

Premiers retours sur la faisabilité du traçage des écoulements à l'aide des isotopes stables de l'eau et du radon

Sophie Guillon^{1*}, Agnès Rivière¹, Nicolas Flipo¹

^{1 2} MINES ParisTech, PSL Research University, Centre de Géosciences, 77300 Fontainebleau

* sophie.guillon@mines-paristech.fr

Résumé

L'étude des échanges nappe-rivière par le PIREN Seine est conduite sur le bassin des Avenelles depuis 2011. Cette étude permet, à partir de mesures des températures de l'eau et des différences de charge entre les nappes et les cours d'eau, de quantifier les flux d'eau échangés. Afin de pouvoir valider ces quantifications, d'autres méthodes d'estimation des échanges sont ici proposées.

Les isotopes stables de l'eau et le radon-222 permettent d'identifier d'une part les temps de transit et temps de résidence des eaux souterraines et de surface, et d'autre part les échanges nappe-rivière, plus spécifiquement les apports d'eau souterraine, de l'échelle d'une crue à l'échelle saisonnière. Le contraste de concentration en radon entre les eaux de surface et les eaux souterraines est élevé, ce qui devrait permettre d'identifier les zones d'apport à la rivière.

Le suivi de l'évolution saisonnière de la composition isotopique dans les eaux souterraines et de surface a été initié. Pour le moment, les variations saisonnières apparaissent très atténuées comparées à celle dans les précipitations, indiquant une faible fraction d'eaux jeunes dans la rivière. La séparation des hydrogrammes de crue à partir des traceurs géochimiques permettra d'interpréter ces premières observations.

Introduction

Le bassin des Avenelles fait l'objet d'une étude approfondie ayant pour objectif de mieux comprendre les processus d'échanges entre les eaux des nappes phréatiques et les eaux du système hydrographique. Ces travaux se focalisent sur la relation complexe entre les processus hydrologiques basse fréquence se développant à l'échelle des aquifères de grande extension spatiale et les processus hydrologiques haute fréquence se développant dans les cours d'eau. Un dispositif expérimental de suivi des échanges (station MoLoNaRi) a ainsi été développé sur le bassin depuis plusieurs années (Mourhi et al., 2013 ; Berrhouma et al., 2016). Les données récoltées servent de support à une modélisation hydrologique et hydrogéologique du bassin autour de l'interface nappe-rivière. Dans ces stations MoLoNaRi, la hauteur d'eau en rivière, le niveau piézométrique dans les nappes phréatiques ainsi que les températures sont mesurées en continu depuis fin 2012. Ces mesures ont permis d'établir un premier bilan hydrologique du bassin (Mouhri et al. 2013). Afin de valider ces premières estimations, le PIREN Seine s'intéresse aujourd'hui à l'utilisation de traceurs géochimiques. Les premières campagnes basées sur les ions majeurs et les éléments nutritifs ont montré un bon accord entre les interprétations hydrogéophysiques (Berrhouma et al., 2016) et le suivi géochimique (Mouchel et al., 2016). Néanmoins là où des incertitudes demeurent, d'autres traceurs sont mobilisés. A cet effet, des méthodes de traçage des masses d'eau souterraines et de surface basées sur le suivi des isotopes stables de l'eau et du radon sont ici testées.

1 Dispositif de suivi des isotopes stables de l'eau et du radon dissous sur le bassin versant des Avenelles

Le suivi de 3 traceurs géochimiques, isotopes stables de l'eau, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ et $^2\text{H}/^1\text{H}$, et radon-222 dissous, a été initié début 2017 sur le bassin versant de l'Orgeval, avec d'une part des campagnes de mesure mensuelles aux différentes stations de suivi (Mouhri et al., 2013), et un suivi à plus haute fréquence à l'amont et à l'aval du bassin.

1.1 Campagnes de prélèvements dans les différents compartiments de l'hydrosystème

Les campagnes de prélèvements ont débuté en mars 2017, et ont lieu environ tous les 1 mois et demi.

