



HAL
open science

Caractérisation des fonctionnements hydrologique et hydrogéologique du bassin de l'Orgeval

Nicolas Flipo, F. Rejiba, B. Kurtulus, Julien Tournebize, Gaëlle Tallec, G. G. Vilain, Josette Garnier, Patrick Ansart, M. Lotteau

► **To cite this version:**

Nicolas Flipo, F. Rejiba, B. Kurtulus, Julien Tournebize, Gaëlle Tallec, et al.. Caractérisation des fonctionnements hydrologique et hydrogéologique du bassin de l'Orgeval. [Rapport de recherche] irstea. 2009, pp.14. hal-02599666

HAL Id: hal-02599666

<https://hal.inrae.fr/hal-02599666v1>

Submitted on 16 May 2020

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

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

Caractérisation des fonctionnements hydrologique et hydrogéologique du bassin de l'Orgeval

Nicolas Flipo^{1,*}, Fayçal Rejiba², Bedri Kurtulus^{1,4}, Julien Tournebize³, Gaëlle Tallec³, Guillaume Vilain², Josette Garnier², Patrick Ansart³, Marc Lotteau¹

¹ Centre de Géosciences, Mines ParisTech, UMR 7619 Sisyphe, 35 rue Saint-Honoré, 77 305 Fontainebleau

² UMR 7619 Sisyphe, UPMC, BP 105, Tour 56-55, Etage 4, 4 Place Jussieu, 75005 Paris

³ Cemagref, Unité de Recherche « Hydrosystèmes et Bioprocédés » Parc de Tourvoie BP 44, 92163 Antony Cedex

⁴ Mugla University, Geological Engineering Department, 48000 Kotekli Mugla, Turkey

* Nicolas.Flipo@mines-paristech.fr

1 Introduction

La contamination azotée élevée des aquifères et des rivières du bassin de la Seine a conduit le PIREN SEINE à étudier l'origine, le transfert, et le devenir des flux d'azote d'origine agricole. A cet effet, plusieurs actions ont été entreprises.

Tout d'abord un vaste travail d'enquêtes a été mené par l'INRA afin de renseigner les pratiques agricoles et les itinéraires techniques à l'échelle du bassin (Benoît et al. 2000; Mignolet et al. 2004; Mignolet et al. 2007). Les résultats de ces enquêtes ont ensuite été dépouillés et rendus utilisables par le modèle STICS (Brisson et al. 1998), qui simule à l'échelle d'une colonne de sol les flux de nitrates infiltrés à la base de la zone racinaire. Une base de données rassemblant l'ensemble de ces éléments a été constituée.

Parallèlement à ce travail, une modélisation spatialisée a été mise en place à l'échelle du bassin de la Seine (Gomez 2002; Gomez et al. 2003; Ledoux et al. 2007). Cette modélisation basée sur une régionalisation du modèle STICS, couplée avec la représentation explicite des aquifères, a permis de mieux caractériser le transfert des pollutions azotées sur le long terme (30 ans). Les deux projets ont été menés en étroite relation.

L'étude du potentiel dénitrifiant des zones riveraines a été menée de concert avec les deux actions précédentes. Cette approche, basée sur des méthodes isotopiques, a permis de mieux comprendre l'effet de la dénitrification sur l'enrichissement en ¹⁵N des nitrates de la colonne d'eau (Sebilo 2003; Sebilo et al. 2003). Elle a aussi permis de montrer le faible potentiel dénitrifiant des aquifères tertiaires et d'établir des bilans d'azote à l'échelle du bassin de la Seine (Billen et Garnier 1999) jusque dans l'estuaire (Billen et al. 2001).

Ces trois approches ont été menées sur de grandes extensions spatiales. Afin de mieux comprendre les transferts et transformations de l'azote dans le milieu naturel, un changement d'échelle a été

effectué afin de s'intéresser plus spécifiquement au bassin du Grand Morin, dont les pratiques agricoles sont représentatives de celles du plateau briard. Pour ce faire la plate-forme de modélisation CAWAQS (CATCHment WAter Quality Simulator) a été développée (Flipo 2005; Flipo et al. 2007; Flipo et al. 2007).

Suite à ces travaux, le PIREN SEINE s'intéresse aujourd'hui à la production de gaz à effet de serre et notamment à la production de N_2O . A cet effet des piézomètres ont été installés sur le bassin versant de l'Orgeval par la FIRE (Fédération Ile-de-France de Recherche en environnement). L'objet de cette étude est de suivre l'évolution des teneurs en nitrates et N_2O le long d'un gradient plateau agricole - zone riparienne - rivière (Vilain et al. 2008; Vilain et al. 2009). Afin d'être à même de simuler les flux d'azote, nous avons décidé de raffiner, grâce à des campagnes de terrain, le modèle hydrologique/hydrogéologique couplé de l'Orgeval. A cet effet, des campagnes de prospection géophysique et hydrogéologique ont été menées en 2009. Tout d'abord nous présenterons la caractérisation du domaine souterrain obtenue grâce aux campagnes géophysiques. Dans un second temps, nous présenterons deux cartes piézométriques caractéristiques des hautes et basses eaux 2009 interpolées à partir de deux campagnes snapshot.

