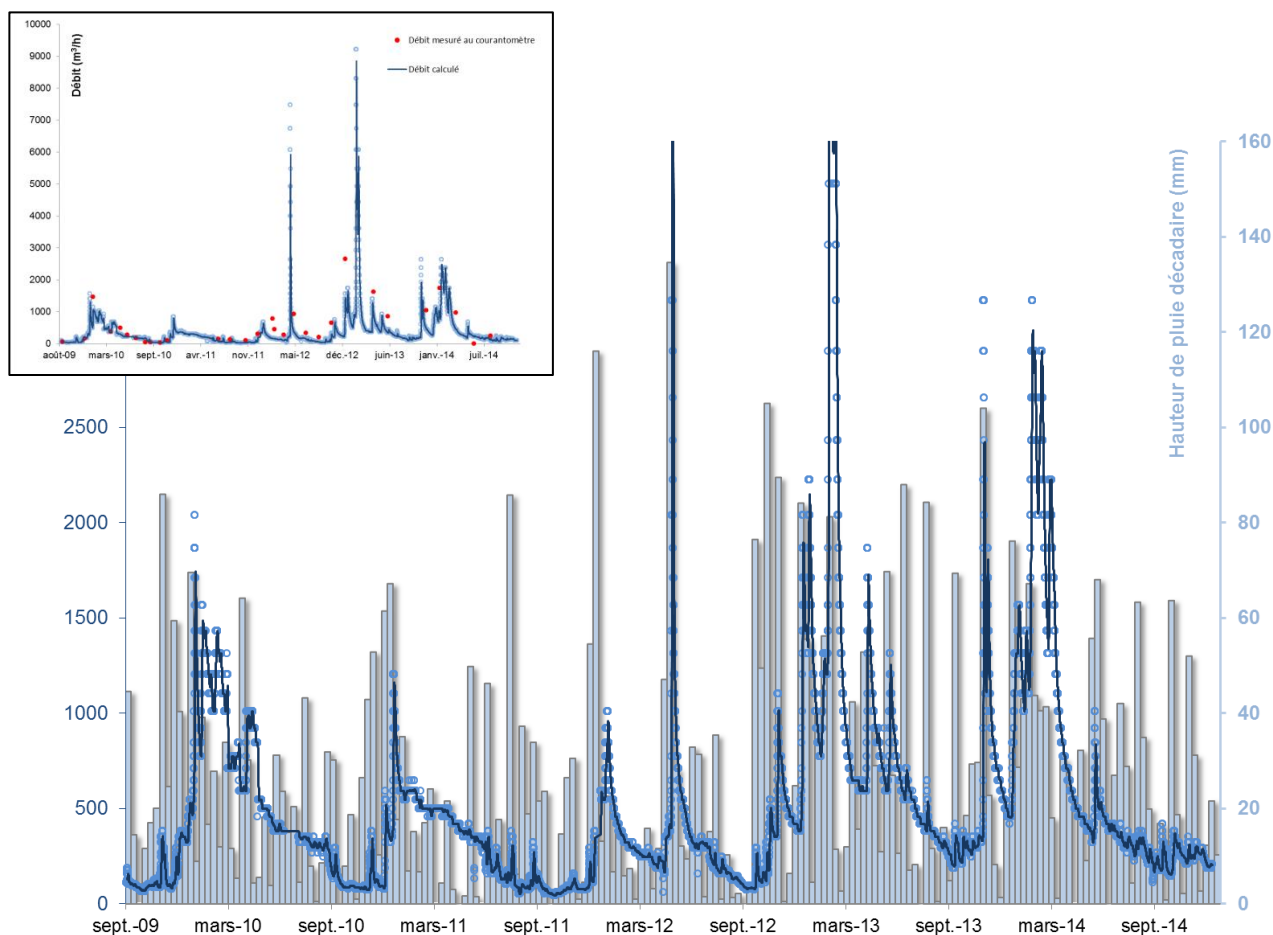


Illustration 54 : Evolution des débits à la source de Sompt et comparaison avec les pluies à la station de Melle (les données ETP ne sont pas disponibles sur la totalité de la période considérée). Trait plein : moyenne mobile sur 48h, graphe du haut : comparaison des débits restitués par la sonde avec les mesures de jaugeage sur le terrain.

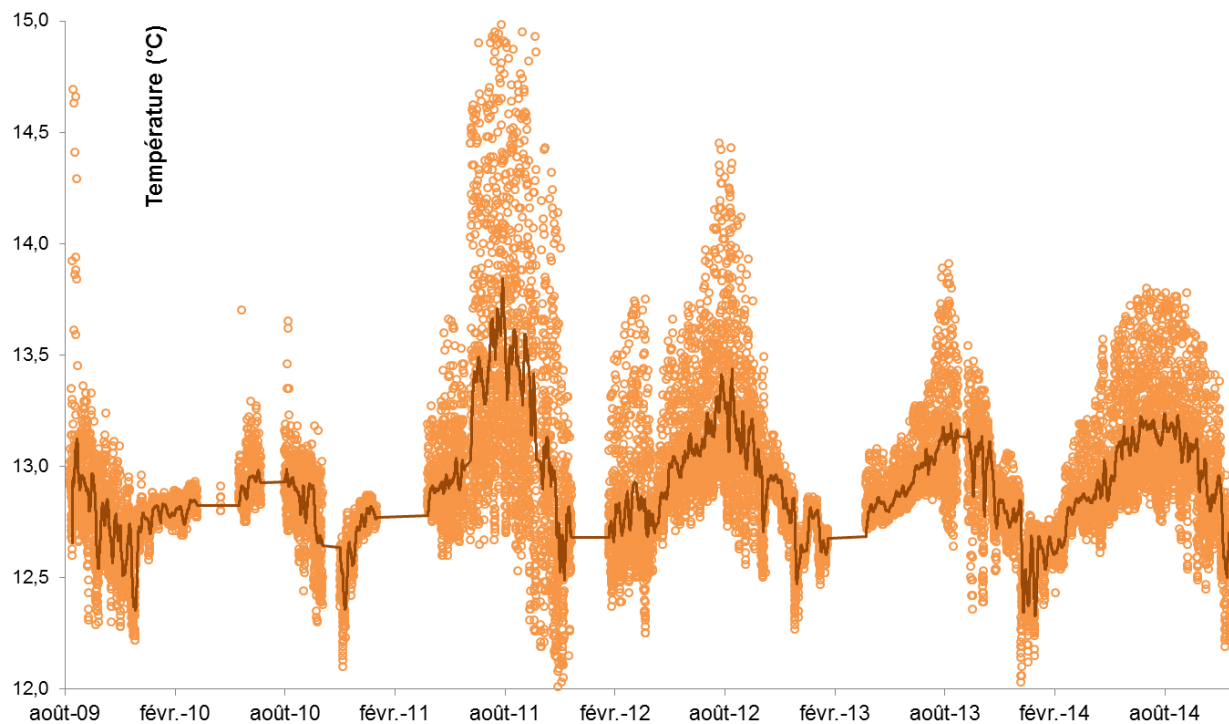


Illustration 55 : Evolution des températures à la source de Sompt. Trait plein : moyenne mobile sur 48h.

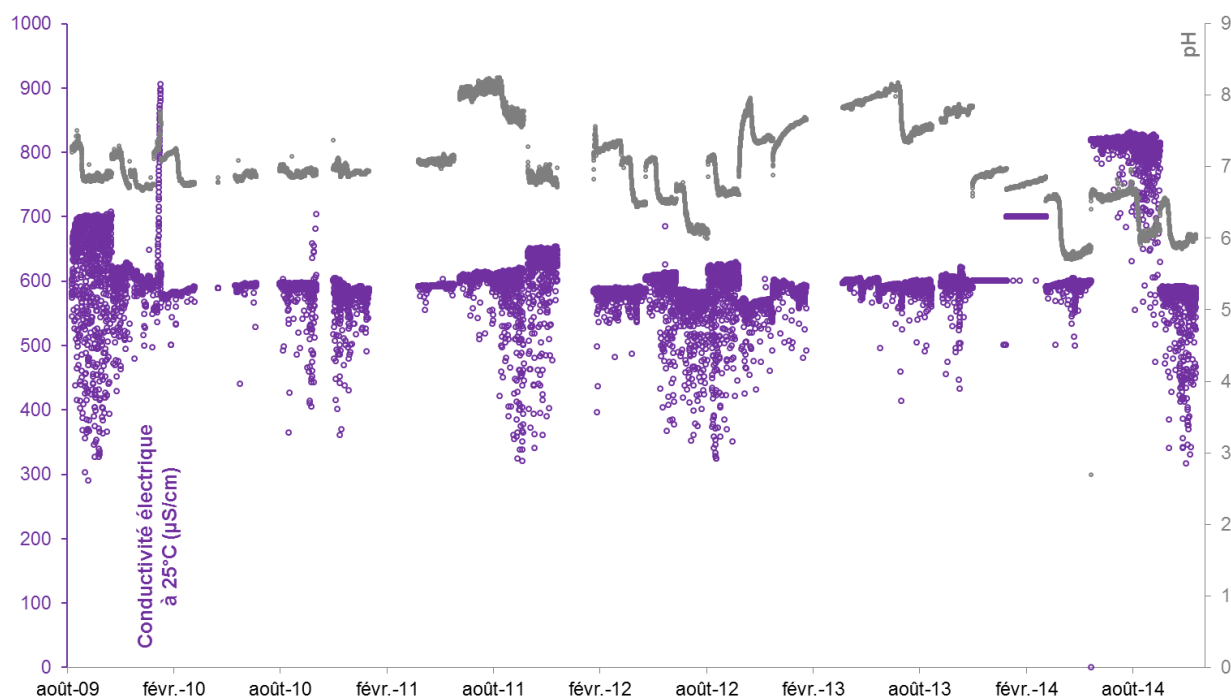


Illustration 56 : Evolution de la conductivité (violet) et du pH (gris) sur la source de Sompt