Les prélèvements d'eau sont réalisés dans la nappe de Brie au niveau de 4 piézomètres de plateau (PZ2f, PZPS1, PZPS4, PZPS6), dans le ru des Avenelles en amont (riv0 ou Mélarchez), au milieu du bassin (stations riv2 et riv4) et en aval (riv5 ou Avav), ainsi que dans le ru Bergeresse à l'ouest du bassin (riv1) (Figure 1). Pour chaque point d'échantillonnage en rivière (excepté à la station riv0), des prélèvements sont réalisés dans les piézomètres de berge associés. Actuellement, les sources et drains n'ont pas été échantillonnés.

Pour chacun des 15 points de prélèvement, les paramètres physico chimiques (température, conductivité électrique, pH et potentiel rédox, sonde multiparamètres HI9828, HANNA) ainsi que la teneur en oxygène dissous (optode, Mettler Toledo) sont mesurés sur le terrain. Dans les piézomètres de berge et de plateau, une pompe péristaltique est utilisée pour prélever l'eau. Une fois que les valeurs des paramètres physico-chimiques sont stables, soit après 4 à 6 L de pompage, un échantillon de 50 mL (flacon PEHD) est prélevé pour les isotopes stables de l'eau, et un échantillon de 250 mL (flacon en verre) pour le radon dissous.

Le radon-222 dissous est mesuré par spectroscopie alpha après dégazage de l'eau (RAD H2O, DurrIDGE) dans les 48 h suivant le prélèvement. La limite de détection, mesurée sur un échantillon d'eau de 250 mL ne contenant pas de radon, est autour de 100 Bq.m^{-3} .

La composition isotopique de l'eau est mesurée au Centre de Géosciences de l'Ecole des Mines de Paris par spectrométrie de masse (Isoprime100-Aquaprep, Elementar). La composition isotopique est exprimée avec la notation $\delta^{18}\text{O}$, en ‰ par rapport au SMOW :

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{R_{ech}}{R_{SMOW}} - 1 \quad \text{avec } R = \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \quad (1)$$

où R_{ech} est le rapport isotopique dans l'échantillon, R_{SMOW} celui dans du standard international SMOW (Standard Mean Oceanic Water). Deux standards secondaires sont utilisés au laboratoire pour la calibration des mesures par rapport au SMOW.

1.2 Echantillonnage des précipitations

Les précipitations constituent le terme source de l'eau du bassin versant, qui doit donc être particulièrement bien échantillonné. Un pluviomètre collecteur (Palmex) spécialement conçu pour limiter l'évaporation et donc le fractionnement isotopique (Groening et al., 2012) a été installé à la ferme de la Derrier, au milieu de la partie aval du bassin. Les précipitations cumulées sont collectées une fois par mois, leur quantité déterminée et un échantillon prélevé pour l'analyse de la composition isotopique de l'eau. En novembre 2017, le pluviomètre a été déplacé au centre IRSTEA de Boissy-le-Chatel afin de faciliter la collecte, avec une fréquence de prélèvement hebdomadaire.

