



# Rapport d'expertise :

## Modélisation hydrodynamique du bassin de Sainteny-Marchésieux. Avis du BRGM

BRGM/RP-65885-FR

Octobre 2016

### Cadre de l'expertise :

Appuis aux administrations  Appuis à la police de l'eau   
Catastrophe naturelle  Autres

Date de réalisation de l'expertise : Juin 2016

Localisation géographique du sujet de l'expertise :

Auteurs BRGM : ARNAUD L. et PENNEQUIN D.

Demandeur : DDTM de la Manche

1.89 3740.46 -625.5



Géosciences pour une Terre durable


**brgm**


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

***Ce rapport est le produit d'une expertise institutionnelle qui engage la responsabilité civile du BRGM. Il constitue un tout indissociable et complet ; une exploitation partielle ou sortie du contexte particulier de l'expertise n'engage pas la responsabilité du BRGM.***

***La diffusion des rapports publics est soumise aux conditions de communicabilité des documents, définie en accord avec le demandeur. Aucune diffusion du présent document vers des tiers identifiés ne sera volontairement engagée par le BRGM sans notification explicite du demandeur.***

Ce document a été vérifié et approuvé par :

Vérificateur :	Date : 07/11/2016
Nom : N. AMRAOUI	
Approbateur :	Date :
Nom : E. GOMEZ	Directeur interrégional Centre-Ouest du BRGM



**Mots-clés :** Appui à la police des eaux souterraines, Modélisation hydrodynamique, Bassin de Sainteny-Marchésieux, Manche.

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

**Arnaud L., Pennequin D.** (2016) – Modélisation hydrodynamique du bassin de Sainteny-Marchésieux (50). Avis du BRGM. Rapport BRGM/RP-65885-FR, 29 pages, 18 figures.

© BRGM 2016, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Sommaire

<b>1. Introduction</b> .....	<b>5</b>
<b>2. Contexte général</b> .....	<b>6</b>
2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE .....	6
2.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE .....	8
<b>3. Caractérisation sommaire des deux modèles hydrogéologiques</b> .....	<b>9</b>
3.1. MODELE TERRE ET HABITAT .....	9
3.1.1 Modèle conceptuel .....	9
3.1.2 Géométrie et maillage .....	11
3.1.3 Conditions hydrauliques aux limites du modèle .....	12
3.1.4 Recharge .....	13
3.1.5 Relations nappe-rivière.....	14
3.1.6 Débits prélevés .....	14
3.1.7 Calage du modèle et résultats.....	14
3.1.8 Paramètres hydrodynamiques issus du calage.....	15
3.1.9 Analyse de sensibilité .....	15
3.1.10 Bilan hydraulique des entrées / sorties .....	15
3.2. MODELE DE L'UNIVERSITE DE RENNES.....	16
3.2.1 Modèle conceptuel .....	16
3.2.2 Géométrie et maillage .....	16
3.2.3 Conditions hydrauliques aux limites du modèle .....	18
3.2.4 Recharge .....	19
3.2.5 Relations nappe-rivière.....	20
3.2.6 Calage du modèle et résultats.....	21
3.2.7 Paramètres hydrodynamiques issus du calage.....	22
3.2.8 Analyse de sensibilité .....	22
3.2.9 Bilan hydraulique des entrées / sorties .....	23
<b>4. Diagnostic</b> .....	<b>25</b>
4.1. COMPARAISON DES DEUX MODELES .....	25
4.2. AVIS PRELIMINAIRE .....	26
<b>5. Recommandations</b> .....	<b>28</b>
<b>6. Bibliographie</b> .....	<b>29</b>

## Liste des illustrations

Illustration 1 – Schéma structural de la zone d'étude (feuille n° 117 – Carentan, BRGM©).....	7
Illustration 2 – Coupe schématique figurant les variations latérales de faciès et l'empilement des formations plio-pléistocène du bassin de Sainteny-Marchésieux (modifié d'après Dugué, 2003).....	7
Illustration 3 – Bilan hydrologique du bassin de Sainteny-Marchésieux calculé par SOGREAH sur la période 1994-1999.....	10
Illustration 4 – Gammes d'épaisseur des 6 couches du modèle Terre et Habitat.....	11
Illustration 5 – Epaisseur des marnes et grès de Marchésieux (couche 5) (extrait de Terre et Habitat, 2014) .....	12
Illustration 6 – Limites à charges imposées en bordure sud-ouest du modèle (extrait de Terre et Habitat, 2014).....	13
Illustration 7 – Evolution de l'infiltration mensuelle (extrait de Terre et Habitat, 2014). .....	14
Illustration 8 – Paramètres hydrodynamiques issus du calage du modèle de Terre et Habitat .....	15
Illustration 9 – Géométrie du modèle de l'Université de Rennes (figure du haut extraite d'Armandine Les Landes, 2013 et figure du bas extraite de De Ridder, 2011).....	18
Illustration 10 – Conditions aux limites du modèle de l'Université de Rennes (extrait de Armandine Les Landes, 2013).....	19
Illustration 11 – Ruissellement mensuel simulé par le modèle GR2M modifié et ruissellement observé (extrait de Armandine Les Landes et al.,2014).....	20
Illustration 12 – Niveaux piézométriques simulés vs niveaux observés (extrait de Armandine Les Landes et al., 2014).....	21
Illustration 13 – Comparaison entre la cartographie des zones humides observée (source : Parc naturel des marais du Cotentin et du Bessin) et celle simulée (niveaux simulés compris entre 0 et 0.5 m de profondeur) (extrait de Armandine Les Landes et al., 2014) .....	22
Illustration 14 – Perméabilités issues du calage du modèle de l'Université de Rennes (extrait de De Ridder, 2011).....	22
Illustration 15 – Résultats de l'analyse de sensibilité (extrait de De Ridder, 2011).....	23
Illustration 16 – Bilan hydraulique des entrées / sorties, modèle de l'Université de Rennes.....	23
Illustration 17 – Bilan hydraulique des flux échangés (extrait de De Ridder, 2011).....	24
Illustration 18 – Principales caractéristiques des deux modèles (en italique, caractéristiques issues du rapport SOGREAH de 2001 et non renseignées par Terre et Habitat (2014)) .....	25

# 1. Introduction

Le bassin aquifère de Sainteny-Marchésieux constitue une ressource en eau d'intérêt majeur pour le département de la Manche. Plusieurs forages exploitent ce bassin afin d'alimenter en eau des collectivités importantes du centre Manche (SYMPEC, SYMPIC, SIAEP de Sainteny). Par ailleurs, des prélèvements substantiels sont effectués au NO de ce bassin (tourbière de Baupte).

Dans le but d'aider à la gestion de cette ressource en eau, deux modèles hydrodynamiques ont été élaborés : un premier, développé par le bureau d'étude SOGREAH en 2000 et actualisé par Terre et Habitat en 2014 pour le compte du Syndicat Mixte de Production d'Eau du Centre-Manche « SYMPEC » et un second, conçu par l'Université de Rennes en partenariat avec le Parc naturel régional du Bessin et du Cotentin (2011-2014).

Dans le cadre de sa mission d'appui à la Police de l'Eau, le BRGM a été sollicité par la DDTM de la Manche pour caractériser sommairement les deux modèles afin de mettre en évidence leurs principales différences ainsi que les points forts et les points faibles de chacun.

Il est demandé au BRGM de rendre un avis préliminaire sur les domaines d'utilisation souhaités des modèles, mais en aucun cas de faire une expertise approfondie des deux outils. En termes d'utilisation, les attentes de la DDTM50 et des Syndicats AEP sont les suivantes :

- mesurer l'impact des prélèvements en nappe sur les zones humides et tourbières ;
- estimer les échanges entre le sous bassin de Marchésieux et celui de Sainteny en fonction de la localisation des captages et des volumes prélevés ;
- estimer la zone d'influence des forages ;
- identifier et quantifier les zones d'alimentation par les précipitations mais également par les terrains jouxtant le bassin (Trias et Diorite de Coutances) ;
- tester différents scénarios d'exploitation (nouveaux forages, débits de production, etc.) visant à déterminer les volumes prélevables par sous-bassin (sous différentes contraintes environnementales).

Enfin, à la lumière des nouvelles connaissances acquises par le BRGM entre 2012 et 2015 sur le fonctionnement hydrogéologique du bassin de Sainteny-Marchésieux, des recommandations seront faites par le BRGM dans l'objectif de disposer d'un outil capable de répondre aux attentes des gestionnaires.

## 2. Contexte général

Les éléments rapportés dans le présent chapitre sont extraits des rapports d'études produits par le BRGM dans le cadre de l'étude générale du sous bassin de Marchésieux, menée en partenariat avec l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, le Conseil Général de la Manche et la DDTM entre 2012 et 2016 (Laurent et al., 2014a ; Laurent et al., 2014b, Vittecoq et al., 2015 ;Vittecoq et al., 2016a ; Vittecoq et al., 2016b). Celle-ci visait à améliorer les connaissances géologiques et hydrogéologiques du sous bassin de Marchésieux (investigations géophysiques, caractérisation hydro-géochimique, forages de reconnaissance et pompages d'essai, instrumentation des zones humides, suivis hydrologique et piézométriques, etc.).

L'objet du présent chapitre est d'introduire les contextes géologique et hydrogéologique dans le but de faciliter la lecture de la suite du rapport. Il n'est donc pas ici question de présenter de façon détaillée l'hydro-système de Marchésieux.

### 2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE

Le bassin de Sainteny-Marchésieux, situé au centre du département de la Manche, est divisé en deux sous bassins : le sous bassin de Sainteny (environ 35 km<sup>2</sup>), d'âge Miocène et le sous bassin de Marchésieux (environ 100 km<sup>2</sup>), d'âge Plio-pléistocène.

Le bassin présente un relief peu marqué et est caractérisé par la présence de nombreux marais. Les faciès lithologiques présents s'étendent du Paléozoïque (Ordovicien) au Quaternaire avec un remplissage maximum d'environ 160 m des séries néogènes et pléistocènes dans le bassin.

La zone est affectée par des failles d'orientations NE-SO et NNO-SSE (Illustration 1). La présence de la faille de Sainteny séparant les deux sous bassins faisait débat jusqu'alors (non reportée sur la carte de l'illustration 1). Les investigations géophysiques (sismique notamment) menées récemment par le BRGM montrent un contact en biseau écartant l'hypothèse tectonique et suggèrent donc une morphologie sédimentaire (érosion / dépôts).

L'encaissant est constitué au sud par les formations (1) de grès et d'arkoses paléozoïques et (2) de diorite et de volcanites cadomiennes, à l'ouest, par les formations du socle paléozoïques (schiste et grès), et à l'est et au nord, par les formations du Trias (sables, argiles, conglomérats) et du Permien (pélites rouges) (Illustration 1).

Les formations géologiques présentes au sein du bassin de Sainteny-Marchésieux sont, des plus récentes aux plus anciennes (Illustration 2) :

- les Blocailles de Saint-Sébastien-de-Raids (Pléistocène) ;
- les Sables de la Lande de Millière (Eburonien, Pléistocène inférieur) ;
- les Sables de Saint-Vigor (Tiglien, Pléistocène inférieur) ;
- les Marnes de Saint-Nicolas-de-Pierrepoint (Pléistocène inférieur) ;
- les Faluns de Bohon (Prétribglien, Pléistocène inférieur) ;
- les Marnes du Boscq d'Aubigny (Pléistocène inférieur et Pliocène supérieur) ;
- les Grès coquilliers de Marchésieux (Reurévien, Pliocène supérieur) ;
- les Faluns de Bléhou (Helvétien, Miocène moyen) ;
- les Pélites rouges de Saint-Jean-de-Daye (Autunien, Permien inférieur).