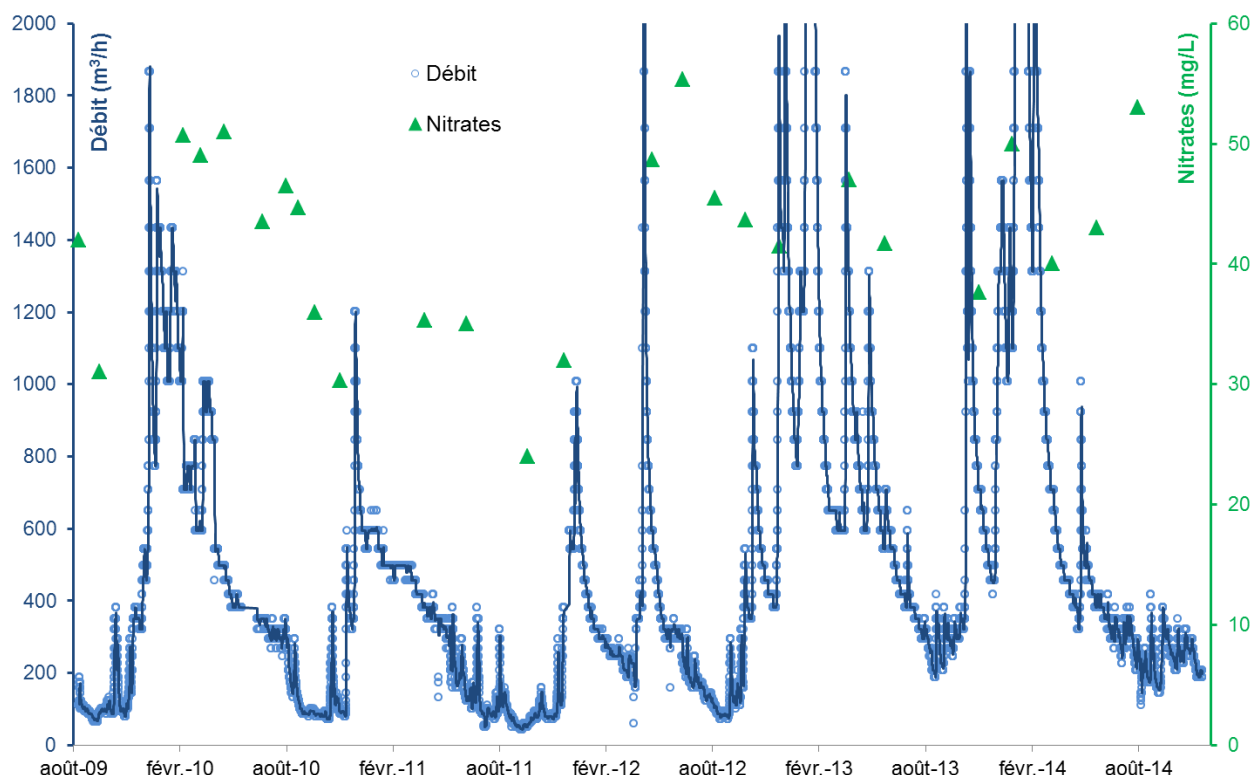


Illustration 57 : Evolution des teneurs en nitrates et des débits à la source de Sompt

6.2.2. Les sources de la Touvre (07093X0020/HY)

Les sources de la Touvre (avec celle, voisine, de la Lèche) constituent l'exutoire quasi-unique d'un grand domaine karstique installé dans les formations calcaires du Jurassique moyen (Dogger) et supérieur. Seconde résurgence de France de par son débit (après la Fontaine du Vaucluse), les sources de la Touvre sont exploitées depuis 1889 pour l'eau potable d'Angoulême.

En amont, l'aquifère karstique de la Touvre est alimenté par les pluies qui tombent directement sur les calcaires des forêts de la Braconne et du Bois Blanc (470 km² environ pour la superficie de cet impluvium) et par les pertes des rivières, qu'elles soient totales (Bandiat, Tardoire) ou partielles (Bonnieure). Le bassin d'alimentation total est estimé à 1 200 km² (impluvium + bassins versants du Bandiat, de la Tardoire et de la Bonnieure).

Il transiterait environ en moyenne 350 M de m³/an d'eau aux sources avec une contribution des pertes de rivière à hauteur de 70 %.

Au cours de la période 2009-2012, le débit des sources, évalué à partir de la station de Foulpougne sur la Touvre, est majoritairement compris entre 15 000 m³/h et 80 000 m³/h avec des débits de pointe pouvant atteindre 177 000 m³/h en avril 2012 (Illustration 58).

D'août 2009 à décembre 2014, la température des eaux varie de 11 à 14 °C selon un cycle annuel : les températures les plus basses sont rencontrées en hiver et les plus élevées en été (Illustration 59). En parallèle, la conductivité électrique des eaux varie selon un cycle

comparable à celui de la température. Ainsi les valeurs de conductivité les plus basses, de l'ordre de 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sont enregistrées en période de recharge hivernale ou printanière tandis que les valeurs les plus hautes, généralement de l'ordre de 480 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sont enregistrées en période d'étiage (Illustration 60). Bien que l'éloignement entre le point de pompage et le point de mesure (qui est dans la station) puisse modifier le paramètre de température, l'évolution simultanée de la température et de la conductivité semble être le témoin d'une alimentation plus importante en provenance des eaux de surface (Tardoire, Bandiat) en hiver et d'une alimentation majoritairement par l'aquifère karstique en périodes de basses eaux.

Le pH ne montre pas d'évolution significative, il est globalement compris entre 7,3 et 7,5 (Illustration 60). Les sauts de pH parfois enregistrés correspondent à une dérive ou un dysfonctionnement de la sonde.

Les concentrations en nitrates sont majoritairement comprises entre 10 et 20 mg/L sans que des cycles annuels clairs en lien avec le débit des sources puissent être mis en évidence (Illustration 61). Des valeurs supérieures à 20 mg/l ont été mesurées par le BRGM durant l'hiver 2012/2013, en relation avec des débits élevés, mais celles-ci ne sont pas confirmées par les mesures du contrôle sanitaire (ADES). Toutefois, les concentrations en nitrates semblent varier plus fortement ces dernières années.

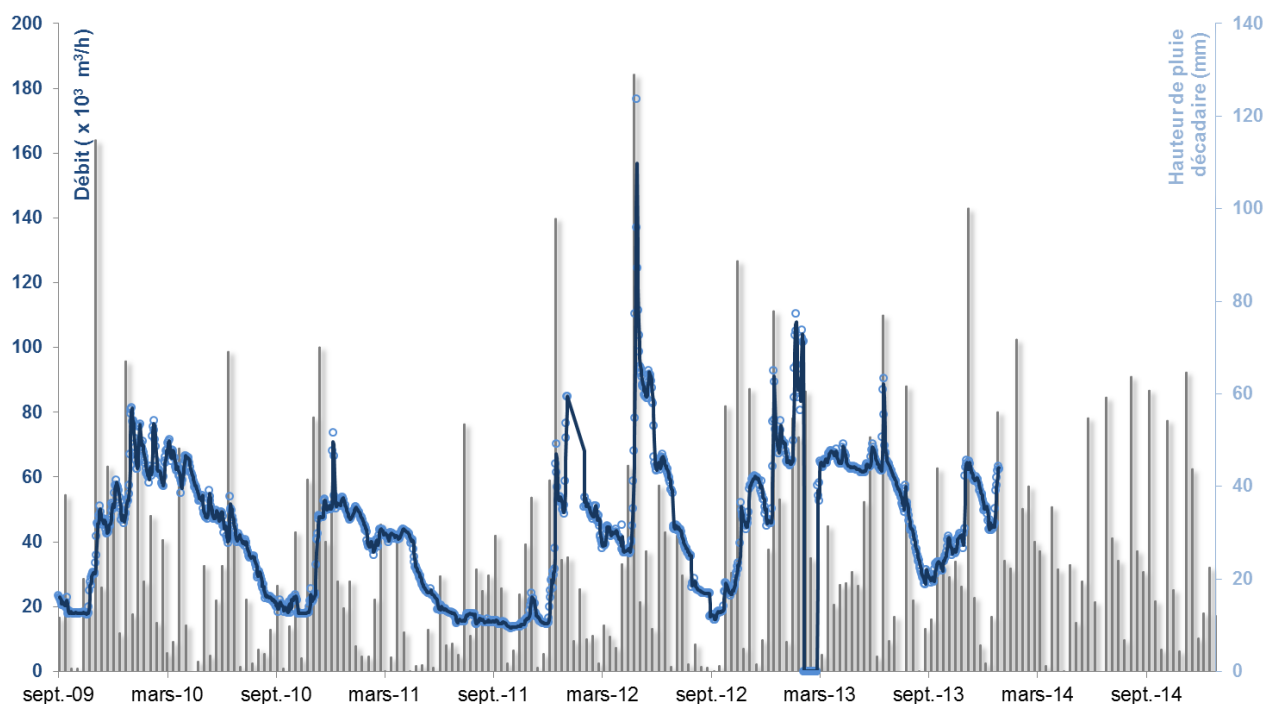


Illustration 58 : Débit de la Touvre à la station de Foulpougne et pluviométrie décadaire de la station de la Couronne-Angoulême.

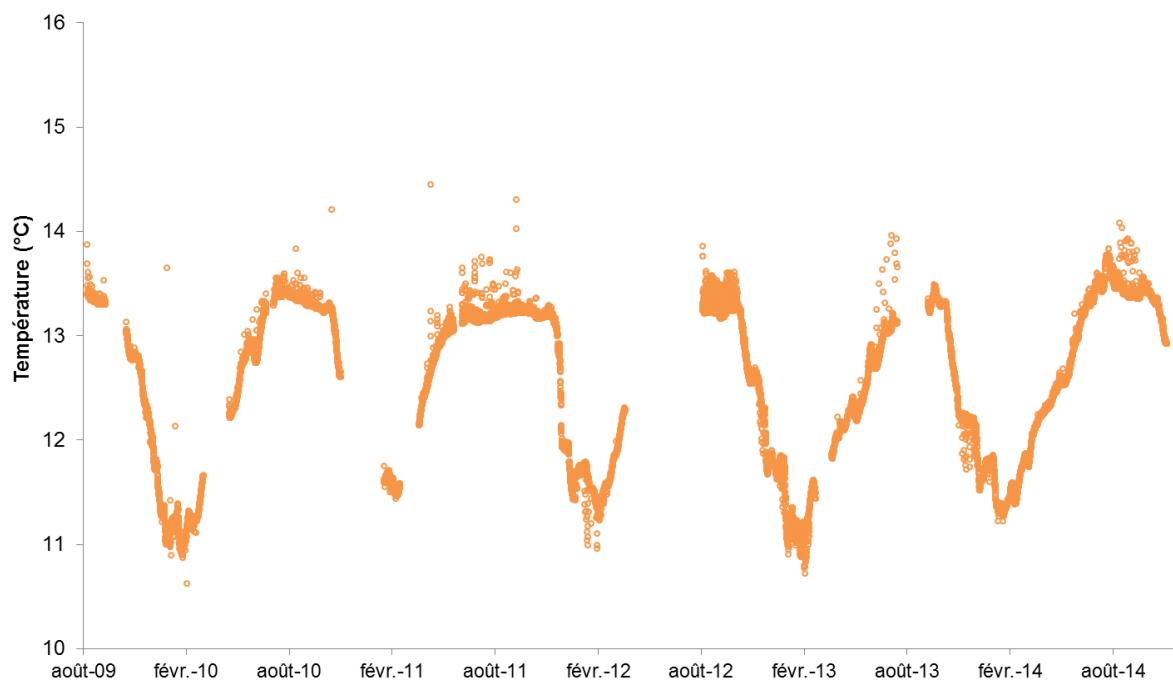


Illustration 59 : Température des eaux à l'émergence du Bouillant, sources de la Touvre.