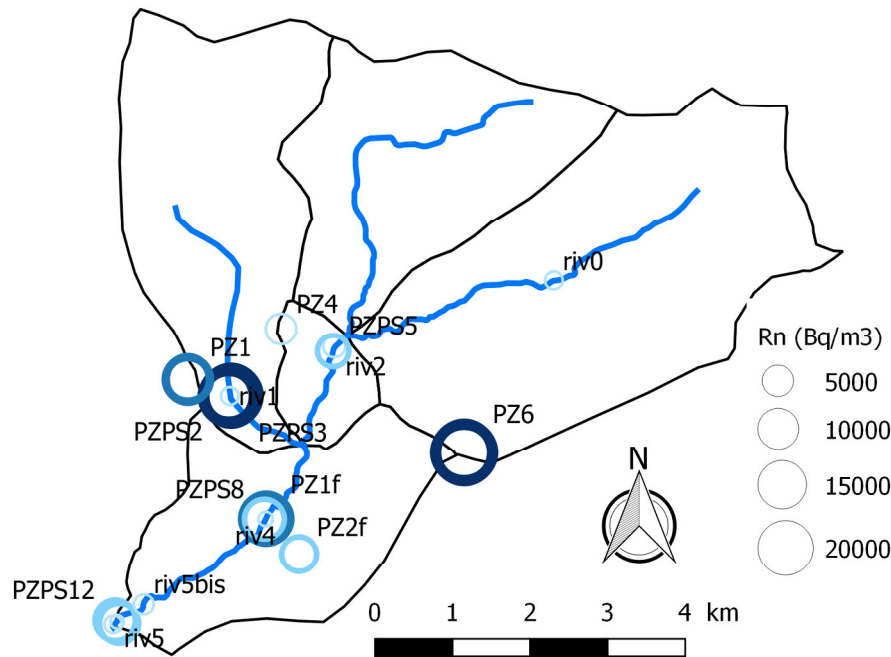


Figure 1 : Localisation des points d'échantillonnage pour le radon et les isotopes de l'eau dans le ru des Avenelles (points riv), les piézomètres de berge et la nappe de Brie (points PZPS et PZ). L'activité en radon mesurée en novembre 2017 est représentée par les tailles des symboles.

1.3 Suivi automatique à haute fréquence dans le ru des Avenelles

Dans l'optique d'utiliser les isotopes stables de l'eau pour la séparation des hydrogrammes de crue, un suivi plus haute fréquence est réalisé dans le ru des Avenelles au niveau des stations riv0 en amont et riv5bis en aval (River Lab, Floury, 2017) (Figure 1). L'alimentation électrique présente à ces deux points permet d'utiliser des préleveurs péristaltiques automatiques (ISCO à la station riv0, Endless Hauser à la station riv5bis). Deux prélèvements de 50 à 100 mL sont réalisés chaque jour, à 4h et 16h (heure d'hiver). Les prélèvements de 3 jours consécutifs sont agrégés dans un même flacon. De l'huile de paraffine est utilisée pour limiter l'évaporation et le fractionnement isotopique de l'eau une fois échantillonnée. Les échantillons d'eau sont récupérés après décantation, puis la composition isotopique de l'oxygène est mesurée. En juillet et août 2017, le niveau d'eau dans le ru était très bas et les prélèvements n'ont pas pu être réalisés à l'amont en raison du dénoisement de la crépine de prélèvement.

Ce système de prélèvement sera utilisé pour l'échantillonnage de crue, avec un pas de temps de 1 h pendant 24h pour échantillonner le pic de crue, puis un pas de temps de 4h pendant 4 jours.

Une amélioration du système de prélèvement permettrait de s'affranchir de l'huile de paraffine, avec des flacons de prélèvements clos, et un ensemble de rotor et de vannes pour remplir chaque flacon successivement.

2 Utilisation des isotopes stables de l'eau à l'échelle du bassin versant : échanges nappe-rivière et temps de résidence de l'eau

Le débit journalier du ru des Avenelles en amont (station riv0) et en aval (station riv5), ainsi que la pluviométrie journalière sur le site de Boissy-le Chatel à quelques kilomètres seulement au sud-est du bassin, sont mesurées en continu par IRSTEA, et accessibles via la base de données BD_OH. Ces données sont présentées en Figure 2.

2.1 Résultats préliminaires des campagnes mensuelles

Le suivi mensuel de la composition isotopique des précipitations montre une cyclicité annuelle d'environ 4 ‰ d'amplitude, avec des compositions appauvries en isotopes lourds autour de -9 ‰ en hiver, et enrichies en isotopes lourds autour de -5 à -4 ‰ en été (Figure 3).

Aucune structuration spatiale n'a pour le moment pu être identifiée pour la composition isotopique de l'oxygène de l'eau, et on s'intéresse donc ici à la variabilité temporelle.

