







# Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives

Phase 2 : Construction et calage du modèle hydrogéologique

### BRGM/RP-62648-FR

septembre 2013

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 12EAUK17

Croiset N., Wuilleumier A., Bessière H., Gresselin F.

Avec la collaboration de

Seguin J-J.

### Vérificateur :

Nom: Y. Barthélemy

Date: 10/09/2013

Signature :

### Approbateur:

Nom: B. Vittecoq

Date: 26/09/2013

Signature:

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

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



Mots clés: Modélisation hydrogéologique, modèle maillé, Bathonien, Bajocien, Dogger, Plaine de Caen, Orne, Calvados, Dives En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Croiset N., Wuilleumier A., Bessière H., Gresselin F. (2013). Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Phase 2 : Construction et calage du modèle hydrogéologique. Rapport BRGM/RP-62648-FR. 130 pages, 88 ill., 20 tab., 11 annexes. © BRGM, 2013, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

# **Synthèse**

La DREAL de Basse-Normandie et l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN) ont sollicité le BRGM pour la réalisation d'un modèle hydrogéologique maillé portant sur les aquifères de la plaine de Caen-Argentan et le bassin de la Dives. Cette étude a pour vocation :

- de fournir les éléments scientifiques permettant la mise à jour de la délimitation de la Zone de Répartition des Eaux (ZRE) de l'aquifère du Bajo-Bathonien (plaine de Caen-Argentan et Bessin);
- d'évaluer la ressource en eau souterraine exploitable tout en respectant un rabattement piézométrique acceptable, ainsi qu'un débit d'étiage acceptable.

En co-maîtrise d'ouvrage entre l'AESN et le BRGM, et avec un co-financement AESN-BRGM, l'étude a été suivie par un Comité de pilotage constitué par l'AESN, la DREAL, l'ARS, la DDTM du Calvados et la DDT de l'Orne<sup>1</sup>.

L'étude s'est déroulée selon le phasage suivant :

- Phase 1 :
  - o collecte des données et synthèse hydrogéologique ;
  - o construction du modèle géologique ;
- Phase 2 :
  - o construction et calage du modèle hydrogéologique ;
- Phase 3 :
  - o exploitation du modèle hydrogéologique ;
  - o formations à la modélisation en hydrogéologie et à l'utilisation du modèle hydrogéologique.

Les travaux réalisés sont décrits au travers de plusieurs rapports ; le présent rapport décrit la phase 2 de l'étude de construction et de calage du modèle hydrogéologique.

Les résultats du calage en régime transitoire, validés par le Comité de pilotage, sont tout à fait satisfaisants malgré la complexité du domaine modélisé et la présence de nombreux aquifères, localement karstiques. Les chroniques de débit simulées aux stations hydrométriques sont en bonne adéquation avec les mesures de terrain. Les niveaux piézométriques moyens, leurs fluctuations saisonnières et leurs évolutions pluriannuelles sont bien reproduits sur la majorité des piézomètres.

En raison de la grande extension géographique de la zone d'étude et du comportement hydrodynamique complexe de quelques secteurs, le calage pourrait être encore amélioré dans certaines zones, sous réserve de disposer de davantage de données, notamment dans le bassin versant de la Touques et sur les chroniques piézométriques de nature karstique des aquifères du Bajocien et du Bathonien.

Le modèle hydrogéologique ainsi construit apparaît tout à fait pertinent pour répondre aux principaux objectifs de l'étude.

-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Invitée, l'ONEMA régionale n'a pu être présente aux comités de pilotage.

# **Sommaire**

1.	Introduction	13
2.	Rappel de notions d'hydrogéologie	15
	2.1. AQUIFERE ET NAPPE	15
	2.2. NAPPE LIBRE ET NAPPE CAPTIVE	16
	2.3. CARACTERISATION D'UN AQUIFERE  2.3.1. Capacité de stockage  2.3.2. Capacité d'écoulement	17
3.	Construction du modèle hydrogéologique	21
	3.1. PRESENTATION DU CODE DE CALCUL UTILISE  3.1.1. Un modèle multicouche  3.1.2. Variables et paramètres d'entrée du modèle.	21
	3.2.1 Extension du modèle et conditions aux limites 3.2.2 Couches représentées 3.2.3 Maillage 3.2.4 Failles	24 24 26
	3.3. RECHARGE ET RUISSELLEMENT	28 29 33 de 34
	3.4. RESEAU HYDROGRAPHIQUE  3.4.1. Représentation des écoulements de surface et des échanges nappe-riv  43  3.4.2. Les paramètres définissant le réseau hydrographique  3.4.3. Prise en compte d'un drain karstique	43 vière 46
	3.5. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES INITIAUX  3.5.1. Perméabilités  3.5.2. Coefficient d'emmagasinement	47
	3.6. PRELEVEMENTS	55 55
	v.v. m. rokvonicna vvar ramnonadivil 60 600 vvlavi6	

6.	Bibliographie	129
5.	Conclusions	127
	4.3.3. Chronique d'ETP	124
	4.3.2. Rôle hydraulique de la faille de Bény-sur-Mer	120
	4.3.1.Influence des pompages liés à l'élevage des bovins	118
	4.3. ANALYSES DE SENSIBILITE	118
	4.2.4.Bilan des échanges entre couches	116
	4.2.3. Paramètres ajustés à l'issue du calage	111
	4.2.2.Résultats du calage en régime transitoire : chroniques de débit et ch piézométriques	
	4.2.1.Résultat du calage en régime permanent : cartes piézométriques et de dispersion	-
	4.2. RESULTATS DU CALAGE	
	4.1.4. Déroulement du calage	73
	4.1.3. Données de calage	
	4.1.2.Paramètres de calage	66
	4.1.1.Les objectifs du calage et les différentes étapes	65
	4.1. PROCEDURE DE CALAGE	65
4.	Calage du modèle hydrogéologique	65
	3.6.5. Synthèse des volumes prélevés	63
	3.6.4. Prélèvements pour le remplissage des gabions	62
	3.6.3. Prélèvements industriels	61
	3.6.2. Prélèvements agricoles : irrigation et élevage	58

# Liste des illustrations

Illustration 1 : Etendue approximative de la zone d'étude	14
Illustration 2 : Zone saturée et zone non saturée d'un aquifère	16
Illustration 3 : Nappe libre et nappe captive : en 1, la nappe est libre ; en 2 la nappe est captive en 3 la nappe est captive et artésienne	⁄e ; .17
Illustration 4 : Porosité d'un aquifère, eau libre et eau liée	18
Illustration 5 : Effet de la perméabilité sur un pompage : une perméabilité plus faible induit un rabattement plus important du niveau de la nappe	19
Illustration 6 : Exemple de discrétisation d'un modèle maillé multicouche	22
Illustration 7: Environnement de fonctionnement de MARTHE	23
Illustration 8 : Epaisseurs du socle	26
Illustration 9 : Maillage du modèle hydrogéologique	28
Illustration 10 : Zones de 100 mm d'amplitude d'après la grille AURELHY (Météo-France)	30
Illustration 11: Comparaison entre pluviométries moyennes 1971-2000 fournies par AURELH' valeurs calculées à partir des données locales	
Illustration 12 : Corrélation entre les moyennes annuelles 1994-2011 et 1971-2000 calculées partir des données météorologique décadaires. La droite noire est une droite de pente 1, la drouge est la droite de régression linéaire.	roite
Illustration 13 : Zones d'évapotranspiration potentielle définies pour la modélisation	34
Illustration 14 : Principales entités géologiques affleurantes et tracé des bassins versants sélectionnés	35
Illustration 15 : Contexte géologique et lithologique des bassins versants modélisés	36
Illustration 16 :Données d'entrée et de calage des modèles GARDENIA	38
Illustration 17 : Zones de recharge retenues pour le modèle maillé. (se reporter au Tableau 7 pour l'identification des zones)	
Illustration 18 : Relation entre le rapport pluies efficaces/pluies totales et les pluies totales pou les différentes zones de recharge considérées, et droite de régression associée	
Illustration 19 : Réseau hydrographique pris en compte de manière explicite dans le modèle	45
Illustration 20 : Représentation en boîte à moustaches des transmissivités connues par aquifè (la valeur moyenne est en rouge et la médiane correspond à la barre noire dans la boîte)	
Illustration 21 : Perméabilités initiales affectées à la couche des marnes du Callovo-Oxfordien (fond : carte géologique à l'échelle 1M)	
Illustration 22 : Perméabilités initiales affectées à la couche des calcaires du Bathonien moye supérieur	
Illustration 23 : Perméabilités initiales affectées à la couche des calcaires du Bajocien-Aalénie Toarcien	
Illustration 24 : Perméabilités initiales affectées au socle	53
Illustration 25 : Volumes annuels prélevés pour l'alimentation en eau potable dans les eaux de surface (en bleu) et dans les eaux souterraines (en rouge)	
Illustration 26 : Répartition mensuelle des prélèvements de l'année 2002 pour différents syndicats de la zone côtière	56
Illustration 27 : Répartition mensuelle des prélèvements de l'année 2002 pour différents syndicats hors zone côtière	.57

répartition mensuelle considérées. Les volumes prélevés sont ceux de 2010
Illustration 29 : Volumes annuels prélevés pour un usage agricole dans les eaux de surface (en bleu) et dans les eaux souterraines (en rouge). Le figuré hachuré représente la partie des prélèvements liée aux bovins
Illustration 30 : Orientation technico-économique des communes de Basse-Normandie 60
Illustration 31: Zones de répartition mensuelle des prélèvements agricoles 61
Illustration 32: Volumes annuels prélevés pour un usage industriel dans les eaux de surface (en bleu) et dans les eaux souterraines (en rouge)
Illustration 33 : Volumes annuels prélevés dans les différentes couches du modèle
Illustration 34 : Piézomètres disposant d'au moins une mesure de niveau piézométrique utilisés pour le calage en régime permanent
Illustration 35 : Stations hydrologiques disposant d'une chronique de débit et stations de jaugeage disposant de mesures ponctuelles utilisées pour le calage du modèle
Illustration 36 : Ouvrages disposant de chroniques piézométriques utilisées pour le calage du modèle
Illustration 37: Aquifère du Cénomanien : Niveaux piézométriques simulés en régime permanent et courbes isopièzes extraites de l'Atlas hydrogéologique du Calvados (équidistance des courbes de niveaux = 20 m)
Illustration 38 : Carte des débordements de nappe simulés par le modèle et sources inventoriées dans le Cénomanien
Illustration 39 : Diagramme de dispersion du calage piézométrique pour le Cénomanien. Les croix bleues représentent les niveaux piézométriques simulés vs. observés en régime permanent. La droite de calage idéal (de pente 1) est représentée en trait plein noir. Des parallèles ont été tracées de part et d'autre à +/- 10m. Le trait rouge est la droite de régression linéaire du nuage de points
Illustration 40 : Niveaux piézométriques simulés en régime permanent dans l'aquifère des calcaires et sables de l'Oxfordien moyen et supérieur
Illustration 41 : Diagramme de dispersion du calage piézométrique pour l'aquifère des calcaires et sables de l'Oxfordien. Les croix bleues représentent les niveaux piézométriques simulés vs. observés en régime permanent. La droite de calage idéal (de pente 1) est représentée en trait plein noir. Des parallèles ont été tracées de part et d'autre à +/- 10m. Le trait rouge est la droite de régression linéaire du nuage de points
Illustration 42 : Niveaux piézométriques simulés en régime permanent dans l'aquifère des calcaires du Bathonien moyen et supérieur
Illustration 43 : Diagramme de dispersion du calage piézométrique pour l'aquifère des calcaires Bathonien moyen et supérieur. Les croix bleues représentent les niveaux piézométriques simulés vs. observés en régime permanent. La droite de calage idéal (de pente 1) est représentée en trait plein noir. Des parallèles ont été tracées de part et d'autre à +/- 10m. Le trait rouge est la droite de régression linéaire du nuage de points.
Illustration 44 : Niveaux piézométriques simulés dans l'aquifère des calcaires du Bajocien en régime permanent. a) Vue de l'extension totale de la couche. b) Zoom sur la partie libre de la formation et superposition avec la carte piézométrique de l'Atlas hydrogéologique du Calvados (équidistance des isopièzes = 20 m)
Illustration 45 : Diagramme de dispersion du calage piézométrique des calcaires du Bajocien. Les croix bleues représentent les niveaux piézométriques simulés vs. observés en régime permanent. La droite de calage idéal (de pente 1) est représentée en trait plein noir. Des parallèles ont été tracées de part et d'autre à +/- 10m. Le trait rouge est la droite de régression linéaire du nuage de points.

Illustration 46 : Niveaux piézométriques simulés en régime permanent dans l'aquifère du Lias infra-Toarcien et du Trias
Illustration 47 : Diagramme de dispersion du calage piézométrique pour le Lias infra-Toarcien et Trias. Les croix bleues représentent les niveaux piézométriques simulés vs. observés. La droite de calage idéal (de pente 1) est représentée en trait plein noir. Des parallèles ont été tracées de part et d'autre à +/- 10m. Le trait rouge est la droite de régression linéaire du nuage de points.86
Illustration 48 : Stations hydrométriques dont les chroniques de débit ont été utilisées pour le calage dans le bassin versant de la Touques (fond : carte géologique à l'échelle 1/1 000 000).87
Illustration 49 : Débit de la Touques à Mardilly. Comparaison des chroniques simulée (rouge) et observée (bleue)
Illustration 50 : Débit de la Calonne à Authieux-sur-Calonne. Comparaison des chroniques simulée (rouge) et observée (bleue)
Illustration 51 : Stations hydrométriques dont les chroniques de débit ont été utilisées pour le calage dans le bassin versant de la Dives (fond : carte géologique à l'échelle 1/1 000 000) 90
Illustration 52 : Débit de la Dives à Beaumais. Comparaison des chroniques simulée (rouge) et observée (bleue)91
Illustration 53 : Débit de la Dives au Mesnil-Mauger. Comparaison des chroniques simulée (rouge) et observée (bleue)
Illustration 54 : Stations hydrométriques dont les chroniques de débit ont été utilisées pour le calage du bassin versant de l'Orne (fond : carte géologique à l'échelle 1/1 000 000)
Illustration 55 : Débit de l'Orne à la Courbe. Comparaison des chroniques simulée (en rouge) et observée (en bleu)
Illustration 56 : Débit de l'Orne à Grimbosq. Comparaison des chroniques simulée (en rouge) et observée (en bleu)
Illustration 57 : Débit de la Laize à Fresney-le-Puceux. Comparaison des chroniques simulée (en rouge) et observée (en bleu). La station l3612062 est hors service depuis 2002 ; elle a été remplacée par la station l3612060 à partir de 2005, au même emplacement. Les données des deux stations sont présentées sur la figure
Illustration 58 : Localisation des stations hydrométriques dont les chroniques de débit ont été utilisées pour le calage du bassin versant de la Seulles (fond : carte géologique à l'échelle 1/1 000 000)
Illustration 59 : Débit de la Mue à Reviers. Comparaison des chroniques simulée (en rouge) et observée (en bleu)
Illustration 60 : Débit de la Seulles à Juvigny-sur-Seulles. Comparaison des chroniques simulée (en rouge) et observée (en bleu)
Illustration 61 : Localisation des stations hydrométriques pour lesquelles les chroniques ont été utilisées pour le calage du bassin versant de l'Aure (fond : carte géologique à l'échelle 1/1 000 000)
Illustration 62 : Débit de l'Aure à Maisons. Comparaison des chroniques simulée (en rouge) et observée (en bleu)
Illustration 63 : Débit de la Drôme à Sully. Comparaison des chroniques simulée (en rouge) et observée (en bleu)
Illustration 64 : Piézomètres de la craie cénomanienne dont les chroniques ont été utilisées pour le calage (fond : carte géologique à l'échelle 1/1 000 000)99
Illustration 65 : Chroniques piézométriques simulée (en rouge) et observée (en bleu) au piézomètre d'Auquainville (01473X0087)

Illustration 66 : Piézomètres de l'Oxfordien dont les chroniques ont été utilisées pour le calage (fond : carte géologique à l'échelle 1/1 000 000)
Illustration 67 : Piézomètres du Bathonien (hors piézomètres de la ville de Caen) dont les chroniques ont été utilisées pour le calage (fond : carte géologique à l'échelle 1/1 000 000) 102
Illustration 68 : Chroniques piézométriques simulée (en rouge) et observée (en bleu) au piézomètre de Vierville-sur-Mer (00957X0005)
Illustration 69 : Chroniques piézométriques simulée (en rouge) et observée (en bleu) au piézomètre de Saint-Contest (01198X0002)103
Illustration 70 : Chroniques piézométriques simulée (en rouge) et observée (en bleu) au piézomètre d'Ifs (01205X0229)
Illustration 71 : Chroniques piézométriques simulée (en rouge) et observée (en bleu) au piézomètre n°1 de la ville de Caen
Illustration 72 : Chroniques piézométriques simulée (en rouge) et observée (en bleu) pour le piézomètre de Sai (02131X0019)105
Illustration 73 : Piézomètres du Bajocien dont les chroniques ont été utilisées pour le calage (fond : carte géologique à l'échelle 1/1 000 000)
Illustration 74 : Chroniques piézométriques simulée (en rouge) et observée (en bleu) au piézomètre d'Asnières-en-Bessin (00956X0055)107
Illustration 75 : Chroniques piézométriques simulée (en rouge) et observée (en bleu) au piézomètre de Louvigny (01198X0029)108
Illustration 76 : Piézomètres du Lias infra-Toarcien et du Trias dont les chroniques ont été utilisées pour le calage (fond : carte géologique à l'échelle 1/1 000 000)
Illustration 77 : Chroniques piézométriques simulée (en rouge) et observée (en bleu) au piézomètre de Tournebu (01465X0067)110
Illustration 78 : Piézomètres du socle dont les chroniques ont été utilisées pour le calage (fond : carte géologique à l'échelle 1/1 000 000)110
Illustration 79 : Chroniques piézométriques simulée (en rouge) et observée (en bleu) au piézomètre de Saint-Pierre-Du-Regard (01756X0008)11
Illustration 80 : Failles prises en compte dans le modèle géologique et dans le modèle hydrogéologique114
Illustration 81 : Zonation des paramètres de recharge ajustée à l'issue du calage. (se reporter au Tableau 20 pour la correspondance entre numéros de zone et paramètres de recharge) 115
Illustration 82 : Débits entrants et sortants simulés par le modèle en régime permanent 117
Illustration 83 : Baisse piézométrique induite par les prélèvements consacrés à l'élevage (simulation en régime permanent)
Illustration 84 : Localisation du piézomètre de Bény-sur-Mer
Illustration 85 : Chroniques piézométriques à Bény-sur-Mer (01194X0069). Comparaison des niveaux observé (bleu) et simulés, selon que la faille est supposée étanche (rouge) ou « transparente » (vert)
Illustration 86 :Comparaison des niveaux piézométriques simulés en régime permanent dans l'aquifère du Bathonien , selon que la faille est étanche dans sa seule partie NO (en haut) ou sur toute sa longueur (en bas)
Illustration 87 : Niveaux piézométriques au piézomètre de Sarceaux (02124X0037). Comparaison des niveaux observé (bleu) et simulés, avec l'ETP d'Alençon (rouge) et l'ETP de l'Oudon (vert).

### Liste des tableaux

Tableau 1 : Valeurs de porosité efficace pour diverses formations (source : guide d'application l'arrêté interministériel du 11 septembre 2003, MEDD, 2004)	
Tableau 2 : Classification des aquifères selon leur perméabilité	. 19
Tableau 3 : Couches du modèle hydrogéologique	. 25
Tableau 4 : Caractéristiques du maillage du modèle	. 27
Tableau 5 : Stations pluviométriques utilisées pour les zones de recharge du modèle hydrogéologique	. 33
Tableau 6 : Bassins versants ayant fait l'objet de modélisations GARDENIA et données associées	. 39
Tableau 7 : Valeurs initiales des paramètres de recharge affectés au modèle	. 42
Tableau 8 : Statistiques sommaires des valeurs de transmissivité recensées dans la zone d'étude	. 47
Tableau 9 : Perméabilités initiales affectées aux différentes couches du modèle, avant calage	53
Tableau 10 : Statistiques synthétiques des valeurs de coefficient d'emmagasinement recense dans la zone d'étude	ées . 54
Tableau 11 : Valeurs initiales d'emmagasinement libre affectées aux différentes couches du modèle	. 55
Tableau 12 : Répartitions mensuelles des prélèvements pour l'usage AEP (valeurs affectées a modèle pour les zones côtière et intérieure)	
Tableau 13: Répartition mensuelle des prélèvements agricoles	60
Tableau 14 : Evaluation des volumes prélevés pour l'alimentation des gabions non alimentés la mer	•
Tableau 15: Répartition par aquifère du nombre de piézomètres de la zone d'étude disposant d'au moins une mesure de niveau	
Tableau 16 : Chroniques de débit utilisées pour le calage en transitoire	. 69
Tableau 17 : Distribution des chroniques piézométriques de calage dans les couches du mod	
Tableau 18 : Perméabilités ajustées à l'issue du calage	112
Tableau 19 : Emmagasinements libres ajustés à l'issue du calage	113
Tableau 20 : Paramètres de recharge ajustés à l'issue du calage	116

# Liste des annexes

Annexe 1 Légende de la carte géologique à 1/1 000 000M (BRGM)	. 131
Annexe 2 Présentation du logiciel MARTHE (Modélisation d'Aquifères avec maillage Rectangulaire, Transport et HydrodynamiquE)	. 134
Annexe 3 Principes et résultats de calage des modèles GARDENIA	. 137
Annexe 4 Valeurs initiales des flux de recharge et de ruissellement évaluées pour le calage régime permanent	
Annexe 5 Stations hydrométriques utilisées pour le calage du modèle	. 159
Annexe 6 Piézomètres utilisés pour le calage du modèle	. 163
Annexe 7 Chroniques de débit simulées et observées aux stationshydrométriques	. 167
Annexe 8 Chroniques piézométriques simulées et observées dans les ouvrages retenus po calage du modèle	
Annexe 9 Distribution des perméabilités à l'issue du calage	. 207
Annexe 10 Distribution des coefficients d'emmagasinnement libre à l'issue du calage	. 215
Annexe 11 Cartes des flux de recharge et de ruissellement en régime permanent ajustés à l'issue du calage	

# 1. Introduction

La DREAL de Basse-Normandie et l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN) ont sollicité le BRGM pour la réalisation d'un modèle hydrogéologique maillé portant sur les aquifères de la plaine de Caen-Argentan et le bassin de la Dives. Cette étude a pour vocation :

- de fournir les éléments scientifiques permettant la mise à jour de la délimitation de la Zone de Répartition des Eaux (ZRE) de l'aquifère du Bajo-Bathonien (plaine de Caen-Argentan et Bessin);
- d'évaluer la ressource en eau souterraine exploitable tout en respectant un rabattement piézométrique acceptable, ainsi qu'un débit d'étiage acceptable.

En co-maîtrise d'ouvrage entre l'AESN et le BRGM, et avec un co-financement AESN-BRGM, l'étude a été suivie par un Comité de pilotage constitué par l'AESN, la DREAL, l'ARS, la DDTM du Calvados et la DDT de l'Orne<sup>2</sup>.

La zone d'étude couvre la totalité du grand bassin versant comprenant les zones d'intérêt du modèle (plaine de Caen, d'Argentan, Bessin). Le bassin versant de la Touques est également inclus dans le modèle afin de disposer de conditions limites les plus réalistes possibles pour les aquifères Bajocien et Bathonien dans leur partie Est. Cette zone est composée de terrains sédimentaires mésozoïques, comprenant le département du Calvados et une partie du département de l'Orne, depuis l'embouchure de l'Aure dans le secteur de Grandcamp-Maisy jusqu'à l'embouchure de la Touques dans le secteur de Trouville, et vers le sud jusqu'à la latitude d'Ecouché et Sées (Illustration 1).

-

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Invitée, l'ONEMA régionale n'a pu être présente aux comités de pilotage.

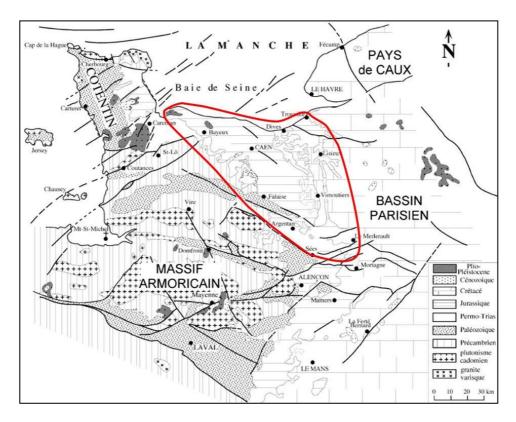


Illustration 1 : Etendue approximative de la zone d'étude

L'étude s'est déroulée selon le phasage suivant :

- Phase 1:
  - collecte des données et synthèse hydrogéologique ;
  - o construction du modèle géologique ;
- Phase 2:
  - o construction et calage du modèle hydrogéologique ;
- Phase 3 :
  - o exploitation du modèle hydrogéologique ;
  - o formations à la modélisation en hydrogéologie et à l'utilisation du modèle hydrogéologique.

### Le présent rapport décrit la construction et le calage du modèle hydrogéologique.

La première partie de l'étude, couvrant la collecte et une première analyse des données, la synthèse hydrogéologique et la construction du modèle géologique, a été présentée dans le rapport de phase 1 (Wuilleumier et al., 2013, RP-62002-FR).

L'exploitation du modèle hydrogéologique fera l'objet d'un rapport spécifique.

# 2. Rappel de notions d'hydrogéologie

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

### 2.1. AQUIFERE ET NAPPE

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

Un aquifère peut être défini<sup>3</sup> comme un ensemble de roches perméables, reposant sur -et parfois recouvert par- des roches moins perméables, comportant une zone saturée<sup>4</sup> et conduisant suffisamment l'eau pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables.

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

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

Un aquifère comporte une zone saturée et, le cas échéant, une zone non saturée (cf. Illustration 2). La zone non saturée correspond à la partie de l'aquifère dans laquelle les « vides » de la roche ne sont pas entièrement saturés d'eau.

-

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Définition du Comité National Français des Sciences Hydrologiques

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> La zone saturée d'un aquifère correspond à la zone du sous-sol dans laquelle l'eau occupe complètement les interstices des roches.

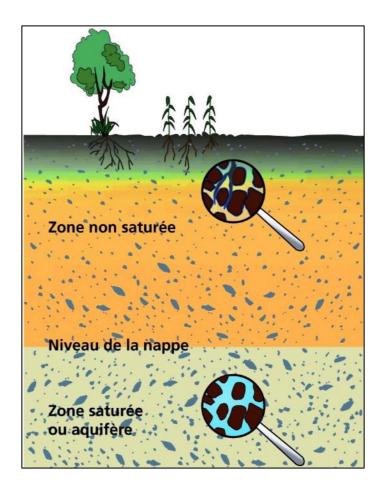


Illustration 2 : Zone saturée et zone non saturée d'un aquifère

### 2.2. NAPPE LIBRE ET NAPPE CAPTIVE

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

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

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

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

L'Illustration 3 présente les différents cas évoqués précédemment.

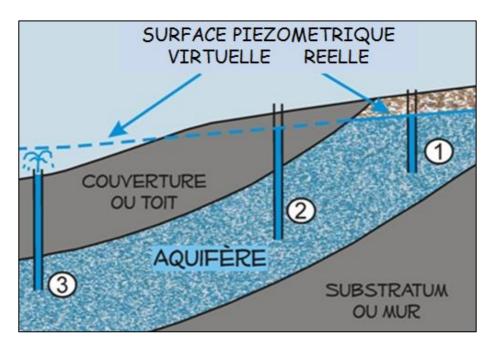


Illustration 3 : Nappe libre et nappe captive : en 1, la nappe est libre ; en 2 la nappe est captive ; en 3 la nappe est captive et artésienne

### 2.3. CARACTERISATION D'UN AQUIFERE

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

### 2.3.1. Capacité de stockage

La quantité d'eau qu'un aquifère emmagasine dépend de ses dimensions (étendue, extension) et de la <u>porosité</u> des roches qui le constituent. La porosité d'une roche correspond au ratio entre le volume des « vides » dans la roche et le volume total. Une roche comporte en effet des vides résiduels entre les grains ou blocs qui la constituent (cf. Illustration 4). Cette porosité varie de quelques pourcents dans une roche compacte et massive (par exemple un basalte massif) à plus de 40% dans des argiles (la porosité des argiles n'est cependant pas exploitable en raison de la très petite taille des pores, laquelle induit d'importants phénomènes de capillarité).

La notion de porosité est essentielle car c'est elle, avec le volume du réservoir aquifère, qui détermine le volume d'eau contenu dans un aquifère. Néanmoins, seule une partie de l'eau contenue dans l'aquifère est disponible pour les écoulements. En effet, une partie de l'eau contenue au sein des pores est liée aux grains de la roche par des forces de capillarité. On l'appelle l'eau liée, par opposition à l'eau disponible pour les écoulements, dénommée l'eau libre (cf. Illustration 4).

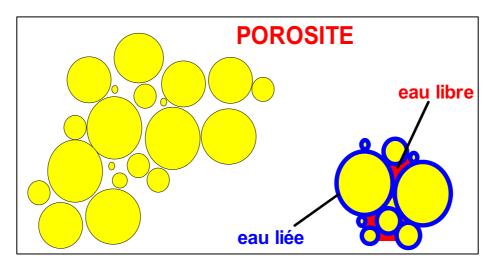


Illustration 4 : Porosité d'un aquifère, eau libre et eau liée

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

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

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

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

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

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

### 2.3.2. Capacité d'écoulement

L'aptitude d'un aquifère à laisser circuler l'eau est caractérisée par la notion de <u>perméabilité</u> (exprimée en m/s). Plus la perméabilité est élevée, meilleure est la capacité de l'aquifère à laisser circuler l'eau. L'effet de la perméabilité sur un pompage est présenté en Illustration 5 : plus la perméabilité est faible, plus le rabattement est important. Des exemples de valeurs de perméabilité sont fournis au Tableau 2.

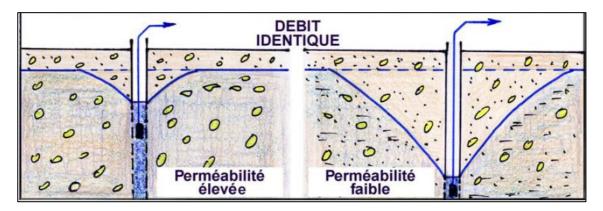


Illustration 5 : Effet de la perméabilité sur un pompage : une perméabilité plus faible induit un rabattement plus important du niveau de la nappe

Valeur de la	Classification	Valeur de l'aquifère	Exemple de roche
Perméabilité	hydrogéologique		
10 <sup>-2</sup> à 10 <sup>-4</sup> m/s	perméable	très bon à bon	Sables et Graviers
10⁻⁵ m/s	assez perméable	assez bon	Calcaires gréseux
10 <sup>-6</sup> à 10 <sup>-7</sup> m/s	peu perméable	médiocre à mauvais	Limons, Mames
égale ou inférieure à	très peu perméable	non aquifère	Argiles
10 <sup>-8</sup> m/s			_

Tableau 2 : Classification des aquifères selon leur perméabilité

Un autre paramètre utilisé en hydrogéologie (car il est déduit des pompages d'essai généralement effectués après la réalisation d'un forage) est la <u>transmissivité</u>. Exprimée en m²/s, elle est égale au produit de la perméabilité par l'épaisseur saturée de l'aquifère.

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

En l'absence de valeurs de perméabilité ou de transmissivité, le <u>débit spécifique</u> peut apporter une première approximation de la capacité d'un aquifère à laisser l'eau circuler en son sein. Ce paramètre, exprimé en m³/h/m, est calculé comme le ratio entre un débit de pompage et le rabattement mesuré dans le forage pour ce débit. Le débit spécifique intégrant les pertes de charges quadratiques associées au forage et à son équipement, il ne reflète cependant pas uniquement les propriétés de l'aquifère.

# 3. Construction du modèle hydrogéologique

Construire un modèle maillé, c'est traduire numériquement, dans des fichiers reconnus par le logiciel de modélisation, le schéma hydraulique sous-tendant le modèle conceptuel d'écoulement élaboré à l'issue de la synthèse hydrogéologique initiale.

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

- Choix d'un logiciel de modélisation, d'où découlent le type de maillage à mettre en œuvre et le format des fichiers de données à élaborer (cf § 3.1);
- Définition précise de l'extension horizontale et verticale du domaine à modéliser et définition des conditions aux limites (cf § 3.2.1 et 3.2.2);
- Construction du maillage, définition de la géométrie du système aquifère par assignation des cotes de toit et mur à chacune des mailles du modèle (cf § 3.2.3);
- Définition des flux de recharge et de ruissellement (cf § 3.3)
- Définition du réseau hydrographique et des échanges nappe-rivière (cf § 3.4);
- Affectation des propriétés hydrogéologiques à chacune des mailles (cf § 3.5) ;
- Distribution des débits de pompage dans les mailles concernées (cf § 3.6).

### 3.1. PRESENTATION DU CODE DE CALCUL UTILISE

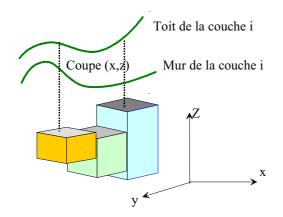
### 3.1.1. Un modèle multicouche

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

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

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

Le modèle utilisé est de type multicouche : chaque couche est discrétisée en mailles parallélépipédiques dont la face supérieure correspond au toit de la formation et la face inférieure au mur de la formation (voir Illustration 6). Pour une maille, les échanges peuvent se faire avec les mailles adjacentes —appartenant à la même couche-, ainsi qu'avec la maille inférieure et la maille supérieure.



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

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

Illustration 6 : Exemple de discrétisation d'un modèle maillé multicouche

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

Le fonctionnement du logiciel est brièvement décrit en Annexe 2.

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

### 3.1.2. Variables et paramètres d'entrée du modèle

Les variables et paramètres constituant les données d'entrée du modèle sont récapitulés sur l'Illustration 7.

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

On peut également distinguer :

- les variables ou paramètres de calage (sur fond orange sur la figure) qui, n'étant évalués que par interprétation de mesures ponctuelles ou n'étant pas accessibles aux mesures, doivent être ajustés ou déterminés au cours des phases de calage du modèle : propriétés hydrogéologiques des formations (emmagasinements, perméabilités...), propriétés du réseau hydrographique, paramètres impliqués dans les calculs hydroclimatiques (capacité de stockage du sol, partition entre ruissellement et infiltration, déphasage induit par la zone non saturée)
- les variables ou paramètres définis *a priori* (sur fond bleu sur la figure), dont la valeur n'est pas réévaluée au cours du calage : structure du milieu géologique, structure du réseau hydrographique, pompages, chroniques de pluie et d'ETP...

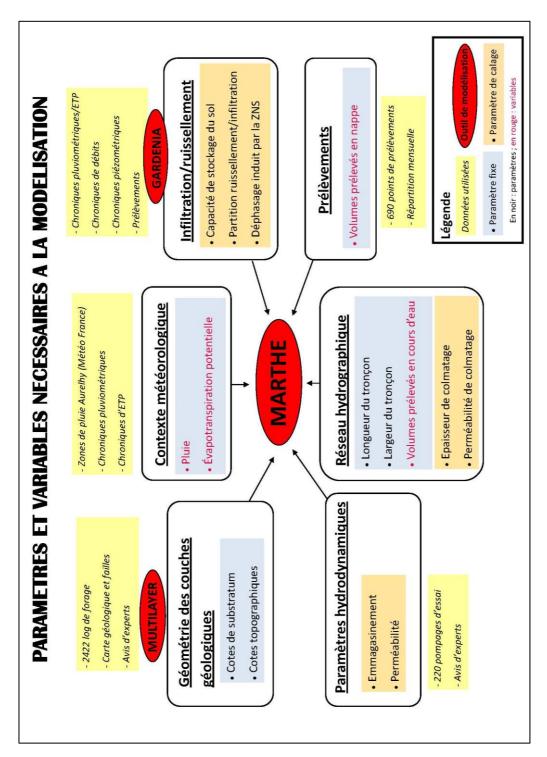


Illustration 7: Environnement de fonctionnement de MARTHE

### 3.2. GEOMETRIE

La structure géométrique du modèle hydrogéologique s'appuie sur celle du modèle géologique décrit dans le rapport de phase 1. Pour les besoins de la modélisation hydrodynamique, quelques modifications ont cependant été apportées aux données associées.

### 3.2.1. Extension du modèle et conditions aux limites

La zone d'étude est définie dans la partie du rapport de phase 1 relative au modèle conceptuel.

Les limites correspondent à des limites de bassin versant hydrographique, supposées correspondre aux bassins versants hydrogéologiques. Il sera donc considéré qu'il n'y a aucun flux entre la zone d'étude et l'extérieur, sauf le long de la bordure maritime.

La Manche est représentée comme une zone à charge piézométrique imposée à 0 m NGF, pour les mailles des aquifères placés directement en équilibre avec la mer.

### 3.2.2. Couches représentées

Le modèle hydrogéologique comporte 10 couches, soit une de moins que le modèle géologique.

La couche correspondant aux dépôts du Cénozoïque hors alluvions (formations tertiaires et quaternaires, hors formations alluviales), qui couvre une large partie de la zone d'étude, n'a pas été individualisée dans le modèle hydrogéologique. En effet, ces dépôts superficiels ne présentent qu'un intérêt hydrogéologique local, et leur situation fréquemment dénoyée poserait des problèmes numériques importants s'ils étaient individualisés dans le modèle.

Cette couche joue cependant un rôle important vis-à-vis de la recharge qui parvient aux couches inférieures : des limons argileux constituent par exemple un frein important à l'infiltration, tandis que des dépôts plus sableux induisent une recharge potentiellement plus importante. Ces propriétés sont prises en compte indirectement par le biais des paramètres d'infiltration (cf. §3.3.4).

Les volumes correspondant à cet ensemble de formations cénozoïques sont ajoutés à la première couche sous-jacente rencontrée. Le modèle hydrogéologique comprend donc **10 couches.** Le Tableau 3 présente ces différentes couches.

Compte tenu du pas de maillage (1 km x 1 km en dehors de la zone gigogne – cf. § 3.2.3), les alluvions ne sont conservées dans le modèle hydrogéologique que lorsqu'elles forment un ensemble de mailles conséquent, c'est-à-dire dans les zones aval des principaux cours d'eau de la zone modélisée (Touques, Dives, Orne, Aure inférieure).

	Formations hydrogéologiques	Potentiel aquifère
1	Alluvions	Aquifère
2	Craie du Cénomanien	Aquifère
3	Formations du Crétacé infra-cénomanien et Kimméridgien	Multicouche localement aquifère
4	Calcaires et sables de l'Oxfordien moyen et supérieur	Aquifère
5	Marnes du Callovo-oxfordien	Aquitard
6	Calcaires du Bathonien moyen et supérieur	Aquifère
7	Formations marneuses du Bathonien inférieur et moyen	Aquitard
8	Calcaires du Bajocien-Aalénien-Toarcien	Aquifère
9	Formations Lias infra-Toarcien et du Trias	Multicouche localement aquifère
10	Socle	Aquifère mineur

Tableau 3 : Couches du modèle hydrogéologique

Les épaisseurs des différentes couches sédimentaires sont présentées dans le rapport de phase 1. Les formations de socle, cartographiées sous la forme d'une couche unique, ont une épaisseur qui varie entre 5 à 15 m selon la morphologie et l'existence d'un recouvrement (cf. Illustration 8).

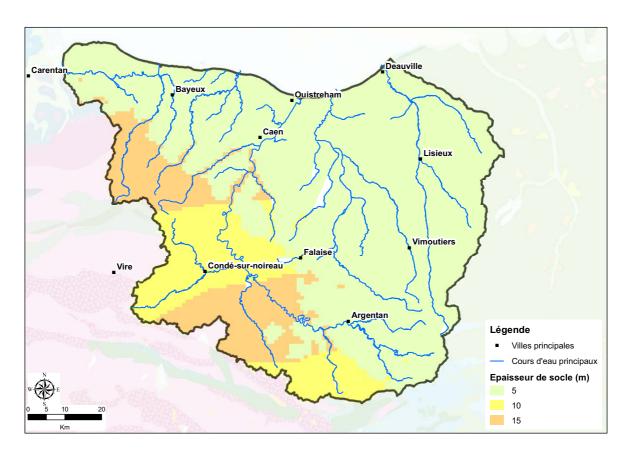


Illustration 8 : Epaisseurs du socle

### 3.2.3. Maillage

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

- le pas et la variabilité spatiale des données de terrain disponibles,
- la taille et la complexité géométrique et hydrogéologique des aménagements à simuler,
- pour le transport de masse, éventuellement, le respect de critères numériques assurant la représentativité des calculs (nombre de Péclet et nombre de Courant),
- la précision de calcul recherchée,
- un nombre de mailles compatible avec une durée de calcul « raisonnable » sur un microordinateur courant.