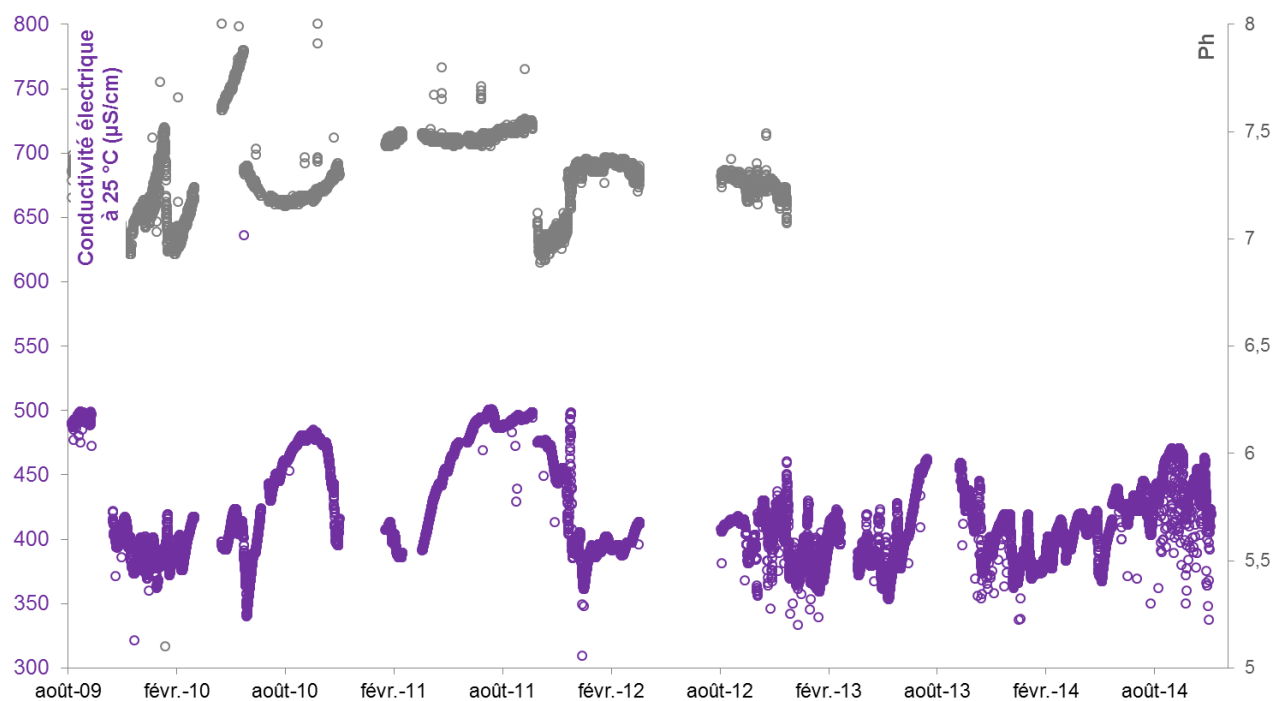


Illustration 60 : Conductivité électrique et pH des eaux de l'émergence du Bouillant, source de la Touvre.

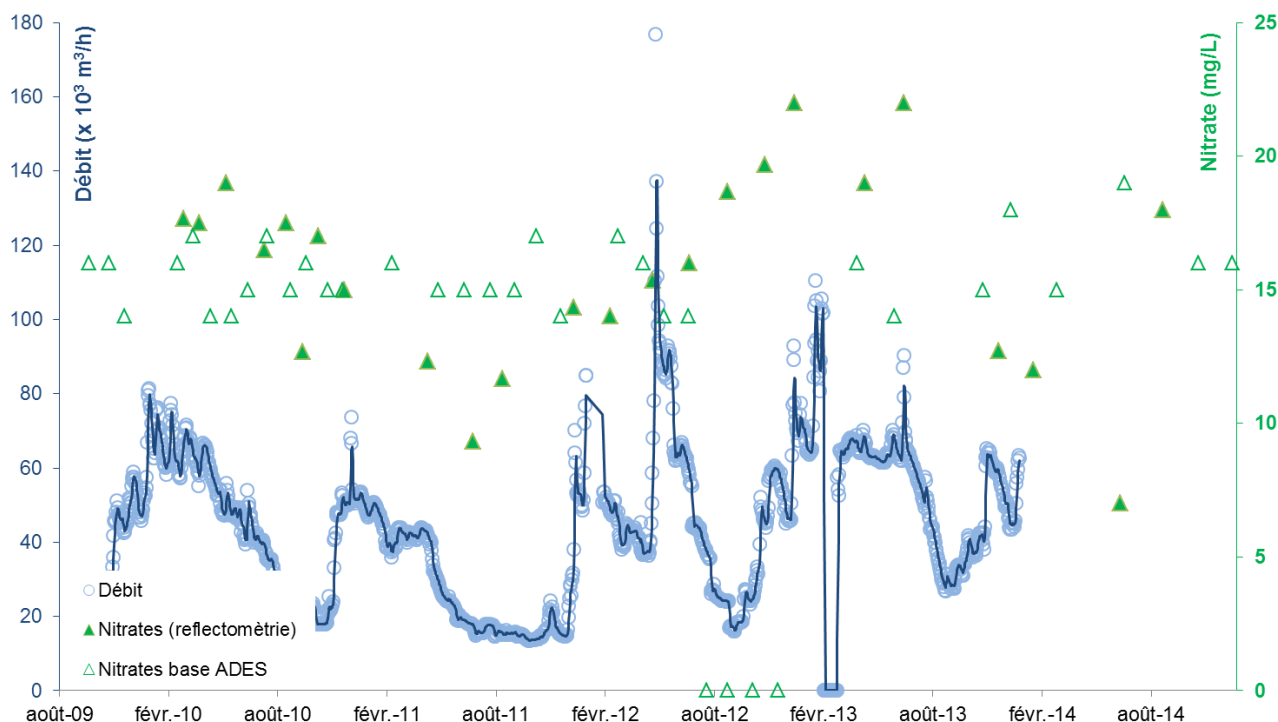


Illustration 61 : Evolution des teneurs en nitrates et des débits à l'émergence du Bouillant, source de la Touvre.

6.2.3. La source Moulin Neuf à Saint-Fraigne (06608X0034/PUITS)

La source de Moulin Neuf au Sud de Saint-Fraigne (16), exploitée pour l'AEP et située en bordure de l'Aume, sort des calcaires du Jurassique supérieur (Kimméridgien). Cette source est une des plus importantes du secteur avec un débit moyen en étiage estimé à 250 m³/h (cf. notice de la carte géologique 1/50 000 d'Aulnay). La nappe du Jurassique supérieur est contenue dans une frange fissurée et altérée superficielle faisant en moyenne 20 m d'épaisseur.

En raison de dégradation de l'appareil de mesure et de pertes d'eau constatées dans le fossé entre la sortie de la source et le point de jaugeage, le calcul des débits sur la période août 2009-septembre 2010 n'est pas fiable et les données sont manquantes sur la période septembre 2010-septembre 2011. A partir du mois de septembre 2011, les débits calculés à la source varient majoritairement dans la gamme 95 - 190 m³/h. La source montre une forte réactivité aux pluies hivernales et printanières. Les valeurs absolues des débits de pointe doivent cependant être considérées avec prudence au regard du faible nombre de point de jaugeage sur ces périodes.

La température de l'eau est très stable, fluctuant entre 13 et 13,6 °C. De petites hausses de température sont liées à des débits de crue (Illustration 63).

Lors des étiages, la conductivité est en moyenne de 670 µS/cm. Lorsque la recharge s'amorce, la conductivité chute autour de 600 et 630 µS/cm. Ces fluctuations de conductivité électrique indiqueraient qu'à l'étiage, la source est principalement alimentée par des eaux de nappe tandis qu'en période de recharge, la source serait alimentée par des eaux de nappe tamponnées par des eaux météoriques, fraîche, peu minéralisée et rapidement infiltrée.

Depuis le début du suivi horaire des concentrations en nitrates à l'aide d'un analyseur UV en septembre 2011, les concentrations mesurées varient de 30 à 60 mg/L (Illustration 65). Les concentrations sont corrélées positivement au débit de la source avec une augmentation des concentrations lorsque le débit de la source augmente. Ces pics de concentrations en hiver et au printemps s'expliquent par le lessivage des sols et l'entraînement de l'azote non consommé vers la nappe lors des épisodes pluvieux.