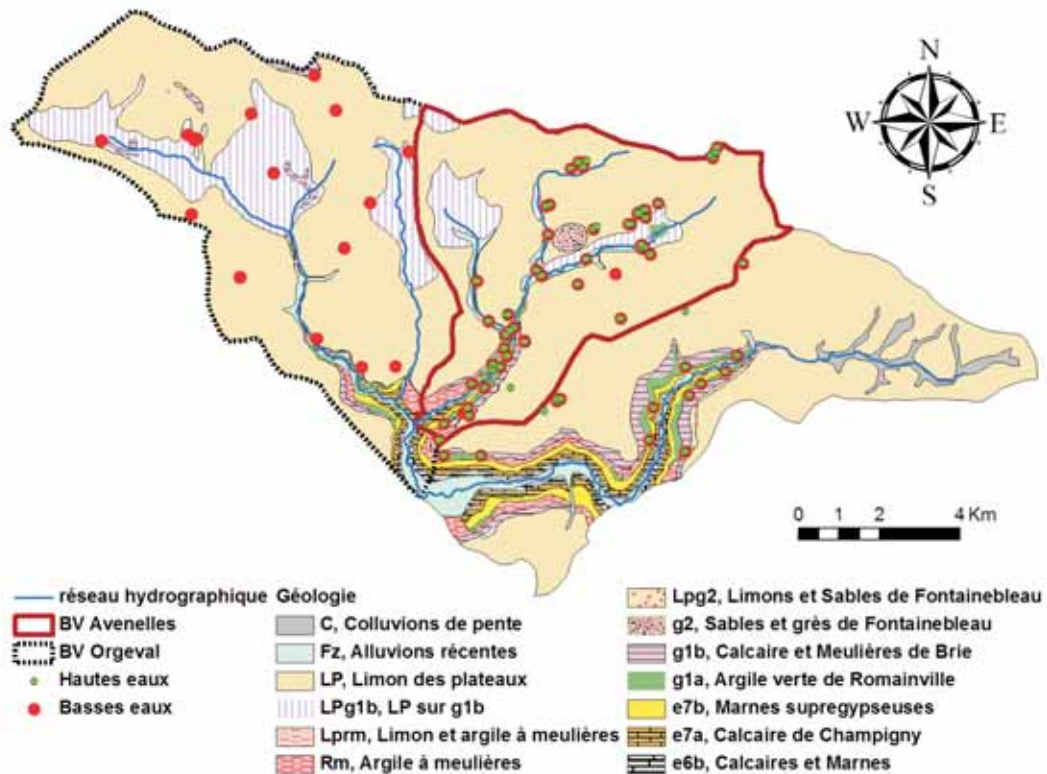


Figure 1: Carte géologique de l'Orgeval

2 Le bassin de l'Orgeval

Le bassin versant de l'Orgeval fait partie d'un Observatoire de Recherche en Environnement (ORE) géré par le GIS ORACLE (<http://gisoracle.cemagref.fr>). Le site est échantillonné, en termes de mesure du débit, par le Cemagref depuis 1962. Il est aussi un site expérimental du PIREN SEINE, de la FIRE (Fédération Ile-de-France de Recherche en Environnement).

Période	Système	Etage stratigraphique	Lithologie dominante	Niveaux aquifères
Quaternaire			Alluvions	Aquifères alluviaux
Tertiaire	Oligocène	Aquitanién	Calcaire de Beauce	Calcaires de Beauce et des sables de Fontainebleau
		Stampien	Sables de Fontainebleau Calcaire de Brie Marnes vertes	
	Eocène supérieur	Bartonien	Marnes supragypseuses Calcaires de Champigny Calcaire de St. Ouen Sables de Beauchamp	Calcaires de Champigny
	Eoc. Moyen	Lutétien	Calcaire gossier	Sables du Soissonnais et calcaire grossier
	Eoc. Inférieur	Yprésien	Sables de Cuise Sables du Soissonnais Argile plastique	
	Paléocène	Thanétien Dano-Montien	Sables de Bracheux Calcaires, marnes	
Secondaire	Crétacé sup.	Sénonien Turonien Cénomanién	Craie	Nappes de la Craie
		Albien Aptien à Néocomien	Argiles du Gault Sables, argiles Argiles, sables	Albien Néocomien
	Jurassique sup.	Portlandien Kiméridgien Callovo-Oxfordien	Calcaires sup. Marnes Calcaires récifaux	Portlandien Lusitanien
		Bathonien Bajocien Aalénien	Calcaires, marnes	Dogger
	Jurassique inf. (Lias)	Toarcien Domérien Pliensbachien Sinémurien Hettangien	Argiles, marnes Calcaires gréseux Marnes Calcaires compacts Calcaires marneux	Lias
		Trias	Argiles bariolées Grès de base	
	Primaire	Permien Carbonifère Dévonien		Grès, argiles, conglomérats Schistes, calcaires Schistes, calcaires

Table 1: Cadre lithostratigraphique du bassin de Paris

Le bassin versant de l'Orgeval (Figure 1, dont l'exutoire est situé à environ 70 km à l'est de Paris, a une superficie de 104 km². L'Orgeval est affecté par un climat océanique tempéré. La température moyenne est d'environ 10°C, avec une moyenne mensuelle, minimale en hiver de 4°C et maximale en été de 19°C. La pluviométrie moyenne annuelle du bassin est de 700mm.

Le bassin versant du Grand Morin s'inscrit dans la partie est des formations tertiaires du bassin de Paris (Tableau 1, d'après AESN (1974), Wei (1990)). Le substratum tertiaire est recouvert de dépôts éoliens quaternaires. Cependant, le plateau de Brie est une surface d'érosion qui porte une formation

superficielle spécifique constituée par des argiles de décalcification et des accidents siliceux, l'argile à meulières de Brie.

La structure géologique en feuillets (Figure 1) du bassin date de l'Ère tertiaire et est constituée de deux grands ensembles : l'Oligocène (couche supérieure) et l'Eocène supérieur (couche inférieure).

L'Oligocène est constitué des sables de Fontainebleau (Stampien supérieur), des calcaires et meulières de Brie (Stampien inférieur), et des argiles et marnes vertes (Stampien inférieur). Les sables de Fontainebleau ne s'observent qu'aux alentours de la butte témoin de Doue. Le calcaire de Brie constitue la plate-forme structurale du plateau. La base des formations stampiennes est formée de niveaux tendres et marneux (argiles vertes). La nappe des calcaires de Brie constitue un aquifère libre et perché dont le mur est constitué par des argiles vertes quasiment imperméables Mégnien (1979). Cette nappe est alimentée par la percolation des eaux de pluie à travers les formations superficielles quaternaires limoneuses. En période de hautes eaux, la surface piézométrique atteint les limons. Ces derniers sont saisonnièrement gorgés d'eau, ce qui a incité à une large utilisation du drainage agricole enterré.

L'Eocène supérieur comprend un nombre important de formations. Il s'agit des marnes supragypseuses (jusqu'à 16 m d'épaisseur), des calcaires de Champigny (épaisseur supérieure à 20 m au centre du bassin) et des marnes infragypseuses du Ludien, du calcaire de St. Ouen (10 à 20 m d'épaisseur) et des sables de Beauchamp (épaisseur de l'ordre de 20 m seulement à l'ouest du bassin), rattachés respectivement au Bartonien supérieur et inférieur. Les calcaires du Champigny sont marqués, latéralement et longitudinalement, par une variabilité considérable de faciès.