La totalité des mesures de compositions isotopiques réalisées à ce jour sont rassemblées dans le diagramme $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ en Figure 4. Les précipitations permettent de définir la droite des eaux météoriques locales (Local Meteoric Water Line, LMWL, $\delta^2\text{H} = 7.43 \delta^{18}\text{O} + 3.88$, Figure 4). Toutes les compositions isotopiques mesurées dans les eaux souterraines, les alluvions avec les piézomètres de berge, et les eaux de surface, s'alignent également le long de cette droite. L'évaporation entraîne un fractionnement isotopique et donc une déviation sous la droite des eaux météoriques. La transpiration, n'entraîne en revanche pas de fractionnement isotopique. Dans un contexte de climat tempéré, les mesures confirment la prédominance de la transpiration sur l'évaporation.

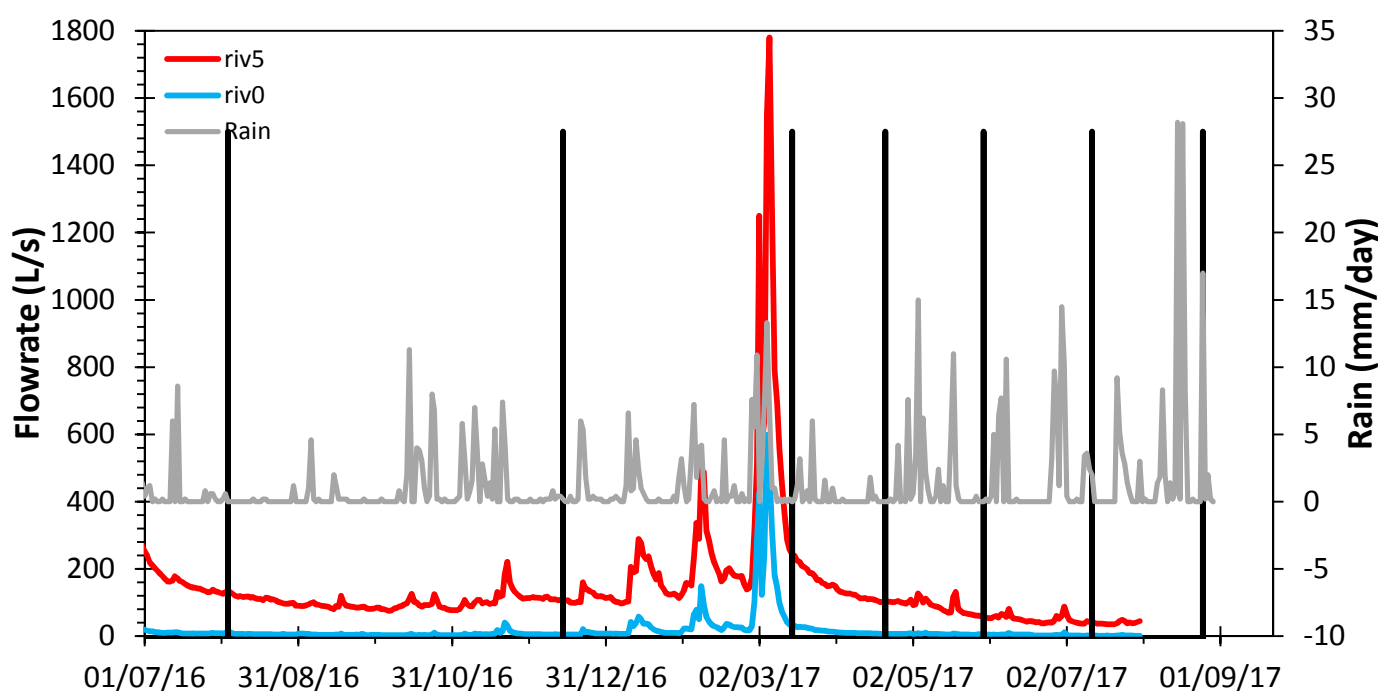


Figure 2 : Précipitation (gris) à Boissy le Chatel, débit du ru des Avenelles en amont (riv0, rouge) et en aval (riv5bis, bleu) du bassin (données BDOH). Les traits verticaux noirs indiquent les campagnes d'échantillonnage.