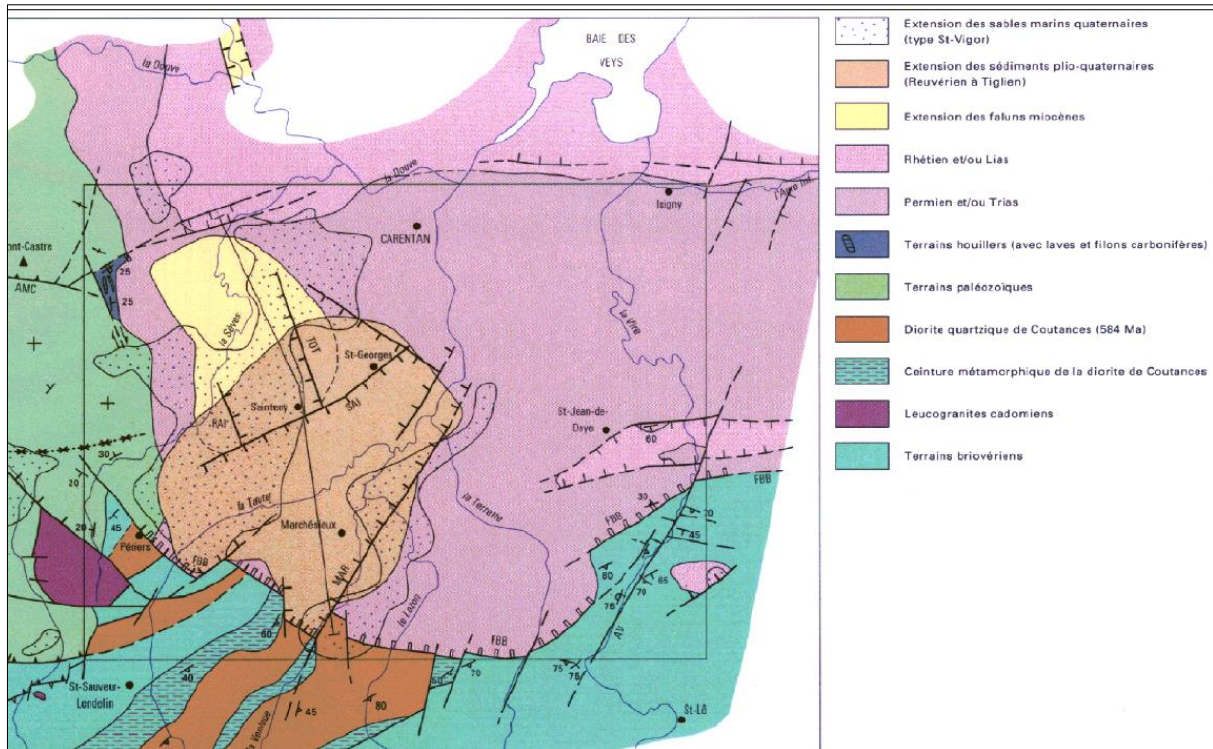


Illustration 1 – Schéma structural de la zone d'étude (feuille n° 117 – Carentan, BRGM©)

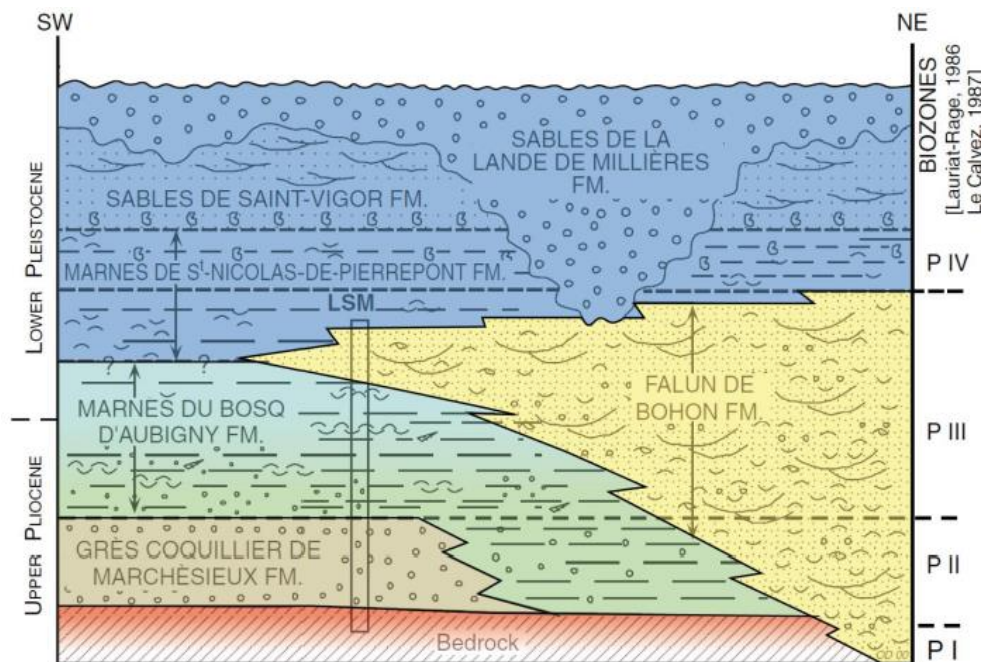


Illustration 2 – Coupe schématique figurant les variations latérales de faciès et l'empilement des formations plio-pléistocène du bassin de Sainteny-Marchésieux (modifié d'après Dugué, 2003)

## 2.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

Les deux sous bassins sont drainés par les principaux cours d'eau les traversant. Le système hydrogéologique est composé d'un aquifère multi-couche. Les principales formations aquifères sont :

- les sables de Saint-Vigor, d'une épaisseur maximale de 30 m. Ils sont captés aux Douceries pour l'AEP avec un débit d'environ 400 m<sup>3</sup>/jour. Ils sont présents au sud-ouest du bassin de Marchésieux et à l'ouest du bassin de Sainteny et sont principalement sous couverture argileuse et parfois tourbeuse holocène. Ils surmontent le complexe du Bosq d'Aubigny ;
- les sables de la Lande de Millières, d'une épaisseur maximale de 30 m ;
- les Faluns de Bohon, calcaires gréseux grossiers, d'une épaisseur maximale de 70 m. Ils s'étendent sur le sous bassin de Sainteny et les parties nord-est et sud-est du sous bassin de Marchésieux. Ils sont adjacents au complexe Bosq d'Aubigny ou sus-jacents aux pélites du Permien (substratum) ;
- le complexe Marnes du Bosq d'Aubigny – Grès de Marchésieux : les marnes, aux faciès hétérogènes, auraient une fonction conductrice et les Grès une fonction capacitive ;
- les faluns de Bléhou.

Le bassin de Sainteny-Marchésieux représente ainsi une réserve aquifère particulièrement intéressante à l'échelle du département de la Manche puisqu'il alimente en eau potable un quart de la population du département. Le sous-bassin de Sainteny est exploité à raison de 5 Mm<sup>3</sup>/an tandis que celui de Marchésieux reste pour le moment peu exploité.

Il faut par ailleurs noter la présence d'horizons tourbeux (épaisseurs comprises entre 2 et 12 m) constituant une partie de la couverture holocène. Des flux verticaux ont été mis en évidence entre la nappe de la tourbe et la nappe sous-jacente ; ils sont majoritairement ascendants, mais peuvent également être descendants en période d'étiage.

La tourbière de Baupte au Nord du bassin fait l'objet d'un pompage : 17.5 Mm<sup>3</sup>/an en moyenne avec une forte variation d'une année à l'autre (8.7 Mm<sup>3</sup>/an en 2006 et 34.8 Mm<sup>3</sup>/an en 2001). Cette estimation a été réalisée par l'exploitant de la tourbière à partir des heures de fonctionnement de la station de pompage (absence de compteur) (Lucassou, 2011).

### 3. Caractérisation sommaire des deux modèles hydrogéologiques

La caractérisation des modèles est réalisée sur la base des critères suivants : modèle conceptuel hydrogéologique, géométrie et maillage, conditions hydrauliques aux limites, recharge, prélèvements, relations nappe-rivière, démarche de calage et résultats, paramètres hydrodynamiques, bilan des flux et analyse de sensibilité.

#### 3.1. MODELE TERRE ET HABITAT

Un premier modèle a été conçu en 2001 par SOGREAH. Une actualisation de ce dernier a été commandée par le SYMPEC et réalisée en 2014 par Terre et Habitat. La caractérisation du modèle s'est appuyée sur la consultation des documents suivants :

- ✓ SOGREAH (2001) – Fourniture d'un outil d'aide à la décision avec calage du modèle hydrodynamique en régime permanent et en régime transitoire ;
- ✓ SYMPEC (2012) – Réactualisation du modèle hydrodynamique du bassin de Sainteny-Marchésieux. Dossier de Consultation des Entreprises. Cahier des Clauses Techniques Particulières ;
- ✓ SYMPEC (2014) – Comité Syndical du 4 décembre 2014. Diaporama ;
- ✓ Terre et Habitat (2012) – Bassin de Sainteny-Marchésieux (50). Réactualisation du modèle mathématique. Proposition technique et financière ;
- ✓ Terre et Habitat (2014) – Bassin de Sainteny-Marchésieux (50). Réactualisation du modèle mathématique. Rapport R-1295.

Les objectifs assignés au nouveau modèle étaient (extraits de Terre et Habitat, 2014) :

- « de quantifier les apports à la nappe par les précipitations mais également par les terrains jouxtant le bassin de Sainteny-Marchésieux ;
- de mesurer l'impact des prélèvements sur la zone humide et la tourbe ;
- d'estimer les échanges entre le bassin de Marchésieux et celui de Sainteny ;
- d'estimer la zone d'influence des forages ;
- de tester différents scénarios d'exploitation ».

En 2001, le modèle avait été conçu avec le logiciel DEDALE-3D (méthode des différences finies) développé par SOGREAH. En 2014, le modèle a été repris par Terre et Habitat à l'aide du logiciel Feflow (méthode des éléments finis).

La consultation des documents mis à disposition n'a pas pu être complétée par un entretien avec Terre et Habitat faute de disponibilité commune.

##### 3.1.1 Modèle conceptuel

Le modèle conceptuel de l'hydrosystème Sainteny-Marchésieux décrit par SOGREAH (2001) repose sur les fondements suivants :

- le remplissage tertiaire et quaternaire du bassin d'effondrement est très hétérogène avec de fortes variations de faciès (ex. : sables et argiles au sein de la formation des marnes du Bosq d'Aubigny). Du point de vue de la modélisation, SOGREAH a fait le choix de regrouper les formations et/ou faciès lithologiques aux caractéristiques hydrodynamiques proches (Cf. § 3.1.2) ;
- les pélites permienes de Saint-Jean-de-Daye sont considérées comme l'encaissant géologique imperméable du bassin de Sainteny-Marchésieux ;

- deux failles d'importance affectent le bassin : la faille de Raids – St-Georges-de-Bohon (orientée NE-SO), séparant physiquement les bassins de Sainteny et de Marchésieux (= limite sud des faluns du Bléhou) et la faille de Sainteny – Le Bas Bosq (orientée N-S) séparant le sous bassin de Sainteny en deux. SOGREAH n'a pas considéré les structures secondaires supposées par manque d'information, en particulier dans le sous bassin de Marchésieux ;
- à partir d'une analyse croisée des données géologiques, des paramètres hydrodynamiques, des chroniques piézométriques et des épaisseurs d'argile ou d'argile sableuse de recouvrement, SOGREAH a proposé une synthèse de l'état des différentes nappes étudiées : nappes captives au centre des sous bassins, nappe libre en périphérie et nappe semi-captive en zone intermédiaire. Au Sud-Ouest, une nappe dite supérieure est mise en évidence (au sein d'argile sableuse) séparée hydrauliquement de la nappe inférieure (Grès de Marchésieux) par les argiles du Bosq d'Aubigny ;
- la majorité des cours d'eau draine les eaux souterraines : Sèves, Holerotte, Taute, Lozon et plus secondairement le Douit Jean, la Bucaille aval et le Raffoville. « Pour ces trois derniers cours d'eau, la déconnexion rivière / nappe peut être effective durant les périodes estivales ». SOGREAH considère cependant que les rivières n'alimentent *a priori* pas la nappe ;
- identification de 4 bassins versants hydrogéologiques : Sèves – Holerotte, Taute aval, Taute amont et tourbières de Baupte
- les principales zones de recharge « sont localisées sur les bordures occidentales, orientales et probablement sud ». Ces secteurs correspondent à une plus faible épaisseur voire à l'absence du recouvrement argileux. La recharge se fait principalement par les apports météoriques : « les apports par les coteaux sont quasiment nuls compte tenu de l'imperméabilité des formations encaissantes » ;

Les principales inconnues mises en avant par SOGREAH concernent la géologie du sous bassin de Marchésieux : épaisseur du remplissage, failles supposées, etc.

