

Arnaud Willeumier, Nolwenn Croiset, Cécile Allanic, Charlotte Bourgault, Frederic Gresselin. **Un modèle hydrogéologique pour une gestion durable des ressources en eaux souterraines et superficielles du Calvados.** Géologues, Revue officielle de la Société Géologique de France, décembre 2014, Les ressources en eau à l'échelle régionale face à la demande pour les différents usages, en France, pp.100-105.

Cet article est diffusé par voie électronique avec l'aimable autorisation de la société géologique de France.

Il est paru dans le numéro 183 de la revue Géologues de décembre 2014, aux pages 100 à 105. Le sommaire de ce numéro est accessible à l'adresse suivante :

<https://www.geosoc.fr/publication/geologues/sommaires-et-resumes/932-183-les-ressources-en-eau-a-l-echelle-regionale-face-a-la-demande-pour-les-differents-usages-en-france-1/file.html>

Un modèle hydrogéologique pour une gestion durable des ressources en eaux souterraines et superficielles du Calvados

Arnaud Wuilleumier¹, Nolwenn Croiset², Cécile Allanic³, Charlotte Bourgault⁴, Frédéric Gresselin⁵.

Des ressources en eau sous tension

Les aquifères côtiers de la plaine de Caen et du bassin de la Dives (Fig. 1A), en particulier les aquifères calcaires du Bajocien et du Bathonien, constituent des ressources en eau stratégiques pour la Basse-Normandie, dont 90 % des volumes qui y sont prélevés le sont pour l'alimentation en eau potable des populations (soit 55,4 Mm³/an en 2010), 4,8 % pour l'industrie (3,4 Mm³/an) et 3,7 % pour l'agriculture (2,6 Mm³/an). L'exploitation de ces eaux souterraines influe sur les niveaux piézométriques et engendre un impact sur les milieux aquatiques qui peut s'avérer localement important, générant une baisse significative du débit de certains cours d'eau en étiage. La surexploitation de la ressource peut modifier également les conditions physico-chimiques naturelles qui prévalent dans les aquifères, notamment les processus de dénitrification naturelle dont ils bénéficient dans leur partie captive.

Dans les années 2000, en relais du décret-loi de 1935, les Services de l'État ont donc classé ce territoire en Zone de Répartition des Eaux (ZRE⁶) afin d'y contrôler davantage les nouveaux prélèvements. En appui d'autres mesures (Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques du 30/12/2006, décret n°2007-1381 du 24/09/2007, circulaire du 30/06/2008...) et suite à son évolution réglementaire, ce dispositif devrait permettre à l'horizon 2025 de restaurer l'équilibre des milieux aquatiques dans les zones en déficit quantitatif qui bordent la côte du Calvados. Il devrait par ailleurs autoriser une mise en œuvre rapide d'une politique de gestion collective de la ressource à travers la définition de volumes prélevables et le respect d'un débit minimum dans les cours d'eau.

Définir des volumes prélevables dans les eaux souterraines n'est pas aisé dans le contexte particulier des bassins versants côtiers du Calvados où les conditions lithologiques et les relations nappe / rivières varient rapidement dans l'espace. La modélisation hydrodynamique couplée eaux souterraines – eaux de surface est un des outils les mieux adaptés pour appréhender cette complexité, et apporter les éléments scientifiques permet-

tant aux Services de l'État de répondre aux nouvelles exigences réglementaires.

Un modèle géologique 3D...

La géométrie des réservoirs aquifères conditionnant les résultats des modèles numériques hydrogéologiques, il est primordial de construire préalablement un modèle géologique assurant la cohérence entre toutes les données et actualisable dans le futur (Barthélemy et Seguin, 2013). Le modèle géologique réalisé couvre l'ensemble du département du Calvados et une partie de celui de l'Orne, soit une surface de 7 500 km². Géologiquement, cette région de Basse-Normandie appartient à deux domaines : le Bassin parisien dans sa partie est et le Massif armoricain dans sa partie ouest (Fig. 1A). Le Massif armoricain se compose de formations intrusives (surtout des granites) et primaires (en particulier des grès et des schistes) qui seront regroupées sous la formation « SOCL » dans la pile des formations modélisées (Fig.1B). Les différentes couches du Secondaire du Bassin parisien représentent les principaux aquifères et aquicludes de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. La pile lithostratigraphique synthétique, référence pour la codification spécifique de toutes les données géologiques intégrées au modèle, a été adaptée aux objets ciblés, à savoir l'aquifère du Bajocien et celui du Bathonien (Wuilleumier *et al.*, 2013). Ainsi, le modèle géologique comporte 11 couches individualisées par rapport à leurs caractéristiques hydrogéologiques (et non par rapport à leur âge).

