

Fonctionnement hydrogéologique du bassin versant de Neuillé (Maine-et- Loire)

Rapport final

BRGM/RP-60290-FR
Septembre 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2009 09EAU166

P. Chrétien & F. Lucassou
Avec la collaboration de
**D. Allier, V. Baudouin, A. Frioux, C. Gautron, M. Lair, G. Rodriguez, E.
Rouxel, J. Toutain**

Vérificateur :

Nom : ROUXEL
Date : 17/10/2011



Approbateur :

Nom : CONIL
Date : 02/11/2011



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 : eau souterraine, piézométrie, Turonien, irrigation, alimentation en eau potable, Neuillé, Maine-et-Loire, Pays-de-la-Loire.

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

P. Chrétien & F. Lucassou avec la collaboration de V. Baudouin, A. Frioux, C. Gautron, M. Lair, G. Rodriguez, E. Rouxel & J. Toutain (2010) – Bassin Versant de Neuillé – Interprétation des campagnes piézométriques basses et hautes eaux. Rapport final – BRGM/RP-60290-FR, 46 p., 12 ill., 4 tab., 2 ann.

© BRGM, 2011, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le niveau de la nappe du Turonien est suivi dans le bassin versant de Neuillé depuis 1992¹ dans le cadre du réseau piézométrique patrimonial du département du Maine-et-Loire. L'historique de suivi met en évidence une nette tendance à la baisse depuis 2004.

À la demande de la Direction Départementale des Territoires du Maine-et-Loire, le BRGM réalise une étude sur l'élaboration de règles de gestion de la ressource en eau souterraine pour le bassin versant de Neuillé. Deux campagnes piézométriques ont été réalisées à l'automne 2009 (basses eaux) et au printemps 2010 (hautes eaux) et ont permis d'élaborer deux cartes piézométriques. On peut ainsi tracer les limites des bassins versants hydrogéologiques le long des crêtes piézométriques.

Pour ce qui concerne la nappe du Turonien à Neuillé, le bassin versant hydrogéologique correspond peu ou prou au bassin versant hydrologique. Ses limites latérales ont été déterminées au moyen des cartes piézométriques (crêtes piézométriques). Sa limite amont a quant à elle été déterminée grâce à la carte IGN au 1/25000 et au modèle numérique de terrain (crête topographique). Enfin, la limite aval correspond à la limite d'érosion du tuffeau du Turonien (contact tuffeau/marnes à Ostracées). Le bassin versant présente une superficie de 12,1 km².

Entre octobre 2009 et mars 2010, on estime que le volume d'eau stocké par le tuffeau du Turonien est compris entre 2 et 3,3 millions de m³, soit 170 à 270 mm (selon la valeur retenue pour le coefficient d'emménagement). Les prélèvements quant à eux représentent sur cette période 18 mm.

Il est probable que la chute de piézométrie observée sur le piézomètre de Neuillé soit due à l'effet conjugué de l'augmentation des prélèvements (au sein desquels l'irrigation prend une part de plus en plus forte, mais reste sensiblement inférieure à l'AEP) et de la diminution de la recharge hivernale démontrée par les bilans hydrologiques.

¹ Interruption de juin 1999 à mai 2004

Sommaire

1. Introduction	9
2. Piézométrie du bassin versant de Neuillé	11
2.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE	11
2.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE	11
2.2.1. Géologie	11
2.2.2. Hydrogéologie	12
2.3. CAMPAGNES PIEZOMETRIQUES DE TERRAIN	13
2.3.1. Automne 2009 : basses eaux (BE)	13
2.3.2. Printemps 2010 : hautes eaux (HE)	14
2.4. CARTES PIEZOMETRIQUES	15
3. Clefs de lecture des cartes piézométriques	19
3.1. CARACTERISTIQUES ET LIMITES D'UTILISATION DES CARTES PIEZOMETRIQUES	19
3.2. COMMENTAIRES SUR LES CARTES PIEZOMETRIQUES	19
3.2.1. Lignes de courant et sens d'écoulement	19
3.2.2. Gradient hydraulique	19
3.2.3. Comparaison entre basses eaux et hautes eaux – Estimation de la variation de stock	20
3.2.4. Relations nappe-rivière	23
4. Bilan hydrologique sur la période 1992-2010	25
4.1. DONNÉES UTILISÉES	25
4.2. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION	25
4.3. IMPACT DES PRÉLÈVEMENTS SUR LA RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE	32
5. Conclusion	37
6. Bibliographie	39

Liste des illustrations

Illustration 1 : localisation de Neuillé dans le Maine-et-Loire (source : rapport BRGM/RP-57883-FR, 2009).	11
Illustration 2 : carte géologique simplifiée (source : rapport BRGM/RP-57883-FR, 2009).	12
Illustration 3 : coupe géologique schématique du coteau de Neuillé (l'échelle verticale est fortement dilatée)	13
Illustration 4 : localisation des points de mesure - campagne basses eaux.	14
Illustration 5 : localisation des points de mesure - campagne hautes eaux.	15
Illustration 6 : grille d'interpolation (spline) des hautes eaux.	16
Illustration 7 : chroniques piézométriques 2009 et 2010 du piézomètre de Neuillé.	17
Illustration 8 : bassin versant hydrogéologique de Neuillé.	21
Illustration 9 : cartographie du battement de la nappe entre octobre 2009 et mars 2010.	22
Illustration 10 : entre les hameaux « Vraie » et « le Petit Moulin », la nappe est déconnectée de l'Automne	24
Illustration 11 : évolution des prélèvements dans le tuffeau du bassin de Neuillé et proportion des prélèvements agricoles par rapport aux prélèvements totaux	32
Illustration 12 : comparaison des prélèvements et de la piézométrie à Neuillé entre 1992 et 2011	33
Illustration 13 : comparaison de la recharge de la nappe et de la piézométrie	33
Illustration 14 : comparaison de la recharge et des prélèvements sur le bassin de Neuillé	34
Illustration 15 : la moyenne des pluies mensuelles hivernales de la période 2004-2010 est inférieure à celle de la décennie précédente	34

Liste des tableaux

Tableau 1 : stockage d'eau souterraine dans le tuffeau selon plusieurs valeurs du coefficient d'emmagasinement.	23
Tableau 2 : recharge annuelle du tuffeau calculée par bilan hydrologique, $RU_{max} = 130$ mm	27
Tableau 3 : recharge annuelle du tuffeau calculée par bilan hydrologique, $RU_{max} = 90$ mm	28
Tableau 4 : recharge annuelle du tuffeau calculée par bilan hydrologique, $RU_{max} = 50$ mm	29
Tableau 5 : comparaison du stockage hivernal 2009-2010 calculé selon les deux méthodes décrites ci-dessus	31

Tableau 6 : comparaison des précipitations hivernales34

Liste des annexes

Annexe 1 Carte piézométrique basses eaux dans le secteur de Neullé41
Annexe 2 Carte piézométrique hautes eaux dans le secteur de Neullé45

1. Introduction

Le niveau de la nappe du Turonien est suivi dans le bassin versant de Neuillé depuis 1992² dans le cadre du réseau piézométrique patrimonial du département du Maine-et-Loire. L'historique de suivi met en évidence une nette tendance à la baisse depuis 2004 (moins marquée entre 1992 et 1999).

La ressource que représente la nappe du Turonien constitue localement un enjeu important à préserver puisqu'elle est utilisée pour la production d'eau potable (captage de Neuillé). C'est la raison pour laquelle les conflits d'usage de l'eau souterraine qui pourraient apparaître en période d'étiage sur le bassin versant de Neuillé rendent nécessaire une gestion de la ressource plus adaptée qui prendrait en compte à la fois les besoins et le stock utilisable.

À la demande de la Direction départementale des territoires du Maine-et-Loire, le BRGM a étudié le fonctionnement du bassin versant de Neuillé pour tenter de déterminer les causes de la chute de piézométrie dans la nappe du Turonien. Nous présentons dans le présent rapport les cartes piézométriques du bassin élaborées grâce aux données piézométriques collectées lors de deux campagnes de terrain (basses eaux puis hautes eaux). L'interpolation de ces cartes permet d'approcher par le calcul le volume d'eau souterraine stocké entre l'automne 2009 et le printemps 2010. On complète ce calcul par un bilan hydrologique « classique ».

² Interruption de juin 1999 à mai 2004

formations est masqué par des alluvions constituées de lits sableux avec des lentilles de graviers et de cailloutis.

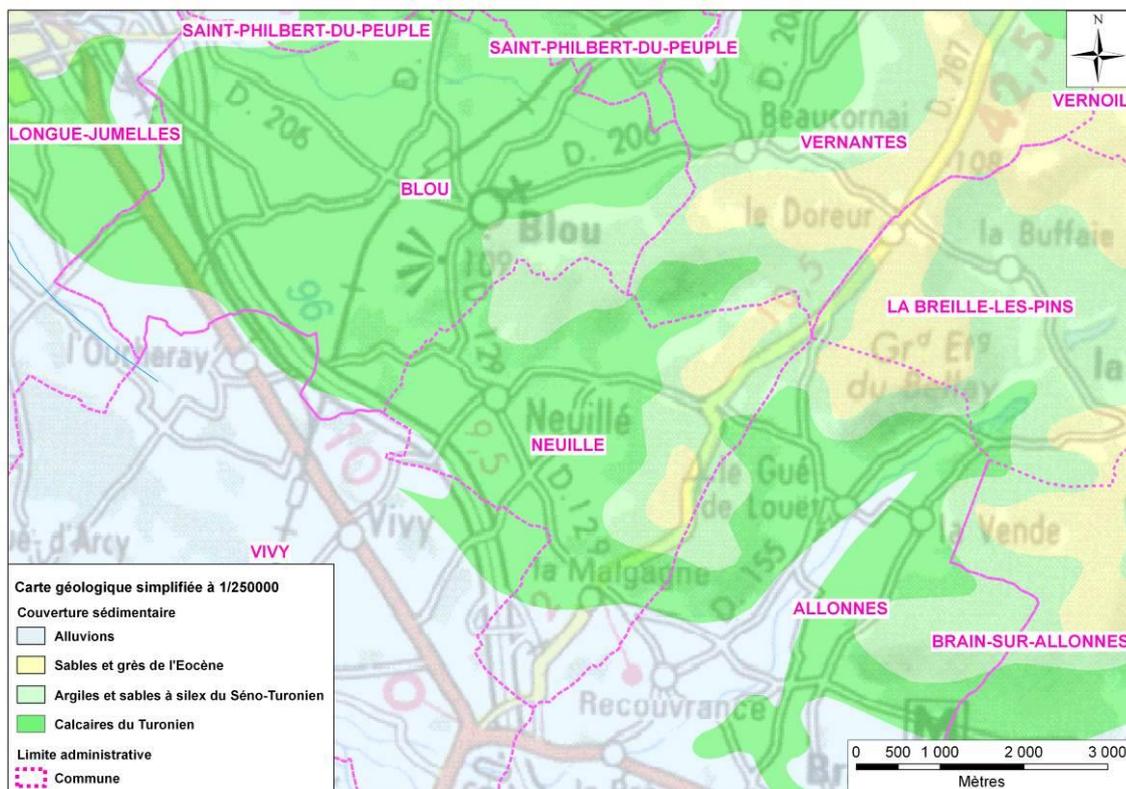


Illustration 2 : carte géologique simplifiée (source : rapport BRGM/RP-57883-FR, 2009).