À titre indicatif, on utilise en général des mailles de 500 à 1000 mètres de côté pour les modèles régionaux, affinées à 200-250 m dans les zones d'un intérêt particulier. »<sup>5</sup>

Il a été choisi d'utiliser une discrétisation en mailles carrées de 1 km de côté sur la majeure partie de l'extension du modèle. Dans une partie de la zone d'étude, dans laquelle une plus

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Barthélemy et Seguin, 2013

grande précision était recherchée – notamment pour prendre en compte avec plus de finesse le réseau hydrographique et la géométrie des formations – la fonctionnalité de Marthe qui permet d'introduire un maillage gigogne constitué de mailles plus petites que celles du maillage principal a été utilisée. Dans cette zone, les mailles mesurent 200 m de côté.

Le modèle géologique a été élaboré avec une taille de maille de 200 m de côté. Le passage de la discrétisation en mailles de 200 m de côté aux mailles de 1 km de côté a été fait en choisissant, pour la topographie et l'altitude du toit des formations, la moyenne des valeurs des mailles de 200 m. Pour les mailles qui comprennent un tronçon du réseau hydrologique, la topographie est définie comme l'altitude minimale des mailles de 200 m de côté afin d'avoir des cotes de fond de cours d'eau correspondant au niveau topographique minimum : c'est en effet cette cote altimétrique qui contrôle le niveau piézométrique dans l'aquifère. Une épaisseur minimale de 1 m a été fixée pour toutes les formations dans toutes les mailles.

L'extension de la zone discrétisée plus finement a été définie en concertation avec le Comité de pilotage. Elle correspond à une zone littorale centrée autour d'un axe Caen-Ouistreham, représentée sur l'Illustration 9. Elle comprend le bassin versant de la Mue, le bassin versant de l'Orne un peu à l'amont de son entrée dans Caen, une partie du bassin versant de la Dives aval, la Gronde et le Dan.

Le tableau suivant récapitule l'extension de chaque couche ainsi que le nombre de mailles qui la compose.

		Nombre de mailles			
Formation	Superficie de la couche (km²)	Total	dans le maillage principal	dans le maillage gigogne	
Alluvions	208	2513	112	2401	
Craie du Cénomanien	1435	1435	1435	0	
Formations du Crétacé infra- cénomanien et Kimméridgien	1649	1649	1649	0	
Calcaires et sables de l'Oxfordien moyen et supérieur	1580	1580	1580	0	
Marnes du Callovo-oxfordien	2828	6431	2678	3753	
Calcaires du Bathonien moyen et supérieur	4146	15567	3670	11897	
Formations marneuses du Bathonien inférieur et moyen	2658	14217	2176	12041	
Calcaires du Bajocien-Aalénien- Toarcien	4391	16307	3894	12413	
Formations Lias infra-Toarcien et du Trias	2956	14511	2475	12036	
Socle	7622	19590	7123	12467	
Total	7622	93800	26792	67008	

Tableau 4 : Caractéristiques du maillage du modèle

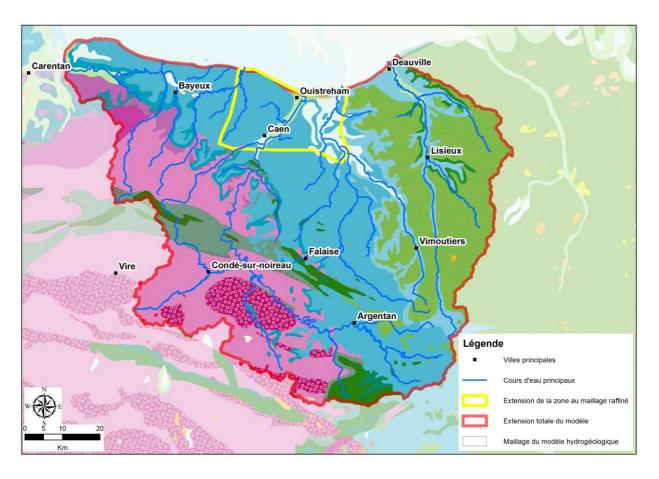


Illustration 9 : Maillage du modèle hydrogéologique

### 3.2.4. Failles

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

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

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

### 3.3. RECHARGE ET RUISSELLEMENT

### 3.3.1. Paramètres nécessaires à la modélisation

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

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

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

Pour chaque maille du modèle, la pluie et l'évapotranspiration sont extraites des chroniques météorologiques locales. Ces chroniques proviennent des données acquises par Météo France aux différentes stations météorologiques de la zone d'étude (voir §3.3.2 et §3.3.3).

Les paramètres du processus de recharge (la capacité de stockage du sol, la partition de la pluie efficace et le temps de demi-percolation) sont affectés d'une incertitude importante car ils ne peuvent être déduits de mesures de terrain. Ces paramètres sont donc réévalués au cours du processus de calage afin de reproduire au mieux les fluctuations de la nappe. Un jeu de paramètres initial a été évalué à partir de simulations préalables effectuées à l'aide du logiciel GARDENIA (voir §3.3.4).

Pour le régime permanent, des flux de ruissellement et de recharge ont été directement appliqués par zones, selon une approche décrite au § 3.3.5.

### 3.3.2. Répartition spatiale des précipitations

La répartition spatiale des précipitations a été faite sur la base d'un découpage en zones homogènes du domaine modélisé. A chacune des zones est associée une chronique pluviométrique représentative de la pluie.

### a) Zonation

Des zones de pluie ont été déterminées sur la base de la grille AURELHY de Météo-France, en délimitant des plages de 100 mm d'amplitude. La zone correspondant à la gamme de 700-800 mm étant particulièrement étendue, elle a été subdivisée en secteurs calqués sur les limites de bassin versant (zones 12 et 13).

Cette approche a fourni un découpage du domaine d'étude en 13 zones représentées sur l'Illustration 10.

Toutes les mailles appartenant à une même zone météorologique reçoivent les mêmes précipitations, dont les valeurs sont déterminées en rattachant une chronique pluviométrique à chacune des zones.

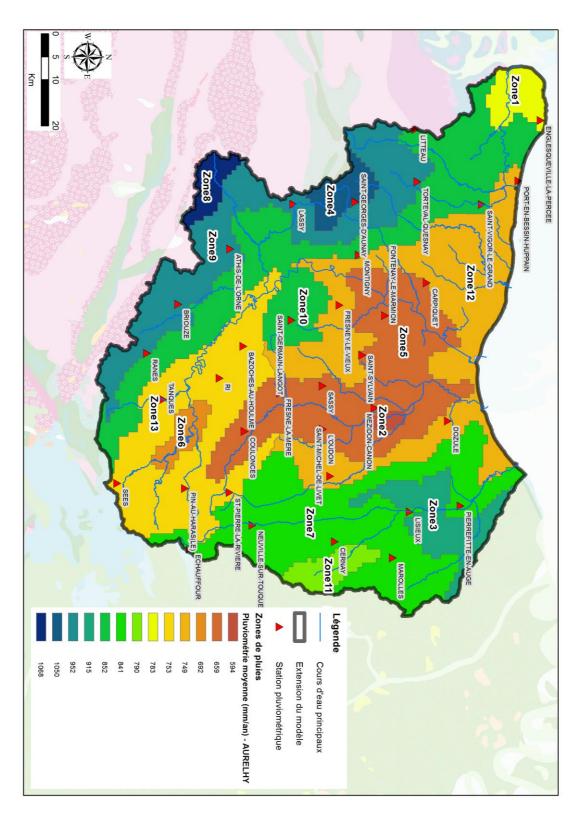


Illustration 10 : Zones de 100 mm d'amplitude d'après la grille AURELHY (Météo-France)

### b) Chronique pluviométrique affectée à chaque zone

Afin de s'assurer d'une bonne cohérence entre chroniques pluviométriques locales et informations fournies par la grille AURELHY au pas kilométrique, la pluviométrie moyenne interannuelle 1971-2000 de chaque station pluviométrique a été comparée à la valeur AURELHY locale. Les résultats sont présentés en Illustration 11. L'écart le plus important est observé à la station de Sassy (6%), ce qui peut s'expliquer par une importante lacune de données entre 1991 et 1994. Les autres écarts demeurent inférieurs à 4% et la corrélation linéaire obtenue montre l'absence de biais systématique entre observations et grille AURELHY. Celle-ci peut donc bien être considérée comme représentative des pluviométries interannuelles locales.

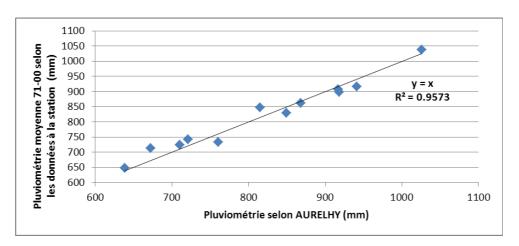


Illustration 11: Comparaison entre pluviométries moyennes 1971-2000 fournies par AURELHY et valeurs calculées à partir des données locales

Dans le détail du calcul, les chroniques des stations de Lisieux et Saint-Vigor-le-Grand ne démarrant qu'en 1994, la pluviométrie moyenne entre 1971 et 2000 à ces stations a été estimée à partir de la corrélation observée sur les autres stations du territoire pour la période 1994-2011 (cf. Illustration 12).

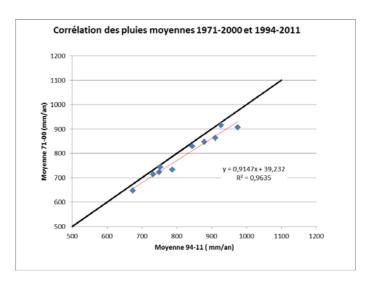


Illustration 12 : Corrélation entre les moyennes annuelles 1994-2011 et 1971-2000 calculées à partir des données météorologique décadaires. La droite noire est une droite de pente 1, la droite rouge est la droite de régression linéaire.

Pour une zone AURELHY donnée, la moyenne interannuelle de la pluviométrie peut légèrement différer de la valeur calculée à la station pluviométrique jugée représentative de la zone. Un facteur correctif a donc été pris en compte lors de l'affectation des chroniques de pluie aux zones de recharge du modèle. Ce facteur correctif est égal au ratio constaté entre la moyenne interannuelle de la pluviométrie décadaire à la station et la moyenne interannuelle de la zone AURELHY correspondante sur la période 1971-2000. Cela revient à ajuster le cumul pluviométrique interannuel, tout en conservant la variabilité de la chronique de pluie.

Les stations pluviométriques retenues pour les différentes zones de recharge sont indiquées dans le Tableau 5. Lorsque plusieurs stations se trouvaient dans la même plage AURELHY, la station la plus centrale, la plus fiable ou bien celle dont la pluviométrie moyenne se rapprochait le plus de la pluviométrie moyenne de la plage AURELHY a été sélectionnée. Pour mémoire, les stations sont, dans la plupart des cas, très cohérentes entre elles : les double-cumuls qui permettent de vérifier la cohérence des valeurs mesurées sur deux stations ont été présentés dans le rapport de phase 1.

Zone	Pluie moyenne 71-00 AURELHY (mm)	Stations correspondantes	Pluie moyenne 71-00 (mm) à la station	Station choisie Raisons du choix (le cas échéant)	
1	783	Englesqueville-la- Percée	794	Englesqueville-la-Percée	
2	594	l'Oudon	647	L'Oudon	
3	915	Lisieux	858	Lisieux	
4	1050	Saint-Georges-d'Aunay Carpiquet	1037 723	Saint-Georges-d'Aunay L'Oudon	
5 659	659	Sassy l'Oudon	713 647	Plus central et plus proche de la moyenne	
6	692	Ri Pin au Haras	734 717	Pin-au-Haras Plus proche de la moyenne	
7	840	Lisieux Cernay	858 829	Cernay Plus central et proche de la moyenne	
8	1067	Briouze Lassy Saint-Georges-d'Aunay	898 913 1037	Saint_Georges d'Aunay Plus proche de la moyenne	
9	952	Briouze Lassy Torteval-Quesnay	898 913 909	Lassy Plus central et proche de la moyenne	
10	852	Saint-Germain-Langot Saint-Vigor-Le-Grand Montigny	862 787 846	Saint-Germain-Langot Plus central et proche de la moyenne	
11	789	Cernay	829	Cernay	
12	748	Carpiquet  Dozule	723 816	Carpiquet Station météorologique de référence (classe 0)	
13	752	Ri Pin au Haras	734 717	Ri Plus proche de la moyenne	

Tableau 5 : Stations pluviométriques utilisées pour les zones de recharge du modèle hydrogéologique

### 3.3.3. Répartition spatiale des évapotranspirations potentielles

La démarche mise en œuvre est similaire à celle adoptée pour les précipitations.

Les données d'évapotranspiration potentielle dont on dispose sont des chroniques sont celles de Météo France, calculées avec la formule de Penman-Monteith. Elles ne sont disponibles sur l'ensemble de la période modélisée que pour 3 stations de mesure : deux dans le domaine modélisé (Carpiquet et l'Oudon) et une à proximité (Alençon). Un test de sensibilité a été réalisé pour estimer l'importance du choix de la station d'ETP sur les résultats de modélisation (cf.§ 4.3.3). Ces tests ont montré que les trois stations ETP conduisaient à des résultats très voisins, aussi bien pour les chroniques de débit que pour les chroniques piézométriques.

La station de l'Oudon ayant la chronique ETP la plus courte, il a été décidé de n'utiliser que les chroniques de Carpiquet et d'Alençon.

Le domaine d'étude a ainsi été découpé en 2 zones, représentées sur l'Illustration 13, délimitées en fonction de la distance à la côte. Aucun facteur correctif n'est appliqué aux chroniques ETP de ces stations.

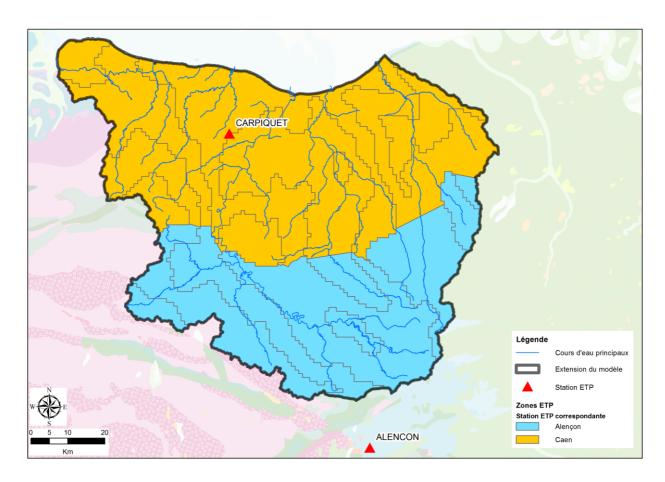


Illustration 13 : Zones d'évapotranspiration potentielle définies pour la modélisation.

# 3.3.4. Modélisation GARDENIA pour la détermination initiale des paramètres de recharge

# a) Présentation du modèle GARDÉNIA

GARDÉNIA est un modèle global conceptuel qui permet de réaliser le bilan hydrologique de bassins versants à partir de chroniques de pluie et d'évapotranspiration potentielle (ETP), représentatives. Une fois calé sur les observations disponibles, le modèle permet de simuler l'évolution du débit à l'exutoire et/ou du niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente pour différentes chroniques de pluie et ETP.

Le fonctionnement du logiciel est décrit en Annexe 3.

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

Les bassins versants sélectionnés pour le calcul de la recharge ont été choisis en fonction de leur lithologie (cf Illustration 15), avec l'objectif de travailler sur des bassins versants aussi homogènes que possible, la lithologie étant supposée être un facteur décisif pour la recharge.

Neuf bassins versants ont ainsi été sélectionnés : l'Aure à Maisons, la Dive au Mesnil, la Dive à Saint-Lambert-sur-Dives, la Mue à Reviers, le Noireau à Cahan, la Seulles à Juvigny, l'Orne à la Courbe, l'Orne à May-sur-Orne, la Touques à Saint-Martin-de-la-Lieue.

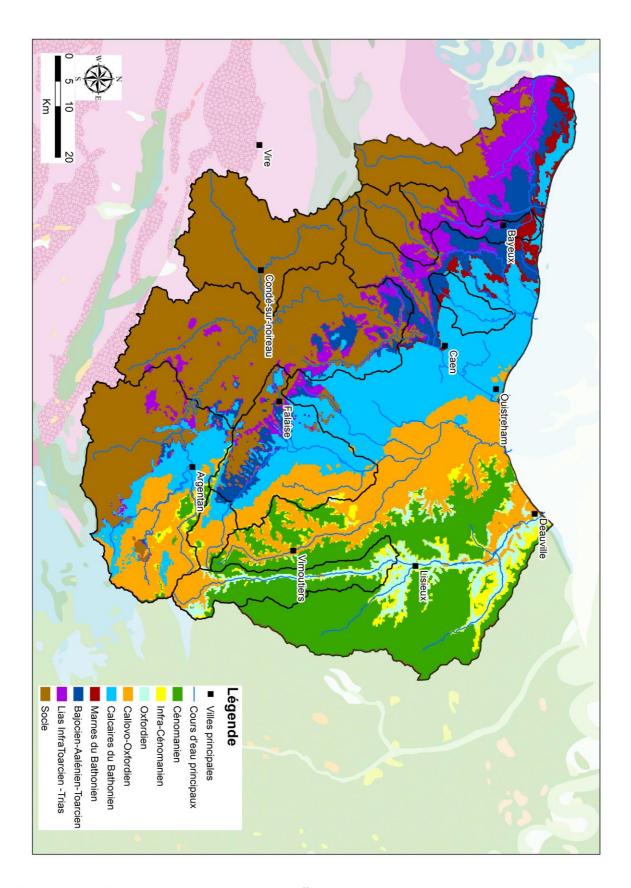


Illustration 14 : Principales entités géologiques affleurantes et tracé des bassins versants sélectionnés

Bassins Versants	Géologie	Lithologie
L'Aure à Maisons	Socle à l'amont, Trias/lias, Bajocien, Marnes de Port-en-Bessin	mixte (marnes, calcaires, altérites du socle)
La Dives au Mesnil	Bathonien à l'ouest, Callovien à l'Est, socle et un peu de Bajocien au sud	calcaire et marnes majoritairement
La Dives à Saint Lambert	Callovien principalement, Bathonien à l'ouest	marnes majoritairement
La Mue à Reviers	Un peu de Bajocien à l'amont mais majoritairement Bathonien	calcaires
Le Noireau à Cahan	Socle	altérites du socle
La Seulles à Juvigny	Socle	altérites du socle
L'Orne à la Courbe	Cénomanien/Callovien/ Bathonien/Lias-Trias/Socle	multiple
L'Orne à May-sur-Orne	Très majoritairement socle depuis la station hydro de la Courbe	altérites du socle en majorité
La Touques à Saint-Martin-de-la-lieue	Un peu de Callovien à l'amont, Cénomanien majoritairement (recouvrement d'argiles à silex), Oxfordien en fond de vallée	majoritairement craie sous argiles à silex

Illustration 15 : Contexte géologique et lithologique des bassins versants modélisés

#### c) Calage

#### Généralités

À l'issue du calage, le modèle fournit :

- les différentes composantes de l'écoulement (évapotranspiration réelle, infiltration, écoulement...),
- une représentation graphique permettant de comparer observations et simulations,
- des critères numériques d'évaluation de la qualité de l'ajustement.

La qualité du calage et son évolution sont appréciées visuellement par superposition des chroniques mesurées et calculées de niveau piézométrique et de débit, ainsi que par des critères numériques globaux. À l'issue du calage, on peut considérer que l'on dispose d'un jeu de paramètres représentatifs du bassin versant, sous réserve que les valeurs des paramètres soient hydrologiquement réalistes.

Les limites et incertitudes liées au calage sont présentées en Annexe 3.

#### • Paramètres hydrologiques du modèle

On pourra se reporter à l'Annexe 3 pour une description des équations utilisées dans le logiciel.

Les paramètres hydrologiques du modèle sont au nombre de huit.

Quatre paramètres dimensionnels caractérisent les différents réservoirs :

- capacité de stockage du sol (mm), ou « réserve disponible pour l'évapotranspiration » ;
- hauteur d'eau dans le réservoir représentant la Zone Non Saturée (ZNS) pour laquelle il y a égale répartition entre écoulement rapide et percolation;
- temps de demi-percolation du réservoir représentant la ZNS (mois);
- temps de demi-décroissance du réservoir souterrain (mois).

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

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

En outre, deux autres paramètres peuvent être ajustés lors du calage d'un modèle lorsque celui-ci prend en compte un niveau piézométrique :

- le coefficient d'emmagasinement « équivalent » ;
- le niveau de base local.

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

## • Données d'entrée et données de calage

Les données d'entrée sont les précipitations, l'évapotranspiration potentielle et, le cas échéant, les prélèvements. Les données de calage sont de deux types : niveaux piézométriques et données de débit. Toutes les données collectées et analysées ont été présentées dans le rapport de phase 1.

La période de calage commune aux différents bassins correspond aux années 1994-2011 (données de prélèvement indisponibles avant 1994) avec une période d'initialisation<sup>6</sup> allant de 1971 à 1994. Pour les bassins sans prélèvements, la période de calage s'étend de 1982 à 2011, avec 10 années d'initialisation (1971-1981).

L'Illustration 16 et le Tableau 6 synthétisent les données d'entrée et de calage initialement identifiées puis finalement retenues pour les différents modèles. Les données barrées dans le tableau ont soit des chroniques trop courtes, soit possèdent trop de lacunes ; elles ont donc été exclues. Les données qui ont été retenues apparaissent en gras dans le tableau.

-

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Il s'agit d'une période non utilisée pour le calage qui permet d'initialiser le remplissage des différents réservoirs du modèle.

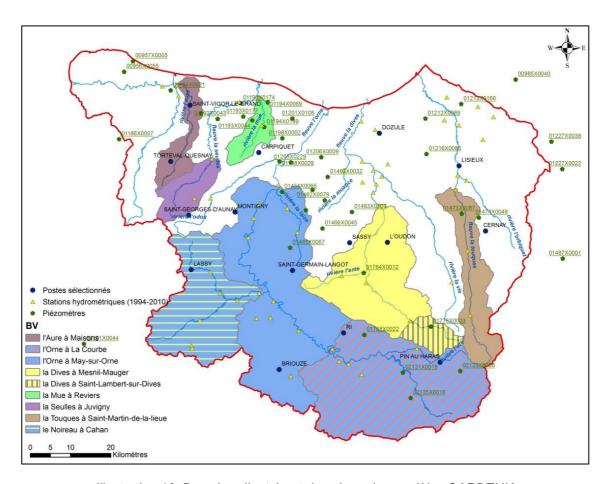


Illustration 16 :Données d'entrée et de calage des modèles GARDENIA

BV	PLUIE	ЕТР	PIEZOMETRE	Débits disponibles
La Mue à Reviers - I4053010	CARPIQUET (1944)	caen	01194X0069 (Bathonien 1969) 01194X0149 (Bathonien-1971) 01193X0044 (Bathonien-1971)	08/1970 - 12/2011
La Seulles à Juvigny-sur- Seulles -l4022010	St Georges d'Aunay (1971) Torteval-Quesnay (1971)	caen		09/1981 - 11/2011
L'Aure à Maisons - I5321510	ST-Vigor-Le-Grand (1992) Torteval-Quesnay(1971) Litteau (1971)	caen	<b>01184X0021 (Bajocien 1974)</b> 01191X0004 (Bajocien 1974) 01186X0007 (Socie 2007)	09/1981 - 12/2011
La Dives au Mesnil- Mauger - I2051040	L'Oudon (1964) Frene-La-Mere (1971) L'Eglise (1985) Sassy (1971)	caen l'oudon	01764X0012 (Bathonien-2007)	05/1993 - 11/2011
La Dives à Saint-Lambert- sur-Dive - I2001010	<del>La Boulangerie (1987)</del> Pin au Haras (1961)	caen l'oudon	01776X0023 (Bathonien 2006) 01768X0022 (Bathonien 1995)	07/1978 - 12/2011
La Touques à Saint- Martin-de-la-Lieue - I1031010	<del>Les Cotieres (1974)</del> <del>St Martin (1968)</del> Cernay (1971)	caen l'oudon alençon	01473X0087 (Cénomanien-1974) 01474X0048 (Cénomanien-2004)	10/1980 - 11/2011
Le Noireau à Cahan - 13462010²	Lassy (1967) <del>La Ribardière (1968)</del>	caen		02/1997 - 12/2011
L'Orne à May-sur-Orne - 13621010	Fresney-Le-Vieux (1989) St-Germain-Langot (1971) Le Mesnil Richard (1971) Briouze (1951) Fontenay Le Marmion (1989) Montigny (1971) Houay (1970)	caen l'oudon alençon	01465X0067 (Lias InfraToarcien/Trias-2008) 01454X0065 (Bajocien-1973) 01461X0012 (Bathonien-1970) 02135X0016 (Bathonien-2000) 02131X0018 (Bathonien-1995) 02133X0008 (Bathonien-1995) 01768X0022 (Bathonien-1995)	10/1983 - 12/2011
L'Orne à la Courbe - 13121010	Houay (1970) <del>Le Château (1971)</del> <del>La Cressonnière (1951)</del> <b>Pin au Haras (1961)</b> <del>Lycee Agricole (1952)</del>	caen l'oudon alençon	02135X0016 (Bathonien-2000) 02131X0018 (Bathonien-1995) <b>02133X0008 (Bathonien-1995)</b> 01768X0022 (Bathonien-1995)	02/1997 - 12/2011

Tableau 6 : Bassins versants ayant fait l'objet de modélisations GARDENIA et données associées

## d) Résultats du calage

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

Tous les résultats relatifs à ces modélisations de recharge sont présentés en Annexe 3.

Différentes gammes de valeurs des paramètres ressortent en fonction de la lithologie des bassins versants.

Le caractère plus ou moins infiltrant des formations affleurantes se reflète dans la valeur de la hauteur de répartition entre ruissellement et percolation (coefficient RuiPerc). Ainsi, le bassin versant de la Dives, constitué essentiellement de marnes dans sa partie amont et de formations plus perméables à l'aval, est simulé avec un RuiPerc de l'ordre de 5 mm en amont (Saint-Lambert-sur-Dives), valeur traduisant un fort ruissellement, et de 35 mm plus en aval (Mesnil-Mauger), valeur reflétant un contexte mixte). Pour le bassin versant de la Touques, constitué principalement à l'affleurement de craie cénomanienne sous recouvrement d'argiles à silex, le RuiPerc est assez élevé, autour de 90 mm, traduisant une prédominance de l'infiltration sur le ruissellement.

Pour le bassin versant de la Mue, il a été nécessaire de réaliser une modélisation complémentaire en prenant en compte deux réservoirs souterrains. Cette modification a permis d'améliorer nettement la restitution des écoulements et la cohérence des paramètres de calage avec le caractère très infiltrant des formations affleurantes.

Ces résultats de simulation ont servi à définir un jeu de paramètres initiaux pour l'ensemble des mailles du modèle spatialisé. L'affectation de valeurs aux paramètres de recharge a été effectuée par plages associées aux zones d'affleurement des couches du modèle ou à des bassins versants hydrographiques lorsque la zone considérée était très hétérogène (cas des bassins versants de l'Aure et de la Drôme, ou du socle qui a été divisé en plusieurs zones de recharge du fait des comportements différents observés dans les bassins de l'Orne à May-sur-Orne, du Noireau à Cahan et de la Seulles à Juvigny-sur-Seulles).

Les zones de recharge et les paramètres associés affectés initialement au modèle sont présentés à l'Illustration 17 et au Tableau 7. Pour le Bathonien et le Bajocien, les paramètres considérés se rapprochent de ceux de la Mue à Reviers ; quelques modifications ont cependant été apportées, notamment au temps de demi-percolation estimé à presque 40 mois par les modélisations GARDENIA. Ce temps particulièrement élevé reflète exclusivement le comportement pluriannuel des fluctuations de la nappe, au détriment des fluctuations saisonnières pourtant présentes (comme l'a montré la modélisation GARDENIA du bassin versant avec deux réservoirs souterrains). Les temps de demi-percolation retenus pour la modélisation maillée demeurent compris entre 2 et 10 mois afin de rendre compte des fluctuations saisonnières.

Les paramètres de recharge ont ensuite été revus lors du processus de calage du modèle maillé.

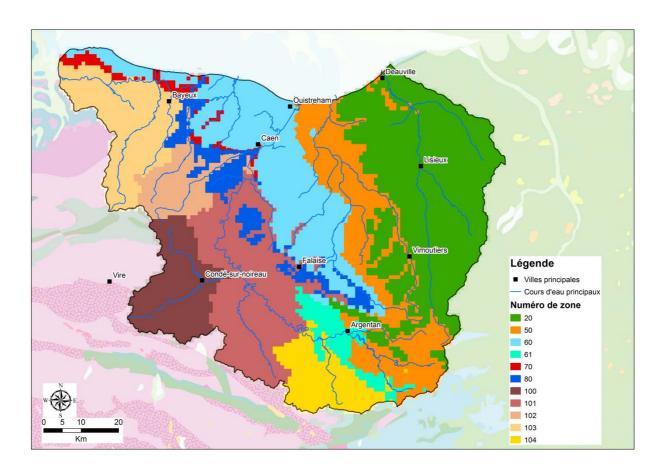


Illustration 17 : Zones de recharge retenues pour le modèle maillé. (se reporter au Tableau 7 pour l'identification des zones)

Numéro de zone	Couche affleurante majoritaire	BV modélisé avec GARDENIA correspondant	Capacité de stockage (mm)	Hauteur d'équipartition ruissellement/infiltration RUIPER (mm)	Temps de demi- percolation (mois)
20	Cénomanien	La Touques à Saint-Martin-de-la-lieue	299	90	0.564
30	Callovo- Oxfordien	La Dives à Saint Lambert (ETP Caen)	210	5.7	2.34
60	Calcaires du Bathonien	La Mue à Reviers (modifié)	310	85	10
61	Calcaires du Bathonien	La Mue à Reviers (modifié)	300	100	2
70	Marnes du bathonien inf.	La Dives à Saint Lambert (ETP Caen)	210	2.7	2.34
80	Bajocien- Aalénien- Toarcien	La Mue à Reviers (modifié)	310	90	7
100	Socle	Le Noireau à Cahan	137	6.5	10.7
101	Socle	L'Orne à May-sur-Orne	229	8.7	3.68
102	Socle	La Seulles	177	7.1	5.7
103	Socle	L'Aure à Maisons	425	10.4	3.1
104	Socle	L'Orne à la Courbe (ETP Caen)	146	5.3	8.95

Tableau 7 : Valeurs initiales des paramètres de recharge affectés au modèle.

## 3.3.5. Données utilisées pour les calculs en régime permanent

Pour les simulations en régime permanent (cf. 4.1.1b pour les détails sur la procédure de calage en régimes permanent et transitoire), il est nécessaire d'appliquer un flux de recharge et un flux de ruissellement moyens dans chacune des mailles.

Ces flux sont fonction de la pluviométrie et des paramètres de recharge. Pour chaque zone de recharge, un flux de recharge et un flux de ruissellement ont été calculés à partir des résultats des modélisations GARDENIA.

Les pluies considérées pour chaque zone sont les pluies moyennes 1971-2000 de la grille AURELHY.

Le pourcentage de pluie efficace par rapport à la pluie totale a été supposé proportionnel à la pluie moyenne. La relation de proportionnalité a été établie en utilisant les résultats fournis par GARDENIA, comme présenté sur l'Illustration 18. Les bassins versants de la Mue à Reviers et de l'Aure à Maisons n'ont pas été pris en compte car les pourcentages de pluie efficace

obtenus sur ces bassins versants sont significativement plus bas que pour les autres zones (ces faibles valeurs obtenues avec GARDENIA pourraient être expliquées, pour le bassin versant de l'Aure, en partie par des pertes karstiques, pour le bassin versant de la Mue, en partie par des prélèvements non répertoriés). Lorsque plusieurs résultats – correspondant à différentes chroniques d'ETP – étaient disponibles, ils ont été tous utilisés.

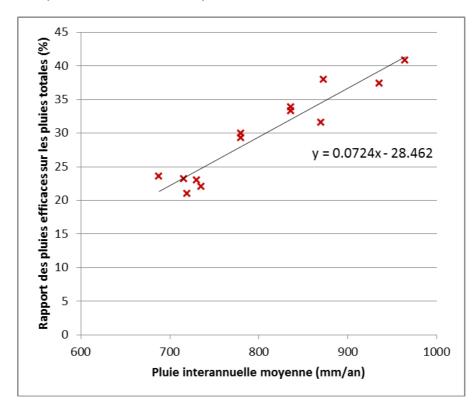


Illustration 18 : Relation entre le rapport pluies efficaces/pluies totales et les pluies totales pour les différentes zones de recharge considérées, et droite de régression associée.

Les valeurs initiales des flux moyens de recharge et de ruissellement utilisés pour les simulations en régime permanent ont été déterminées à partir des pourcentages moyens de ruissellement et d'infiltration (obtenus par les modélisations GARDENIA pour les différentes zones de sol) ; ces valeurs ont ensuite été revues au cours de la procédure de calage.

Les distributions initiales des flux de ruissellement et d'infiltration sont présentées en Annexe 4.

#### 3.4. RESEAU HYDROGRAPHIQUE

# 3.4.1. Représentation des écoulements de surface et des échanges napperivière

Plusieurs méthodes de représentation des relations nappe-rivière sont classiquement utilisées dans les modèles d'écoulement souterrain. Deux sont utilisées pour le modèle hydrogéologique du Bajo-Bathonien de Basse-Normandie :

 prise en compte de manière explicite du réseau hydrographique principal en tant qu'entité hydraulique bien individualisée. Les cours d'eau simulés de cette manière ont été sélectionnés à partir de la base de données BD Carthage, après discussion avec le Comité de pilotage. Le réseau hydrographique ainsi modélisé est représenté en Illustration 19. Pour ces cours d'eau, chaque maille du réseau hydrographique se voit assigner plusieurs paramètres régissant les échanges nappe-rivière.

utilisation de « mailles de débordement » pour les mailles situées sur le tracé de cours d'eau secondaires. Avec cette approche, les cours d'eau sont simulés par une succession de mailles dans lesquelles la nappe peut déborder. En pratique, chaque maille située sous un cours d'eau se voit attribuer une cote de débordement correspondant à la cote altimétrique du fil d'eau. Si le niveau piézométrique calculé dans la maille dépasse cette cote, le niveau piézométrique est ramené à la cote de débordement attribuée à la maille et la hauteur d'eau excédentaire est traduite par un débit de débordement qui rejoint le tronçon le plus proche du réseau hydrographique.

En pratique, toutes les mailles affleurantes (hormis le réseau hydrographique explicite) ont été définies comme des mailles à débordement. Il a été vérifié après calage du modèle que la localisation des débordements simulés par le modèle était cohérente avec la localisation des sources, des zones humides ou de petits cours d'eau non pris en compte de façon explicite (cf. Illustration 38).

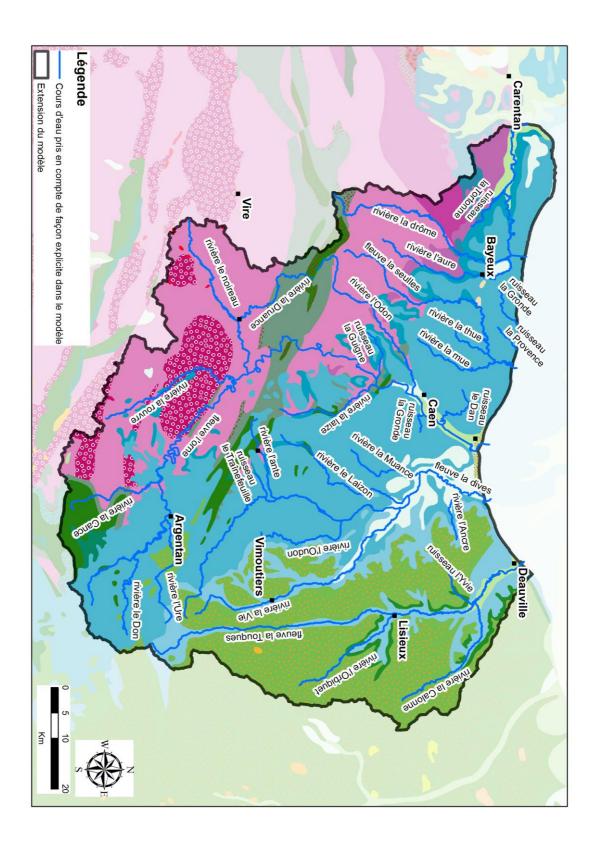


Illustration 19 : Réseau hydrographique pris en compte de manière explicite dans le modèle

#### 3.4.2. Les paramètres définissant le réseau hydrographique

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

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

Les interactions entre la nappe et la rivière dépendent de la différence entre la hauteur d'eau dans la rivière et le niveau piézométrique.

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

- <u>Sa largeur et sa longueur.</u> La longueur des tronçons est calculée sur chaque maille à l'aide du logiciel ArcGis. Elle correspond à l'intersection entre le cours d'eau et la maille du modèle. La largeur des rivières a été déterminée à l'aide de photos satellites.
- La cote absolue du fil d'eau dans le tronçon. Elle est définie arbitrairement comme se situant à 0.8 m au-dessous du point le plus bas du MNT au pas de 200 m (MNT constitué pour le modèle géologique à partir du MNT de l'IGN au pas de 50 m). Cette cote a été vérifiée et, le cas échéant, corrigée pour garantir qu'une maille située à l'aval hydraulique d'une autre se voit bien attribuer une cote de fil d'eau inférieure à celle de la maille amont.
- <u>La cote absolue du fond de la rivière</u>. La hauteur d'eau dans la rivière a été fixée arbitrairement à 0.5 m. La cote du fond de la rivière est donc calée à la cote du fil d'eau dans la rivière moins 0.5 m.
- <u>L'épaisseur du lit de la rivière.</u> Une épaisseur uniforme de 0.2 m a été retenue pour l'ensemble du domaine modélisé.
- <u>La perméabilité du lit de la rivière</u>. La perméabilité du lit de la rivière n'étant généralement pas connue, elle a été fixée arbitrairement à 10<sup>-4</sup>m/s (avant calage) sur tous les cours d'eau modélisés. Ce paramètre a ensuite été revu en cours de calage, notamment pour restituer les fluctuations observées sur certains piézomètres situés en bordure de cours d'eau.

### 3.4.3. Prise en compte d'un drain karstique

Le réseau karstique creusé dans le Bajocien au niveau de l'Aure inférieur est bien connu, notamment par des tests de traçage effectués à partir des pertes de Tourneresse et de Fosse Soucy, qui situent assez précisément les résurgences sur le platier de Port-en-Bessin (cf. rapport de phase 1).

Ce drain karstique est modélisé de façon explicite avec MARTHE, à la manière d'un tronçon de cours d'eau. L'altitude d'un drain dans les mailles qu'il traverse est estimée par interpolation linéaire entre l'altitude des pertes et celle des résurgences.

Initialement, deux autres drains ont été introduits dans le modèle pour rendre compte des variations de niveaux (niveau de base fixe et variations épisodiques rapides) observées aux piézomètres de Saint-Martin-des-Entrées dans le Bajocien et de Vieux-Fumé dans le Bathonien. Faute de parvenir à un calage satisfaisant, ces drains n'ont finalement pas été retenus et le comportement karstique observé n'est donc pas reproduit par les simulations.

#### 3.5. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES INITIAUX

Des paramètres initiaux ont été attribués à chaque couche du modèle sur la base des données issues des pompages d'essai et des connaissances mises à disposition par le Comité de pilotage. Ces paramètres ont été réévalués lors de la phase de calage afin de restituer au mieux les niveaux et débits observés.

#### 3.5.1. Perméabilités

#### a) Données utilisées

Une synthèse des données de perméabilité disponibles est proposée ci-après. Pour mémoire, le rapport de phase 1 fournit une carte de localisation des 215 valeurs de transmissivité recensées dans la zone d'étude. Le Tableau 8 en présente par ailleurs une synthèse statistique.

À noter qu'il existe un biais notoire dans les données présentées puisque, d'une part, les valeurs obtenues correspondent à des sites réputés favorables à la production d'eau souterraine et que, d'autre part, un forage « sec »<sup>7</sup> - c'est-à-dire un forage peu productif - ne donne pas lieu à pompage d'essai. Les valeurs présentées correspondent donc en règle générale à la fourchette haute des transmissivités.