Le Bajocien-Bathonien a donc été subdivisé en 3 couches (voir figures 1B et 1C) :

- les calcaires du Bathonien moyen et supérieur (BATH), devenant marneux vers le Nord-Est (sillon marneux). On exclut de cette couche les argiles de Lion (Crombrash) du Bathonien supérieur qui sont rattachées aux marnes callovo-oxfordiennes (CALO) ;
- les marnes et calcaires marneux du Bathonien moyen et inférieur (incluant en particulier les marnes de Porten-Bessin) (MAPO), constituant une séparation impor-

1. BRGM Aquitaine, Parc Technologique Europarc, 24 avenue Léonard de Vinci, 33600 Pessac.

Courriel : a.wuilleumier@brgm.fr

2. BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 02.

Courriel : c.allanic@brgm.fr

3. Idem 2. Courriel : n.croiset@brgm.fr

4. AESN, Direction Territoriale et Maritime des Rivières de Basse Normandie - 1, rue de la Pompe, BP 70087, 14203 Hérouville-Saint-Clair cedex.

Courriel : bourgault.charlotte@aesn.fr

5. DREAL de Basse-Normandie, CITIS, Le Pentacle, avenue de Tsukuba, 14209 Hérouville-Saint-Clair.

Courriel : frederic.gresselin@developpement-durable.gouv.fr

6. Voir décret d'application n° 94-354 du 20 avril 1994 - art. 211-71 du Code de l'environnement.

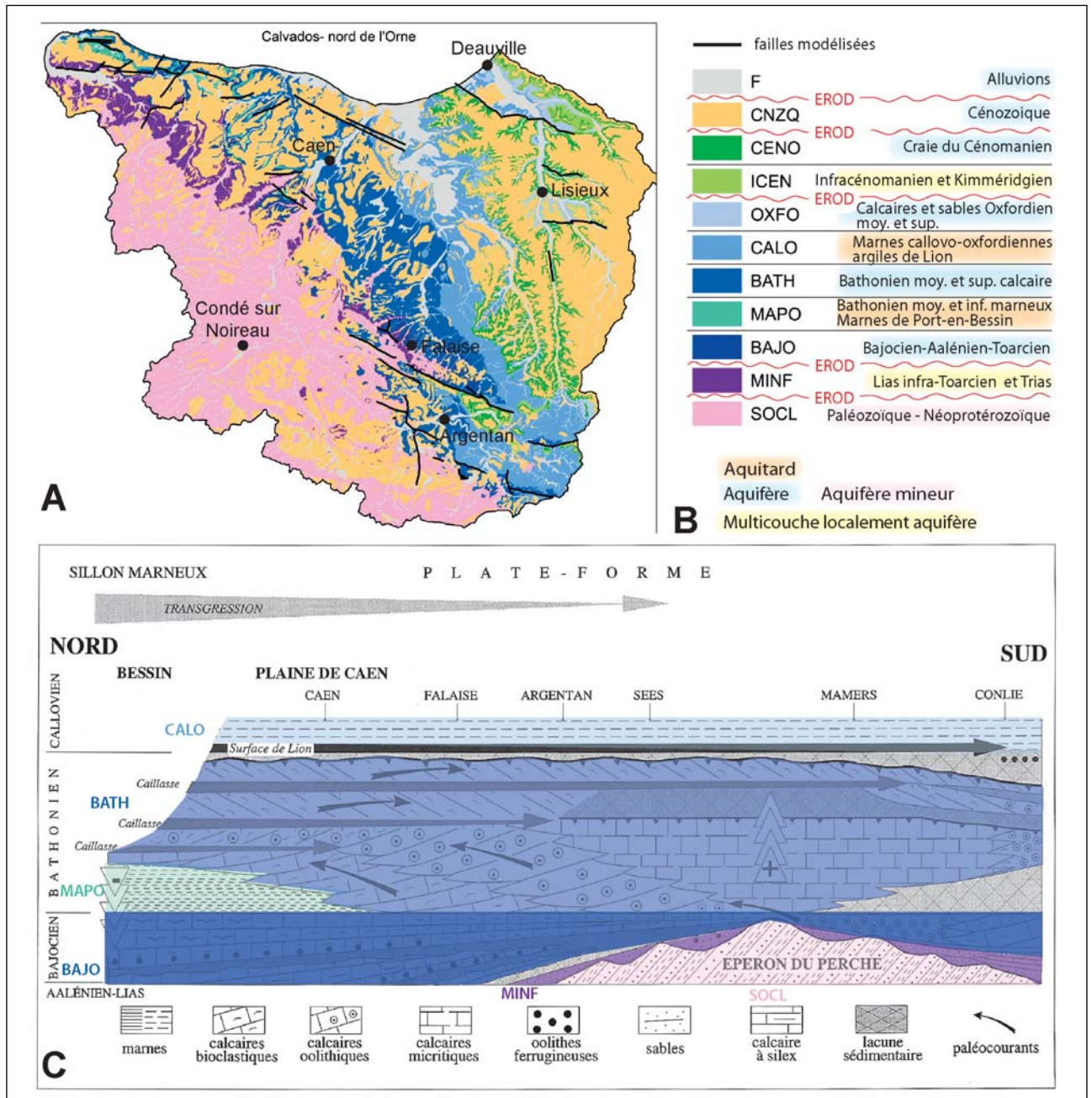


Figure 1. A. Carte géologique simplifiée du Calvados et du nord de l'Orne (Wuilleumier et al., 2013). B. Pile litho-stratigraphique des formations modélisées (le code couleur est appliqué sur les figures A et C) (Wuilleumier et al., 2013). C. Coupe géologique Nord-Sud des formations rencontrées dans la plaine de Caen (Dugué et al., 1998).

tante au voisinage du littoral entre les aquifères du Bajocien et du Bathonien ;

- les calcaires du Bajocien (alternance de calcaires, à spongiaires notamment, et de caillasses) (BAJO). Cette couche inclut également les formations calcaires sous-jacentes de l'Aalénien (La Malière) et du Toarcién avec à la base les Argiles à poissons.

La géométrie des interfaces de ces 11 formations a