3 Prospection géophysique

3.1 Principe de la mesure

La prospection géophysique réalisée sur le transect plateau - fond de vallée s'est basée sur la méthode de "résistivité électrique en courant continu".

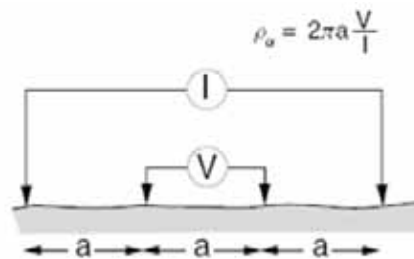


Figure 2: dispositif de mesure de résistivité électrique à 4 électrodes.

L'objectif de cette méthode est de déterminer la résistivité électrique du terrain naturel. Le principe de mesure consiste à injecter un courant I à l'aide de deux électrodes (métalliques) d'injection et de mesurer la différence de potentiel à l'aide d'une autre paire d'électrodes Figure 2. Le rapport entre la différence de potentiel et le courant d'injection permet d'obtenir la résistance électrique (Ω). La valeur de résistance est ensuite convertie en résistivité apparente ($\Omega.m$) grâce à un coefficient dit "géométrique" qui dépend de la géométrie du dispositif (i.e la position à la surface des électrodes).

Cependant, la capacité d'un matériau naturel à conduire ou résister au passage du courant électrique (Figure 3) dépend essentiellement de l'importance de la teneur en argile, et dans une moindre mesure de sa teneur en eau libre. Pour interpréter ces mesures, il convient de prendre en compte le principe d'équivalence vis-à-vis du mesurable géophysique : un terrain très conducteur mais peu épais, donnerait une réponse équivalente à un terrain moins conducteur mais d'épaisseur plus importante. Il est donc indispensable de calibrer les mesures géophysiques par des observations (forages, tranchées), tout en synthétisant un maximum d'*a priori* (géologie, niveau piézométrique, ...).

L'évaluation des valeurs de résistivités dites interprétées nécessitent l'inversion (au sens mathématique) des résistivités apparentes mesurées. C'est une étape indispensable, mais particulièrement délicate en l'absence de données de calage (ce qui est une conséquence du principe d'équivalence).

La mesure de résistivité peut s'effectuer dans le cadre :

1. d'une cartographie de résistivités affectées à une profondeur donnée $\rho(x, y)$;
2. d'un sondage (les électrodes d'injection et de mesure de potentiel sont éloignées les unes des autres le long d'un profil en maintenant un point milieu commun). Ce qui permet d'avoir une description verticale des variations de résistivité $\rho(z)$, à une position (x, y) donnée ;
3. d'un panneau électrique Figure 4, afin d'obtenir le long d'un segment une section en 2D, $\rho(x, z)$.

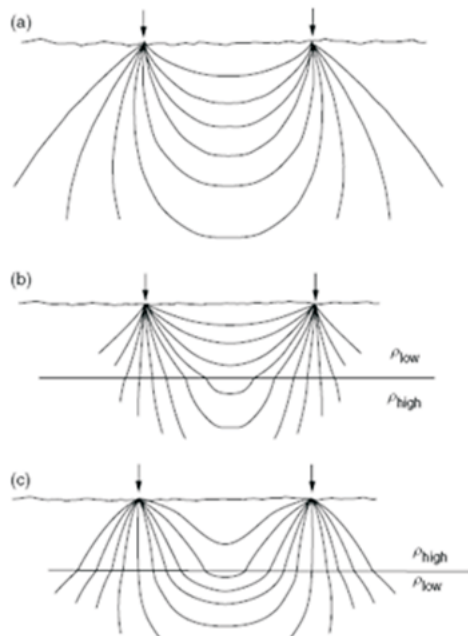


Figure 3: lignes de courants se développant dans un ou des milieux de résistivités distinctes. Les lignes de courants se concentrent dans les milieux les plus conducteurs électriquement.

3.2 Les campagnes de mesure

Un des objectifs de la prospection électrique effectuée sur l'Orgeval est de caractériser la structure de subsurface du transect des Avenelles (Figure 5) qui fait l'objet d'une intense campagne de mesures

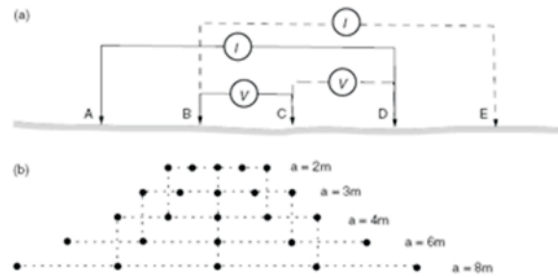


Figure 4: correspondance entre position en surface des électrodes et affectations des mesures de résistivités apparentes dans le cadre de mise en oeuvre d'un panneau électrique.

des flux de nitrates et de N_2O associés (Vilain et al. 2008; Vilain et al. 2009). Pour cela deux types de dispositifs ont été mis en oeuvre : trois sondages électriques au niveau des piézomètres 1, 2, et 3 (P1, P2, P3, respectivement), et deux panneaux électriques (cf. Pa1 et Pa2 Figure 5).