Transmissivité (m²/s)	Cénomanien	Oxfordien	Bathonien	Bajocien	Trias	Socle
Nb. d'observations	9	12	125	23	23	23
Minimum	3.6E-04	2.9E-03	8.3E-06	2.8E-05	4.2E-04	3.0E-05
Maximum	0.02	0.04	0.70	0.27	0.03	0.007
1er Quartile	5.3E-04	3.7E-03	1.1E-03	1.0E-03	1.4E-03	2.3E-04
Médiane	4.0E-03	1.4E-02	5.0E-03	1.0E-02	2.2E-03	5.0E-04
3ème Quartile	1.6E-02	1.7E-02	1.5E-02	2.3E-02	8.0E-03	1.6E-03
Moyenne	7.3E-03	1.4E-02	2.1E-02	3.4E-02	6.0E-03	1.3E-03

Tableau 8 : Statistiques sommaires des valeurs de transmissivité recensées dans la zone d'étude

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Un forage dit « sec » n'est pas nécessairement dépourvu d'eau mais il ne peut fournir qu'un débit très inférieur au débit attendu.

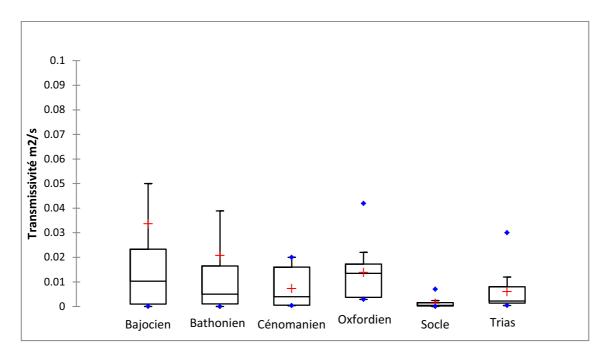


Illustration 20 : Représentation en boîte à moustaches des transmissivités connues par aquifère (la valeur moyenne est en rouge et la médiane correspond à la barre noire dans la boîte)

Des valeurs initiales de perméabilité ont été estimées à partir de ces transmissivités et de l'épaisseur moyenne des différentes couches (cf. ci-après).

La connaissance de l'hydrogéologie locale a permis d'élaborer des hypothèses de spatialisation de la perméabilité, notamment en se basant sur la morphologie des terrains (Bajocien) ou sur les évolutions latérales de faciès lithologique. Ces approches ont été élaborées et discutées avec le Comité de pilotage.

#### b) Perméabilités initiales utilisées dans le modèle maillé

#### Alluvions

La migration vers le NE du lit de la Touques dans sa partie aval a conduit à une différenciation lithologique entre la zone de dépôt des alluvions anciennes – principalement sableuses – et celle dans laquelle se déposent les alluvions plus récentes (lit actuel de la Touques), avec une lithologie plus argileuse.

Ceci amène à considérer une perméabilité initiale relativement faible (10<sup>-7</sup> m/s) pour les alluvions modernes de la vallée de la Touques, tandis qu'une valeur initiale de 10<sup>-5</sup> m/s a été affectée aux autres zones alluviales (Dives, Orne et Aure inférieure).

#### • Craie du Cénomanien

Une perméabilité initiale uniforme de 10<sup>-5</sup> m/s est assignée à l'ensemble de la couche.

#### • Formation du Crétacé Infra-Cénomanien et Kimméridgien

Le Crétacé inférieur de l'Infra-Cénomanien et le Kimméridgien regroupent des niveaux plus ou moins perméables. Certaines formations (glauconie de base, argiles du Kimméridgien...) sont peu à très peu perméables, ce qui explique que l'aquifère sus-jacent du Cénomanien soit

perché, tandis que d'autres (sables verts de l'Albien par exemple) sont des niveaux plus productifs, bien que d'épaisseur restreinte.

Pour rendre compte de cette stratification sans multiplier le nombre de couches, un coefficient d'anisotropie entre perméabilités horizontale et verticale a été utilisé, avec une perméabilité verticale (10<sup>-8</sup> m/s) cent fois plus faible que la perméabilité horizontale (10<sup>-6</sup> m/s). Ces valeurs sont initialement supposées uniformes dans tout le domaine modélisé.

## • Calcaires et sables de l'Oxfordien moyen et supérieur

Les calcaires et sables de l'Oxfordien regroupent plusieurs niveaux distincts :

- les sables de Glos (Oxfordien supérieur) dont la limite d'extension se situe vers le Sud de Lisieux et dont l'épaisseur peut atteindre 30 m.
- les calcaires de l'Oxfordien moyen, coralligènes et productifs au Nord de Lisieux, moins coralligènes et moins exploités plus au Sud
- le calcaire gréseux de Roussier de Gacé (Oxfordien inférieur) présent dans le Sud de la vallée de la Touques.

L'extension de ces formations et leurs propriétés hydrodynamiques étant trop peu connues pour délimiter différentes zones de perméabilité, une perméabilité initiale uniforme de 10<sup>-5</sup> m/s a été appliquée à toute cette formation.

#### Marnes du Callovo-Oxfordien

Bien qu'à dominante marneuse très prononcée, cette formation présente une certaine hétérogénéité, avec des marnes plus ou moins sableuses suivant les zones de dépôt. Dans la zone d'Argentan, la lithologie est assez sableuse et potentiellement plus perméable. Une perméabilité initiale de 10<sup>-7</sup> m/s a ainsi été appliquée. Sous les marais de la Dives, les perméabilités sont supposées être un peu plus faibles (5.10<sup>-8</sup> m/s). Plus à l'Ouest, vers le sillon marneux, les perméabilités sont supposées très faibles (10<sup>-9</sup> m/s), la proximité à ce sillon se traduisant par un enrichissement en argiles.

Les différentes zones de perméabilité sont présentées sur l'Illustration 21.

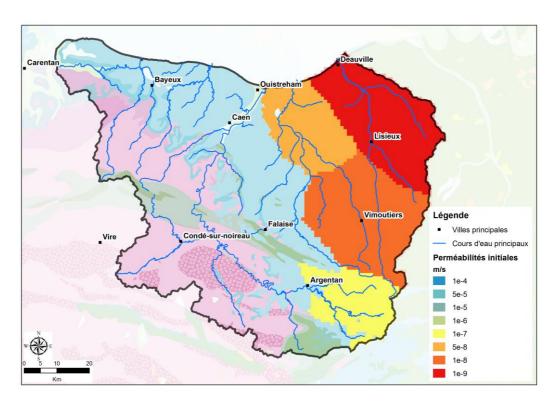


Illustration 21 : Perméabilités initiales affectées à la couche des marnes du Callovo-Oxfordien (fond : carte géologique à l'échelle 1M)

#### • Calcaires du Bathonien moyen et supérieur

Les valeurs de transmissivité mesurées en forage ne montrent pas de différence significative de perméabilité entre la partie Nord et la partie Sud (zone d'Argentan) de la formation. En revanche, une gradation Sud-Ouest / Nord-Est est attendue, compte tenu de l'augmentation des teneurs argileuses en direction du sillon marneux : 4 classes de perméabilité sont distinguées, avec des valeurs comprises entre  $10^{-4}$  m/s dans la partie Sud-Ouest et  $10^{-7}$  m/s vers le sillon marneux de la partie Nord-Est.

Les différentes classes de perméabilité sont présentées à l'Illustration 22.

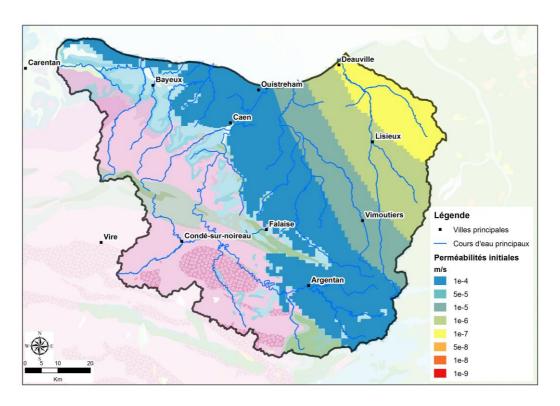


Illustration 22 : Perméabilités initiales affectées à la couche des calcaires du Bathonien moyen et supérieur

#### Formations marneuses du Bathonien inférieur et moyen

Aucune donnée de transmissivité mesurée en forage n'est disponible pour cette formation, ce qui s'explique par sa faible perméabilité. A partir de l'observation de phénomènes de drainance dans ces marnes, Dassibat, Pascaud et Roux (1980) en estiment la perméabilité autour de 10<sup>-8</sup> m/s, valeur retenue pour initier le calage.

### Calcaires du Bajocien-Aalénien-Toarcien

Les calcaires du Bajocien sont très karstifiés mais la géométrie des karts est très peu connue (hormis les pertes de l'Aure à Maisons).

Comme observé fréquemment dans les formations calcaires et crayeuses, il est vraisemblable que la fracturation et la perméabilité de la formation dépendent en partie du contexte géomorphologique. Il a donc été considéré que la perméabilité des vallées était supérieure (10<sup>-4</sup> m/s) à celle des plateaux (5.10<sup>-5</sup> m/s). Lorsque la formation est sous couverture, sa perméabilité est supposée plus faible, autour de 10<sup>-6</sup> m/s, voire 10<sup>-7</sup> m/s à l'extrême NE de la zone d'étude.

Ces différentes zones de perméabilité sont représentées sur l'Illustration 23.

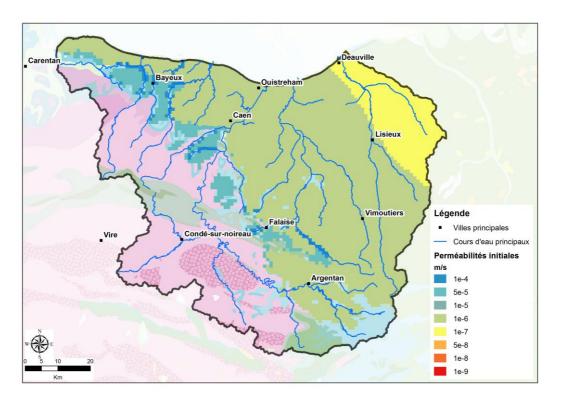


Illustration 23 : Perméabilités initiales affectées à la couche des calcaires du Bajocien-Aalénien-Toarcien

#### • Formations du Lias infra-Toarcien et du Trias

Ces formations, notamment les dépôts fluviatiles du Trias, présentent une variabilité latérale très importante. En l'absence d'une cartographie lithologique de ces formations, une perméabilité initiale homogène de 10-6 m/s a été appliquée, en gardant en mémoire la possibilité d'une anisotropie de perméabilité horizontale/verticale dans les secteurs où les formations marneuses du Lias recouvriraient les formations plus perméables du Trias.

#### Socle

Les perméabilités sont supposées être nettement supérieures en zone d'affleurement (10<sup>-5</sup> m/s) que sous couverture (10<sup>-7</sup> m/s), selon la distribution spatiale représentée à l'Illustration 24.

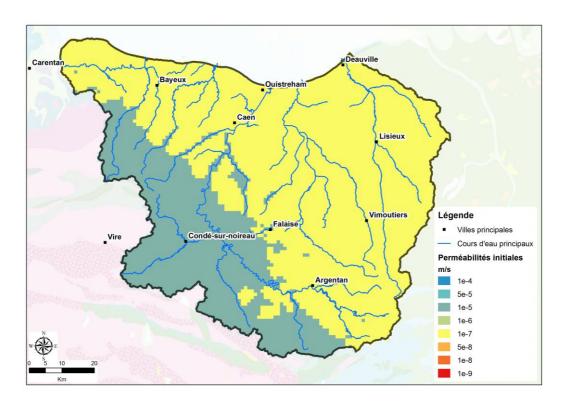


Illustration 24 : Perméabilités initiales affectées au socle

Les perméabilités attribuées à chaque couche sont récapitulées dans le tableau ci-après.

Couche du modèle	Perméabilités initiale(en m/s)
Alluvions	- vallée de la Touques : 10 <sup>-/</sup> m/s - autres : 10 <sup>-5</sup> m/s
Craie du Cénomanien	10 <sup>-5</sup> m/s
Formations du Crétacé infra- cénomanien et Kimméridgien	Verticale : 10 <sup>-8</sup> / Horizontale : 10 <sup>-6</sup> m/s
Calcaires et sables de l'Oxfordien moyen et supérieur	10 <sup>-5</sup> m/s
Marnes du Callovo-oxfordien	<ul> <li>zone d'Argentan : 10<sup>-7</sup> m/s</li> <li>marais de la Dives : 5.10<sup>-8</sup> m/s</li> <li>Ailleurs du SO vers le NE : de 10<sup>-7</sup> à 10<sup>-9</sup> m/s</li> </ul>
Calcaires du Bathonien moyen et supérieur	D'Ouest en Est : de 10 <sup>-4</sup> à 10 <sup>-7</sup> m/s
Formations marneuses du Bathonien inférieur et moyen	10 <sup>-8</sup> m/s
Calcaires du Bajocien- Aalénien-Toarcien	<ul> <li>A l'affleurement dans les vallées : 10<sup>-4</sup> m/s, sur les versants 5.10<sup>-5</sup> m/s</li> <li>Sous couverture : 10<sup>-6</sup> à 10<sup>-7</sup> m/s</li> </ul>
Formations Lias infra- Toarcien et du Trias	10 <sup>-6</sup> m/s
Socle	10 <sup>-5</sup> m/s à l'affleurement, 10 <sup>-7</sup> m/s sous couverture

Tableau 9 : Perméabilités initiales affectées aux différentes couches du modèle, avant calage

### 3.5.2. Coefficient d'emmagasinement

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

- pour les nappes libres, le coefficient d'emmagasinement est assimilable à la porosité efficace, autour de 10<sup>-1</sup> à 10<sup>-2</sup>;
- pour les nappes captives, l'emmagasinement correspond au volume d'eau stocké/libéré par compression/décompression de l'eau et de la roche. Le coefficient d'emmagasinement spécifique (emmagasinement par épaisseur unitaire) est beaucoup plus faible (10<sup>-7</sup> à 10<sup>-5</sup> m<sup>-1</sup>) que le coefficient d'emmagasinement libre.

#### a) Données utilisées

Le coefficient d'emmagasinement peut être déduit d'un pompage d'essai si les rabattements ont été mesurés dans un piézomètre voisin du puits de pompage.

78 valeurs de coefficient d'emmagasinement ont été recensées dans la zone d'étude : elles concernent tous les aquifères, en conditions libres ou captives.

La répartition des valeurs par aquifère et la liste des valeurs figurent dans le rapport de phase 1. Des statistiques synthétiques sont présentées au Tableau 10 (à l'exclusion du Cénomanien et du socle pour lesquels le nombre de valeurs est insuffisant).

Emmagasinement	Cénomanien	Oxfordien	Bathonien	Bajocien	Trias	Socle
Nb. d'observations	2	10	39	9	16	2
Minimum	2.0E-03	3.5E-05	1.0E-05	7.4E-08	1.0E-05	6.5E-02
Maximum	4.0E-03	5.0E-03	1.0E-01	3.0E-02	5.2E-02	1.0E-01
1er Quartile		8.1E-05	1.8E-04	2.0E-04	3.5E-05	
Médiane		1.6E-04	1.0E-03	8.0E-04	1.1E-03	
3ème Quartile		3.9E-03	8.5E-03	2.0E-03	1.5E-02	

Tableau 10 : Statistiques synthétiques des valeurs de coefficient d'emmagasinement recensées dans la zone d'étude

Ces statistiques montrent que la majorité des valeurs concerne des domaines captifs à semicaptifs (valeurs médianes inférieures ou égales à 10<sup>-3</sup>). Notons que la valeur minimum donnée pour le Bajocien est douteuse (7.4 10<sup>-8</sup>).

Compte tenu du faible nombre de valeurs disponibles, notamment pour les nappes libres, la spatialisation de ces paramètres (emmagasinement libre et emmagasinement captif) a été effectuée en concertation avec le Comité de pilotage, principalement sur la base des connaissances hydrogéologiques régionales.

#### b) Valeurs initiales d'emmagasinement utilisées dans le modèle avant calage

#### Emmagasinement captif

L'emmagasinement captif spécifique est considéré égal à 10<sup>-6</sup> m<sup>-1</sup> dans toutes les couches du modèle.

#### • Emmagasinement libre

Les valeurs d'emmagasinement libre diffèrent d'une couche à une autre. Ces valeurs figurent dans le Tableau 11.

Couche du modèle	Emmagasinement libre initial
Alluvions	15%
Craie du Cénomanien	5%
Formations du Crétacé infra-cénomanien et Kimméridgien	5%
Calcaires et sables de l'Oxfordien moyen	5 % dans la partie Nord
et supérieur	1% dans la partie Sud
Marnes du Callovo-oxfordien	1%
Calcaires du Bathonien moyen et supérieur	3%
Formations marneuses du Bathonien inférieur et moyen	1%
Calcaires du Bajocien-Aalénien-Toarcien	1%
Formations Lias infra-Toarcien et du Trias	5%
Socle	1%

Tableau 11 : Valeurs initiales d'emmagasinement libre affectées aux différentes couches du modèle

#### 3.6. PRELEVEMENTS

Les volumes annuels prélevés par les collectivités, les industries et les irrigants ont été transmises par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie pour la période allant de 1994 à 2010. La description de ces données figure dans le rapport de phase 1.

#### 3.6.1. Prélèvements pour l'alimentation en eau potable

## a) Synthèse des prélèvements

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

Environ 85 % de ces prélèvements se font en eau souterraine. L'évolution depuis 1994 (cf. Illustration 25) montre une légère baisse des prélèvements jusqu'en 2007 puis une légère hausse entre 2007 et 2010.

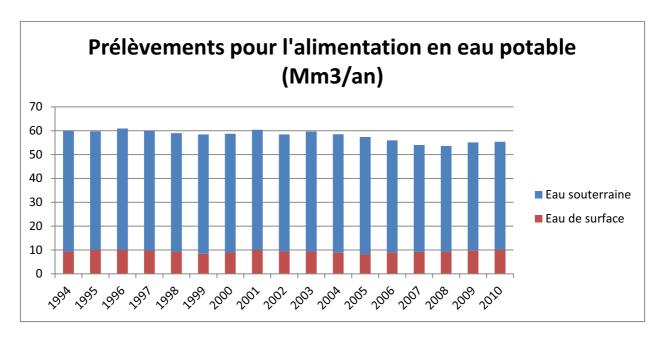


Illustration 25 : Volumes annuels prélevés pour l'alimentation en eau potable dans les eaux de surface (en bleu) et dans les eaux souterraines (en rouge).

## b) Répartition mensuelle

Des valeurs de distribution mensuelle ont été communiquées par différents syndicats de la zone d'étude uniquement pour l'année 2002. Ces données, présentées sur les illustrations suivantes, montrent que la répartition mensuelle des prélèvements s'organise différemment selon leur localisation géographique.

Certains syndicats de la zone littorale montrent une variabilité saisonnière marquée, avec un pic de consommation durant les mois d'été dû à l'afflux touristique (cf. Illustration 26), tandis que d'autres montrent une variabilité saisonnière beaucoup plus faible (cf. Illustration 27).

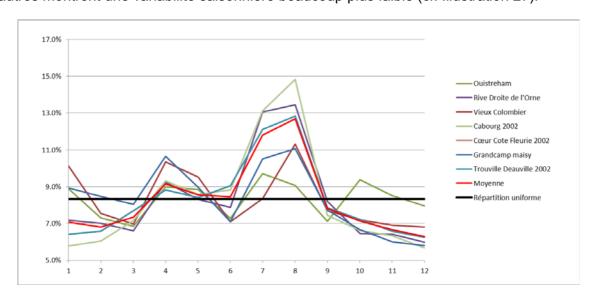


Illustration 26 : Répartition mensuelle des prélèvements de l'année 2002 pour différents syndicats de la zone côtière

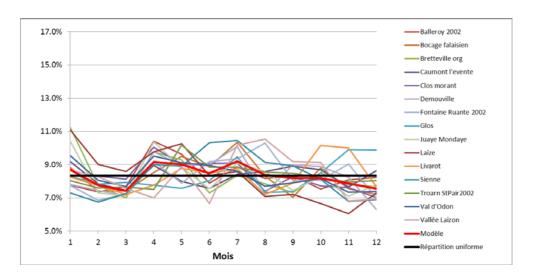


Illustration 27 : Répartition mensuelle des prélèvements de l'année 2002 pour différents syndicats hors zone côtière

A partir de ces données, deux zones géographiques ont été déterminées (voir l'Illustration 28) et deux règles de répartition mensuelles ont été établies, correspondant à la moyenne des distributions dans chaque zone.

	Zone 1 à saisonnalité peu marquée	Zone 2 à saisonnalité forte
janvier	8.7%	7.1%
février	7.8%	6.8%
mars	7.4%	7.3%
avril	9.2%	9.2%
mai	9.0%	8.6%
juin	8.5%	8.5%
juillet	9.2%	11.8%
août	8.4%	12.7%
septembre	8.2%	7.8%
octobre	8.2%	7.1%
novembre	7.9%	6.7%
décembre	7.6%	6.3%

Tableau 12 : Répartitions mensuelles des prélèvements pour l'usage AEP (valeurs affectées au modèle pour les zones côtière et intérieure)

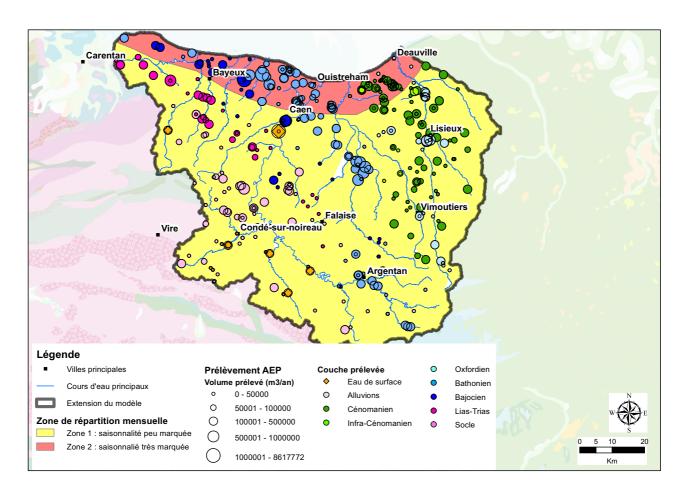


Illustration 28: Carte des prélèvements AEP pris en compte dans le modèle et zones de répartition mensuelle considérées. Les volumes prélevés sont ceux de 2010.

## 3.6.2. Prélèvements agricoles : irrigation et élevage

## a) Synthèse des prélèvements

Les données de prélèvement pour usage agricole sont issues du fichier des volumes annuels déclarés à l'Agence de l'Eau Seine-Normandie au titre de la redevance « prélèvement » ou d'une estimation basée sur les données de la Base de Données Nationale d'Identification (BDNI) pour les prélèvements destinés à l'élevage (cf. rapport de phase 1).

Pour ces derniers, le prélèvement a été rattaché au premier aquifère rencontré depuis la surface, sauf lorsque celui-ci se situe à une profondeur importante (par exemple, présence d'une importante épaisseur de marnes du Callovo-Oxfordien dans le bassin de la Dives) : dans ce cas, le prélèvement est supposé provenir du cours d'eau.

L'Illustration 29 présente l'évolution des prélèvements pour usage agricole entre 1994 et 2010.

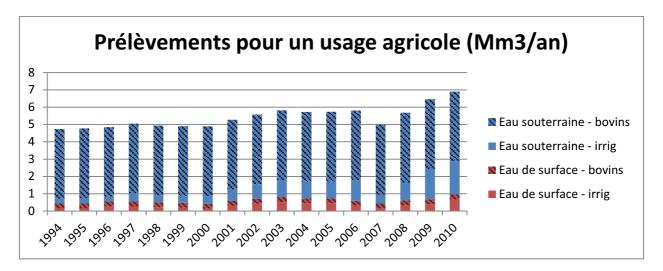


Illustration 29 : Volumes annuels prélevés pour un usage agricole dans les eaux de surface (en bleu) et dans les eaux souterraines (en rouge). Le figuré hachuré représente la partie des prélèvements liée aux bovins.

## b) Répartition mensuelle

L'agriculture est principalement constituée de grandes cultures dans la plaine de Caen, alors qu'elle est plutôt orientée vers l'élevage ailleurs dans la zone d'étude (voir l'Illustration 30). Cette répartition territoriale des activités agricoles a permis de définir, à l'aide des informations transmises par la DDTM du Calvados (cf. rapport de phase 1), trois répartitions mensuelles différentes des prélèvements annuels. Ces répartitions mensuelles sont indiquées dans le Tableau 13, tandis que les zones associées sont schématisées sur l'Illustration 31.

Quelle que soit leur localisation, les prélèvements liés aux bovins ont été considérés comme ayant une répartition mensuelle uniforme tout au long de l'année.

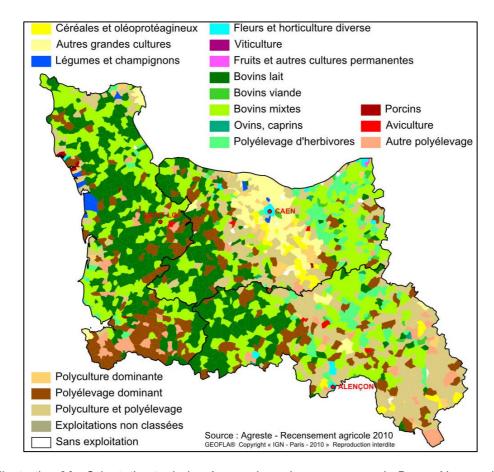


Illustration 30 : Orientation technico-économique des communes de Basse-Normandie. Source : Agreste 2010

	Répartition mensuelle			
	Zone 1 : grandes cultures	Zone 2 : polyculture - maraîchage	Zone 3 : Elevage	
janvier	0 %	0 %	8.3 %	
février	0 %	0 %	8.3 %	
mars	0 %	3 %	8.3 %	
avril	6 %	3 %	8.3 %	
mai	20 %	12 %	8.3 %	
juin	19 %	25 %	8.3 %	
juillet	24 %	33 %	8.3 %	
août	16 %	19 %	8.3 %	
septembre	14 %	5 %	8.3 %	
octobre	0 %	0 %	8.3 %	
novembre	0 %	0 %	8.3 %	
décembre	0 %	0 %	8.3 %	

Tableau 13: Répartition mensuelle des prélèvements agricoles

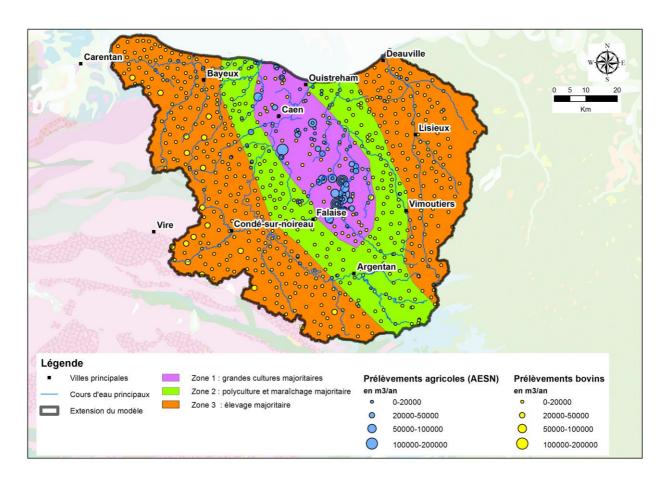


Illustration 31: Zones de répartition mensuelle des prélèvements agricoles.

#### 3.6.3. Prélèvements industriels

## a) Synthèse des prélèvements

La part représentée par les prélèvements industriels dans le domaine d'étude est relativement faible par rapport aux prélèvements totaux. Une nette diminution de ces prélèvements est observée entre 1994 et 2010 (cf. Illustration 32).

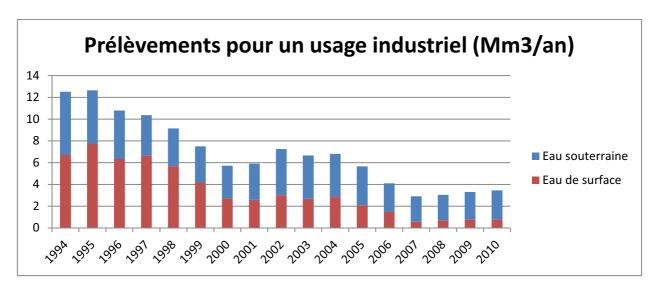


Illustration 32: Volumes annuels prélevés pour un usage industriel dans les eaux de surface (en bleu) et dans les eaux souterraines (en rouge).

### b) Répartition mensuelle

Les prélèvements industriels sont supposés ne pas varier au cours de l'année.

#### 3.6.4. Prélèvements pour le remplissage des gabions

Les gabions sont des étendues d'eau entretenues pour la chasse au gibier d'eau. Ces plans d'eau sont alimentés à partir de prises d'eau en cours d'eau, en nappe ou en mer. Leur alimentation, sur la base des informations fournies par la DDTM du Calvados, se fait en général entre le 15 août et le 15 septembre.

Pour la plupart des gabions, le mode d'alimentation (eau de surface, nappe ou mer) est renseigné dans les fichiers transmis par la DDTM du Calvados. Lorsque le prélèvement est indiqué comme se faisant en rivière ou lorsqu'aucune indication n'est disponible, le prélèvement a été considéré comme ayant lieu dans le tronçon de cours d'eau le plus proche.

Conformément aux indications du Comité de pilotage, le volume prélevé pour le remplissage des gabions a été évalué sur la base d'une lame d'eau de 50 cm répartie sur la superficie du plan d'eau entre le 15 août et le 15 septembre. Dans le Calvados, la surface des gabions est connue. Dans l'Orne, cette donnée n'est pas disponible. Nous avons donc considéré une surface moyenne de 1,6 ha, égale à la surface médiane des gabions du Calvados.

Le Tableau 14 présente les prélèvements correspondant aux remplissages des gabions et les compare aux débits mensuels moyens minima des cours d'eau où ils sont effectués.

Les prélèvements rattachés à des cours d'eau non explicitement pris en compte dans le modèle (cf. Illustration 19) n'ont pas été intégrées aux simulations.

Bassins hydrographiques	Surface (km²)	Prélèvement (Mm³/an)	Prélèvement (m³/s entre le 15/08 et le 15/09)
Touques	1.0	0.5	0.19
Dives	3.6	1.8	0.70
Orne	0.9	0.45	0.17
Seulles	0.38	0.19	0.07
Aure	2.0	1.0	0.38
Gronde et Provence	0.76	0.38	0.15

Tableau 14 : Evaluation des volumes prélevés pour l'alimentation des gabions non alimentés par la mer.

### 3.6.5. Synthèse des volumes prélevés

L'Illustration 33 synthétise l'évolution des volumes prélevés sur la zone d'étude entre 1994 et 2010 pour les différentes couches du modèle ainsi que pour les eaux de surface.

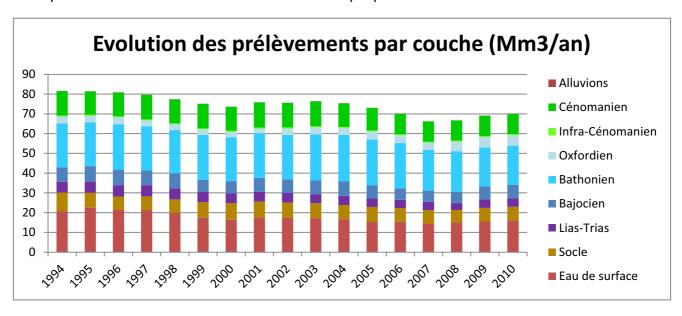


Illustration 33 : Volumes annuels prélevés dans les différentes couches du modèle.

Selon les années, les prélèvements en eau souterraine représentent entre 72 et 78% des prélèvements totaux. Ils sont majoritairement concentrés dans les couches du Bathonien, du Cénomanien et du Bajocien. Ces trois couches représentent respectivement 37%, 19% et 13% des prélèvements en eau souterraine en 2010.

## 4. Calage du modèle hydrogéologique

#### 4.1. PROCEDURE DE CALAGE

#### 4.1.1. Les objectifs du calage et les différentes étapes

## a) Objectifs

Cette phase correspond à la recherche de l'ensemble des valeurs des paramètres permettant d'obtenir une bonne adéquation entre les observations disponibles et les valeurs calculées par le modèle, en charges hydrauliques et en débits pour les modèles d'écoulement souterrain.

Pour les modèles spatialisés, les paramètres à ajuster sont les paramètres descriptifs du milieu hydrogéologique (perméabilités et coefficients d'emmagasinement des formations, perméabilité du lit des cours d'eau, ...), ainsi que la recharge par les précipitations.

Le calage est une procédure itérative pendant laquelle on procède par « essais – erreurs ». Cette phase permet au modélisateur d'apprécier les réactions du modèle, d'identifier les secteurs critiques, de mesurer le poids relatif des différentes composantes hydrauliques, d'apprécier leurs interactions, et d'évaluer leur contribution au fonctionnement du système aquifère. Autant que possible, les paramètres sont modifiés par couches ou par grande zone.

La qualité du calage et son évolution sont appréciées visuellement par superposition des chroniques de charge et de débit mesurées et calculées. Pour le modèle de Basse-Normandie, les priorités assignées au calage ont été de bien restituer les débits et les piézométries dans les secteurs du Bessin, de l'Orne et de la Dives aval.

#### b) Les différentes étapes

Une première phase de calage, dite en régime permanent, porte sur un état hydraulique stabilisé n'induisant ni stockage ni déstockage d'eau dans le système aquifère, c'est-à-dire sans contribution de la capacité d'emmagasinement du milieu souterrain. Cette phase de calage est par conséquent circonscrite à la seule distribution spatiale des perméabilités et des recharges. Les objectifs de cette première étape sont de :

- valider la géométrie du modèle ;
- ajuster les choix et hypothèses du modèle conceptuel par des validations quantifiées ;
- vérifier la cohérence des données, nombreuses et indépendantes, qui régissent le comportement hydraulique du système aquifère (recharge, perméabilités, niveaux piézométriques, débits...).

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

En pratique, de nombreux aller-retour sont nécessaires entre le calage en régime permanent - pour dégrossir la distribution des perméabilités et calculer un état piézométrique stabilisé fournissant les charges initiales nécessaires aux simulations en transitoire - et le calage en transitoire pour ajuster à la fois les perméabilités et, secondairement, les emmagasinements.

#### • Régime permanent

Pour le modèle de Basse-Normandie, le calage en régime permanent porte sur la situation du début de l'année 1994. Les valeurs de prélèvement sont celles de janvier 1994, et les recharges correspondent à la recharge moyenne (cf. paragraphe 3.3.4.a).

Le temps de calcul nécessaire pour les simulations en régime permanent en partant d'une situation proche du régime d'équilibre est inférieur à 2 minutes (PC Intel Quadri Core cadencé à 3.2GHz, Windows 32 bits, 4 Go de RAM), ce qui a permis d'effectuer un grand nombre de simulations durant la phase de calage.

#### Régime transitoire

Le calage en régime transitoire a été mené sur la période 1994-2010, période pour laquelle les données de prélèvement sont disponibles

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

Le pas de temps des calculs hydrodynamiques est mensuel. Pour les calculs hydroclimatiques (calcul des flux de recharge et de ruissellement), le pas de temps est décadaire (dont la durée est ajustée pour qu'il y ait 3 décades par mois).

Le temps de calcul nécessaire pour les simulations en transitoire sur la période 1994-2010 est d'environ 2h15.

## c) Convergence numérique du modèle

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

#### 4.1.2. Paramètres de calage

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

#### a) Paramètres hydrodynamiques

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

#### b) Recharge

Les paramètres de recharge, déterminés par grandes zones (cf. §3.3.4.d), doivent être ajustés pour permettre de restituer les débits des cours d'eau et les fluctuations piézométriques.

## c) Echanges nappe-rivière

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

#### 4.1.3. Données de calage

Les observations de terrain utilisées comme références de calage sont de différente nature :

- mesures ponctuelles (dans le temps et dans l'espace) du niveau piézométrique d'une nappe ;
- localisation d'une source, traduisant une émergence de nappe ;
- cartes piézométriques indiquant les niveaux de nappe, les directions et gradients d'écoulement, ainsi que les évolutions temporelles lorsque plusieurs cartes ont été levées au fil du temps;
- chroniques de débit (sources ou rivières) et de niveaux piézométriques.

## a) Mesures piézométriques ponctuelles et asynchrones

Pour le calage en régime permanent, des données piézométriques ont été recherchées sur l'ensemble de la zone d'étude, afin de cerner sur une extension la plus large possible les niveaux piézométriques de chacune des nappes. Tous les ouvrages qui disposent d'au moins une mesure piézométrique ont été utilisés. Pour les points d'eau qui disposent de plusieurs mesures, c'est le niveau minimum qui a été retenu.

Au total, des mesures sont disponibles sur 2595 points de la zone d'étude, situés dans les aquifères de Cénomanien, de l'Oxfordien, du Bathonien, du Bajocien et des formations du Lias-Trias. La majorité des points est située dans les aquifères du Bajo-Bathonien comme indiqué dans le Tableau 15.

Couche du modèle	Nombre de points disposant d'au moins 1 mesure piézométrique
Craie du Cénomanien	259
Calcaires et sables de l'Oxfordien moyen et sup	109
Calcaires du Bathonien moyen et inférieur	1109
Calcaires du Bajocien- Aalénien-Toarcien	350
Formations du Lias infra- Toarcien et du Trias	173

Tableau 15: Répartition par aquifère du nombre de piézomètres de la zone d'étude disposant d'au moins une mesure de niveau.

Compte tenu de l'hétérogénéité des données ainsi collectées, une dispersion importante des niveaux piézométriques est inévitable, d'autant que l'amplitude des fluctuations piézométriques est souvent importante (jusqu'à plus de 20 m), surtout si le point d'eau se situe loin d'un exutoire de la nappe et que celle-ci est peu productive.

L'Illustration 34 montre la localisation des piézomètres disposant d'au moins une mesure de niveau de nappe. Ces points sont très inégalement répartis, et quasi inexistants dans les parties captives des nappes.

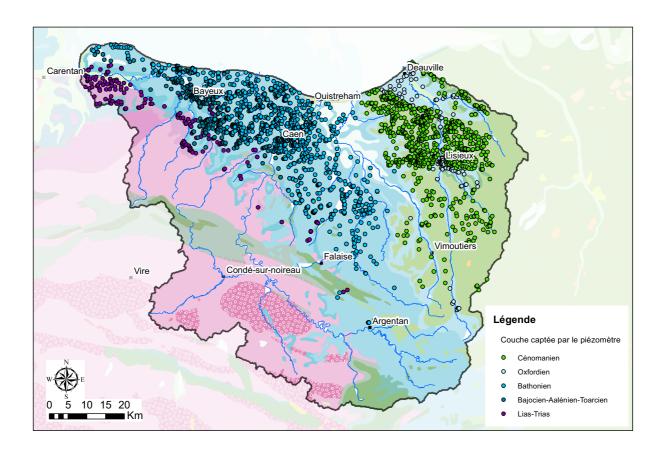


Illustration 34 : Piézomètres disposant d'au moins une mesure de niveau piézométrique utilisés pour le calage en régime permanent.

#### b) Cartes piézométriques

Plusieurs cartes piézométriques couvrent la zone d'étude. L'ensemble de ces données est décrit dans le rapport de phase 1.

Deux principales sources de données ont été utilisées pour le calage :

- L'atlas hydrogéologique du Calvados (Arnaud, 2007), avec des cartes piézométriques d'une partie des aquifères du Bajocien, du Bathonien, et de l'aquifère Cénomanien. En complément, des cartes de basses eaux, moyennes eaux et hautes eaux ont été construites à l'occasion de la présente étude. Seules les cartes de moyennes eaux ont été utilisées pour le calage en régime permanent.
- Une carte piézométrique de l'aquifère du Bathonien, établie à l'occasion de la construction d'un modèle hydrogéologique dans le secteur d'Argentan-Sées (Pivette Consultant et al, 2001).

### c) Localisation des sources

La localisation des sources est un élément de calage intéressant car une source est un exutoire de nappe qui peut contraindre utilement le modèle en termes de piézométrie et de débit.

L'ensemble des sources inventoriées à partir des données disponibles en Banque du Sous-Sol est présenté dans le rapport de phase 1.

#### d) Chroniques de débit

De nombreux cours d'eau de la zone d'étude disposent de mesures de débits bancarisées dans la banque HYDRO. Au total, 59 stations de mesure sont réparties sur les principaux bassins versants du territoire étudié.