été élaborée au pas de 200 m à l'aide d'un logiciel de modélisation géologique GDM-Multilayer (Bourgine et al., 2007 et 2008). Ces outils permettent notamment de prendre en compte les discontinuités liées aux failles modélisées ainsi que de vérifier si les contraintes d'inégalités sont respectées (Bourgine et al., 2007 et 2008). Le cas échéant, l'ajout de points de contrainte permet de respecter les structures géologiques et les variations connues des épaisseurs des formations. Les paramètres

d'interpolation de chaque surface sont également ajustés en fonction de la densité du jeu de données diminuant avec la profondeur. Ensuite, les différentes surfaces sont interpolées (krigeage linéaire sans dérive) et combinées automatiquement entre elles en fonction de leur caractère « érosif » ou « déposant ». Ce modèle géologique multi-couche cohérent ainsi réalisé constitue l'ossature du modèle hydrodynamique.

... pour un modèle hydrodynamique représentatif

La construction géométrique du modèle hydrogéologique (Fig. 2), effectuée avec le logiciel MARTHE (Thiery, 1990, 2004), a consisté en une adaptation du modèle géologique. Celle-ci s'est traduite notamment de la façon suivante :

- afin de limiter les temps de calcul, le modèle hydrogéologique a été discrétisé en mailles carrées de 1 km de côté sur la majeure partie de son extension. Dans la partie aval de l'Orne et de la Dives, un maillage gigogne constitué de mailles de 200 m de côté a été utilisé afin de prendre en compte avec plus de finesse le réseau hydrographique et la géométrie des formations ;
- la couche correspondant aux dépôts du Cénozoïque hors alluvions a été supprimée. Ces dépôts sont en effet

fréquemment dénoyés, ce qui poserait des problèmes numériques importants s'ils étaient individualisés dans le modèle. Les épaisseurs correspondant à cet ensemble de formations sont ajoutées à la première couche sous-jacente rencontrée ;

- compte tenu du maillage retenu, 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).