Préalablement à la construction du modèle, un bilan hydrologique a été calculé par SOGREAH sur la période 1994-1999 (Cf. Illustration 3).

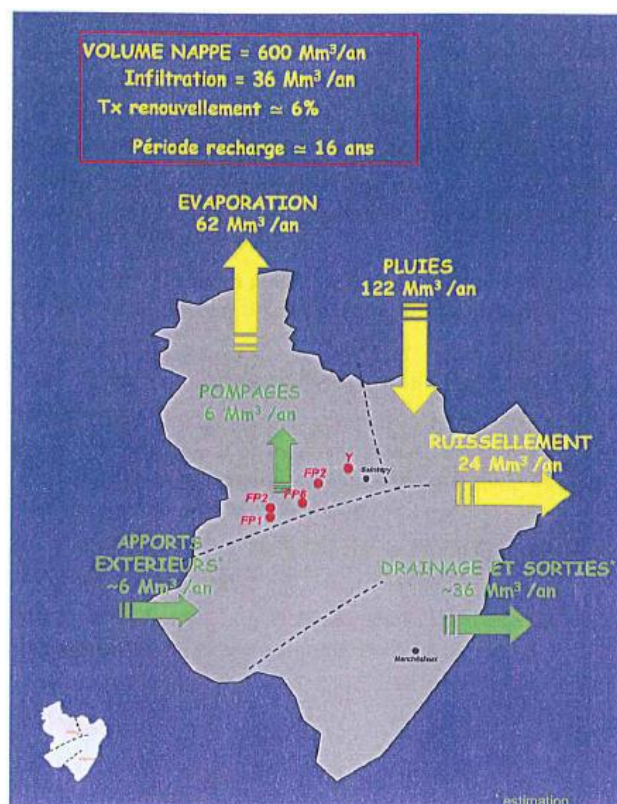


Illustration 3 – Bilan hydrologique du bassin de Sainteny-Marchésieux calculé par SOGREAH sur la période 1994-1999

L'actualisation du modèle en 2014 a notamment été justifiée par les nouveaux forages de l'Isthme du Cotentin (en dehors de l'emprise du modèle initial) et par les nouvelles connaissances acquises. Ces

dernières viennent notamment modifier le modèle conceptuel initial : apports possibles par les failles, au Sud et Sud-Ouest, qui mettent en contact les formations de socle productives et les sables du sous bassin de Marchésieux.

### 3.1.2 Géométrie et maillage

En 2001, l'extension du domaine modélisé était de 132 km<sup>2</sup> et n'englobait pas la totalité du bassin de Sainteny-Marchésieux. Le cahier des charges établi par le SYMPEC dans le cadre de l'actualisation du modèle faisait état d'une extension à l'ensemble du bassin. La nouvelle extension du modèle n'est cependant pas discutée dans le rapport d'étude de 2014. On peut uniquement se baser sur les cartes d'épaisseur mais dont le fond IGN est peu lisible (Cf. Illustration 5).

Le CCTP préconisait de repousser la limite ouest du modèle jusqu'à la ligne de partage des eaux séparant le bassin de l'Ay du bassin de la Sèves. Or, au regard des cartes fournies dans le rapport de Terre et Habitat (2014), cette extension ne semble pas avoir été considérée.

Six couches géologiques sont modélisées : 1) les formations tourbeuses, 2) les argiles sableuses de recouvrement (marnes de Saint-Nicolas), 3) les sables des landes de Millières et de Saint-Vigor, 4) les faluns de Bohon, 5) les marnes et grès de Marchésieux et 6) les faluns de Bléhou.

Il est précisé que les marnes de Bosq d'Aubigny et les grès de Marchésieux ont été regroupés car difficilement distinguables.

Il faut noter qu'initialement le modèle était constitué de 9 couches. La simplification opérée en 2014 n'est pas discutée dans le rapport d'étude.

Les cotes topographiques sont extraites des données renseignées sur les cartes IGN au 1/25 000. Un Modèle Numérique de Terrain ne semble donc pas avoir été utilisé, comme par exemple le MNT au pas de 25 m utilisé par l'Université de Rennes.

L'épaisseur de la tourbe (couche 1) a été interpolée à partir des quelques points connus (tourbière de Baupte, et en aval de la Taute pour l'essentiel). Une épaisseur fictive de 10 cm a été affectée partout où la tourbe n'existe pas. Ce procédé a été utilisé pour les différentes couches du modèle. Cette méthode simplificatrice est le plus souvent utilisée lorsque le simulateur ne peut pas prendre en compte le biseautage des couches (ce qui est souvent le cas, mais peut aussi introduire des biais significatifs et des erreurs dans le calcul des flux, des bilans voire des écoulements) ; au regard des éléments mis à disposition et du temps imparti pour cette expertise, il n'est pas possible dans le cas présent d'évaluer le biais qui a été introduit par cette hypothèse de simplification retenue pour le modèle.

Les épaisseurs des 5 couches sous-jacentes sont issues des travaux de Thèse de S. Baize (1998) ainsi que de données de forages complémentaires, collectées par SOGREAH et Terre et Habitat. D'après les cartes d'isopaques consignées dans le rapport d'étude, le tableau suivant récapitule les gammes d'épaisseurs utilisées pour chacune des couches du modèle.

Couche	Epaisseurs (m)
1	1 à 12
2	1 à 27
3	1 à 31
4	3 à 33
5	10 à 150
6	10 à 110

Illustration 4 – Gammes d'épaisseur des 6 couches du modèle Terre et Habitat.

Pour chacune des couches, il aurait été intéressant de superposer aux cartes d'isopaques, les logs géologiques utilisés. L'élaboration du modèle géologique n'est pas documentée : logiciel, méthode d'interpolation, etc.

La question du maillage du modèle n'est pas traitée dans le rapport d'étude de Terre et Habitat (2014). Dans le CCTP, il était demandé de prendre en compte un maillage irrégulier resserré dans les zones d'intérêt

et/ou bien connues. Même si le choix d'un modèle aux éléments finis avait été justifié par Terre et Habitat pour notamment représenter plus précisément les cours d'eau et le drainage de la nappe, aucune information n'a été trouvée dans les documents consultés.

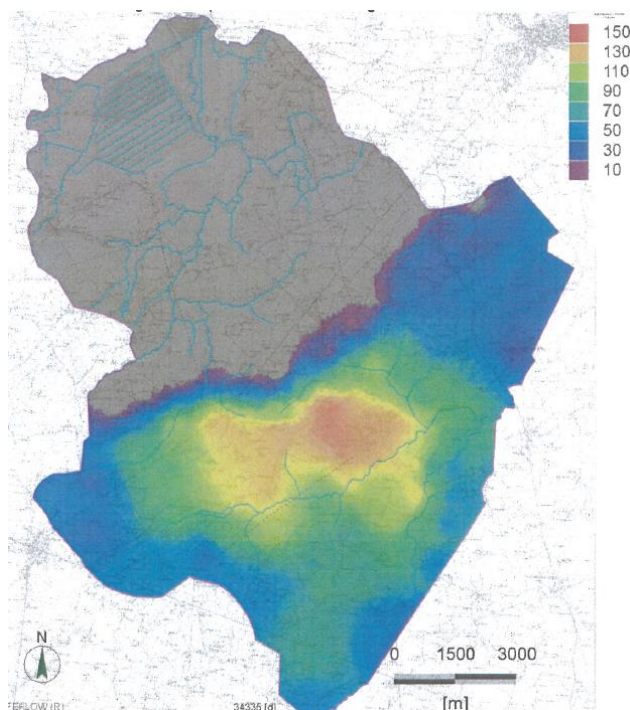


Illustration 5 – Epaisseur des marnes et grès de Marchésieux (couche 5) (extrait de Terre et Habitat, 2014)

### 3.1.3 Conditions hydrauliques aux limites du modèle

Les conditions aux limites ne sont décrites que pour deux tronçons où une condition de type charge imposée est retenue (sud-ouest du modèle). Les valeurs fixées sont de +10,5 m NGF sur un tronçon Nord et de + 15 m NGF sur un tronçon Sud (Cf. Illustration 6). SOGREAH justifie des apports d'eau depuis l'amont sur la base des cartes piézométriques réalisées par SOGREAH en 1999. Ce point est confirmé par l'étude du BRGM sur le sous-bassin de Marchésieux (Vittecoq et al, 2016b) ; de plus, d'autres apports par les aquifères de socle ont également été identifiés (limites Est et Sud-Est).

Ces apports sont dépendants de la recharge sur les bassins versants de socle concernés, il est par conséquent difficile de ne pas considérer de variations saisonnières et interannuelles. Par ailleurs, en régime transitoire, le recours à une condition de type flux imposé est préférable et préconisé au § 4.2. De plus, d'une manière générale, l'utilisation des charges imposées tend à rigidifier un modèle, il faut veiller à ce qu'elle soit déployée loin des secteurs à enjeux de manière à éviter les éventuels effets de bord lors de son exploitation (réalisation de simulations). Rien ne permet ici d'évaluer le biais éventuel.

Pour le reste, les conditions aux limites ne sont pas explicitées dans le rapport de Terre et Habitat (2014). Si on se réfère au rapport de SOGREAH (2001), deux autres types de limite sont considérés : limites naturelles de drainage de la nappe pour les limites correspondant à des cours d'eau (Sèves, marais, Taute, Holerotte) et limites à flux nul en bordure du bassin plio-quadernaire. Comme vu précédemment, des échanges de flux entre l'encaissant et l'aquifère sédimentaire sont également suspectés au nord, au sud et à l'est.

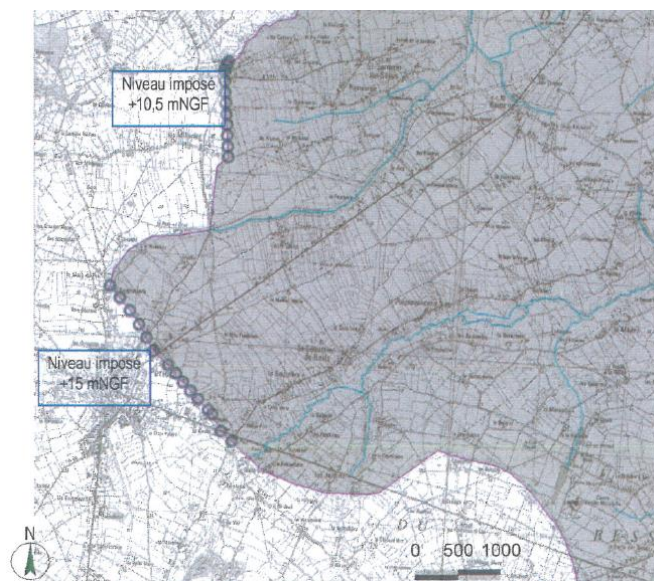


Illustration 6 – Limites à charges imposées en bordure sud-ouest du modèle (extrait de Terre et Habitat, 2014).

### 3.1.4 Recharge

Le calcul de la recharge n'est pas précisément décrit dans le rapport de 2014 : « Les apports pluviométriques ont été calculés sur l'ensemble du bassin en tenant compte des phénomènes évaporatifs, du coefficient moyen de ruissellement et du stockage temporaire d'eau dans la zone non saturée ».