2.2.2. Hydrogéologie

L'ensemble Sables du Coniacien et Tuffeau du Turonien constitue un aquifère unique qui renferme une nappe libre d'importance régionale. Le substratum imperméable de cet aquifère est constitué par les marnes du Cénomaniens supérieur (Marnes à Ostracées).

Selon les documents consultés, les sables du Coniacien sont ici dénoyés en raison de leur position topographique élevée. Le niveau statique s'établit dans le tuffeau du Turonien. Les dômes piézométriques se situent au droit des buttes. Dans la vallée, les écoulements convergent vers la fontaine Suzon. Des nappes perchées, plus ou moins discontinues, apparaissent dans les sables du Bartonien à la faveur des passées argileuses qui s'intercalent dans les sables du Coniacien.

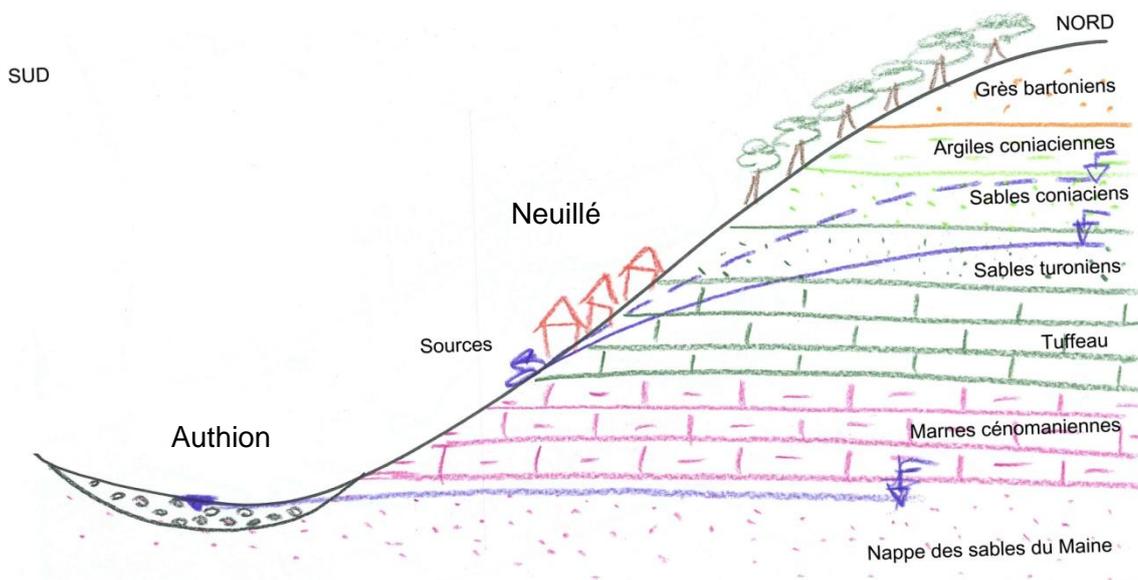


Illustration 3 : coupe géologique schématique du coteau de Neuillé (l'échelle verticale est fortement dilatée).

L'alimentation de l'aquifère s'effectue par l'infiltration des précipitations sur ce bassin et par drainance à travers les sables du Coniacien et les formations du Bartonien au droit des plateaux.

Localement, cet aquifère est exploité pour l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation et plus modestement pour des usages domestiques (potager, sanitaires, ...).

2.3. CAMPAGNES PIÉZOMÉTRIQUES DE TERRAIN

2.3.1. Automne 2009 : basses eaux (BE)

La campagne piézométrique de basses eaux s'est déroulée du 12 au 15 octobre 2009. 48 puits ou forages ont été visités ; trois d'entre eux étaient à sec. On dispose donc de 45 mesures pour dresser la carte piézométrique des basses eaux.

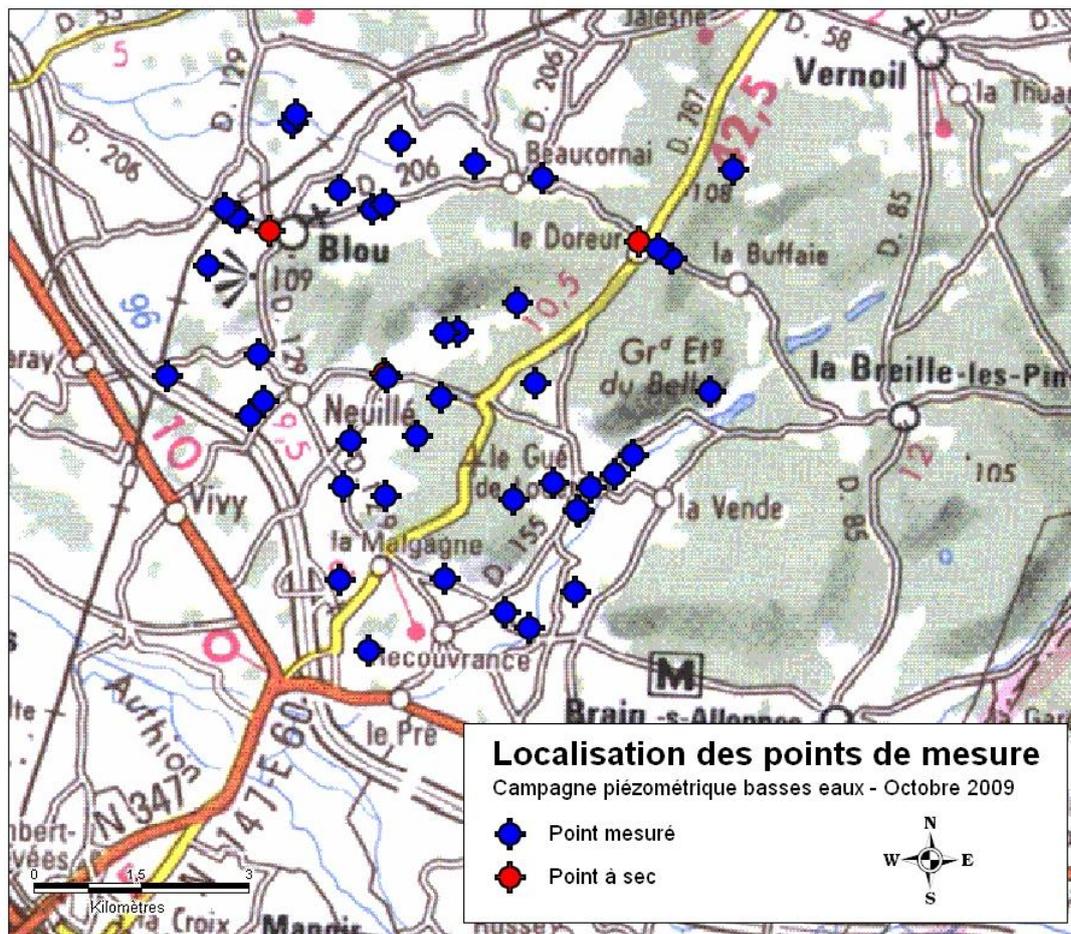


Illustration 4 : localisation des points de mesure - campagne basses eaux.

2.3.2. Printemps 2010 : hautes eaux (HE)

La campagne piézométrique de hautes eaux s'est déroulée les 9 et 10 mars 2010. 61 puits ou forages ont été visités ; quatre d'entre eux étaient à sec. On dispose donc de 57 mesures pour dresser la carte piézométrique des hautes eaux.

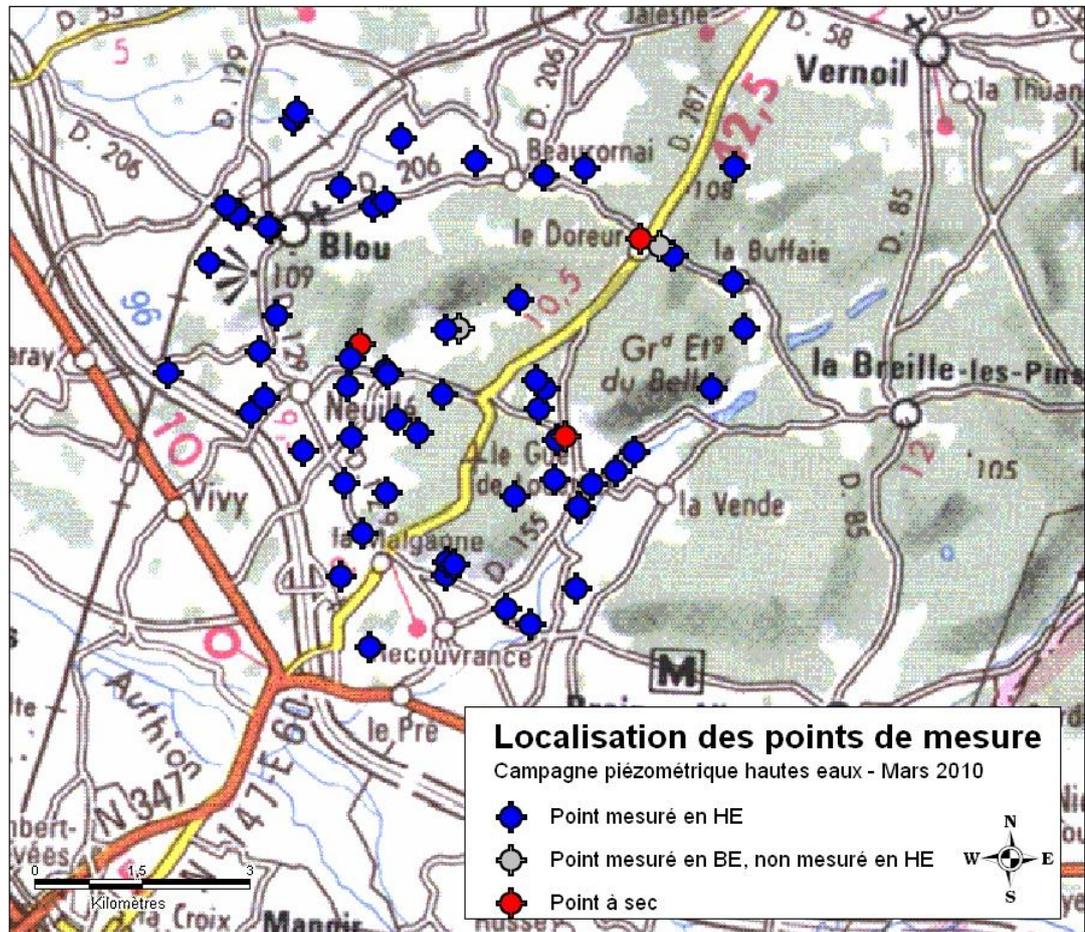


Illustration 5 : localisation des points de mesure - campagne hautes eaux.