La construction du modèle hydrogéologique a été finalisée en intégrant les principaux cours d'eau alimentant ou alimentés par les eaux souterraines. Les paramètres initiaux qui dimensionnent les échanges nappe/rivière ont été estimés sur la base d'avis d'experts, avant d'être ajustés pendant le calage du modèle.

Les pluies efficaces ont été déterminées à partir de données spatialisées de pluie issues de la grille AURELHY⁷ de Météo-France (Bénichou *et al.*, 1987), d'une vingtaine de chroniques pluviométriques journalières et des chroniques d'évapotranspiration journalières (ETP) de Caen-Carpique et Alençon. La séparation des pluies efficaces entre recharge et ruissellement, ainsi que le déphasage temporel induit par la zone non-saturée, ont été évalués par le biais de modélisations hydrologiques globales

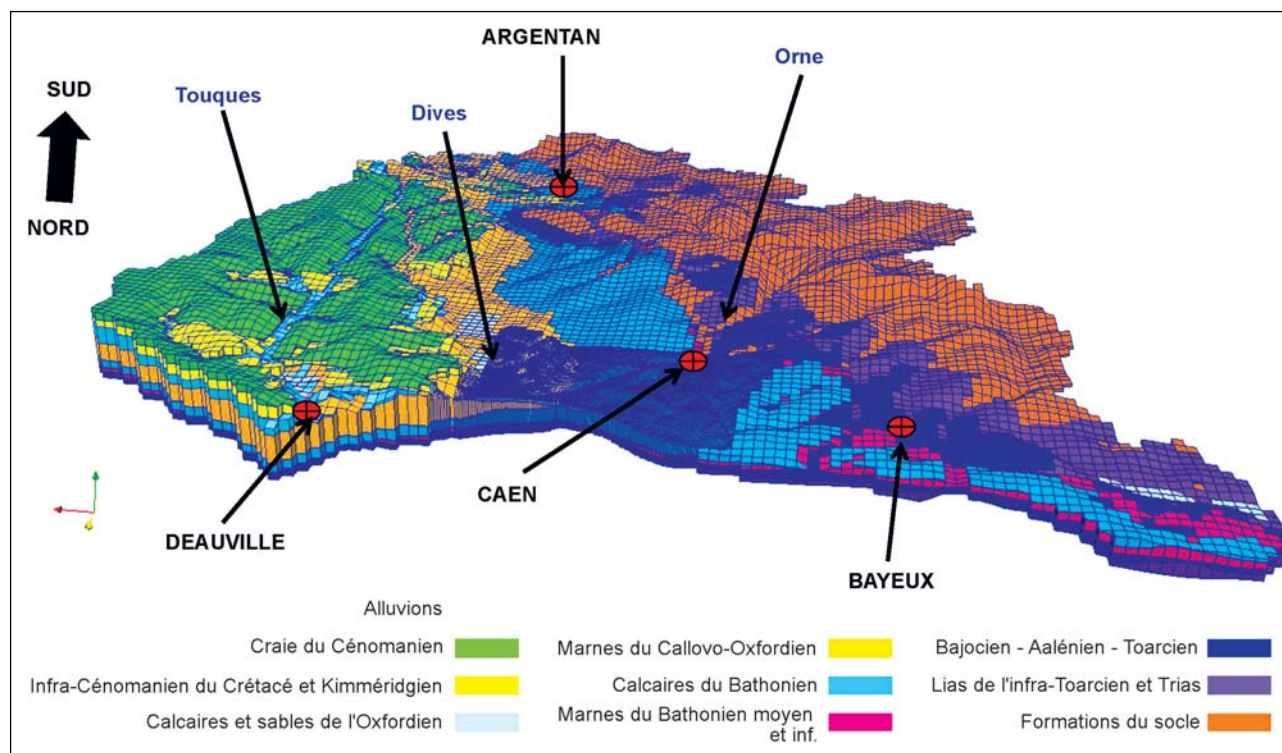


Figure 2. Visualisation 3D, vers le sud, du modèle hydrogéologique des fleuves côtiers du Calvados (source : Croiset *et al.*, 2013).