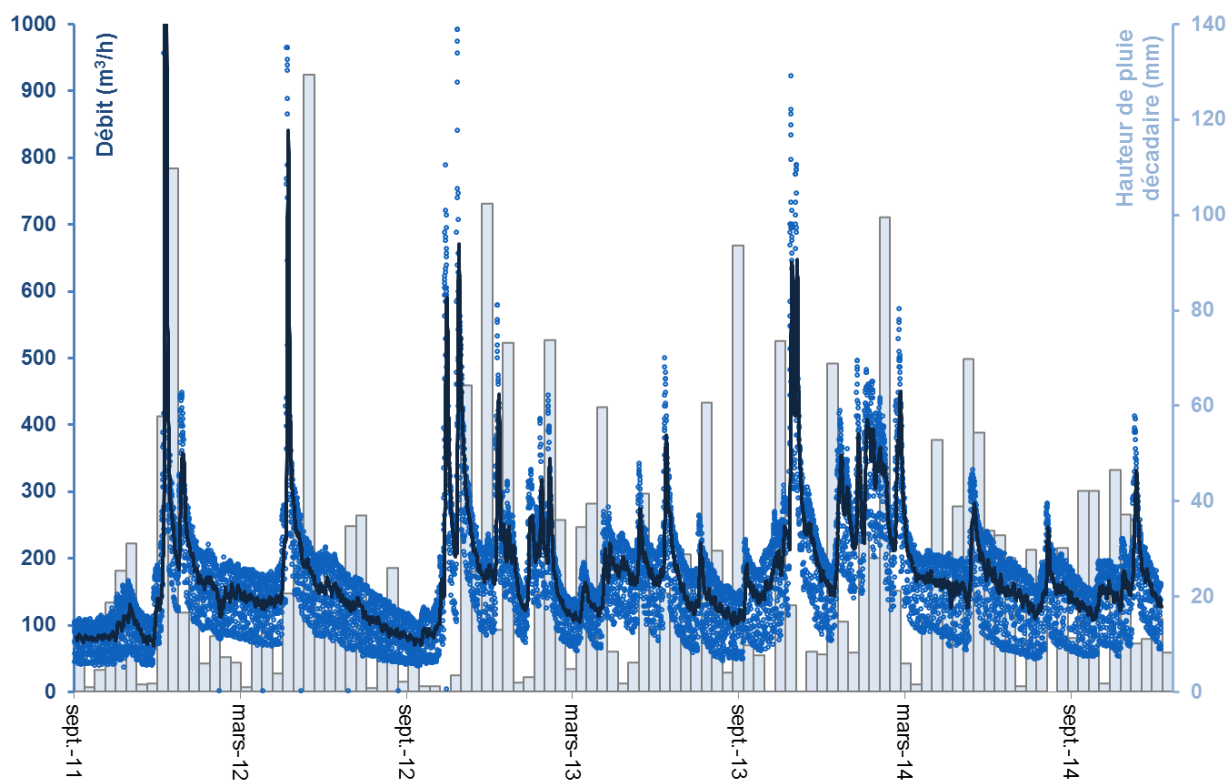
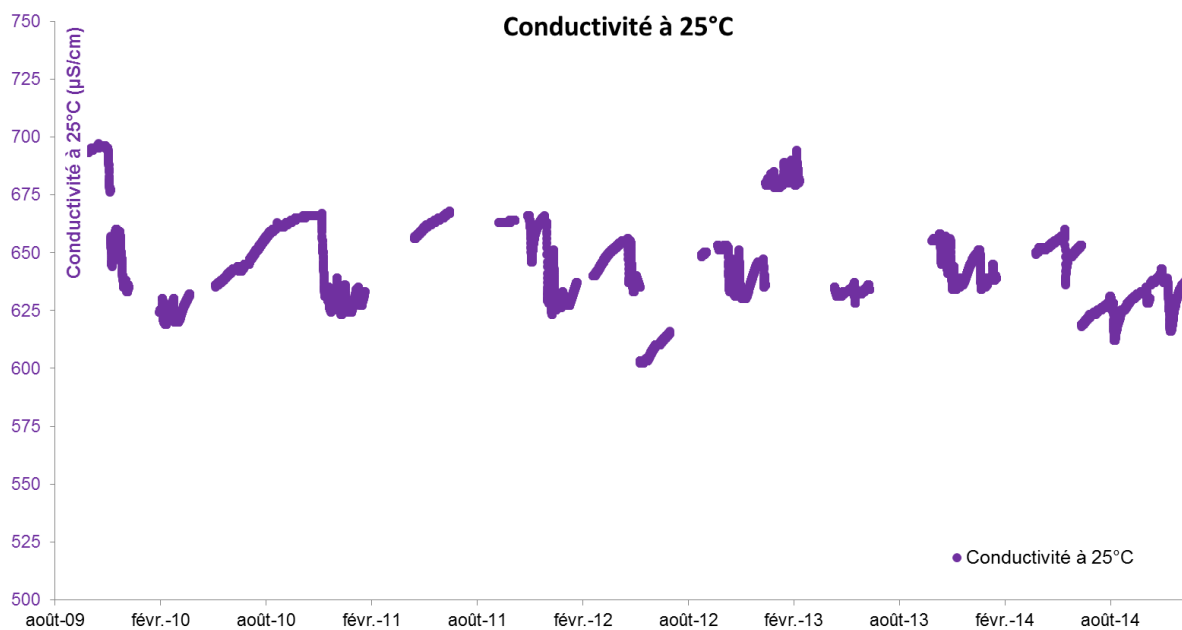
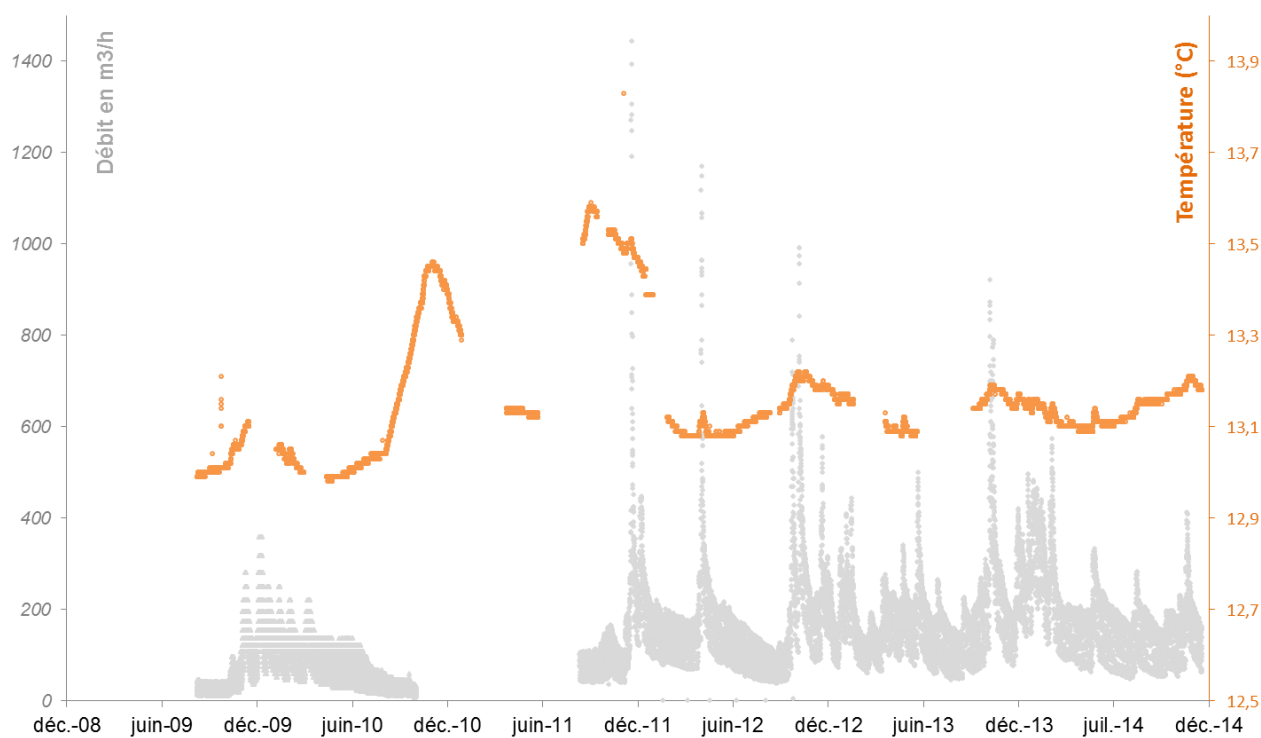


Illustration 62 : Evolution du débit de la source de Moulin Neuf (Trait plein:moyenne mobile sur 48h) sur l'histogramme des pluies décennales de la station météorologique de Tusson.



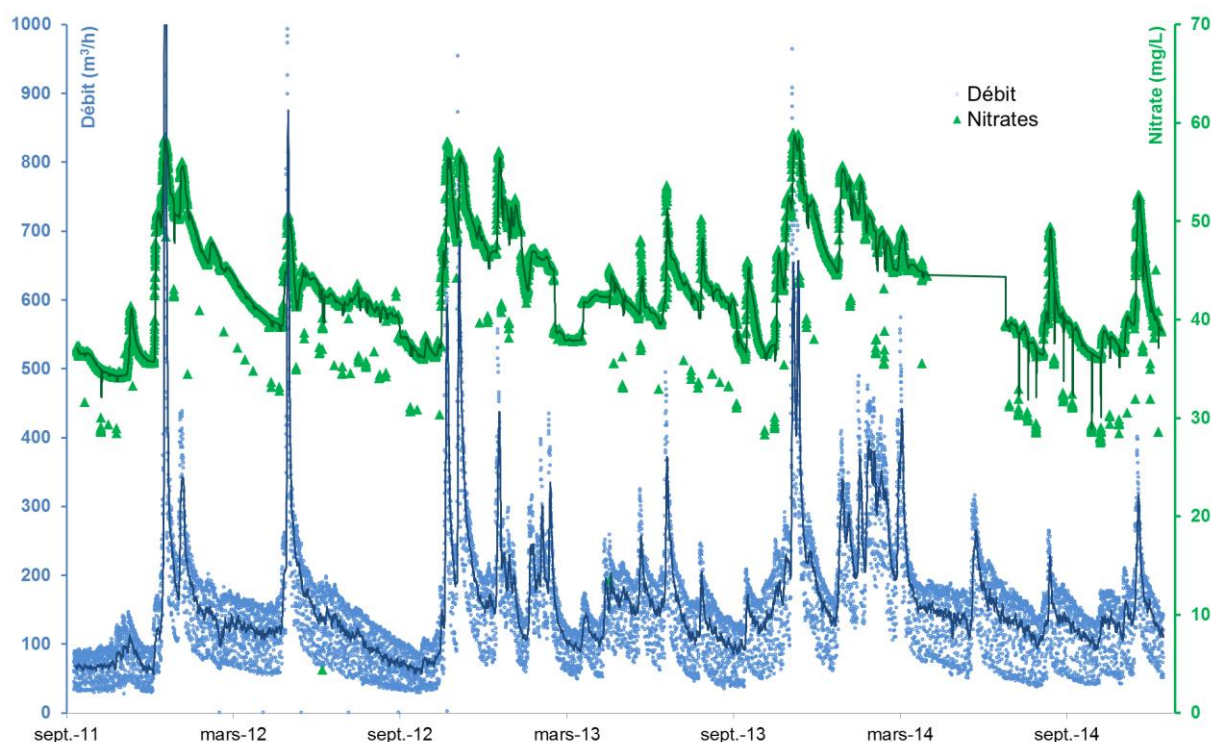


Illustration 65 : Corrélation positive entre le débit et les teneurs en nitrates de la source de Moulin Neuf.