Par ailleurs, de nombreuses campagnes de jaugeage des cours d'eau ont été réalisées dans le secteur étudié. Les données ont été bancarisées par la DREAL de Basse-Normandie. Les chroniques acquises au cours de ces campagnes sont assez courtes mais elles ont pu apporter une information précieuse pour les cours d'eau ne disposant pas de chroniques répertoriées dans la banque HYDRO (la Guigne, le Traînefeuille, le Dan et la Gronde littorale).

Le rapport de phase 1 décrit l'ensemble des données disponibles.

Les stations hydrométriques utilisées pour le calage du modèle sont situées sur les cours d'eau modélisés de façon explicite et disposant de données sur la période de calage (1994-2010).

Au total, ce sont ainsi 36 chroniques de débit qui ont été utilisées pour le calage en transitoire. Les stations correspondantes sont mentionnées sur l'Illustration 35. Une liste de ces stations hydrométriques, avec la commune d'implantation et le code de la station est fournie en Annexe 4.

Le Tableau 16 résume la distribution des chroniques débitmétriques dans les différents bassins versants du domaine modélisé.

Bassin versant	Nombre de chroniques de débit utilisées pour le calage
Touques	7
Dives	6
Orne	17
Seulles	4
Aure	2

Tableau 16 : Chroniques de débit utilisées pour le calage en transitoire.

Les chroniques de débit journalier fournies par la DREAL ont été moyennées au pas de temps mensuel pour pouvoir être comparées aux données simulées par le modèle.

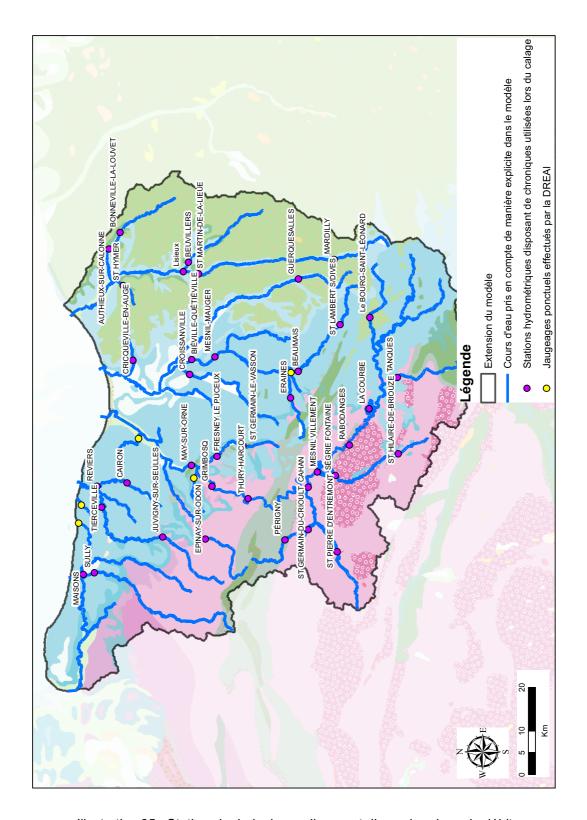


Illustration 35 : Stations hydrologiques disposant d'une chronique de débit et stations de jaugeage disposant de mesures ponctuelles utilisées pour le calage du modèle

## e) Chroniques piézométriques

De nombreuses chroniques piézométriques, rattachées à différents réseaux (suivi patrimonial des eaux souterraines, suivi piézométrique de la ville de Caen, suivi effectué par le Syndicat Départemental de l'Eau de l'Orne, ...) sont disponibles sur le domaine d'étude. Elles sont détaillées dans le rapport de phase 1.

Pour le calage du modèle, 61 chroniques piézométriques disposant de données pendant au moins une partie de la période de calage ont été utilisées. Elles sont positionnées sur l'Illustration 36. Une liste des piézomètres contenant la commune d'implantation, le numéro BSS (Banque de données du Sous-Sol) de l'ouvrage, et la couche du modèle concernée est présentée en Annexe 6.

Les différents aquifères sont très différemment suivis par ces réseaux piézométriques : 80% des chroniques concernent les fluctuations des nappes du Bathonien et du Bajocien. Une synthèse du rattachement des chroniques piézométriques aux aquifères est donnée au Tableau 17.

Couche du modèle	Nombre de chroniques piézométriques utilisées lors du calage
Craie du Cénomanien	5
Calcaires et sables de l'Oxfordien moyen et sup	2
Calcaires du Bathonien moyen et inférieur	40 (20 réseau patrimonial +3 SDE de l'Orne + 17 ville de Caen)
Calcaires du Bajocien- Aalénien-Toarcien	8
Formations du Lias infra- Toarcien et du Trias	4 <sup>8</sup>
Socle	2

Tableau 17 : Distribution des chroniques piézométriques de calage dans les couches du modèle.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> La chronique du piézomètre de Villers-Canivet (indice BSS : 01762X0024), non citée dans le rapport de phase 1, a également été utilisée pour le calage.

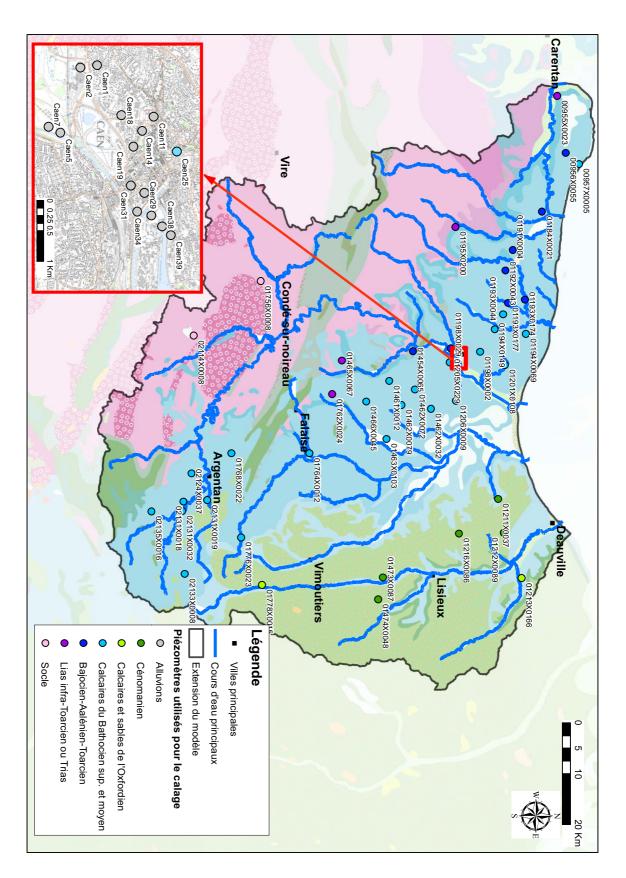


Illustration 36 : Ouvrages disposant de chroniques piézométriques utilisées pour le calage du modèle.

### 4.1.4. Déroulement du calage

La phase de calage est un travail de longue haleine qui a été mené conjointement par deux modélisateurs. La mise en place de ce binôme a permis un échange régulier sur les difficultés rencontrées au fur et à mesure du travail et la poursuite des opérations de calage en l'absence de l'un ou de l'autre des modélisateurs.

Un appui régulier a été recherché auprès d'autres membres de l'équipe de modélisation en hydrogéologie du BRGM. Ces regards « extérieurs » ont permis d'explorer des pistes de calage variées et de prendre du recul par rapport aux difficultés rencontrées au quotidien dans la manipulation des nombreux fichiers informatiques constituant le modèle. Un contact direct avec le concepteur du logiciel Marthe a permis par ailleurs d'optimiser l'extraction des informations nombreuses fournies par le logiciel.

Après avoir constaté que les modifications portant sur les aquifères du Cénomanien et de l'Oxfordien dans la partie Est de la zone modélisée avaient peu d'impact sur les autres secteurs, le calage de cette zone a pu être mené de manière presque indépendante, permettant le travail simultané des deux modélisateurs sur les deux parties du modèle.

Le calage a été conduit en travaillant par zones calquées sur des entités hydrogéologiques jugées homogènes. Dans la mesure du possible, des valeurs uniformes ont été affectées aux paramètres de calage de ces zones, ce qui a permis d'aboutir à un modèle relativement simple en termes de distribution spatiale des paramètres hydrogéologiques. L'expérience montre qu'une telle approche favorise la robustesse du modèle, notamment pour les simulations prévisionnelles ultérieures. Elle s'avère en général préférable à celle qui cherche à restituer précisément la complexité des observations de terrain (mesures piézométriques et/ou transmissivités déduites des pompages d'essai) par des mosaïques complexes de paramètres de calage ne s'appuyant pas sur une argumentation hydrogéologique rationnelle.

Cependant, trop peu d'informations sont parfois disponibles pour délimiter une zone de valeurs d'un paramètre. Par exemple, le calage de la chronique piézométrique de Saint-Germain-de-Clairefeuille (02133X0008) a nécessité de diminuer l'emmagasinement libre par rapport aux valeurs d'emmagasinement utilisées pour le Bathonien dans le secteur. Ne disposant d'aucune information permettant de délimiter une zone à faible emmagasinement (autre piézomètre à proximité, connaissance fine des structures géologiques locales...), une zone rectangulaire a été définie autour de ce piézomètre. Cette délimitation n'a aucun sens physique mais, en l'absence de connaissances complémentaires, toute délimitation reste arbitraire et cette vue permet de garder en mémoire l'absence d'information qui l'accompagne.

#### 4.2. RESULTATS DU CALAGE

# 4.2.1. Résultat du calage en régime permanent : cartes piézométriques et diagrammes de dispersion

La qualité du calage a été évaluée en comparant les niveaux piézométriques simulés aux cartes piézométriques disponibles d'une part, et aux données piézométriques ponctuelles et asynchrones d'autre part (cf. 4.1.3). Pour le calage de l'aquifère du Cénomanien, la localisation des sources a également été exploitée.

Pour les mesures ponctuelles et asynchrones, l'adéquation entre niveaux piézométriques simulés et observés est analysée au travers de diagrammes de dispersion où sont reportés, pour chaque formation aquifère, les niveaux simulés en fonction des niveaux observés.

### a) L'aquifère de la craie du Cénomanien

Pour cet aquifère, le calage a été guidé par la comparaison des niveaux piézométriques simulés et des niveaux asynchrones, ainsi qu'avec la carte piézométrique de moyennes eaux présentée dans l'Atlas hydrogéologique du Calvados.

Sur une grande partie de son extension, la nappe du Cénomanien est perchée, séparée de l'aquifère des calcaires oxfordiens par les dépôts infra-cénomaniens (glauconie de base, argiles kimméridgiennes...) peu perméables. Globalement, les écoulements suivent la topographie jusqu'aux limites d'extension de la formation où les eaux souterraines émergent, donnant naissance à des sources, le plus souvent perchées au-dessus des fonds de vallée. Ces sources correspondent à des zones de débordement dans le modèle hydrogéologique ; elles figurent sur l'Illustration 38.

Le niveau piézométrique simulé en régime permanent pour cet aquifère est présenté en Illustration 37. Sur cette illustration figurent également les isopièzes de moyennes eaux de l'Atlas piézométrique du Calvados. La comparaison des isopièzes « observées » et des niveaux simulés montre une bonne adéquation entre niveaux, avec des gradients de nappe (pente) correctement restitués.

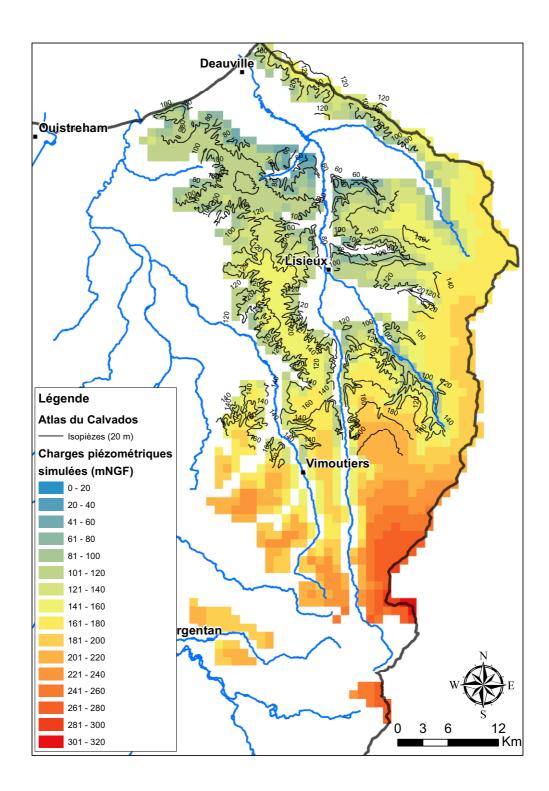


Illustration 37: Aquifère du Cénomanien : Niveaux piézométriques simulés en régime permanent et courbes isopièzes extraites de l'Atlas hydrogéologique du Calvados (équidistance des courbes de niveaux = 20 m).

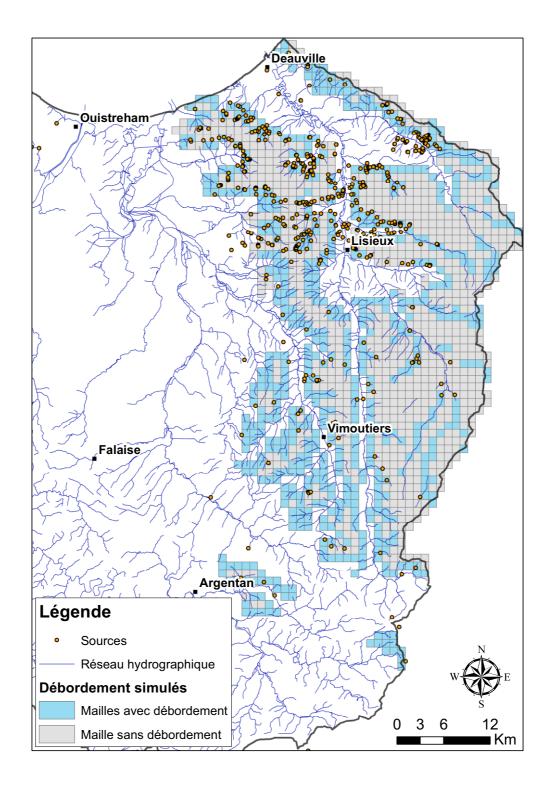


Illustration 38 : Carte des débordements de nappe simulés par le modèle et sources inventoriées dans le Cénomanien.

Le diagramme de dispersion présenté en Illustration 39 comporte 259 valeurs de niveaux piézométriques simulés/observés. Les battements de la nappe étant assez importants, ils induisent inévitablement des écarts entre l'état « moyen » modélisé et les mesures piézométriques de terrain, celles-ci pouvant correspondre à des états piézométriques de hautes eaux ou basses eaux.

On observe globalement une bonne correspondance entre niveaux simulés et niveaux observés, avec toutefois des niveaux simulés en général légèrement supérieurs aux niveaux observés : ceci peut s'expliquer par le fait que lorsque plusieurs valeurs de niveaux piézométriques étaient disponibles en un point, la valeur minimale a été retenue (cf. p.67).

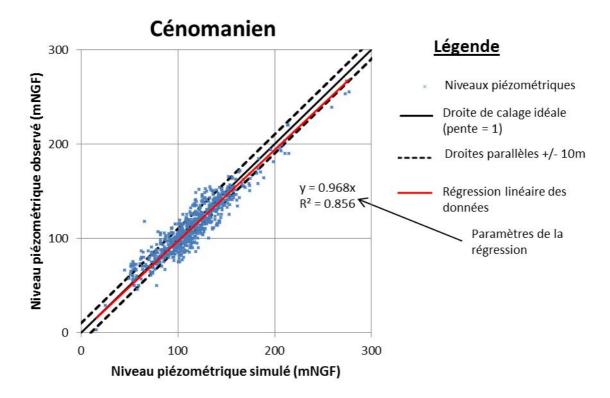


Illustration 39 : Diagramme de dispersion du calage piézométrique pour le Cénomanien.

Les croix bleues représentent les niveaux piézométriques simulés vs. observés en régime permanent.

La droite de calage idéal (de pente 1) est représentée en trait plein noir. Des parallèles ont été tracées de part et d'autre à +/- 10m. Le trait rouge est la droite de régression linéaire du nuage de points.

#### b) L'aquifère des calcaires et sables de l'Oxfordien

Les observations de référence utilisées pour le calage de la nappe des calcaires et sables de l'Oxfordien se limitent à des niveaux piézométriques ponctuels et asynchrones.

Les deux principales sources d'alimentation de cet aquifère sont la drainance des calcaires du Cénomanien *via* les formations de l'infra-Cénomanien et du Kimméridgien, et la recharge pluviale lorsque la formation affleure. Les principales sorties se font par des échanges napperivière dans les vallées de la Touques, de la Calonne et la partie aval de l'Orbiquet. Globalement, les écoulements convergent vers les cours d'eau qui drainent la nappe.

Les niveaux piézométriques simulés en régime permanent dans cet aquifère sont présentés à Illustration 40. Il n'existe pas de carte piézométrique « observée » pour cet aquifère.

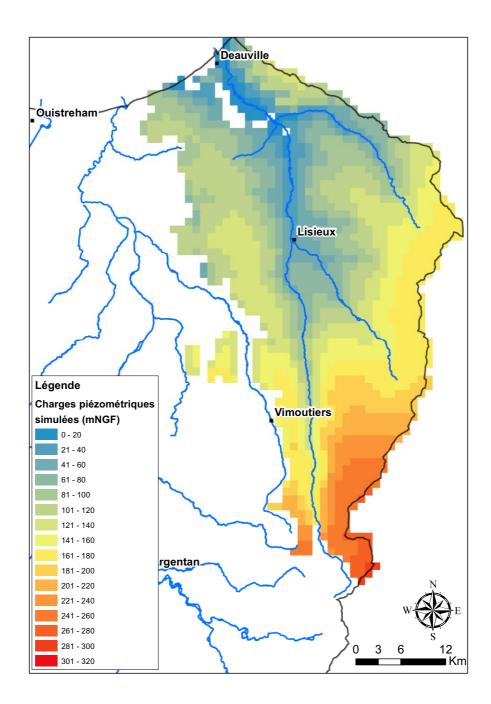


Illustration 40 : Niveaux piézométriques simulés en régime permanent dans l'aquifère des calcaires et sables de l'Oxfordien moyen et supérieur.

Un diagramme de dispersion a été tracé à partir des mesures disponibles sur 109 points (Illustration 41). Ce diagramme montre une bonne correspondance entre les niveaux observés et simulés. Comme pour le Cénomanien et pour les mêmes raisons, les niveaux simulés sont en général légèrement supérieurs aux niveaux observés.

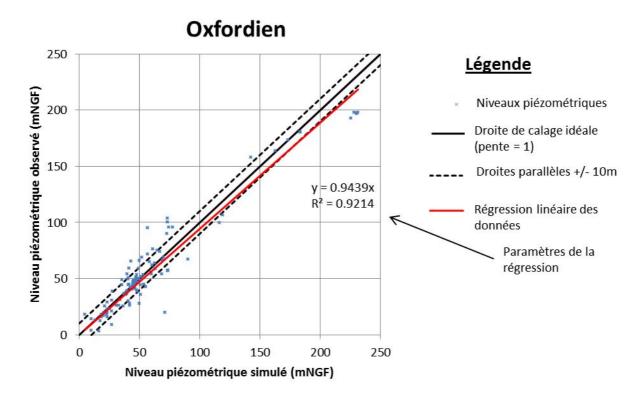


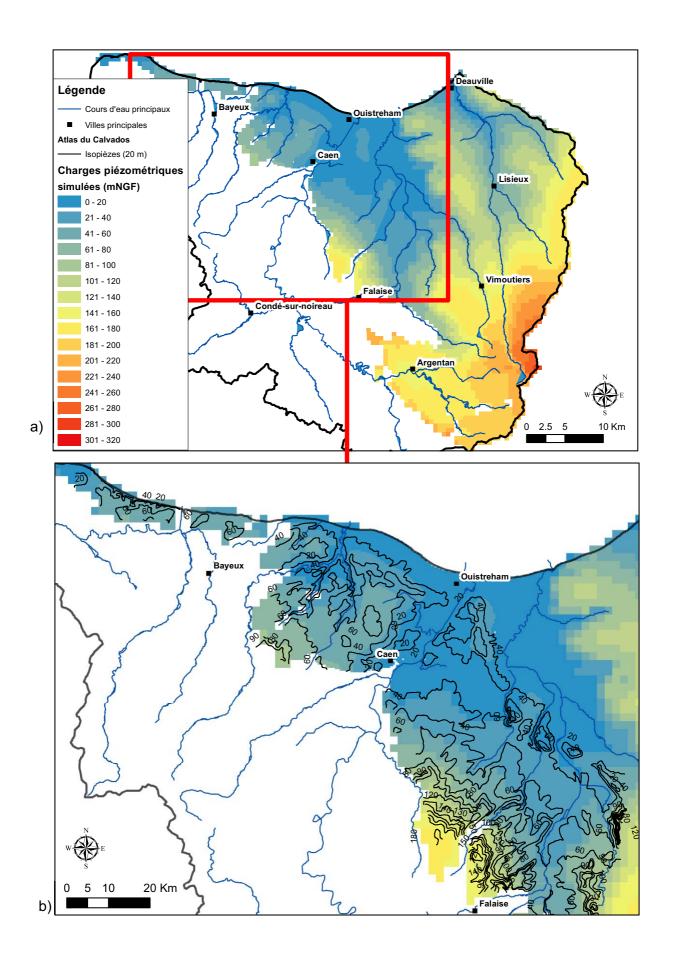
Illustration 41 : Diagramme de dispersion du calage piézométrique pour l'aquifère des calcaires et sables de l'Oxfordien. Les croix bleues représentent les niveaux piézométriques simulés vs. observés en régime permanent. La droite de calage idéal (de pente 1) est représentée en trait plein noir. Des parallèles ont été tracées de part et d'autre à +/- 10m. Le trait rouge est la droite de régression linéaire du nuage de points

#### c) L'aquifère des calcaires du Bathonien moyen et supérieur

Les références de calage utilisées pour l'aquifère des calcaires du Bathonien moyen et supérieur sont à la fois des données de niveaux asynchrones et la carte piézométrique de moyennes eaux extraite de l'Atlas hydrogéologique du Calvados pour la partie libre.

Le Bathonien est captif sur une majeure partie de la zone d'étude. Dans la partie libre, la piézométrie suit globalement la topographie et l'aquifère est drainé par le réseau hydrographique.

L'Illustration 42 présente la piézométrie simulée pour cette formation avec, dans la partie libre de l'aquifère, la comparaison avec la carte piézométrique de l'Atlas hydrogéologique du Calvados.



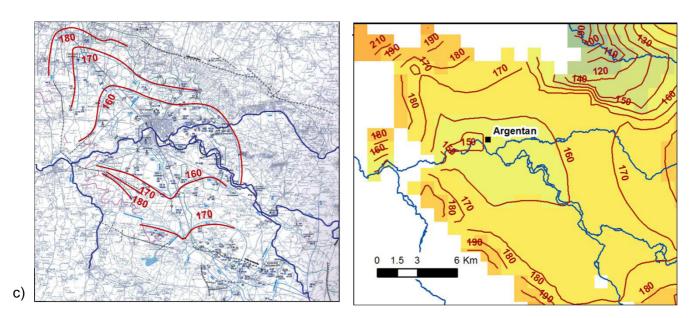


Illustration 42 : Niveaux piézométriques simulés en régime permanent dans l'aquifère des calcaires du Bathonien moyen et supérieur.

- a) Vue de l'extension totale de la couche.
- b) Zoom sur la partie libre de la formation et comparaison avec la carte piézométrique de l'Atlas hydrogéologique du Calvados. L'équidistance des isopièzes est de 20 m.
- c) Zoom sur le secteur d'Argentan. A gauche, carte piézométrique du rapport de modélisation Argentan-Sées (Pivette Consultant et al. 2001) équidistance des isopièzes = 10 m. A droite, piézométrie et isopièzes (équidistance = 10 m) simulées.

L'Illustration 43 présente le diagramme de dispersion tracé à partir de 1109 mesures de niveaux piézométriques. Comme pour les autres couches, ce diagramme montre que les niveaux simulés sont globalement cohérents avec les niveaux observés. Les remarques faites pour les couches précédentes restent valides pour celle-ci.

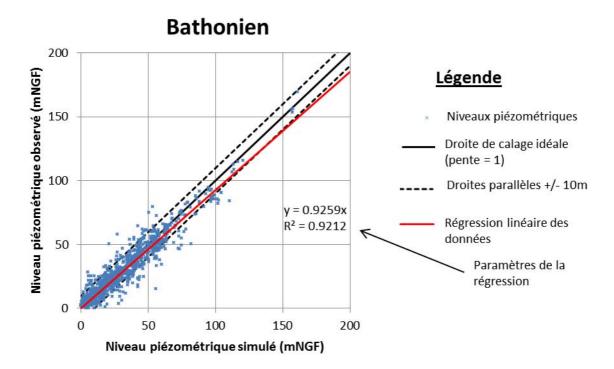


Illustration 43 : Diagramme de dispersion du calage piézométrique pour l'aquifère des calcaires Bathonien moyen et supérieur. Les croix bleues représentent les niveaux piézométriques simulés vs. observés en régime permanent. La droite de calage idéal (de pente 1) est représentée en trait plein noir. Des parallèles ont été tracées de part et d'autre à +/- 10m. Le trait rouge est la droite de régression linéaire du nuage de points.

## d) L'aquifère des calcaires du Bajocien

Les références de calage pour l'aquifère des calcaires du Bajocien sont des données de niveaux asynchrones et la carte piézométrique de moyennes eaux tirée de l'Atlas hydrogéologique du Calvados pour la partie libre.

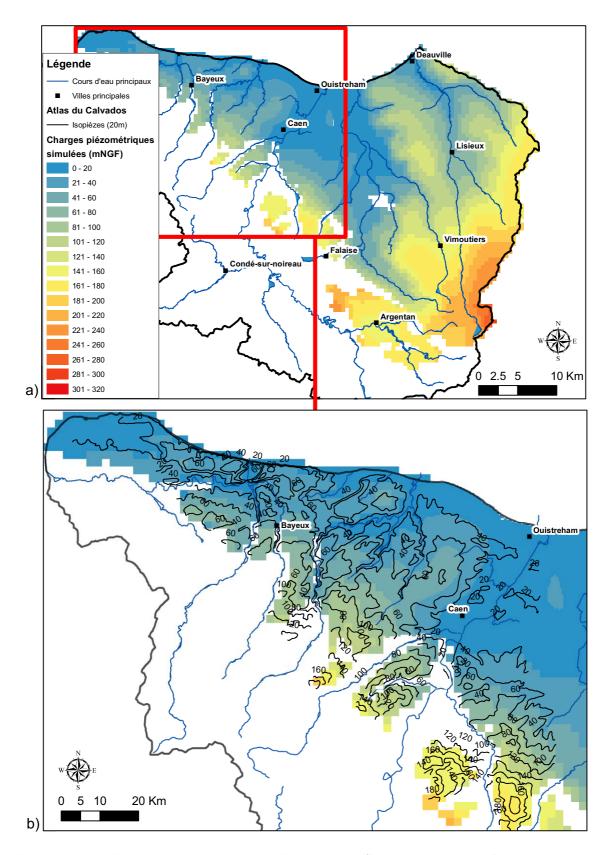


Illustration 44 : Niveaux piézométriques simulés dans l'aquifère des calcaires du Bajocien en régime permanent. a) Vue de l'extension totale de la couche. b) Zoom sur la partie libre de la formation et superposition avec la carte piézométrique de l'Atlas hydrogéologique du Calvados (équidistance des isopièzes = 20 m).

L'Illustration 45 présente le diagramme de dispersion tracé à partir de 350 mesures de niveaux piézométriques. Ce diagramme montre que les niveaux simulés sont globalement cohérents avec les niveaux observés. Les remarques faites pour les couches précédentes restent également valides.

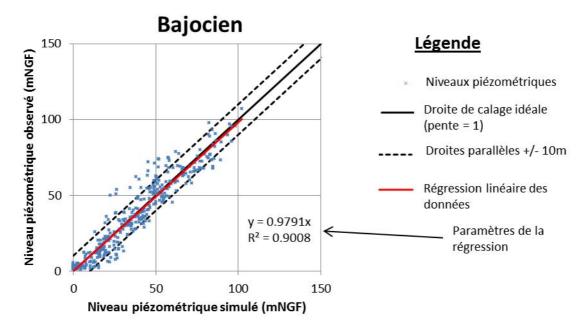


Illustration 45 : Diagramme de dispersion du calage piézométrique des calcaires du Bajocien. Les croix bleues représentent les niveaux piézométriques simulés vs. observés en régime permanent. La droite de calage idéal (de pente 1) est représentée en trait plein noir. Des parallèles ont été tracées de part et d'autre à +/- 10m. Le trait rouge est la droite de régression linéaire du nuage de points.

# e) L'aquifère des formations du Lias infra-Toarcien et du Trias

Les références de calage pour l'aquifère des formations du Lias infra-Toarcien et du Trias se limitent à des niveaux piézométriques ponctuels et asynchrones. Les niveaux piézométriques simulés en régime permanent dans cet aquifère sont présentés à Illustration 46.

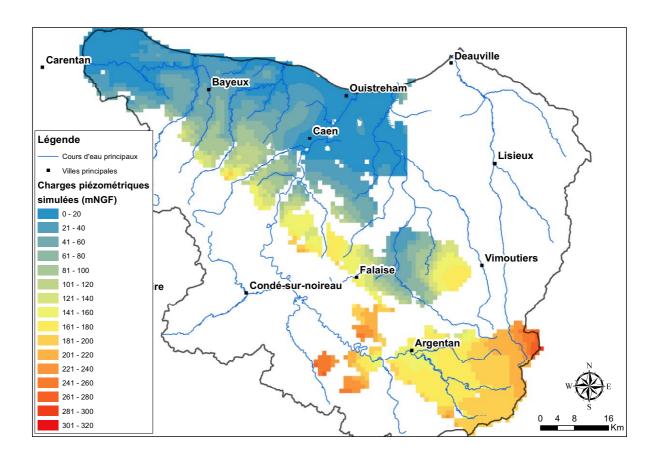


Illustration 46 : Niveaux piézométriques simulés en régime permanent dans l'aquifère du Lias infra-Toarcien et du Trias.

L'Illustration 47 présente le diagramme de dispersion tracé à partir de 173 mesures de niveaux piézométriques. Comme pour les autres couches, ce diagramme montre que les niveaux simulés sont globalement cohérents avec les niveaux observés. Les remarques faites pour les couches précédentes restent valides.

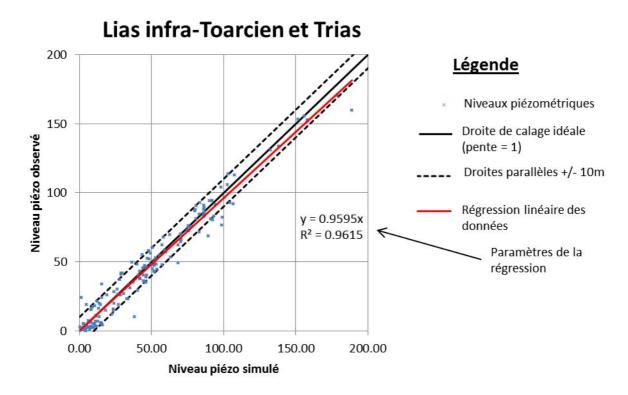


Illustration 47 : Diagramme de dispersion du calage piézométrique pour le Lias infra-Toarcien et Trias. Les croix bleues représentent les niveaux piézométriques simulés vs. observés. La droite de calage idéal (de pente 1) est représentée en trait plein noir. Des parallèles ont été tracées de part et d'autre à +/- 10m. Le trait rouge est la droite de régression linéaire du nuage de points.

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

# a) Représentation des chroniques de débit mesurées aux stations hydrométriques

Pour les 36 stations de débits disposant de données sur la période modélisée, les graphiques de comparaison des débits observés et simulés, accompagnés le cas échéant d'éléments de contexte, sont présentés dans ce rapport. Pour chaque grand bassin versant de la zone d'étude, quelques chroniques de débit représentatives des différents comportements observés dans le bassin sont présentées et commentées ci-après ; toutes les autres chroniques sont regroupées dans l'Annexe 7.

#### • Bassin versant de la Touques

Des chroniques de débit de 7 stations du bassin versant de la Touques ont été utilisées pour le calage ; elles se situent sur les cours d'eau de la Touques, la Calonne, l'Yvie et l'Orbiquet (cf. Illustration 48).

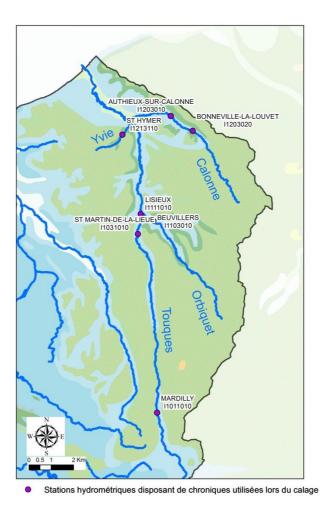


Illustration 48 : Stations hydrométriques dont les chroniques de débit ont été utilisées pour le calage dans le bassin versant de la Touques (fond : carte géologique à l'échelle 1/1 000 000).

Globalement, sur ce bassin versant, les ordres de grandeur des débits sont respectés (module), mais des écarts importants apparaissent, notamment pour les débits de pointe qui sont souvent assez largement surestimés par le modèle. Ce constat est valable pour toutes les chroniques du secteur. A l'inverse, les étiages sont fréquemment sous-estimés, principalement sur l'Orbiquet et sur la partie aval de la Touques.

La comparaison des débits écoulés et simulés dans la Touques à la station de Mardilly (Illustration 49) montre que la dynamique est en général bien restituée, même si les tarissements simulés sont souvent plus rapides que les tarissements observés. Le ruissellement semble légèrement surestimé pour la plupart des années, tandis que les débits d'étiage sont systématiquement sous-estimés.

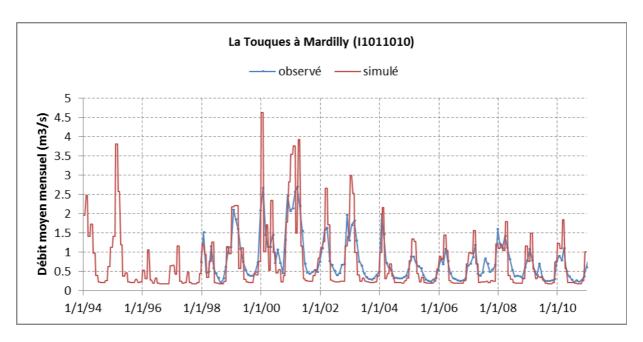


Illustration 49 : Débit de la Touques à Mardilly. Comparaison des chroniques simulée (rouge) et observée (bleue).

La comparaison des débits écoulés et simulés dans la Calonne à la station d'Authieux-sur-Calonne (Illustration 50) montre que les débits de pointe sont systématiquement surestimés. En revanche, les débits d'étiage (hors étiages 2001 et 2002) et les dynamiques sont bien restitués.

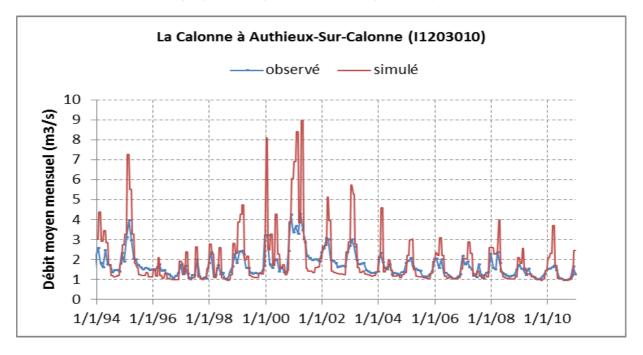


Illustration 50 : Débit de la Calonne à Authieux-sur-Calonne. Comparaison des chroniques simulée (rouge) et observée (bleue).

Le calage a été réalisé de manière conjointe sur ces chroniques de débit et sur les chroniques piézométriques du secteur. L'absence de certaines informations a contribué à rendre délicat le calage dans ce secteur ; parmi celles-ci, on peut citer :

- l'incertitude attachée au cumul des débits sortant par les multiples sources ;

- les piézométries des sables verts et de l'Oxfordien demeurent mal connues ;
- l'alimentation de la Touques se fait à partir de multiples composantes (ruissellement direct, apports par les sources du Cénomanien, apports par les sources des sables verts, soutien du débit par la nappe des calcaires ou sables de l'Oxfordien,...) dont les contributions respectives demeurent insuffisamment cernées.

Ce calage reste certes imparfait mais est suffisant au vu des objectifs du modèle. En effet, cette zone est surtout modélisée pour fournir des conditions aux limites réalistes aux principales zones d'intérêt du modèle (Bessin, plaine de Caen). La piézométrie du Cénomanien, correctement représentée (*cf.* §4.2.2b) tant en niveau moyen qu'en dynamique d'évolution, permet d'établir des conditions aux limites réalistes pour le Pays d'Auge.

#### Bassin versant de la Dives

Les chroniques de débit utilisées pour le calage sont celles des stations hydrométriques implantées sur les cours d'eau de la Dives, la Vie, l'Ante et l'Ancre (*cf.* Illustration 51). Quelques données de jaugeages disponibles sur le Traînefeuille ont également été utilisées.



Illustration 51 : Stations hydrométriques dont les chroniques de débit ont été utilisées pour le calage dans le bassin versant de la Dives (fond : carte géologique à l'échelle 1/1 000 000).

La Vie, dans sa partie amont, est en grande partie alimentée par l'aquifère perché du Cénomanien. La modélisation présente les mêmes limites que celles observés pour le bassin versant de la Touques, l'alimentation des cours d'eau des deux bassins versants étant assez semblable : les débits de pointe sont en général surestimés tandis que les débits d'étiage simulés sont légèrement inférieurs aux observations. Sur l'Ancre, le constat est similaire mais dans une bien moindre mesure : si certains débits de pointe, les plus élevés, sont assez largement surestimés par le modèle, les autres sont correctement simulés et les débits d'étiage simulés ne sont que légèrement inférieurs aux débits observés.

La comparaison des débits écoulés et simulés dans la Dives à la station de Beaumais (Illustration 52) montre que les dynamiques d'écoulement sont très bien représentées, en particulier les dynamiques de vidange et le soutien d'étiage par les nappes.

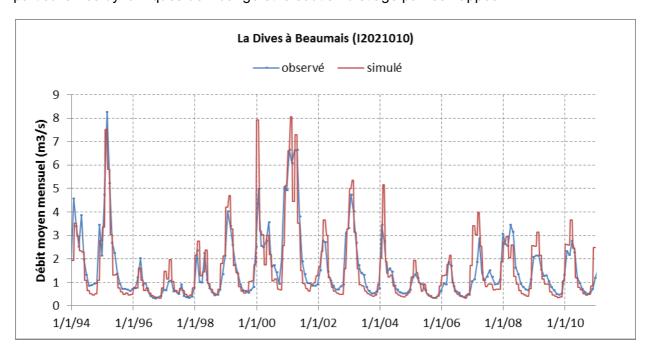


Illustration 52 : Débit de la Dives à Beaumais. Comparaison des chroniques simulée (rouge) et observée (bleue).

La comparaison des débits écoulés et simulés dans la Dives à la station du Mesnil-Mauger (Illustration 53) montre que les débits de pointe sont souvent surestimés. En revanche, les débits d'étiage et les dynamiques sont bien représentés.

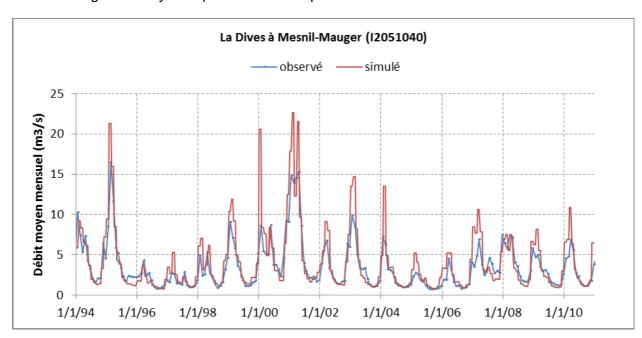
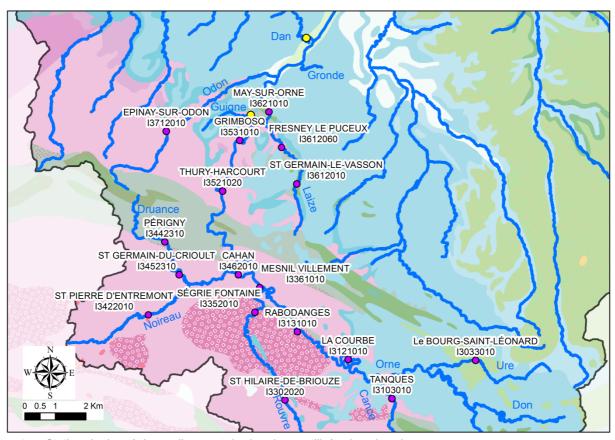


Illustration 53 : Débit de la Dives au Mesnil-Mauger. Comparaison des chroniques simulée (rouge) et observée (bleue).