7. La méthode d'interpolation AURELHY (Analyse Utilisant le RELief pour l'HYdrométéorologie), développée par Météo-France, utilise l'information « relief » pour améliorer la cartographie des précipitations. Elle s'appuie sur un modèle numérique de terrain (MNT) fourni par l'Institut Géographique National (IGN) et s'articule autour des 3 points suivants :

- 1 - Reconnaissance automatique de la liaison statistique existant entre les précipitations et le relief environnant.
- 2 - Utilisation optimale de cette liaison statistique aux points où l'on ne dispose pas de valeur mesurée.
- 3 - Génération d'une carte régionale des précipitations, intégrant au mieux les effets dus au relief.

(non spatialisées) réalisées avec le logiciel GARDENIA (Thiery, 2014). Les valeurs initiales des paramètres hydrodynamiques (perméabilité et coefficient d'emmagasinement), attribuées à chaque couche du modèle, ont été déterminées à partir de 220 pompages d'essai et de la bibliographie (Wuilleumier *et al.*, 2013).

Les données relatives aux volumes prélevés en nappe sont issues des fichiers fournis par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie et la DDTM du Calvados (pour la modulation mensuelle des prélèvements AEP notamment). Des données de prélèvements mensuels ont pu être collectées auprès de syndicats maître d'ouvrage. Lorsque ces données n'étaient pas accessibles, les chroniques ont été reconstituées à partir des éléments disponibles. 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 % provenant des eaux souterraines.

Le calage du modèle hydrogéologique a principalement consisté à ajuster les paramètres hydrodynamiques, les paramètres de recharge et les paramètres

dimensionnant les échanges nappe-rivière, afin de restituer au mieux les fluctuations spatio-temporelles des écoulements en eaux souterraines mais également en eaux de surface. Le calage du modèle en « régime hydraulique permanent », puis en « régime transitoire » au pas de temps mensuel sur 17 années (1994-2010), s'est appuyé sur les cartes piézométriques régionales, ainsi que sur 61 chroniques piézométriques et 36 chroniques de débit enregistrées aux stations hydrométriques implantées sur le réseau hydrographique (Croiset *et al.*, 2013).

Après calage, une série d'analyses de sensibilité a permis d'apprécier la réactivité du modèle aux principaux paramètres de calage : perméabilité, emmagasinement, recharge, pompage... Elle a notamment permis de tester :

- le rôle hydraulique de la faille ONO-ESE entre Caen et Ouistreham au travers de plusieurs simulations. L'attribution à la faille d'un rôle de barrière hydraulique, en rive gauche du Dan dans sa partie amont, améliore l'adéquation entre niveaux simulés et niveaux observés ;