La Figure 5a présente les évolutions temporelles du $\delta^{18}\text{O}$ dans les eaux de surface et les piézomètres de berge associés. Une variabilité saisonnière semble se dessiner pour la composition isotopique des eaux de surface, avec une amplitude inférieure à 1 ‰, très atténuée par rapport à celle dans les précipitations. Cette forte atténuation indique un temps de résidence moyen plutôt long, et une faible fraction des eaux jeunes de moins de 2-3 mois (Kirchner, 2016).

La composition isotopique de l'aquifère de Brie (Figure 5b) apparaît globalement homogène à l'échelle du bassin, moyennant une légère cyclicité saisonnière de moins de 0.5 ‰ d'amplitude. Le léger enrichissement dans les eaux souterraines ($\delta^{18}\text{O} = -6.75$ ‰) par rapport à la moyenne pondérée dans les précipitations locales ($\delta^{18}\text{O} = -7.4$ ‰), qui n'est pas visible clairement sur le diagramme $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ (Figure 4) pourrait être du à une légère reprise évaporatoire de l'eau contenue dans les sols (Barnes et al.lison, 1988).

L'évolution longitudinale de la composition isotopique dans la rivière n'est pas constante au cours de l'année, avec un $\delta^{18}\text{O}$ qui peut être homogène le long de la rivière, comme en avril et juin 2017, mais également des différences jusqu'à 1 ‰ comme en mars 2017. En été, les débits dans la rivière sont faibles (Figure 2) et la composition isotopique apparaît plutôt plus enrichie ($\delta^{18}\text{O}$ plus élevé, entre -6.5 et -6.0 ‰,

Figure 5a). Cet enrichissement est compatible avec une évaporation plus importante dans une rivière à faible débit et avec les températures plus élevées en été. Le suivi en hiver en périodes de hautes eaux qui va être réalisé fin 2017 et début 2018 permettra de confirmer ces résultats.

Dans les piézomètres de berge à la station aval, la composition isotopique est semblable à celle de la rivière, indiquant une connexion importante entre la rivière et ses alluvions. En revanche, à la station riv4 où les alluvions sont connues pour être plus riches en argiles, la composition isotopique du piézomètre de berge est peu variable autour de -7.0 ‰, valeur comprise entre les compositions moyennes des précipitations et de la nappe.