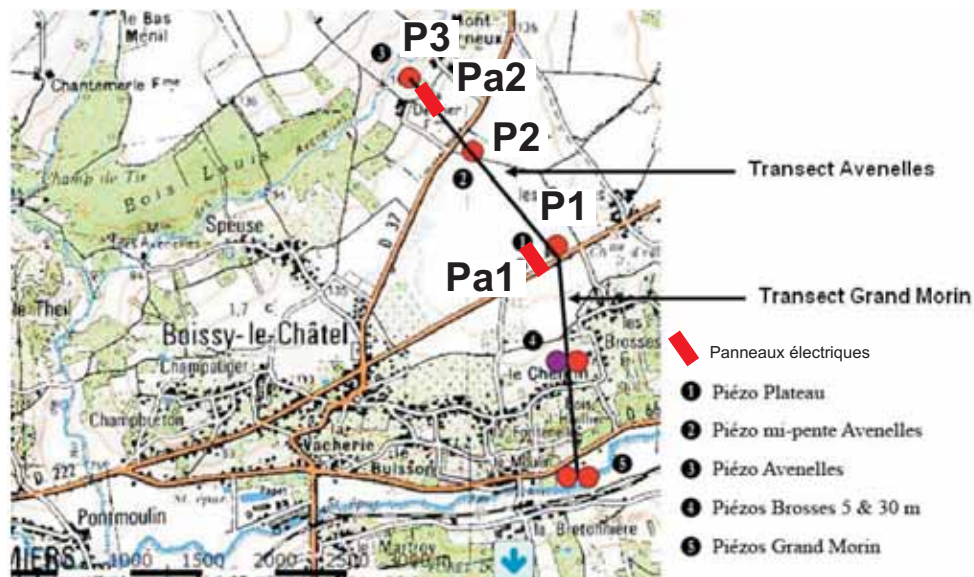


Figure 5: Localisation des transects piézométriques de la FIRE (FR 3020). Les campagnes géophysiques ont été réalisées au niveau du transect Avenelles.

3.3 Résultats de la prospection électrique sur le site d'Orgeval

L'ensemble des résistivités interprétées des sondages et des panneaux sont généralement inférieures à $80 \Omega.m$, ce qui est assez conducteur électriquement, et caractéristique de milieux à forte teneur en argile. Les contrastes entre les différentes formations sont suffisamment importants pour les discriminer.

Les données du forage au niveau du piézomètre P1 (Table 2) ont permis de calibrer la signature, en termes de résistivités, des différents horizons rencontrés lors du sondage P1 (Figure 6). Cette description est confirmée par le panneau électrique de 200m de long effectué à proximité (Pa1, Figure

Nature de la formation	Profondeur
Limons	0 - 5.20 m
Limons avec quelques blocs de calcaires	5.20 - 5.70 m
Blocs de calcaires beige, blanc (traces fossiles) - Brie	5.70 - 10 m
Argiles vertes avec inclusions calcaires	10 - 11.50 m
Argiles vertes homogènes	11.50 - 13 m
Sables	13 - 13.50 m
Argiles vertes homogènes	13.50 - 14.50 m
Transition argiles - marnes avec inclusions calcaires	14.50 - 16.70 m
Marnes beiges, blanches	17.70 - 19.20 m
Marnes grises	19.20 - 20 m
Marnes plus foncées (gris-bleu)	? - 26.50 m
Calcaire marneux avec inculsion de silex à 33.50 m	28.40 - 33.90 m
Calcaire blanc - Champigny	33.90 - 40 m

Table 2: Données de forage au niveau de P1

7). De plus, ce panneau permet d'établir l'absence de pendage subhorizontal des différents horizons dans cette zone. L'horizon superficiel de type limoneux a une épaisseur estimée de 5m, mais aucune variation de résistivités à l'échelle métrique n'a pu permettre pour l'instant de détecter le niveau piézométrique (situé à environ 3m dans ce secteur).

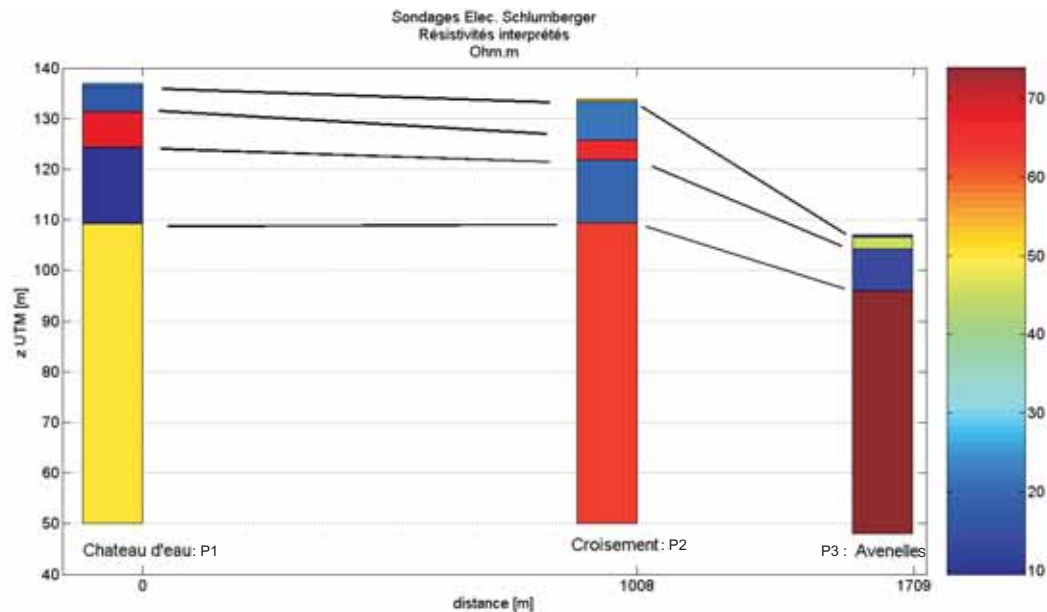


Figure 6: Interprétation des sondages électriques

Les deux autres sondages (Figure 6) ont été effectués au niveau de la départementale D37 (P2, Figure 5), et en bordure du ru des Avenelles (P3). Ils permettent de caractériser le prolongement des horizons identifiés précédemment. Le deuxième panneau électrique Figure 7 effectué à mi chemin

entre les deux derniers sondages (entre la D37 et les Avenelles), montrent clairement, que l'horizon résistant, assimilé aux calcaires de Brie, n'est plus aussi continu, tout en se rapprochant de la surface. Il est par ailleurs possible de suivre très précisément le toit du calcaire de Champigny (situé à une profondeur accessible) ainsi que la puissance de l'horizon conducteur le surplombant (argiles vertes et marnes supragypseuses). Le dernier sondage (P3), en corrélation avec une variation topographique plus marquée, indique que les limons de surface semblent se mélanger avec les calcaires de Brie pour former un horizon superficiel d'environ 2m d'épaisseur et de résistivité d'environ $50 \Omega.m$.