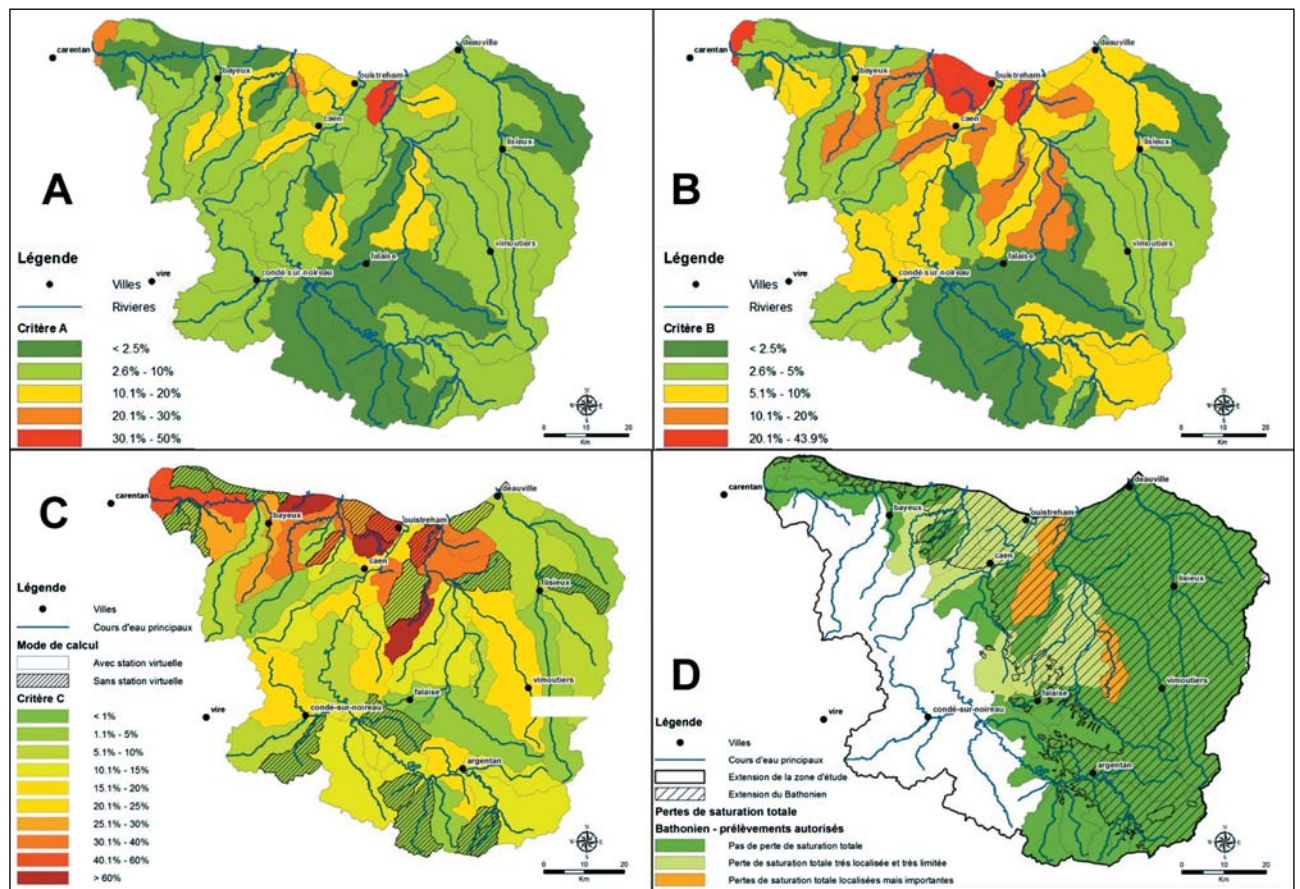


Figure 3. Critères élaborés en vue de l'identification des zones en tension quantitative. A Ratio entre les prélèvements en eaux souterraines (ESO) et le renouvellement des ESO. B. Pourcentage de baisse des apports en ESO aux eaux de surface entre le régime naturel et un état influencé par les prélèvements. C. Pourcentage de baisse constaté sur le QMNA5 simulé entre le régime naturel et un état influencé par les prélèvements. D. Identification de pertes de saturation totale simulées entre le régime naturel et un état influencé par les prélèvements (Wuilleumier *et al.*, 2014).

■ le choix de la station d'évapotranspiration potentielle (ETP) utilisée pour la partie sud du modèle, en comparant deux simulations en régime transitoire réalisées avec différentes chroniques d'ETP. Les résultats montrent des influences minimales sur les chroniques piézométriques simulées, ainsi que sur les débits simulés.

Impact des usages sur les ressources en eau

Dans le but de préciser les secteurs en tension quantitative, le territoire a été divisé en 67 unités hydrologiques (Fig. 3), pour lesquelles des bilans d'eau ont été réalisés. Des critères ont été élaborés pour permettre la délimitation de la ZRE. Il s'agit :

- du ratio entre les prélèvements en eaux souterraines et le renouvellement des eaux souterraines ;
- du ratio entre les prélèvements totaux et le QMNA5⁸ ;

- du pourcentage de baisse des apports en eau souterraine aux eaux de surface entre le régime naturel et un état influencé par les prélèvements ;
- du pourcentage de baisse constaté sur le QMNA5 simulé entre le régime naturel et un état influencé par les prélèvements ;
- de l'identification des secteurs dans lesquels la simulation montre qu'un aquifère perd sa saturation totale entre le régime naturel et un état influencé par les prélèvements.