2.4. CARTES PIÉZOMÉTRIQUES

Les profondeurs mesurées sont converties en altitude avant d'être interpolées

$$z_{\text{nappe}} = Z_{\text{repère}} - h_{\text{mesurée}}$$

Les mesures ont dans un premier temps été interpolées manuellement par triangulation, directement sous forme d'isopièzes (courbe équipotentielle de charge hydraulique, lire § 3.2.1) sur fonds topographique et géologique :

- en veillant à ce que la cote piézométrique soit inférieure à la cote topographique ;
- en vérifiant la cohérence des isopièzes avec les différents axes de drainage naturels que constituent les vallées humides et les vallons secs ;
- en s'assurant de la cohérence entre les isopièzes basses eaux (octobre 2009) et les isopièzes hautes eaux (mars 2010) ;

- en arrêtant le cas échéant les isopièzes aux limites d'extension de la nappe (lignes d'affleurement, failles, etc.) ;

La carte piézométrique des basses eaux du tuffeau du Turonien du secteur de Neuillé figure en annexe 1. La carte piézométrique des hautes eaux du tuffeau du Turonien du secteur de Neuillé figure en annexe 2.

Dans un second temps, les isopièzes ainsi obtenues ont été interpolées par la méthode « spline » (qui donnait de meilleurs résultats que le krigeage sous les plateaux) pour obtenir deux grilles au pas de 25 m des basses et hautes eaux.

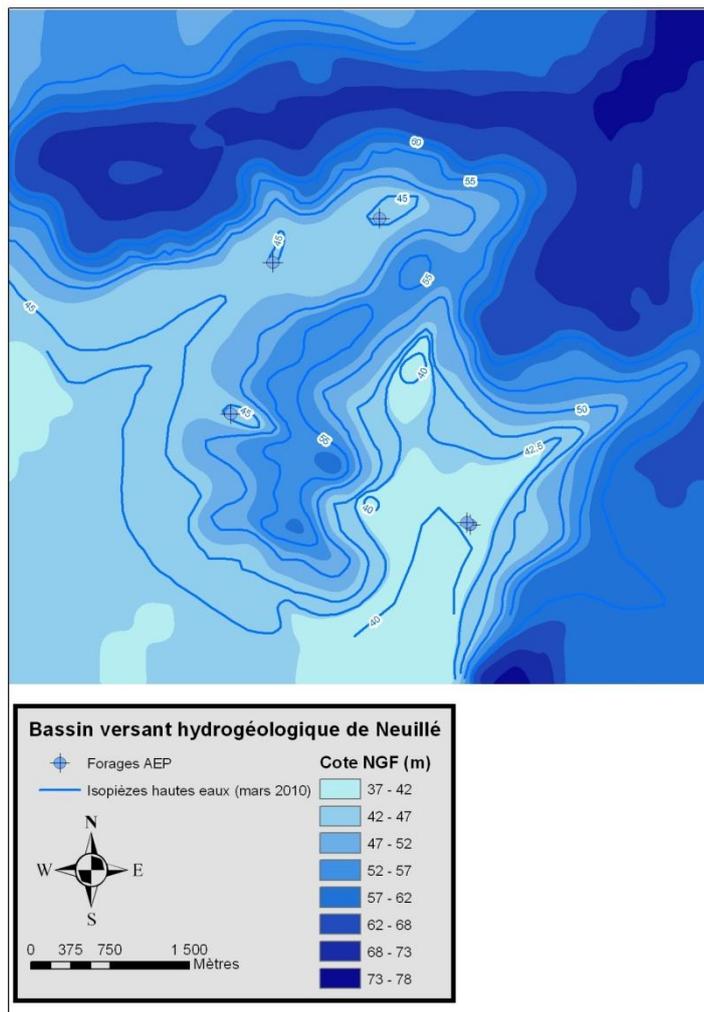


Illustration 6 : grille d'interpolation (spline) des hautes eaux.

Il est intéressant de noter que bien que les isopièzes utilisées pour l'interpolation respectent la hiérarchie hautes eaux / basses eaux, l'interpolation, elle, donne un résultat surprenant : au lieu-dit la Rue Noire notamment, le battement de la nappe est négatif, c'est-à-dire que les hautes eaux interpolées sont inférieures aux basses eaux

interpolées (cf. Illustration 9, § 3.2.3). Ce résultat singulier est peut-être dû au manque de données piézométriques dans le secteur concerné, conduisant à une interpolation imprécise. Comme le battement de la nappe entre octobre 2009 et mars 2010 est particulièrement faible (Illustration 7), l'imprécision provoque ce résultat inattendu. On ne l'observe d'ailleurs pas sur la chronique du piézomètre 04558X0072 suivi dans le cadre du réseau piézométrique du Maine-et-Loire. Dans les calculs qui suivent, le battement de la nappe sera réputé nul dans ce secteur.

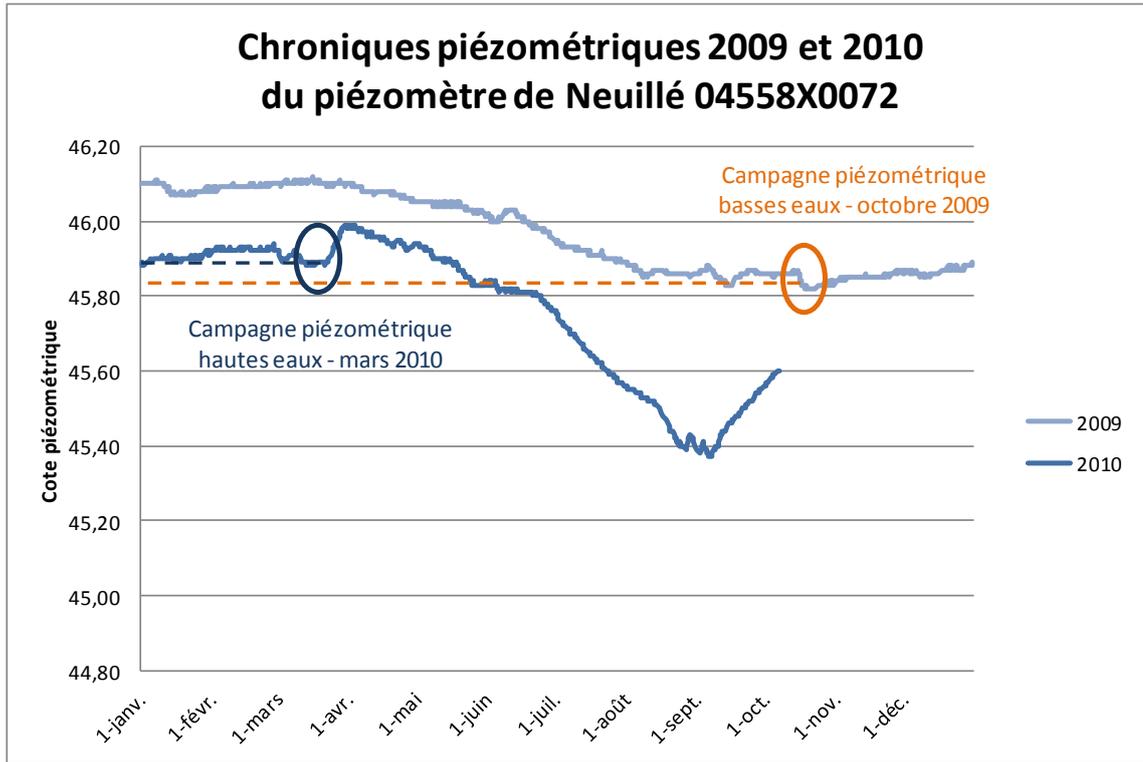


Illustration 7 : chroniques piézométriques 2009 et 2010 du piézomètre de Neuillé.

3. Clefs de lecture des cartes piézométriques

3.1. CARACTÉRISTIQUES ET LIMITES D'UTILISATION DES CARTES PIÉZOMÉTRIQUES

Les cartes piézométriques basses et hautes eaux élaborées dans le cadre de la présente étude contribuent à l'amélioration de la connaissance des ressources en eaux souterraines du bassin versant de Neuillé ; elles peuvent être exploitées localement, afin d'estimer l'altitude du toit de la nappe. L'écart entre les courbes piézométriques est de 5 m et elles ont été interpolées en grille au pas de 100 m.

Sur un plan pratique, elles peuvent être utilisées comme des documents d'orientation, voire comme un outil d'aide à la décision à une échelle plus grande, de l'ordre de $1/25\,000$. Elles restent cependant inadaptées pour des échelles plus précises.

3.2. COMMENTAIRES SUR LES CARTES PIÉZOMÉTRIQUES

3.2.1. Lignes de courant et sens d'écoulement

Les isopièzes sont des équipotentielles (la charge hydraulique est la même le long d'une isopièze). Les lignes de courant, qui définissent la direction et le sens des écoulements de la nappe, sont perpendiculaires aux isopièzes et vont dans le sens des potentiels décroissants (de la charge hydraulique la plus élevée vers la plus faible).

A la simple observation de la carte et de l'allure des isopièzes, on constate que la nappe est drainée par les cours d'eau et les vallées sèches (et donc les lignes de courant convergent vers les vallées).

On peut ainsi tracer les limites des bassins versants hydrogéologiques le long des crêtes piézométriques. Pour ce qui concerne la nappe du Turonien à Neuillé, le bassin versant hydrogéologique correspond peu ou prou au bassin versant hydrologique.

3.2.2. Gradient hydraulique

Le gradient hydraulique entre deux points de la surface piézométrique est l'équivalent de la pente en topographie. Il épouse le modelé topographique en en atténuant la rugosité. Il est plus faible sous les plaines et les plateaux que sous les coteaux.

On le détermine en calculant le rapport de la différence de potentiel entre deux points (donc ici une différence de charge hydraulique) par la distance séparant les deux points.

Le gradient hydraulique et la transmissivité de la roche aquifère permettent de déterminer le débit de la nappe au travers de la section de passage considérée (loi de

Darcy). Le tuffeau est le plus transmissif là où il est fracturé, et c'est souvent le cas dans les vallées humides ou sèches.

3.2.3. Comparaison entre basses eaux et hautes eaux – Estimation de la variation de stock

Le battement de la nappe (différence entre niveau le plus haut et niveau le plus bas) est maximal sous les plateaux et minimal dans les plaines et sous les coteaux.