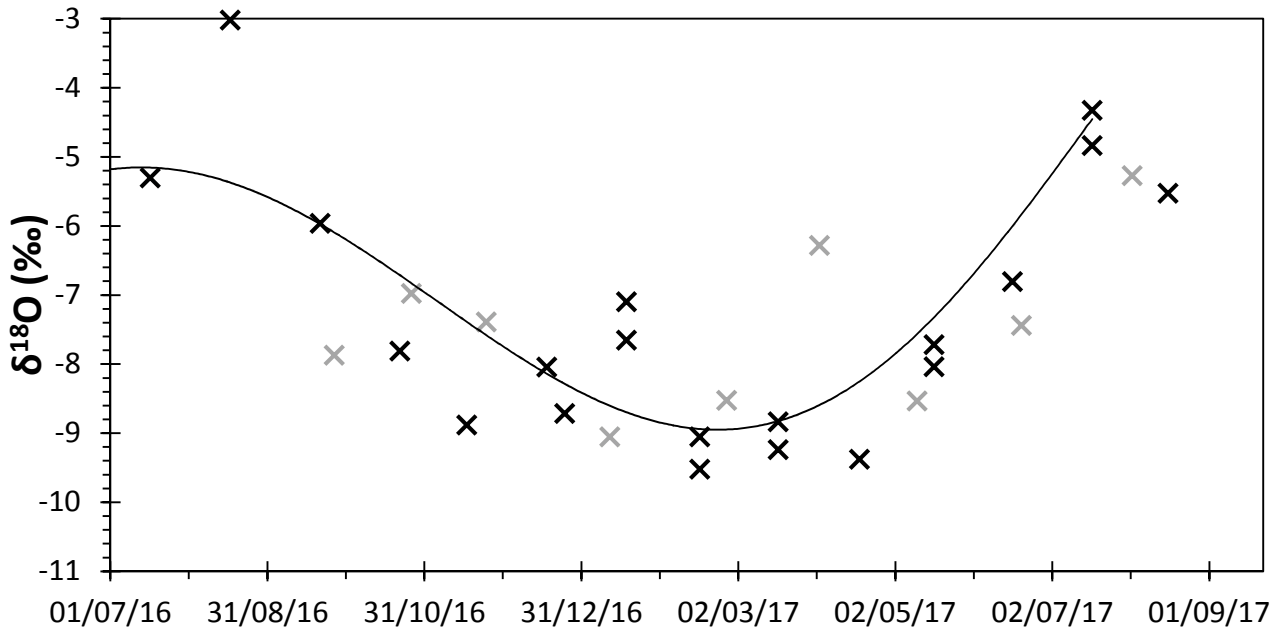


Figure 3 : Evolution de la composition isotopique de l'oxygène dans les précipitations à Fontainebleau (noir) et sur le bassin des Avenelles (gris), suivant une variation saisonnière sinusoïdale (courbe noire).

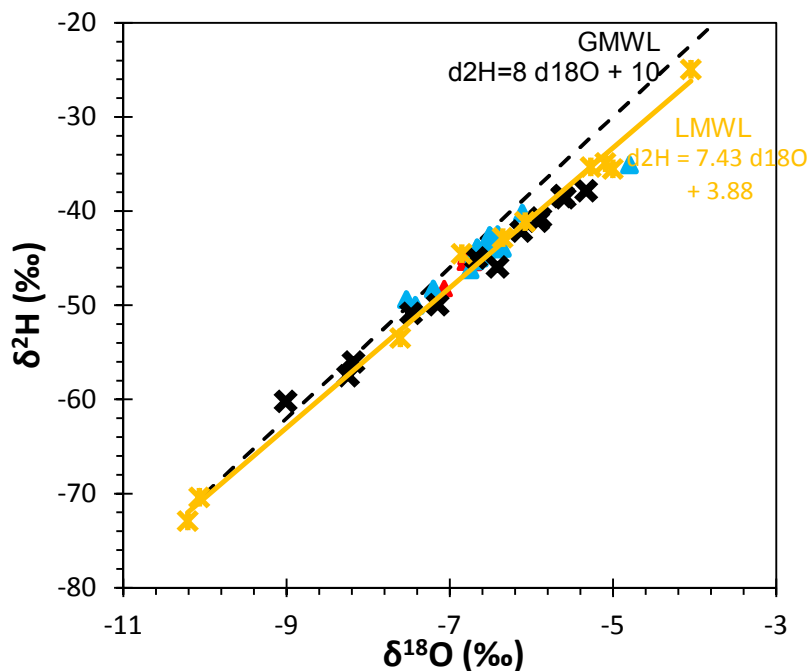


Figure 4 : Composition isotopique des précipitations (x), aquifère de Brie (x) et eaux de surface (Δ amont, Δ aval). Les droites des eaux météoriques mondiales (GMWL) et locales (LMWL) sont indiquées.