Les zones en « forte tension quantitative » sont définies comme étant celles pour lesquelles le QMNA5 simulé avec pompage est inférieur de plus de 30% au QMNA5 simulé sans pompages (données climatiques de 1971-2010 et année 2010 comme configuration spatiale et temporelle de référence pour ces prélèvements) (Wuilleumier, 2014). L'étude révèle ainsi que dans 10 unités hydrologiques, situées majoritairement au voisinage du littoral, les prélèvements affectent significativement les ressources en eau souterraine et/ou les écoulements de surface (Fig. 4A).

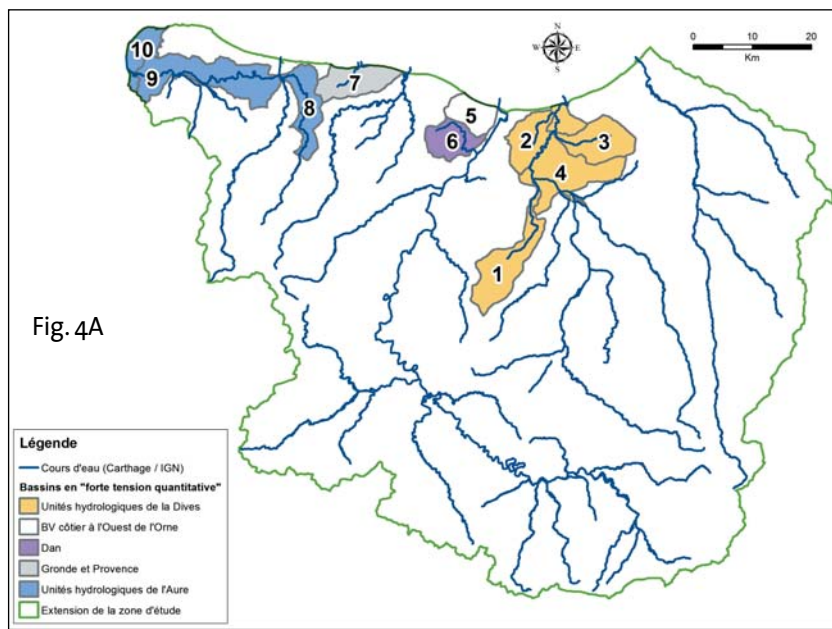


Fig. 4A

Simulations prédictives de réduction des prélèvements

Un volume prélevable maximal a été déterminé pour chacune des dix unités hydrologiques sous tension quantitative identifiées précédemment (voir figure 4). Ce volume maximal prélevable correspond au volume de prélèvements annuels permettant de ne pas dépasser un impact de 30% sur le QMNA5 simulé. Le calcul de ces volumes conduit à recommander une baisse de 3,5 Mm³ des prélèvements annuels par rapport aux prélèvements effectués en 2010 pour l'ensemble de ces dix zones. Une forte disparité est cependant observée d'une unité à l'autre (voir figure 4B).

Fig. 4B

Nom Bassin versant	Prélèvements 2010 (100000 m3)	Baisse des prélèvements vs 2010 (%)	Baisse de prélèvements vs 2010 (100000 m3)
1 Muance (La)	11,2	47%	5,2
2 Divette (La)	7,2	23%	1,7
3 Ancre (L')	11,4	10%	1,1
4 Dives aval (La)	16,1	0%	-
5 FRHC14 - BV côtier Ouest Orne	6,6	8%	0,5
6 Dan (Le)	17,1	82%	10,6
7 Gronde littoral et Provence	4,1	82%	3,3
8 Aure aval (L')	7,6	15%	1,1
9 Aure inférieure (L')	15,2	44%	6,7
10 Aure inf. confluence Vire (L')	7,9	66%	5,2
TOTAL	104,3	34%	35,5

Figure 4. A) Localisation des unités hydrologiques en « forte tension quantitative ». B) Baisse appliquée sur les prélèvements de 2010 permettant de ne pas dépasser un impact des pompages supérieur à 30% du QMNA5 naturel simulé (Wuilleumier et al., 2014).

On identifie ainsi que l'unité hydrologique de la Dives aval qui présente un impact relativement fort sur le QMNA5 (37%), ne nécessite pas pour autant une baisse des prélèvements au sein même de l'unité. Les réductions de pompage effectuées à l'amont sur la

8. QMNA5 : QMNA - débit (Q) mensuel (M) minimal (N) de chaque année civile (A) - de fréquence de retour 5 ans sec, soit débit mensuel minimal de l'année civile ayant une probabilité d'être dépassé 4 années sur 5.