On obtient une estimation de la variation du stock d'eau souterraine entre les basses eaux et les hautes eaux à l'échelle du bassin en maillant l'aire du bassin versant souterrain puis en multipliant pour chaque maille le battement de la nappe HE-BE (marnage) par la surface de la maille et par le coefficient d'emmagasinement. Soit :

- ΔS la variation de stock,
- m le nombre de mailles totales du bassin,
- $\forall i \in [1; m]$, A_i la superficie de la maille i (mailles carrées de superficie A_0),
- H_i^{HE} la cote piézométrique de la nappe en période de hautes eaux (mars 2010) dans la maille i ($i \in [1; m]$),
- H_i^{BE} la cote piézométrique de la nappe en période de basses eaux (octobre 2009) dans la maille i .
- φ le coefficient d'emmagasinement

$$\Delta S = \varphi \times \sum_{i=1}^m A_0 \times (H_i^{HE} - H_i^{BE})$$

(stockage si $\Delta S > 0$, déstockage si $\Delta S < 0$).

La superficie du bassin versant de Neuillé, déterminée grâce aux cartes piézométriques basses et hautes eaux et au modèle numérique de terrain, est estimée à 12 km² environ. Les limites latérales du bassin ont été déterminées au moyen des cartes piézométriques (crêtes piézométriques). La limite amont du bassin a quant à elle été déterminée grâce à la carte IGN au 1/25000 et au modèle numérique de terrain (crête topographique). Enfin, la limite aval correspond à la limite d'érosion du tuffeau du Turonien (contact tuffeau/marnes à Ostracées).

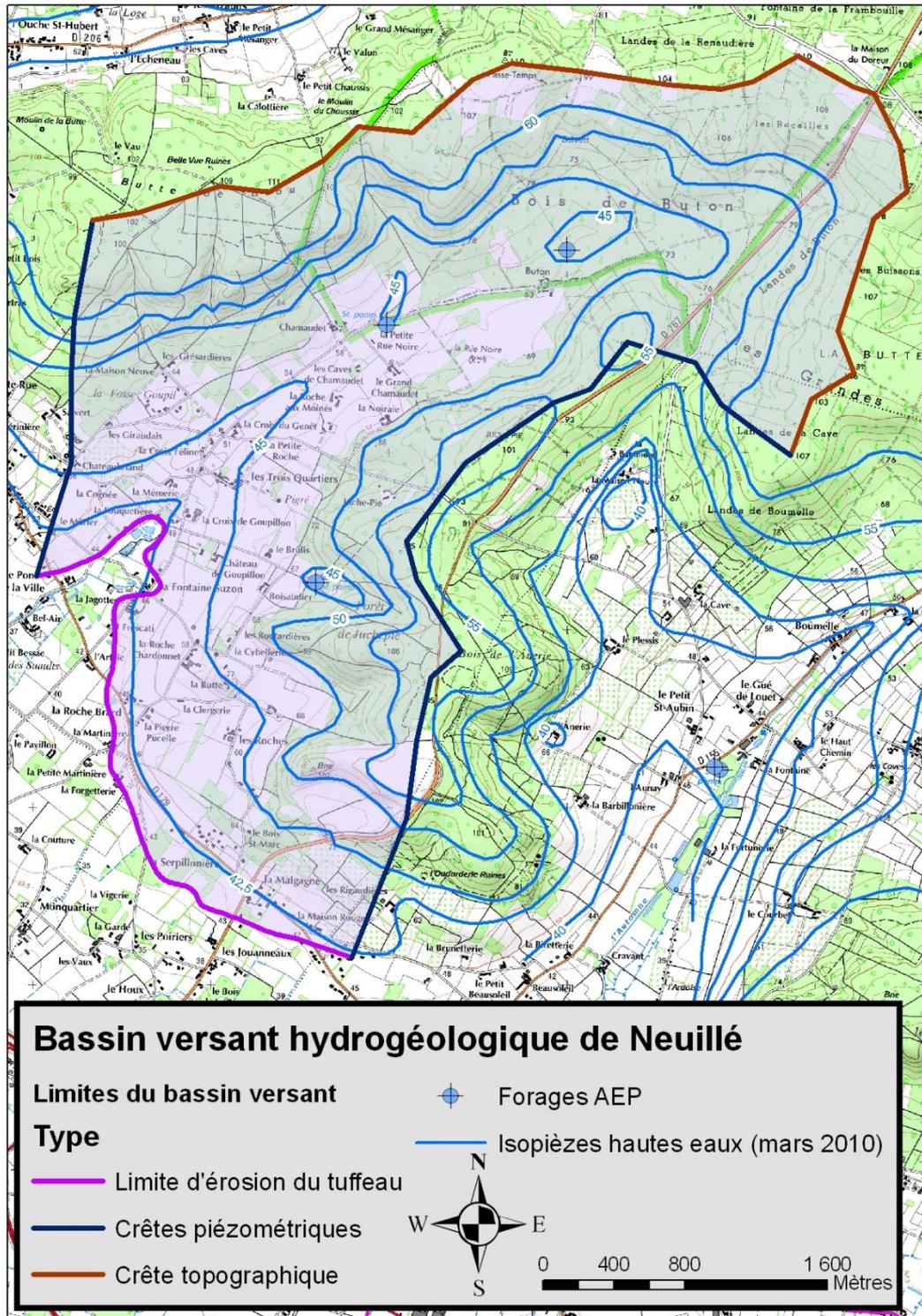


Illustration 8 : bassin versant hydrogéologique de Neuillé.

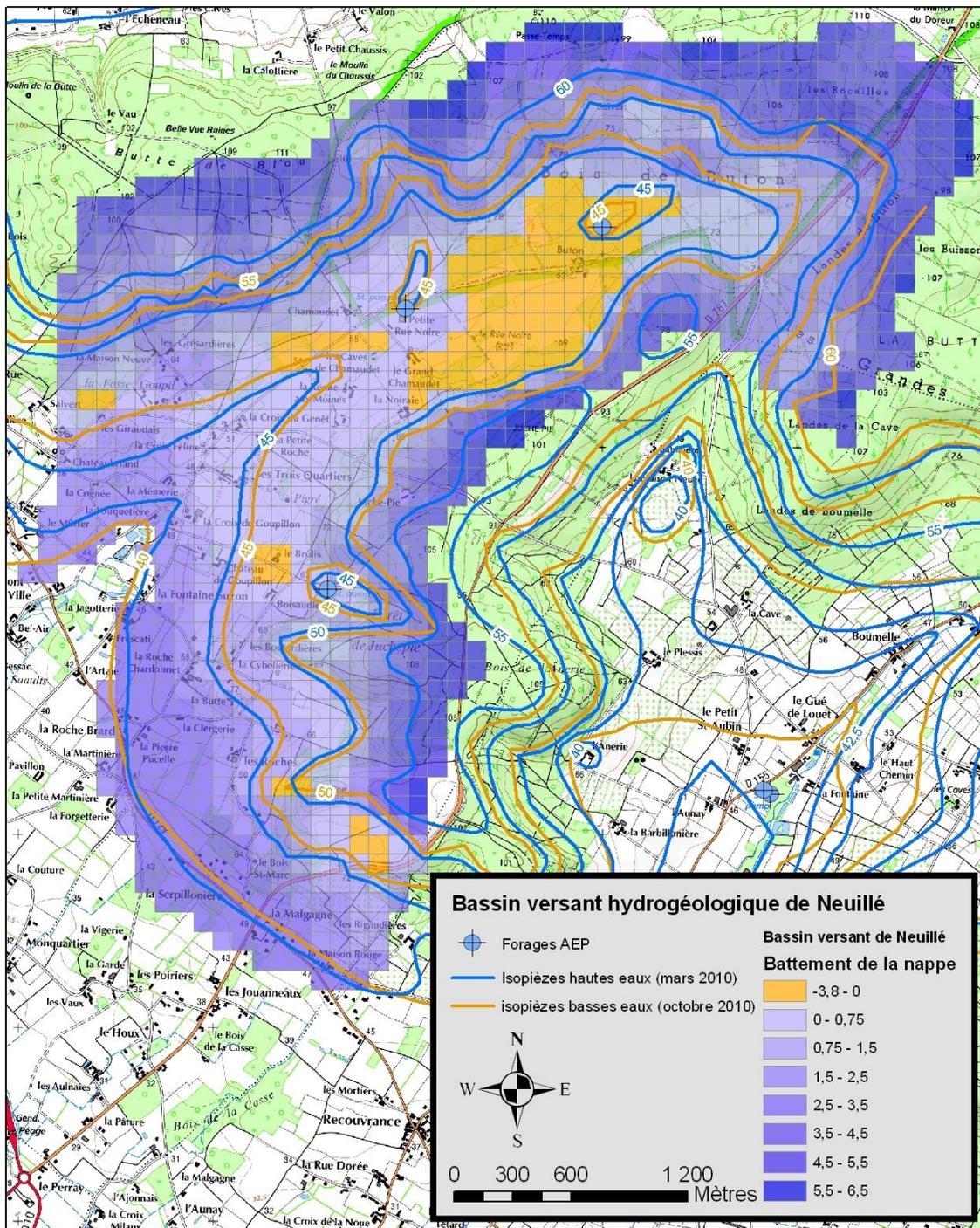


Illustration 9 : cartographie du battement de la nappe entre octobre 2009 et mars 2010.

L'aquifère du bassin de Neuillé est un aquifère multicouche ; or le coefficient d'emmagasinement dépend de la nature de la roche. Cependant les niveaux piézométriques les plus hauts estimés (autour de +70 m NGF sous les plateaux du

Bois de Buton) indiquent que seul le tuffeau du Turonien est saturé (*i.e.* les roches sus-jacentes ne contiennent pas d'eau libre, à l'exception des nappes perchées sans connexion directe à la nappe qui nous intéresse ici). On peut donc ne considérer que le coefficient d'emmagasinement du tuffeau du Turonien dans la formule ci-dessus.

Le forage AEP de Neuillé – Boisaudier a fait l'objet d'un pompage d'essai. Le coefficient d'emmagasinement de la nappe est estimé à 13%. Dans le tuffeau à Allonnes (la Fontaine), il est compris entre 8 et 12%. On obtient pour différentes valeurs de ϕ (uniformes sur le bassin) :

ϕ	stockage (m3)	stockage (mm)
8%	2,01E+06	166
10%	2,52E+06	207
13%	3,27E+06	270

Tableau 1 : stockage³ d'eau souterraine dans le tuffeau selon plusieurs valeurs du coefficient d'emmagasinement.

On verra plus tard (§ 4.2) que les pluies efficaces sont évaluées à 266 mm entre le 1^{er} octobre et le 28 février à Neuillé. Le calcul ci-dessus surestime donc le volume d'eau souterraine stocké. Une explication peut être que l'altitude de la nappe est la moins bien connue sous les plateaux (pas de puits ou forages dans les zones boisées), qui correspondent également aux secteurs où le battement de la nappe est le plus fort (Illustration 9) ; l'incertitude sur la piézométrie est donc maximale dans les mailles où le stockage calculé est le plus élevé.

