Stratégie d'échantillonnage des échanges nappe-rivière du bassin agricole de l'Orgeval

Amer Mouhri[1*], Nicolas Flipo[1*], Fayçal Rejiba[2], Chantal de Fouquet[1], Gaëlle Tallec[3], Ludovic Bodet[2], Véronique Durand[4], Anne Jost[2], Roger Guérin[2], Patrick Ansart[3]

[1]Centre de Géosciences, MINES ParisTech, 35 rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau
[2]UMR 7619 Sisyphe, UPMC, 4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 05.
[3]HBAN, Cemagref, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes CS 10030, 92761 Antony Cedex.
[4]Univ Paris-Sud/CNRS, Laboratoire IDES, UMR8148, 91405, Orsay Cedex.
[*]Contact : amer.mouhri@mines-paristech.fr; nicolas.flipo@mines-paristech.fr

1 Introduction

La dynamique des échanges d'eau à l'interface nappe-rivière est complexe et mal comprise. La quantification de ces échanges s'appuie sur des approches interdisciplinaires couplant à des échelles emboîtées hydrologie, géophysique, biogéochimie, et parfois écologie. L'interface nappe-rivière est considérée comme une zone de transition caractérisée par une grande variabilité des processus physiques (liés au transport) et biogéochimiques (dégradation, biodégradation, précipitation, sorption-désorption etc). Cette zone de transition entre la nappe et la rivière est caractérisée par des faibles vitesses d'écoulement tri-dimensionnel. Les écologistes utilisent le terme de zone hyporhéique (ZH) pour la définir (Schwoerbec 1961). Les interactions nappe-rivière sont complexes et se développent de manière diverse suivant les échelles spatiales d'étude. Suivant l'échelle d'observation, les hétérogénéités fonctionnelles peuvent varier du centimètre au mètre (Brunke and Gonser, 1997; Woessner, 2000). Ces échanges complexes varient en fonction du secteur morphologique, de la saison, de l'hydraulique du cours d'eau, de la position relative du niveau de la nappe par rapport à celle du niveau de l'eau en surface, et des caractéristiques physiques de la couche de sédiments du fond du cours d'eau.

Du point de vu conceptuel, une typologie des échanges nappe- rivière peut-être établie suivant deux forçages majeurs : le gradient hydraulique et la structure géologique. Le gradient hydraulique définit la direction des échanges entre la rivière et l'aquifère et la structure géologique définit la capacité de transmettre les flux à travers l'interface. On distingue plusieurs situations :

i) le complexe Rivière-ZH-Aquifère est complètement déconnecté. Dans ce cas, le cours d'eau s'écoule sur substrat imperméable caractérisé par une absence de la ZH et des échanges de flux.

ii) le complexe Rivière-ZH est déconnecté de l'aquifère, la zone hyporhéique est créée uniquement par l'infiltration des eaux des surface dans le sédiment.

iii) le complexe Rivière-ZH-Aquifère est connecté et les échanges d'eau se font dans le sens de drainage et/ou de l'alimentation de la nappe.

iv) un dernier cas particulier, où le cours d'eau s'écoule sur substrat imperméable avec une présence de zone hyporhéique latérale (sur les bords de la rivière) et au niveau du lit majeur uniquement.

Pour plus de renseignements sur les méthodes d'investigation du complexe rivière-ZH-Aquifère, se reporter au rapport PIREN Seine de Mouhri et al. (2012).

Le but de ce travail, est de localiser et de quantifier ces échanges dans le système aquifère multicouche du bassin de l'Orgeval (GIS ORACLE). Si les travaux récemment menés dans le cadre du PIREN Seine et de la FIRE ont permis d'aboutir à une meilleure compréhension du fonctionnement du bassin amont, les questions suivantes demeurent :

i) Si le réseau hydrographique semble alimenté par la formation aquifère des calcaires de Brie à l'amont du système, qu'en est-il de la relation nappe rivière dans le secteur aval du système (cheminement sur le semi perméable constitué des Marnes vertes, et surtout

avec la seconde formation aquifère des calcaires de Champigny) ?

ii) Quels sont les flux d'eau (et indirectement de polluants) échangés temporellement entre les nappes et les cours d'eau ?

Répondre à ces deux questions est aujourd'hui un enjeu capital et nécessaire pour aboutir à une compréhension approfondie et véritable du fonctionnement hydrologique du bassin et des processus dynamique au niveau de l'interface nappe-rivière qui servira ensuite de support à la modélisation biogéochimique spatialisée. Pour ce faire, des campagnes de mesures hydro-géophysiques ont été réalisées afin de mettre en place un dispositif expérimental pérenne de mesure multi-échelle. Cette approche « hydrogéophysique » est appliquée à l'échelle du bassin et à l'échelle de la zone hyporhéique.

2 La zone d'étude

Le site expérimental de l'Orgeval (104 km2) fait partie de l'Observatoire ORACLE (1800 km2) délimité par les bassins versant du Grand et du Petit Morin à 70 km à l'est de Paris (Figure 1). Le GIS ORACLE, Observatoire de Recherche sur les bassins versants ruraux Aménagés, pour les Crues, les Etiages et la qualité de l'eau, est un site atelier du PIREN Seine et de la FIRE (Fédération Ile de France de Recherche en Environnement). Il a été labellisé SOERE à travers le Réseau Français de Bassins Versants.

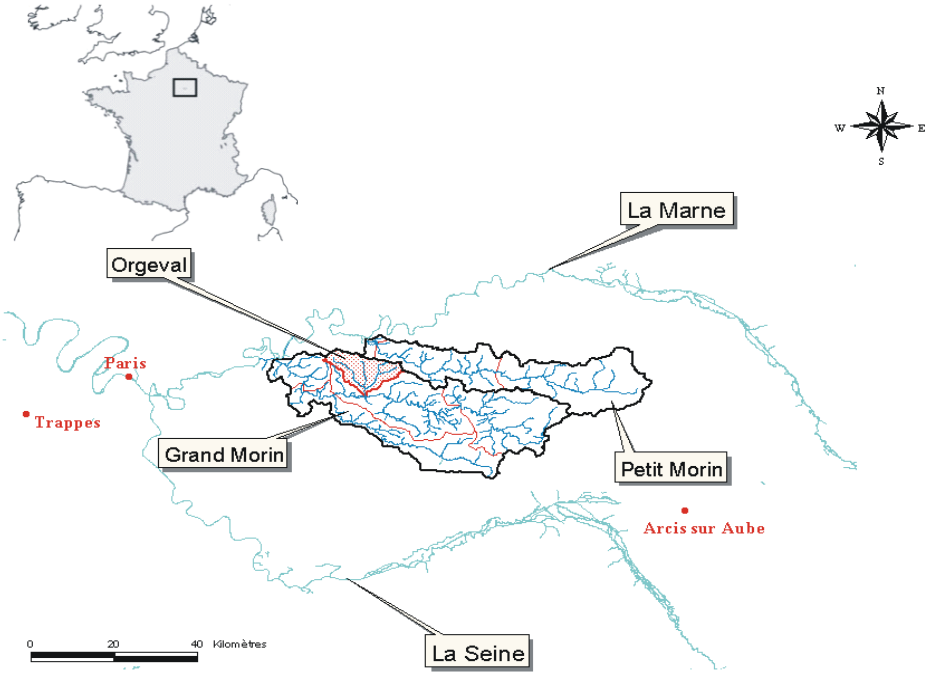


Figure 1: Situation géographique

L'objectif scientifique du GIS est de comprendre le fonctionnement hydrologique et biogéochimique des bassins sédimentaires en milieu rural anthropisé. Cette recherche passe par l'observation multi-variables et multi-échelles d'un ensemble de sous-bassins versants emboîtés (1km² à 1800 km²) du bassin parisien. ORACLE, fournit les bases scientifiques nécessaires à la gestion et à la maîtrise des risques liés aux événements extrêmes (inondations, sécheresses) ainsi qu'à l'évaluation des impacts des activités anthropiques et notamment agricoles, sur le régime et la qualité des eaux. Vis-à-vis de l'ensemble de ces risques, l'anthropisation des milieux concourt à la fois à l'augmentation de l'occurrence des aléas et à l'aggravation de la vulnérabilité des territoires. Répondre à ces enjeux n'est possible qu'à travers une activité d'observation d'ampleur et de durée adaptées, à différentes échelles, de la parcelle agricole à celle du bassin versant. Situé à 70 km à l'Est de Paris, les bassins versants d'ORACLE influencent les apports d'eau de l'agglomération parisienne, tant en terme quantitatif que qualitatif. Sa configuration représentée par un ensemble de sous-bassins emboités et l'antériorité de ses

observations, sur près de 50 ans pour le bassin versant de l'Orgeval, permettent de répondre aux questions de changement d'échelle et en font un site d'exception. Les approches développées sont caractéristiques du fonctionnement de ces milieux mais aussi des enjeux sociaux économiques importants liés à la dégradation de la qualité du milieu naturel et à la prévision et la prévention des risques hydrologiques (crues et étiages) de l'agglomération parisienne.

L'étude de ce bassin, situé à moins de 100 km en amont de l'agglomération parisienne, est donc primordiale dans le cadre opérationnel des prévisions des crues. La principale source de pollution diffuse est l'agriculture intensive (46 % des terres du bassin de la Seine, 80 % d'ORACLE), via l'utilisation de phytosanitaires et de nitrate en excès. Un des enjeux socio-économiques majeurs aujourd'hui est donc de comprendre les processus de transfert d'eau et de polluants pour la mise en place et l'évaluation d'outils et d'éco-technologies, pour une gestion intégrée du territoire et une protection des ressources en eau. Ainsi, ORACLE fait également partie du périmètre d'étude, délimité par la Région Ile-de-France, et qui fait l'objet actuellement d'un projet de Parc Naturel Régional des deux Morins, outil d'aménagement durable du territoire, qui a l'ambition d'équilibrer les zones périurbaines et rurales.

Ces différents points et l'insertion d'ORACLE dans la recherche régionale, nationale et internationale ainsi que dans un contexte opérationnel, sont les bases de cet observatoire. ORACLE participe également activement au processus du SAGE 2 Morin (périmètre identique à celui d'ORACLE), à travers le projet SCITESAGE développé au sein du PIREN Seine. Ce projet vise à étudier les changements d'échelles sociales, notamment à travers la perception du milieu des différents acteurs participants à l'élaboration du SDAGE Seine-Normandie et des SAGE 2 Morin et Orge-Yvette. Plus spécifiquement, un travail d'évaluation de la participation de la communauté scientifique au SAGE 2 Morin est actuellement en cours.

2.1 L'Orgeval : un contexte géomorphologique et hydrogéologique représentatif de la zone centrale du bassin de la Seine

Le bassin expérimental de l'Orgeval est affecté par un climat océanique tempéré avec une pluviométrie moyenne annuelle de 700mm.

Il est représentatif, à la fois des pratiques agricoles sur le bassin de la Seine (type grandes cultures) et aussi de la géomorphologie des bassins incisés propres à l'hydrosystème Seine sur sa zone centrale où les formations tertiaires de l'Oligocène (aquifère de Brie) et de l'Eocène (calcaires du Champigny) sont affleurantes dans les vallées. Sur le plan hydrogéologique, le bassin de l'Orgeval est influencé par un système aquifère multi-couche (Figure 2), qui est composé de deux principales formations géologiques: l'Oligocène et l'Eocène. Ces deux unités aquifères sont séparées par un aquitard argileux. Le bassin est recouvert de dépôts éoliens quaternaires, essentiellement constitués de lentilles de sable et de limon peu perméables. L'Oligocène est constitué par la nappe des calcaires de Brie. Celle-ci représente un aquifère libre et perché dont le mur est constitué par des argiles vertes quasiment imperméables (Mégnien, 1979). L'Eocène supérieur est représenté par la nappe du calcaire de Champigny. Celle-ci constitue un aquifère de perméabilité de fissure, recouvert sur les plateaux par le manteau des argiles vertes. Cette nappe est généralement libre, bien que coiffée d'une couche argileuse. Elle est alimentée par les flancs de vallées et localement par les zones poreuses et les gouffres (Campinchi et Morisseau, 1983).

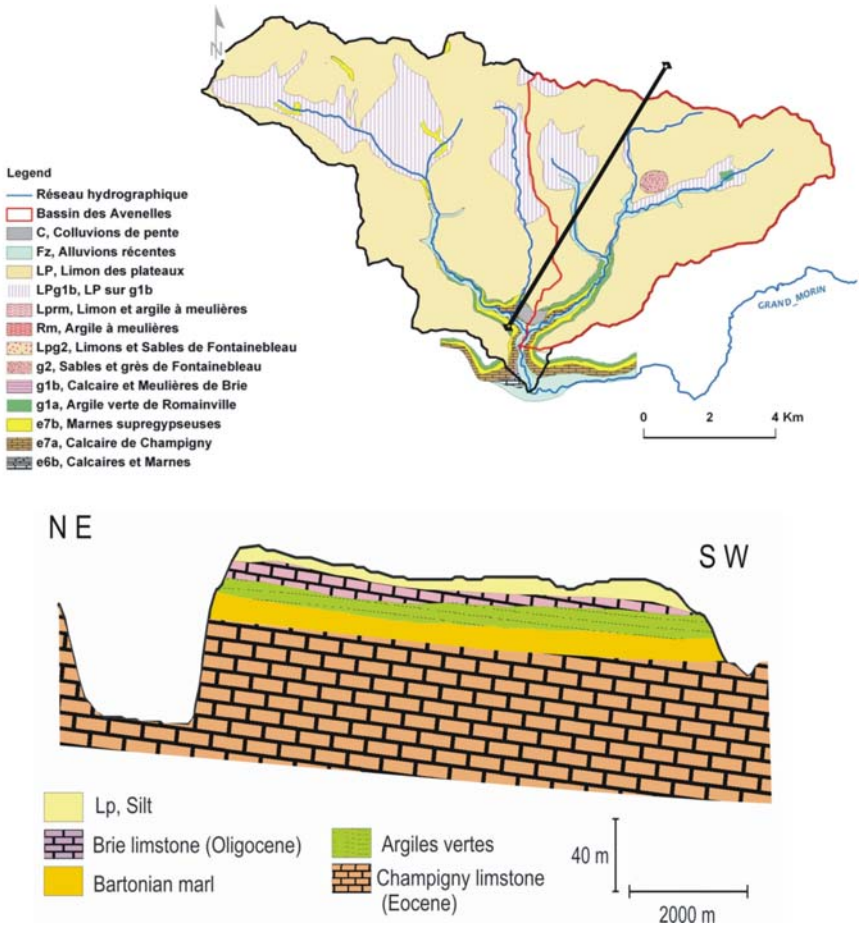


Figure 2 : Carte géologique et une coupe géologique Nord est- Sud est de la zone d'étude

2.2 Données disponibles

L'ensemble des compartiments hydrologiques et hydriques d'ORACLE sont suivis via un réseau de mesure complet (Figure) : stations limnimétriques à l'exutoire de chaque sous-bassin et dans le réseau de drainage, stations piézométriques, stations pluviométriques réparties sur l'ensemble d'ORACLE et stations d'humidité des sols en surface et en profondeur. Ce dispositif est doublé d'un réseau de mesure de la qualité des eaux de surface, de pluie et de la nappe. Un réseau de mesure dit « de base » est maintenu en permanence, afin de ne pas interrompre les chroniques. La longueur et la continuité de certaines chroniques sur le long terme sont nécessaires pour i) appréhender correctement le fonctionnement des hydrosystèmes, ii) détecter des tendances ou des changements dans les comportements, iii) évaluer les impacts de modifications d'origines anthropiques, de couvert végétal ou liées aux aménagements hydro-agricoles et ce, jusqu'aux changements climatiques. Ces données de base sont acquises principalement par la DRIEE Ile-de-France, Météo-France et le Cemagref.