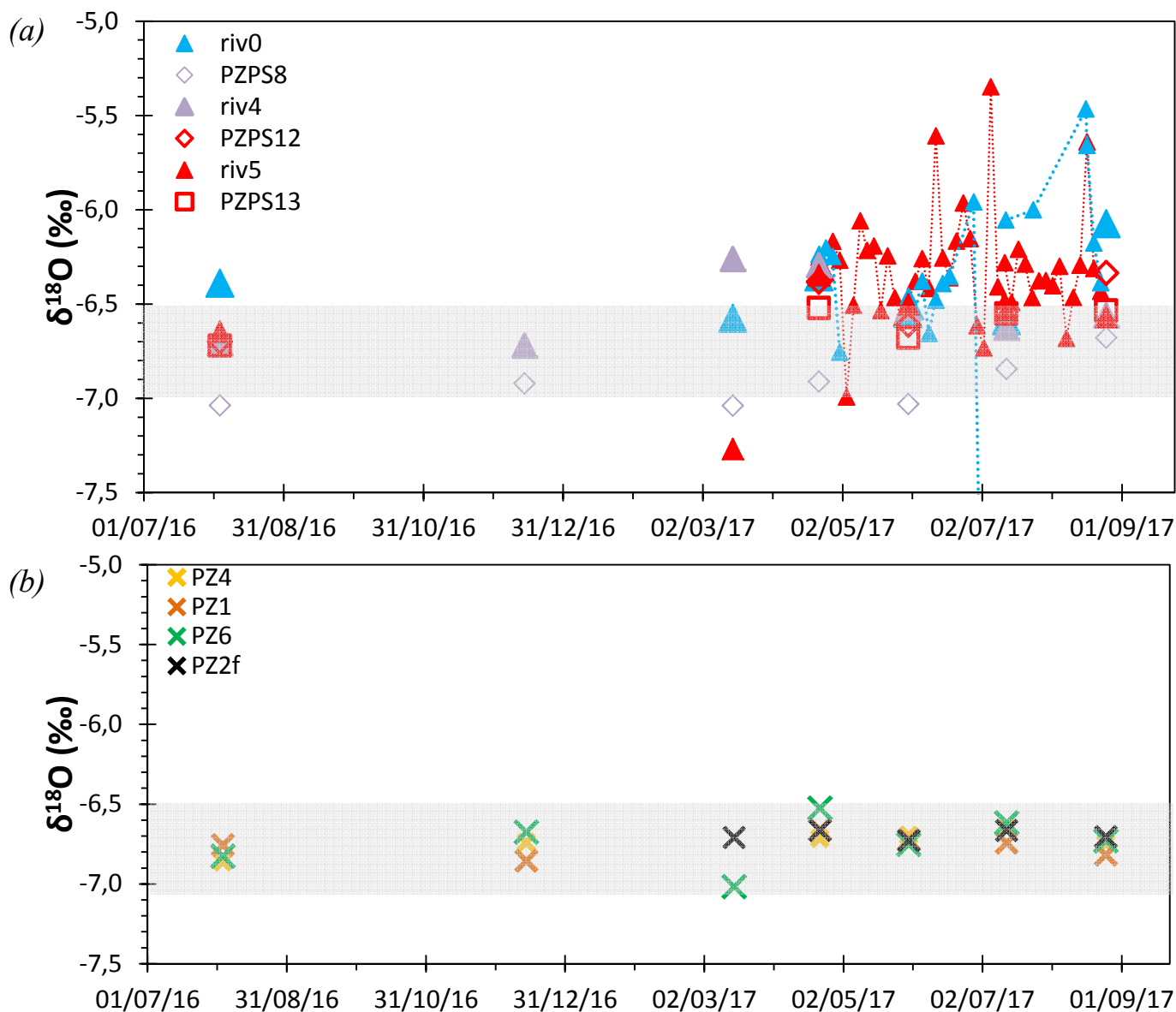


Figure 5: Evolution du $\delta^{18}O$ (a) dans le ru des Avenelles (triangles) et dans les piézomètres de berge associés (losanges et carrés), en amont (bleu), au milieu du bassin (gris) et en aval (rouge), et (b) dans l'aquifère de Brie (croix).