3.2.4. Relations nappe-rivière

Bien que les axes des vallées humides et sèches constituent des axes de drainage de la nappe, les mesures piézométriques relevées dans les puits qui bordent le ruisseau « l'Automne » à la bordure orientale du secteur étudié (hors bassin versant de Neuillé) indiquent que nappe et cours d'eau sont déconnectés (la cote piézométrique de la nappe est inférieure à celle du fond du cours d'eau), aussi bien en période de basses eaux que de hautes eaux. Cette déconnexion pourrait être due au pompage AEP proche (lieu-dit « la Fontaine »).

Plus en aval, au hameau « le Petit Moulin », nappe et ruisseau sont à nouveau connectés.

La partie déconnectée du ruisseau l'Automne est comprise entre le Petit-Moulin et Vraie, sans que l'on puisse définir plus précisément dans l'état actuel des connaissances les bornes aval et amont du linéaire déconnecté. Sur le linéaire déconnecté, la nappe ne contribue pas à l'alimentation du cours d'eau : il y a donc un manque à gagner pour le débit du ruisseau.

³ En considérant un battement de nappe nul lorsqu'il était négatif ;

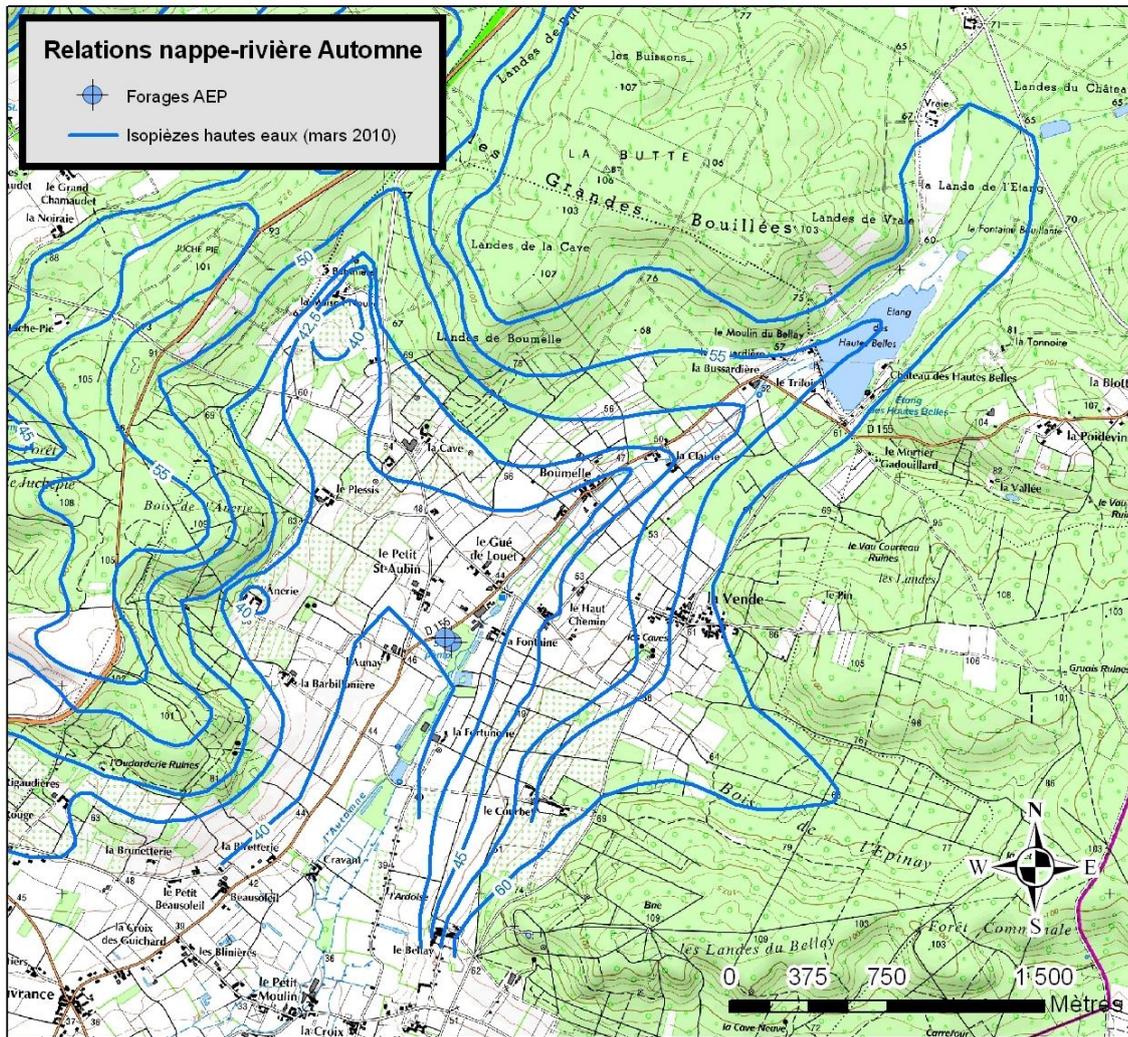


Illustration 10 : entre les hameaux « Vraie » et « le Petit Moulin », la nappe est déconnectée de l'Automne.

4. Bilan hydrologique sur la période 1992-2010

4.1. DONNÉES UTILISÉES

Trois bilans hydrologiques au pas de temps décadaire ont été établis entre 1992 et 2009 grâce à la pluie à Longué-Jumelles et l'ETP à Beaucouzé, en optant pour trois valeurs différentes de réserve utile des sols maximales. Le ruissellement est négligé dans le calcul.

L'Institut supérieur des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage, basé à Angers, évalue la réserve utile maximale des sols – au sens pédologique – à 130 mm sur le bassin de Neuillé. Au vu des valeurs de réserve utile maximale des sols (RU_{max}) couramment admises dans les bilans hydrogéologiques dans des contextes géologiques comparables, on peut néanmoins raisonnablement penser que la valeur de 130 mm est une surestimation de la réserve utile des sols au sens hydrogéologique, ou constitue la borne haute de l'ensemble des valeurs rencontrées sur le BV. C'est pourquoi les bilans ont également été calculés avec des valeurs de RU_{max} de 50 et 90 mm.

Les données de prélèvements proviennent de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne (AELB). De l'avis de la Chambre d'agriculture du Maine-et-Loire et de la Direction départementale des territoires, des prélèvements « sauvages » non déclarés existeraient en sus de ces volumes transmis par l'AELB.

4.2. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Les années 2005, 2007 et 2008 sont des années où les pluies hivernales ont été particulièrement faibles, conduisant à une proportion élevée des prélèvements par rapport à la ressource renouvelable (recharge) – jusqu'à 338 % en 2005 dans l'hypothèse où la RU_{max} vaut 130 mm. Cette proportion n'excède généralement pas 25 %, mais est assez volatile.

Sur la période de recharge allant du 1^{er} octobre 2009 au 28 février 2010, les pluies efficaces ont atteint 266 mm (hauteur d'eau calculée sur la base des données Météo France de pluviométrie à la station de Longué-Jumelles et d'évapo-transpiration à la station de Beaucouzé, au pas de temps décadaire.) Le ruissellement est très faible sur le secteur et est négligé dans le calcul ; en effet, il n'existe pas de cours d'eau majeur qui draine le bassin (à l'exutoire du bassin, le ruisseau de la Fontaine-Suzon est temporaire, et son débit n'est pas connu). Les prélèvements AEP et domestiques sur la période octobre-mars sont quant à eux de l'ordre de 218 000 m³ (source AELB), soit 18 mm (irrigation non significative sur cette période.) Les débits des sources au contact tuffeau/marnes à Ostracées sont négligeables. Si l'on néglige le débit du ruisseau, il n'y a donc pas d'autres sorties que celles dues aux prélèvements pour l'AEP.

Interprétation des campagnes piézométriques basses et hautes eaux du bassin versant de Neullé

Année	Recharge		Prélèvements AEP		Prélèvements irrigation connus		Prélèvements totaux		Part de l'irrigation dans les prélèvements totaux	Prélèvements totaux par rapport à la recharge	Prélèvements irrigation par rapport à la recharge
	mm	m3	mm	m3	mm	m3	mm	m3			
1992	87,4	1,06E+06	19,0	2,30E+05							
1993	56,1	6,80E+05	20,7	2,51E+05							
1994	234,9	2,85E+06	21,0	2,55E+05							
1995	228,3	2,77E+06	22,5	2,73E+05							
1996	125,3	1,52E+06	21,0	2,55E+05	3,3	4,03E+04	24,4	2,95E+05	14%	19%	3%
1997	53,8	6,52E+05	24,3	2,95E+05	3,6	4,34E+04	27,9	3,38E+05	13%	52%	7%
1998	137,3	1,66E+06	24,1	2,92E+05	3,4	4,16E+04	27,5	3,34E+05	12%	20%	2%
1999	283,4	3,44E+06	26,2	3,18E+05	4,0	4,82E+04	30,2	3,66E+05	13%	11%	1%
2000	210,1	2,55E+06	26,9	3,26E+05	5,9	7,10E+04	32,8	3,97E+05	18%	16%	3%
2001	198,4	2,41E+06	27,8	3,37E+05	7,2	8,67E+04	34,9	4,23E+05	20%	18%	4%
2002	93,1	1,13E+06	23,9	2,89E+05	5,2	6,35E+04	29,1	3,53E+05	18%	31%	6%
2003	84,2	1,02E+06	27,1	3,28E+05	7,9	9,55E+04	35,0	4,24E+05	23%	42%	9%
2004	128,8	1,56E+06	28,9	3,51E+05	7,4	9,02E+04	36,4	4,41E+05	20%	28%	6%
2005	12,1	1,47E+05	28,8	3,49E+05	12,1	1,47E+05	40,9	4,96E+05	30%	338%	100%
2006	120,1	1,46E+06	25,8	3,13E+05	14,5	1,76E+05	40,3	4,89E+05	36%	34%	12%
2007	100,5	1,22E+06	27,9	3,38E+05	8,4	1,02E+05	36,3	4,40E+05	23%	36%	8%
2008	80,5	9,76E+05	28,8	3,50E+05	13,2	1,60E+05	42,0	5,09E+05	31%	52%	16%
2009	98,3	1,19E+06	28,7	3,48E+05							
hiver 2009-10	125,7	1,52E+06	32,5	3,94E+05							
<i>hypothèses : ruissellement négligeable</i>											
	RUmax =	130 mm									

Tableau 2 : recharge annuelle du tuffeau calculée par bilan hydrologique, RUmax = 130 mm.