Tableau1 : Données de base d'ORACLE pour les 2 Morin qui incluent l'Orgeval

Equipements	Types de mesure	Nombre de stations	Fréquence de mesure	Période d'observation
Stations Limnimétriques	Hauteur d'eau / Jaugeage ponctuel	11	Continue	Depuis 1962
Pluviomètres	Lame d'eau pluviomètre à augets basculeurs	19	Continue	Depuis 1962
Piézomètres	Hauteur d'eau	11	Continue et journalière	Depuis 1989
Qualité	NO3, NO2, NH4, PO4, Cl, COD, CID et conductivité	11	Journalière	Depuis 1975 pour certaines stations
Station Météorologique	T° min and max, radiations totales, T° du sol à - 50 cm et - 100 cm, Humidité min, max et moyenne	1 station + 2 à proximité de l'observatoire	Continue	Depuis 1962
Humidité du sol	Humidité volumique du sol à différentes profondeurs, sur 3 sites de mesure sur le BV	3 profils (de 5 cm à 155 cm)	Continue	Depuis 1988 sur 1 site, depuis 2006 sur 2 autres sites
Carte des cultures	Carte des cultures du bassin et Plan d'occupation des sols	Bassin versant des Avenelles	Annuelle	Depuis1998
Cartes	carte pédologique et géologique, MNT 25 m, MNT 50 m, supports SIG …			

3 Etude à l'échelle régionale

L'étude à l'échelle régionale (bassin de l'Orgeval) vise à mieux comprendre le rôle des deux principaux forçages (gradient hydraulique et structure géologique) dans les échanges nappe-rivière. La détermination de la structure géologique est abordée par des investigations géophysiques à grande échelle alors que le gradient hydraulique est abordé par la mesure des niveaux de la nappe afin d'établir le schéma des écoulements souterrains à l'échelle du bassin.

3.1 La structure géologique

La caractérisation de la structure de l'aquifère superficiel de la formation de Brie à l'échelle du bassin des Avenelles a été réalisée. La structure souterraine du bassin a été définie en utilisant la carte géologique au 1/50000 couplée à des prospections géophysiques (Figure 3) de la morphologie souterraine du bassin. Ces prospections, qui comprennent des sondages TDEM (sondages électromagnétiques dans le domaine temporel), des sondages électriques et des tomographies de résistivité électrique (ERT), ont été réalisées afin d'améliorer la description de la géologie de surface et des deux aquifères sous-jacents (formation de Brie et calcaires du Champigny).
Les sondages TDEM ont été réalisés sur un transect de 1 km qui va du plateau au ru des Avenelles (Figure 3-A) la technique TDEM est rapide, mais nécessite généralement une validation par des prospections électriques (plus lourdes à mettre en oeuvre) insensibles aux perturbations de surface. Deux autres sondages ERT de 200 m ont été effectués à proximité des forages du Château d'eau et celui des Avenelles (Figure 3-B). Ces deux panneaux électriques, effectués le long du profil des sondages TDEM, sont réalisés selon le dispositif wenner schlumberger et avec un écartement de 4m entre électrodes. La présence de log au droit des piézomètres a servi à valider les inversions des

enregistrements de terrain. Cela permet de mieux identifier les signatures géophysiques des différentes entités en place (Figure 3).

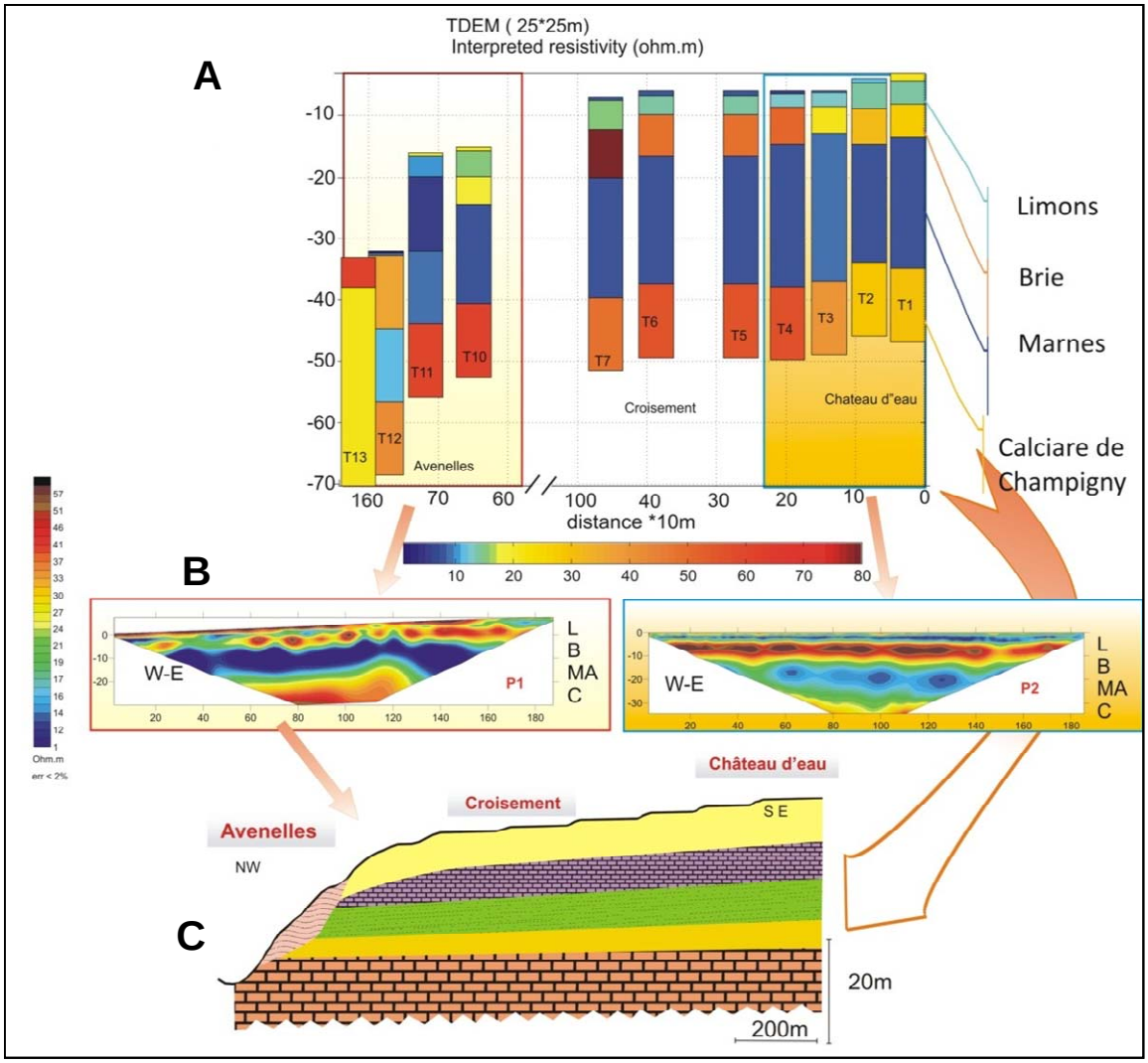


Figure 3: Détermination de la structure géologique à grande échelle par les méthodes géophysiques A) les sondages électromagnétiques dans le domaine temporel(TDEM), B) sondages électriques et des tomographies de résistivité électrique (ERT), schéma interprétatif des faciès observés par les deux méthodes.

La tomographie de résistivité électrique est présentée sous la forme d'une image (ici en deux dimensions) des résistivités du sous-sol obtenues après inversion des valeurs de résistivités apparentes mesurées en combinant des sondages électriques verticaux à un profilage. Alors que les sondages TDEM sont présentés sous forme de log 1 D. La dynamique des échelles de couleurs représentant la résistivité électriques ERT est cohérente avec les données TDEM. Les résultats montrent un fort contraste entre les argiles vertes et marnes (faible résistivité) et les formations dures (fortes résistivités) qui correspondent à la formation de Brie et au calcaire de Champigny. Ils confirment également la présence des différentes entités géologiques décrites précédemment avec une structure tabulaire. Les épaisseurs des couches observées (limons, formation de brie, argile et marne et calcaire de Champigny) correspondent globalement à celles décrites dans les logs de la base de données sous-sol du BRGM. Ces mesures mettent en évidence le contact de la formation de Brie avec les limons de plateau et l'affinement de l'épaisseur jusqu'à la disparition de cette formation en se rapprochant de ru des Avenelles (Figure 3).

Il convient de noter qu'en TDEM, les mesures (valeurs de résistivités) ont une sensibilité plus faible qu'en tomographie électrique pour les terrains superficiels, ainsi que pour les terrains très résistants électriquement (i.e. Brie et Champigny)

3.2 Les écoulements régionaux

La connaissance des niveaux d'eau dans la nappe et dans les cours d'eau est un préalable indispensable à la mise en œuvre d'un système de mesure des échanges nappe rivière. A cet effet, des campagnes de mesures synchrones (snapshots) des niveaux piézométriques ont été réalisées. Plusieurs estimations de cartes piézométriques, obtenues par interpolation par krigeage, cokirigeage, krigeage par dérviée externe ou à l'aide d'une méthodologie basée sur ANFIS (Artificial Neuro Fuzzy Inference System) (Kurtulus et Flipo, 2011 ; Flipo et al, 2011) ont été réalisées. L'analyse des erreurs d'interpolation et des erreurs liées aux méthodes d'interpolation ont permis d'identifier les zones où un échantillonnage des hauteurs piézométriques était indispensable pour mieux comprendre les écoulements à l'échelle du bassin. Ces cartes sont aussi utiles pour estimer les flux régionaux d'eau arrivant à la zone hyporhéique.

Dans ce rapport, nous présentons la démarche d'interpolation, les résultats et les validations croisées des estimations par krigeage des quatre campagnes de mesure. Parmi toutes les méthodes testées, c'est cette méthode qui présente les meilleurs résultats pour les basses eaux.

3.2.1 Mesure synchrone de la piézométrie.

L'acquisition de données sur l'ensemble de la nappe libre de la formation de Brie est réalisée en vue de la modélisation des écoulements et de l'estimation des flux échangés avec les cours d'eau. Deux campagnes de mesures piézométriques synchrones ont été effectuées en période de basses eaux (septembre 2009 et octobre 2011) et deux autres en période de hautes eaux (avril 2009 et juin 2001). Le relevé du niveau de la nappe par rapport au sol (profondeur de la zone non saturée) a été effectué par sonde graduée sur plus de 50 puits (privé et public) et 7 piézomètres, répartis sur l'ensemble du bassin de l'Orgeval. Les campagnes sont réalisées par deux équipes sur une période de deux jours. En plus du niveau de la nappe, la profondeur du puits ainsi que d'autres anomalies (puits pompé ou vide,..) sont également renseignés.
Par ailleurs, pour l'interpolation, le niveau d'affleurement du toit des argiles vertes au niveau des vallées, extrait à partir de la carte géologique de Canipelle (1964) a été assimilé aux lignes de sources de la nappe de Brie. Le modèle numérique de terrain à maille 25m est également utilisé pour niveler les points de mesure (supposé représenter l'altitude du sol).

3.2.2 Démarches d'interpolation.

L'étude géostatistique vise à fournir des estimations de la cote du toit de la nappe aux dates indiquées, ainsi que les incertitudes d'estimation associées. Les cartes d'écart-type de krigeage serviront à localiser les piézomètres supplémentaires à mettre en place, de façon à préciser la piézométrie de la nappe dans les zones de plus forte incertitude.
L'étude géostatistique se décompose en trois étapes :

- une étude exploratoire des données, statistique puis variographique, permettant de détecter les anomalies dans les données, puis de caractériser les variables d'abord statistiquement, puis par leur structure spatiale (analyse variographique) ;
- une étape de modélisation des variogrammes (i.e. identification des structures mathématiques qui permettent de représenter la variabilité spatiale des données) ;
- une étape d'estimation (krigeage ou co-krigeage et variance d'estimation associée), complétée par l'analyse des résultats.

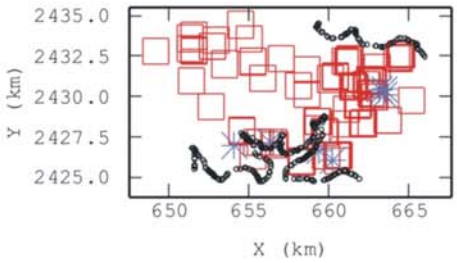
Deux modélisations sont envisageables :

i) Estimer la profondeur du toit de la nappe (variable mesurée) par une méthode d'interpolation (par exemple le krigeage). Les cartes piézométriques sont alors obtenues par soustraction de la profondeur (variable estimé) aux cotes du sol renseignées par le MNT. Dans ce cas, l'étude variographique est effectuée sur la variable profondeur.