Muance et l'Ancre, voire la Divette, suffisent à rétablir un écoulement à l'étiage supérieur au débit de référence retenu. Ce résultat montre bien la nécessité de prendre en compte les relations amont-aval entre les différentes unités hydrologiques dans le cadre de la gestion des zones en tension quantitative.

Conclusion

En fournissant une représentation 3D de l'agencement des réservoirs, le modèle hydrogéologique constitue un outil d'aide à la gestion des prélèvements existants et à venir. Il a permis de dresser un diagnostic initial des impacts des prélèvements sur les eaux souterraines et les eaux de surface. Ce modèle a pour vocation d'être mis à jour régulièrement et donc d'être amélioré constamment. Il permet également de cibler de nouvelles acquisitions de données, si nécessaire, à cette amélioration.

Sur la base de scénarios prévisionnels, le modèle hydrogéologique a fourni les éléments scientifiques permettant la révision de la délimitation de la Zone de Répartition des Eaux (ZRE) dans l'aquifère du Bajo-Bathonien (plaine de Caen-Argentan et Bessin), révision d'ores et déjà engagée par les Services de l'État. Il a également permis de définir un volume annuel prélevable sur ce territoire et orienté sur les zones nécessitant une attention particulière.

Ce travail démontre l'importance d'une connaissance fine des volumes prélevés, à un pas de temps au moins mensuel, dont il convient d'organiser la capitalisation. Il illustre également l'importance d'un retour d'expérience régulier, avec une révision éventuelle des volumes de prélèvements proposés au regard des constats qui seront effectués dans les années à venir.

Bibliographie

- Barthélemy Y., Seguin J.-J., 2013. Modélisation maillée des écoulements souterrains - Principes, démarche et recommandations. Rapport BRGM/RP-62549-FR.
- Bénichou P., Le Breton O., 1987. AURELHY : une méthode d'analyse utilisant le relief pour les besoins de l'hydrométéorologie. In : Deuxièmes journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier. Paris : ORSTOM, p. 299-304. (Colloques et Séminaires). Journées Hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier 2., Montpellier (FRA), 1986/09/16-17. ISBN 2-7099-0865-4.
- Bourguin B., 2006. Modélisation géologique 3D à l'aide du programme MultiLayer. Version 3. Rapport BRGM/RP-53111-FR.
- Bourguin B., Leparmentier A.-M., Lembezat C., Thierry P., Luquet C., Robelin C., 2008. Tools and methods for constructing 3D geological models in the urban environment. The Paris case. Proceeding of the 8th international geostatistics congress : GEOSTATS 2008, Chili, J.M. Ortiz and X. Emery Editors, Vol. 2, 951-960.
- Croiset N., Wuilleumier A., Bessière H., Gresselin F., Seguin J.-J., 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 p.
- Dugué O., Fily G., Rioult M., 1998. Le Jurassique des côtes du Calvados. Biostratigraphie, Sédimentologie, Paléoécologie, Paléogéographie et Stratigraphie séquentielle. Bull. Soc. géol. Normandie et Amis Muséum du Havre, 85, 2, 132 p.
- Thiéry D., 1990. Logiciel MARTHE, Modélisation d'Aquifères par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Écoulements. Notice BRGM R-32210.
- Thiéry D., 2004. Logiciel MARTHE 6.4 : Couplage nappe – rivières et nappes – drains ; bilans hydroclimatiques. Note technique NT EAU 2004/19.
- Thiéry D., 2014. Logiciel GARDÉNIA, version 8.2. Guide d'utilisation. Rapport final. Rapport BRGM/RP-62797-FR, 116 p.
- Wuilleumier A., Allanic C., Boudet M., Bourguin B., Croiset N., Machard de Gramont H., Pannet P., Tourlière B., 2013. Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Phase 1 : Collecte des données, synthèse hydrogéologique et construction du modèle géologique. Rapport BRGM/RP-62002-FR, 188 p.
- Wuilleumier A., Croiset N., Seguin J.-J., 2014. Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Phase 3 : Utilisation du modèle hydrogéologique pour la mise à jour de la ZRE et le calcul des volumes prélevables. Rapport BRGM/RP-62863-FR, 75 p.