Le calcul a été fait au pas de temps mensuel. La recharge moyenne calculée par Terre et Habitat est de 249 mm/an sur la période 1994-2012, soit 26.6 % de la pluie totale (Illustration 7).

Une recharge uniforme est appliquée sur l'ensemble du domaine.

Dans le rapport de SOGREAH (2001), la méthode de calcul de la recharge repose sur le calcul d'un bilan hydrologique au pas de temps mensuel, avec les hypothèses suivantes : RFU<sub>max</sub> = 100 mm (RFU : Réserve facilement utilisable), coefficient cultural moyen K<sub>c</sub> de 0.8 (correspondant à une occupation des sols par des prairies), taux de ruissellement mensuel correspondant au rapport entre le débit mensuel moyen et la pluie moyenne mensuelle (constant sur les 6 années de calcul) et temps de percolation déconvolué : 70% atteignent la nappe en moins d'un mois et 30% au bout de deux mois.

La recharge annuelle moyenne ainsi calculée est de 263 mm/an sur la période 1994-1999. Sur la même période, la recharge annuelle moyenne calculée par Terre et Habitat en 2014 est de 255 mm/an. Cette différence ne peut s'expliquer à partir des documents mis à disposition.

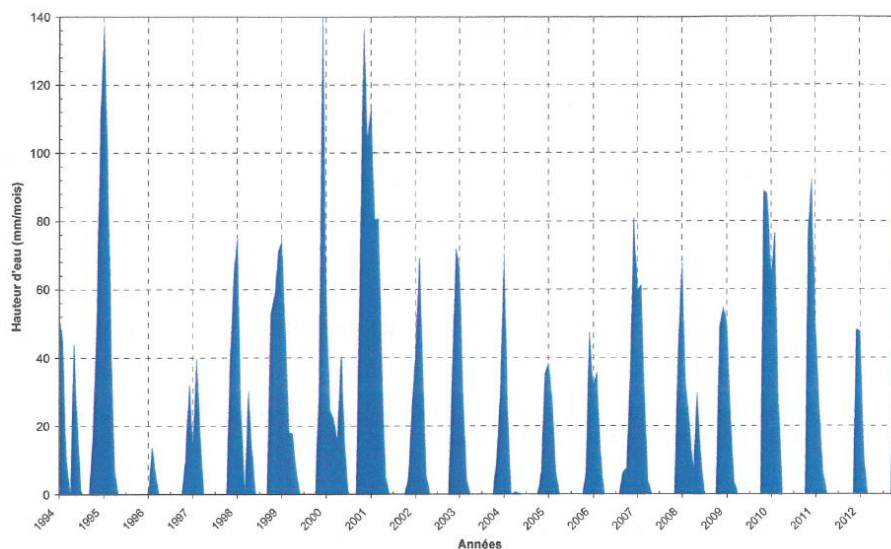


Illustration 7 – Evolution de l'infiltration mensuelle (extrait de Terre et Habitat, 2014).

### 3.1.5 Relations nappe-rivière

Dans l'offre technique de Terre et Habitat, plusieurs options sont proposées pour modéliser les relations nappe-rivière, mais elles ne sont pas discutées dans le rapport d'étude de 2014.

Le choix de mailles de drainage sur l'ensemble du domaine modélisé semble avoir été fait : « (...) les cotes du sol correspondent aux cotes de drainage de la nappe. Aussi dès que la nappe atteint le sol, elle est automatiquement drainée par le modèle ». À partir de ces seuls éléments, il n'est pas possible de savoir si l'eau drainée quitte le système modélisé ou pas, ou encore si des infiltrations des cours d'eau vers la nappe sont possibles.

Le modèle SOGREAH (2001) considérait localement des « conditions de suintement » (eau évacuée du modèle) et majoritairement des « conditions de drainage ».

### 3.1.6 Débits prélevés

Neuf forages AEP sont considérés dans le modèle : six pour le SYMPEC et trois pour le SYMPIC, ces derniers ont été mis en service en 2006.

Concernant les pompages pratiqués dans la tourbière de Baupte, leur intégration dans le modèle n'est pas claire : « Les conditions de pompage sont mal connues, ce qui rend difficile leur représentation dans le modèle ». Par conséquent, la question de leur prise en compte (de façon directe ou indirecte) se pose.

Les ouvrages de prélèvements à usages agricole et domestique ne semblent pas être pris en compte (au moins 5 forages agricoles et 5 domestiques sont inventoriés par Laurent et al., 2014a). Ces prélèvements étant marginaux par rapport à l'AEP, le biais ici introduit reste faible à l'échelle du modèle.

### 3.1.7 Calage du modèle et résultats

Le calage a été réalisé en régime permanent puis en régime transitoire sur la période 1995-2012.

Le pas de temps de calcul n'est pas précisé par Terre et Habitat (2014), on peut imaginer qu'il est identique à celui retenu par SOGREAH (2001), à savoir un pas de temps mensuel. Si c'est le cas et compte tenu des caractéristiques de l'hydrosystème de Sainteny-Marchésieux, un pas de temps mensuel semble être le maximum acceptable pour un modèle de gestion.

L'objectif du calage en régime transitoire semble s'être limité à la retranscription de l'évolution des niveaux piézométriques sur les différents points d'observation disponibles. Douze chroniques comparant niveaux simulés et niveaux observés sont présentées.

Les conditions initiales des simulations en régime transitoire posent question au regard des chroniques piézométriques simulées (état piézométrique initial très largement inférieur aux niveaux moyens de l'aquifère ?). L'état initial n'est pas discuté (résultat de simulations préalables en régime permanent ?).

Il n'est fait aucune mention du calage en régime permanent.

### 3.1.8 Paramètres hydrodynamiques issus du calage

Ils sont présentés dans le tableau récapitulatif suivant :

Formations	Perméabilité horizontale	Perméabilité verticale	Porosité cinématique	Emmagasinement captif
Tourbe	$7,3.10^{-6}$ m/s	$7,3.10^{-6}$ m/s	23 %	$10^{-4}$
Argile sableuse	$2,2.10^{-7}$ m/s	$2,2.10^{-7}$ m/s	18-21%	$10^{-4}$
Sables milliére + Vigor	$1,4.10^{-4}$ m/s	$1,4.10^{-4}$ m/s	8-15%	$10^{-4}$
Faluns bohon	$7,3.10^{-4}$ m/s	$7,3.10^{-4}$ m/s	5-7%	$10^{-4}$
Marnes grès Marchésieux	$3,9.10^{-4}$ m/s	$3,9.10^{-4}$ m/s	3%	$10^{-4}$
Faluns Bléhou	$2,4.10^{-3}$ m/s	$2,4.10^{-3}$ m/s	5%	$10^{-4}$

Illustration 8 – Paramètres hydrodynamiques issus du calage du modèle de Terre et Habitat

L'hétérogénéité des perméabilités des différentes formations n'est pas ici considérée avec *a priori* une valeur unique par couche modélisée. À titre comparatif, les pompages d'essai récents conduits par le BRGM (Laurent et al., 2014b) aboutissent aux valeurs de perméabilité suivantes :

- Marnes du Bosq d'Aubigny à Auxais :  $9,5.10^{-4}$  m/s ;
- Marnes et grès de Marchésieux :  $7,7.10^{-4}$  m/s à Saint-André-de-Bohon et  $2,2.10^{-5}$  m/s à Orgueil ;
- Faluns de Bohon à Saint-Georges-de-Bohon :  $1,8.10^{-4}$  m/s.

Par ailleurs, le BRGM a estimé la perméabilité des tourbes par l'intermédiaire de slug tests sur le sous-bassin de Marchésieux. Les valeurs varient entre  $1.10^{-6}$  et  $3.10^{-7}$  m/s. Ces valeurs sont du même ordre, quoique moins dispersées, que les valeurs estimées par Auterives (2007) comprises entre  $10^{-9}$  et  $10^{-5}$  m/s.

Au regard de de ces données, il est clair qu'une valeur de perméabilité unique par formation géologique ne permet pas de refléter la complexité du remplissage sédimentaire (variations latérales de faciès, etc.). Aucune anisotropie verticale n'a été introduite.

Enfin, pour des aquifères captifs, contrairement à ce qui est proposé par Terre et Habitat, l'utilisation d'un coefficient captif spécifique, paramètre intrinsèque à la formation (noté  $S_s$ , dimension  $m^{-1}$ ), est fortement recommandée. L'emmagasinement est, en effet, dépendant de l'épaisseur de la couche aquifère.

### 3.1.9 Analyse de sensibilité

Aucune analyse de sensibilité ne semble avoir été mise en œuvre par Terre et Habitat (2014) ou SOGREAH (2001). Cette démarche est habituellement recommandée afin de pouvoir traiter les incertitudes sur les données et guider le processus de calage du modèle.

### 3.1.10 Bilan hydraulique des entrées / sorties

Aucune information n'est disponible à propos des flux modélisés dans les documents consultés.

Ceci est dommageable, car au-delà des informations apportées quant au fonctionnement hydrogéologique du système aquifère, le bilan hydraulique est un élément essentiel pour juger de la recevabilité du modèle.

### 3.2. MODELE DE L'UNIVERSITE DE RENNES

La caractérisation du modèle s'est appuyée sur la consultation des documents suivants :

- ✓ Armandine Les Landes A. (2011a) – Modélisation de l'impact de la pression anthropique et du climat sur les niveaux d'eau dans les marais du Cotentin. Caractérisation des interactions zone humide-aquifère. Mémoire de Master H3 2<sup>ème</sup> année (2010/2011) ;
- ✓ Armandine Les Landes A. (2011b) – Modélisation de l'impact de la pression anthropique et du climat sur les niveaux d'eau dans les marais du Cotentin. Caractérisation des interactions zone humide-aquifère. Diaporama, Comité de Pilotage du 21/06/2011 ;
- ✓ Armandine Les Landes A., Aquilina L., De Ridder J., Longuevergne L., Pagé C. et Goderniaux P. (2013) – Investigating the respective impacts of groundwater exploitation and climate change on wetland extension over 150 years. Journal of Hydrology 509 (2014) 367-378 ;
- ✓ De Ridder J. (2011) – Effet de la fluctuation des niveaux d'eau et de la qualité des eaux de recharge sur la biogéochimie des tourbières. Exemple des marais du Cotentin en Normandie. Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes ;
- ✓ Aquilina L., De Ridder J. et Armandines Les Landes A. (2012) – Etude de l'impact de l'anthropisation du marais : biogéochimie et hydrologie. Diaporama, Comité de Pilotage du 16/06/2012.

Le modèle a été développé en 2011 dans le cadre d'un stage du Master H3 2<sup>ème</sup> année de l'Université de Rennes. Ce travail s'inscrivait plus largement dans la Thèse de Doctorat de De Ridder J. (2011). Quelques évolutions ont ensuite été apportées jusqu'en 2013 (Armandine Les Landes, 2013).

Les objectifs assignés au modèle hydrodynamique étaient doubles (Armandine Les Landes, 2011a) :

- « caractériser les interactions entre zone humide et aquifère (en reproduisant les niveaux d'eau dans l'aquifère et les zones humides) ;
- évaluer l'impact de différents scénarios d'exploitation d'une part et du changement climatique d'autre part sur l'hydro-système zone humide-aquifère ».

Le modèle a été conçu à l'aide du logiciel Visual Modflow 3D (modèle aux différences finies).

En complément des documents consultés, un entretien avec Antoine Armandine Les Landes s'est tenu le 26 mai 2016.

#### 3.2.1 Modèle conceptuel

La description du fonctionnement hydrogéologique du bassin de Sainteny-Marchésieux s'appuie sur le modèle conceptuel proposé par SOGREAH (2001). En revanche, l'Université de Rennes a fait le choix d'une représentation simplifiée du système aquifère (Cf. § 3.2.2).

Les limites du domaine modélisé correspondent globalement à celles du graben (superficie du modèle = 135 km<sup>2</sup>), et donc à l'extension du modèle initial de SOGREAH.