Année	Recharge		Prélèvements AEP		Prélèvements irrigation connus		Prélèvements totaux		Part de l'irrigation dans les prélèvements totaux	Prélèvements totaux par rapport à la recharge	Prélèvements irrigation par rapport à la recharge
	mm	m3	mm	m3	mm	m3	mm	m3			
1992	147,2	1,78E+06	19,0	2,30E+05							
1993	111,8	1,36E+06	20,7	2,51E+05							
1994	285,9	3,47E+06	21,0	2,55E+05							
1995	268,3	3,25E+06	22,5	2,73E+05							
1996	165,3	2,00E+06	21,0	2,55E+05	3,3	4,03E+04	24,4	2,95E+05	14%	15%	2%
1997	89,4	1,08E+06	24,3	2,95E+05	3,6	4,34E+04	27,9	3,38E+05	13%	31%	4%
1998	202,2	2,45E+06	24,1	2,92E+05	3,4	4,16E+04	27,5	3,34E+05	12%	14%	2%
1999	331,2	4,02E+06	26,2	3,18E+05	4,0	4,82E+04	30,2	3,66E+05	13%	9%	1%
2000	268,2	3,25E+06	26,9	3,26E+05	5,9	7,10E+04	32,8	3,97E+05	18%	12%	2%
2001	198,4	2,41E+06	27,8	3,37E+05	7,2	8,67E+04	34,9	4,23E+05	20%	18%	4%
2002	173,1	2,10E+06	23,9	2,89E+05	5,2	6,35E+04	29,1	3,53E+05	18%	17%	3%
2003	124,2	1,51E+06	27,1	3,28E+05	7,9	9,55E+04	35,0	4,24E+05	23%	28%	6%
2004	158,2	1,92E+06	28,9	3,51E+05	7,4	9,02E+04	36,4	4,41E+05	20%	23%	5%
2005	50,2	6,09E+05	28,8	3,49E+05	12,1	1,47E+05	40,9	4,96E+05	30%	81%	24%
2006	172,6	2,09E+06	25,8	3,13E+05	14,5	1,76E+05	40,3	4,89E+05	36%	23%	8%
2007	100,5	1,22E+06	27,9	3,38E+05	8,4	1,02E+05	36,3	4,40E+05	23%	36%	8%
2008	134,6	1,63E+06	28,8	3,50E+05	13,2	1,60E+05	42,0	5,09E+05	31%	31%	10%
2009	164,2	1,99E+06	28,7	3,48E+05							
hiver 2009-10	165,7	2,01E+06	32,5	3,94E+05							
<i>hypothèses : ruissellement négligeable</i>											
	RUmax =	90 mm									

Tableau 3 : recharge annuelle du tuffeau calculée par bilan hydrologique, RUmax = 90 mm.

Interprétation des campagnes piézométriques basses et hautes eaux du bassin versant de Neuillic

Année	Recharge		Prélèvements AEP		Prélèvements irrigation connus		Prélèvements totaux		Part de l'irrigation dans les prélèvements totaux	Prélèvements totaux par rapport à la recharge	Prélèvements irrigation par rapport à la recharge
	mm	m3	mm	m3	mm	m3	mm	m3			
1992	187,2	2,27E+06	19,0	2,30E+05		<i>pas de données</i>					
1993	151,8	1,84E+06	20,7	2,51E+05		<i>pas de données</i>					
1994	325,9	3,95E+06	21,0	2,55E+05		<i>pas de données</i>					
1995	308,3	3,74E+06	22,5	2,73E+05		<i>pas de données</i>					
1996	205,3	2,49E+06	21,0	2,55E+05	3,3	4,03E+04	24,4	2,95E+05	14%	12%	2%
1997	129,4	1,57E+06	24,3	2,95E+05	3,6	4,34E+04	27,9	3,38E+05	13%	22%	3%
1998	242,2	2,94E+06	24,1	2,92E+05	3,4	4,16E+04	27,5	3,34E+05	12%	11%	1%
1999	371,2	4,50E+06	26,2	3,18E+05	4,0	4,82E+04	30,2	3,66E+05	13%	8%	1%
2000	308,2	3,74E+06	26,9	3,26E+05	5,9	7,10E+04	32,8	3,97E+05	18%	11%	2%
2001	228,8	2,77E+06	27,8	3,37E+05	7,2	8,67E+04	34,9	4,23E+05	20%	15%	3%
2002	222,7	2,70E+06	23,9	2,89E+05	5,2	6,35E+04	29,1	3,53E+05	18%	13%	2%
2003	164,2	1,99E+06	27,1	3,28E+05	7,9	9,55E+04	35,0	4,24E+05	23%	21%	5%
2004	198,2	2,40E+06	28,9	3,51E+05	7,4	9,02E+04	36,4	4,41E+05	20%	18%	4%
2005	90,2	1,09E+06	28,8	3,49E+05	12,1	1,47E+05	40,9	4,96E+05	30%	45%	13%
2006	212,6	2,58E+06	25,8	3,13E+05	14,5	1,76E+05	40,3	4,89E+05	36%	19%	7%
2007	136,5	1,66E+06	27,9	3,38E+05	8,4	1,02E+05	36,3	4,40E+05	23%	27%	6%
2008	178,6	2,17E+06	28,8	3,50E+05	13,2	1,60E+05	42,0	5,09E+05	31%	24%	7%
2009	204,2	2,48E+06	28,7	3,48E+05		<i>pas de données</i>					
hiver 2009-10	205,7	2,49E+06	32,5	3,94E+05		<i>pas de données</i>					
<i>hypothèses : ruissellement négligeable</i>											
	RUmax =	50 mm									

Tableau 4 : recharge annuelle du tuffeau calculée par bilan hydrologique, RUmax = 50 mm.

Les deux méthodes décrites ci-dessus (évaluation du volume d'eau stocké par différence entre les basses et hautes eaux – lire § 3.2.3 – et calcul de la recharge par bilan hydrologique) donnent des résultats sensiblement différents (Tableau 5). Les différences tiennent aux incertitudes qui pèsent sur la valeur de réserve utile maximale du bassin d'une part, et sur celle du coefficient d'emmagasinement du tuffeau d'Anjou d'autre part.

	Bilan hydrologique			Interpolation de la piézométrie		
	RU = 50 mm	RU = 90 mm	RU = 130 mm	$\varphi = 8\%$	$\varphi = 10\%$	$\varphi = 13\%$
Prélèvements (m3)	2,18E+05					
Prélèvements (mm)	18					
Recharge (m3)	2,49E+06	2,01E+06	1,52E+06			
Recharge (mm)	206	166	126			
Stockage (m3)	2,28E+06	1,79E+06	1,31E+06	2,01E+06	2,52E+06	3,27E+06
Stockage (mm)	188	147,7	107,7	166	207	270

Tableau 5 : comparaison du stockage hivernal 2009-2010 calculé selon les deux méthodes décrites ci-dessus.

Il faut également insister sur d'autres incertitudes :

- l'altitude piézométrique de la nappe :
 - si la profondeur mesurée par rapport au repère est précise au centimètre près, le repère n'est en revanche jamais nivelé (sauf exception) et la référence altimétrique est donc celle obtenue au moyen du fond IGN au 1/25 000 (précision inférieure au mètre.)
 - presque aucun puits ou piézomètre n'existe au droit des plateaux boisés qui délimitent le bassin de Neuillé. L'incertitude sur la piézométrie de la nappe est donc maximale là où le stockage d'eau souterraine calculé est le plus élevé : le calcul par interpolation de la piézométrie surestime le volume d'eau souterraine stocké entre octobre 2009 et mars 2010.
- une partie de la pluie efficace est probablement stockée dans les nappes perchées qui se forment au droit des plateaux, dans les sables du Bartonien notamment, à la faveur de passées argileuses dans les sables du Coniacien (lire § 2.2.2).

4.3. IMPACT DES PRÉLÈVEMENTS SUR LA RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE

Si l'on excepte les années où l'été s'est révélé particulièrement maussade (faible ETP), comme en 2002 et 2007, les prélèvements agricoles n'ont cessé d'augmenter depuis le milieu des années 1990 (en valeur absolue, mais aussi relativement aux prélèvements totaux du bassin – cf. Illustration 11). Sur la même période, les prélèvements pour l'AEP ont augmenté également, mais moins vite que ceux destinés à l'irrigation.

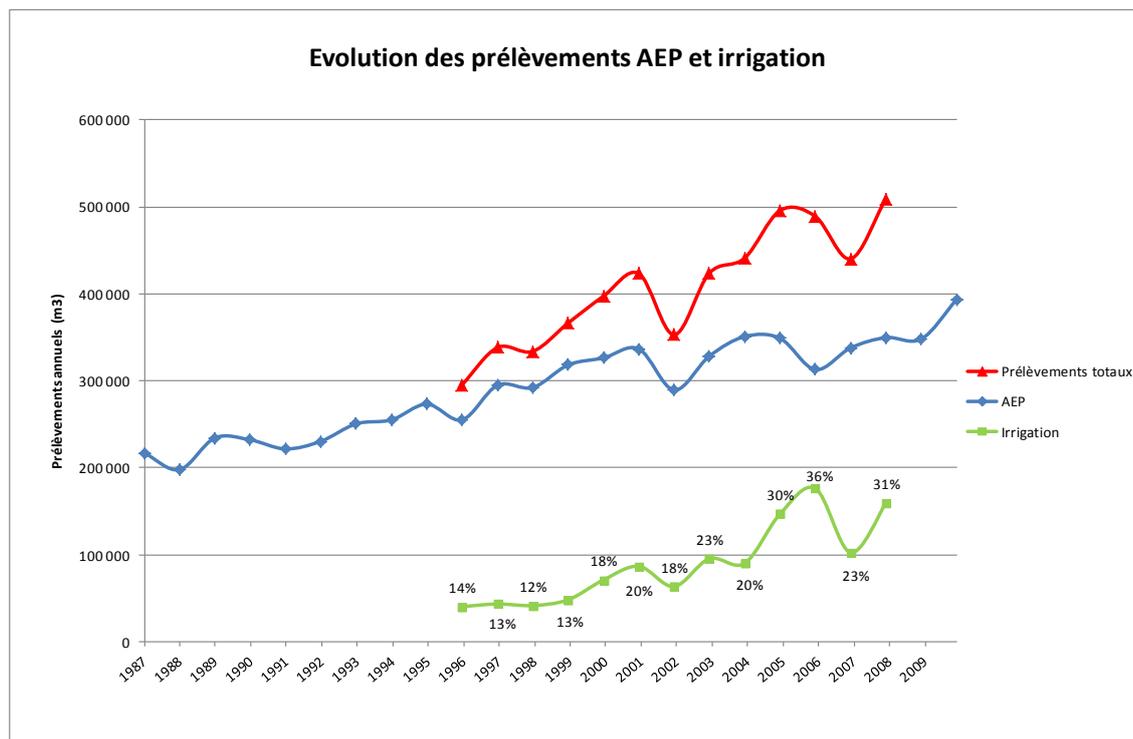


Illustration 11 : évolution des prélèvements dans le tuffeau du bassin de Neuillé et proportion des prélèvements agricoles par rapport aux prélèvements totaux.

Le piézomètre 04558X0072 de Neuillé, qui capte le tuffeau, enregistre une baisse de la piézométrie très sensible depuis sa réactivation en 2004, et visible – bien que moins marquée – sur la période 1992-1999 (le suivi du point a été interrompu de 1999 à 2004). On a cherché la cause de cette chute de piézométrie du côté du niveau de prélèvements (Illustration 12) et du côté de la recharge (Illustration 13).