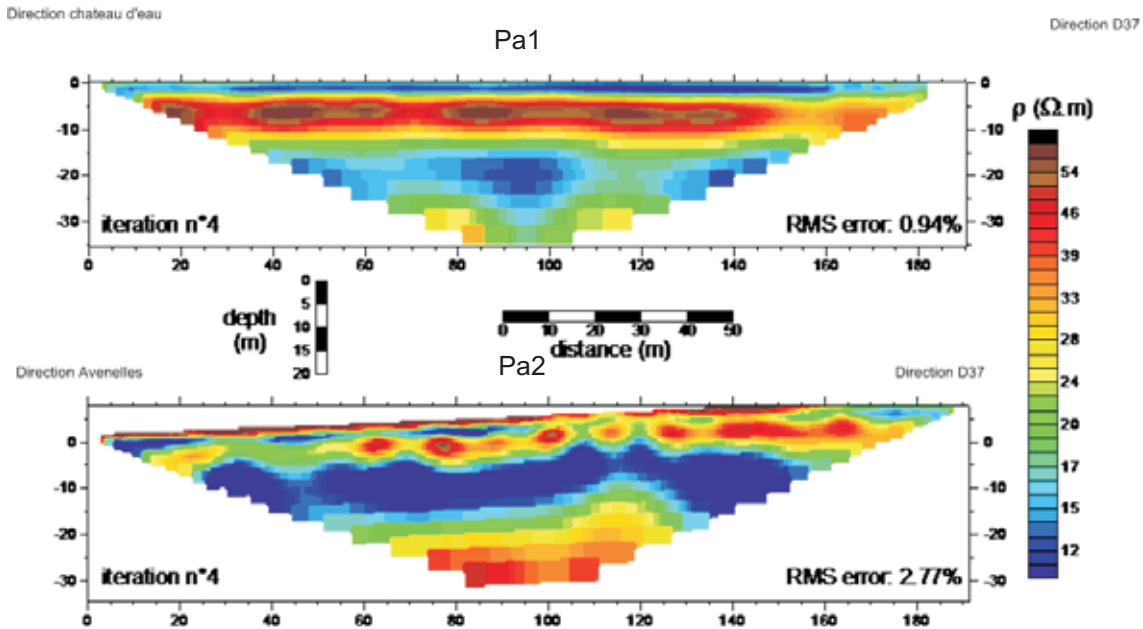


Figure 7: Panneaux électriques type wenner-schlumberger (écartement entre électrodes de 2m). (Haut) situé près du château d'eau (Pa1). (Bas) entre les Avenelles et la D37 (Pa2)

L'ensemble de ces mesures permet alors d'établir un schéma conceptuel de synthèse (Figure 8) qui caractérise les formations de subsurface du transect des Avenelles. Il est intéressant de remarquer que le mélange des calcaires de Brie avec les limons des plateaux correspond à un exutoire des flux hydriques de surface. Ceci a une conséquence notable sur les teneurs en eau du sol et par conséquent sur les flux biogéochimiques associés.

4 Caractérisation de la piézométrie du bassin des Avenelles

Afin de caractériser plus précisément l'hydrogéologie en hautes et basses eaux de l'Orgeval, deux campagnes snapshot ont été réalisées les 16 avril et 29 septembre 2009. L'ensemble des mesures obtenues ont ensuite été interpolées. Le jeu de données pour la campagne hautes eaux comporte 70 valeurs, alors que celui de la campagne basses eaux en comporte 77 car des puits situés à l'ouest du bassin de l'Orgeval ont aussi été échantillonnés (Figure 1).

Plusieurs techniques d'interpolation ont été testées: ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy based Inference System), le krigeage ordinaire (OK) et le krigeage utilisant un modèle numérique de terrain

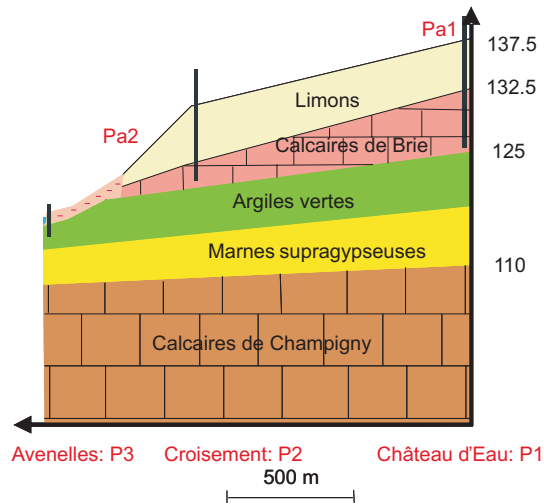


Figure 8: Schéma de synthèse de la structure de subsurface du transect Avenelles

(MNT) en dérive externe (KED) (Kurtulus et al. 2009b; Kurtulus et al. 2009a). Dans ce rapport nous ne présenterons que les résultats obtenus avec les deux interpolateurs les plus performants: ANFIS utilisant des fonctions membre de type triangulaire et le KED.

4.1 Les interpolateurs

ANFIS est une technique d'interpolation qui se base sur les concepts d'ensemble à limite floue (Zadeh 1965; Pratihari 2008) et les réseaux de neurones (Abrahart et al. 2004). Un intérêt majeur de cette méthode est que la mesure n'est pas considérée comme absolue mais entachée d'une erreur inconnue. La structure ANFIS comporte une boucle de rétroaction qui permet au modèle de caler automatiquement les paramètres de ses noeuds de calcul en fonction d'un vecteur objectif (Figure 9). Pour plus d'information sur la méthode, consulter Jang (1993), Jang (1995), Jang (1996), Kurtulus et al. (2009a). Dans le cas présent, les entrées de ANFIS sont les coordonnées cartésiennes des piézomètres ainsi que la côte du sol au droit des piézomètres.