6.2.4. Source de Forge à Mouthiers-sur-Boême (07096X0021/FORGE)

La source de Forge à Mouthiers sort des calcaires du Turonien supérieur, au pied d'un coteau calcaire en bordure de la Boême. La sortie principale se fait dans un étang d'agrément. L'eau de cet étang a été longtemps captée pour l'Alimentation en Eau Potable du secteur. Le captage a été abandonné récemment pour des raisons de qualité des eaux (nitrates et phytosanitaires).

De l'étang partent trois bras de rivière qui rejoignent la Boême. Deux des bras ont été équipés pour le suivi des débits. Le troisième, le moulin, est suivi par des mesures manuelles. La reconstitution des débits de la source suppose donc l'ajout de ces sorties d'eau.

Sur la période suivie, les étiages les plus sévères sont rencontrés lors de l'été 2011 et à la fin de l'été 2012 avec des débits de l'ordre de 170 m³/h (Illustration 66). Le débit de la source est conditionné par les événements pluvieux hivernaux et les débits de pointe seraient susceptibles de dépasser les 3 000 m³/h (avril 2012). Le débit moyen de la source est estimé à 860 m³/h. Ces débits sont à considérer avec précaution en raison de la relation imparfaite entre le débit total de la source, calculé sur la base des débits jaugés manuellement, et la hauteur d'eau dans le canal principal de la source. Cette relation s'améliore au fur et à mesure que la densité de points de mesure de jaugeage s'accroît.

Le suivi des températures montre clairement des cycles annuels (de 12 à 14 °C), correspondant aux cycles climatiques avec des eaux plus fraîches en hiver et plus chaudes en été (Illustration 67). Mais il y a également une correspondance avec les débits de la source ; ces fluctuations de température peuvent aussi s'expliquer par une contribution plus importante en eaux de « nappe » en été (transits lents) par rapport aux eaux de « ruissellement » (transits rapides).

Le suivi de la conductivité montre une certaine stabilité (autour de 580 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (Illustration 68). Le pH se stabilise autour de 6,9 mais la sonde connaît de fréquents dysfonctionnements. Une certaine variabilité du pH peut être engendrée par le développement conséquent de macrophytes dans le lit du canal sur la période estivale.

En ce qui concerne l'évolution des concentrations nitrates, des valeurs élevées sont mesurées en hiver (proche de 50 mg/L) et des valeurs plus basses en période d'étiage (autour de 30 mg/L) (Illustration 69). Les historiques des analyses disponibles dans les archives du BRGM montrent une certaine stabilité sur les 30 dernières années (mars 1981 : 50 mg/L mesuré), mais une augmentation importante des teneurs dans les années 1970 : en mai 1958, 5 mg/L mesuré, en novembre 1972, 8 mg/L mesuré.

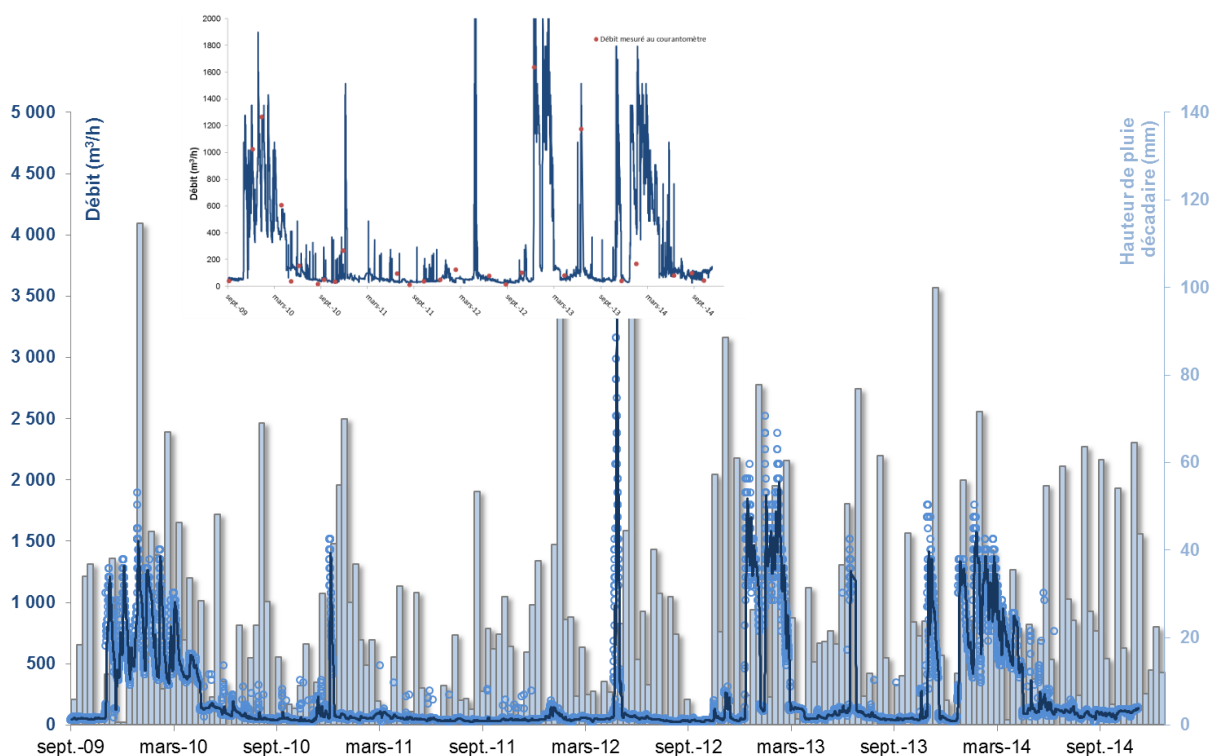


Illustration 66 : Débit estimé de la source de Forge et pluviométrie décadaire. Le trait plein représente la moyenne mobile sur 48 h, graphe du haut : comparaison des débits mesurés par la sonde avec les mesures de jaugeage ponctuelles

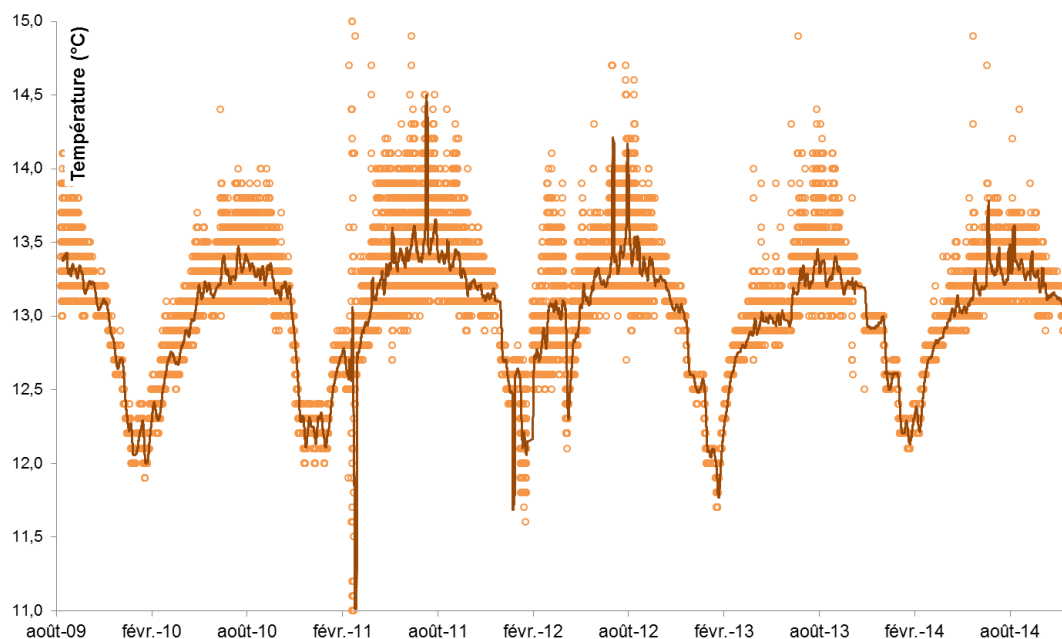


Illustration 67 : Température de l'eau de la source de Forge entre 2009 et 2014. Le trait plein représente la moyenne mobile sur 48 h.

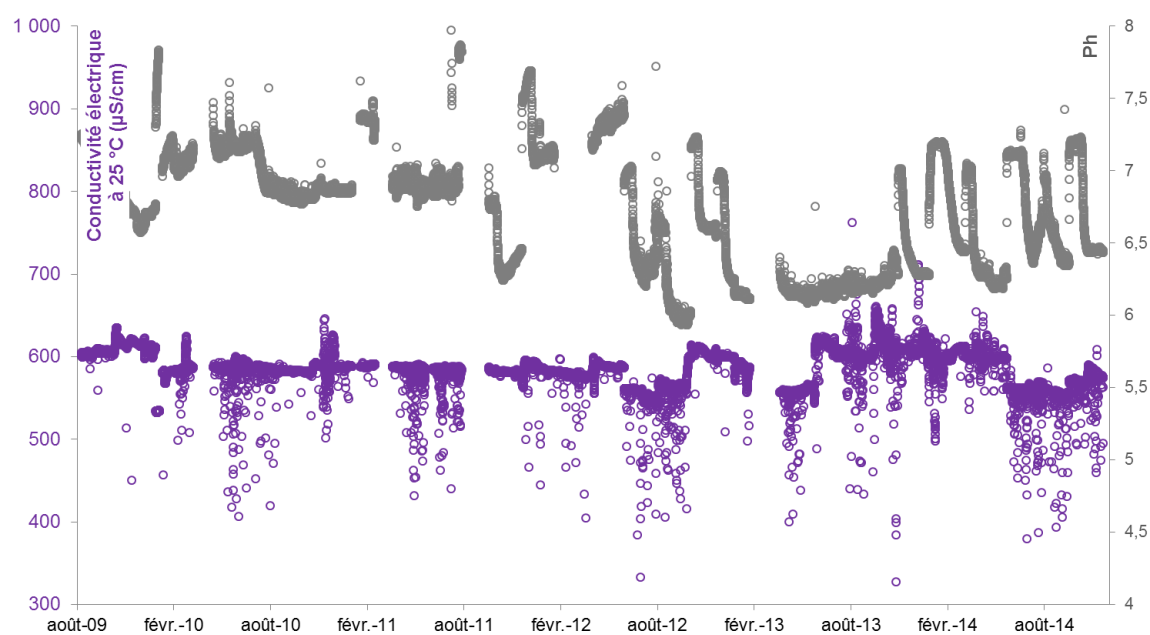


Illustration 68 : Conductivité électrique et pH mesurés sur les eaux de la source de Forge entre 2009 et 2014. Le trait plein représente la moyenne mobile sur 48 h.