#### Bassin versant de l'Orne

Les chroniques de débit de 17 stations hydrométriques du bassin versant de l'Orne ont été utilisées pour le calage du modèle ; elles sont implantées sur les cours d'eau de l'Orne, de l'Ure, de la Cance, de la Druance, du Noireau, de la Rouvre, de la Laize, et de l'Odon (cf. Illustration 54). Quelques données de jaugeage disponibles sur le Dan et la Guigne ont également été utilisées.



- Stations hydrométriques disposant de chroniques utilisées lors du calage
- O Jaugeages ponctuels effectués par la DREAL

Illustration 54 : Stations hydrométriques dont les chroniques de débit ont été utilisées pour le calage du bassin versant de l'Orne (fond : carte géologique à l'échelle 1/1 000 000).

Globalement, les débits du bassin versant de l'Orne sont très bien restitués par le modèle, tant à l'amont de la Courbe, dans le secteur d'Argentan où l'Orne et ses affluents coulent sur des terrains calloviens puis bathoniens et bajociens, que dans le secteur où le socle affleure, entre la Courbe et May-sur-Orne. Dans ces deux grandes zones, les débits d'étiage, les dynamiques et les débits de pointe sont bien rendus, comme présenté sur les figures ci-après et en Annexe 7.

Deux stations hydrométriques fournissent des données sur la Laize, principalement alimentée par l'aquifère du Cinglais, lui-même constitué par un ensemble de formations allant des calcaires du Bajocien au Lias-Trias. Sur cette rivière, les niveaux de pointe et les dynamiques de vidange sont bien représentés par le modèle, tandis que les niveaux des étiages sont légèrement mais assez systématiquement sous-estimés.

L'Illustration 55 montre une bonne adéquation entre les débits de l'Orne simulés et observés à la Courbe.

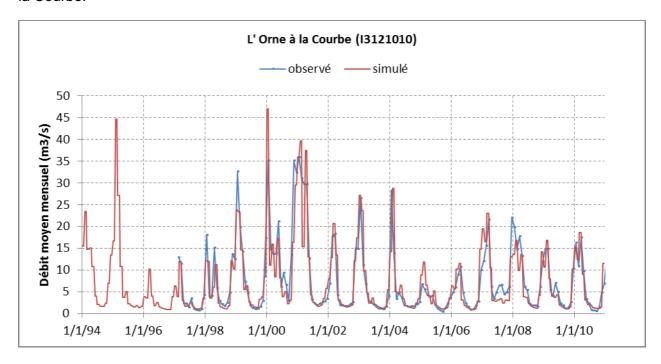


Illustration 55 : Débit de l'Orne à la Courbe. Comparaison des chroniques simulée (en rouge) et observée (en bleu).

L'Illustration 56 présente les évolutions comparées des débits simulés et observés pour l'Orne à la sortie du socle, à Grimbosq. Les débits d'étiage, les dynamiques de tarissement et les débits de pointe sont bien représentés, ce qui montre que le ruissellement sur le socle est modélisé de façon satisfaisante.

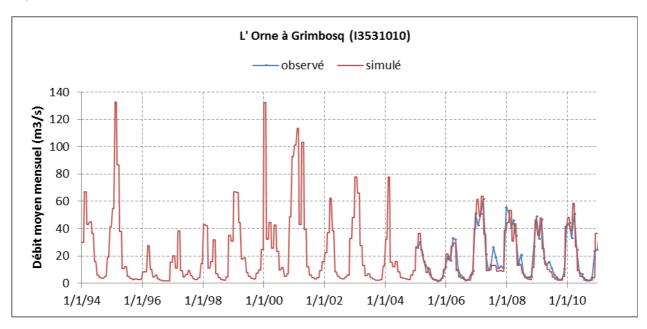


Illustration 56 : Débit de l'Orne à Grimbosq. Comparaison des chroniques simulée (en rouge) et observée (en bleu).

Pour la Laize à Fresney-le-Puceux (Illustration 57), les dynamiques sont correctement représentées mais les débits d'étiage sont légèrement mais systématiquement sous-estimés. La Laize est essentiellement alimentée par drainage de l'aquifère du Cinglais, fortement exploité pour l'alimentation en eau potable de la ville de Caen aux captages de Moulines-Tournebu.

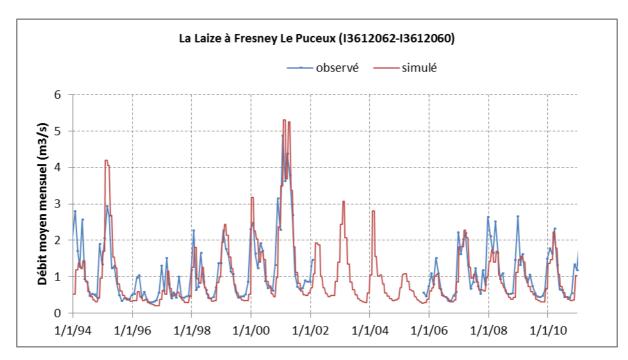
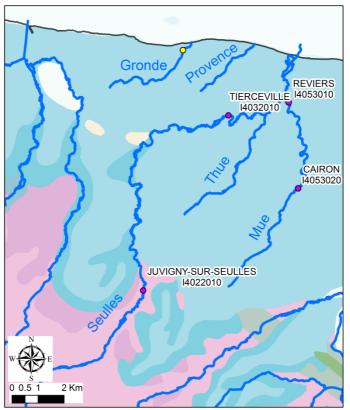


Illustration 57 : Débit de la Laize à Fresney-le-Puceux. Comparaison des chroniques simulée (en rouge) et observée (en bleu). La station l3612062 est hors service depuis 2002 ; elle a été remplacée par la station l3612060 à partir de 2005, au même emplacement. Les données des deux stations sont présentées sur la figure.

#### Bassin versant de la Seulles

Des chroniques de débit de 4 stations du bassin versant de la Seulles ont été utilisées pour le calage, réparties sur les cours d'eau de la Mue et de la Seulles (*cf.* Illustration 58). Quelques données de jaugeage disponibles sur la Gronde ont également été exploitées.



- O Stations hydrométriques disposant de chroniques utilisées lors du calage
- O Jaugeages ponctuels effectués par la DREAL

Illustration 58 : Localisation des stations hydrométriques dont les chroniques de débit ont été utilisées pour le calage du bassin versant de la Seulles (fond : carte géologique à l'échelle 1/1 000 000).

Sur la Seulles, les débits simulés et observés montrent une bonne correspondance. Sur la Mue, les débits simulés sont fréquemment surestimés mais les dynamiques de vidange sont généralement bien représentées.

La comparaison des débits simulés et mesurés sur la Mue à Reviers est présentée à l'Illustration 59. Ce graphique montre que les dynamiques (notamment les tarissements) sont bien représentées. Les débits d'étiage sont surestimés pour plusieurs années, en particulier de 1996 à 1998. Selon la DREAL, ceci peut s'expliquer par le fait que ces années étant particulièrement sèches, des prélèvements non répertoriés (et donc non pris en compte par la modèle) ont pu être effectués dans le cours d'eau. Les débits de pointe sont quant à eux assez systématiquement surestimés.

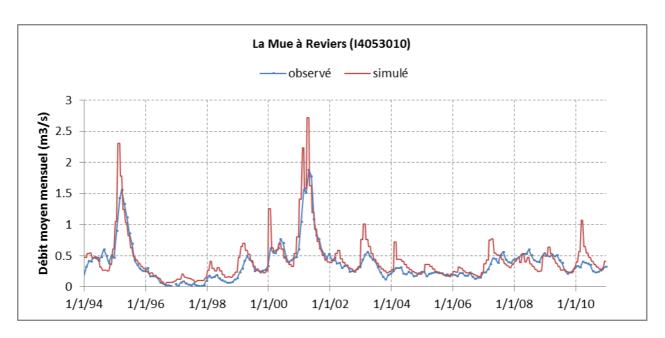


Illustration 59 : Débit de la Mue à Reviers. Comparaison des chroniques simulée (en rouge) et observée (en bleu).

La comparaison des débits simulé et observé sur la Seulles à Juvigny-sur-Seulles (Illustration 60) montre une très bonne restitution par le modèle : les débits de pointe, comme les débits d'étiage et les dynamiques de tarissement sont bien représentés.

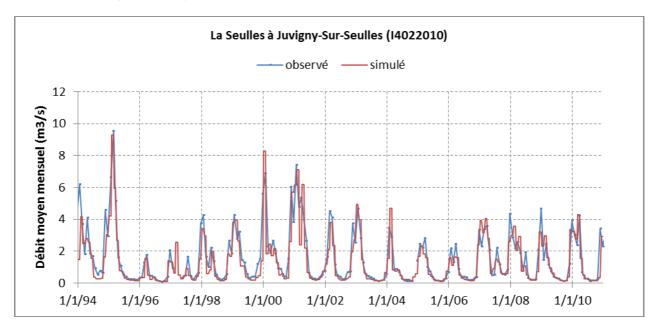
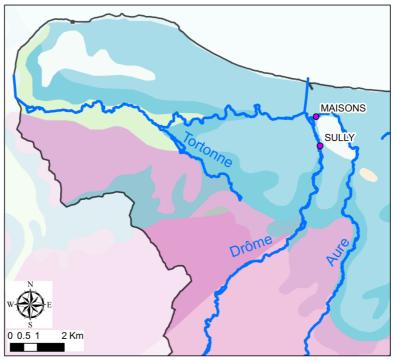


Illustration 60 : Débit de la Seulles à Juvigny-sur-Seulles. Comparaison des chroniques simulée (en rouge) et observée (en bleu).

## • Bassin versant de l'Aure

Les chroniques de débit de 2 stations hydrométriques du bassin versant ont été utilisées pour le calage ; elles sont situées sur les cours d'eau de l'Aure supérieure et de la Drôme (Illustration 61).



Stations hydrométriques disposant de chroniques utilisées lors du calage

Illustration 61 : Localisation des stations hydrométriques pour lesquelles les chroniques ont été utilisées pour le calage du bassin versant de l'Aure (fond : carte géologique à l'échelle 1/1 000 000)

La qualité du calage des chroniques dans ce bassin versant est correcte. Cependant les débits de pointe sont souvent surestimés sur l'Aure à la station de Maisons (Illustration 62) tandis qu'ils sont régulièrement sous-estimés sur la Drôme à la station de Sully (Illustration 63).

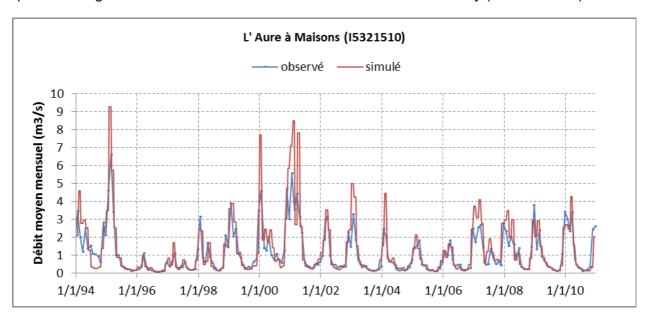


Illustration 62 : Débit de l'Aure à Maisons. Comparaison des chroniques simulée (en rouge) et observée (en bleu).

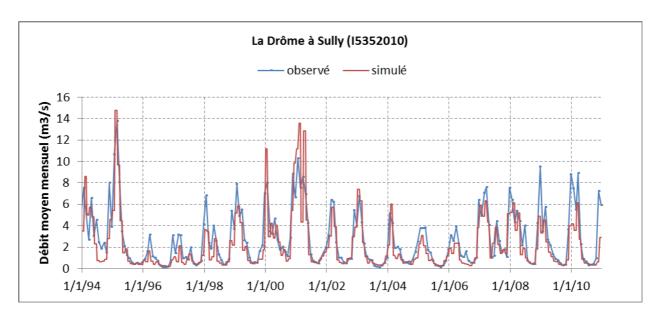


Illustration 63 : Débit de la Drôme à Sully. Comparaison des chroniques simulée (en rouge) et observée (en bleu).

# b) Représentation des chroniques piézométriques

Les 61 chroniques piézométriques simulées et observées sont présentées dans ce rapport. Pour chaque aquifère du domaine d'étude, quelques chroniques piézométriques représentatives sont commentées ci-après; les autres graphiques comparant les niveaux piézométriques observés et simulés sont regroupés dans l'Annexe 8.

#### • Piézomètres de la craie du Cénomanien

5 chroniques piézométriques ont été utilisées pour le calage de l'aquifère du Cénomanien (cf. Illustration 64).

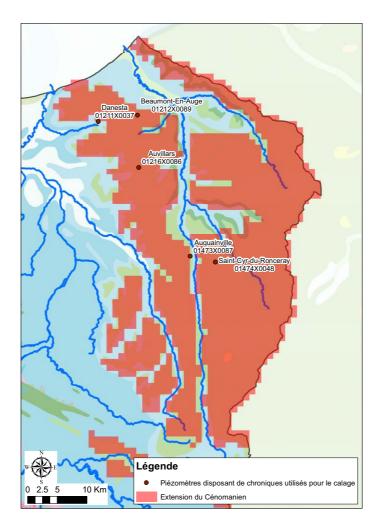


Illustration 64 : Piézomètres de la craie cénomanienne dont les chroniques ont été utilisées pour le calage (fond : carte géologique à l'échelle 1/1 000 000)

Tous les piézomètres montrent des cycles pluriannuels bien marqués. Les cycles annuels ont une amplitude plus faible, variable selon les années et les piézomètres.

La comparaison des niveaux simulés et observés dans le piézomètre d'Auquainville (Illustration 65) montre qu'ils sont en bonne adéquation, aussi bien en termes de niveaux moyens que de dynamique d'évolution. La cyclicité annuelle et les cycles pluriannuels sont notamment bien reproduits.

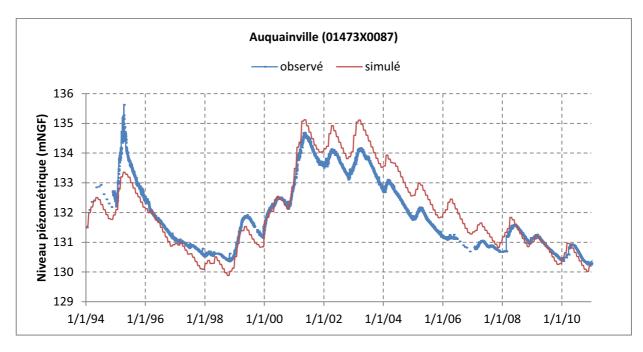


Illustration 65 : Chroniques piézométriques simulée (en rouge) et observée (en bleu) au piézomètre d'Auquainville (01473X0087).

## Piézomètres des calcaires et sables de l'Oxfordien

Seules 2 chroniques piézométriques ont été utilisées pour le calage de l'aquifère de l'Oxfordien (cf. Illustration 66).

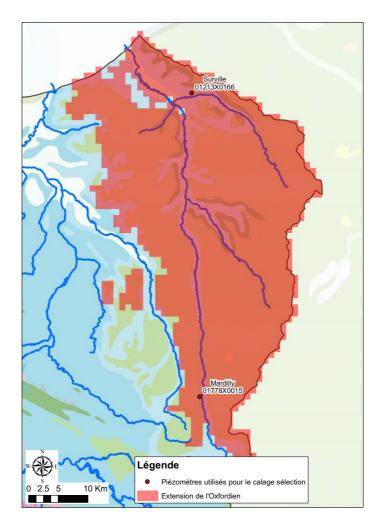


Illustration 66 : Piézomètres de l'Oxfordien dont les chroniques ont été utilisées pour le calage (fond : carte géologique à l'échelle 1/1 000 000)

Il faut noter que les contextes particuliers dans lesquels se trouvent les deux piézomètres ne sont pas représentatifs du comportement hydrodynamique de cet aquifère. En effet, le piézomètre de Mardilly est implanté en bordure de la Touques et le piézomètre de Surville, situé à flanc de coteau, correspond à un niveau perché au sein de l'Oxfordien, assez compartimenté dans ce secteur. Les chroniques simulées et observées pour les deux piézomètres ainsi que des éléments de contexte sont présentés en Annexe 8.

Les niveaux moyens sont bien reproduits mais l'amplitude des fluctuations annuelles est sousestimée.

## • Piézomètres des calcaires du Bathonien moyen et supérieur

40 chroniques piézométriques sont disponibles pour l'aquifère des calcaires du Bathonien, 7 dans la région d'Argentan, 17 dans la ville de Caen et 16 dans le reste de l'aquifère (cf. Illustration 67).

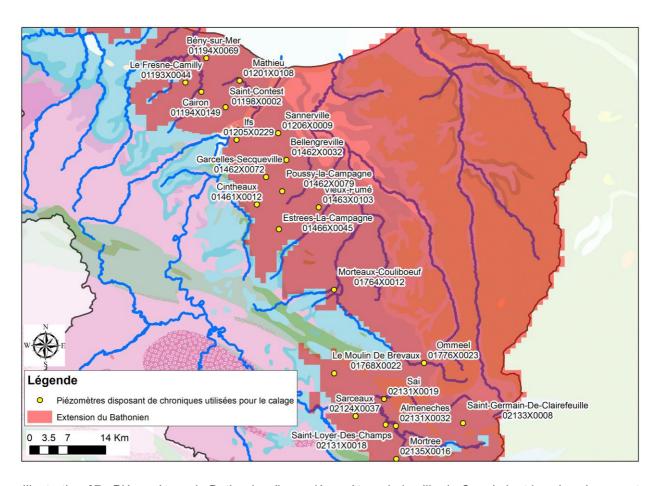


Illustration 67 : Piézomètres du Bathonien (hors piézomètres de la ville de Caen) dont les chroniques ont été utilisées pour le calage (fond : carte géologique à l'échelle 1/1 000 000).

Le comportement piézométrique le plus fréquent du Bathonien est celui d'un aquifère fissuré présentant des cycles saisonniers généralement bien individualisés, avec un tarissement estival prononcé (à l'exception des piézomètres de Cintheaux, Poussy-la-Campagne, Estrées-la-Campagne et Saint-Contest qui ne montrent pas d'évolutions saisonnières). Lorsqu'elles existent, les évolutions saisonnières se surimposent à des cycles pluriannuels dont l'amplitude, généralement faible, peut s'accroître notablement lorsque la fracturation diminue. Pour sa part, le piézomètre d'Estrées-la-Campagne présente un niveau quasiment fixe qu'il n'a pas été possible de restituer avec le modèle.

L'Illustration 68 présente les chroniques piézométriques observées et simulées pour le piézomètre de Vierville-sur-Mer, dans le Bessin. Les niveaux simulés sont légèrement mais systématiquement inférieurs aux niveaux observés. Les amplitudes des variations saisonnières sont bien rendues par le modèle.

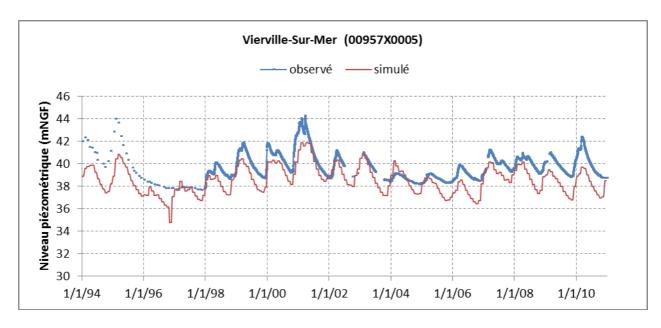


Illustration 68 : Chroniques piézométriques simulée (en rouge) et observée (en bleu) au piézomètre de Vierville-sur-Mer (00957X0005).

Le piézomètre de Saint-Contest fait preuve d'une inertie beaucoup plus forte, avec des cycles annuels peu, voire pas du tout perceptibles, alors que les variations pluriannuelles sont bien marquées. Ces dynamiques sont rendues par le modèle (Illustration 69).

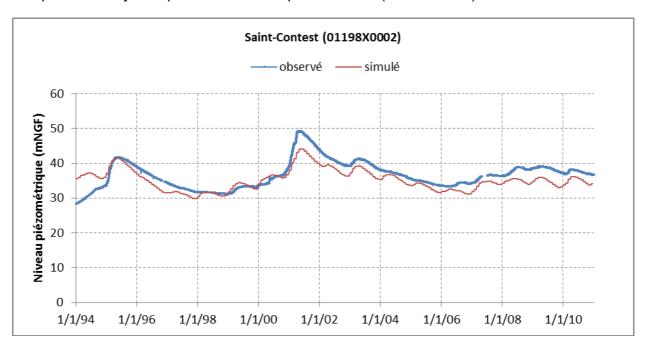


Illustration 69 : Chroniques piézométriques simulée (en rouge) et observée (en bleu) au piézomètre de Saint-Contest (01198X0002)

Le piézomètre d'Ifs montre des cycles pluriannuels de grande ampleur et des cycles annuels plus ou moins marqués selon les années. La modélisation restitue assez bien les évolutions pluriannuelles mais le modèle exagère les cycles annuels.

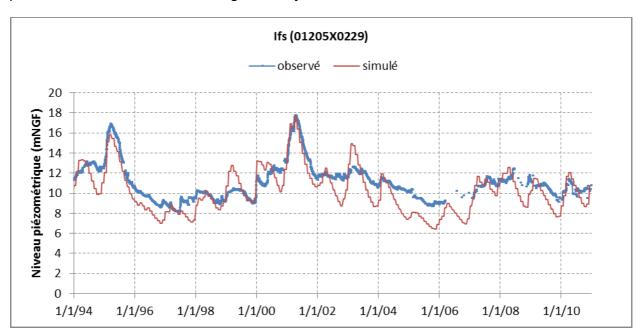


Illustration 70 : Chroniques piézométriques simulée (en rouge) et observée (en bleu) au piézomètre d'Ifs (01205X0229)

L'Illustration 71 présente les chroniques piézométriques observée et simulée pour un des piézomètres de la ville de Caen, à moins d'un kilomètre des prélèvements de Prairie. La chronique piézométrique est très influencée par les pompages comme le montre la comparaison des chroniques simulées avec et sans pompages. Le modèle semble bien restituer les évolutions piézométriques à long terme, même si les lacunes de la chronique observée ne permettent pas de l'affirmer avec certitude.

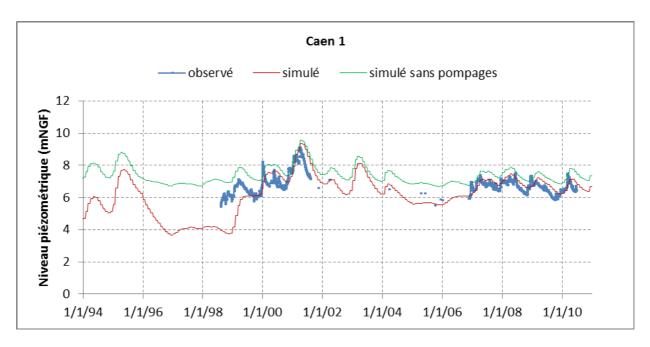


Illustration 71 : Chroniques piézométriques simulée (en rouge) et observée (en bleu) au piézomètre n°1 de la ville de Caen.

L'Illustration 72 présente les chroniques piézométriques observée et simulée au piézomètre de Sai, dans le secteur d'Argentan. Ce piézomètre est situé à environ 150 m de la rivière l'Ure. Les amplitudes des variations piézométriques saisonnières sont sous-estimées par le modèle. Le fait de considérer un niveau d'eau fixe dans la rivière (cf. §3.4.2) est probablement une limite pour la représentation précise des niveaux piézométriques en bordure de rivière.

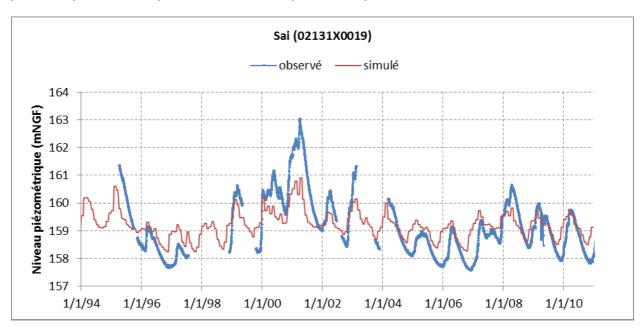


Illustration 72 : Chroniques piézométriques simulée (en rouge) et observée (en bleu) pour le piézomètre de Sai (02131X0019)

#### Piézomètres des calcaires du Bajocien

8 chroniques piézométriques ont été utilisées pour le calage de l'aquifère des calcaires du Bajocien (Illustration 73).

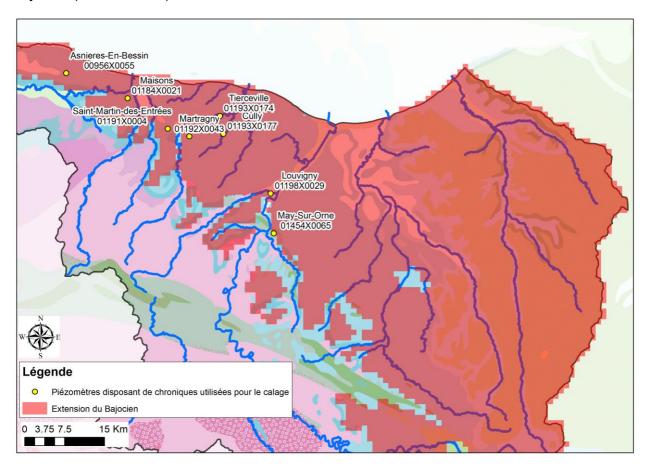


Illustration 73 : Piézomètres du Bajocien dont les chroniques ont été utilisées pour le calage (fond : carte géologique à l'échelle 1/1 000 000).

Cette nappe est globalement plus réactive que le Bathonien car elle a une capacité de stockage plus faible. A l'exception des piézomètres de Saint-Martin-des-Entrées et de Cully, les cycles saisonniers sont très marqués et assez réguliers, surtout dans le Bessin. Les piézomètres de Maisons et de Saint-Martin-des-Entrées présentent un comportement karstique, qu'il n'a pas été possible de reproduire dans le modèle.

La piézométrie d'Asnières-en-Bessin (Illustration 74) présente des cycles saisonniers très marqués. L'amplitude et la dynamique des fluctuations piézométriques sont très bien reproduites par le modèle.

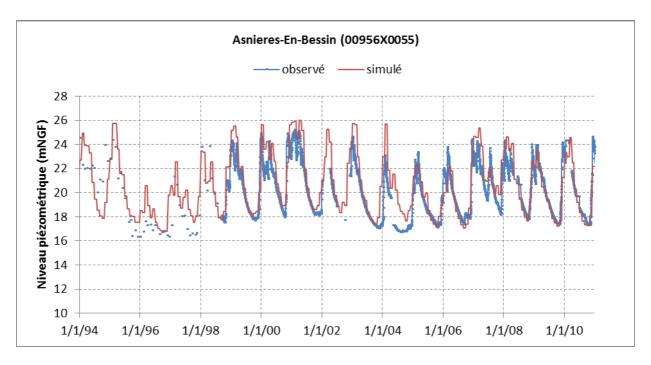


Illustration 74 : Chroniques piézométriques simulée (en rouge) et observée (en bleu) au piézomètre d'Asnières-en-Bessin (00956X0055)

La chronique piézométrique de Louvigny (Illustration 75) est fortement influencée par les captages de Prairie, situés à moins d'un kilomètre et exploités pour l'alimentation en eau potable de Caen. L'Illustration 75, représente la chronique piézométrique simulée dans un scénario sans aucun prélèvement. La comparaison des chroniques simulées avec et sans pompages montre l'influence des prélèvements, notamment sur les niveaux de basses eaux. Entre 2000 et 2004, les fluctuations annuelles sont très bien reproduites par le modèle tandis qu'avant 1997 et à partir de 2005 elles sont sous-estimées par le modèle. Ces différences de rendu pourraient s'expliquer par une estimation erronée des prélèvements pendant ces périodes.

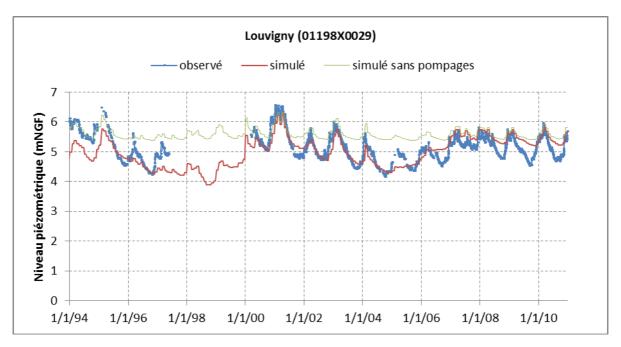


Illustration 75 : Chroniques piézométriques simulée (en rouge) et observée (en bleu) au piézomètre de Louvigny (01198X0029).

#### Piézomètres des formations du Lias infra-Toarcien et du Trias

4 chroniques piézométriques ont été utilisées pour le calage de l'aquifère des formations du Lias infra-Toarcien et du Trias (Illustration 76).

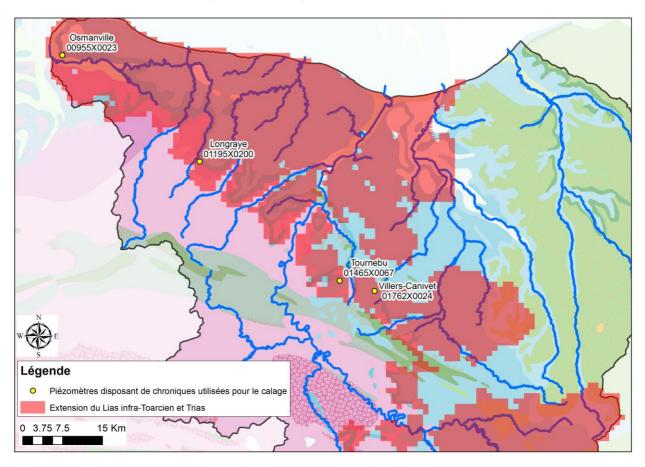


Illustration 76 : Piézomètres du Lias infra-Toarcien et du Trias dont les chroniques ont été utilisées pour le calage (fond : carte géologique à l'échelle 1/1 000 000).

Les piézomètres de Tournebu, Longraye et Villers-Canivet présentent des fluctuations saisonnières assez marquées, bien simulées à Tournebu et Longraye. Les fluctuations interannuelles sont difficiles à évaluer, les chroniques observées étant très courtes. Le piézomètre d'Osmanville présente des fluctuations de faible ampleur mais très rapides, non restituées par le modèle.

Les chroniques simulée et observée au piézomètre de Tournebu sont présentées à l'Illustration 77 ; les autres chroniques sont regroupées à l'Annexe 8.

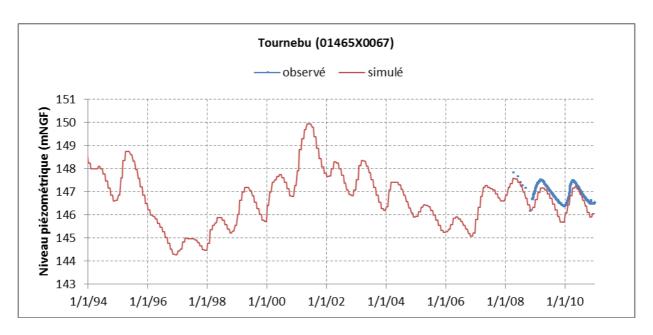


Illustration 77 : Chroniques piézométriques simulée (en rouge) et observée (en bleu) au piézomètre de Tournebu (01465X0067)

#### Piézomètres du socle

2 chroniques piézométriques ont été utilisées pour le calage de l'aquifère du socle : Briouze et Saint-Pierre-du-Regard (Illustration 78).

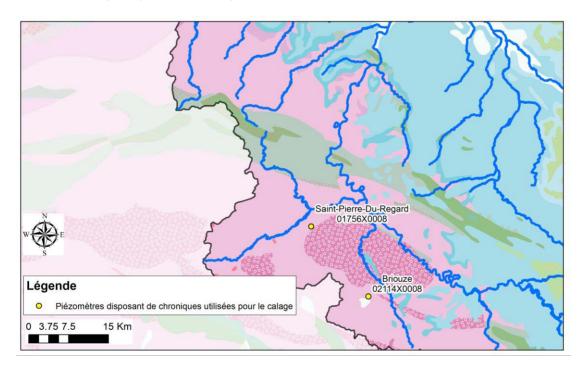


Illustration 78 : Piézomètres du socle dont les chroniques ont été utilisées pour le calage (fond : carte géologique à l'échelle 1/1 000 000).

La chronique de Saint-Pierre-du-Regard est présentée dans l'Illustration 79. Elle montre des fluctuations annuelles bien marquées, dont le modèle restitue bien la dynamique mais sous-estime un peu l'amplitude.

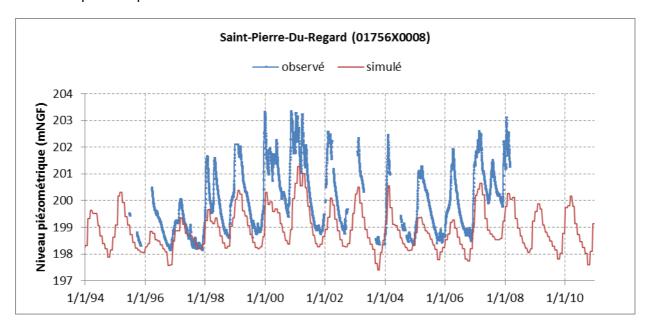


Illustration 79 : Chroniques piézométriques simulée (en rouge) et observée (en bleu) au piézomètre de Saint-Pierre-Du-Regard (01756X0008).

# 4.2.3. Paramètres ajustés à l'issue du calage.

# a) Paramètres hydrodynamiques

## • Perméabilités

Le Tableau 18 synthétise les valeurs de perméabilité affectées à chaque couche du modèle à l'issue du calage. Les cartes illustrant la distribution spatiale des perméabilités sont présentées en Annexe 9.

Couche du modèle	Perméabilités finales (en m/s)
Alluvions	<ul> <li>vallée de la Touques : 10<sup>-7</sup></li> <li>vallée de la Dives : 2.10<sup>-4</sup></li> <li>vallée de l'Aure inférieure : 10<sup>-5</sup></li> </ul>
Craie du Cénomanien	entre 10 <sup>-4</sup> et 10 <sup>-5</sup>
Formations du Crétacé infra-Cénomanien et du Kimméridgien	<ul> <li>Horizontale : 1 à 2.10<sup>-6</sup></li> <li>Verticale : 2.10<sup>-9</sup> à 2.10<sup>-8</sup></li> </ul>
Calcaires et sables de l'Oxfordien moyen et supérieur	- 1 à 5.10 <sup>-5</sup> sauf dans une petite zone en rive droite de la Touques après l'embouchure avec la Calonne : 5.10 <sup>-7</sup>
Marnes du Callovo- Oxfordien	<ul> <li>zone d'Argentan : 10<sup>-7</sup></li> <li>marais de la Dives : 5.10<sup>-8</sup></li> <li>ailleurs du SO vers le NE : de 4 à 1.10<sup>-9</sup></li> </ul>
Calcaires du Bathonien moyen et supérieur	<ul> <li>sous couverture : 2 à 5.10<sup>-7</sup></li> <li>à l'affleurement : 6.10<sup>-6</sup> à 5.10<sup>-4</sup></li> </ul>
Formations marneuses du Bathonien inférieur et moyen	10 <sup>-8</sup> à 10 <sup>-9</sup>
Calcaires du Bajocien- Aalénien-Toarcien	<ul> <li>partie libre: 5.10<sup>-7</sup> à 10<sup>-4</sup></li> <li>partie captive: 5.10<sup>-6</sup> à 10<sup>-7</sup> m/s</li> </ul>
Formations du Lias infra- Toarcien et du Trias	<ul> <li>au Nord de Falaise, sous couverture : horizontale : 10<sup>-6</sup>, verticale 10<sup>-9</sup></li> <li>ailleurs, les perméabilités horizontales et verticales sont égales et comprises entre 10<sup>-6</sup> et 10<sup>-4</sup> m/s</li> </ul>
Socle	10 <sup>-6</sup> à 5.10 <sup>-5</sup> m/s à l'affleurement, 10 <sup>-7</sup> m/s sous couverture

Tableau 18 : Perméabilités ajustées à l'issue du calage.

# Coefficients d'emmagasinement

Les coefficients d'emmagasinement captif n'ont guère été modifiés au cours du calage. Ils sont donc partout égaux à 10<sup>-6</sup> m<sup>-1</sup>, sauf dans les calcaires bajociens et les calcaires bathoniens sous-couverture, où ils ont été ajustés à 10<sup>-7</sup> m<sup>-1</sup>.

Les coefficients d'emmagasinement libre affectés à chaque couche après calage sont récapitulés dans le Tableau 19. Lorsque plusieurs valeurs sont affectées à une même couche, une carte de distribution spatiale est jointe en Annexe 10.

Couche du modèle	Emmagasinement libre final		
Alluvions	15%		
Craie du Cénomanien	5-10%		
Formations du Crétacé infra-Cénomanien et du Kimméridgien	5%		
Calcaires et sables de l'Oxfordien moyen	5 % dans la partie Nord		
et supérieur	1% dans la partie Sud		
Marnes du Callovo-Oxfordien	1%		
Calcaires du Bathonien moyen et supérieur	0.5-3%		
Formations marneuses du Bathonien inférieur et moyen	1%		
Calcaires du Bajocien-Aalénien-Toarcien	0.1-1%		
Formations du Lias infra-Toarcien et du Trias	5-10%		
Socle	0.2-1%		

Tableau 19 : Emmagasinements libres ajustés à l'issue du calage.

# b) Failles

Le calage du modèle a permis de tester le rôle hydraulique de plusieurs failles. À l'issue du calage, deux d'entre elles sont supposées jouer le rôle de limites étanches et elles sont simulées en tant que telles : la faille de Grande Gouffern au Nord d'Argentan et une partie d'une faille de direction N110 entre Caen et Ouistreham (Illustration 80).

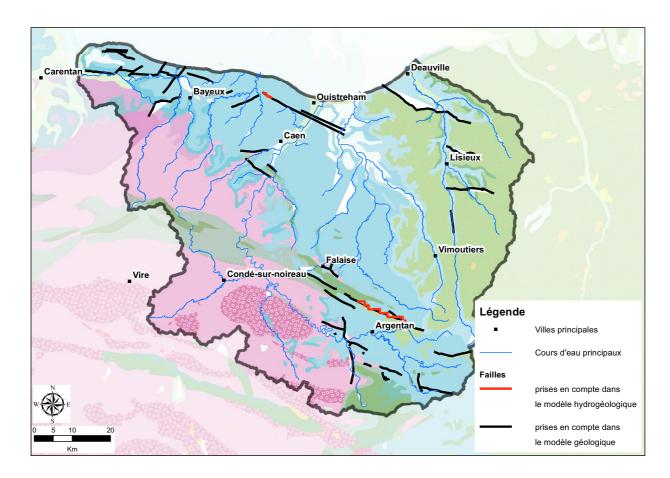


Illustration 80 : Failles prises en compte dans le modèle géologique et dans le modèle hydrogéologique

# c) Recharge

# • En régime transitoire

Les zones de recharge et les paramètres de recharge associés ajustés à l'issue du calage sont présentés sur l'Illustration 81 et dans le Tableau 7.