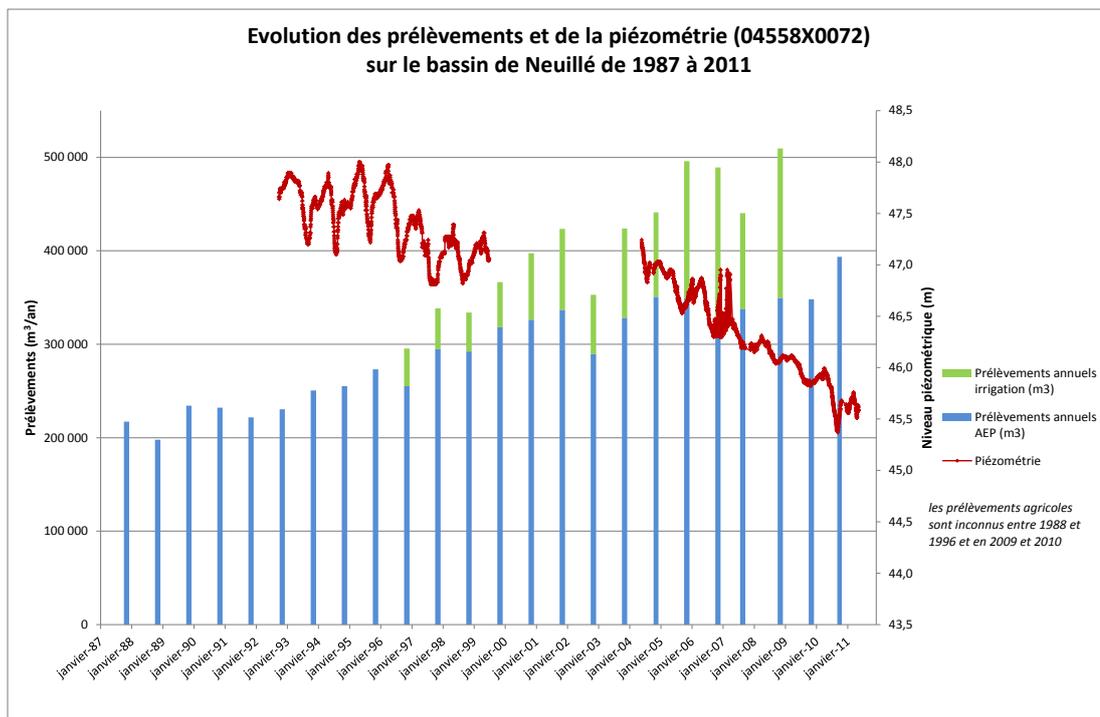


Illustration 12 : comparaison des prélèvements et de la piézométrie à Neuillé entre 1992 et 2011.

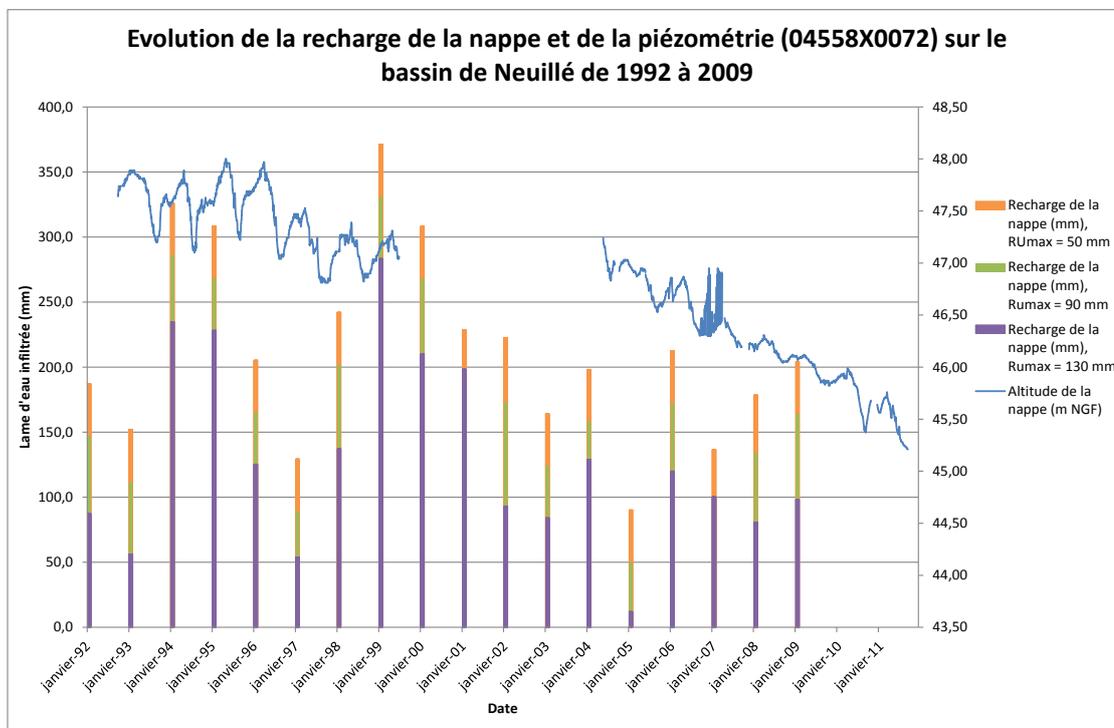


Illustration 13 : comparaison de la recharge de la nappe et de la piézométrie.

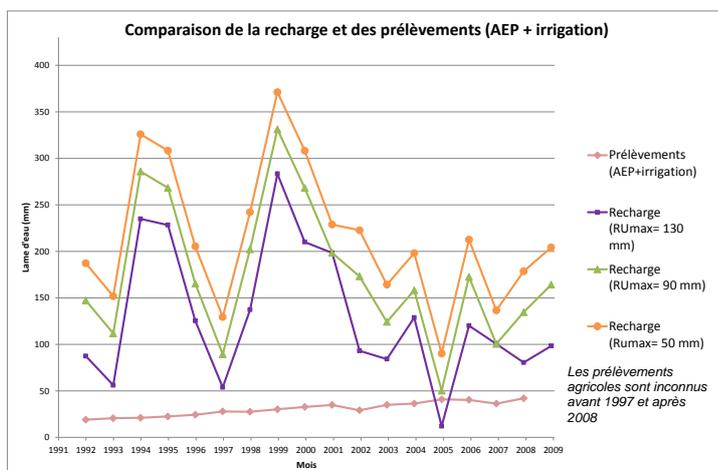


Illustration 14 : comparaison de la recharge et des prélèvements sur le bassin de Neuillé.

L'illustration 13 montre que la recharge de l'aquifère sur le bassin de Neuillé est orienté à la baisse sur la décennie 1999-2009. En effet à Neuillé, la moyenne des précipitations mensuelles hivernales des dernières années est inférieure à la moyenne des précipitations mensuelles hivernales de la décennie précédente, et des normales mensuelles hivernales 1971-2010 (Illustration 15 et Tableau 6).

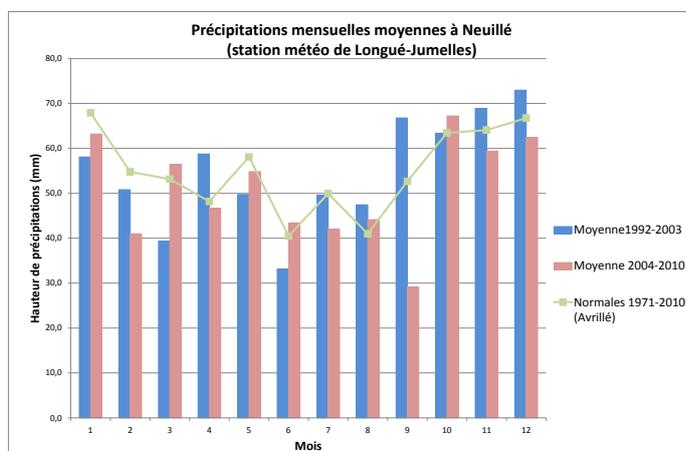


Illustration 15 : la moyenne des pluies mensuelles hivernales de la période 2004-2010 est inférieure à celle de la décennie précédente.

Année	Précipitations hivernales (de novembre à février) en mm	Recharge annuelle en mm
Moyenne 1992-2003	251	197
Moyenne 2004-2010	226	130
Moyenne 1971-2010 (Avrillé)	254	<i>pas de données</i>

Tableau 6 : comparaison des précipitations hivernales.

Ces dernières années, le manque à gagner moyen est de 28 mm de précipitations brutes pendant la période de recharge par rapport à la normale calculée sur la période 1971-2010. En première approximation, en faisant l'hypothèse que la recharge annuelle de la période 1971-2010 est comparable à celle de la période 1992-2003 (les précipitations brutes sont très proches), le manque à gagner sur la recharge annuelle entre 2004 et 2010 est de l'ordre de 70 mm. Les prélèvements quant à eux avoisinent les 40 mm. Les deux phénomènes représentent une lame d'eau de près de 110 mm, pour une recharge annuelle de 130 mm en moyenne sur la période 2004-2010. Cela explique sans doute le déséquilibre piézométrique observé à partir de 2004 sur la chronique du piézomètre 04558X0072.

En définitive, il est hasardeux de conclure que le niveau de prélèvements est à lui seul à l'origine de la baisse de la piézométrie. D'une part, les prélèvements connus ne représentent qu'une partie de la recharge (en moyenne de 20 à 50 % selon que l'on calcule avec une R_{Umax} de 50 à 130 mm, voir Tableau 2 à Tableau 4 et Illustration 14). D'autre part l'illustration 13 montre que sur la période 2000-2010 la recharge de l'aquifère a eu tendance à diminuer. C'est donc probablement l'effet cumulé de l'augmentation des prélèvements et de la diminution de la recharge qui explique la chute de piézométrie enregistrée à Neuillé.

L'utilisation du code TEMPO pour modéliser la piézométrie à Neuillé n'a pas porté ses fruits, notamment en raison de l'absence de chronique hydrométrique sur le bassin. La mise en place d'une station de jaugeage sur la Fontaine Suzon à l'exutoire du BV a donc toute son importance. L'Agence de l'Eau Loire-Bretagne a indiqué lors de la réunion du comité de pilotage de l'étude de juillet 2011 qu'elle pourrait participer financièrement à cette mise en place.

5. Conclusion

Les campagnes piézométriques de l'automne 2009 et du printemps 2010 ont abouti à l'élaboration de deux cartes piézométriques basses et hautes eaux qui renseignent chacune sur le fonctionnement hydrogéologique du bassin versant.

Les axes de drainage constitués par les vallées humides ou sèches sont bien représentés par les courbes piézométriques, et montrent que la nappe alimente les ruisseaux du secteur (l'Automne et la Fontaine-Suzon.) Le pompage AEP d'Allonnes pourrait être à l'origine d'un rabattement de la nappe tel que nappe et ruisseau sont déconnectés sur une partie du cours de l'Automne, y interdisant la contribution de la nappe au débit du ruisseau. Dans une perspective de mise en œuvre de règles de gestion de la ressource en eau, l'installation d'une station hydrométrique sur le ruisseau la Fontaine-Suzon aurait toute son importance.