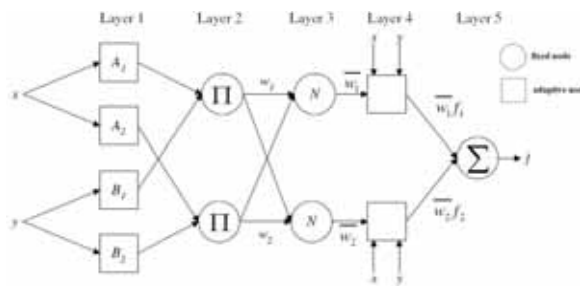


Figure 9: ANFIS architecture for two inputs x, y . Layer 1: generates membership grades. Layer 2: Fuzzy rules. Layer 3: calculates weights of rules named firing strengths. Layer 4: product of the normalized firing strengths. Layer 5: fuzzy results transformed into a traditional output by summation

Le krigeage relève d'une toute autre philosophie basée sur un outil géostatistique, le variogramme, qui permet, pour cette étude, de caractériser spatialement la variabilité de la piézométrie. Dans le cas particulier du KED (Wackernagel 2003), le krigeage est effectué par rapport à une référence¹ qui est ici le MNT. Pour plus d'information sur cette méthode, consulter Chilès et Delfiner (1999), Isaaks et Srivastava (1989). L'analyse des données et le KED ont été réalisés à l'aide du logiciel Isatis (Geovariances 2004).

4.2 Cartes piézométriques

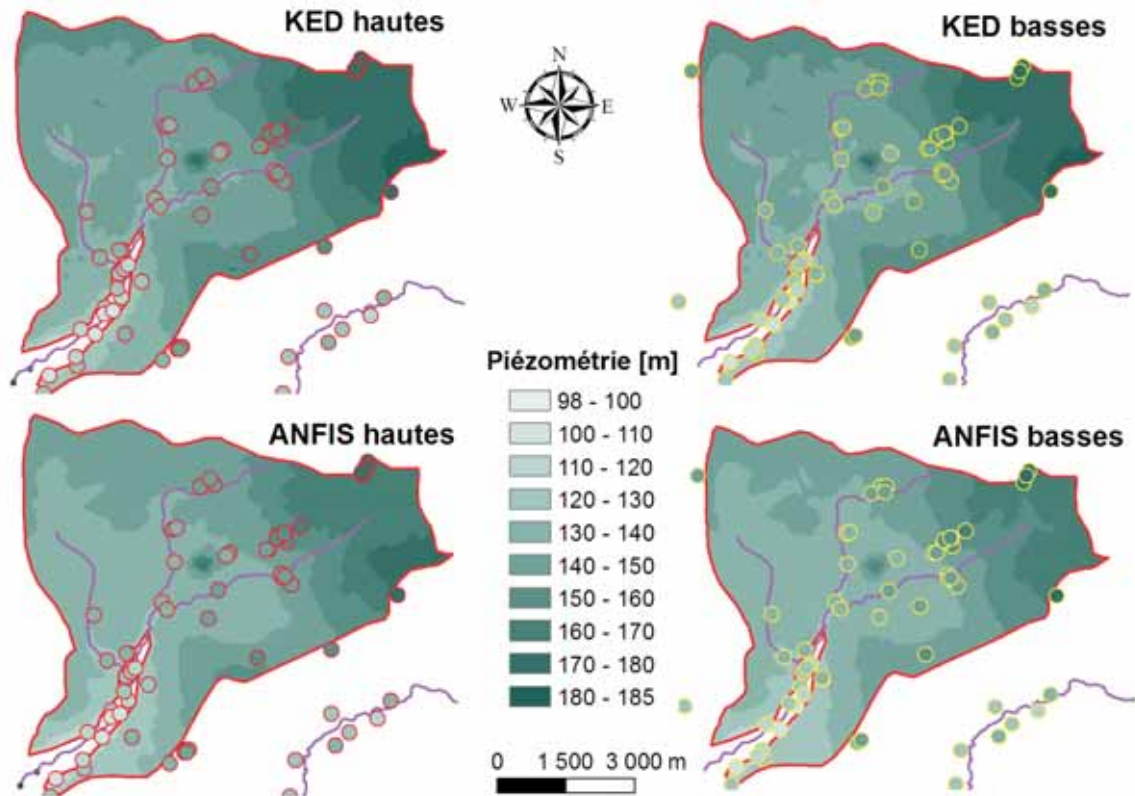


Figure 10: Cartes piézométriques des hautes et basses eaux interpolées par KED et ANFIS

Les interpolations présentent toutes des schémas de drainage cohérents (Figure 10), avec cependant des schémas de drainage plus marqués par les rivières pour ce qui concerne le KED. La cohérence de l'interpolation des piézométries mesurées dans les puits du bassin, qui comporte des puits drainant parfois les limons, parfois les calcaires de Brie, semble confirmer le fait que ces deux formations forment une seule entité hydrogéologique (Mégnyen 1979). Globalement le KED estime des niveaux piézométriques plus élevés que ANFIS. Or le KED est un interpolateur "exact" au sens où il estime les valeurs observées aux points d'observation (dans le cas d'un variogramme sans effet de pépité ce qui

¹dérive externe

est le cas dans la présente étude). La méthode ANFIS, quant à elle, ne respecte pas cette condition (cf. les écarts de classes entre observations et simulations pour ANFIS, Figure 10). Il semble donc que le KED soit un interpolateur plus robuste. Nous avons envisagé d'utiliser les écarts entre interpolations pour identifier des zones de fortes incertitudes sur l'estimation de la piézométrie afin d'implanter de nouveaux piézomètres. Au vu des considérations précédentes sur la méthode ANFIS nous adapterons notre stratégie en nous basant plutôt sur les écarts entre hautes et basses eaux estimées par le KED (Figure 11).