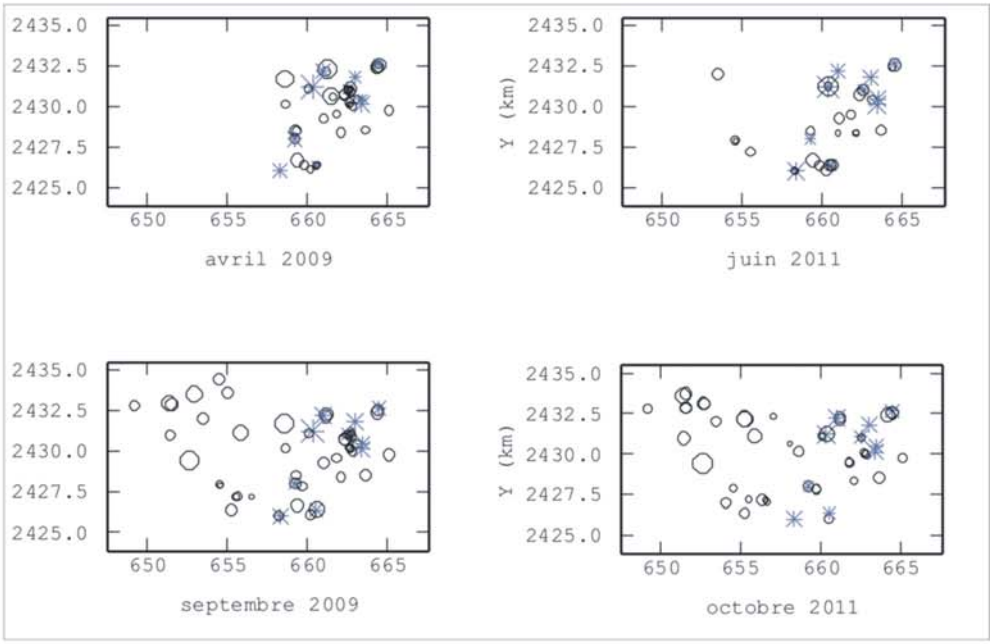
ii) Convertir la profondeur en cote piézométrique aux puits mesurés, et estimer directement cette variable (variable recalculée), avec la cote topographique en covariable.

Pour l'estimation en dérive externe, le modèle variographique est celui des « résidus » locaux de la cote piézométrique par rapport à la dérive (dans ce cas, le MNT).

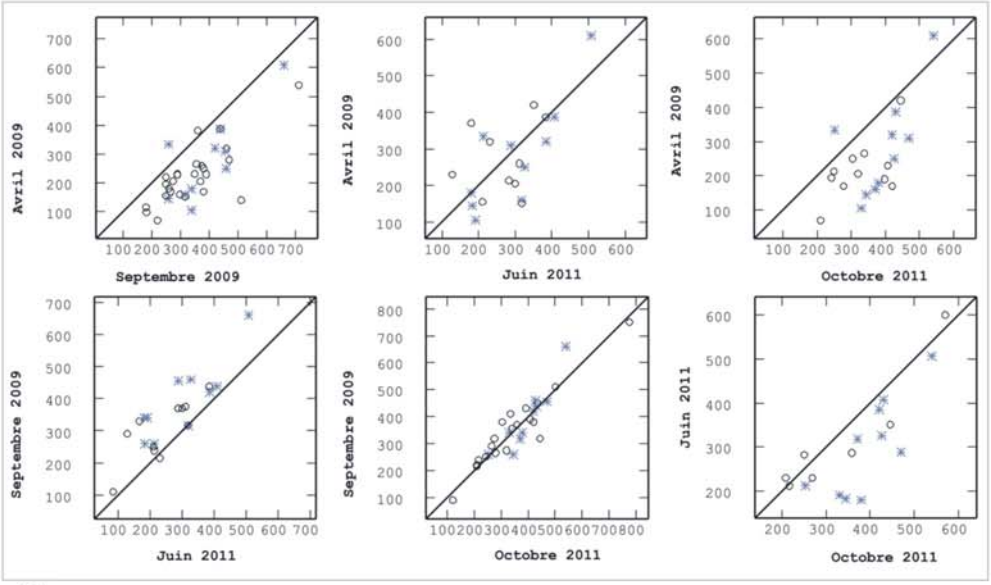
3.2.2.1 Analyse exploratoire des données.



A): Localisation des données : a) différents types de données : puits, * piézomètres, o sources



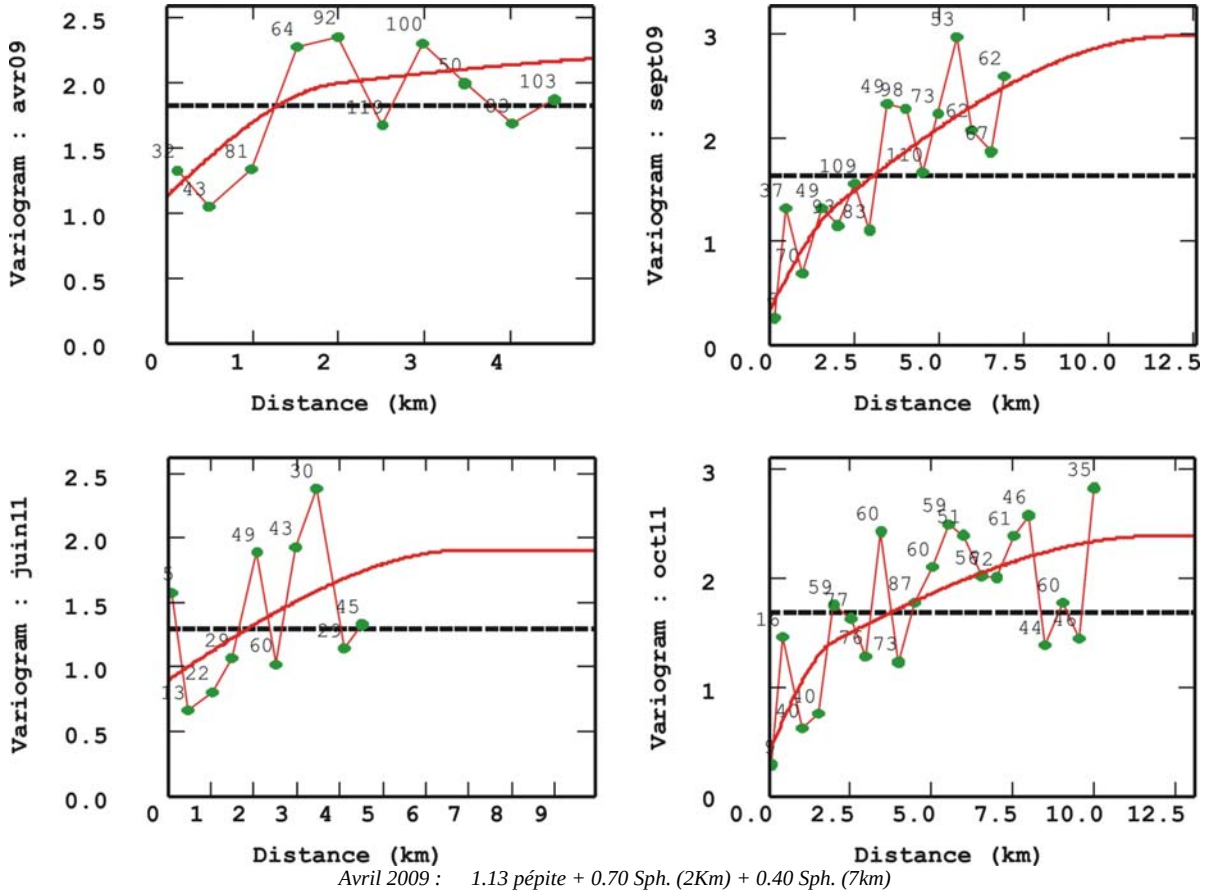
B): Différentes campagnes. Les * indiquent les puits communs aux quatre campagnes



C): Nuages de corrélation des mesures de la profondeur (en cm) entre les quatre campagnes

Figure 4 : Présentation des campagnes de mesure de la profondeur du toit de la nappe

Les puits mesurés ne sont pas souvent les mêmes suivant les campagnes, et les profondeurs du toit de la nappe ou les cotes piézométriques étant corrélées temporellement, on peut améliorer l'estimation (meilleure cohérence et meilleure précision) par une modélisation multivariable.
Des modèles bivariables de la profondeur du toit de la nappe ont été ajustés en modèle linéaire de co-régionalisation (Polus et al, 2011) pour les basses eaux et pour les hautes eaux, ainsi que pour l'année 2011. Le nombre de puits communs est trop faible dans les autres cas (2009, 2011, les quatre campagnes) pour le calcul des variogrammes simples et croisés correspondants et leur ajustement (Figure 6).



Avril 2009 : 1.13 pépite + 0.70 Sph. (2Km) + 0.40 Sph. (7km)
Septembre 2009 : 0.34 pépite + 0.49 Sph. (2km) + 2.16 sphérique (12km)
Juin 2011 : 0.90 pépite + 0.01 sph. (2km) + 1.00 Sph. (7km)
Octobre 2011 : 0.40 pépite + 0.70 Sphérique (2km) + 1.29 sphérique (12 km)

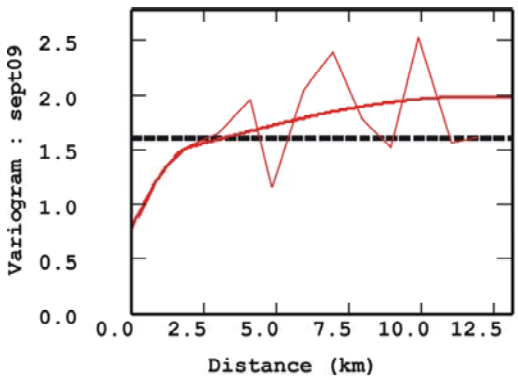
Figure 5: Ajustement des variogrammes simples omnidirectionnels de la profondeur du toit de la nappe***. Valeurs de l'axe des ordonnées en m²***

Plusieurs ajustements bivariables sont testés soit en utilisant les structures communes des ajustements monovariables (en pratique, les modèles monovariables ont été déduits des modèles bivariables), soit en introduisant des structures différentes. A titre d'exemple la Figure 6 présente les variogrammes bivariables des deux campagnes de basses eaux. La première variable (profondeur du toit de la nappe en septembre 2009) et la seconde variable (profondeur du toit de la nappe en octobre 2011) sont bien corrélée, avec un coefficient de corrélation 0.94.

3.2.2.1 Validation croisée des variogrammes

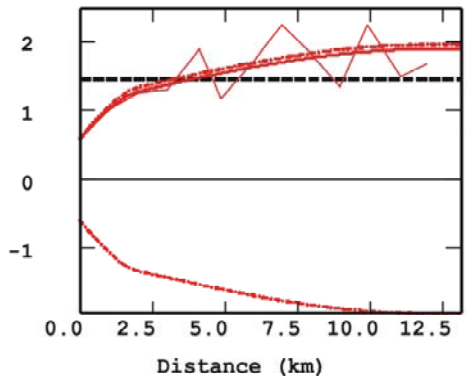
La validation croisée est réalisée avant d'entreprendre le krigeage, afin de fournir des critères statistiques de sélection dans le choix d'un modèle de variogramme et le voisinage utilisé pour le krigeage. Le principe est d'éliminer à tour de rôle chaque observation (1 mesure de la nappe) et de l'estimer à l'aide de ses voisins. En chaque point, on obtient donc une valeur vraie (Zi) et une valeur estimée (Z*i) que l'on peut comparer pour déterminer si le modèle fournit des estimations se comportant comme prévu , si le voisinage utilisé est adéquat.

Pour, l'appréciation de la qualité du krigeage, la moyenne (m) et à la variance (s^2) de l'erreur d'estimation, et la moyenne et à la variance de l'erreur standardisée (Z*-Z)/S* sont calculées.



Modèle des basses eaux

$$\begin{bmatrix} .78 & .59 \\ .59 & .46 \end{bmatrix} Pépite + \begin{bmatrix} .59 & .48 \\ .48 & .47 \end{bmatrix} Sph.(2\,km) + \begin{bmatrix} .62 & .83 \\ .83 & 1.09 \end{bmatrix} Sph.(12\,km)$$



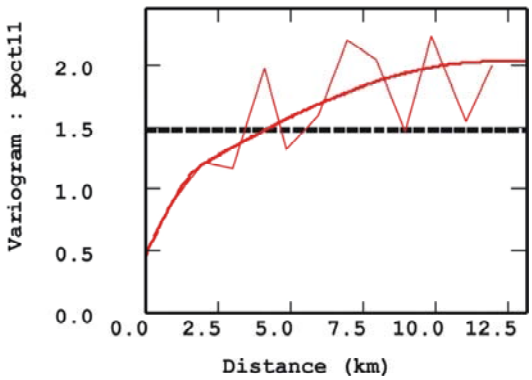


Figure 6: Ajustement bivariables en modèle linéaire de corégionalisation des basses eaux. Valeurs de l'axe des ordonnées en m²

L'histogramme des fréquences de l'erreur standardisée (Z*-Z)/S* ainsi que la localisation des points d'échantillonnage sont représentés pour vérifier qu'une ou deux données extrêmes ne perturbent pas les analyses statistiques, et pour vérifier que les résidus sont spatialement homogènes (Figure 7). Il est également intéressant de localiser les erreurs d'estimation, ce qui permet de vérifier à la fois la validité de la mesure au point et d'en tenir compte lors de l'interprétation des champs piézométriques interpolés. Plus de 95 % des données ont une erreur standardisée inférieure à 2,5 (excepté les 2 points verts sur la figure 7).

La moyenne des erreurs est effectivement proche de 0, mais la variance d'erreur reste assez élevée, ce qui explique la dispersion du nuage de corrélation entre Z et Z*. Cela peut être expliqué par le nombre réduit (52) des points de mesure et leur écartement spatial, mais aussi par l'amplitude de l'effet de pépite reflétant pour partie les erreurs de mesure.

La validation croisée permet d'examiner l'influence du voisinage sur l'estimation. Les différents critères ne privilégient pas un voisinage en particulier. De ce fait et par simplification, nous avons opté pour un krigeage de bloc avec voisinage unique, en effectuant une étude de sensibilité avec un voisinage glissant.