Entre octobre 2009 et mars 2010, on calcule grâce à une estimation du battement de la nappe que 2 à 3 millions de mètres cube d'eau souterraine ont été stockés par le tuffeau du Turonien (selon la valeur du coefficient d'emmagasinement retenue pour le calcul, qui surestime le stockage d'eau souterraine). Sur cette période, les pluies efficaces ($P_{\text{brute}} - \text{ETP}$) atteignent 266 mm, et les prélèvements représentent 18 mm ; par un calcul de bilan hydrologique classique, en formulant diverses hypothèses, on obtient une lame d'eau rechargeant la nappe sensiblement inférieure à celle obtenue au moyen du battement entre basses et hautes eaux.

C'est probablement l'effet cumulé de l'augmentation des prélèvements et de la diminution de la recharge qui explique la chute de piézométrie enregistrée à Neuillé. Les volumes prélevés en nappe par les irrigants sont néanmoins partiellement connus (des prélèvements non déclarés existeraient) et il serait intéressant de préciser la connaissance de la pression agricole sur la ressource (et des usages domestiques non déclarés, qui bien que de plus faible importance, sont avérés).

6. Bibliographie

P. Chrétien avec la collaboration de V. Baudouin, A. Frioux, C. Gautron, M. Lair, G. Rodriguez, E. Rouxel et J. Toutain (2010) – Bassin Versant de Neuillé – Interprétation des campagnes piézométriques basses et hautes eaux. Rapport intermédiaire – BRGM/RP-59236-FR, 36 p., 8 ill., 2 ann.

J. Toutain, E. Rouxel avec la collaboration de V. Baudouin V., G. Rodriguez (2009) – Élaboration de règles de gestion volumique de la ressource en eau souterraine – Bassin Versant de Neuillé. Rapport d'avancement – BRGM/RP-57883-FR, 35 p., 14 ill., 2 ann.

P. Chrétien avec la collaboration de V. Sallier (2007) – Picardie – Nappe de la craie – Cartes piézométriques hautes eaux 2001-2002 et moyennes eaux 1960-2007. Rapport final. BRGM/RP-55971-FR, 72 pages, 6 illustrations, 2 annexes.

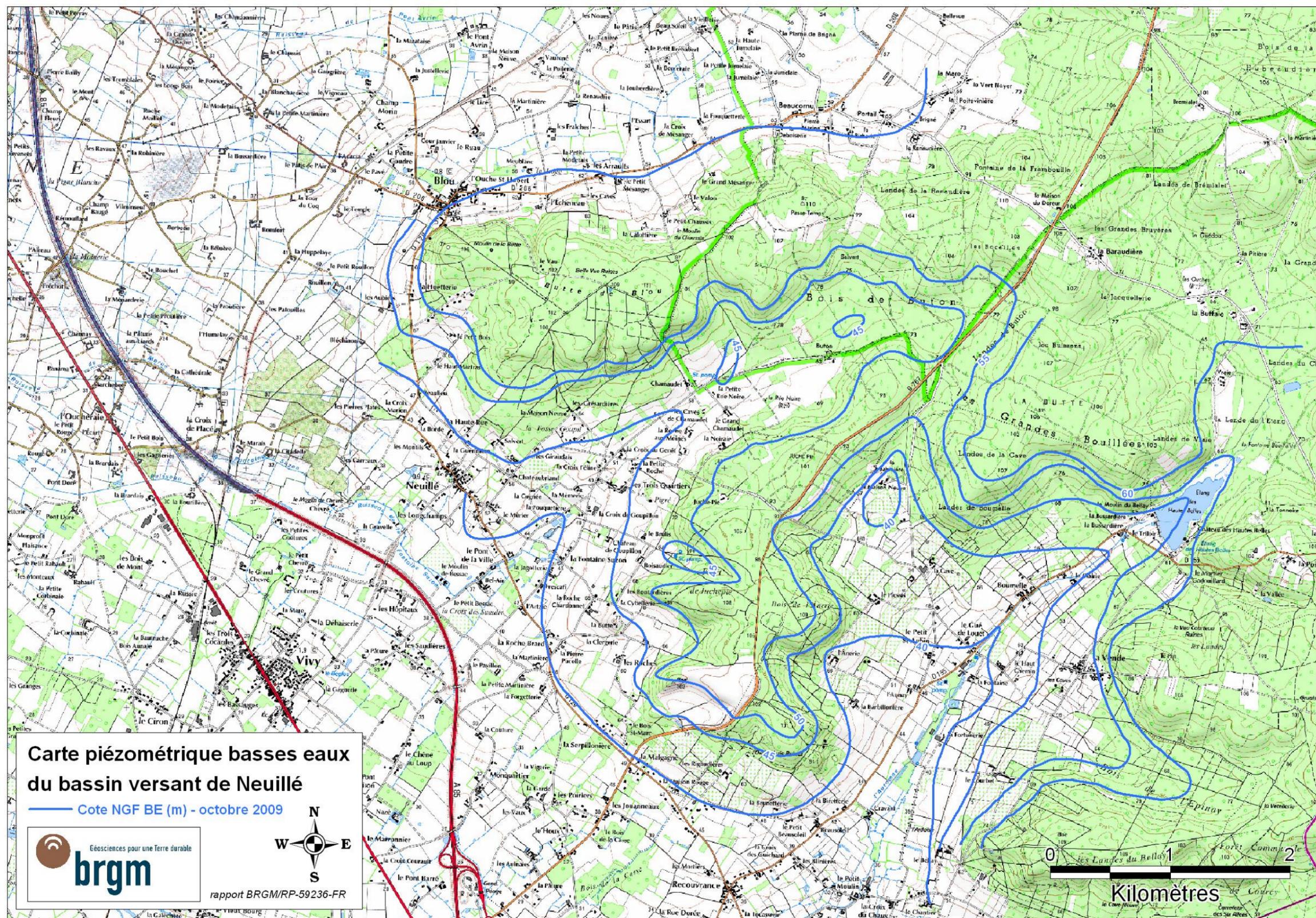
G. Chéné, G. Bastian, C. Brunjail et P. Laurent (1999) – Vieillissement accéléré de blocs de tuffeau en laboratoire sous l'effet de cycles d'imbibition-séchage. Matériaux et Constructions, Vol. 32, Août-Septembre 1999, pp 525-532.

D. Dessandier (1995) – Étude du milieu poreux et des propriétés de transfert des fluides du tuffeau blanc de Touraine. Documents du BRGM 245. Éditions BRGM.

Projet d'emprunt sur les sites des Roches à Neuillé (1993) – Définition des écoulements souterrains et vulnérabilité de la nappe. BRGM/RR-37582-FR

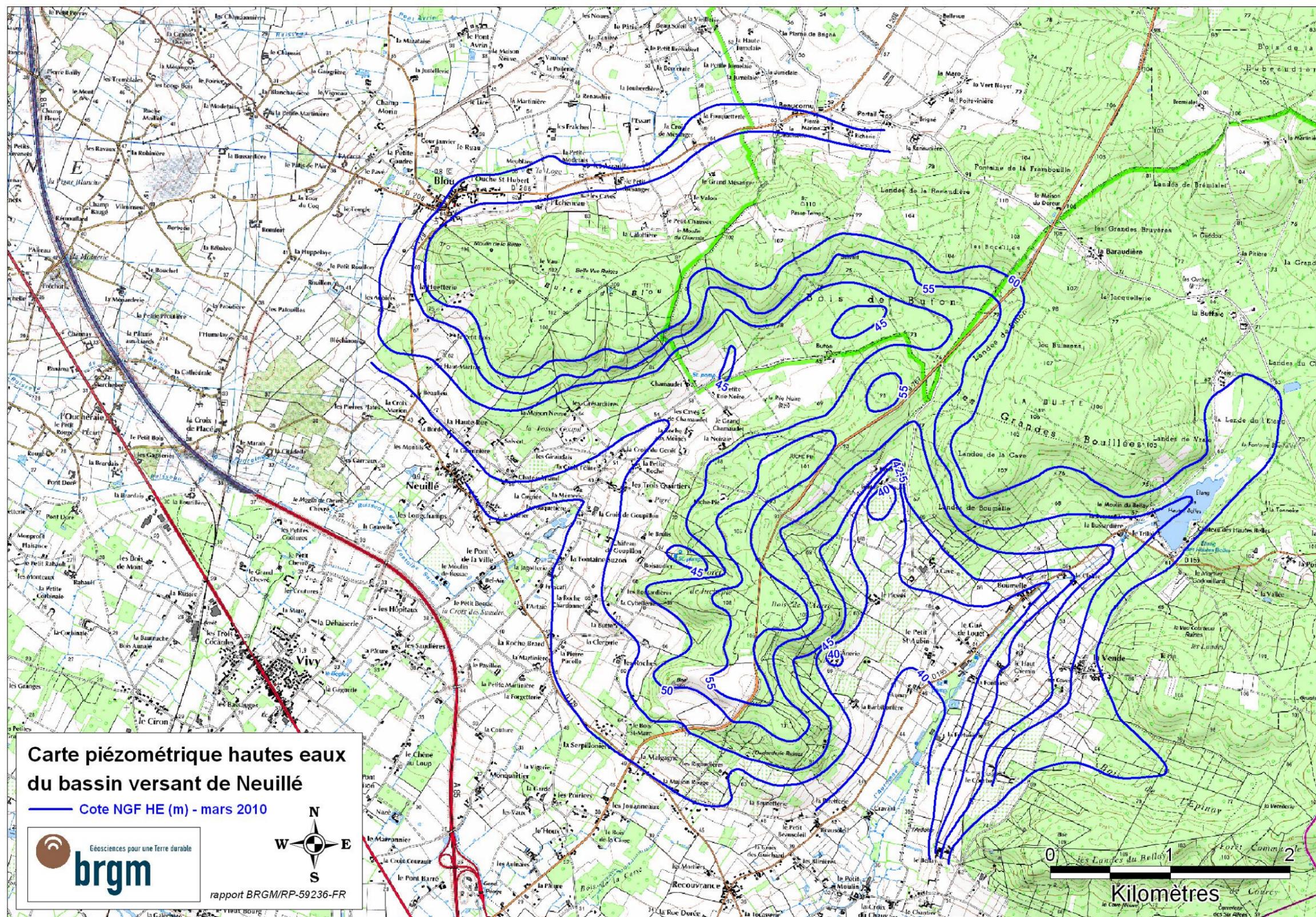
Annexe 1

Carte piézométrique basses eaux dans le secteur de Neuillé



Annexe 2

Carte piézométrique hautes eaux dans le secteur de Neuillé





Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Pays-de-la-Loire

1 rue des Saumonières
BP 92 342

44323 Nantes cedex
Tél. : 02 51 86 01 51