La principale limite mise en avant par l'Université de Rennes concerne les connaissances géologique et hydrogéologique limitées du sous bassin de Marchésieux (Armandine Les Landes A., 2011b).

#### 3.2.2 Géométrie et maillage

Le modèle est constitué de 6 couches. La discrétisation verticale ne s'appuie pas sur des considérations litho-stratigraphiques.

La première couche, d'une épaisseur constante et égale à 10 m, est composée à la fois de tourbes et de sables (Illustration 9). Ce n'est pas précisé, mais on imagine que les sables correspondent aux formations

des sables de la Lande de Millières et des sables de Saint-Vigor. La distribution des perméabilités permet de distinguer tourbe et sable (Cf. Illustration 9).

Le toit de la première couche est issu du Modèle Numérique de Terrain au pas de 25 m.

Une épaisseur uniforme de 10 m pose question puisque des épaisseurs variant entre 1 et plus de 10 sont attribuées à l'horizon tourbeux (Armandine Les Landes, 2011a ; De Ridder, 2011). De même, l'épaisseur des formations sableuses peut atteindre jusqu'à 30 m d'épaisseur.

Plus en profondeur, le remplissage sédimentaire du bassin de Sainteny-Marchésieux a été discrétisé en 5 couches d'extension identique (soit le domaine modélisé) (couches 2 à 6). La discrétisation verticale en 5 couches n'est pas ici dictée par la succession des différentes formations géologiques (absence de modèle géologique).

Pour chacune des couches 2 à 6, quatre unités géologiques (faluns de Bohon et de Blehou, grès de Marchésieux, marnes d'Aubigny et marnes de Saint- Nicolas-de-Pierrepoint) sont considérées par l'intermédiaire de valeurs de perméabilité différentes mais constantes sur la verticale (Cf. Illustration 9 et § 3.2.8).

L'épaisseur des 5 couches n'est pas précisée. Une vue en coupe est cependant proposée par Armandine Les Landes (2014), chacune des couches possède une épaisseur uniforme, cette dernière étant croissante avec la profondeur (Illustration 9) pour visiblement répondre à des considérations numériques : « *L'aquifère est discrétisé en 5 couches du fait de la disproportion entre son épaisseur et celle de la première couche* ». La profondeur du substratum a été fixée à 150 m pour le sous bassin de Marchésieux et à 100 m pour le sous bassin de Sainteny.

La représentation géométrique choisie est très simplifiée et ne permet pas de reproduire la complexité du remplissage sédimentaire du bassin de Sainteny-Marchésieux (Cf. § 2).

Horizontalement, le modèle est discrétisé selon des mailles carrées de 90 m de côté. Chaque couche compte ainsi 16 670 mailles.

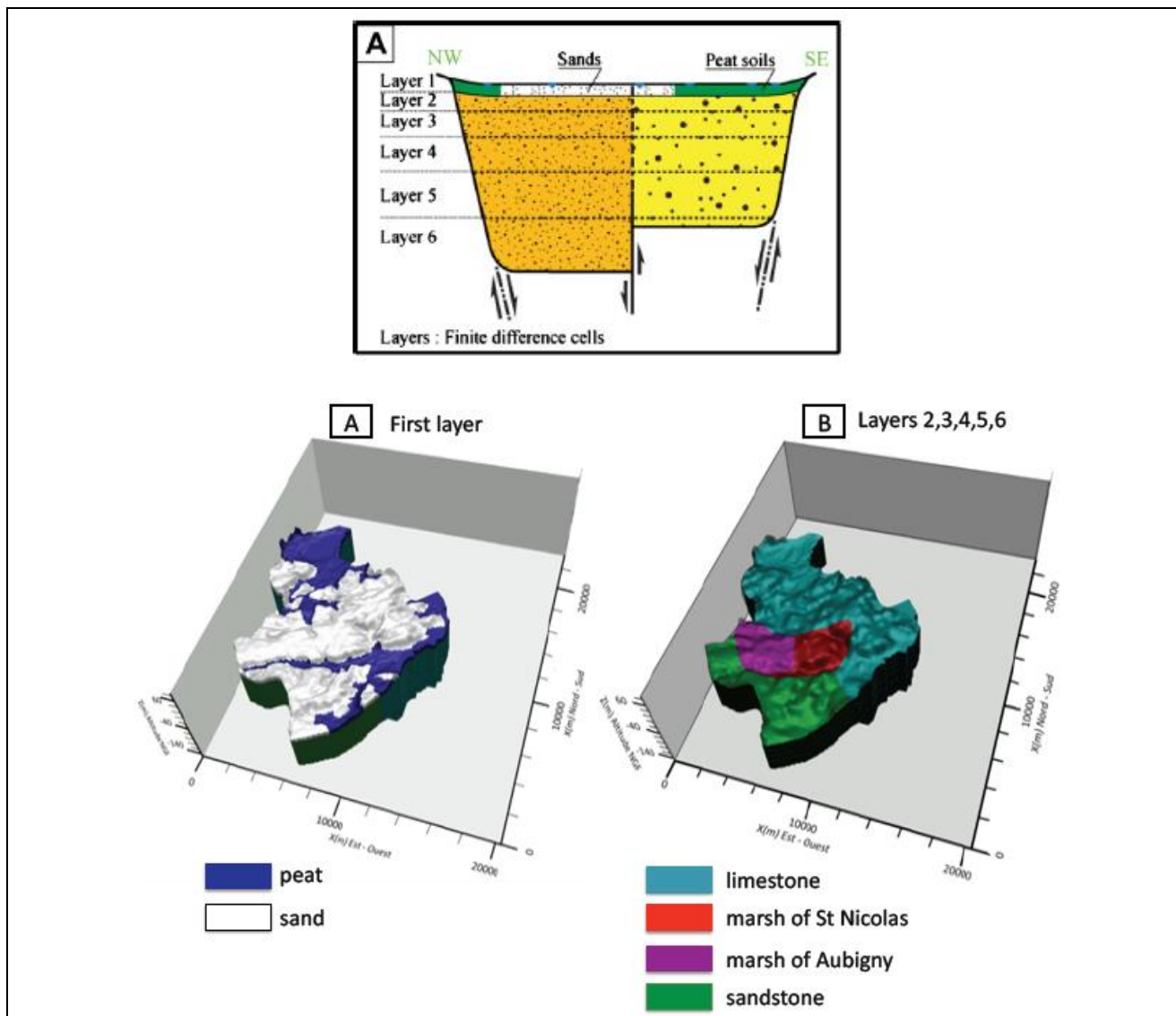


Illustration 9 – Géométrie du modèle de l'Université de Rennes (figure du haut extraite d'Armandine Les Landes, 2013 et figure du bas extraite de De Ridder, 2011)

### 3.2.3 Conditions hydrauliques aux limites du modèle

Trois types de limites ont été appliqués (Illustration 10) :

- **limites à flux nul** : limites d'affleurement des formations de socle encaissantes, limite étanche affectée à une faille en bordure sud-est, cours d'eau et marais au nord et à l'est ;
- **limites à charge imposée** : tourbière de Baupte (400 ha) où le niveau piézométrique est maintenu par pompage pour éviter l'inondation des parcelles agricoles environnantes. La charge imposée a été fixée à la valeur d'une côte piézométrique correspondant au niveau d'eau moyen dans la zone (4.9 m de profondeur). Il faut signaler que le choix d'une charge imposée a été lié à l'impossibilité de récupérer des informations sur les pompages exercés ;
- **limites à flux imposé** : flux d'eau souterraine entrant au sud-ouest depuis les aquifères de socle adjacents (Cf. limites C-D et E-F, Illustration 10). Les valeurs du flux imposé sont déterminées à partir d'un calcul de la recharge sur les bassins versants amont et ajustées lors du calage du modèle.

Il est précisé que le modèle conceptuel repose sur celui proposé par SOGREAH en 2001. Pourtant, une différence est constatée à l'Ouest entre la Sèves et Gorges où SOGREAH avait opté pour une limite d'alimentation (limite non naturelle) alors que l'Université de Rennes a fait le choix d'une limite de type flux nul (limite d'affleurement).

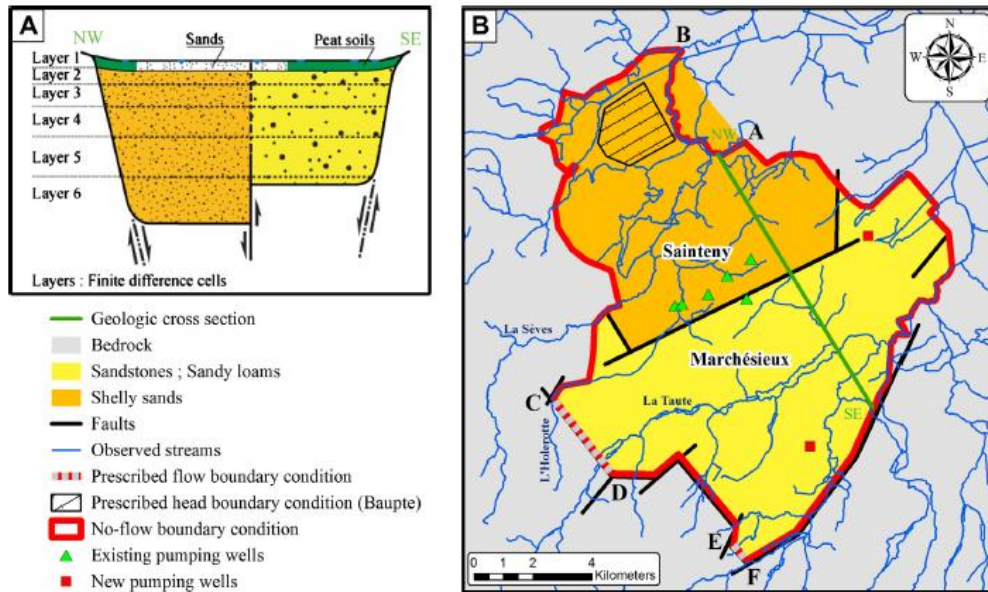


Illustration 10 – Conditions aux limites du modèle de l'Université de Rennes (extrait de Armandine Les Landes, 2013).

### 3.2.4 Recharge

Les valeurs de recharge sont calculées, de façon indépendante du modèle hydrodynamique, à partir d'une modélisation globale pluie-débit au pas de temps mensuel (version modifiée de GR2M, développé par l'IRSTEA). Les données de précipitation et d'ETP ont été fournies par Météo France. Les débits de la rivière utilisés n'étaient disponibles que sur les périodes janvier 1999 à décembre 2000 et janvier 2003 à décembre 2007. La durée de calage du modèle pluie-débit est courte mais présente l'avantage d'inclure une année sèche et une année humide.

Le calage du modèle global est limité à un paramètre : la capacité de rétention en eau du sol (valeur non fournie).

La recharge annuelle ainsi calculée est utilisée en entrée du modèle hydrodynamique, avec une répartition uniforme sur l'ensemble du domaine modélisé. La recharge annuelle calculée varie de 164 à 338 mm/an. La répartition mensuelle de la recharge n'est pas présentée. Sur ces mêmes années, les recharges annuelles calculées par Terre et Habitat varient entre 126 mm (2005) et 483 mm (2000). Une différence significative est ainsi constatée.

Un diagramme de dispersion entre ruissellement mensuel simulé et observé est présenté (Illustration 11). Les faibles valeurs de ruissellement (<10 mm/mois) apparaissent surestimées par le modèle global.