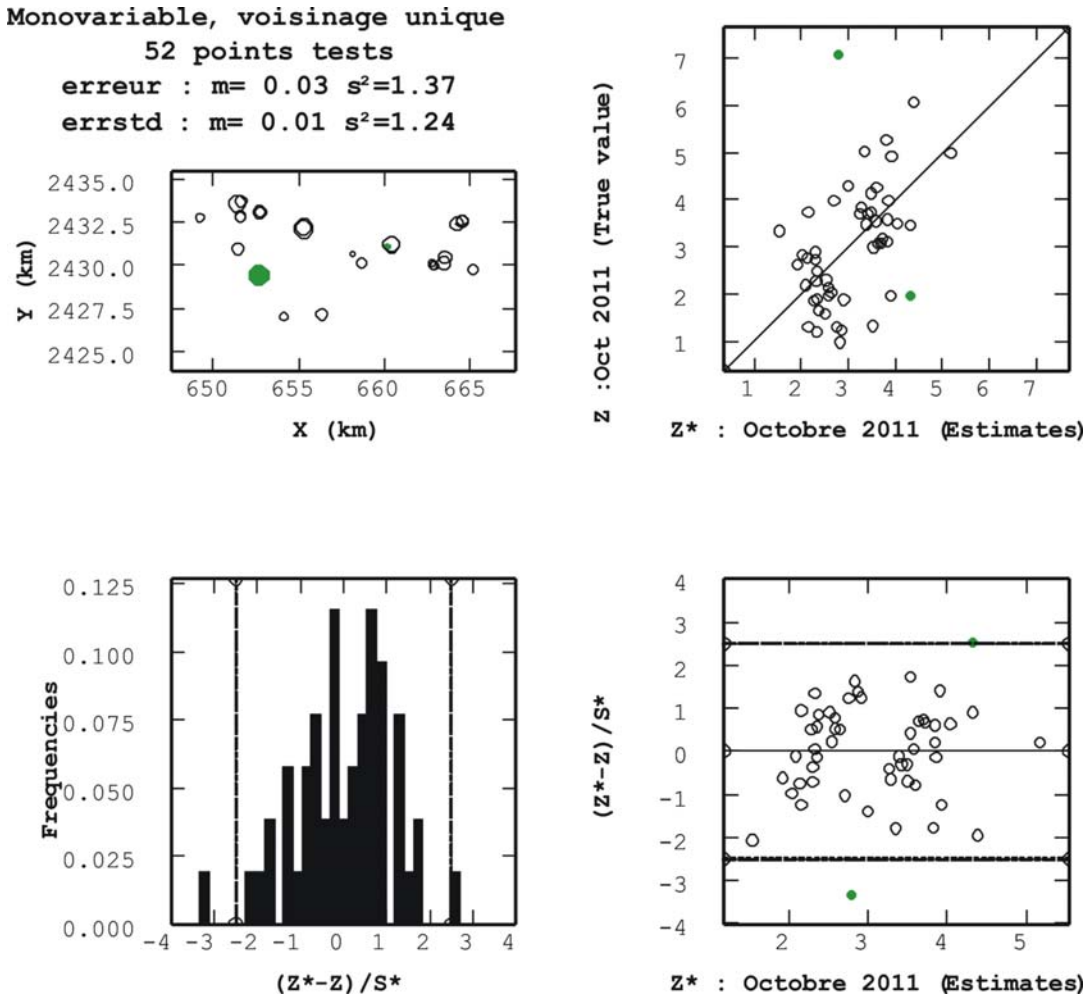
3.2.2.1 Krigeage de la profondeur et incertitude d'estimation

La mise en œuvre de la méthode de krigeage passe par une étape d'analyse des données (*cf. 3.2.2.1).* Elle est destinée à décrire la structure spatiale de la variable régionalisée (*cf.* ***Erreur ! Source du renvoi introuvable.).*** La carte de l'interpolation est alors accompagnée d'indicateurs (erreur d'estimation sur la profondeur) de la fiabilité des résultats.

Le krigeage est une méthode dite locale où les valeurs inconnues (Z*) sont estimées à partir d'un voisinage de points échantillonnés (Z_i). Par rapport à d'autres méthodes d'interpolation, le krigeage se distingue par le calcul de l'erreur d'estimation associée. Chaque carte d'abondance relative prédite est

donc à regarder en parallèle de celle de la carte des erreurs associées. Cette méthode permet également de prendre en compte des covariables *(cf.* ***Erreur ! Source du renvoi introuvable.****):* comme par exemple utiliser simultanément les mesures de septembre 2009 et d'octobre 2011 qui présentent le maximum d'échantillons pour la réalisation de l'interpolation par co-krigeage des profondeurs de la nappe de juin 2011.

Le krigeage « de bloc » est effectué en voisinage unique, avec les variogrammes monovariables ajustés précédemment. Il apparaît quelques estimations négatives de la profondeur, ne dépassant pas une quarantaine de cm (septembre 2009), et localisées (en rouge sur les cartes des profondeurs du toit de la nappe) à proximité immédiate des cours d'eau en aval du bassin (Figure 8 et Figure 9).



Erreur (m ; s²) correspondent respectivement à la moyenne et à la variance de l'erreur d'estimation
Errstd (m, s²) correspondent respectivement à la moyenne et à la variance de l'erreur standardisée (Z*-Z)/S*

Figure 7: Exemple de validation croisée du Krigeage de la profondeur pour d'octobre 2011 (les erreurs d'estimation signalées en vert).

3.2.2.2 Reconstitution de la cote piézométrique

Les cartes de profondeur du toit de la nappe pour les basses eaux (septembre 2009 et octobre 2011) sont marquées par un fort effet de pépite autour des grappes de puits, alors que celles des hautes eaux (avril 2009 et juin 2011) sont relativement lisses, à cause du nombre réduit de puits. A cause de la moindre variabilité spatiale aux puits mesurés pour cette campagne (Figure 8), ces incertitudes n'apparaissent pas sur le résumé statistique de l'écart-type de l'erreur d'estimation (annexe 1). Il est à signaler des valeurs « incohérentes » (négatives présentées en rouge sur les figures 8 et 9) de la profondeur du toit de la nappe au niveau des vallées. Ces valeurs ne dépassant pas -40 cm, elles correspondent, en théorie, aux affleurements de la nappe de Brie.

Les cartes d'écart-type d'erreur d'estimation reflètent la localisation des puits, ainsi que le forçage par la ligne de sources. Les plus fortes irrégularités dues à la topographie sont apparentes, notamment autour de la butte de Doue.
La cote piézométrique est reconstituée par soustraction de la profondeur du toit de la nappe au MNT régularisé à 250m. Les statistiques (annexe 1) montrent que la cote piézométrique (estimée) est beaucoup plus dispersée que la profondeur (estimée), avec un écart-type de dispersion supérieure à 15m pour chacune des campagnes, contre moins de 1.5 m. La dispersion de la cote piézométrique reflète donc majoritairement celle du MNT. Cependant les différences entre les quatre campagnes sont apparentes sur les cartes (Figure 8et Figure 9).

Enfin, les cartes des erreurs d'estimation nous renseignent clairement sur les potentialités d'optimisation des campagnes d'échantillonnage. A cet effet et également dans le but d'estimer les écoulements régionaux qui alimentent les quatre sections de rivière choisies, la localisation des 3 nouveaux piézomètres (installés en janvier 2012) au niveau du plateau et été orientée vers les points (blocs) qui présentaient de fortes valeurs d'écart-type d'estimation. Ces nouveaux piézomètres seront présentés plus en détail dans la partie dispositif expérimental *(cf. parties 4 et 5).*

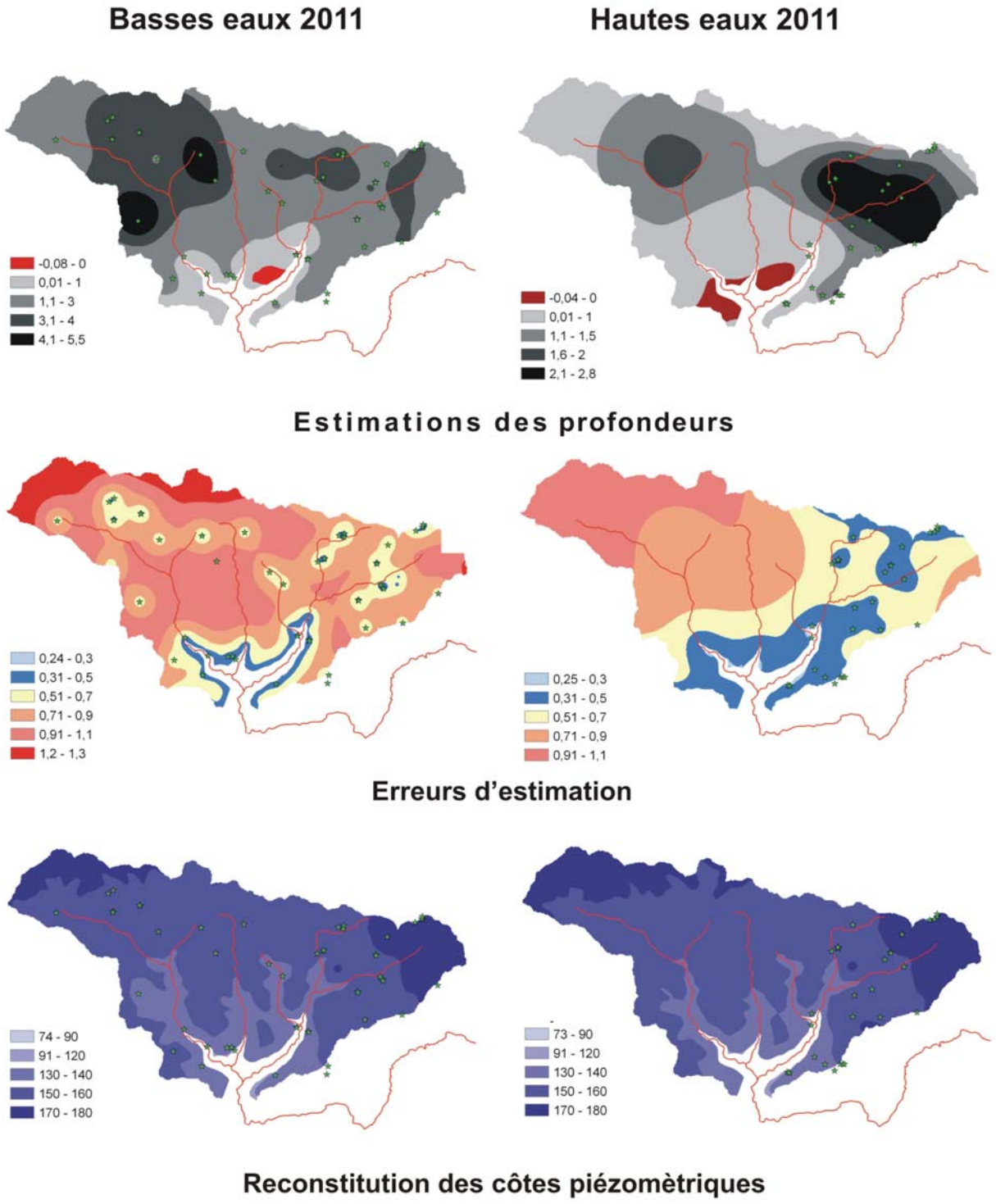


Figure 8 : Cote piézométrique estimée par la différence entre le MNT régularisé (à 250m) et le krigeage de la profondeur (2011). Valeurs en m.

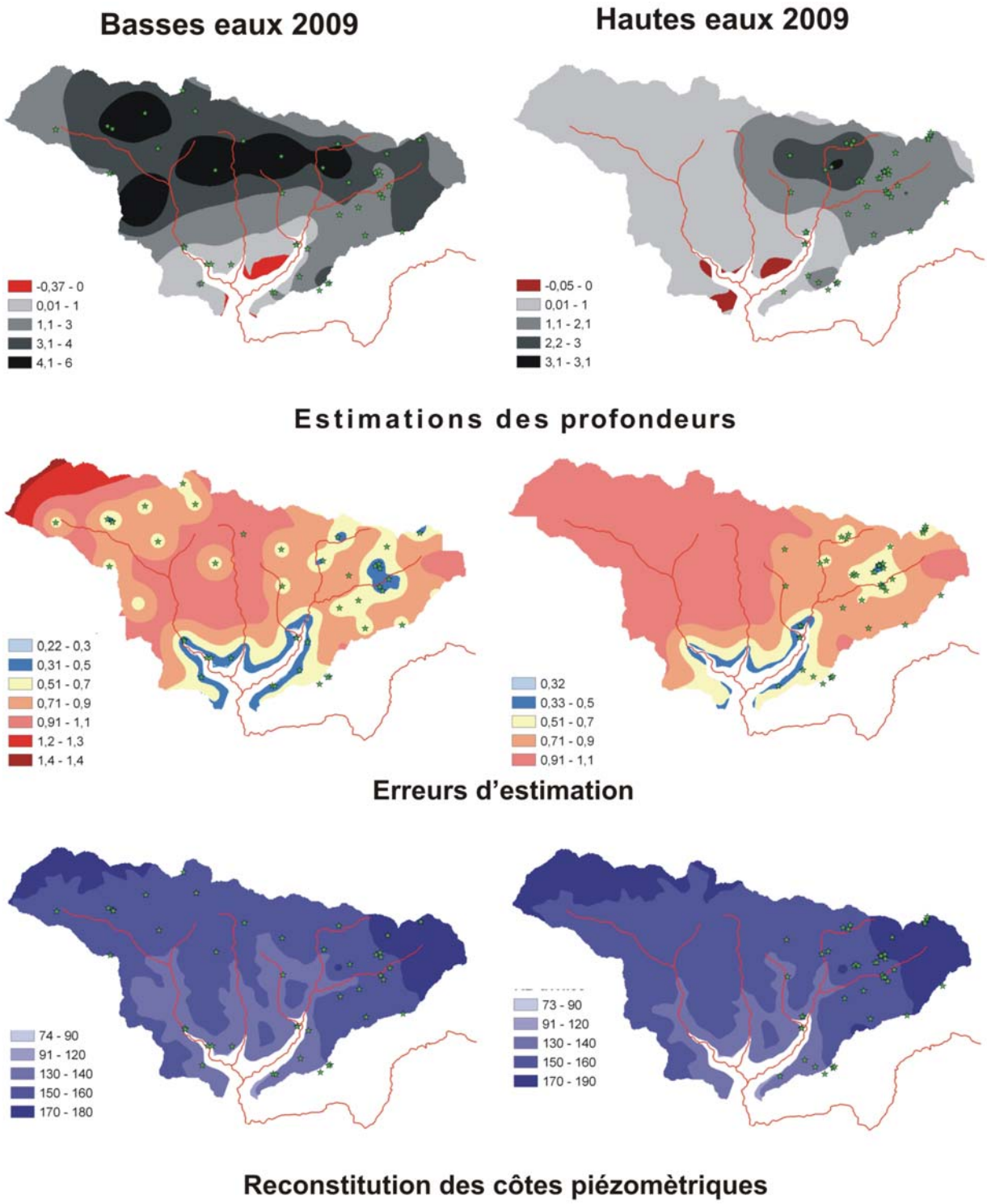


Figure 9 : Cote piézométrique estimée par la différence entre le MNT régularisé (à 250m) et le krigeage de la profondeur (2009). Valeurs en m.