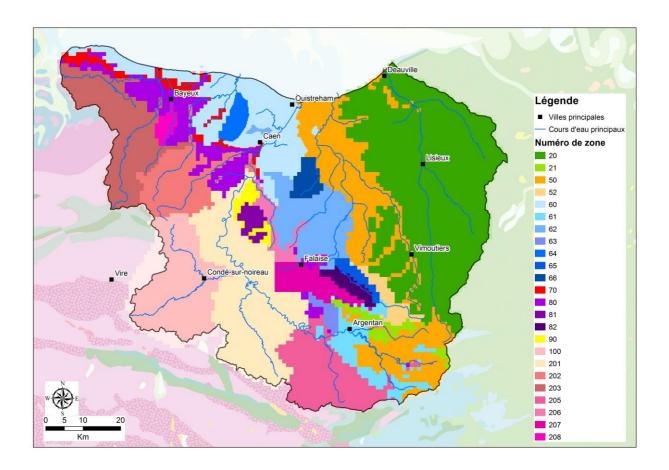


Illustration 81 : Zonation des paramètres de recharge ajustée à l'issue du calage. (se reporter au Tableau 20 pour la correspondance entre numéros de zone et paramètres de recharge)

Numéro de	Capacité de	Hauteur d'équipartition	Temps de demi-
zone	stockage (mm)	ruissellement/infiltration RUIPER (mm)	percolation (mois)
20	230	130	0.6
21	299	90	0.6
50	210	2	2.3
51	210	25	2.3
60	150	100	0.5
61	300	100	0.5
62	150	100	6
63	30	100	5
64	150	500	12
65	30	100	5
66	250	150	6
70	210	2	2.3
80	200	90	0.5
81	150	120	12
82	30	100	5
90	150	120	12
100	137	6.5	10.7
201	229	8.7	3.7
202	177	7.1	5.7
203	425	10.4	3.1
205	146	5.3	9.
206	150	80	12
207	145	80	3.7
208	200	20	3.1

Tableau 20 : Paramètres de recharge ajustés à l'issue du calage

# • En régime permanent

Les cartes de distribution spatiale des flux de recharge et de ruissellement ajustées à l'issue du calage sont présentées en Annexe 11.

# 4.2.4. Bilan des échanges entre couches

L'Illustration 82 présente un bilan des débits entrant et sortant de chaque couche du modèle pour le régime permanent simulé. Ce régime permanent prend en compte les débits de l'année 1994 puisqu'il a vocation à définir un état initial des niveaux piézométriques au démarrage de la simulation en régime transitoire.

Les entrées cumulent la recharge, la drainance depuis une autre couche du modèle et les échanges nappe-rivière. Les sorties correspondent aux débordements de nappe, débits de pompage, échanges nappe-rivière, drainance vers une autre couche du modèle et sorties en mer. Les prélèvements en rivière n'apparaissent pas dans ce schéma.

La baisse des prélèvements en eau souterraine entre 1994 et 2010 étant relativement faible à l'échelle de la zone modélisée (15%), le bilan global des échanges entre couches réalisé avec les prélèvements en eaux souterraines de l'année 2010 aurait été assez peu différent.

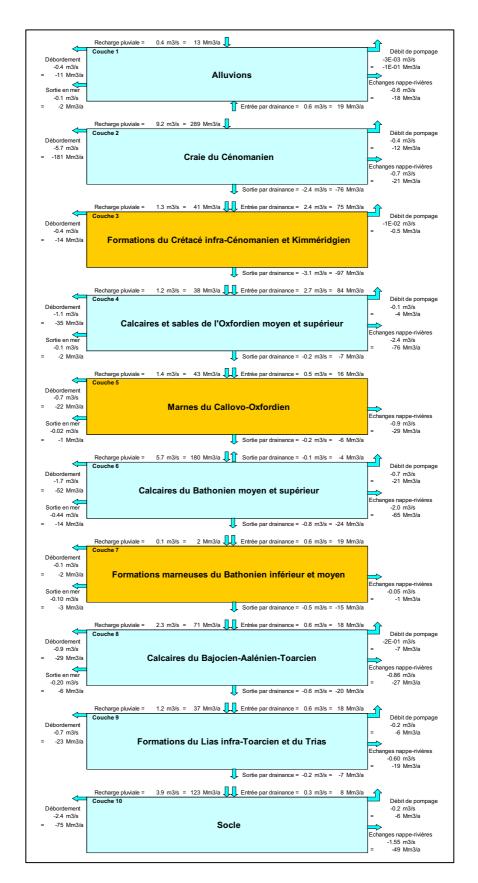


Illustration 82 : Débits entrants et sortants simulés par le modèle en régime permanent

# 4.3. ANALYSES DE SENSIBILITE

Le calage du modèle est en soi une analyse de sensibilité multiforme au cours de laquelle il s'agit de trouver les meilleurs compromis pour rapprocher le comportement et la dynamique du modèle des réactions du système aquifère observées sur le terrain.

Ceci étant, en cours ou en fin de calage, une série d'analyses de sensibilité peut se révéler utile pour apprécier la réactivité du modèle aux principaux paramètres de calage : perméabilité, emmagasinement, recharge, pompages, etc. Ces analyses de sensibilité peuvent être globales (par exemple que se passe-t-il si on multiplie ou divise globalement l'un des paramètres par 2 ?) ou sectorielles (impact d'un accroissement du colmatage d'un cours d'eau sur la productivité d'un champ captant proche).

L'analyse des résultats obtenus permet de hiérarchiser le rôle des différents paramètres dans le comportement et la dynamique du système aquifère, de cerner leur degré d'autonomie ou de couplage, etc. Cette étape d'analyse peut contribuer significativement à améliorer la connaissance du système aquifère, à cerner les lacunes résiduelles, et à concevoir de nouvelles investigations de terrain pour préciser le comportement du système aquifère et améliorer la représentativité du modèle.

# 4.3.1. Influence des pompages liés à l'élevage des bovins

L'étude des fichiers transmis par l'AESN et par la DDTM14 a montré que le nombre de prélèvements pour l'élevage identifié dans ces fichiers est très faible au regard du nombre effectif d'installations. Il a donc été décidé, en concertation avec les membres du Comité de pilotage, de simuler les prélèvements relatifs à l'élevage bovin en se basant sur les fichiers de la Base de Données Nationale d'Identification, laquelle recense les installations, le nombre et le type de bovins par exploitation.

Cette approche est sous-tendue de plusieurs hypothèses :

- le point de prélèvement est supposé se situer au centroïde de la commune :
- les prélèvements sont attribués au premier aquifère capté, sauf dans les zones où celuici est trop profond, auquel cas le prélèvement est affecté à rivière :
- les volumes prélevés sont calculés sur la base de la consommation d'eau moyenne par animal.

L'analyse de sensibilité réalisée consiste à comparer les niveaux piézométriques simulés en régime permanent, avec et sans pompages consacrés à l'élevage.

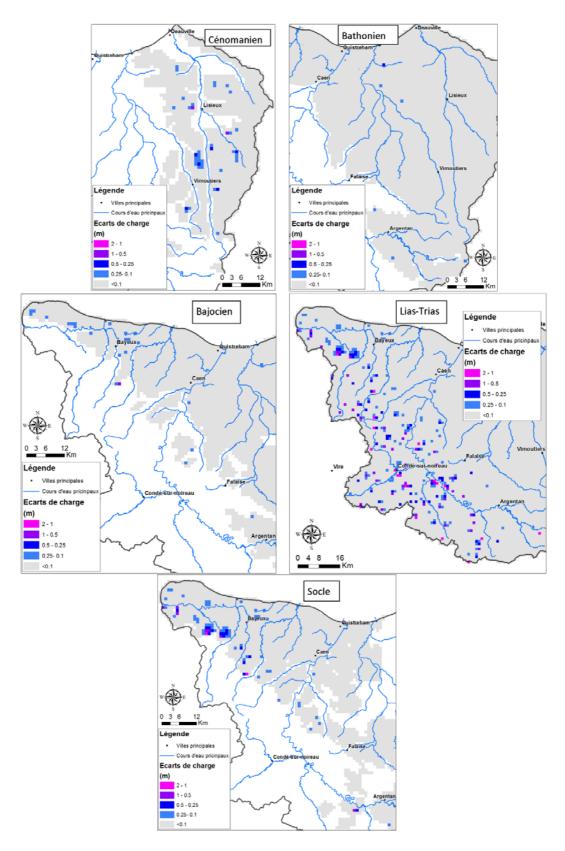


Illustration 83 : Baisse piézométrique induite par les prélèvements consacrés à l'élevage (simulation en régime permanent)

L'Illustration 83 montre les baisses de niveau piézométrique induites par les prélèvements destinés à l'élevage dans les aquifères suivants : craie du Cénomanien, calcaires du Bathonien moyen et supérieur, calcaires du Bajocien-Aalénien-Toarcien, Lias infra-Toarcien et Trias, socle. Les effets des prélèvements pour les bovins sont minimes et très localisés pour les aquifères du Cénomanien, du Bathonien et du Bajocien. Pour l'aquifère du Lias-Trias, le niveau piézométrique baisse de 1.5 m au maximum. Pour le socle, l'impact des prélèvements est plus sensible (les niveaux piézométriques diminuent de presque 2 m par endroit), mais les impacts restent limités au proche voisinage des pompages. Ces impacts piézométriques mineurs n'affectent qu'à la marge le comportement hydrodynamique des nappes, y compris dans les zones à enjeu.

Même si ces pompages n'ont qu'un impact très limité sur les niveaux piézométriques simulés, ils sont intégrés dans la version finale du modèle de façon à ce que celui-ci fournisse une représentation aussi précise que possible des bilans d'entrée/sortie dans le domaine d'étude.

# 4.3.2. Rôle hydraulique de la faille de Bény-sur-Mer

Le rôle hydraulique de la faille de direction ONO-ESE située entre Caen et Ouistreham a été appréhendé au travers de plusieurs simulations :

- « transparence hydraulique » : aucune propriété hydraulique particulière n'est assignée à la faille ;
- barrière hydraulique intégrale, la faille faisant écran aux écoulements souterrains sur toute sa longueur : la faille est assimilée à une limite étanche sur toute sa longueur ;
- barrière hydraulique partielle : rôle de limite étanche assigné à une partie seulement de la longueur de la faille.

Le piézomètre de Bény-sur-Mer, situé à moins de 200 m en amont hydraulique de cette faille (Illustration 84), témoigne de l'impact piézométrique potentiel de la faille.

L'Illustration 85 permet de comparer les niveaux piézométriques au piézomètre de Bény-sur-Mer selon que la faille se comporte comme une limite étanche ou qu'elle ne joue aucun rôle hydraulique particulier. L'attribution à la faille d'un rôle de barrière hydraulique améliore l'adéquation entre niveaux simulés et niveaux observés.

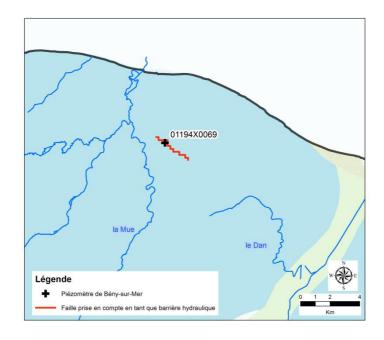


Illustration 84 : Localisation du piézomètre de Bény-sur-Mer

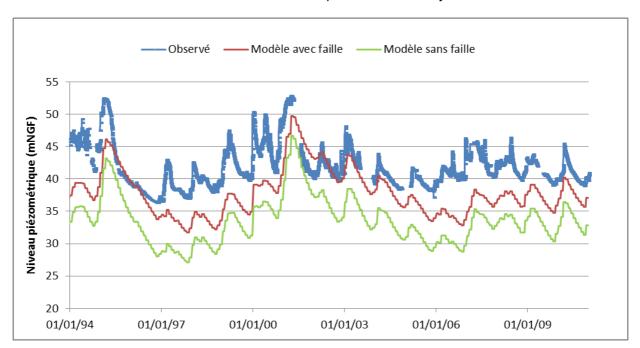


Illustration 85 : Chroniques piézométriques à Bény-sur-Mer (01194X0069). Comparaison des niveaux observé (bleu) et simulés, selon que la faille est supposée étanche (rouge) ou « transparente » (vert).

L'Illustration 86 permet de comparer les niveaux piézométriques simulés en régime permanent dans l'aquifère du Bathonien, en considérant, soit que la faille est considérée étanche dans sa seule partie nord-ouest, soit qu'elle est étanche sur toute sa longueur. L'influence du rôle étanche attribué à la faille comme limite étanche n'est perceptible que dans un secteur relativement restreint, en rive gauche du Dan dans sa partie amont. En effet, dans la majeure partie du reste de la zone, les écoulements sont parallèles à la faille : ils n'en subissent donc pas l'influence.

Sur l'Illustration 86 ont également été reportés les niveaux piézométriques asynchrones disponibles dans ce secteur pour l'aquifère du Bathonien. Ces données ne sont toutefois pas suffisantes pour conclure avec certitude que l'une des deux configurations soit plus vraisemblable que l'autre. Il a donc été décidé de choisir la solution la plus simple, à savoir de n'attribuer aucun rôle hydraulique particulier à la faille, sauf au voisinage du piézomètre de Bény-sur-Mer.

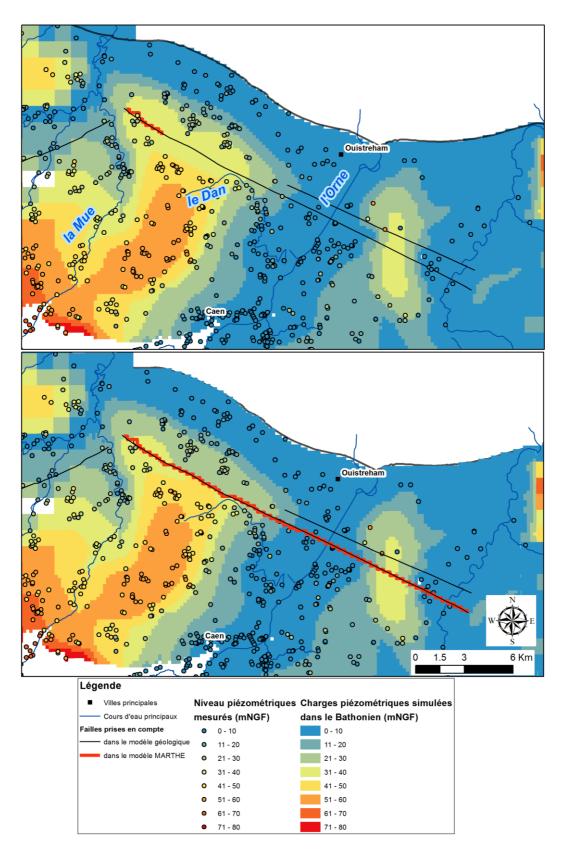


Illustration 86 :Comparaison des niveaux piézométriques simulés en régime permanent dans l'aquifère du Bathonien , selon que la faille est étanche dans sa seule partie NO (en haut) ou sur toute sa longueur (en bas).

# 4.3.3. Chronique d'ETP

Afin de mesurer l'influence du choix de la station d'évapotranspiration potentielle (ETP), deux simulations en régime transitoire ont été comparées, l'une en affectant à la partie Sud du modèle la chronique de la station de l'Oudon, l'autre en optant pour la chronique d'Alençon (la délimitation des zones d'ETP est celle de l'Illustration 13).

La comparaison des chroniques piézométriques simulées en prenant en compte l'une ou l'autre des séries d'ETP montre que les différences sont minimes. Les écarts les plus importants apparaissent dans le Bathonien, secteur d'Argentan. Le piézomètre de Sarceaux (Illustration 87) est l'un des ouvrages présentant les écarts les plus importants, jusqu'à 0.4 m ponctuellement.

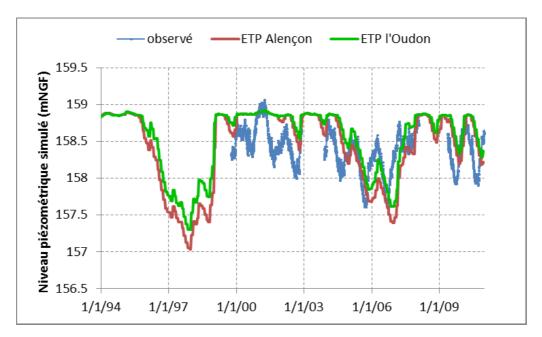


Illustration 87 : Niveaux piézométriques au piézomètre de Sarceaux (02124X0037). Comparaison des niveaux observé (bleu) et simulés, avec l'ETP d'Alençon (rouge) et l'ETP de l'Oudon (vert).

Les comparaisons menées sur les chroniques de débit simulées aux stations hydrométriques conduisent aux mêmes conclusions, avec de très faibles différences entre les résultats obtenus avec les deux séries. Les écarts les plus importants sont relevés pour l'Orne et ses affluents méridionaux. L'Illustration 88 permet de comparer les débits observés et simulés à la station de Ségrie-Fontaines sur la Rouvre. Les différences constatées entre les débits simulés avec les deux chroniques d'ETP sont minimes.

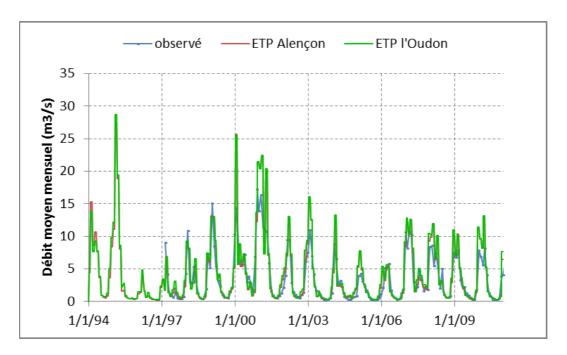


Illustration 88 : Débits de la Rouvre à Ségrie-Fontaines. Comparaison des niveaux observé (bleu) et simulés, avec l'ETP d'Alençon (rouge) et l'ETPde l'Oudon (vert).

Au vu de ces résultats et du fait que la station de l'Oudon a une chronique d'ETP beaucoup plus courte que celle d'Alençon, la version finale du modèle exploite la chronique d'Alençon pour la partie Sud du domaine d'étude.

# 5. Conclusions

Le présent rapport restitue la deuxième phase du travail de modélisation hydrogéologique maillée portant sur les aquifères des plaines de Caen-Argentan et du bassin de la Dives. Cette phase a permis de construire et de caler un modèle hydrogéologique pour simuler les écoulements souterrains dans le domaine d'étude.

La géométrie du modèle est héritée de celle du modèle géologique élaboré durant la première phase de l'étude. Le modèle hydrogéologique comporte 10 couches du socle jusqu'à la surface, dont 5 couches aquifères : craie du Cénomanien, calcaires et sables de l'Oxfordien moyen et supérieur, calcaires du Bathonien moyen et supérieur, calcaires du Bajocien-Aalénien-Toarcien, formations du Lias infra-Toarcien et Trias.

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

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

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

Les caractéristiques des pompages en nappe sont issues des données fournies par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie et la DDTM du Calvados (pour la modulation mensuelle des prélèvements AEP et pour les prélèvements affectés au remplissage des gabions). Lorsque les données mensuelles n'étaient pas disponibles, les chroniques ont été reconstituées à partir des éléments disponibles (p. ex., prélèvements AEP mensuels 2002 collectés dans le cadre du SDAEP). Au total, ce sont entre 67 et 82 Mm³/an (selon les années) qui sont prélevés sur l'ensemble du domaine d'étude, dont 75 % à 80 % proviennent des eaux souterraines.

Le calage du modèle, en régime permanent puis en régime transitoire sur 17 années (1994-2010) au pas de temps mensuel, s'est appuyé sur les cartes piézométriques régionales disponibles, ainsi que sur 61 chroniques piézométriques et 36 chroniques de débit enregistrées aux stations hydrométriques implantées sur le réseau hydrographique. Le calage a principalement consisté à ajuster les paramètres hydrogéologiques (perméabilité et coefficients d'emmagasinement), les paramètres de recharge, et les paramètres dimensionnant les échanges nappe-rivière.

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

En raison de la grande extension géographique de la zone d'étude et du comportement hydrodynamique complexe de quelques secteurs, le calage pourrait être encore amélioré dans certaines zones, sous réserve de disposer de davantage de données. C'est en particulier le cas dans le bassin versant de la Touques (pays d'Auge), secteur situé en périphérie des principales zones d'intérêt du modèle, pour lequel le calage des chroniques piézométriques est satisfaisant tout en présentant des débits d'étiage sous-estimés par le modèle. Les chroniques piézométriques de nature karstique relevées dans les aquifères du Bajocien et du Bathonien sont par ailleurs difficilement restituées, malgré les tentatives faites pour introduire des drains simulant les réseaux karstiques (fonctionnalité particulière du logiciel MARTHE).

A l'inverse, de nombreuses zones, dont les principales zones d'intérêt du modèle, sont très bien rendues par le modèle.

Le modèle hydrogéologique ainsi construit apparaît tout à fait pertinent pour répondre aux principaux objectifs de l'étude ; il peut notamment :

- fournir les éléments scientifiques qui permettront la mise à jour de la délimitation de la Zone de Répartition des Eaux (ZRE) dans l'aquifère du Bajo-Bathonien (plaine de Caen-Argentan et Bessin);
- permettre d'évaluer la ressource en eau souterraine exploitable tout en respectant des rabattements piézométriques et des débits d'étiage acceptables.

Un troisième rapport décrira l'exploitation du modèle au travers de scénarios prédictifs et fournira les bilans hydrodynamiques par zone qui permettront de répondre aux objectifs cidessus.

# 6. Bibliographie

Arnaud L., Mardhel V., Coueffë R, Tourlière B. (2007) - Atlas hydrogéologique numérique du Calvados. Volet cartographique. Rapport BRGM/RP-55670-FR, 150 p, 83 illustrations, 1 annexe.

Arnaud L. (2007) - Atlas hydrogéologique numérique du Calvados. Volet quantitatif. Rapport BRGM/RP-55672-FR, 110 p, 64 illustrations, 3 annexes.

Barthélemy Y., Seguin J.J. (2013). Modélisation maillée des écoulements souterrains – Principes, démarche et recommandations. Rapport BRGM/RP-62549-FR

Dassibat C., Pascaud P., Roux JC (1980) – Hydrogéologie des calcaires jurassiques inférieur et moyen en Basse-Normandie. Bull. BRGM section III n°1, pp. 63-79.

Journaux A., Pareyn C., Roux J.-C., (1966) - Étude hydrogéologique de la plaine de Caen. Rapport final sur les données acquises au cours des années 1964 - 1965 et 1966. Rapport DSGR.66.A76.

Lithologic (2009) - Dossier technique préparatoire à la définition des périmètres de protection des forages de Prairie I. Rapport R/OC/09.078a

Lithologic (2008) - Dossier technique préparatoire à la définition des périmètres de protection des captages d'eau potable de Moulines. Demande d'autorisation. Secteur de Moulines et Tournebu. Rapport R/OC/08.082b

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (septembre 2004) - Guide d'application de l'arrêté interministériel du 11 septembre 2003 relatif à la rubrique 1.1.0 de la nomenclature eau.

Pivette Consultant et Baumann ingeniering SARL, (2001) : Aquifère Bathonien de la région d'Argentan-Sées. Modélisation mathématique pour la gestion de la ressource. Maîtrise d'Ouvrage : Conseil Général de l'Orne.

SCE Aménagement et Environnement : Schéma départemental d'alimentation en eau potable (SDAEP) du Calvados :

- Phase 1 : Diagnostic de la situation actuelle (2003) ;
- Phase 2 : Enjeux, sectorisation et propositions (2004) ;
- Phase 3 : Estimation des coûts (2005).

Sogreah (2008) – Etude préalable à l'instauration des périmètres de protection. Secteur de la Gronde. Rapport d'étude. Rapport Juillet 2008. Révision B. N° 0-83-5510

Thierion C. (2007) - Synthèse de la thèse sur la modélisation hydrogéologique des aquifères du Bajocien - Bathonien dans le secteur des Bocages Normands

Thiéry D. (2004). Logiciel MARTHE 6.4 : Couplage nappe – rivières et nappes – drains ; bilans hydroclimatiques, Note technique NT EAU 2004/19.

Thiéry D. (1990). Logiciel MARTHE, Modélisation d'Aquifères par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements. Notice BRGM R-32210.

Ville de CAEN, Rapport d'activité 2002 - Eau potable et Assainissement

Ward D., McKague K., (2007) – Les exigences en eau du bétail. Fiche technique de l'Ontario. COMMANDE N° 07-024.

# **Annexe 1**

# Légende de la carte géologique à 1/1 000 000M (BRGM)



# Annexe 2

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

#### DOMAINE D'APPLICATION

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

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

#### REFERENCES

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

# STRUCTURE DU LOGICIEL

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

# CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

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

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

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

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

### Calcul des écoulements

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

# Calcul du transport

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

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

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

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

# Interactions géochimiques

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

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

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

# Annexe 3

# Principes et résultats de calage des modèles GARDENIA

- 1. Fonctionnement du logiciel GARDÉNIA
- 2. Limites et incertitudes des modélisations GARDENIA
- 3. Paramètres de calage des modèles GARDÉNIA

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

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

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

Les couleurs des lignes se réfèrent à la description géologique et à la lithologie du bassin versant

Les deux dernières lignes du tableau « différence Orne » et « différence Dives » sont des modélisations complémentaires réalisées pour lesquelles les débits des sous-bassins amont au bassin versant aval et leurs surfaces respectives ont été retranchés. Cela permet faire ressortir les différences de comportement entre les parties du bassin versant en fonction de la lithologie

4. Bilans obtenus après calage à l'échelle des bassins versants modélisés

Les notations suivantes sont utilisées : Qrap : écoulements rapides, Qsout1 : écoulements souterrains dans le premier réservoir, Qsout : écoulements dans un second réservoir souterrain le cas échéant (cas de la Mue à Revier seulement).

5. Comparaison entre simulations et observations pour chaque bassin versant à l'issue des calages

# 1. Fonctionnement du logiciel GARDÉNIA

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

Comme explicité sur l'illustration suivante, GARDÉNIA simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, ruissellement) par une succession de trois<sup>9</sup> réservoirs en cascade qui représentent respectivement :

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

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

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

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

Les données nécessaires sont :

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

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Un quatrième réservoir souterrain peut être utilisé lorsque deux dynamiques distinctes d'écoulement des eaux souterraines coexistent dans le bassin versant étudié.

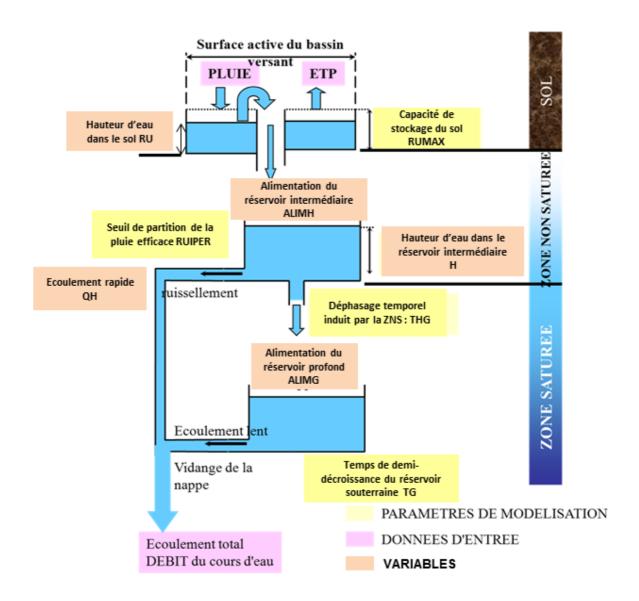


Schéma fonctionnel du modèle GARDENIA

Vidange du réservoir superficiel

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

Vidange du réservoir intermédiaire

Percolation dans le réservoir profond : ALIMG=H.dt/THG

Ecoulement à l'extérieur sous forme de composante rapide : QH=H.dt/(THG.RUIPER.H)

Vidange du réservoir profond

Ecoulement vers l'exutoire : QG=G.dt/TG

## 2. Limites et incertitudes des modélisations GARDENIA

# Incertitudes liées à l'appréciation de la validité du calage

Comment décider qu'une simulation est « satisfaisante » ?

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

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

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

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

# Incertitudes liées au choix de la durée de modélisation

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

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

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

Les 13 modèles de recharge ont été calés sur une période d'une vingtaine d'années couvrant des conditions climatiques variées. Des calages sur des périodes plus courtes peuvent conduire à de meilleurs coefficients d'ajustement mais ils se révèlent en général moins robustes sur de longues périodes.

# Interprétation des paramètres et choix des paramètres initiaux

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

Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives : rapport de phase 2

Bassins Versants	Pluie	etp	Piézomètre modélisé	Pompages	ages	Coef Emmag	Coef Pluie	Coef	Rumax Progr	RuiPer	T1/2 montée	Coef corrélation global
				Débit	Niveau	ı	%	%	mm	mm	ı	ı
L'Aure à Maisons	Torteval	Caen	01184X0021	non	oui	1.7E-03	-2.5	0	425.1	10.4	3.1	0.93
La Dives au Mesnil	l'Oudon	Caen	01764X0012	non	oui	2.4E-02	8	-10	192.6	34	0.7	0.91
	l'Oudon	l'Oudon	01764X0012	oui (2)	uou	0.018	7.4	-9.51	314.2	36.3	1	0.93
La Dives à	Pin au Haras	Caen	01768X0022	non	non	1.7E-02	0	-8.72	216.9	5.7	2.3	06.0
Saint Lambert												
		l'Ondon	01768X0023	non	non	0.017	-6.4	-9.9	205.7	5.8	2.1	0.89
La Mue à Reviers	Caen	Caen	01194X0149	oui	ino	1.2E-06	10	8.52	309.8	58.3	39.7	0.95
Le Noireau à Cahan	Lassy	Caen	ancnu	non			5.9	-10	136.7	6.5	10.7	0.94
La Seulles à Juvigny	Saint Georges	Caen	ancnu	non			-6.5	-10	177.5	7.1	5.68	0.92
	d'Aunay											
L'Orne à la Courbe	Pin au haras	caen	02133X0008	non	oui	6.4E-04	2	-10	145.6	5.3	8.9	0.92
		alençon	02133X0008	non	ino	5.4E-04	5	-10	188.1	4.3	10	0.92
L'Orne à	Houay	caen	02133X0008	nou	uou	0.0043	12	-10	140.3	13.8	2.2	0.91
May-sur-Orne												
	Houay	alençon	02133X0008	nou	uou	0.0022	12	-10	228.9	8.7	3.7	0.91
La Touques à	Cernay	alençon	01473X0087	oui (2)	uou	0.106	4	-10	298.6	06	9.0	0.92
Saint-Martin-de-la-lieue												
différence Orne	Houay	alençon	02133X0008	non	ino	0.0073	12	-10	155.4	22.3	1.4	0.91
différence Dives			01764X0012	oui (2)	uou	1.9E-02	8.94	-8.74	346.9	44.4	1.1	0.93

2. Paramètres de calage des modèles GARDENIA

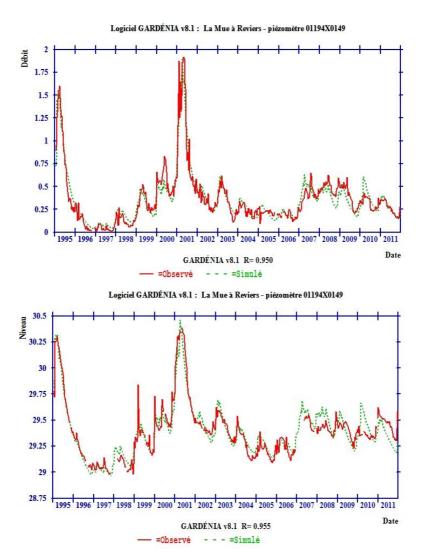
Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives : rapport de phase 2

Bassins Versants	etp	surface	module (m3/s)	lame d'eau ruisselée	piézomètre	Pluie	ETR	Pluie efficace	Qrap	Qsout1	Qsout2	Diff Stock
L'Aure à Maisons	Caen	135	1.1	257.1	01184X0021	931.1	694.2	242.8	186.5	58.3	0.0	-7.9
La Dives au Mesnil	caen	638	3.5	173.1	01764X0012	719.9	569.1	151.7	54.8	98.4	0.0	-2.5
	l'Oudon				01764X0013	716.0	552.3	166.2	64.1	103.6	0.0	-4.0
La Dives à Saint Lambert	caen	88	0.46	165	01768X0022	735.6	573.6	162.4	124.1	38.5	0.0	-0.7
	l'Oudon				01768X0023	688.4	526.3	162.3	122.4	40.1	0.0	-0.3
La Mue à Reviers	Caen	96	0.34	111.8	01194X0149	809.2	671.4	142.3	51.1	97.1	1.1	-11.6
Le Noireau à Cahan	Caen	520	6.9	418.7	ancnu	965.0	570.7	394.3	358.3	35.9	0.0	0.0
La Seulles à Juvigny	Caen	133	1.5	355.9	aucun	935.7	585.5	350.4	304.8	46.2	0.0	-0.7
L'Orne à la Courbe	caen	932	7	237	02133X0008	780.4	552.2	228.7	202.4	26.5	0.0	9.0-
	Alençon				02133X0009	780.4	547.3	234.2	211.3	23.1	0.0	-1.3
L'Orne à May-sur-Orne	caen	2506	23.9	301	02133X0008	9.988	552.9	284.1	205.1	79.5	0.0	-1.0
	Alençon				02133X0008	9.988	528.5	279.3	225.7	54.2	0.0	-1.7
La Touques à Saint- Martin-de-la-lieue	alençon	289	2.5	273	01473X0087	870.6	595.3	275.6	70.0	211.1	0.0	-5.8
différence by Orne	alençon	1574			02133X0008	873.1	541.8	332.0	209.0	124.6	0.0	-2.3
différence Dives	l'Oudon	550			01764X0012	730.2	565.0	168.1	57.5	112.2	0.0	-4.5

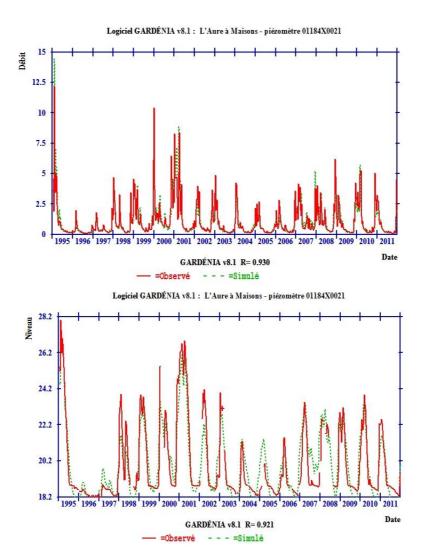
3. Bilans obtenus après calage à l'échelle des bassins versants modélisés

# 3. Comparaison des chroniques de débit et des chroniques piézométriques observées et simulées avec GARDENIA

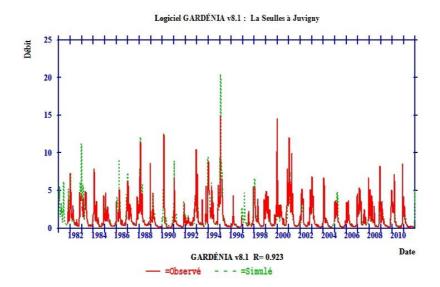
# Calage de la Mue à Reviers



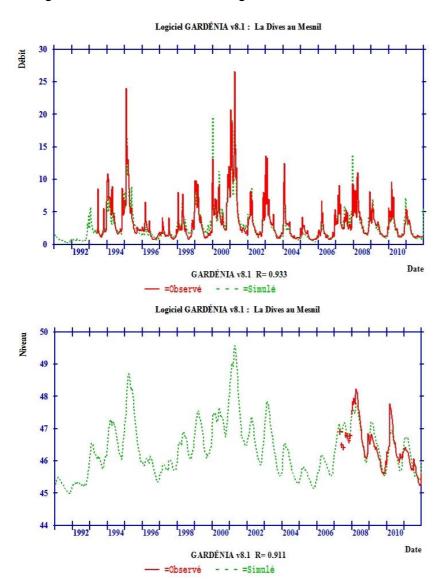
# Calage de l'Aure à Maisons



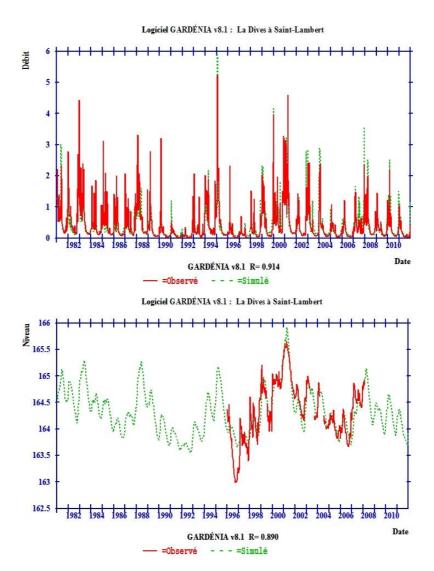
# Calage de la Seulles à Juvigny-sur-Seulles



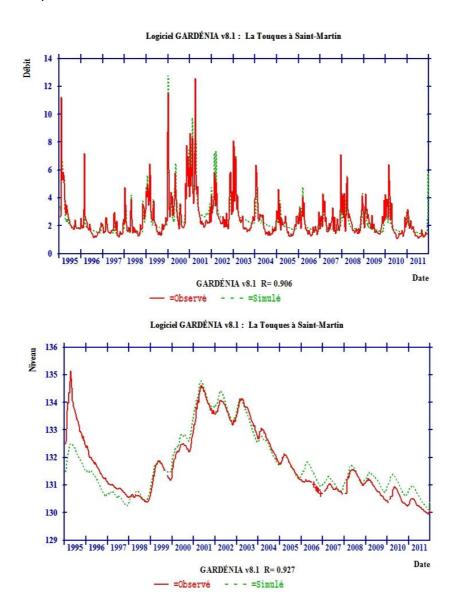
# Calage de la Dives au Mesnil-Mauger



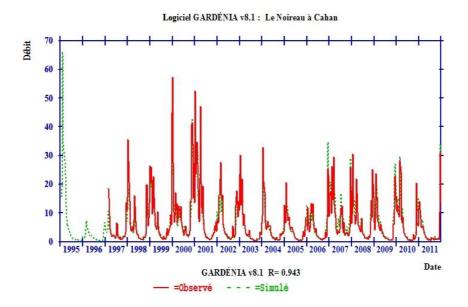
# Calage de La Dives à Saint-Lambert-sur-Dive



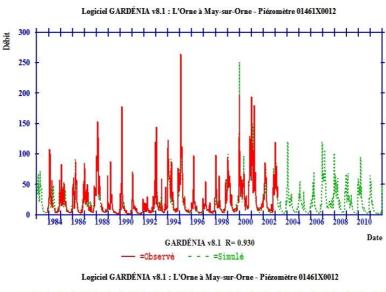
# Calage de La Touques à Saint-Martin-de-la-Lieue

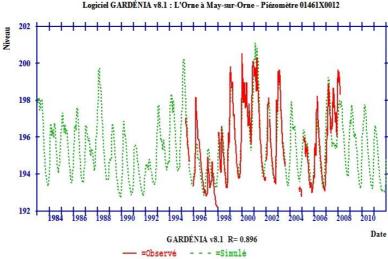


# Calage du Noireau à Cahan

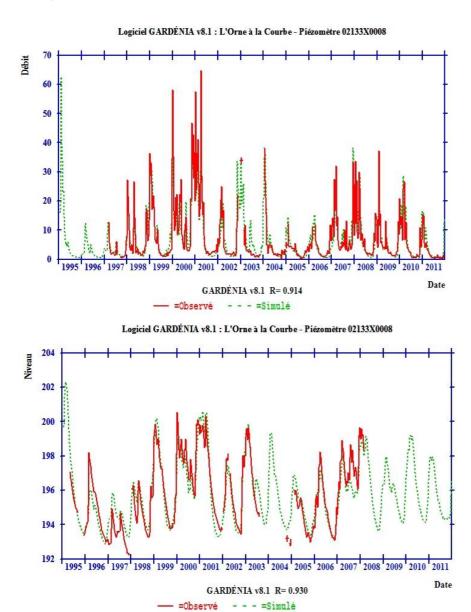


# Calage de L'Orne à May-sur-Orne



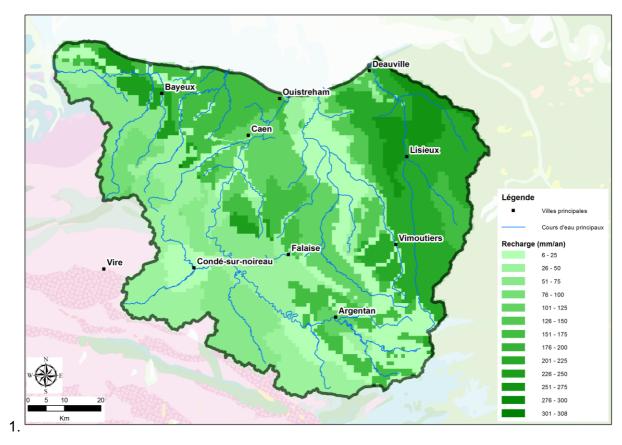


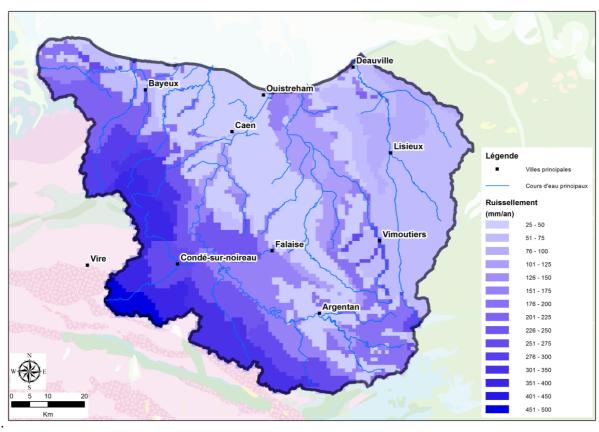
# Calage de L'Orne à la Courbe



# Valeurs initiales des flux de recharge et de ruissellement évaluées pour le calage en régime permanent

- 1. Flux de recharge pris en compte initialement pour la modélisation en régime permanent
- 2. Flux de ruissellement pris en compte initialement pour la modélisation en régime permanent