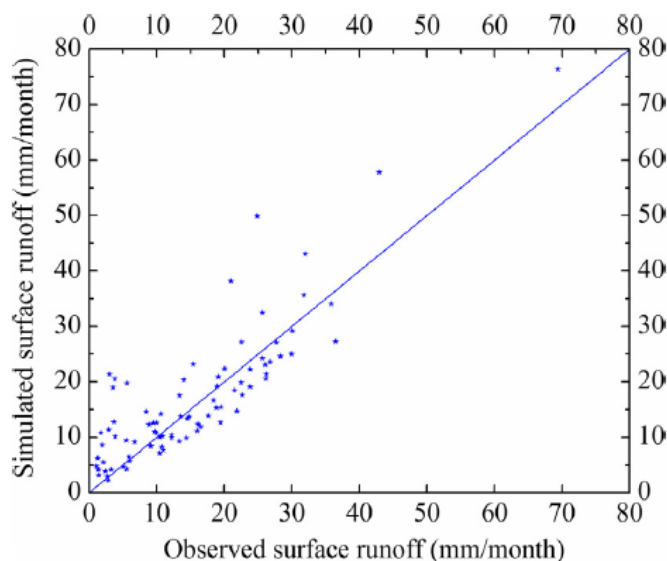


Illustration 11 – Ruissellement mensuel simulé par le modèle GR2M modifié et ruissellement observé (extrait de Armandine Les Landes et al., 2014)

### 3.2.5 Relations nappe-rivière

Au sein du modèle, toutes les mailles sont traitées comme des « mailles de drainage » (option Modflow) pour lesquelles sont renseignées la cote de la rivière (= cote topographique du MNT 25m) et la conductance par unité de surface ( $T^{-1}$ ).

Dès que le niveau piézométrique simulé atteint la cote du sol, l'eau souterraine quitte le système.

Les valeurs de conductance ne sont pas fournies, mais le choix d'une conductance largement supérieure aux perméabilités du terrain a été fait : « La conductance des drains ( $=DX*DY*SCOND$  avec  $DX$  et  $DY$  la longueur des cellules et  $SCOND$  la conductance par unité de surface) est fixée de façon à être largement supérieure aux perméabilités, afin de ne pas limiter le drainage. Cette conductance permet au modèle de déterminer librement les zones de drainage (zone humide et rivière) ».

L'impact des pompages sur les cours d'eau est évalué par différence entre les flux de débordement simulés.

L'auteur a précisé que les mailles de drainage permettaient de simuler des échanges nappe-rivière dans les deux sens. Une forte valeur de conductance a cependant été retenue afin de favoriser le drainage des eaux souterraines par le réseau hydrographique. L'infiltration possible des rivières vers la première couche du modèle n'est pas discutée ni abordée dans la présentation du bilan hydraulique des flux.

Par ailleurs, une forte conductance revient à ignorer le colmatage du lit des cours d'eau ou les plus faibles perméabilités des zones humides. Le cas échéant, le risque est donc ici de surestimer le débit de transfert de la rivière et/ou des zones humides vers la nappe en condition de pompage (approche optimiste).

Les volumes annuels pompés pour l'alimentation en eau potable ont été récupérés auprès des exploitants. Au total, 6 forages sont considérés : 5 dans le sous bassin de Sainteny (~ 5 Mm<sup>3</sup>/an) et 1 dans le sous bassin de Marchésieux (~ 0.14 Mm<sup>3</sup>/an) (Cf. localisation des forages, Illustration 10).

Comme évoqué précédemment, la tourbière de Baupte, située dans le nord du bassin, fait l'objet de pompages. Elle a été exploitée jusqu'en 2006, depuis pour éviter l'inondation de parcelles agricoles, un pompage est maintenu. Faute d'information sur les débits prélevés, l'Université de Rennes a appliqué une charge imposée sur l'ensemble de la tourbière (0.4 km<sup>2</sup>).

### 3.2.6 Calage du modèle et résultats

Le calage a été réalisé en régime permanent pour deux années aux conditions hydrologiques distinctes : 1999-2000 avec des conditions de hautes eaux et 2003-2004 avec des conditions de basses eaux. Le calage a été validé à partir de l'année hydrologique 2006-2007 (année climatique moyenne).

Le modèle n'a pas été calé en régime transitoire.

Les perméabilités ont été ajustés selon une procédure automatique (module PEST), en respectant les gammes de valeurs calculées lors des pompages d'essai par SOGREAH, 2001 et Auterives et al., 2011.

Le modèle a été calé sur les paramètres suivants : 1) les niveaux piézométriques observés, 2) la distribution spatiale des zones humides et 3) les volumes d'eau souterraine drainés.

Concernant les niveaux piézométriques, le calage a été jugé satisfaisant lorsque la différence entre niveau simulé et niveau observé était comprise entre +1 et -1 m. Les résultats sont présentés par le graphique suivant. Les points pour lesquels le calage apparaît moins satisfaisant ne sont pas discutés.

Armandine Les Landes et al., 2014 signalent que les niveaux piézométriques sont globalement surestimés en condition de hautes eaux et sous-estimés en basses eaux.

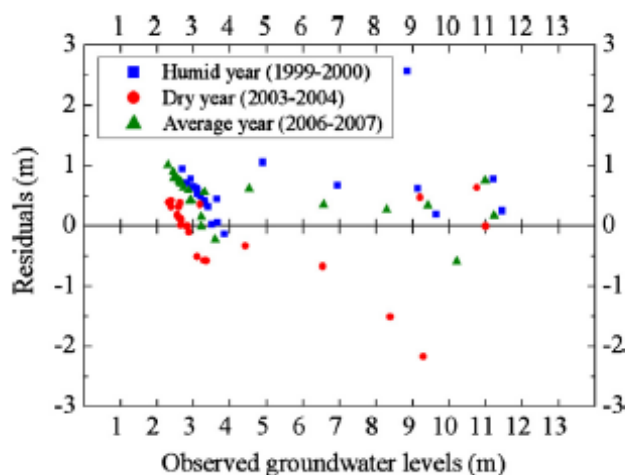


Illustration 12 – Niveaux piézométriques simulés vs niveaux observés (extrait de Armandine Les Landes et al., 2014)

Les zones humides simulées correspondent aux mailles pour lesquelles le niveau piézométrique simulé est proche de la surface (> 0.5 m de profondeur). La superficie des zones humides simulée représente 27 % du bassin de Sainteny-Marchésieux (Illustration 13).

Le volume d'eau drainé par les rivières, calculé par le modèle, correspond à la somme des flux de débordement par les mailles de drainage (30 Mm<sup>3</sup>/an pour l'année 2006/2007). Il est comparé à la différence entre les principales entrées par les cours d'eau (Sèves, Holerotte et Taute) et les principales sorties (Sèves et Taute). Ce bilan entrées/sorties est réalisé à partir des stations de jaugeage existantes. La différence entre volume drainé simulé et observé est inférieure à 5%.

L'absence de stations hydrologiques sur certains cours d'eau est mise en avant par les auteurs, en particulier aux exutoires du bassin. Il aurait été intéressant d'appréhender l'erreur associée par une campagne de jaugeages ponctuels.

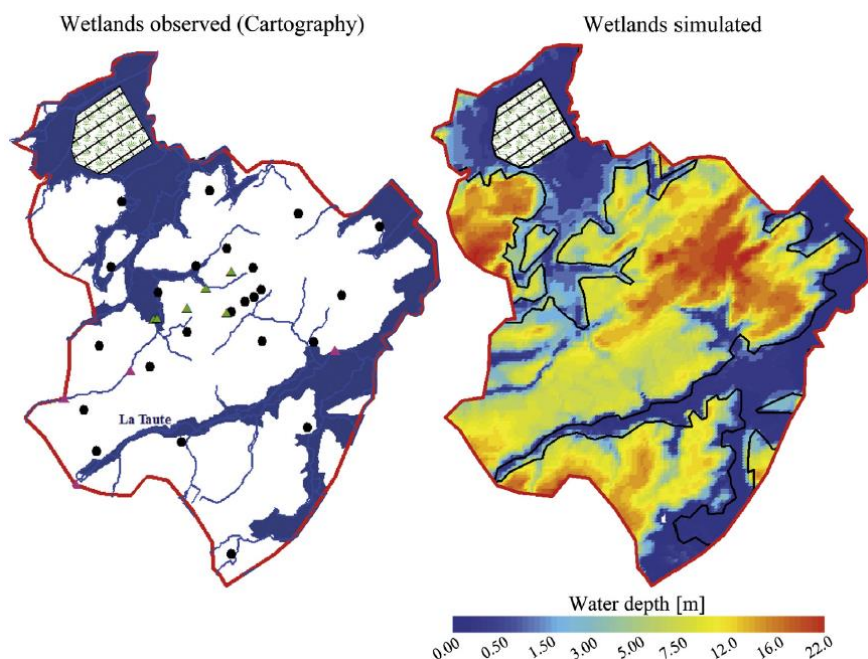


Illustration 13 – Comparaison entre la cartographie des zones humides observée (source : Parc naturel des marais du Cotentin et du Bessin) et celle simulée (niveaux simulés compris entre 0 et 0.5 m de profondeur) (extrait de Armandine Les Landes et al., 2014)

### 3.2.7 Paramètres hydrodynamiques issus du calage

Les valeurs de perméabilité issues du calage sont récapitulées dans le tableau suivant. Seules les tourbes (couche 1) sont concernées par une anisotropie verticale. Chaque unité géologique identifiée est caractérisée par une valeur de perméabilité unique.

		$K_{xy}$	$K_z$
Layer 1	Sands	$1.10^{-6}$	$1.10^{-6}$
	Peat	$8.10^{-7}$	$7.10^{-8}$
Layer 2, 3, 4, 5, 6	Limestone (Faluns)	$8.10^{-3}$	$8.10^{-3}$
	Sandstone	$8.10^{-4}$	$8.10^{-4}$
	Marshes of Saint Nicolas	$5.5 \cdot 10^{-6}$	$5.5 \cdot 10^{-6}$
	Marshes of Aubigny	$2.10^{-5}$	$2.10^{-5}$

Illustration 14 – Perméabilités issues du calage du modèle de l'Université de Rennes (extrait de De Ridder, 2011)

### 3.2.8 Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité a été menée pour de nombreux paramètres : recharge, perméabilité de la tourbe, épaisseur de la 1<sup>ère</sup> couche, charge imposée sur la limite SO, profondeur du substratum, pompages, charge hydraulique de la tourbière, perméabilité des argiles et sables (couche 1), perméabilité des marnes de Saint-Nicolas, perméabilité des marnes d'Aubigny et conductance des drains.

L'impact de ces paramètres a été étudié vis-à-vis de la sensibilité des variables de sorties suivantes : niveaux piézométriques, volume d'eau drainé, flux entre compartiments, extension des zones humides (Illustration 15).

Les variations affectées à chaque paramètre et l'unité de la sensibilité (ordonnée des graphes de l'illustration 15) ne sont pas précisées ; ce qui rend difficile l'analyse des résultats.

Globalement, les paramètres les plus influents seraient la recharge, la perméabilité et l'épaisseur de la tourbe ainsi que le flux imposé en limite SO dans une moindre mesure. Les paramètres les moins impactant seraient la perméabilité des marnes de Saint-Nicolas et d'Aubigny et la conductance des drains.