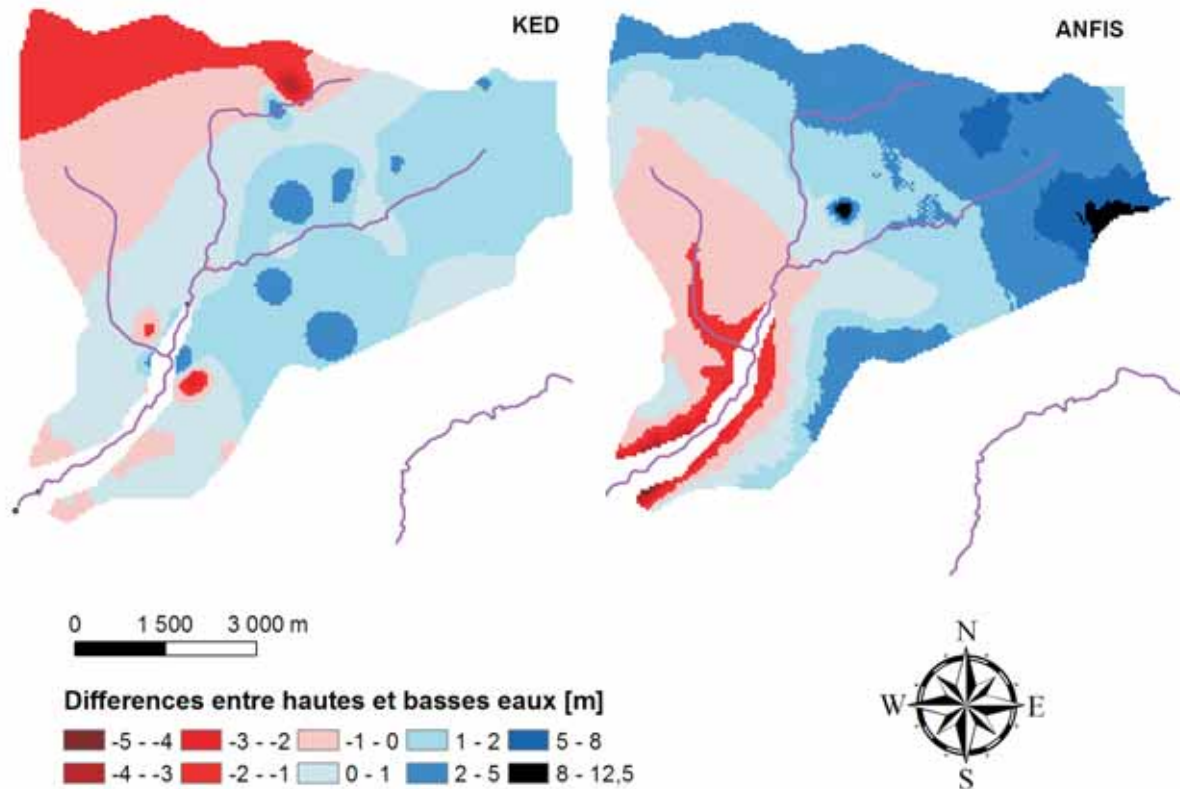


Figure 11: Différences entre les hautes et basses eaux

Avant d'aller plus loin, il convient de noter que toutes les interpolations présentent une anomalie (maxima local) au niveau de la butte témoin de Doue au centre du bassin (Figure 10). Cela est dû au fait que le MNT contraint fortement l'estimation de la piézométrie, ce qui n'est pas le cas dans ce secteur où une couche de sables de Fontainebleau coiffe les calcaires de Brie. Cette anomalie devra être prise en compte dans le futur en estimant une incertitude associée à l'interpolation.

La Figure 11 illustre les écarts d'interpolation entre les hautes et les basses eaux. Les deux interpolateurs mènent à des situations paradoxales où les basses eaux sont estimées comme étant plus hautes que les hautes eaux. Ceci est lié:

- d'une part à l'échantillonnage. En effet, certains puits de la campagne hautes eaux n'étaient

pas accessibles lors de la campagne basses eaux. De plus de nouveaux puits situés à l'ouest du bassin ont été échantillonnés lors de la campagne basses eaux;

- d'autre part à l'erreur d'interpolation elle-même.

Des écarts négatifs entre hautes et basses eaux montrent combien l'interpolation de données ponctuelles de piézométrie est délicate. Pour le cas spécifique du KED deux types d'écarts négatifs se distinguent:

- des écarts locaux de faible amplitude;
- un biais systématique pour les écarts situés dans la frange Nord - Nord-Ouest du bassin.

Les écarts locaux sont liés à l'interpolateur lui-même. En effet, une différence locale importante entre deux points de mesure d'une même campagne engendre, pour le cas de notre variogramme de type puissance, un fort gradient local. Si lors de la seconde campagne, seul un puits est échantillonné, l'interpolateur ne simule pas du tout le même gradient. La première interpolation va générer une bosse et une cuvette locale alors que la seconde, générera un terrain à gradient continu. Dans le pire des cas, la différence des deux mène donc à calculer un maxima et un minima local. Au mieux, nous observons simplement un maxima local.

Par contre, le biais systématique localisé au Nord - Nord-Ouest du bassin a une toute autre origine, à savoir la différence d'échantillonnage. En effet la campagne basses eaux a permis d'échantillonner de nouveaux puits situés à l'ouest du bassin. Ces puits ont été pris en compte pour kriger les basses eaux du bassin des Avenelles. Dans cette zone spécifique, cela permet de réduire l'incertitude liée à l'interpolation. Or dans cette zone, l'incertitude d'interpolation est la plus forte pour les hautes eaux, du fait de l'absence de points de mesure. Il faudra donc attendre la prochaine campagne hautes eaux, lors de laquelle nous échantillonnerons les mêmes puits que pour la dernière campagne basses eaux, afin d'analyser les réelles incohérences d'interpolation dans cette partie du bassin.

5 conclusion

Les campagnes de terrain menées en 2009 ont permis de mieux caractériser la structure de subsurface du transect Avenelles dédié à l'analyse des flux de N_2O , d'une part, et d'aboutir à une vision spatialisée de la piézométrie du bassin, d'autre part. Ces deux actions vont être poursuivies en 2010 afin d'élaborer un modèle hydrologique/hydrogéologique distribué qui permettra d'analyser finement les flux hydriques dans le bassin et notamment d'identifier des zones humides. Ce modèle servira ensuite de base à des modélisations biogéochimiques qui s'intéresseront tout d'abord aux flux d'azote dans l'hydrosystème Orgeval. Dans un avenir plus lointain, le modèle pourra servir de support à la simulation des flux de pesticides.

6 Remerciements

Les auteurs remercient l'ensemble des personnes ayant participé aux nombreuses campagnes de terrain: type snapshot et géophysiques. Cette action de recherche a été co-financée par la FIRE-FR3020 et par l'Institut Carnot MINES.