# Stations hydrométriques utilisées pour le calage du modèle

Identifiant	Commune	Rivière
11011010	MARDILLY	Touques (La)
11031010	ST MARTIN-DE-LA-LIEUE	Touques (La)
11103010	BEUVILLERS	Orbiquet (L')
11111010	LISIEUX	Touques (La)
11203010	AUTHIEUX-SUR-CALONNE	Calonne (La)
I1203020	BONNEVILLE-LA-LOUVET	Calonne (La)
11213110	ST HYMER	Yvie (L')
12001010	ST LAMBERT S/DIVES	Dives (La)
12021010	BEAUMAIS	Dives (La)
12023410	ERAINES	Ante (L')
12051040	MESNIL-MAUGER	Dives (La)
12102010	GUERQUESALLES	Vie (La)
12213610	CRICQUEVILLE-EN-AUGE	Ancre (L')
13033010	Le BOURG-SAINT-LEONARD	Ure (L')
13103010	TANQUES	Cance (La)
13121010	LA COURBE	Orne (L')
13131010	RABODANGES	Orne (L')
13302020	ST HILAIRE-DE-BRIOUZE	Rouvre (La)
13352010	SEGRIE FONTAINE	Rouvre (La)
13361010	MESNIL VILLEMENT(LE)	Orne (L')
13422010	ST PIERRE D'ENTREMONT	Noireau (Le)
13442310	PERIGNY	Druance (La)
13452310	ST GERMAIN-DU-CRIOULT	Druance (La)
13462010	CAHAN	Noireau (Le)
13521020	THURY-HARCOURT	Orne (L')
13531010	GRIMBOSQ	Orne (L')
13612010	ST GERMAIN-LE-VASSON	Laize (La)
13612060	FRESNEY LE PUCEUX	Laize (La)
13621010	MAY-SUR-ORNE	Orne (L')
13712010	EPINAY-SUR-ODON	Odon (L')
14022010	JUVIGNY-SUR-SEULLES	Seulles (La)
14032010	TIERCEVILLE	Seulles (La)
14053010	REVIERS	Mue (La)
14053020	CAIRON	Mue (La)
15321510	MAISONS	Aure (L')
15352010	SULLY	Drôme (La)

# Piézomètres utilisés pour le calage du modèle

Code BSS	Couche captée	Commune	Lieu-dit
00955X0023	9	Osmanville	Habitation Bachelet Route D'Isigny
00956X0055	8	Asnières-En-Bessin	Puits de Montigny
00957X0005	6	Vierville-Sur-Mer	Puits Hamel au Prêtre
01184X0021	8	Maisons	Puits de Maisons
01191X0004	8	Saint-Martin-des-Entrées	Puits de Saint Germain
01192X0043	8	Martragny	Puits Ferme Lebas de Martragny
01193X0044	6	Le Fresne-Camilly	Puits Camilly
01193X0174	8	Tierceville	Forage Fea12
01193X0177	8	Cully	Forage Le Moulin à Foulon
01194X0069	6	Bény-sur-Mer	Forage de Bény sur Mer
01194X0149	6	Cairon	Forage Le Vieux Cairon
01195X0200	9	Longraye	Forage les Beyrolles
01198X0002	6	Saint-Contest	Puits Le Bec Hellouin
01198X0029	8	Louvigny	Forage du Château de Louvigny
01201X0108	6	Mathieu	Puits de Mathieu
01205X0229	6	Ifs	Puits la Maroisière
01206X0009	6	Sannerville	Puits Le Grand Pendant
01211X0037	2	Danesta	Puits du Calvaire
01212X0089	2	Beaumont-En-Auge	Ferme De Drumare
01213X0166	4	Surville	Puits La Lézardière
01216X0086	2	Auvillars	Puits Gonfray
01454X0065	8	May-Sur-Orne	Ferme Des Hauts Vents
01461X0012	6	Cintheaux	Puits de la Ferme de l'Hôtellerie
01462X0032	6	Bellengreville	Puits de la Perquette
01462X0072	6	Garcelles-Secqueville	Puits de Secqueville
01462X0079	6	Poussy-la-Campagne	Puits de Poussy la Campagne
01463X0103	6	Vieux-Fumé	Puits Le Mesnil
01465X0067	9	Tournebu	Puits de la mairie
01466X0045	6	Estrees-La-Campagne	Route De Soignolles
01473X0087	2	Auquainville	Forage d'Auquainville
01474X0048	2	Saint-Cyr-du-Ronceray	Puits de Saint Cyr du Ronceray
01756X0008	10	Saint-Pierre-Du-Regard	Les Bruyères
01762X0024	9	Villers-Canivet	Herbage Château de Torps F3
01764X0012	6	Morteaux-Couliboeuf	Forage du Château de Blocqueville
01768X0022	6	Le Moulin De Brevaux	Les Luzernes
01776X0023	6	Ommeel	Puits de l'ancienne école
01778X0015	4	Mardilly	La Nasserie
02114X0008	10	Briouze	Pont Sncf Marais Du Haze
02124X0037	6	Sarceaux	Le Marais
02131X0018	6	Saint-Loyer-Des-Champs	La Huarderie
02131X0019	6	Sai	Le Grand Clos
02131X0032	6	Almeneches	Saint-Hippolyte
02133X0008 02135X0016	<u>6</u> 6	Saint-Germain-De-Clairefeuille  Mortree	Le Colombier Le Parc
			Le Faic
Caen1	<u>1</u> 1	Caen	
Caen11	1	Caen	
Caen14 Caen18	1	Caen Caen	
Caen19	1	Caen	
Caen19 Caen2	1	Caen	
Caen25	6	Caen	
Caen29	1	Caen	
Caen31	1	Caen	
Caen34	1	Caen	
Caen37	1	Caen	
Caen38	1	Caen	
Caen39	1	Caen	
Caen5	1	Caen	
Caen7	1	Caen	
240111		1	1

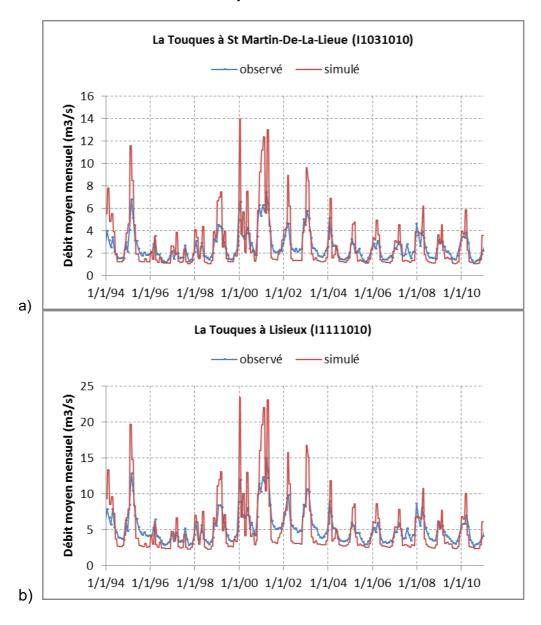
# Chroniques de débit simulées et observées aux stationshydrométriques

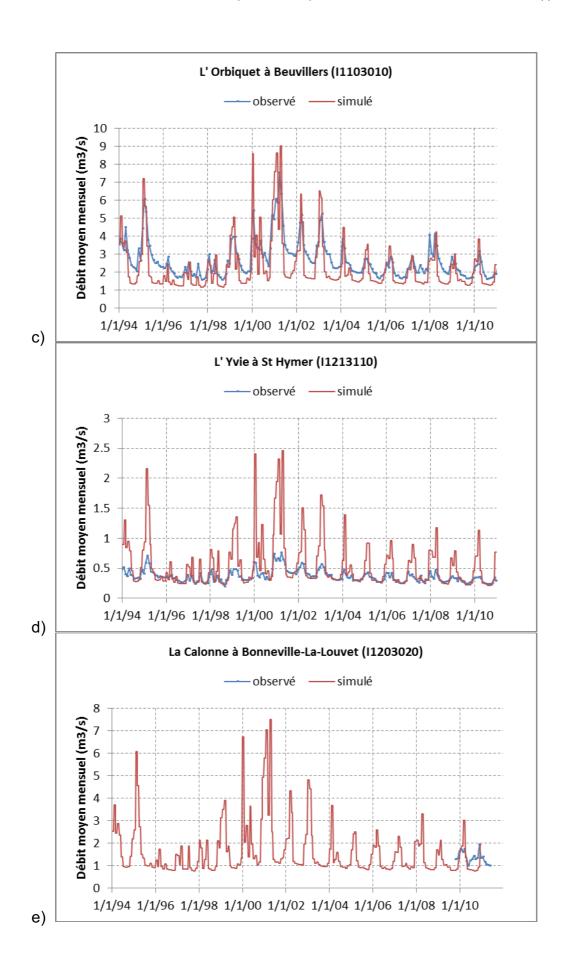
Les figures suivantes présentent la comparaison des chroniques simulée (rouge) et observée (bleue) pour les stations de mesures disposant des données sur la période de calage non présentées dans la partie principale du rapport.

- 1. Bassin versant de la Touques
  - a. La Touques à St Martin-De-La-Lieue (I1031010)
  - b. La Touques à Lisieux (I1111010)
  - c. L'Orbiquet à Beuvillers (I1103010)
  - d. L'Yvie à St Hymer (I1213110)
  - e. La Calonne à Bonneville-La-Louvet (11203020)
- 2. Bassin versant de la Dives
  - a. La Dives à St Lambert S/Dives (I2001010)
  - b. L'Ante à Eraines (12023410)
  - c. La Vie à Guerquesalles (12102010)
  - d. L'Ancre à Cricqueville-En-Auge (I2213610)
  - e Données de jaugeages du Traînefeuille (point n°131)
- 3. Bassin versant de l'Orne
  - a. L'Ure au Bourg-Saint-Leonard (I3033010)
  - b. La Cance à Tanques (I3103010)
  - c. L'Orne à Rabodanges (I3131010)
  - d. La Rouvre à St Hilaire-De-Briouze (13302020)
  - e. La Rouvre à Segrie Fontaine (13352010)
  - f. L'Orne au Mesnil Villement (13361010)
  - g. Le Noireau à St Pierre D'Entremont (13422010)
  - h. La Druance à Perigny (13442310)
  - i. La Druance à St Germain-Du-Crioult (13452310)
  - j. Le Noireau à Cahan (13462010)
  - k. L'Orne à Thury-Harcourt (13521020)
  - I. La Laize à St Germain-Le-Vasson (13612010)
  - m. L'Orne à May-Sur-Orne (13621010)
  - n. L'Odon à Epinay-Sur-Odon (13712010)
  - o Données de jaugeages de la Guigne (point n°546)
  - p Données de jaugeages du Dan (point n°452)

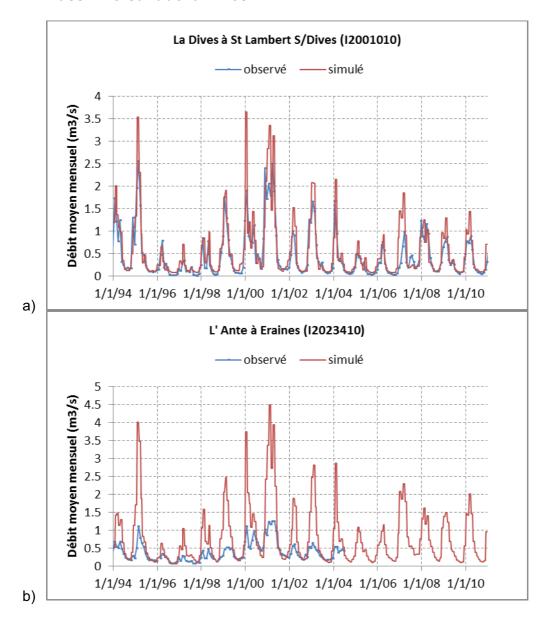
- 4. Bassin versant de la Seulles
  - a. La Seulles à Tierceville (14032010)
  - b. La Mue à Cairon (I4053020)
  - c Données de jaugeages de la Gronde littorale (point n°439)

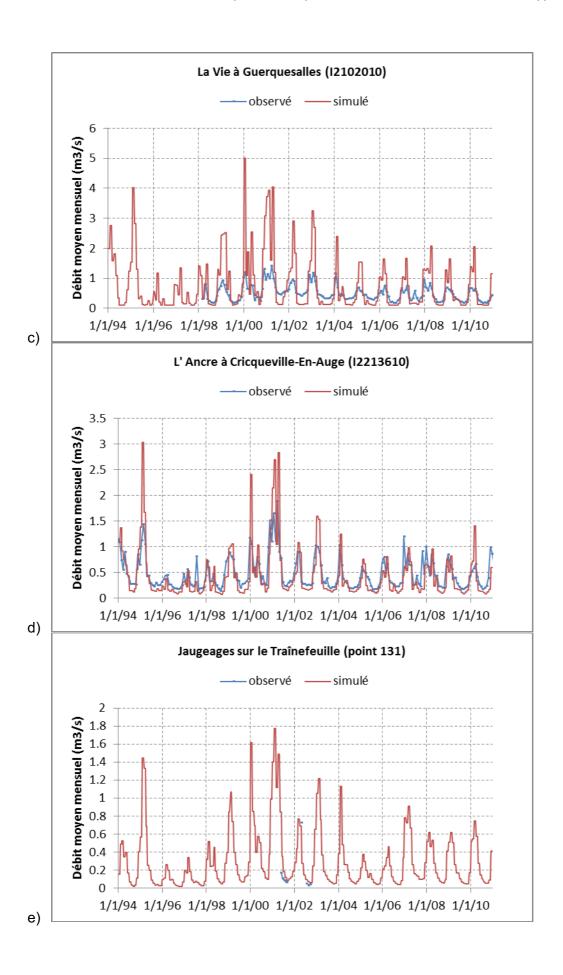
# 1. Bassin versant de la Touques



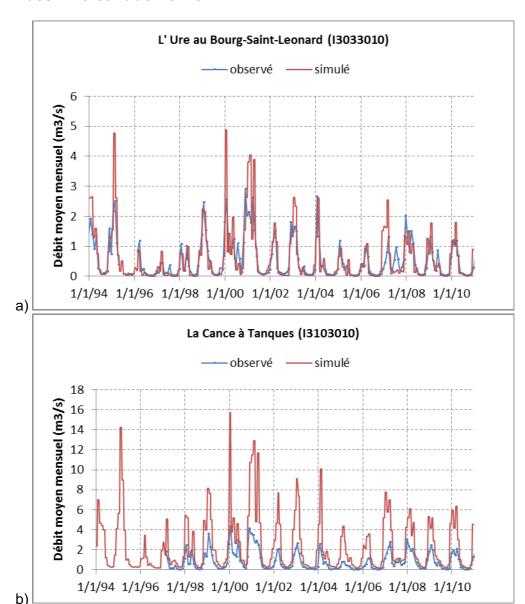


### 2. Bassin versant de la Dives

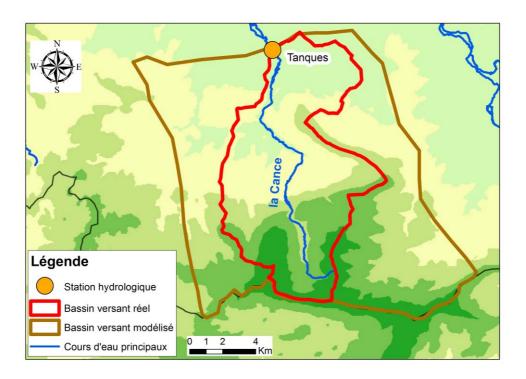


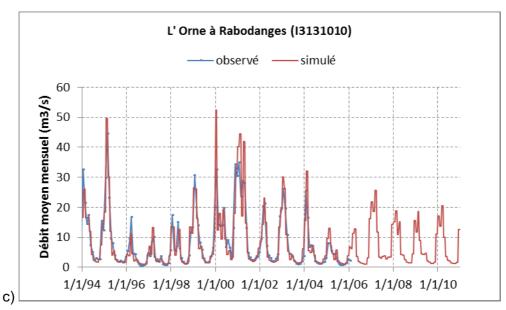


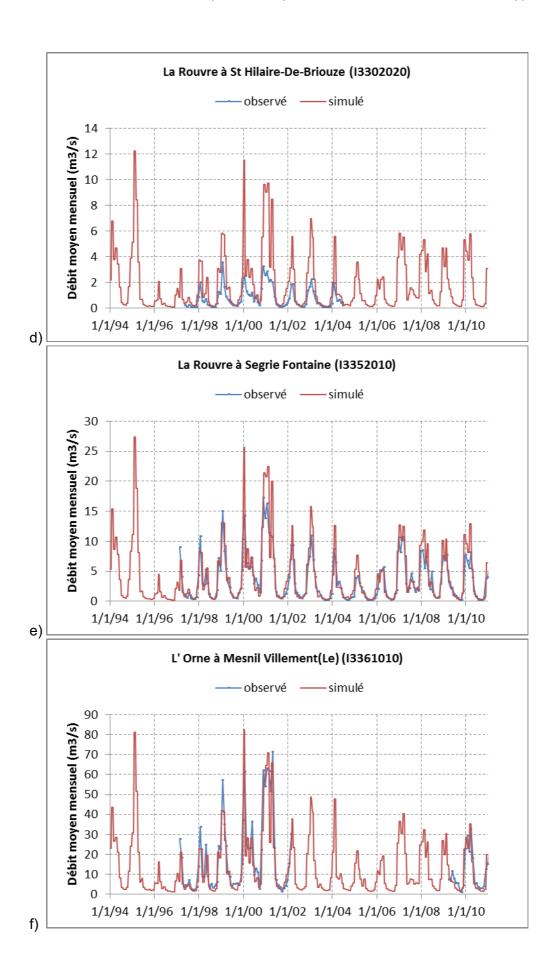
#### 3. Bassin versant de l'Orne

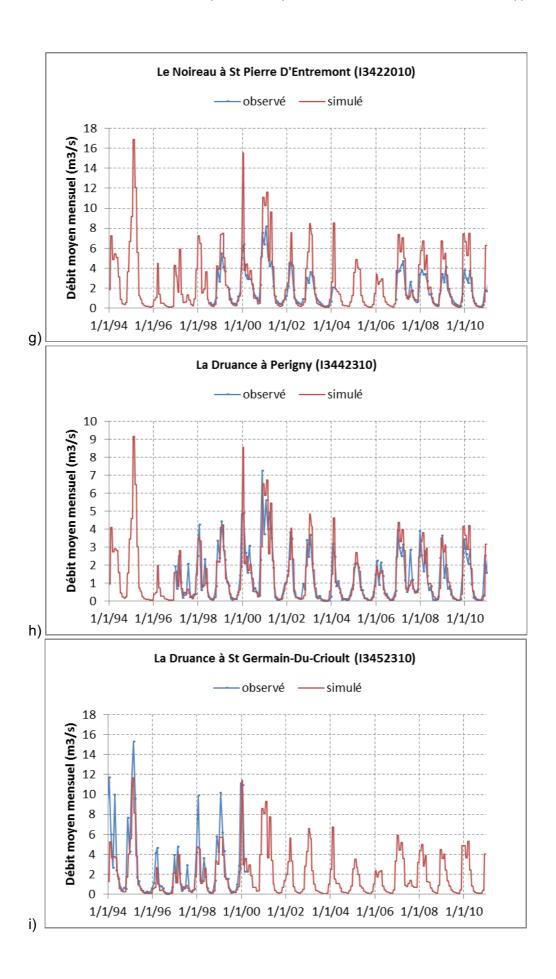


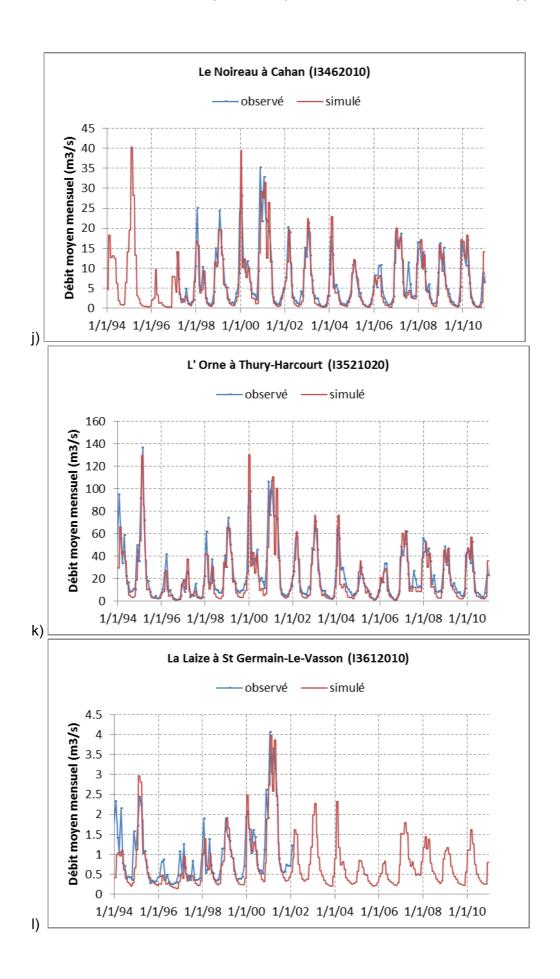
La large surestimation des débits de la Cance à Tanques est due à une mauvaise représentation du bassin d'alimentation de la rivière dans le modèle. En effet, dans le logiciel MARTHE, à chaque pas de temps, le ruissellement de chaque maille est transféré sans délai au cours d'eau le plus proche. Dans la grande majorité des cas, le cours d'eau le plus proche est effectivement le cours d'eau dans lequel est conduit le ruissellement mais dans le bassin versant de la Cance, ce n'est pas le cas : étant donné la topographie, une grande partie du ruissellement, géographiquement proche de la Cance est en réalité dirigé vers l'Orne à l'Est et vers la Rouvre à l'Ouest comme présenté sur l'illustration ci-après.

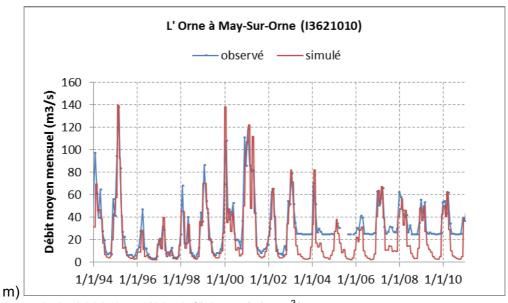




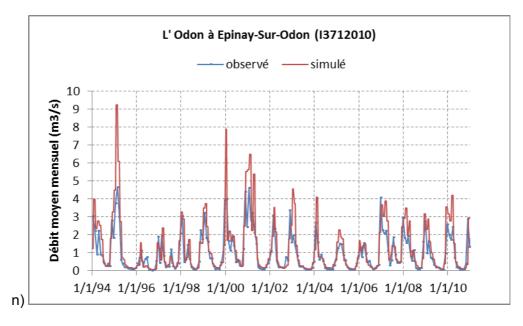


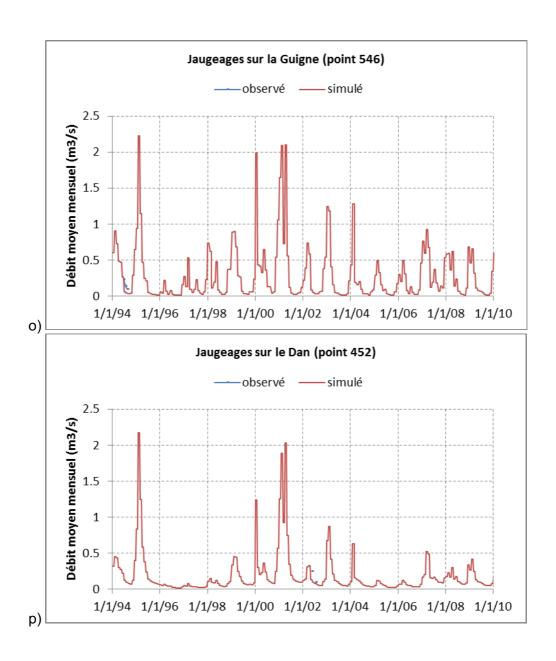




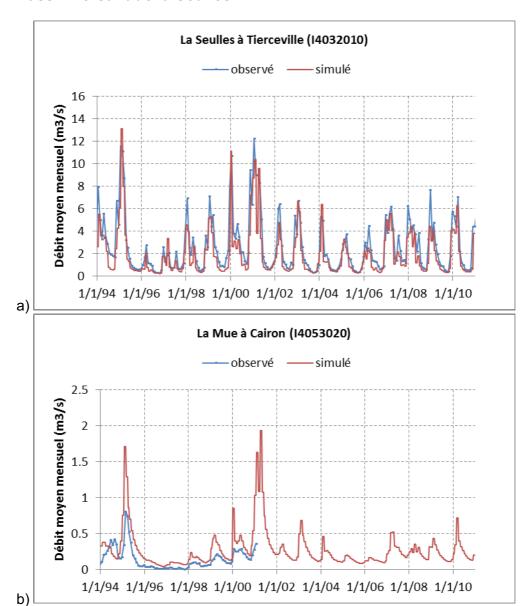


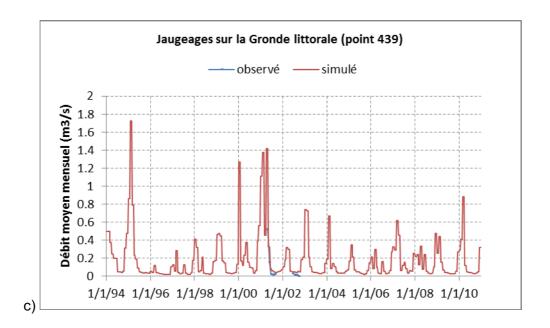
A partir de 2003, les débits inférieurs à 25 m³/s ne sont pas correctement représentés





### 4. Bassin versant de la Seulles





### **Annexe 8**

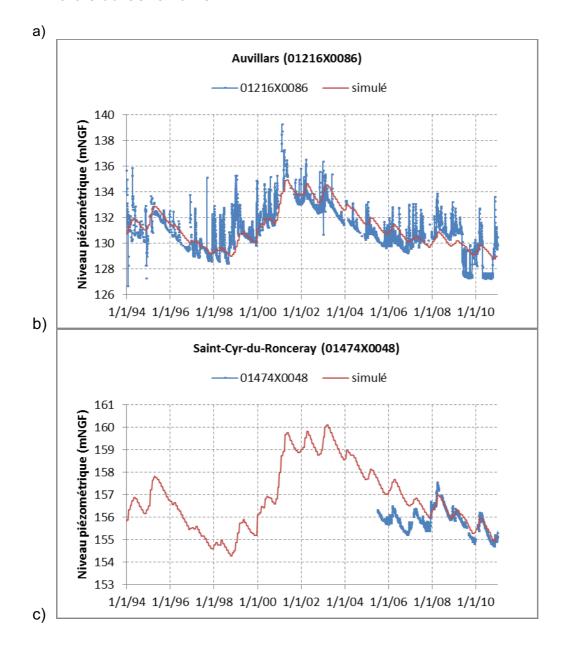
# Chroniques piézométriques simulées et observées dans les ouvrages retenus pour le calage du modèle

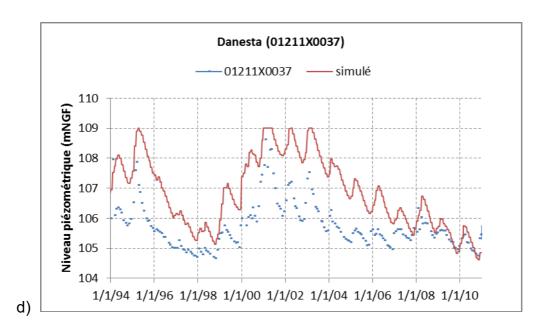
Les figures suivantes présentent la comparaison des chroniques piézométriques simulées (en rouge) et observées (en bleu) pour les piézomètres non présentés dans la partie principale du rapport.

- 1. Craie du Cénomanien
  - a. Beaumont-En-Auge (01212X0089)
  - b. Auvillars (01216X0086)
  - c. Saint-Cyr-du-Ronceray (01474X0048)
  - d. Danesta (01211X0037)
- 2. Calcaires et sables de l'Oxfordien moyen et supérieur
  - a. Mardilly (01778X0015)
  - b. Surville (01213X0166)
- 3. Calcaires du Bathonien moyen et supérieur
  - a. Le Fresne-Camilly (01193X0044)
  - b. Bény-sur-Mer (01194X0069)
  - c. Cairon (01194X0149)
  - d. Mathieu (01201X0108)
  - e. Sannerville (01206X0009)
  - f. Cintheaux (01461X0012)
  - g. Bellengreville (01462X0032)
  - h. Garcelles-Secqueville (01462X0072)
  - i. Poussy-la-Campagne (01462X0079)
  - j. Vieux-Fumé (01463X0103)
  - k. Estrees-La-Campagne (01466X0045)
  - I. Morteaux-Couliboeuf (01764X0012)
  - m. Ommeel (01776X0023)
  - n. Le Moulin De Brevaux (01768X0022)
  - o. Saint-Loyer-Des-Champs (02131X0018)
  - p. Saint-Germain-De-Clairefeuille (02133X0008)
  - q. Mortree (02135X0016)
  - r. Sarceaux (02124X0037)
  - s. Almeneches (02131X0032)
  - t. Caen 2
  - u. Caen 5
  - v. Caen 7
  - w. Caen 11
  - x. Caen 14

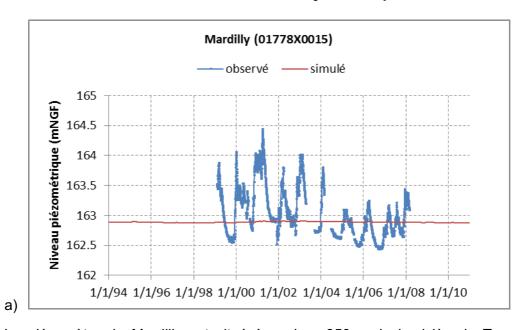
- y. Caen 16
- z. Caen 18
- aa. Caen 19
- bb. Caen 25
- cc. Caen 29
- dd. Caen 31
- ee. Caen 33
- ff. Caen 34
- gg. Caen 37
- hh. Caen 38
  - ii. Caen 39
- 4. Calcaires du Bajocien-Aalénien-Toarcien
  - a. Maisons (01184X0021)
  - b. Saint-Martin-des-Entrées (01191X0004)
  - c. Martragny (01192X0043)
  - d. Tierceville (01193X0174)
  - e. Cully (01193X0177)
  - f. May-Sur-Orne (01454X0065)
- 5. Formations du Lias infra-Toarcien et Trias
  - a. Longraye (01195X0200)
  - b. Osmanville (00955X0023)
  - c. Villers-Canivet (01762X0024)
- 6. Socle
  - a. Briouze (02114X0008)

### 1. Craie du Cénomanien

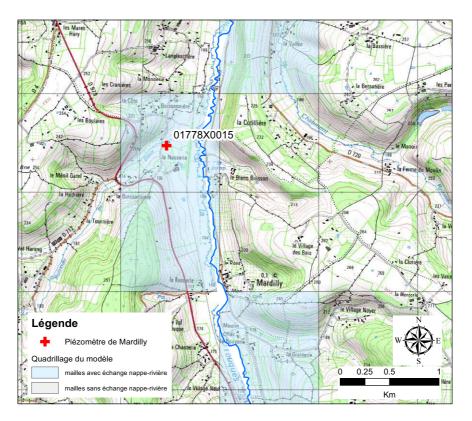


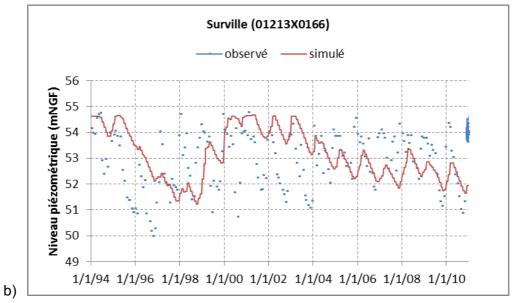


### 2. Calcaires et sables de l'Oxfordien moyen et supérieur



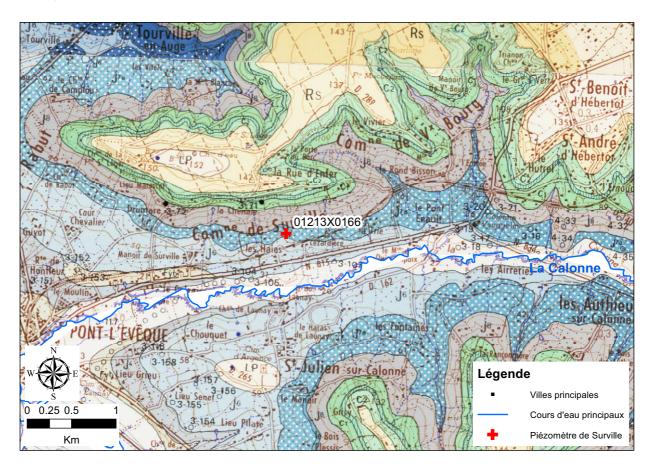
Le piézomètre de Mardilly est situé à environ 350 m de la rivière la Touques. Dans le modèle, ce piézomètre est situé presqu'au centre d'une maille dans laquelle des échanges nappe-rivière ont lieu (cf illustration ci-après). Le comportement modélisé n'est donc pas celui d'un piézomètre situé à plusieurs centaines de mètres du cours d'eau mais celui d'un piézomètre situé à proximité immédiate du cours d'eau. De plus, le niveau d'eau dans les cours est considéré comme fixe. Pour ces deux raisons, il n'est pas étonnant que les variations du niveau piézométrique simulé soient bien moindres que les variations réellement observées.





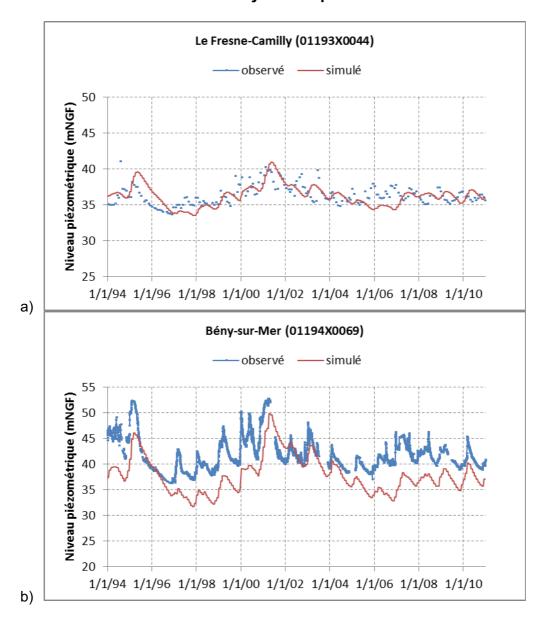
La comparaison des niveaux observé et simulé pour le piézomètre de Surville montre que, si les niveaux moyens sont correctement reproduits, les fluctuations annuelles sont nettement sous-estimées. La situation du piézomètre, présentée sur l'illustration ci-après est assez particulière. Il est situé sur le coteau au-dessus de la vallée de la Calonne. Aucune coupe technique de ce forage n'est disponible mais d'après la carte géologique, il se situe dans les sables de Glos. Au niveau de la vallée de la Calonne, la notice de la carte géologique de Lisieux indique que des faciès argileux sont intercalés dans les sables de Glos. Les données piézométriques montrent des gradients de nappe très élevés dans le secteur (5 à 7%) qui pourraient indiquer une compartimentation verticale de l'aquifère dans ce secteur. Ce contexte complexe ne peut pas

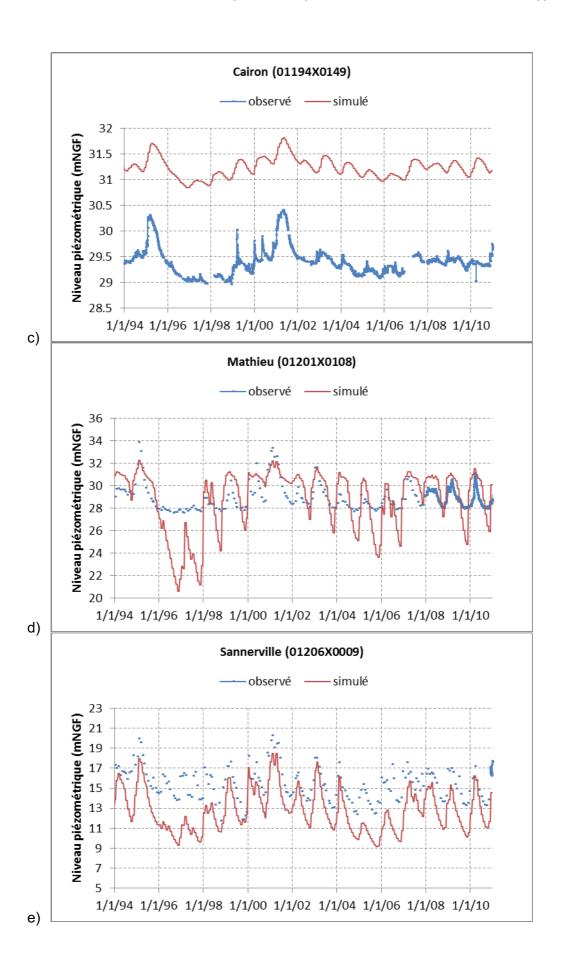
être représenté avec précision par notre modèle qui considère l'Oxfordien comme une couche homogène.