3.2.3 Discussion sur les résultats du krigeage

La comparaison entre les différentes estimations du krigeage de la profondeur du toit de la nappe est réalisée en traçant les nuages de corrélation entre les quatre campagnes (Figure 10) et par la synthèse des paramètres statistiques (annexe1).
Les nuages de corrélation montrent bonne une corrélation entre les basses eaux (septembre 2009 et octobre 2011) avec un coefficient de corrélation de 0.86, et entre les hautes eaux (avril 2009 et juin 2011) avec un coefficient de corrélation de 0.77. Alors que les corrélations basses eaux-hautes eaux sont moyennes à médiocre (0.32< R<0.77). La campagne d'avril 2009 est la moins bien corrélée aux autres car la campagne a été menée uniquement sur le bassin des Avenelles (la partie Est du bassin de l'Orgeval). Néanmoins, les résultats des quatre campagnes semblent cohérents, puisque les estimations des champs piézométriques de hautes eaux sont bien supérieures à celles des champs de basses eaux (cf. Figure 10).
La dispersion du nuage de points entre les basses et les hautes eaux peut être associée à l'échantillonnage (les points mesurés ne sont pas toujours les mêmes entre les différentes campagnes) et également à la nature des écoulements (stationnaires en basses eaux, transitoires en hautes eaux) qui sont eux-mêmes influencés par l'hétérogénéité spatiale de l'aquifère. De ce fait, les meilleures estimations de la profondeur du toit de la nappe, et par là-même des piézométries, sont obtenues lors des périodes de basses eaux.

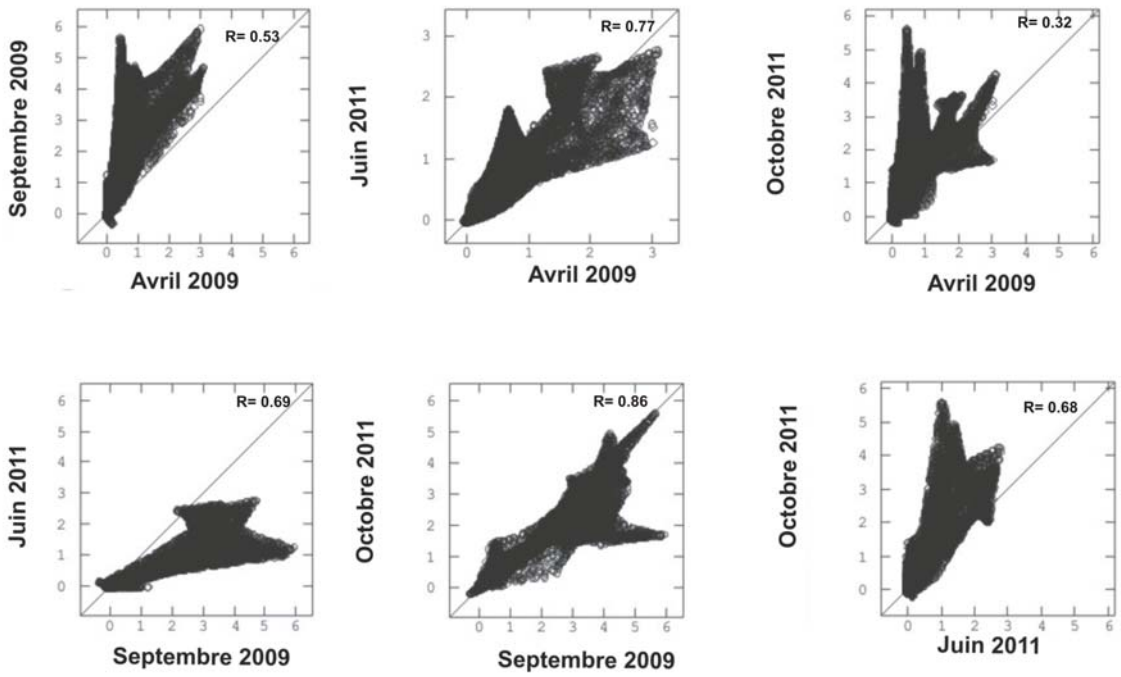


Figure 10 : Nuages de corrélation des estimations par krigeage de la profondeur du toit de la nappe. Valeurs en m.

4 Etude de la connectivité locale.

Cette section décrit les investigations géophysiques et les campagnes de carottage menées en 2011 pour déterminer la nature de la connectivité hydraulique entre la rivière et l'aquifère et pour décrire la structure et la stratigraphie au niveau de la zone hyporhéique. Cette partie décrit le choix de la localisation des sections de rivières, de forage et d'implantation de piézomètres, ainsi que la mise en place de l'instrumentation.

Le choix des sites à prospecter et à instrumenter au niveau des sections de rivière a été fait en deux étapes : la recherche de sections rivière, puis la détermination de la connectivité. Une reconnaissance sur le terrain est réalisée en se basant sur les cartes géologiques (BRGM et Canipelle 1964) et sur les observations de la stratigraphie, de la morphologie et de la structure du cours d'eau. Les points sont identifiés en prenant en compte la géométrie longitudinale de la rivière (linéarité du cours d'eau sur

une longueur de plus de 100 m) et l'accessibilité du point à la mesure géophysique et à l'instrumentation. Quatre points (sections de rivière) ont été choisis selon différentes connectivités potentielles entre le cours d'eau et le substrat. Deux points en amont supposés en connexion avec la formation de Brie, un point intermédiaire en contact avec les argiles vertes où le cours d'eau est probablement déconnecté de l'aquifère. Pour ce point, il est nécessaire de vérifier la présence ou non d'une zone hyporhéique ou pas. Un dernier point aval où le cours d'eau est supposé en connexion avec le calcaire de Champigny a aussi été identifié.

4.1 Détermination de la connectivité par tomographie de résistivité électrique

Les quatre sites choisis ont fait l'objet de campagnes d'investigation géophysique à l'aide de tomographies de résistivité électrique de 200 m de long et une profondeur d'environ 20 m. La résolution spatiale associée à l'écartement des électrodes (4m) ne permet pas de distinguer des horizons de puissance inférieure à 2-3m (Figure11). Ces investigations en bordure de rivière ont été réalisées dans le double objectif d'identifier le contact cours d'eau - substrat géologique, et d'estimer les profondeurs des piézomètres à mettre en place.

Les tomographies latérales et transversales réalisées sur les berges de la rivière ont ainsi permis de localiser les zones potentielles des échanges nappe-rivière à l'échelle du réseau hydrographique d'une longueur de 3.2 km (Mouhri et al., 2011a,b).

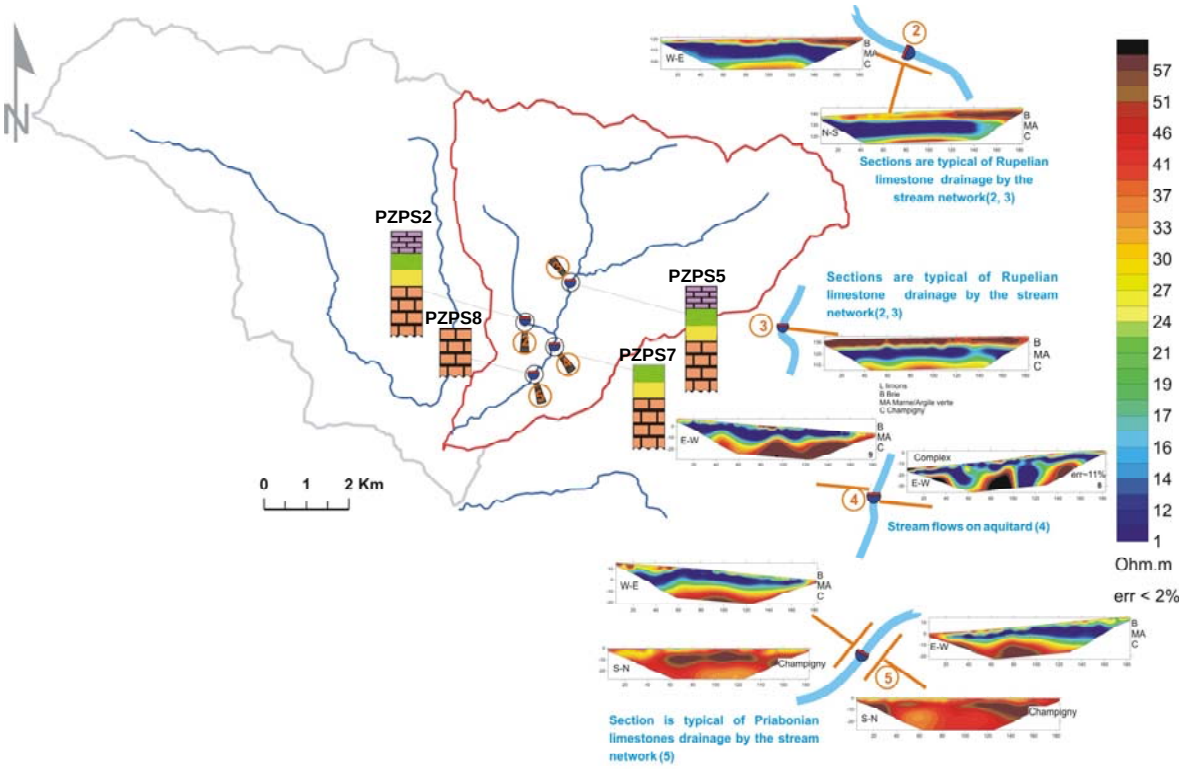


Figure11 : Synthèse des campagnes de caractérisation de la connectivité nappe-rivière avec des tomographies de résistivité électrique pour les 3.2 km de réseau hydrographique suivi par le dispositif expérimental (Mouhri al., 2011).

Sur l'ensemble des profils, on retrouve la structure et les entités géologiques observées au niveau du plateau *(Cf. 5.1 La structure géologique)* avec la disparition de la formation de Brie aux points intermédiaire (PZPS7) et aval (PZPS). Les deux points amont (PZPS2 et PZPS5) sont caractérisés par de fortes résistivités électriques en surface. Ceci traduit une connectivité de la rivière avec la formation de Brie. Le profil point intermédiaire (PZPS7) montre de faibles résistivités électriques en surface, traduisant que le cours d'eau s'écoule sur le substrat imperméable des argiles vertes. Enfin, le profil de la section aval présente de plus fortes résistivités qui semblent associées au calcaire dur du Champigny.

Ce tronçon de rivière choisi est caractéristique de différentes situations de drainage des calcaires de Brie et des échanges avec les calcaires de Champigny. Les deux sites en amont sont connectés à l'unité aquifère supérieur (Oligocène), drainant respectivement 10,5 et 24 km^2. La station aval, drainant un bassin versant de surface de 40 km^2, est reliée à l'unité aquifère inférieure. Les campagnes géophysiques ont permis de définir les épaisseurs des aquifères aux points d'échantillonnages.

4.2 Détermination de la connectivité par carottage

Les forages ont été réalisés dans le but de mettre en place les piézomètres et de valider les profils géophysiques avec des observations de faciès carottés. Les carottages ont été exécutés par une sondeuse hydraulique équipée d'une couronne en diamant de l'entreprise GINGER CEBTP. Pour les passages dans les meulières dures (difficilement carottables), un tricône à billes de carbure de tungstène a dû être employé. La précision verticale du carottage utilisant un tricône est estimée de à 30 - 40 cm suivant la profondeur de creusement. Les investigations ont été menées jusqu'à une profondeur de 17 m sur le plateau (jusqu'aux argiles vertes qui constituent le mur de la nappe de Brie) et de1 à 3m au niveau des piézomètres de bordure de rivière (jusqu'au moins à 1 m sous le niveau relatif du niveau d'eau de la rivière). La présence des blocs de meulières dures et qui s'éboulent au passage de la foreuse a nécessité de forer en destructif ø 100 mm avec tubage à l'avancement. Au cours des 8 sondages, il a été prélevé des échantillons intacts des limons de plateau (6 m) et de bloc de meulière siliceuse (2 m seulement) au carottier sous gaine. 3 sondages ont été réalisés au niveau du plateau (PZPS1= 12 m ; PZPS4= 12m et PZPS6= 12m) et 5 autres en bordure de rivière (PZPS2, 3 et 3bis, 5 ; 7et 8). Le PZPS5 correspond au puits d'un particulier, en bordure de la rivière, qui va servir de point supplémentaire de suivi en amont du système. Ce point, potentiellement en connexion avec la formation de Brie, ne sera pas donc discuté dans cette partie (Figure 12).

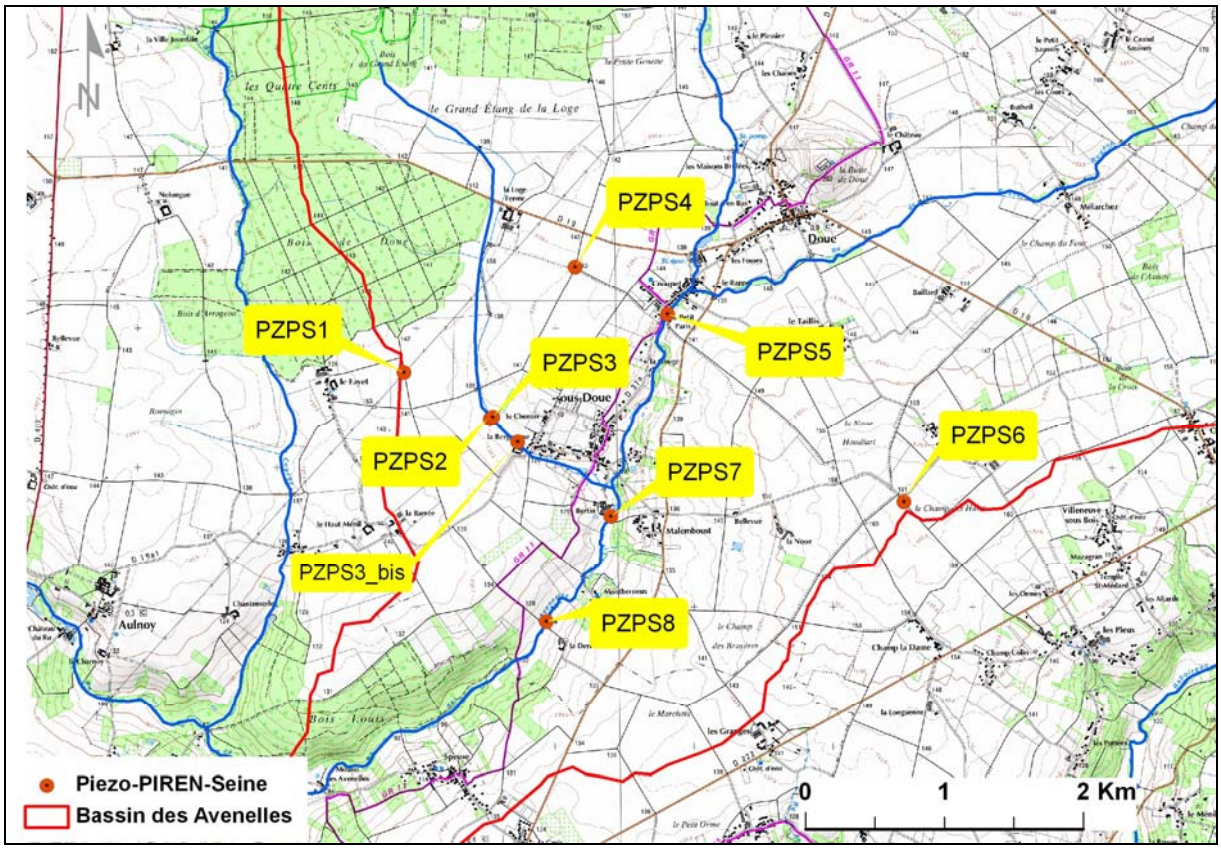


Figure 12 : Situation des 8 sondages réalisés au niveau du bassin des Avenelles.