References

- Abrahart, R., P. Kneale, and L. See (Eds.) (2004). *Neural Networks for hydrological modelling*. A.A. Balkema Publishers.
- AESN (1974). *Les bassins de la Seine et des cours d'eau Normands - Eaux souterraines*, Volume Agence de l'eau Seine-Normandie, Nanterre, tome1, fasc. 4.
- Benoît, M., C. Bornerand, C. Mignolet, E. Bienaimé, R. Cosserat-Mangeot, J.-F. Mari, and J.-M. Trommenschlager (2000). Etude rétrospective des dynamiques agricoles dans le bassin de la Seine depuis les années 70. Technical report, PIREN SEINE.
- Billen, G. and J. Garnier (1999). Nitrogen transfers through the Seine drainage network: a budget based on the application of the riverstrahler model. *Hydrobiologia* 410, 139–150.
- Billen, G., J. Garnier, A. Ficht, and C. Cun (2001). Ecological modeling of the 50 last years of anthropogenic impact in the seine estuary. *Estuaries* 24(6), 977–993.
- Brisson, N., B. Mary, D. Ripoché, M. Jeuffroy, F. Ruget, B. Nicoulaud, P. Gate, F. Devienne-Barret, R. Antonioletti, C. Durr, G. Richard, N. Beaudoin, S. Recous, X. Tayot, D. Plenet, P. Cellier, J. Machet, J. Meynard, and R. Delécolle (1998). Stics : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. 1- theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311–346.
- Chilès, J.-P. and P. Delfiner (1999). *Geostatistics : modeling spatial uncertainty*. Wiley, New-York.
- Flipo, N. (2005). *Modélisation intégrée des transferts d'azote dans les aquifères et les rivières : Application au bassin du Grand Morin*. Ph. D. thesis, Centre d'Informatique Géologique.
- Flipo, N., S. Even, M. Poulin, S. Théry, and E. Ledoux (2007). Modelling nitrate fluxes at the catchment scale using the integrated tool CAWAQS. *Sci Total Environ* 375, 69–79.
- Flipo, N., N. Jeannée, M. Poulin, S. Even, and E. Ledoux (2007). Assessment of nitrate pollution in the Grand Morin aquifers (France): combined use of geostatistics and physically-based modeling. *Environ Pollut* 146(1), 241–256.
- Geovariances (2004). *Isatis Software Manual, 5th Edition*. Geovariances and Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. 710 p.
- Gomez, E. (2002). *Modélisation intégrée du transfert de nitrate à l'échelle régionale dans un système hydrologique. Application au bassin de la Seine*. Ph. D. thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Centre d'Informatique Géologique.
- Gomez, E., E. Ledoux, P. Viennot, C. Mignolet, M. Benoît, C. Bornerand, C. Schott, B. Mary, G. Billen, A. Ducharne, and D. Brunstein (2003). Un outil de modélisation intégrée du transfert des nitrates sur un système hydrologique: Application au bassin de la Seine. *La Houille Blanche* 3-2003, 38–45.
- Isaaks, E. and R. Srivastava (1989). *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press. 561 p.
- Jang, J. (1993). ANFIS adaptive-network-based fuzzy inference systems. *IEEE Trans. Systems, Man Cybern* 23(3), 665–685.
- Jang, J. (1995). Neuro-fuzzy modeling and control. *Proceedings of the IEEE* 83 3, 378–406.

- Jang, J. (1996). Input selection for ANFIS learning. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems* 2, 1493–1499.
- Kurtulus, B., N. Flipo, G. Vilain, J. Tournebize, G. Tallec, and P. Goblet (2009a). Assessing the spatial hydraulic head distribution in surface aquifer using different interpolation methods. *J. of Hydrology submitted*.
- Kurtulus, B., N. Flipo, G. Vilain, J. Tournebize, G. Tallec, and P. Goblet (2009b). Comparison of ANFIS and ordinary kriging to assess hydraulic head distribution: the Orgeval case study. In *Proceedings of ICNC, Madeira, Oct 5-7, 2009*.
- Ledoux, E., E. Gomez, J. Monget, C. Viavattene, P. Viennot, A. Ducharne, M. Benoit, C. Mignolet, C. Schott, and B. Mary (2007). Agriculture and groundwater nitrate contamination in the Seine basin. The STICS-MODCOU modelling chain. *Sci Total Environ* 375, 33–47.
- Mégnién, C. (1979). Hydrogéologie du centre du bassin de Paris. Mémoire BRGM.
- Mignolet, C., C. Schott, and M. Benoît (2004). Spatial dynamics of agricultural practices on a basin territory: a retrospective study to implement models simulating nitrate flow. the case of the seine basin. *Agronomie* 24, 219–236.
- Mignolet, C., C. Schott, and M. Benoît (2007). Spatial dynamics of farming practices in the Seine basin: Methods for agronomic approaches on a regional scale. *Sci Total Environ* 375, 13–32.
- Pratihari, D. (2008). *Soft Computing*. Alpha Science International Ltd.
- Sebilo, M. (2003). *Utilisation du traçage isotopique naturel pour caractériser et quantifier les processus de nitrification et de dénitrification à l'échelle du réseau hydrographique de la Seine*. Ph. D. thesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- Sebilo, M., G. Billen, M. Grably, and A. Mariotti (2003). Isotopic composition of nitrate-nitrogen as a marker of riparian and benthic denitrification at the scale of the whole Seine river system. *Biogeochemistry* 63, 35–51.
- Vilain, G., J. Garnier, G. Tallec, and P. Cellier (2009). Emission de N₂O dans le paysage agricole : un continuum plateau-fond de vallée de l'Orgeval. Technical report, PIREN SEINE.
- Vilain, G., J. Garnier, G. Tallec, P. Cellier, and N. Flipo (2008). Flux de N₂O le long d'un continuum parcelle-zone humide-rivière dans le bassin versant de l'Orgeval. Technical report, PIREN SEINE.
- Wackernagel, H. (2003). *Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications*. Springer, Berlin.
- Wei, H. F. (1990). *Modélisation tridimensionnelle du transfert d'eau, de chaleur et de masse dans l'aquifère géothermique du Dogger dans le Bassin de Paris*. Ph. D. thesis, ENSMP.
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control* 8, 338–353.