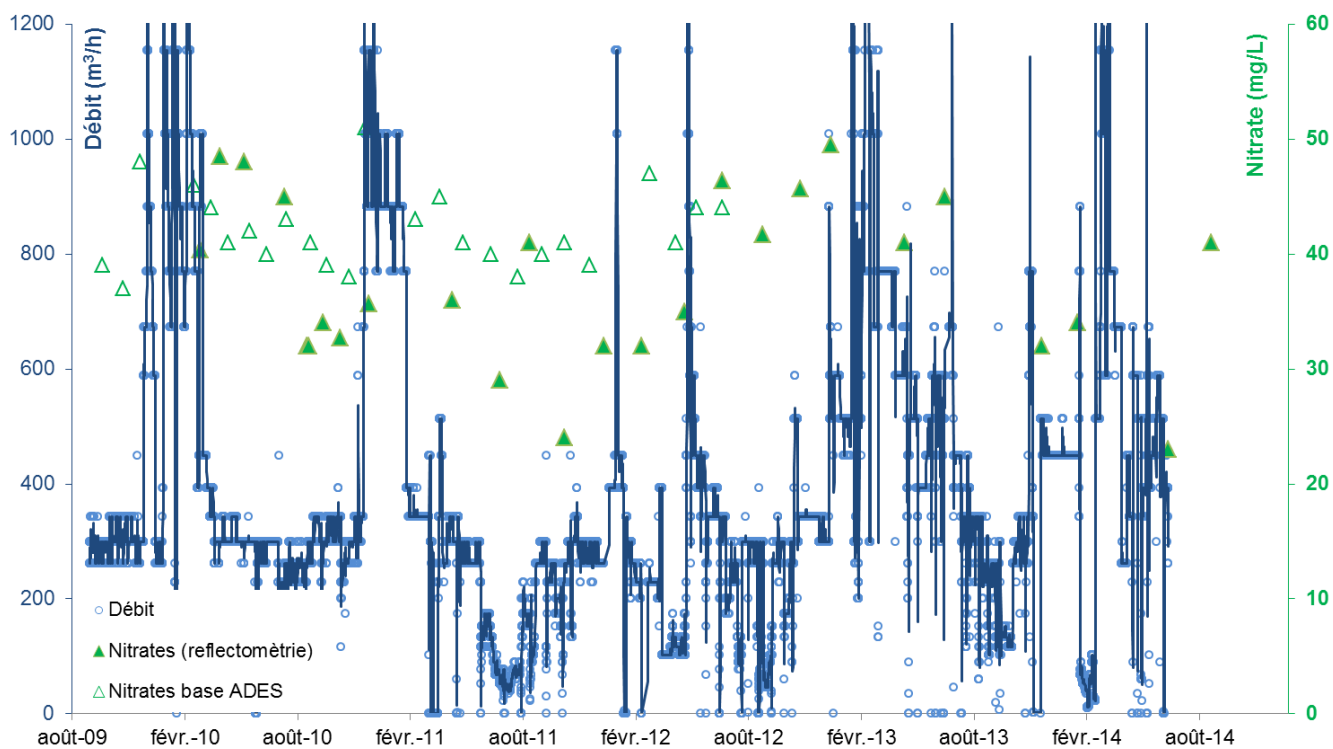


Illustration 69 : Débit estimé et teneurs en nitrates mesurées sur les eaux de la source de Forge entre 2009 et 2014. Le trait plein représente la moyenne mobile sur 48 h.

7. Conclusion, propositions

Le présent rapport conclut une suite d'opérations sur le bassin versant de la Charente, financées par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et le BRGM, s'inscrivant dans un programme global appelé « Caractérisation des pollutions diffuses sur le bassin de la CHarente – état des Lieux et mOdélisation [CACHALO] » se déclinant en 3 étapes. La première a conduit, d'une part, à l'équipement de 4 sources caractéristiques et importantes du bassin versant (Sompt dans le Dogger, la Touvre dans le karst de la Rochefoucauld, Mouthiers-sur-Boëme sortant du Turonien et St-Fraigne émergeant du Jurassique supérieur) et, d'autre part, à faire un état des lieux (2009) de la qualité des nappes vis-à-vis des nitrates. La seconde a fait l'état des lieux (2011) vis-à-vis des phytosanitaires. Enfin, la troisième, objet de ce rapport, examine la faisabilité d'une modélisation du bassin versant en couplant un modèle « agro-hydrologique » basé sur SWAT (développé à l'Université du Texas et couramment utilisé à l'IRSTEA Bordeaux) et un modèle hydrodynamique assurant le transport des nitrates, basé sur MARTHE (développé au BRGM).

Dans le premier travail exploratoire réalisé en 2012, les différents outils de modélisation des transferts d'azote du sol vers les nappes et les rivières étaient comparés. Il en découlait que SWAT était un outil adapté à une modélisation à l'échelle d'un bassin versant, contrairement à d'autres outils, comme AGRIFLUX ou STIC (INRA), orientés vers une approche à l'échelle de la parcelle agricole. Au cours de cette étape exploratoire, un premier travail de couplage SWAT/MARTHE avait été réalisé en s'appuyant sur une modélisation du bassin de la Boutonne.

Le travail exploratoire mené en 2012 a été poursuivi en s'attachant à examiner plus précisément les possibilités de contraindre les bilans de flux hydriques des simulations SWAT afin de pouvoir utiliser les bilans de flux de nitrates calculées comme données d'entrée du modèle MARTHE. Le modèle SWAT a été calibré sur la base des bilans de flux hydriques calculés avec le modèle MARTHE. Ce travail, dont ce rapport rend compte, est le fruit d'un partenariat étroit entre IRSTEA Bordeaux (Unité Environnement, Territoires et Infrastructures) et le BRGM Poitou-Charentes.

Globalement ce travail souligne la difficulté de coupler les modèles SWAT et MARTHE du fait des différences d'approche entre les 2 outils, notamment concernant le calcul du bilan des flux hydriques. Plus précisément, la contribution des différents compartiments (sol/nappe/rivière) aux bilans de flux hydriques diffèrent entre les deux modèles. Ces différences expliquent notamment des déphasages et des écarts d'amplitude assez importants entre les chroniques de débits de cours d'eau restituées par SWAT en comparaison de ceux calculées avec MARTHE (considéré comme le modèle de référence dans la présente étude). Ce décalage dans le calcul des bilans de flux hydriques rend complexe l'utilisation de données de sortie du modèle SWAT comme données d'entrée dans le modèle MARTHE pour calculer les flux de nitrates diffusant dans la nappe.

SWAT est un modèle « bassin versant », semi-spatialisé à pas continu journalier, de type « réservoirs », comprenant un grand nombre de paramètres (plus de 120), ce qui apparaît comme une force dans la prise en compte des pratiques agricoles ou d'aménagement des bassins versants mais peut-être une faiblesse en matière de calcul des flux, notamment dans la prise en compte des transferts par les nappes qui peuvent fournir dans certaines zones une contribution essentielle du débit des cours d'eau. Son objectif n'est pas de modéliser les

nappes mais d'être outil d'aide à la décision pour le maintien de la qualité des eaux superficielles. (nitrates, pesticides). En dehors de l'outil informatique SWAT proprement dit, IRSTEA a développé des méthodes et programmes (GENLU2) pour faciliter la modélisation des pratiques agronomiques et des trajectoires de l'agriculture. La connaissance sur le bassin de la Charente de ces pratiques par Irstea émane d'enquêtes de terrain ciblées sur plusieurs sites d'études, réalisées depuis plusieurs années et d'un travail de typologie. Soulignons que, dans le bassin versant de la Boutonne, l'IRSTEA n'a pas réalisé d'enquête terrain, mais a utilisé le travail de typologie des pratiques du bassin de la Charente ainsi que le traitement des données disponibles sur ce bassin (RPG) pour produire une vision « modélisée » des pratiques agricoles.

MARTHE est avant tout un outil de modélisation de l'hydrodynamisme des nappes souterraines. Les modèles développés avec ce logiciel sont spatialisés (dans les 3 dimensions). Les calculs reposent sur des bilans de flux entre mailles parallélépipédiques, en fonction du pas de temps, et principalement sur les paramètres liés à la géométrie (notamment épaisseur de l'aquifère), les champs de perméabilité et d'emménagement. Le calage en matière de flux hydriques est contraint par la bonne restitution des chroniques piézométriques pour les nappes, des chroniques de débit pour les rivières. Mais, si en matière de flux le modèle Boutonne MARTHE est assez bien calé, la modélisation des transferts de masse en nitrates fait appel à d'autres paramètres (transferts rapide dans les fissures, transferts lents dans la matrice, absorption sur la matrice rocheuse, dispersion, dégradation...) plus difficile à reproduire dans un modèle. Le pas de temps de calcul (le mois dans le modèle Boutonne) est aussi un facteur déterminant.

Les échanges entre IRSTEA et BRGM conduisent donc à faire évoluer non-seulement les outils de modélisation mais aussi à préciser le paramétrage des modèles et les données d'entrée, les échelles spatio-temporelles. Plusieurs pistes de réflexion découlent donc de ce travail.

Coté IRSTEA, la définition des itinéraires techniques rentrés dans le modèle SWAT a été pour ce projet basé sur l'analyse des pratiques et de l'occupation du sol entre 2006 et 2011 (le RPG est la principale donnée de travail) pour s'adapter au mieux à la période modélisée par MARTHE (1998-2007). Les successions culturales considérées dans le modèle SWAT sont donc actuellement une duplication cyclique sur la période modélisée (20 ans) des informations disponibles pour cette période de 6 ans. Compte-tenu de l'inertie des nappes, la prise en compte des pratiques plus anciennes et de points d'inflexion sur la période modélisée est une piste d'amélioration. Par ailleurs, avec plus de temps et en s'appuyant sur cette première expérience, une meilleure calibration du modèle est possible, notamment pour le calcul de la recharge et des flux transférés vers les nappes et les rivières : elle devrait permettre de rapprocher les flux calculés par les deux modèles et de mieux prendre en compte les différences de fonctionnement (maille temporelle et spatiale) .

Coté BRGM, se pose notamment la question du pas de temps des calculs mensuel. Un pas de temps journalier, comme celui du modèle sous SWAT, devrait permettre de mieux caler sur la réalité observée mais en revanche accroîtrait les temps de calcul. Parallèlement, la prise en compte des mailles SAFRAN (8 km de côté) pour l'introduction des données météorologiques devrait permettre d'affiner le calcul de la recharge et être plus cohérent avec l'approche bassin versant de SWAT. Enfin, en matière de transport des nitrates dans l'aquifère, la prise en compte d'une double porosité (fonctionnalité existant actuellement dans MARTHE mais qui pourrait vraisemblablement être améliorée) pourrait permettre de mieux gérer les transferts de flux et les transferts de masse, les transferts rapide (fissures, karst) et les transferts lents (matrice).