Au niveau du plateau, les 3 points sondés ont montré que la stratigraphie semble plus complexe et plus hétérogène que ne le laissaient présager les interprétations géophysiques. En effet, La formation de Brie est très hétérogène entre 6 et 10m de profondeur. Dans cette zone, elle est constituée d'une alternance de blocs de meulière et d'argile (Figure 13). On ne rencontre des calcaires de Brie à

proprement parler que sur une épaisseur de 1 à 2 m à l'Ouest du domaine d'étude (PZPS1 et PZPS4) et pas du tout à l'Est (PZPS6). Ce constat est en accord avec les observations d'affleurements au niveau du bassin de l'Orgeval et des bassins voisins (Thiry, 2011 ; Bricon and Cavelier 1961). Les faciès observés lors de ces sondages sont en accord avec le profil vertical d'altération des calcaires de plateau du bassin de Paris qui a été décrit par Thiry, 2011. Du bas (argiles vertes) vers la surface du soil, on retrouve (Figure 13) :

i) des calcaires lacustres présentant de nombreuses figures de dissolution micro-karstiques ;

ii) un horizon argileux contenant des morceaux de calcaire résiduel et des masses silicifiées dispersées. Des structures d'effondrement de taille métrique, liées à la dissolution du calcaire sous-jacent, sont fréquemment observées ;

iii) La partie inférieure de l'horizon siliceux est formée de masses siliceuses compactes, irrégulières, de 0,5 à 1,0 m d'épaisseur et de plusieurs mètres de diamètre. Elles sont généralement d'aspect terne, peuvent devenir translucides par endroit, un cortex scoriacé entoure les blocs et se développe le long des fractures ;

iv) La partie supérieure de l'horizon siliceux est formée de masses siliceuses poreuses et celluleuses, d'orientation horizontale. Les masses siliceuses ont 0,5 à 1 m d'allongement à la base et deviennent plus petites vers le sommet.

v) Généralement les meulières n'affleurent pas à la surface des plateaux et sont couvertes par les loess quaternaires.

L'hétérogénéité spatiale de la formation de Brie (blocs de meulière englobés dans une matrice argilo-sableuse) et les faibles épaisseurs de calcaires « discontinus » de Brie, posent le problème de la géométrie et de l'épaisseur de l'aquifère. Les questions de quelle formation échantillonner, et par conséquent de la configuration des crépines, se sont posées lors de la pose des piézomètres. A priori, l'aquifère de la nappe de Brie est constitué par les formations des limons de surface, des argiles à meulière et du calcaire de Brie au sens strict (Mégnien, 1979). Lors de la pose des piézomètres et afin d'éviter les problèmes de colmatage par les fines, nous avons opté pour un crépinage sur la hauteur des calcaires de Brie et des argiles à meulière et un tube plein pour les limons de surface (Figure 13).

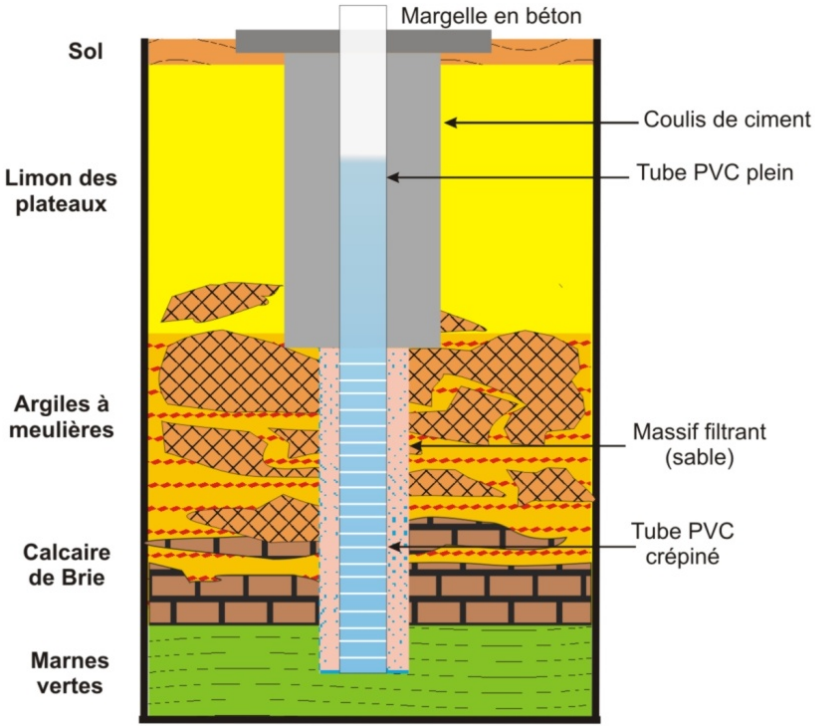


Figure 13 : Schéma de faciès et de la stratigraphie observée lors du carottage sur le plateau et avec la coupe technique du piézomètre

Au niveau des sections de rivière (dans la zone ripariane), les investigations ont été menées sur les 3 points identifiés et prospectés précédemment. En amont du système, les sondages PZPS2 et PZPS 3 et PZPS 3bis ont été réalisés au niveau de la ferme Bergeresse. Un point intermédiaire PZPS7 situé au niveau de la ferme de Bertin et un point aval PZPS 8 au niveau de la ferme de la Derrier ont aussi fait l'objet de sondages. Les logs interprétés sont présentés dans la Figure 14.

La comparaison des faciès et des connectivités observées par carottage à ceux issus de l'interprétation par les méthodes géophysiques montre qu'au niveau des points amont (PZPS2) et intermédiaire (PZPS7), les résultats sont cohérants. Par contre, au niveau du point aval (PZPS8), on note une différence majeure entre ces deux méthodes. Le carottage a révélé que la rivière est en contact avec les marnes supragypseuses (grises) et non pas avec le calcaire de Champigny, indiquant une similarité de la signature géophysique entre ces deux entités.

En termes de connectivité entre la rivière et le substratum, le point amont PZPS 2 est constitué d'un complexe Rivière-ZH-aquifère complètement connecté où les échanges d'eau peuvent avoir lieu dans les deux sens (infiltration et exfiltration). La zone hyporhéique est probablement constituée de deux entités différentes : une entité latérale ou de bordure composée par les limons de surface et les argiles à meulière et une entité sous le lit du cours d'eau constituée des calcaires de Brie. Aux points PZPS7 (intermédiaire) et PZPS8 (aval), le complexe rivière-ZH est probablement déconnecté de l'aquifère. Dans ce cas, une zone hyporhéique se développerait plutôt latéralement (bordure) et non pas verticalement sous lit du cours d'eau qui s'écoule sur des argiles vertes imperméables. La ZH latérale est constituée d'un mélange de limons/alluvions et d'argiles à meulière.

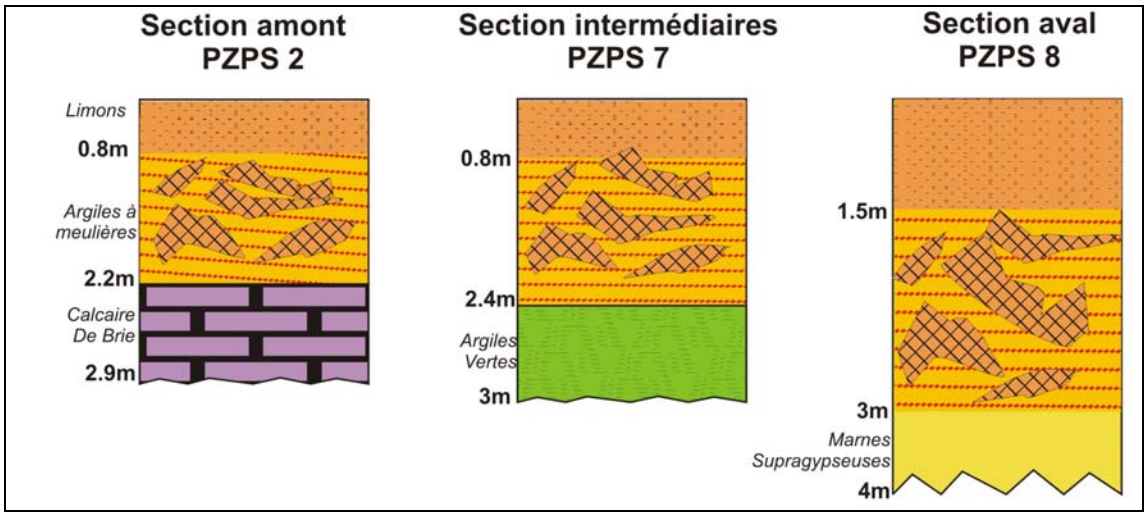


Figure 14 : Schéma de faciès et de la stratigraphie observée lors du carottage en bordure de ru des Avenelles

Finalement, la résolution verticale (~4m) des premières investigations ERT utilisées pour identifier rapidement et approximativement les grandes entités géologiques (limons, calcaire de Brie, argiles vertes et calcaire de Champigny) s'avère, à cette échelle locale (ponctuelle), trop lâche pour identifier certaines situations complexes de connectivité hétérogène. D'autres campagnes géophysiques à haute résolution, prévues en 2012, devraient nous permettre de mieux préciser la connectivité à l'échelle locale, et aussi de mieux caractériser la géométrie de la zone hyporhéique.

5 Le dispositif expérimental

Un dispositif expérimental multi-échelles est en cours d'implantation sur le bassin des Avenelles. Ce dispositif va permettre, via une approche inverse à base physique, de quantifier *in situ* les flux d'eau échangés entre le système aquifère multi-couche et le réseau hydrographique. Ce dispositif comprend un système de mesure de variables géophysiques (température et pression) et d'échantillonnage (eau) dans la zone hyporéique et dans les aquifères de subsurface.

Le système expérimental d'instrumentation de chaque section de rivière comporte (Figure15) :

- Deux systèmes de mesures de profils verticaux de température et de la pression sur une profondeur de 40-60cm et avec une discrétisation de 10-20 cm. Deux dispositifs température-pression sont implantés dans la ZH au niveau de chaque rive des 4 sections de rivière choisies. La mesure automatique de la température est réalisée grâce aux sondes reliées à des enregistreurs HOBO avec un pas de temps de 15 min et une précision de 1/10°C. La pression sera mesurée par le dispositif de Greswell, (2009) au pas de 15 min..
- Deux piézomètres de bordure équipés par des mini-sondes de température et de pression avec enregistreur à pas de temps 15 min. Des tests de pompage et des essais de traçage peuvent être réalisés au niveau de ces piézomètres, pour caractériser les propriétés hydrodynamiques du milieu à l'échelle de chaque section.
- Une sonde de température et de niveau d'eau enregistre la température et la pression de la colonne d'eau du cours d'eau. Ces données permettront à la fois d'estimer les débits au niveau de chaque section via la mise en œuvre de courbes de tarage et de calculer les gradients hydrauliques entre la rivière et les piézomètres de bordure.
- Un diapositif de prélèvement d'échantillons d'eau à différentes profondeurs dans le sédiment de la ZH. Ce dispositif, constitué de 4 mini-tubes (mini piézomètre) installés au milieu du cours d'eau, permettra de caractériser la signature géochimique des eaux.

Ce système a pour objectif, par une approche directe (pression) et une approche indirecte (température), d'estimer localement les flux d'eau échangés entre le réseau hydrographique et les aquifères. A cet effet, on développera un modèle hydrogéologique-thermique couplé afin d'inverser les données acquises sur le terrain. De plus un dispositif de prélèvement permet aussi au centre de chaque section de s'intéresser aux concentrations en éléments dissous.

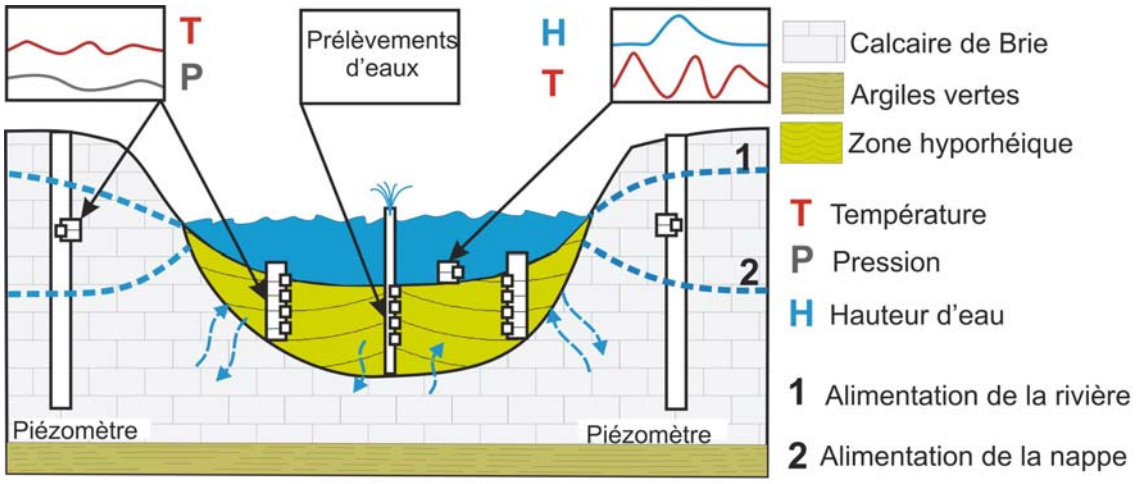


Figure15 : Schéma du dispositif expérimental (Station de mesures) constitué de captures de température et de pression, installés dans les piézomètres de bordure, dans la colonne d'eau, et en 4 profondeurs (10, 20, 30, 40 cm) de la zone hyporhéique

6 Conclusion

L'approche multi-échelles utilisée dans ce travail, s'appuie sur des méthodes hydro-géophysiques, de prospection et de caractérisation qui vont nous permettre de décrire les forçages majeurs (gradient hydraulique et structure géologique) des processus d'échanges à l'interface nappe-rivière.
L'analyse géostatistique de la piézométrie a permis de mieux caractériser la variabilité spatio-temporelle de la piézométrie du bassin avec la description de deux situations hydrologiques contrastées (hautes et basses eaux). Parallèlement à ces approches hydrogéologiques, la structure souterraine a été analysée dans le but de définir la connectivité entre le cours d'eau et le substrat

géologique. Cette analyse a été réalisée par des prospections géophysiques qui ont été validées par des carottages.
Les faciès observés par carottage ont mis en évidence l'hétérogénéité spatiale de la formation de Brie (blocs de meulière englobés dans une matrice argilo-sableuse) et les faibles épaisseurs de calcaires de Brie au sens strict.
Les quatre sections de rivière où est implanté le dispositif expérimental d'échantillonnage de la ZH représentent différents types de connectivité entre le cours eau et l'aquifère :

- ✓ deux sections amont en connection avec la formation de Brie
- ✓ deux sections intermédiaire et aval où le cours d'eau coule sur les argiles et marnes vertes et donc déconnectées de l'aquifère, mais probablement avec une présence d'une zone hyporhéique latérale.