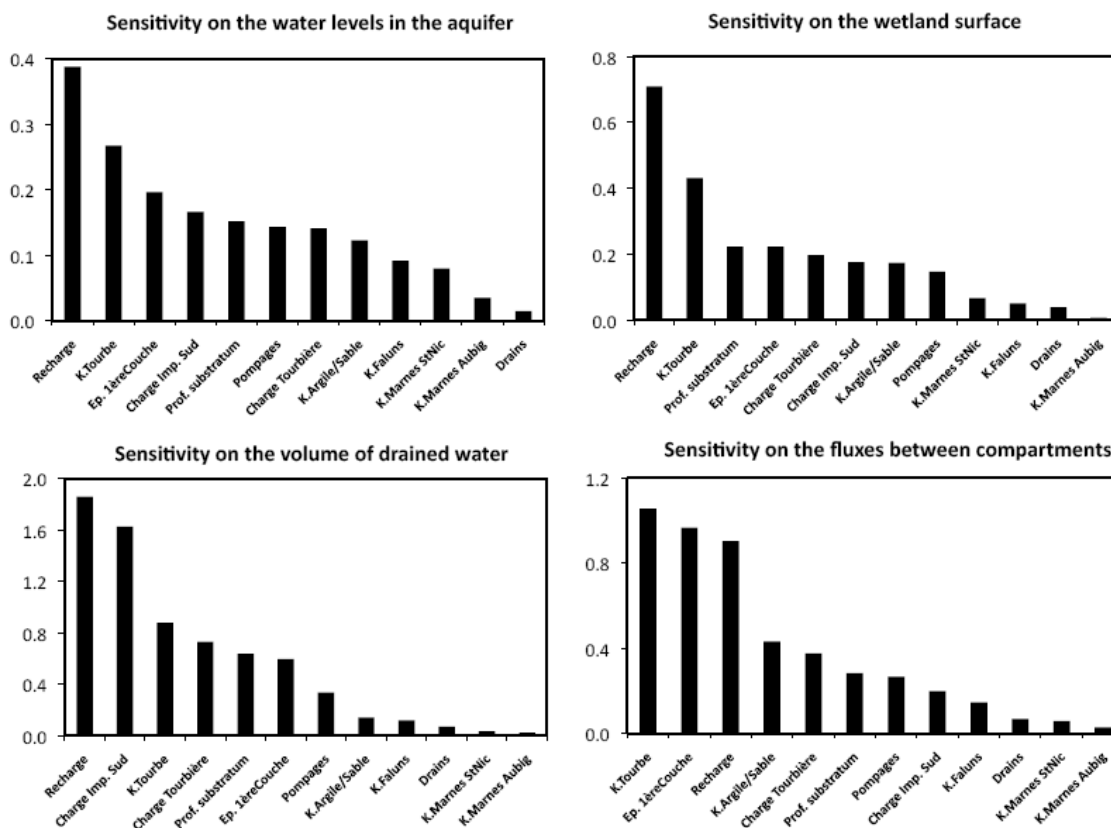


Illustration 15 – Résultats de l'analyse de sensibilité (extrait de De Ridder, 2011)

### 3.2.9 Bilan hydraulique des entrées / sorties

Un bilan des flux principaux est présenté par Armandine Les Landes, 2014 pour le scénario de référence (année 2006-2007) :

Flux	Entrées (Mm <sup>3</sup> /an)	Sorties (Mm <sup>3</sup> /an)
Recharge	33.7	
Apports par les limites SO	18.3	
Eau drainée par les rivières		- 37.0
Pompages AEP		- 4.9
Pompages Baupte (charges imposées)		- 10.0
<b>TOTAL</b>	<b>52.0</b>	<b>- 51.9</b>

Illustration 16 – Bilan hydraulique des entrées / sorties, modèle de l'Université de Rennes

A titre comparatif, il est rappelé que les volumes annuels pompés au droit de la tourbière de Baupte varient entre 8.7 Mm<sup>3</sup>/an (2006) et 34.8 Mm<sup>3</sup>/an (2001), pour un prélèvement moyen de 17.5 Mm<sup>3</sup>/an sur la période 2001-2010.

Dans la Thèse de De Ridder (2011), un schéma présente les flux entrants et sortants pour deux zones humides (Sèves et Taute, cf. Illustration 17). Les flux sont majoritairement ascendants avec alimentation des zones humides par les aquifères profonds. En revanche, aucune information n'est apportée concernant d'éventuelles infiltrations des rivières vers la nappe des tourbes.

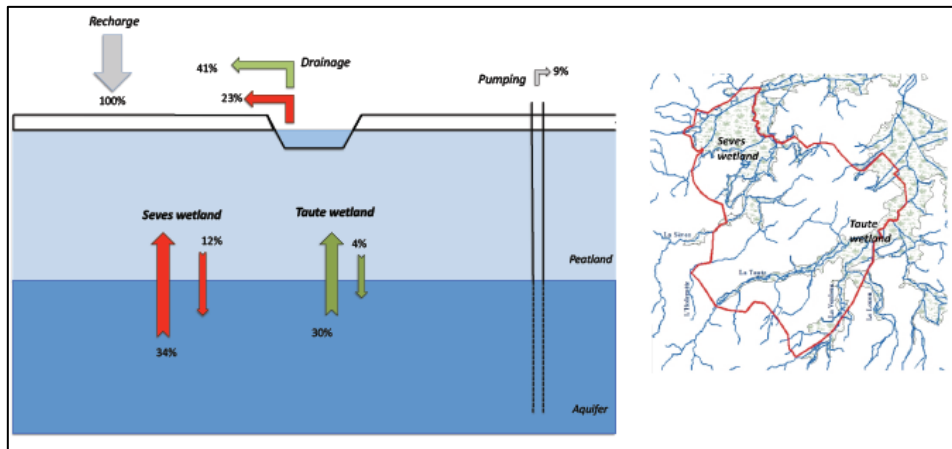


Illustration 17 – Bilan hydraulique des flux échangés (extrait de De Ridder, 2011)

Les échanges entre les différentes unités géologiques ne sont pas présentés.

## 4. Diagnostic

### 4.1. COMPARAISON DES DEUX MODELES

Les deux modèles présentent des différences notables, aussi bien du point de vue conceptuel que du point de vue de la démarche mise en œuvre pour le calage. À titre comparatif, le tableau suivant présente un récapitulatif des principales caractéristiques des deux modèles.

CARACTERISTIQUES	TERRE ET HABITAT	UNIVERSITE DE RENNES
<b>Finalité et principaux objectifs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- bilan hydrologique et recharge</li> <li>- scénarios d'exploitation et impact prélèvements sur zones humides</li> <li>- zones d'influence des forages</li> <li>- échanges entre sous-bassins</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- interactions zones humides / aquifères</li> <li>- impact scénarios d'exploitation</li> <li>- impact changement climatique</li> </ul>
<b>Méthode numérique</b>	- éléments finis	- différences finies
<b>Extension</b>	- bassin complet	- bassin amputée de l'extrémité SE
<b>Discrétisation verticale</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- modèle géologique</li> <li>- 6 couches</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- représentation simplifiée (pas de modèle géologique)</li> <li>- 6 couches (1 couche superficielle + l'aquifère discrétisé en 5 couches)</li> </ul>
<b>Conditions aux limites</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 tronçons à charge imposée au SO</li> <li>- <i>flux nul pour les limites du bassin</i></li> <li>- <i>conditions de drainage pour les limites correspondant à des cours d'eau</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- flux imposés sur 2 portions de la limite SO</li> <li>- flux nul pour le reste</li> </ul>
<b>Echanges nappe-rivière</b>	- <i>rivières principalement représentées par des mailles de drainage et localement par des conditions de type suintement</i>	- mailles de drainage sur l'ensemble du domaine (conductance élevée pour favoriser le drainage des eaux souterraines)
<b>Recharge</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- uniforme (recharge annuelle moyenne = 255 mm)</li> <li>- calculée à partir d'un bilan hydrologique (pas de temps mensuel)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- uniforme (recharge annuelle moyenne = 250 mm)</li> <li>- calculée à partir d'un modèle global pluie-débit (pas de temps mensuel)</li> </ul>
<b>Prélèvements</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 6 forages du SYMPEC et 3 du SYMPIC</li> <li>- pompages de la tourbière de Baupte non considérés ??</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 5 forages AEP</li> <li>- tourbière de Baupte en charge imposée (10 Mm<sup>3</sup>/an) pour considérer l'influence du pompage</li> </ul>
<b>Calage</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- régimes permanent et transitoire (1995-2012, <i>pas de temps mensuel</i>)</li> <li>- uniquement sur les niveaux piézométriques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- régime permanent</li> <li>- sur les niveaux piézométriques, l'extension des zones humides et le volume d'eau drainé par les rivières</li> </ul>
<b>Analyse de sensibilité</b>	- aucune	- plusieurs paramètres testés

Illustration 18 – Principales caractéristiques des deux modèles (en italique, caractéristiques issues du rapport SOGREAH de 2001 et non renseignées par Terre et Habitat (2014)).

## 4.2. AVIS PRELIMINAIRE

Comme évoqué en préambule, le présent avis ne consiste pas en une expertise approfondie des deux modèles. D'une part, le temps imparti à la présente analyse ne le permet pas, d'autre part, plusieurs éléments d'information manquent dans les documents consultés, en particulier pour le modèle de Terre et Habitat.

En tout état de cause, par rapport aux attentes de la DDTM50 et des Syndicats AEP vis-à-vis de la modélisation hydrodynamique du bassin de Sainteny-Marchésieux (§ 1), les deux modèles ne semblent pas en mesure de répondre à la plupart des objectifs de gestion et de connaissance exprimés. En particulier, on peut citer les points suivants : évaluation de l'impact des prélèvements sur les zones humides et tourbières, identification des zones d'alimentation par les précipitations (recharge uniforme pour les 2 modèles), estimation des apports par les aquifères de socle et triasiques en bordure ou encore quantification des flux échangés entre les deux sous-bassins.

Le BRGM est conscient qu'un déficit de connaissances à la date de réalisation des modèles, sur plusieurs points et contraint les auteurs à recourir à des hypothèses simplificatrices.

Le **modèle de l'Université de Rennes** ne peut être utilisé comme un outil de gestion opérationnelle de la ressource en eau du bassin de Sainteny, principalement en raison d'une géométrie trop schématisée et de l'absence d'un calage en régime transitoire. Plus précisément, et au regard des connaissances actuelles, les principales limites du modèle sont :

- une structure géologique trop simplifiée qui ne permet d'approcher, ni la complexité du remplissage du bassin de Sainteny-Marchésieux, ni les circulations d'eaux souterraines (plusieurs nappes supposées). La représentation des tourbes et des sables de Saint-Vigor et de la Lande Millière est également très schématisée (épaisseur uniforme de 10 m). Une représentation géologique non conforme à la réalité risque fort d'entraîner un paramétrage hydrodynamique qui tendra à compenser les erreurs de géométrie, conduisant à des surestimations ou à des sous-estimations de leurs valeurs, avec pour résultat de surestimer ou de sous-estimer les impacts des pressions testées, comme par exemple les conséquences d'un pompage sur le débit d'une rivière ou sur le niveau d'une zone humide ;
- le calage du modèle mené uniquement en régime permanent qui n'autorise pas la prise en compte des fluctuations saisonnières (l'aspect réservoir de l'aquifère n'est pas pris en compte). Un calage en régime permanent ne permet pas de répondre aux besoins d'un modèle de gestion ; ce n'est qu'une première étape dans l'ajustement du modèle. En effet, plusieurs limites d'utilisation du modèle sont inhérentes à un tel calage : il n'est, par exemple, pas possible d'optimiser l'exploitation de la ressource en eau sans considérer les périodes d'étiage, ni appréhender le stockage / déstockage des aquifères. Cette limite d'utilisation avait bien été identifiée par l'Université de Rennes qui évoque le calage en régime transitoire comme une piste de travail future (Armandine Les Landes, 2014) ;
- une extension du modèle qui ne couvre pas la totalité du bassin, et qui exclut par exemple les nouveaux prélèvements du SYMPIC qui ne sont pas intégrés ;
- une recharge uniforme affectée à l'ensemble du domaine modélisé ; l'alimentation par les précipitations mériterait d'être précisée avec la prise en compte de différents paramètres : recouvrement argileux, distinction des zones humides, distribution du réseau hydrographique, etc ;
- un traitement des limites, au moins en partie, non conforme à la réalité et qui peut devenir contraignant ; par exemple, une condition hydraulique de type flux nul a été affectée à la limite Nord du bassin de Sainteny et aux limites Sud et Est alors que les aquifères de socle et les aquifères triasiques en bordure sont par exemple reconnus comme étant aquifères (Vittecoq et al., 2016b). Ceci peut entraîner dans le cas présent par exemple, une surestimation des impacts des pressions testées (ex. pompages), en particulier dans les secteurs proches des limites du modèle.