De ces réflexions découlent un programme de travail permettant de poursuivre le partenariat IRSTEA/BRGM avec comme objectif à terme de 1) disposer d'un outil commun (couplage SWAT/MARTHE) et 2) modéliser le bassin de la Charente (avec des précisions différentes en

fonction des secteurs et des données disponibles). Ce programme de travail pourrait se décliner en 3 étapes :

- Dans un premier temps, le travail de collaboration IRSTEA/BRGM doit se poursuivre sur le bassin test (bassin de la Boutonne) pour finaliser et lever les derniers verrous scientifiques inhérents au transfert des données SWAT en entrée du modèle MARTHE ;
- Dans un second temps, les travaux s'attacheront à la problématique du changement d'échelle, pour passer de l'échelle de la HRU (basée sur des ilots de parcelles) et d'un bassin de la taille de la Boutonne à l'ensemble du bassin de la Charente (plus de 10000 km²), avec en particulier la question de la résolution des données et leur sensibilité sur les résultats ;
- Dans un troisième temps, il s'agit de construire à partir de l'outil commun SWAT-GENLU2-MARTHE un modèle de l'ensemble du bassin versant de la Charente. Cette phase s'appuiera sur les travaux de phase 1 et 2 notamment pour mettre en œuvre la méthodologie de changement d'échelle que la phase 2 aura permis de définir. A l'échelle du bassin versant de la Charente, l'objectif est de simuler la dynamique des transferts d'azote à l'échelle de la masse d'eau (surface et souterraine). Des zooms pourront être faits pour affiner la restitution à des échelles plus fines.

8. Bibliographie

Abbaspour, K. C. 2005. Calibration of hydrologic models: When is a model calibrated? Pages 2449-2455, Melbourne, VIC.

Abbaspour, K. C., C. A. Johnson, and M. T. van Genuchten. 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal* **3**:1340-1352.

Bichot.F., Thinon Larminach M., Touchard.F., Bailly.D. (2005) - Synthèse hydrogéologique par bassins versants de la région Poitou-Charentes. Relations nappes-rivières. Rapport BRGM/RP-53767-FR, 130 p.

Bichot F., Marchais E., Chatelier M (2011) – Bassin de la Charente : recherche d'une méthodologie pour prévoir l'évolution des teneurs en nitrates et produits phytosanitaires en fonction des pratiques anthropiques. Phase 1 : Etat des lieux par rapports aux nitrates. Rapport final. BRGM/RP-59154-FR, 194 p., 8 ill.

Bordenave, P., S. Sauvage, O. Leccia, M. Cattaneo, A. Abraham, J. M. Sanchez, R. Laplana, and J. L. Probst. 2009. Collaborative Technological Platform for implementation for WFD within agricultural context: Task 4 Deliverable 4.2.3.2. Report on environmental effectiveness of mitigation measures.

Chatelier M avec la collaboration de Subra Ph et Durand J. (2013) – Bassin de la Charente : recherche d'une méthodologie pour prévoir l'évolution des teneurs en nitrates et produits phytosanitaires en fonction des pratiques anthropiques. Phase 2 : Etat des lieux par rapports aux phytosanitaires. Rapport final. BRGM/RP-62254-FR, 290 p., 263 fig., 3 tabl., 7 ann.

Douez O. (2008) - Bassin versant de la Boutonne – Etat des lieux de la qualité des eaux par rapport au paramètre nitrate, Rapport BRGM- RP-56404-FR, 55 p., 24 ill.

Douez O., Bichot F., Dequidt D., Dugrillon D., Putot E., Petit L. (2010) - Contribution à la gestion des prélèvements à la périphérie du Marais Poitevin par modélisation hydrodynamique. BRGM/RP-58297-FR, 239 p, 212 ill., 5 ann., 12 pl.

Douez O., Bichot F., Petit L. (2011) – Contribution à la gestion quantitative des ressources en eau à l'aide du modèle Jurassique de Poitou-Charentes. BRGM/RP-59288-FR, 411 p., 286 ill., 2 ann., 4 planches hors texte.

Douez O., Chatelier M., Cussey S. (2012) – Faisabilité d'une modélisation du transfert azoté du sol vers les nappes et les rivières. BRGM/RP-61823-FR, 70 p., 45 ill., 3 ann.

Gassman, P. W., M. R. Reyes, C. H. Green, and J. G. Arnold. 2007a. The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE* **50**:1211-1250.

Gassman, P. W., M. R. Reyes, C. H. Green, and J. G. Arnold. 2007b. Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions, The.

GisSol. 2012. Base de données nationale des informations spatiales pédologiques.*in* I. Responsable : Benoit Toutain, editor. <http://www.gissol.fr/outil/donesol/donesol.php>.

Leccia, O., J. M. Lescot, F. Vernier, and S. Rousset. 2012. Évaluation environnementale et économique de l'impact de modifications des pratiques agricoles par modélisation intégrée à partir de scénarios d'évolution : Rapport intermédiaire d'activité du projet ECCOTER - Les mesures agro-environnementales à enjeu « eau/pesticides ».

Lemordant Y. (1998) - Bassin de la Boutonne – Relations nappe-rivière – délimitation de la nappe d'accompagnement. Rapport BRGM R 40095, 37 p., 16 fig., 4 ann.

Lescot, J. M., O. Leccia, and F. Vernier. 2013. Challenges for integrated assessment and Cost-Effectiveness analysis of mitigation measures for controlling water pollution. Transboundary water management across borders and interfaces: present and future challenges. TWAM2013 International Conference **Conference Proceedings**:5 p.

Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, and J. R. Williams. 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute.

Petelet.Giraud.E., Bichot.F., Thinon.Larminach.M., Subra.P., Aumond.F. (2010) - CAMERA : CARactérisation et Modélisation de l'Evolution des tRAnsfer des pollutions diffuses Bassin de la Sèvre-Niortaise à l'amont de Niort. BRGM/RP-57973-FR, 33 p.

Thiery D. (1990 a) - Logiciel MARTHE. Modélisation d'Aquifère par un maillage rectangulaire en régime transitoire pour un calcul hydrodynamique des écoulements - version 4.3. Rapport BRGM R 32210 EAU 4S 90, 356 p.

Thiery D. (1990 b) - Software MARTHE. Modelling of Aquifers with a Rectangular Grid in Transient state for Hydrodynamic calculations of hEads and flows. Release 4.3. Rapport BRGM 4S/EAU n° R 32548.

Thiery D. (1993) - Modélisation des aquifères complexes - Prise en compte de la zone non saturée et de la salinité. Calcul des intervalles de confiance. Revue Hydrogéologie, 1993, n° 4, p. 325-336.

Thiery D. (1994) - Modélisation 3D des écoulements en Zone Non Saturée avec le logiciel MARTHE version 5.4. Rapport BRGM R 38108 DR/HYT 94, 114 p.

Thiery D. (1995 a) - Modélisation 3D du transport de masse avec le logiciel MARTHE version 5.4. Rapport BRGM R 38149 DR/HYT 95, 171 p.

Thiery D., Golaz C., Azaroual M. (2002) - Mise en œuvre et tests d'application du code MARTHE – PHREEQC Version 6.2. Rapport BRGM/RP-51905-FR, 67 p.

Thiery D., Golaz C. (2002) - Consideration of vegetation effects in version 6.2 of the MARTHE model. Consequences for water and mass uptake. Rapport BRGM/RP- 51988-FR, 48 p.

Thiery D. (2006) - Didacticiel du pré-processeur WinMARTHE v4.0. Rapport final. BRGM/RP 54652-FR, 83 p., 48 fig.

Thiery D. (2008) - Code MARTHE 7.0 : Couplage Nappe-Rivières et Nappe-Drains ; Bilans Hydroclimatiques, Note technique NT EAU 2004/19, 2ème édition,19p

Thiery D. (2010) - Didacticiel du code de calcul MARTHE v7.0. Votre premier modèle. Rapport BRGM n° RP-58632-FR, 112 p., 68 fig.

- Abbaspour, K., M. Vejdani, and S. Haghighat. 2007a. SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT. *in* MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand.
- Abbaspour, K. C. 2005. Calibration of hydrologic models: When is a model calibrated? Pages 2449-2455, Melbourne, VIC.
- Abbaspour, K. C., C. A. Johnson, and M. T. van Genuchten. 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal* **3**:1340-1352.
- Abbaspour, K. C., J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner, J. Zobrist, and R. Srinivasan. 2007b. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* **333**:413-430.
- Akhavan, S., J. Abedi-Koupai, S. F. Mousavi, M. Afyuni, S. S. Eslamian, and K. C. Abbaspour. 2010. Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan-Bahar Watershed, Iran. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **139**:675-688.
- Bioteau, T., P. Bordenave, F. Laurent, and D. Ruelland. 2002. Evaluation des risques de pollution diffuse par l'azote d'origine agricole à l'échelle de bassins versants: intérêts d'une approche par modélisation avec SWAT®. *Ingénieries-EAT*:p. 3-p. 12.
- Bordenave, P., S. Sauvage, O. Leccia, M. Cattaneo, A. Abraham, J. M. Sanchez, R. Laplana, and J. L. Probst. 2009. Collaborative Technological Platform for implementation for WFD within agricultural context: Task 4 Deliverable 4.2.3.2. Report on environmental effectiveness of mitigation measures.
- Gassman, P. W., M. R. Reyes, C. H. Green, and J. G. Arnold. 2007a. The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE* **50**:1211-1250.
- Gassman, P. W., M. R. Reyes, C. H. Green, and J. G. Arnold. 2007b. Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions, The.
- Laurent, F. R., D., Chapdelaine, M. 2007. Simulation de l'effet de changements de pratiques agricoles sur la qualité des eaux avec le modèle SWAT. *Revue des sciences de l'eau* **20**:pp. 395-408.
- Leccia, O., J. M. Lescot, F. Vernier, and S. Rousset. 2012. Évaluation environnementale et économique de l'impact de modifications des pratiques agricoles par modélisation intégrée à partir de scénarios d'évolution : Rapport intermédiaire d'activité du projet ECCOTER - Les mesures agro-environnementales à enjeu « eau/pesticides ».
- Lescot, J. M., O. Leccia, and F. Vernier. 2013. Challenges for integrated assessment and Cost-Effectiveness analysis of mitigation measures for controlling water pollution. Transboundary water management across borders and interfaces: present and future challenges. TWAM2013 International Conference **Conference Proceedings**:5 p.
- Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, and J. R. Williams. 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute.