Sur le plan expérimental, le dispositif de mesure multi-échelles est déployé sur une longueur de 3,2 km de réseau hydrographique. A chaque section de la rivière, la hauteur d'eau et la température sont enregistrées dans la colonne d'eau et des profils (1D) de température et de pression seront mesurés dans la zone hyporhéique. Ces mesures sont couplées avec l'enregistrement des températures et des hauteurs piézométriques dans les piézomètres de bordure. Trois autres piézomètres de plateau situés en amont des sections de rivière sont également suivis en termes de hauteur d'eau et de la température. Ces piézomètres vont être utilisés pour quantifier les flux d'eau, à plus grande échelle, qui convergent des plateaux agricoles aux sections de rivière du dispositif. En outre, l'observation des interfaces nappe-rivière du bassin de l'Orgeval s'inscrit dans le réseau d'observation du GIS Oracle (Figure 16). L'analyse des flux d'eau dans le bassin s'appuiera aussi sur et les données historiques du GIS ORACLE.

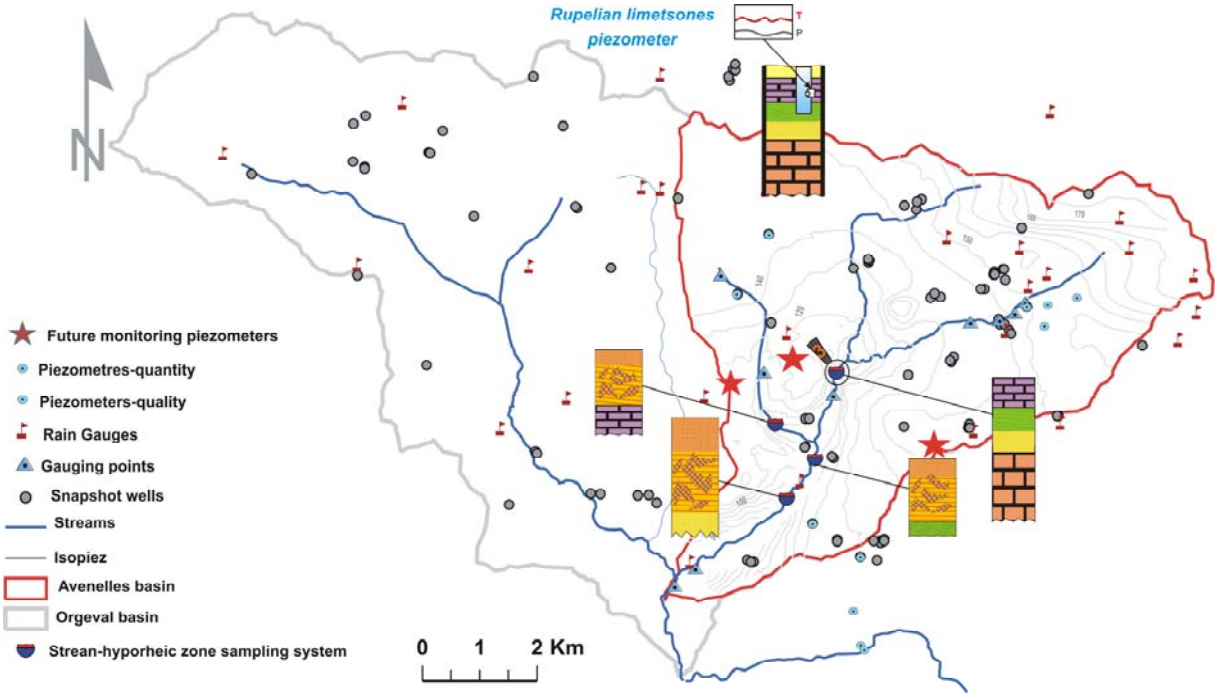


Figure 16: Présentation du réseau de mesure ORACLE, et du dispositif expérimental d'échantillonnage multi-échelles des échanges nappe-rivière.

7 Remerciements

Nous tenons à remercier le PIREN-Seine pour le financement de l'équipement de ce projet ainsi que l'ONEMA (Office National des Eaux et de Milieux Aquatiques) pour le financement, dans le cadre du projet NAPROM, d'une bourse de post-doctorat et d'une partie du fonctionnement du projet. Un grand merci à toutes les personnes qui ont contribué aux nombreuses campagnes de terrain.

8 Références bibliographiques

Brunke, M. and Gonser, T. 1997. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater, Freshwater Biol., 37, 1–33,.

Campinchii, J., Morisseau, M., 1983**.** Etude bibliographique en vue du renforcement de l'alimentation en eau potable (haute vallée du grand morin), BRGM, 83SNG 693 IDF, 27 pages.

Canipelle, A. 1964. Géologie du bassin versant de l'Orgeval (affluent du Grand Morin - région de Coulommiers S. et M.). Thèse. Paris: [s. n.].

Flipo, N. Kurtulus, B., 2011. GEO-ANFIS: application to piezometric head interpolation in unconfined aquifer unit. Proceedings of FUZZYSS'11, November 17-18 2011, Ankara, Turkey

Greswell, R., Ellis, P., Cuthbert, M., White, R., Durand, V., 2009. The design and application of an inexpensive pressure monitoring system for shallow water level measurement, tensiometry and piezometry. Journal of Hydrology. 373, 416–425.

Kurtulus, N., Flipo, N., Tallec, G., Tournebize, J., Vilain, G., Garnier. J., Ansart, P., 2009. Caractérisation des contributions de surface et hydrogéologique du bassin de l'Orgeval, site expérimental du GIS ORACLE, par interpolation de données piézométriques. Comparaison de méthodes géostatistiques. GFHN, 2009, 7 pages.

Kurtulus, N., Flipo, N., 2011. Hydraulic head interpolation using ANFIS - Model selection and sensitivity analysis. Computers and Geosciences, vol. In Press, 2011.

Megnien, C., 1979. Hydrogéologie du centre du bassin de Paris. Mémoire BRGM.

Mouhri A ; Saleh, F., Flipo, N. 2012. Etat de l'art sur les méthodes de caractérisation et de quantification des échanges nappe-rivière, rapport PIREN-Seine, 30p.

Mouhri, A., Flipo, N., Rejiba, F., Durand, V., Tallec, G., Kurtulus B., de Fouquet, C., Jost, A., Bodet L. 2011 a: Mise en place d'un dispositif expérimental multi échelle pour quantifier les échanges nappe-rivière dans un système aquifère multicouche. 8eme Colloque de GFHN-GEOFCAN, 29 novembre – 1er décembre 2011 – ORLEANS , France.246-251p

Mouhri, A., Flipo, N., Rejiba, F., Durand, V., Tallec, G., Kurtulus B., de Fouquet, C., Jost, A., Bodet L. 2011 b : Designing a multiscale experimental sampling system for quantification of stream-aquifer water exchanges – the Orgeval basin case study (France). AGU, San Francisco, December 5-9, 2011.

Polus, E., Flipo, N., de Fouquet, C., Poulin, M., 2011. Geostatistics for assessing the efficiency of distributed physically-based water quality model. Application to nitrates in the Seine River. Hydrol. Process 25, 217-233. doi:10.1002/hyp.7838.

Schwoerbel, J. 1961. Ueber die Lebensbedingungen und die Besiedlung des hyporheischen Lebensraumes, Archiv fuer Hydrobiologie, Suppl. 25, 182–214.

Woessner, W. W. 2000. Stream and fluvial plain ground water interactions: Rescaling hydrogeologic thought, Ground Water, 38(3), 423–429.

Annexe 1

krigeage « de bloc »	effectif	Min	Max	moyenne	écart-type
KB_profondeurZNS_avril09	169653	-0.05	3.14	0.92	0.67
KB_profondeurZNS_sept09	169653	-0.37	5.98	2.79	1.38
KB_profondeurZNS_juin11	169653	-0.04	2.80	1.05	0.64
KB_profondeurZNS_oct11	169653	-0.22	5.76	2.24	1.20

écart-type d'estimation	effectif	Min	Max	moyenne	écart-type
sKB_profondeurZNS_sept09	169653	0.22	1.36	0.80	0.20
sKB_profondeurZNS_avril09	169653	0.32	1.09	0.89	0.20
sKB_profondeurZNS_juin11	169653	0.25	1.08	0.69	0.22
sKB_profondeurZNS_oct11	169653	0.24	1.28	0.84	0.20

Tableau : Résumé statistique du krigeage de la profondeur ZNS (krigeage « de bloc », voisinage unique).

estimation (krigeage)	avril 09	sept. 09	juin 11	oct. 11
avril 09	1.00	0.53	0.77	0.32
septembre 09	0.53	1.00	0.69	0.86
juin 11	0.77	0.69	1.00	0.68
octobre 11	0.32	0.86	0.68	1.00

écart-type d'erreur	avril 09	sept. 09	juin 11	oct. 11
avril 09	1.00	0.84	0.93	0.81
septembre 09	0.84	1.00	0.77	0.89
juin 11	**0.93**	0.77	1.00	0.74
octobre 11	0.81	0.89	0.74	1.00

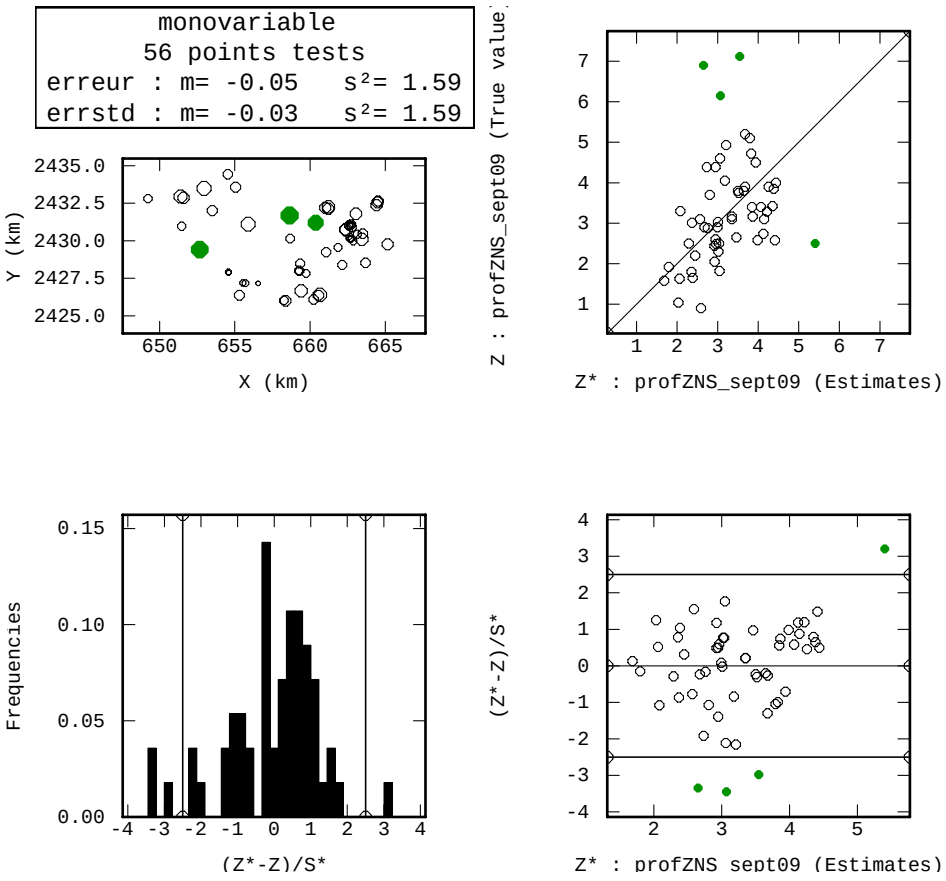
Tableau : Coefficients de corrélation des estimations et des écarts-types d'erreur. Krigeage « de bloc », voisinage unique.

cote piézométrique $MNT_{régularisé(250m)} - Profondeur^{K}$	effectif	Minim	Maxim	moyenne	Ec-type
cote piézométrique avril09	169520	73.38	185.03	148.00	15.70
cote piézométrique sept09	169520	73.93	183.64	146.13	15.23
cote piézométrique juin11	169520	73.42	184.95	147.87	15.64
cote piézométrique oct11	169520	73.78	183.88	146.68	15.25

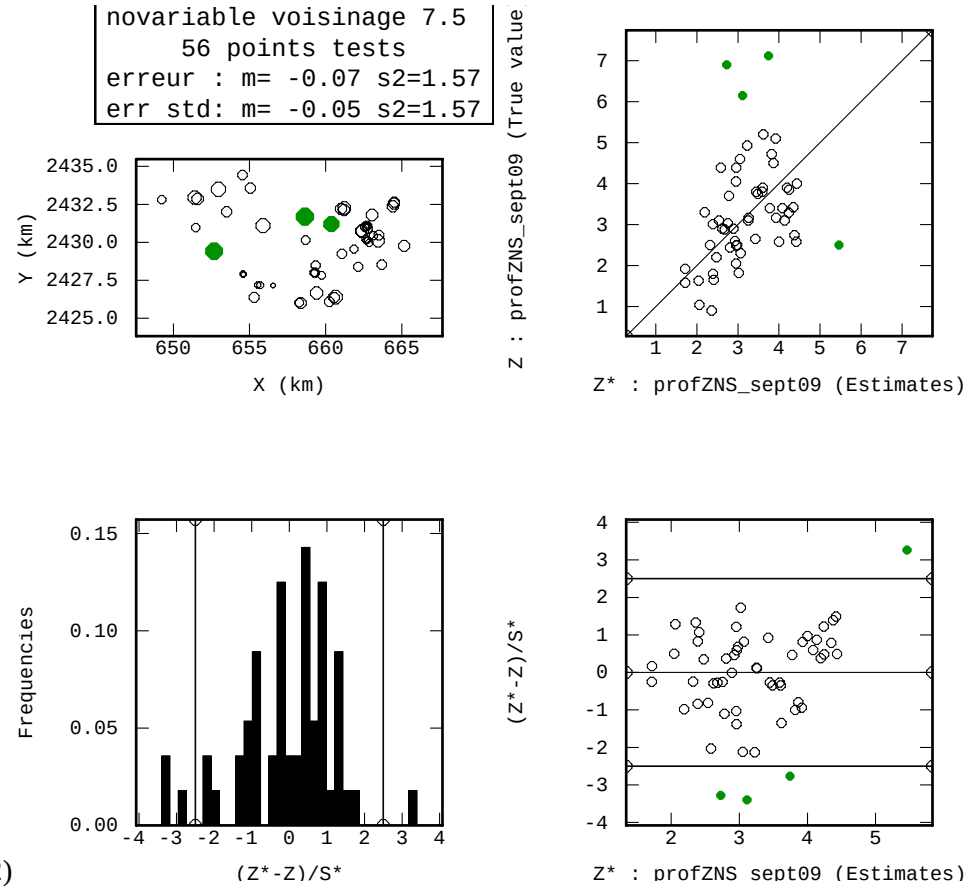
Tableau Résumé statistique de la cote piézométrique estimée par la différence entre le MNT régularisé (à 250m) et le krigeage de la profondeur.