Pour le **modèle de Terre et Habitat**, des informations sont manquantes dans le rapport de 2014 pour une bonne compréhension de son fonctionnement. Il serait donc nécessaire d'obtenir davantage de précisions auprès du bureau d'étude (en particulier pour l'extension du domaine modélisé, les conditions aux limites, la prise en compte des échanges nappe-rivière, le traitement des pompages exercés sur la tourbière de Baupte).

Par ailleurs, en l'absence d'un bilan hydraulique des entrées / sorties, aucune information n'est apportée sur le fonctionnement hydrogéologique de l'hydrosystème de Sainteny-Marchésieux (échanges nappe-rivière-zone humide, flux échangés entre les deux sous-bassins, apports par les aquifères de socle, ...). En outre, comme rappelé précédemment, l'analyse du bilan hydraulique permet de juger de la recevabilité d'un modèle.

Les principales limites à souligner pour le modèle Terre et Habitat sont :

- faute de connaissance, la géométrie du sous bassin de Marchésieux n'apparaît pas suffisamment contrainte par des données de terrain. Cette limite est mise en avant dans les rapports SOGREAH et Terre et Habitat. Le même commentaire fait précédemment pour le modèle de l'Université de Rennes s'applique donc ici aussi : les forts risques de surestimation ou de sous-estimation des valeurs des paramètres hydrodynamiques qui en résultent, peuvent conduire à des erreurs significatives dans le calcul des impacts ;
- le calage a été uniquement axé sur la restitution des niveaux piézométriques des aquifères profonds. C'est à notre sens trop peu pour justifier d'un ajustement correct du modèle, en particulier dans un contexte lié eaux souterraines – eaux de surface ; *a minima*, il aurait été intéressant de valider l'extension des zones humides et les volumes drainés par les cours d'eau ;
- une recharge uniforme affectée à l'ensemble du domaine modélisé ;
- des conditions hydrauliques de type flux nul pour les limite nord, sud et est du bassin de Sainteny alors que les aquifères de socle et les aquifères triasiques en bordure sont reconnus aquifères. Seuls des apports depuis l'ouest ont été considérés par l'intermédiaire d'une limite à charge imposée. Il faut signaler qu'une condition de type flux imposé est préférable à une condition de type charge imposée en régime transitoire dans le but d'éviter toute baisse ou hausse artificielle des débits entrants par les potentiels imposés non justifiés (sous l'effet de pompages par exemple). Les flux entrants ne sont pas précisés par Terre et Habitat ;
- les pompages exercés sur la tourbière de Baupte n'ont *a priori* pas été pris en compte. Les volumes pompés sont importants (~ 18 Mm<sup>3</sup>/an en moyenne) et impactent fortement le bilan hydrologique de l'hydrosystème modélisé ;
- l'absence d'une analyse de sensibilité. Une série d'analyses de sensibilité peut se révéler fort utile pour apprécier la réactivité du modèle aux principaux paramètres de calage et pour améliorer la connaissance du système aquifère, à cerner les lacunes de connaissances prioritaires.

Enfin, au-delà des différentes limites ici détaillées, les points forts des deux modèles sont récapitulés dans le tableau suivant :

MODELE TERRE ET HABITAT	MODELE UNIVERSITE DE RENNES
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Géométrie basée sur des considérations litho-stratigraphiques</li> <li>- <i>Totalité du bassin modélisée</i></li> <li>- <i>Représentation des échanges nappe-rivière</i></li> <li>- Calage en régime transitoire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Calage également conduit vis-à-vis de l'extension des zones humides et des volumes d'eau drainés</li> <li>- Analyse de sensibilité</li> </ul>

Illustration 19 – Récapitulatif des points forts des deux modèles (en italique : des précisions restent à apporter).

## 5. Recommandations

Afin d'avoir un modèle qui réponde aux attentes exprimées, il apparaît indispensable de valoriser les nouvelles connaissances acquises dans le cadre du projet « Marchésieux » conduit par le BRGM entre 2012 et 2016, en partenariat avec l'Agence de l'Eau Seine Normandie et le Conseil Général de la Manche. Les travaux récents de l'Université de Rennes sur le fonctionnement des zones humides du sous bassin de Sainteny sont également à exploiter.

En effet, les nouveaux éléments de connaissance sont à prendre en compte pour réviser le modèle conceptuel hydrogéologique sur lequel s'appuie les deux modèles hydrodynamiques. Il est notamment préconisé les améliorations suivantes :

- **Géométrie et remplissage du bassin de Sainteny-Marchésieux** : suite aux nombreuses investigations géophysiques (sismique, gravimétrie, panneaux électriques, RMP) et aux nouveaux forages réalisés, le toit du substratum du sous bassin de Marchésieux ainsi que la nature du contact entre les deux sous bassins (origine sédimentaire et non tectonique) ont pu être précisés. La complexité du remplissage sédimentaire a, par ailleurs, pu être approchée. La réalisation d'un modèle géologique 3D représentatif apparaît désormais envisageable et est fortement recommandée afin de pouvoir mieux contraindre la géométrie du modèle de gestion de l'hydro-système ;
- **Caractérisation des tourbières** : de nouvelles données relatives à l'épaisseur et la perméabilité des tourbes ont été acquises par l'Université de Rennes et le BRGM ; il convient de les intégrer ;
- **Modélisation explicite des cours d'eau** : sa faisabilité est à étudier au regard 1) de l'inventaire des nombreux aménagements hydrauliques (seuils, batardeaux, vannes, fossés, portes à flots, ...), 2) de l'évaluation de leur impact sur les débits des cours d'eau et 3) des différents jaugeages réalisés par le BRGM (suivi en continu, jaugeages différentiels, etc.). Si sa faisabilité est avérée (ce qui devrait être le cas *a priori*), une telle option permettrait d'évaluer beaucoup plus précisément dans l'espace et dans le temps les échanges nappe-rivière et donc l'impact des pompages sur le débit des cours d'eau et zones humides. En outre, ceci permettrait également de mieux ajuster le calage du modèle, par exemple en l'appuyant aussi sur des débits jaugés à différents endroits dans le bassin ;
- **Apports aux limites** : les apports par les aquifères de socle et les aquifères triasiques, en particulier sur les limites nord et est (condition de type flux nul pour les deux modèles), sont à reprendre et à réévaluer. De nouveaux éléments ont été apportés par le BRGM pour le sous bassin de Marchésieux ; il convient de les intégrer. En outre, le mode de traitement des limites, voire leur positionnement pourrait être revu utilement dans certains cas en fonction des enjeux à simuler, de manière à éviter les effets de bords éventuels ;
- **Recharge météorique** : en ce qui concerne l'alimentation par les précipitations, sa répartition spatiale est à préciser avec la prise en compte de différents paramètres : recouvrement argileux, distinction des zones humides, distribution du réseau hydrographique, etc. Par ailleurs, le calcul du bilan hydroclimatique doit se faire au pas de temps journalier étant donné que les données journalières de pluie et d'évapotranspiration sont disponibles.
- **Ecoulements des eaux au sein des différentes nappes** : les nouvelles cartes piézométriques réalisées par le BRGM mettent en évidence, au centre du bassin, une crête piézométrique moins marquée que celle prise en compte jusqu'alors (biais induit par un forage colmaté). Il est intéressant de signaler que l'Université de Rennes avait rencontré des difficultés pour reproduire ce dôme piézométrique. Par ailleurs, plusieurs nappes sont désormais clairement distinguées au sein du sous bassin de Marchésieux (Vittecoq et at., 2016) : au sein des tourbes, plusieurs nappes superficielles (< 20 m de profondeur) dans les sables de Saint-Vigor et/ou les sables de la Lance Millières, dans la partie superficielle des Marnes du Bosq d'Aubigny ainsi que deux aquifères principaux captifs (Faluns de Bohon et faciès sableux/coquilliers des marnes du Bosq d'Aubigny). De nouveaux piézomètres ont enfin été réalisés et suivis. L'intégration de ces nouvelles données permettraient de mieux dimensionner la géométrie du modèle et paramétrer son fonctionnement hydrodynamique ;

- **Caractérisation hydrodynamique des faluns de Bohon et des Marnes du Bosq d'Aubigny** : des pompages d'essai ont été réinterprétés et trois nouveaux pompages d'essai de longue durée ont été mis en œuvre (nouvelles évaluations de transmissivité et de coefficients d'emménagement). Il est important que les perméabilités issues du calage des modèles soient confrontées à ces nouveaux résultats ;
- **Echanges nappes-zones humides** : les dispositifs de suivi mis en place par l'Université de Rennes et par le BRGM ont permis de mieux caractériser les échanges entre les zones humides et les nappes sous-jacentes. De plus, un épais horizon argileux (20-30 m) a été mis en évidence en dessous des tourbières limitant potentiellement la connexion hydraulique des deux compartiments (Cf. investigations géophysiques et pompage d'essai). Ces données sont également à intégrer et il serait intéressant de poursuivre le suivi sur les dispositifs existants voire de les compléter dans certains « secteurs sensibles » ;
- **Tourbière de Baupte** : il est important de récupérer davantage d'informations relatives au fonctionnement de la tourbière de Baupte et des volumes pompés. Leur influence est très probablement significative.

Plus généralement, pour pouvoir disposer d'un outil de gestion fiable de la ressource, il convient de modéliser de manière indissociée l'ensemble de l'hydro-système (eau de surface et eaux souterraines) avec sa géométrie la plus fine possible, en lui affectant des valeurs pour les paramètres hydrodynamiques qui soient les plus proches possibles de la réalité qu'ils expriment, avec des limites repoussées suffisamment loin des centres d'intérêt et des enjeux à simuler.

## 6. Bibliographie

Auterives C., Aquilina L., Bour O., Davranche M., Paquereau V. (2011) – Contribution of climatic and anthropogenic effects to hydric deficit of peatlands. *Hydrological Processes*, 25.

Baize S. (1998 – Tectonique, eustatisme et climat dans un système géomorphologique côtier. Le Nord-Ouest de la France au Plio-Pléistocène : exemple du Cotentin.

Dugué O. (2003) – The Pliocene to Early Pleistocene marine to fluvial succession of the seuil du Cotentin basins (Armorican massif, Normandy, France). *Journal of Quaternary Science*. Vol. 18, p. 215-226. ISSN 0267-8179.

Laurent A., N'Gom M., Dugué O. (2014a) – Amélioration de la connaissance géologique et hydrogéologique du sous-bassin de Marchésieux. Phase 1 : synthèse des données existantes. Rapport BRGM/RP-62855-FR.

Laurent A., Vittecoq B., Klinka T. (2014b) – Amélioration de la connaissance géologique et hydrogéologique du sous-bassin de Marchésieux. Phase 3 : pompages d'essai sur les forages du Château, de la Grosnière et de la Corbinerie. Rapport BRGM/RP-63136-FR.

Lucassou F. (2011) – Avis sur l'exploitation de la tourbière de Baupte - Vallée de la Sèves (Manche). Rapport BRGM/RP-60160-FR.

Vittecoq B., Jacob T., Baltassat J.M., Mathieu F., Paquet F., Bitri A., Samyn K., Dugué O. (2015) – Amélioration de la connaissance géologique et hydrogéologique du sous-bassin de Marchésieux. Phase 2 : résultats des investigations géophysiques. Rapport BRGM/RP-65218-FR.

Vittecoq B. (2016a) – Résultats de la campagne de forages de reconnaissance, diagraphies et pompages d'essai sur le sous bassin de Marchésieux (50). Rapport BRGM/RP-65224-FR.

Vittecoq B., Laurent A., Klinka T., Gourcy L., Gueho Y., Leprovost A., N'Gom M. (2016b) – Amélioration de la connaissance géologique et hydrogéologique du sous-bassin de Marchésieux – Phase 3 : Caractérisation du fonctionnement des aquifères et des zones humides. Rapport final. BRGM/RP-65214-FR.



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemain  
BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France  
Tel. 02 38 64 34 34

**Direction territoriale Basse-Normandie**

4, Avenue de Cambridge  
14200 Hérouville-Saint-Clair - France  
Tél. : 02 31 06 66 40