- Torre, M., J.-P. Rebillard, H. Ayphassorho, L. Labroue, and C. Helmer. 1992. Etude expérimentale de la dénitrification in situ en eaux courantes: application à la rivière Charente. Pages 263-271 *in* Annales de Limnologie-International Journal of Limnology. Cambridge Univ Press.
- Vernier, F., P. Bordenave, O. Leccia, and K. Petit. 2009. SSA 10 (Pertuis sea and Charente river basin) Agriculture-Irrigation box: Definition and impact of scenarios Links with SSA10 extend model. Page 8 *in* Spicosa meeting, Copenhagen, DNK.

Annexe 1

Mesures et interventions de terrain sur les 4 sources suivies

Fontaine de Sompt

Date	Heure	Temp en °C	Cond en µS	pH	Redox en mV	O2 en mg/l	O2 en %	NO3	NO3	NO3	Moyenne NO3-	Débit en m3/s	Commentaire
20/04/2011	13h30		587	7,35	188,1	0		45	39	41	41,67		
30/06/2011			577	7,1	211	9,6		36	35	36	35,67		
18/08/2011	14h30	12,9	584	7,206	203,4	6,76	67,6	41	38	39	39,33	0,035	
25/10/2011	16h30	12,9	584	7,2	291,5								
15/12/2011		12,8	587	7,22	253,9			30	35	31	32,00	0,085	
15/02/2012	15h00	12,7	621	7,13		2,55	23,6	41	43	39	41,00	0,2182	Problème pour la mesure de débit (trop de turbulence)
24/02/2012	14h00											0,122	Mesure de débit chez Mme Medvedeff au niveau du pont
03/04/2012	17h00	12,9	610	7,13	299	11,28						0,074	
15/05/2012	11h00	13,1	622	7,03	250,4	5,45	53,8	50	47	49	48,67	0,255	Mesure de débit chez Mme Medvedeff au niveau du pont
06/07/2012	16h00	13,2	620	7,05	190,7	11,02		56	55	55	55,33	0,091	
30/08/2012	14h00	13,3	612	7,021	229,8	9,94		47	44		45,50	0,057	Mesure de débit chez Mme Medvedeff au niveau du pont
22/10/2012	17h00	12,9	605	7,05		11,1		44	43	44	43,67	0,18	
19/12/2012	10h00	12,7	597	7,036	245,9	9,84	93,3	43	40		41,50	0,736	Mesure de débit chez Mme Medvedeff au niveau du pont (débit très important)
18/04/2013	13h30	12,8	614	hs	280,7	10,12		49	45		47,00	0,45	Mesure de débit chez Mme Medvedeff au niveau du pont (débit très important). Etalonnage hydrolab + chgt piles
18/06/2013	17h00	12,9	621	7,1	254,5	9,82		42	42	41	41,67	0,238	Mesure de débit chez Mme Medvedeff au niveau du pont (débit très important).
27/11/2013	14h	12,8	614	7,25	119,3	hs		37	38	38	37,67	0,287	Mesure de débit chez Mme Medvedeff au niveau du pont (débit très important). Etalonnage hydrolab + chgt piles
24/01/2014	15h30	13,1	606	7,22	305,5	hs		48	48	53	49,67	0,48	Mesure de débit chez Mme Medvedeff au niveau du pont (débit très important).
02/04/2014	16h	12,9	609	7,32				41	43	35	39,67	0,267	
18/06/2014	15h38	13,5	518	7,409				45	40	44	43,00		Mesure de débit chez Mme Medvedeff au niveau du pont. Etalonnage + cght pile
28/08/2014	15h00	13,5	621	7,52				50	55	53	52,67	0,066	

Source de Mouthiers sur Boême

Date	Heure	Temp en °C	Cond en µS	pH	Redox en mV	O2 en mg/l	O2 en %	NO3	NO3	NO3	Débit en m3/s	Commentaire
10/05/2010	13:00	13,2	607	7,327	236,5	10,44	100,2	46	50			
14/04/2011	15h20							35	38	35		
29/06/2011	12:30	14,1	561	6,9	218	9,51	95,1	28	29	29	0,133	
17/08/2011	13h40	14,8	555	7,325	185,5	7,94	78,6	39	38	43	0,102	
13/10/2011	15h00	14,3	589	7,48				23	23	25	0,11	
15/12/2011	11h00	13,1	553	7,43	164,3	5,68	54,3	33	31	32	0,14	
15/02/2012	14h00	12,5	598	7,4		2,76	26	33	32	31	0,149	D'après la propriétaire une personne de la mairie modifie le niveau d'eau dans la rivière en ouvrant des "trappes".
25/04/2012	11h00	12,9	600	7,24	277,6	9,75	97	35	35	35	0,16	
25/06/2012	10h00	13,4	604	7,07	172,4	8,69	83,8	47	48	44	0,116	Difficulté à faire les mesures de jaugeages à cause de la végétation abondante
29/08/2012	11h00	14,7	602	7,1	304,2	9,91		39	43	43	0,066	
30/10/2012	10h30	12,8	617	7,23	248,3	9,99		45	47	45	0,104	
18/12/2012	11h00	12,7	612	7,238	268,4	9,85	97,4	50	49		0,527	
16/04/2013	11h00	13	616	6,77	183,5	10,75		38	44			Etalonnage hydrolab + chgt pile
21/06/2013	11h00	12,9	616	7,17	311	9,84		44	46	44		
26/11/2013	10h00		616	7,2	hs	9,77		32	32	32	0,3099	etalonnage hydrolab
23/01/2014	13h30	12,6	611	7,38	hs			31	36	35	0,2899	
19/06/2014	10h30	14,3	614	7,44		2,25		22	21	25		etalonnage hydrolab + chgt pile HYDROLAB et ORPHEUS
28/08/2014	9h30	13,3	615	7,49				43	38	41		

Moulin neuf à St-Fraigne

Date	Heure	Temp en °C	Cond en μS	pH	Redox en mV	NO3	NO3	NO3	Débit en m3/s	Débit petit affluent	Commentaire
20/04/2011	14h30		641	7,183		38	33	35			
30/06/2011	16h10		640	7,033	189,9	31	33				
08/09/2011	15h50		692	7,23	207	30	31	32			
02/11/2011	14h00	13,4	648	7,1	231,5	30	29	30	0,023		
02/12/2011	10h30	13,1	644	7,05	225,1	32	29	28	0,03		
11/01/2012	10h30	12,8	643	7,24		37	39	36	0,055		
15/02/2012	10h00	11,4	648	7,24		35	38	36	0,216	0,0246	Débit pris dans la cana de sortie
24/02/2012	10h15								0,126	0,00156	
									0,078		
15/05/2012	14h00	13,1	657	7,02	232,9	46	45	46	0,0578		
06/07/2012	13h00	13	663	7	157,6				0,0972		Mesure de jaugeage incertaine
30/08/2012	10h30	14,2	670	7,069	302,7	35	37		0,03016		
22/10/2012	12h00	13,3	664	7,06		59	51	57	0,229		
19/12/2012	12h30	12,7	660	7,072	264,5	44	44	42	0,0792		
18/04/2013	9h30	13,2	658	7,016	234,6				0,0611		Pb téléchargement (très long + 4h), données OK, appareil déplacé par personnel station + tuyau exhaure pincé. Etalonnage OK
18/06/2013	15h00	13,5	650	7,121	250	35	36		0,0615		
27/11/2013	11h	13,1	645	7,16	129,6	36	31	37	0,0615		Pb téléchargement, etalonnage sonde hydrolab
24/01/2014	9h30	13	643	7,2	311,9	36	36	32	0,0615		Forte différence NO3 Thétys/terrain
02/04/2014	14h30	13,4	628	7,2		34	31	34	0,041		
20/06/2014	13h44	15,1	642	7,402		30	33	31			
29/08/2014	9h00	13,1	655	7,47		38	41	39			Chgt piles hydrolab+etalonnage thétys
17/10/2014	9h30	13,2	661	7,47		33	34	32			Etalonnage 0
18/12/2014	9h30	13	663	7,42		34	30	29			Appareil HS (tuyau de pompe percé cause fréquence échantillonnage trop importante)/changer la pile de la sonde piézo

Source de la Touvre

Date	Heure	Temp en °C	Cond en µS	pH	Redox en mV	O2 en mg/l	O2 en %	NO3	NO3	NO3	Moyenne NO3-	Commentaire
10/05/2010	11:00	12,2	405	7,296	292,8	7,8	70,8	20	18		19,00	
29/06/2011	10:30	18,3	457	7,07	394,4			9	10	9	9,33	
14/04/2011								11	13	13	12,33	
17/08/2011	11h05	17,9	467	7,47	553,2	5,48	58,4	11	12	12	11,67	
25/10/2011	11h00	15,7	497	7,38	458,5							
15/12/2011		13,7	420	7,51	245,5			17	13	13	14,33	
14/02/2012	11h00	11,9	416	7,41		1,93	17,6	16	15	11	14,00	
25/04/2012	15h00	14,9	410	7,91	616	9,72		17	14	15	15,33	
25/06/2012	11h00	13,5	405	87,35	204,7	5,22		16	16	16	16,00	Sonde hydrolab toujours au fond de la cuve
29/08/2012	14h00	15,9	486	7,316	562,4	9,36		19	20	17	18,67	Installation d'une nouvelle sonde Hydrolab
30/10/2012	14h30	14,1	455	7,259	483,6	9,77	96,4	20	19	20	19,67	
18/12/2012	14h00	12,6	462	7,273	707,1	10,26	96,6	22	22		22,00	
16/04/2013	14h	14,5	427	7,2	490	9,87		19			19,00	chgt pile, etalonnage conductivité
21/06/2013	14h30	16	447	7,47	491	9,14		22	20	23	21,67	
26/11/2013	14h00	12,5	437	7,5	200,8	10,18		11	14	13	12,67	etalonnage pH
24/01/2014	13h30	12,7	406	7,62	593,6	hs		12	11	13	12,00	
19/06/2014	8h30	17,5	444	7,69		2,3		7	7	7	7,00	chgt pile, etalonnage conductivité
29/08/2014	14h00	19,1	452	7,66				17	18	19	18,00	cght pile



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 - www.brgm.fr

Direction régionale Poitou-Charentes

5 rue de la Goélette

86280 – Saint-Benoit – France

Tél. : 05 49 38 15 38