Annexe 2

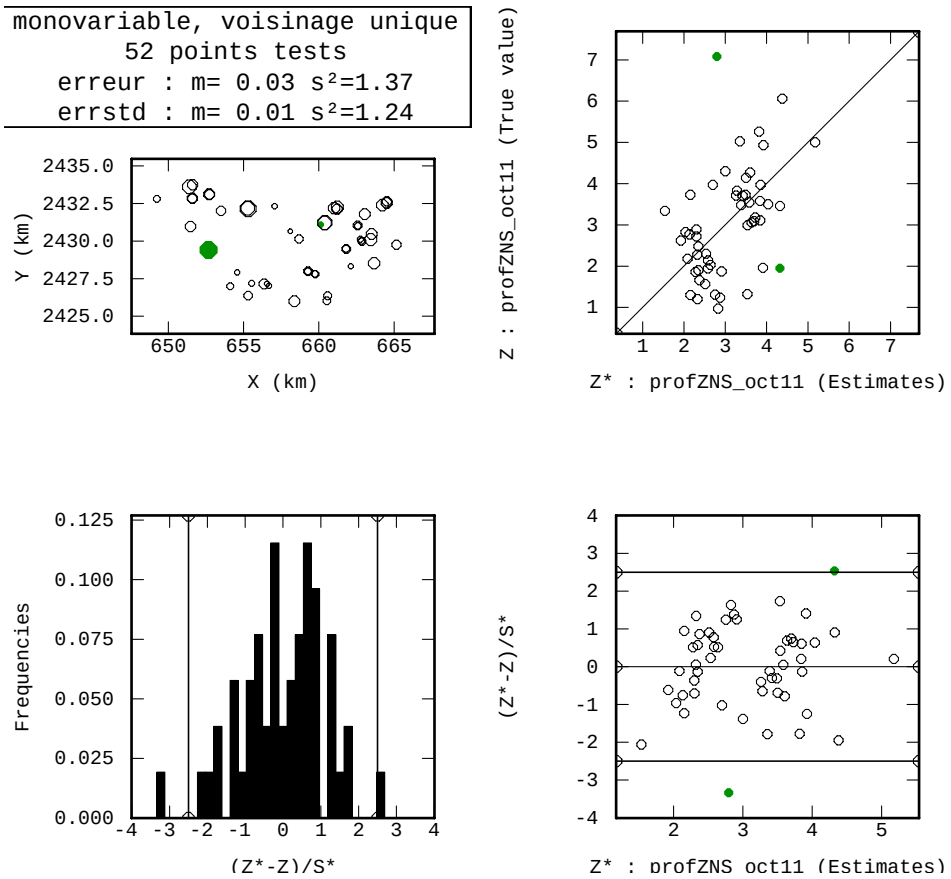
Résultats des tests de validation croisée, cas monovariable.
1) Septembre 2009, voisinage unique
2) Septembre 2009, voisinage glissant 7.5km
3) octobre 2011, voisinage unique
4) octobre 2011, voisinage glissant
5) Septembre 2009, voisinage unique, puits & sources
6) octobre 2011, voisinage unique, puits & sources


monovariable
56 points tests
erreur : m= -0.05 s²= 1.59
errstd : m= -0.03 s²= 1.59
Y (km)
X (km)
Z : profZNS_sept09 (True value)
Z* : profZNS_sept09 (Estimates)
Frequencies
(Z*-Z)/S*
(Z*-Z)/S*
Z* : profZNS_sept09 (Estimates)

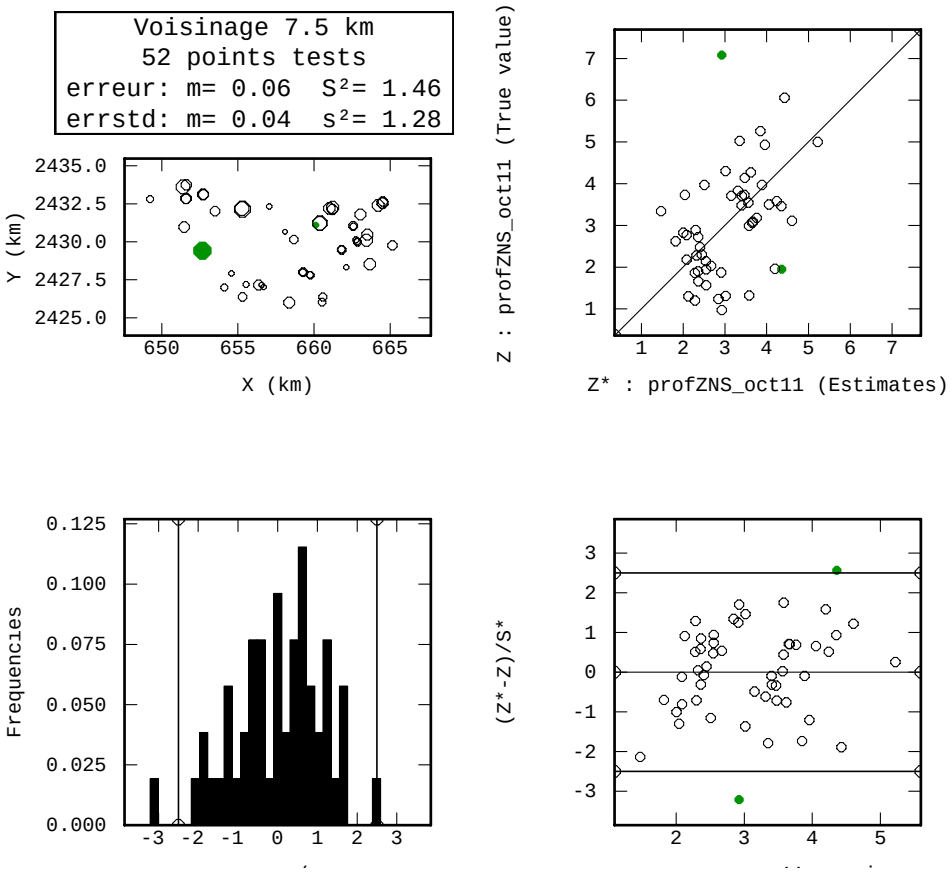
1)


novariable voisinage 7.5
56 points tests
erreur : m= -0.07 s2=1.57
err std: m= -0.05 s2=1.57
Y (km)
X (km)
Z : profZNS_sept09 (True value)
Z* : profZNS_sept09 (Estimates)
Frequencies
(Z*-Z)/S*
(Z*-Z)/S*
Z* : profZNS_sept09 (Estimates)

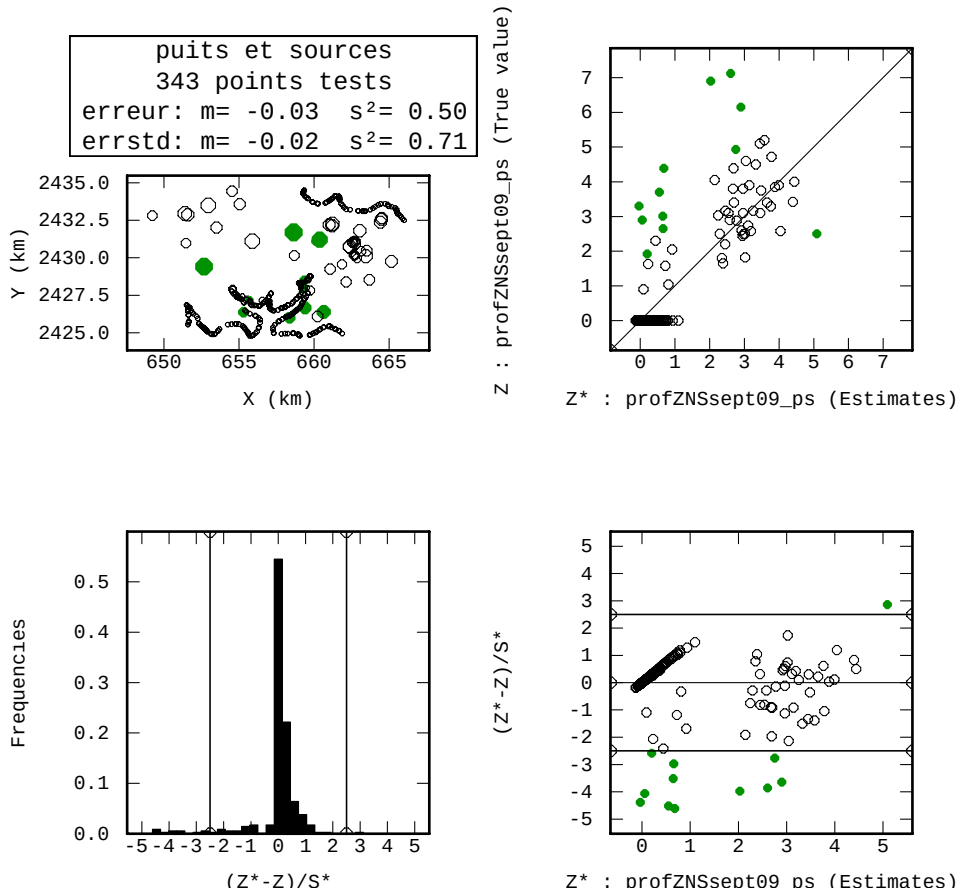
2)


monovariable, voisinage unique
52 points tests
erreur : m= 0.03 s²=1.37
errstd : m= 0.01 s²=1.24
Y (km)
X (km)
Z : profZNS_oct11 (True value)
Z* : profZNS_oct11 (Estimates)
Frequencies
(Z*-Z)/S*
(Z*-Z)/S*
Z* : profZNS_oct11 (Estimates)

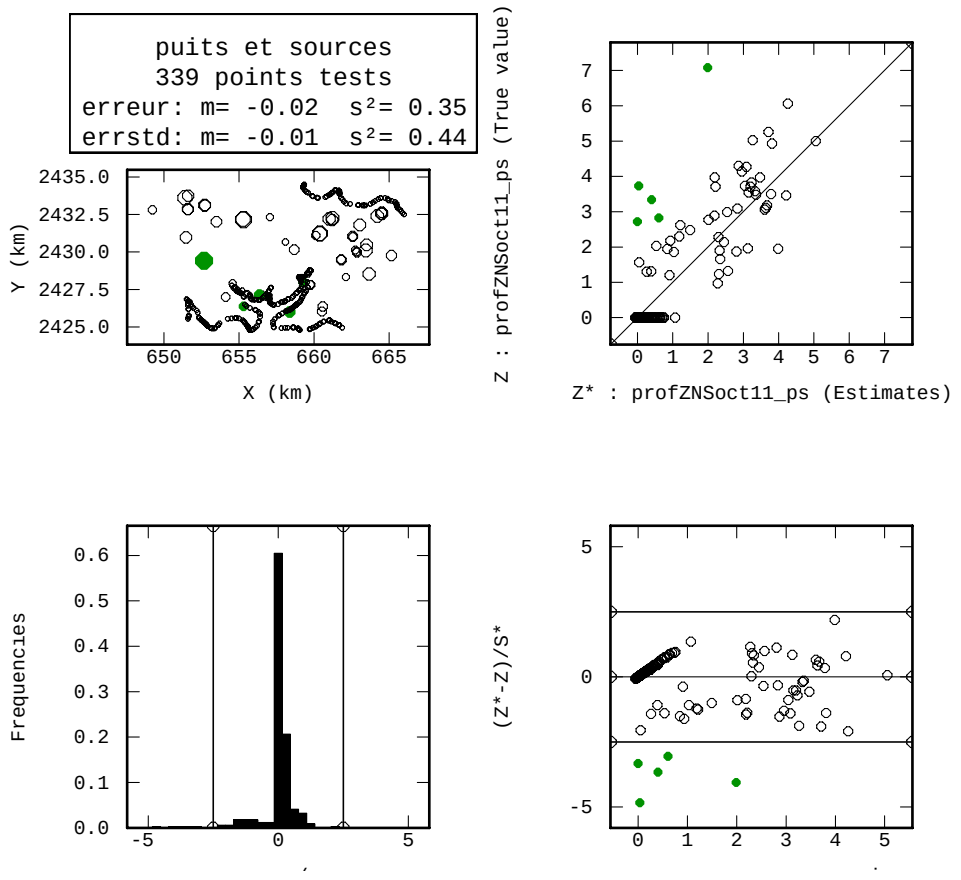
3)


Voisinage 7.5 km
52 points tests
erreur: m= 0.06 S²= 1.46
errstd: m= 0.04 s²= 1.28
Y (km)
X (km)
Z : profZNS_oct11 (True value)
Z* : profZNS_oct11 (Estimates)
Frequencies
(Z*-Z)/S*

4)


puits et sources
343 points tests
erreur: m= -0.03 s²= 0.50
errstd: m= -0.02 s²= 0.71
Y (km)
X (km)
Z : profZNSsept09_ps (True value)
Z* : profZNSsept09_ps (Estimates)
Frequencies
(Z*-Z)/S*
(Z*-Z)/S*
Z* : profZNSsept09_ps (Estimates)

5)


puits et sources
339 points tests
erreur: m= -0.02 s²= 0.35
errstd: m= -0.01 s²= 0.44
Y (km)
X (km)
Z : profZNSoct11_ps (True value)
Z* : profZNSoct11_ps (Estimates)
Frequencies
(Z*-Z)/S*

6)