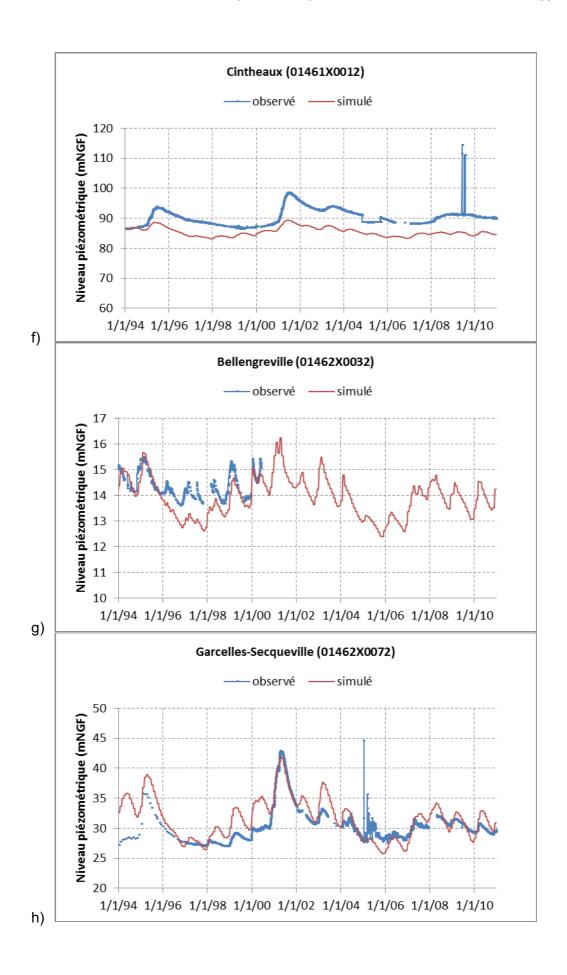


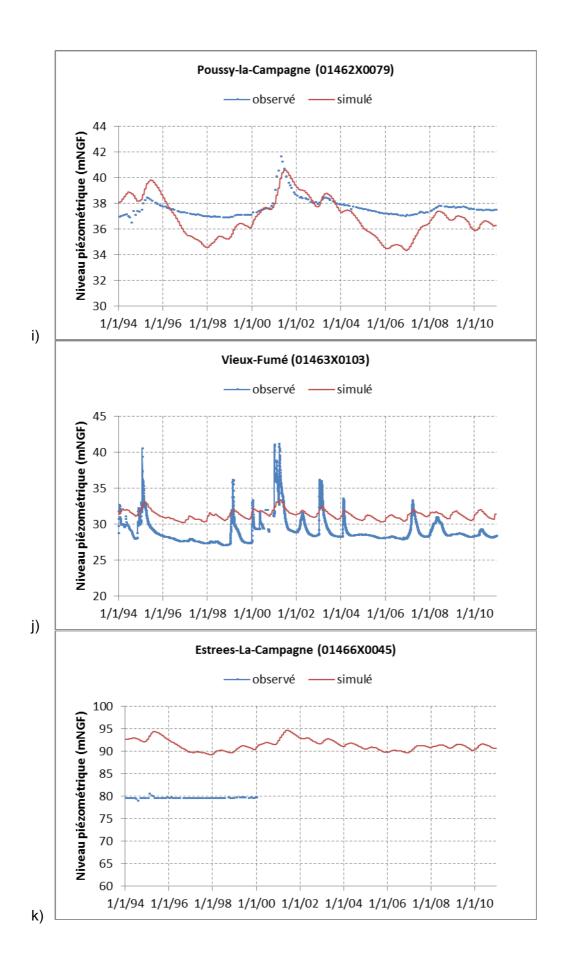
LP: Limons des plateaux – Rs: Argiles à silex - c3: Turonien – c2: Cénomanien / a: Glauconie de base – c1: Albien – j8: Kimméridgien – j7: Séquanien ~ b: Argiles de Villerville ~ a: Sables de Glos – j6: Oxfordien corraligène

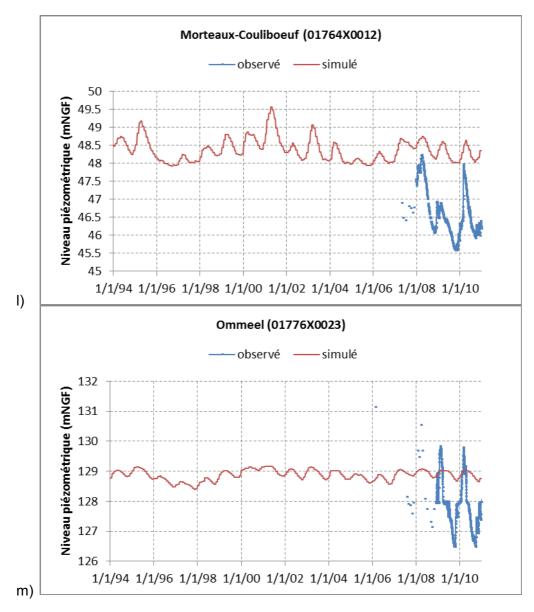
## 3. Calcaires du Bathonien moyen et supérieur



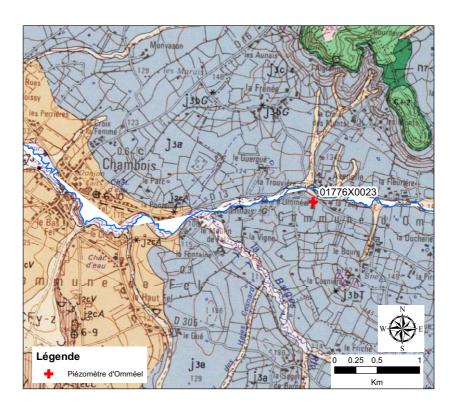




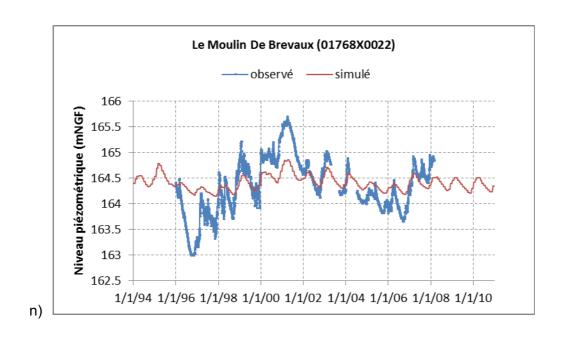


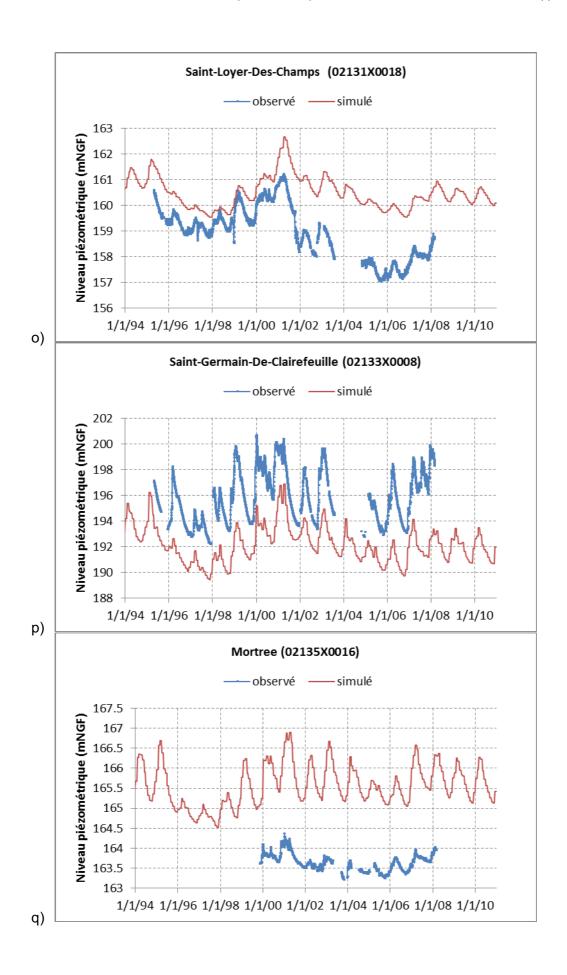


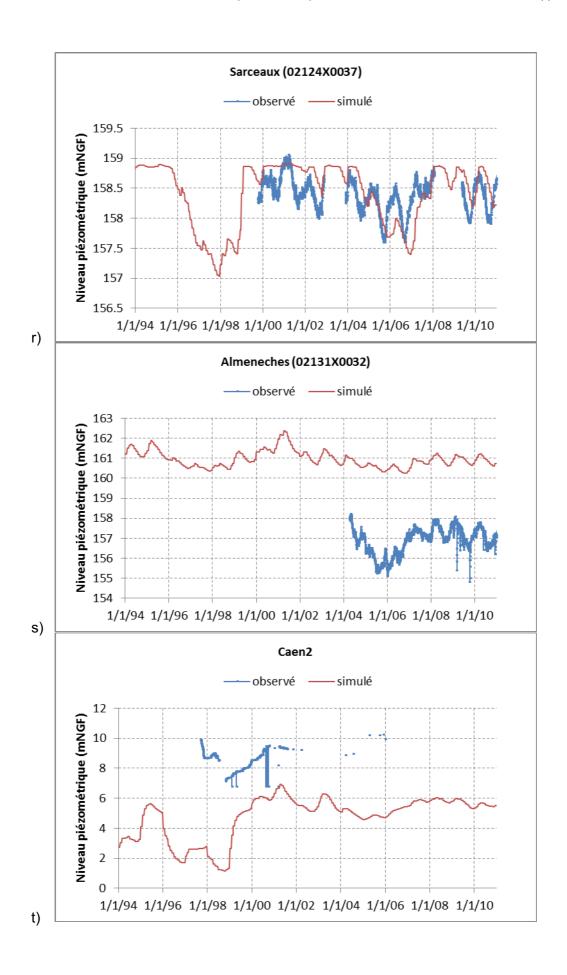
Le piézomètre d'Omméel capte le Bathonien sous couverture callovienne (voir illustration ciaprès). A cet endroit, le Bathonien est donc captif, l'altitude de la rivière au niveau du piézomètre est d'environ 115 mNGF tandis que le niveau piézométrique est largement supérieur (128 mNGF, voir graphique).

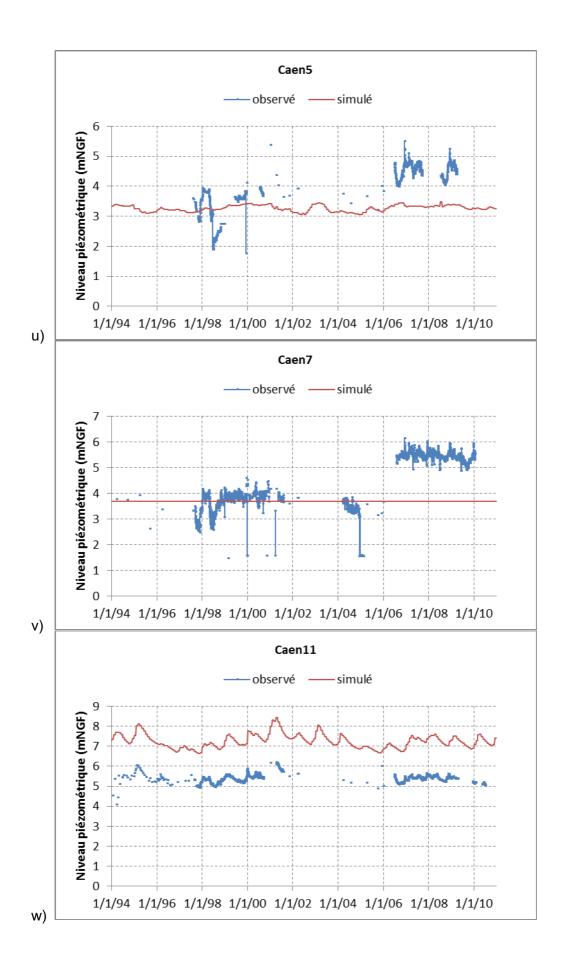


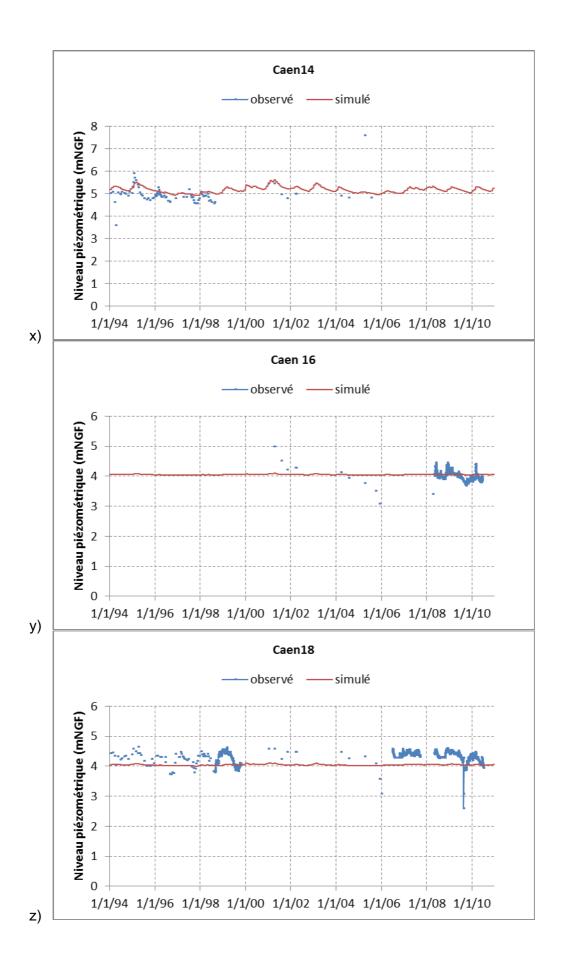
j3a-c : Marnes du Callovien – j2c : Bathonien supérieur.

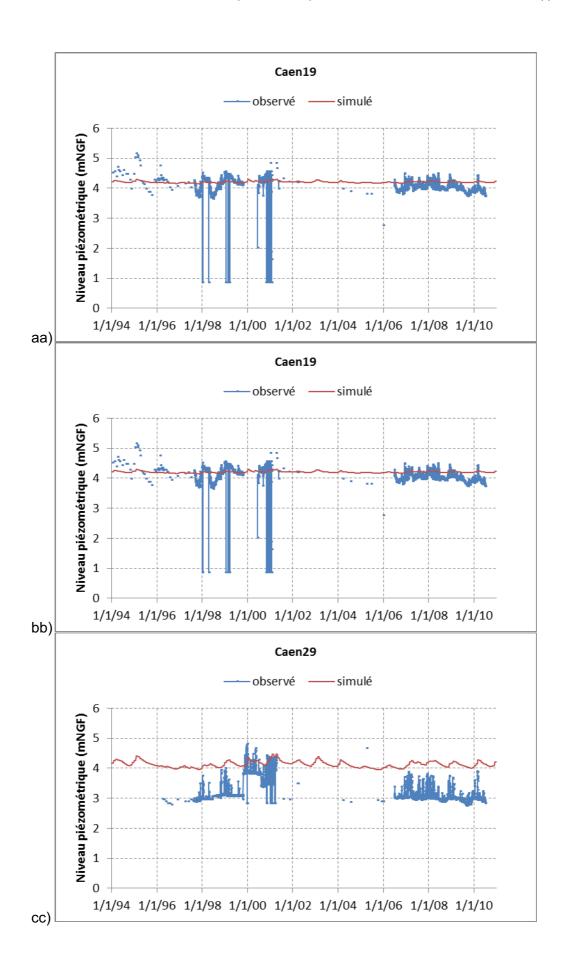


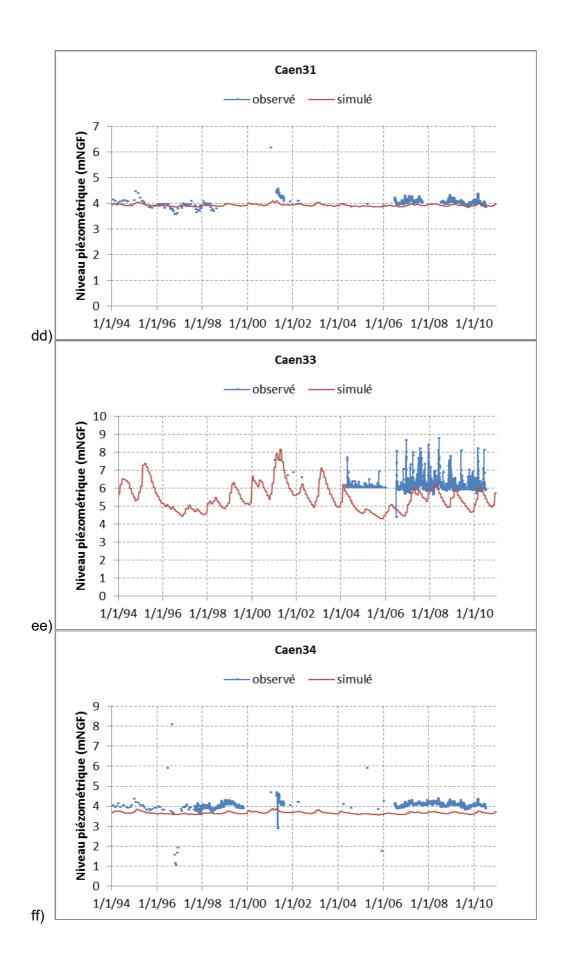


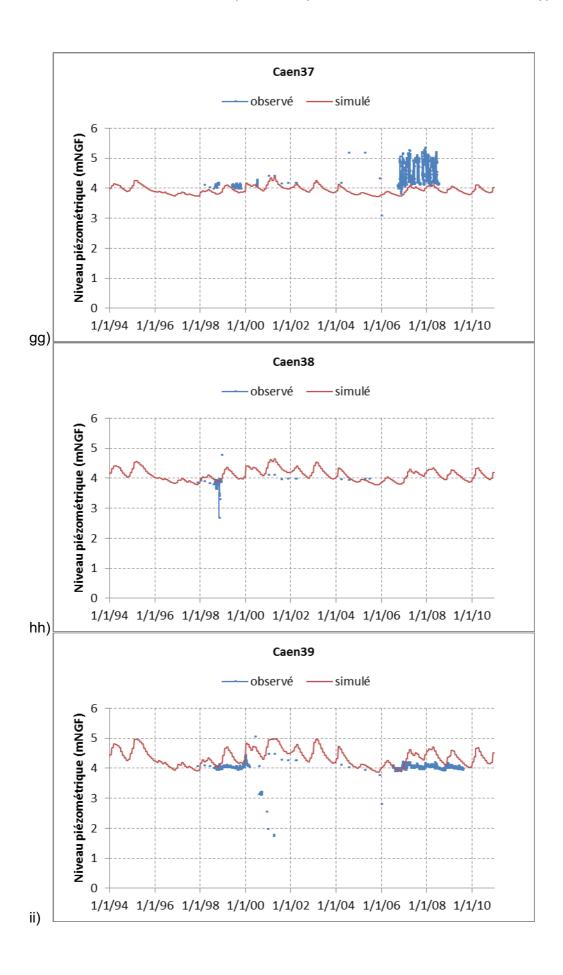


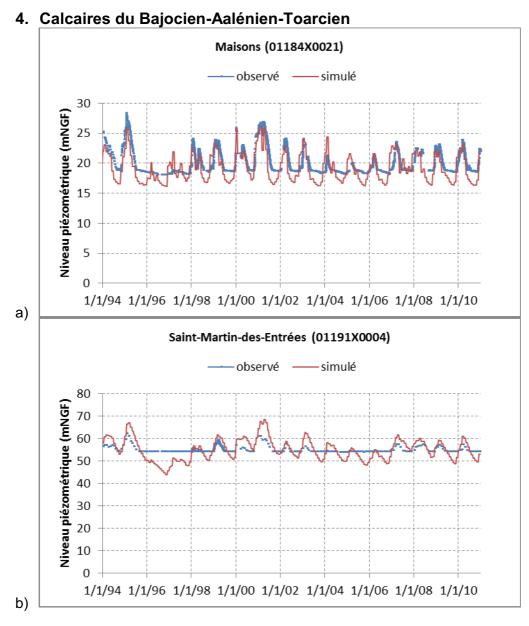




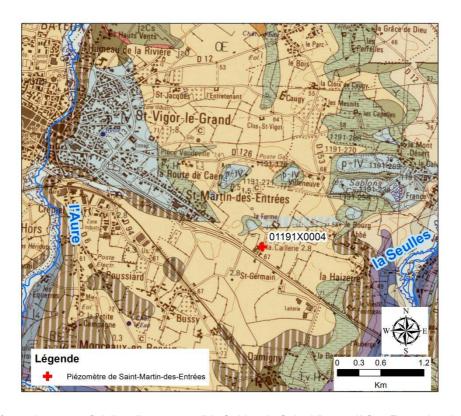




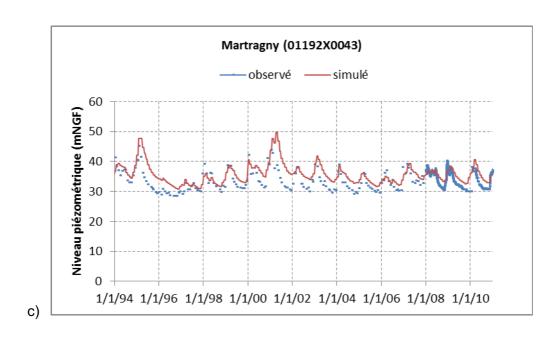


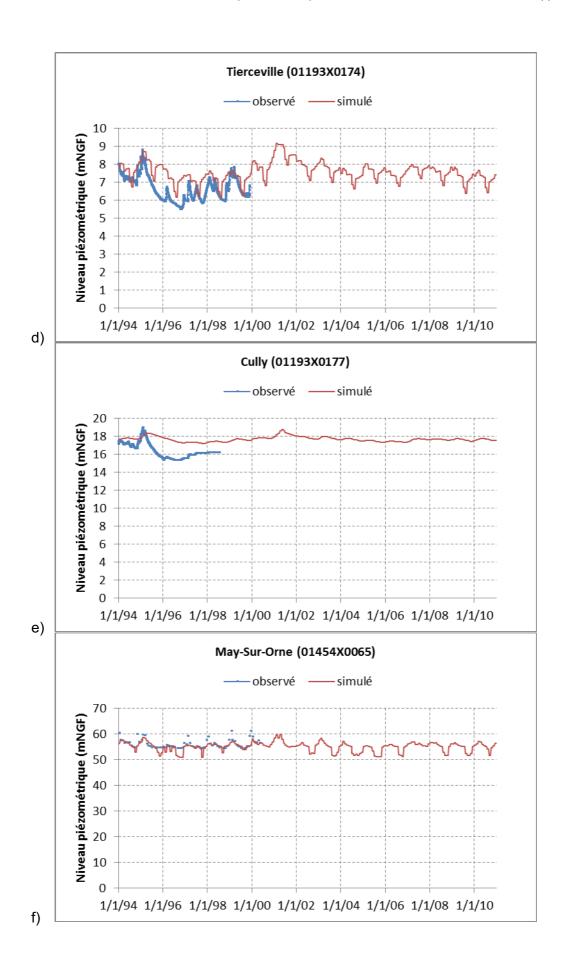


Il n'y a pas de coupe technique disponible pour ce forage. Selon la carte géologique (voir illustration ci-après), il se situe dans les calcaires bajociens, à proximité de plusieurs sablières exploitées, constituées de sables pléistocènes de Saint-Vigor. Le niveau de base que l'on observe sur la chronique rappelle un fonctionnement karstique. La présence de karst dans le Bajocien dans ce secteur n'est pas avérée mais est possible.

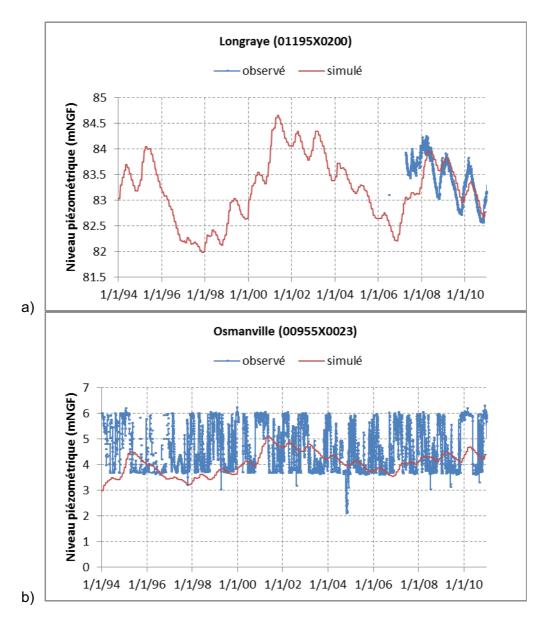


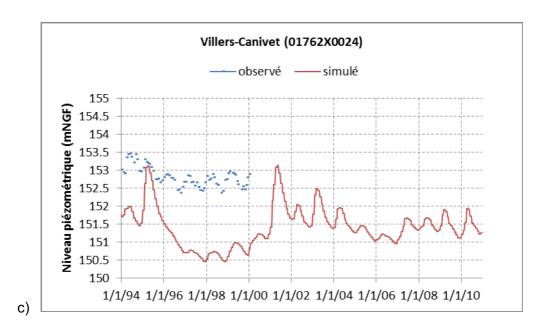
OE/Fv-H,γ: formations superficielles diverses - p-IV: Sables de Saint-Vigor – j2Cs: Formation des Calcaires à spongiaires (Bajocien supérieur).



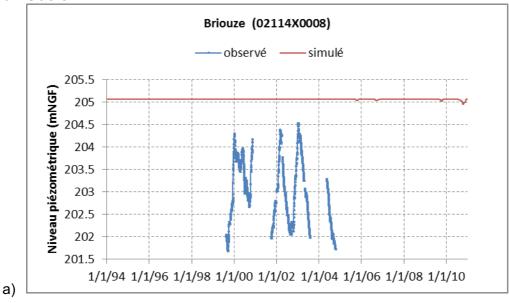


### 5. Formations du Lias infra-Toarcien et du Trias





### 6. Socle

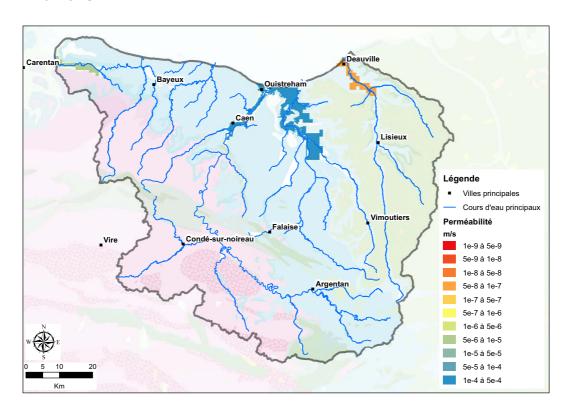


Le piézomètre de Briouze est situé est bordure des marais du Grand Hazé. Dans le modèle, la maille dans laquelle est située le piézomètre est en débordement, c'est pourquoi le niveau simulé est quasiment fixe durant toute la simulation.

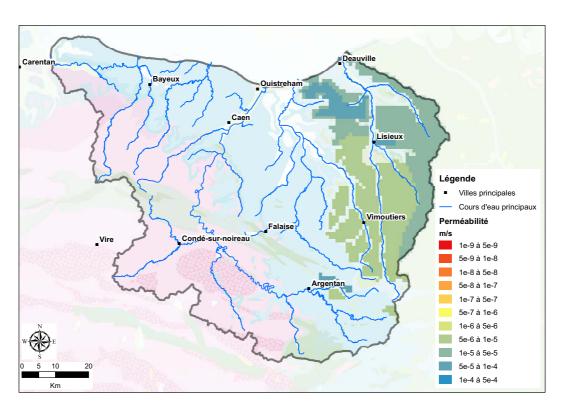
# **Annexe 9**

# Distribution des perméabilités à l'issue du calage

### 1. Alluvions

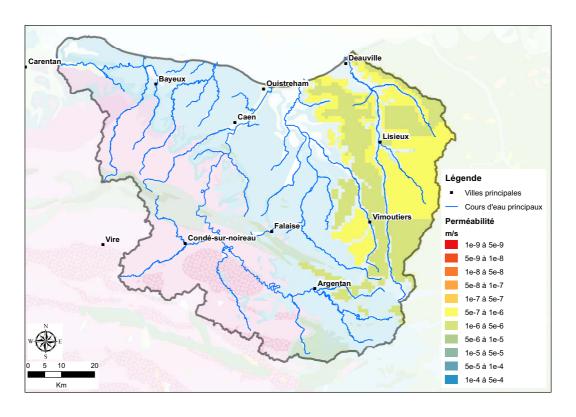


### 2. Craie du Cénomanien

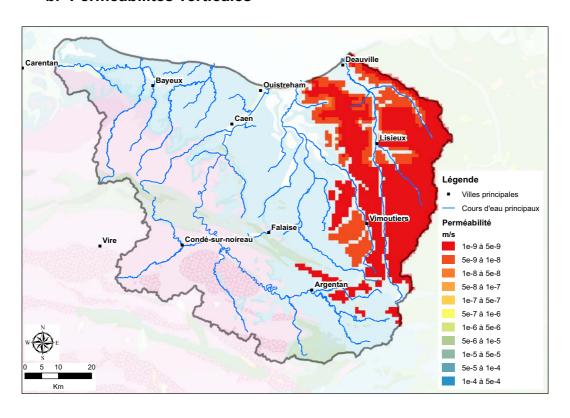


## 3. Formations du Crétacé infra-Cénomanien et Kimméridgien

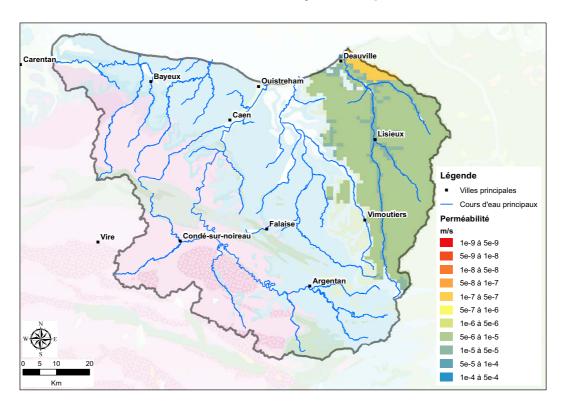
### a. Perméabilités horizontales



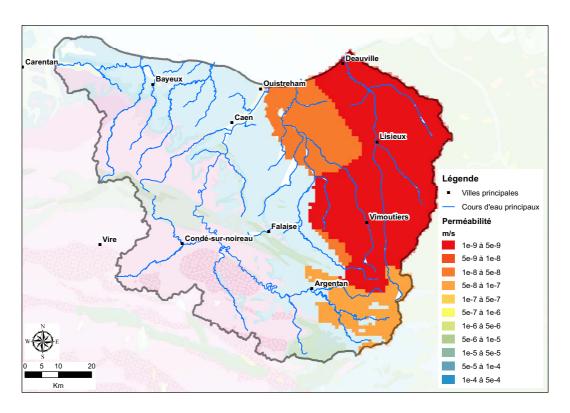
### b. Perméabilités verticales



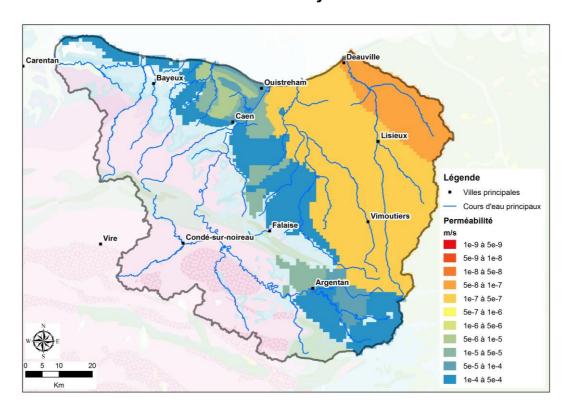
# 4. Calcaires et sables de l'Oxfordien moyen et supérieur



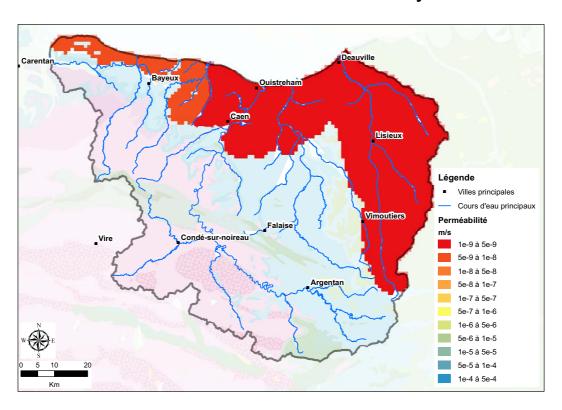
### 5. Marnes du Callovo-Oxfordien



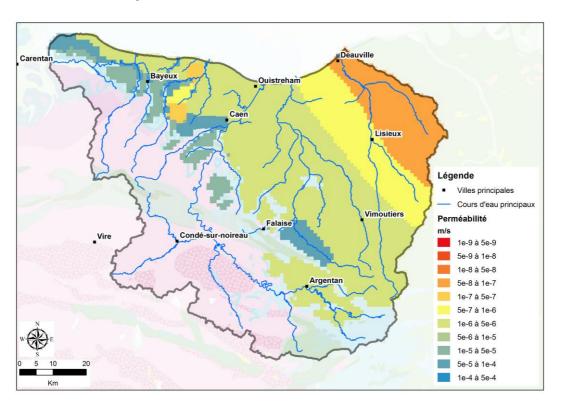
## 6. Calcaires du Bathonien inférieur et moyen



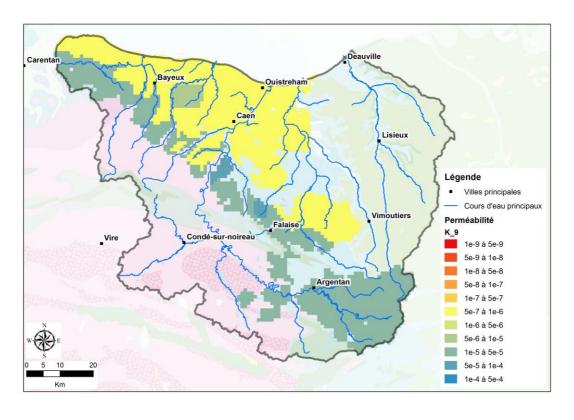
### 7. Formations marneuses du Bathonien inférieur et moyen



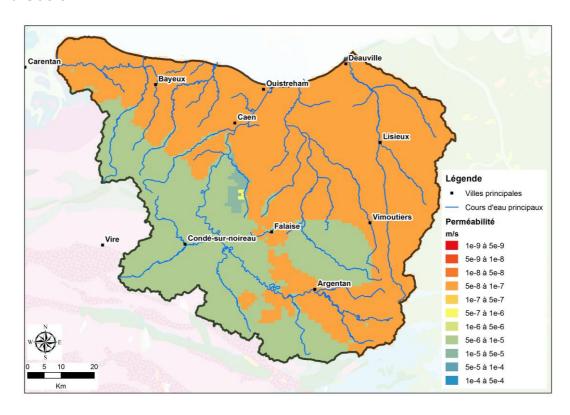
## 8. Calcaires du Bajocien-Aalénien-Toarcien



### 9. Formations du Lias infra-Toarcien et Trias



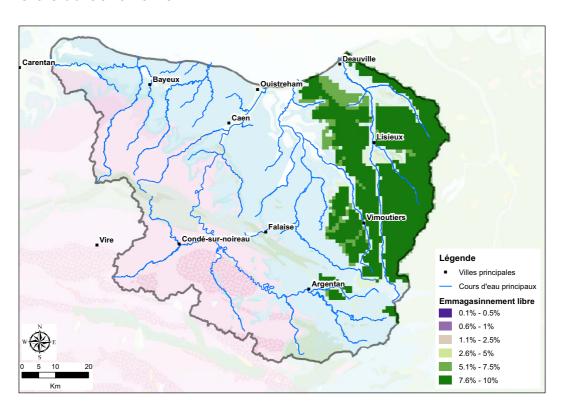
### 10. Socle



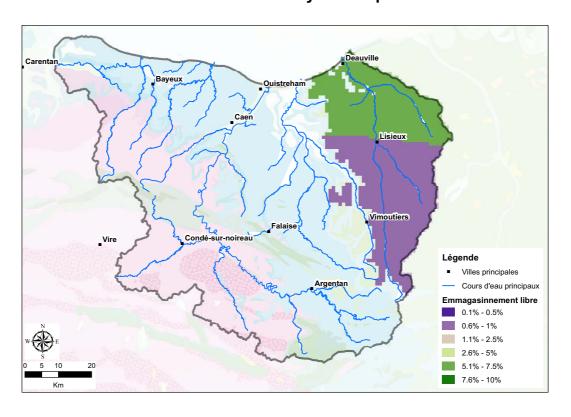
# **Annexe 10**

# Distribution des coefficients d'emmagasinnement libre à l'issue du calage

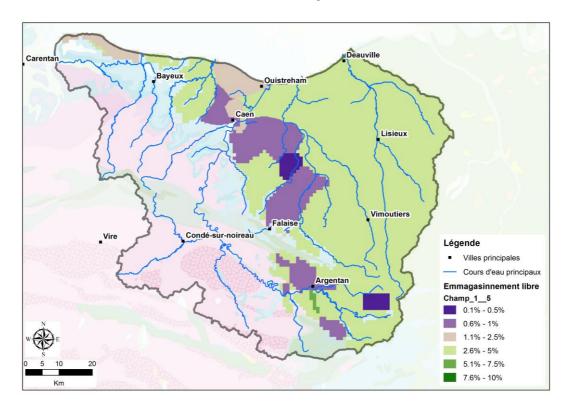
#### 1. Craie du Cénomanien



# 2. Calcaires et sables de l'Oxfordien moyen et supérieur

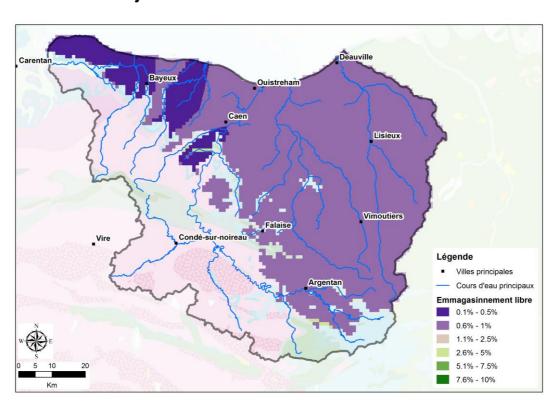


#### 3. Calcaires du Bathonien inférieur et moyen

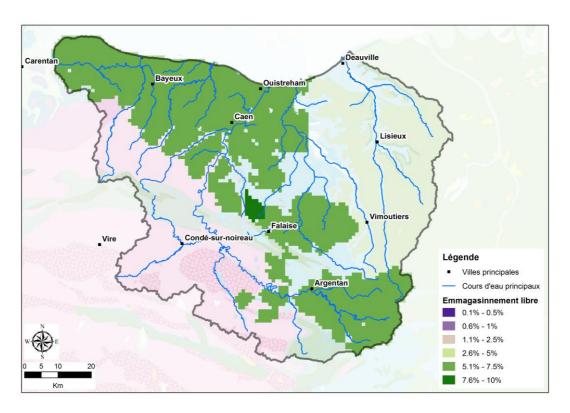


La zone de faible emmagasinement en rive gauche de l'Ure, à l'amont d'Argentan correspond à l'environnement du piézomètre de Saint-Germain-de-Clairefeuille - qui présente des variations très rapides. L'extension (rectangulaire) de cette zone est peu vraisemblable et ne correspond à aucune structure géologique particulière. Cependant, en l'absence d'autres connaissances, notamment aucun suivi piézométrique à proximité, la délimitation d'une zone à faible emmagasinement ne peut être qu'arbitraire.

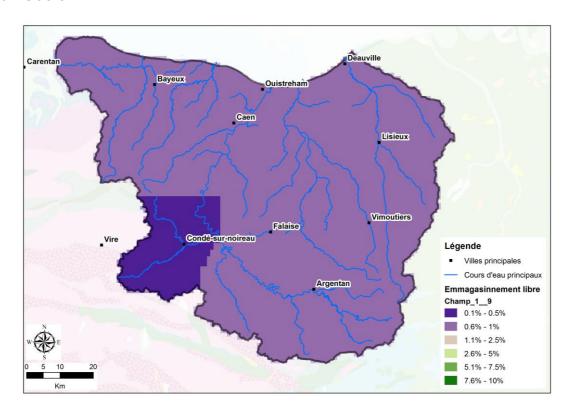
### 4. Calcaires du Bajocien-Aalénien-Toarcien



#### 5. Formations du Lias infra-Toarcien et Trias



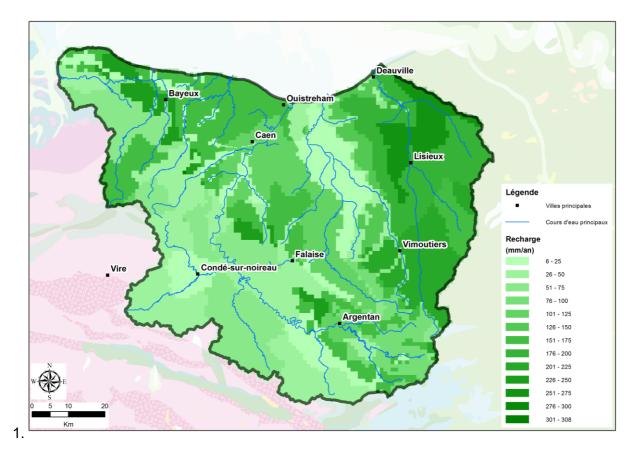
#### 6. Socle

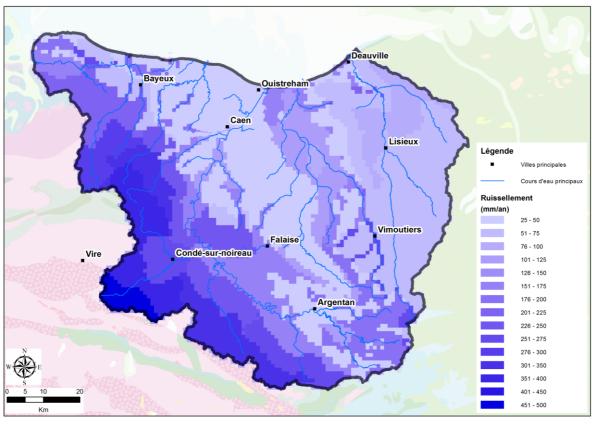


# **Annexe 11**

# Cartes des flux de recharge et de ruissellement en régime permanent ajustés à l'issue du calage

- 1. Flux de recharge en régime permanent ajusté à l'issue du calage
- 2. Flux de ruissellement en régime permanent ajusté à l'issue du calage







# Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin BP 36009 45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

#### Direction régionale de Basse-Normandie

CITIS "Odyssée", Bât. F, 1er étage 4, avenue de Cambridge 14200 - Hérouville-Saint-Clair - France

Tél.: 02 31 06 66 40