Ces observations sont globalement en accord avec les résultats d'études précédentes basées sur la température de l'eau (Berrhouma et al., 2016) et les éléments majeurs (Mouchel et al., 2016). Néanmoins, nous cherchons à obtenir des éléments quantitatifs en termes de flux échangés. Ces premiers résultats indiquent que la faible variabilité des compositions isotopiques limite grandement l'analyse régionale. A cet effet des voies d'analyses événementielles (à pas de temps fins) sont étudiées dans la section suivante afin de décomposer les hydrogrammes de crue. Cela permettrait alors de valider des méthodes analytiques qui pourraient ensuite être utilisées en routine sur la base de la connaissance des variables hydrologiques classiques. Les données isotopiques régionales pourraient alors être réanalysées à la lumière de ces informations pour mieux quantifier les incertitudes.

3 Utilisation des isotopes stables de l'eau pour la séparation des hydrogrammes de crue

3.1 Intérêt par rapport au modèle du bassin versant

Le modèle CaWaQS du bassin de l'Orgeval représente les écoulements souterrains et de surface et leurs couplages. Ce modèle est constitué de différentes bibliothèques qui permettent de modéliser les écoulements dans chaque compartiment de l'hydrosystème (eau de surface, eau souterraine). Les différentes interfaces entre les compartiments sont modélisées elles aussi grâce à des bibliothèques de couplage. Deux étapes de calibration sont nécessaires (Labarthe et al., 2015). La première partie permet de calibrer le bilan de surface du bassin avec les débits en rivière mesurés. Le modèle souterrain est calibré grâce aux mesures piézométriques. Le couplage entre ces deux compartiments est calibré grâce aux stations MoLoNaRi (Rivière et al., 2014).

Pour la partie des échanges nappe-rivière, les traceurs isotopiques et le radon vont nous permettre de valider ces estimations d'échanges nappe-rivière ainsi que le temps de transit de l'eau en rivière et dans les aquifères profonds. En effet, les traceurs géochimiques permettent une séparation indépendante des différentes contributions au débit de la rivière lors d'événements de crues grâce à un bilan massique dans les différents compartiments.

3.2 Approche classique de séparation des hydrogrammes de crue

La séparation basée sur les traceurs chimiques, ions, conductivité ou encore isotopes stables de l'eau, sépare les contributions en conditions hydrologiques avant crue (eau de rivière) et pendant la crue (eau de pluie). L'hypothèse posée est que les eaux avant un événement de crue sont principalement constituées des eaux de l'aquifère. Les eaux pendant l'événement de crue sont uniquement liées aux eaux de ruissellement et de pluie. Pour un événement de crue, la proportion d'eau provenant de la nappe avant la crue s'exprime alors par :

$$b_k = y_k \cdot \frac{\delta_{riv,k} - \delta_{pluie}}{\delta_{prev} - \delta_{pluie}} \quad (4)$$

Où b_k (resp. y_k) est le débit de la nappe (resp de la rivière) à l'instant k , $\delta_{riv,k}$ est la composition isotopique mesurée dans la rivière à l'instant k , δ_{pluie} (resp δ_{prev}) est la composition isotopique de l'eau des précipitations associées à la crue (resp. de l'eau de la rivière juste avant la crue).

Pour réaliser cette séparation, il est nécessaire d'avoir un échantillonnage haute-fréquence de la composition isotopique dans la rivière, en particulier pendant la montée du pic de crue, ainsi que des précipitations au moment de la crue. Il serait également intéressant de capturer plusieurs événements de crue d'intensités différentes, aux différentes saisons, pour des précipitations d'intensité différentes. Les résultats obtenus sur un bassin versant expérimental en Suisse, où le suivi de la composition isotopique dans les précipitations et la rivière est réalisé in situ à haute fréquence grâce à un analyseur laser installé sur le terrain, ont montré que la fraction d'eau liée au ruissellement et à la pluie n'est pas corrélée à l'intensité de la crue, mais avec l'intensité de la précipitation (Von Freyberg, 2017).

La séparation des hydrogrammes de crue à l'aide des isotopes stables de l'eau a déjà été appliquée par Roussel (1995) en amont (Mélarchez, station riv 0) et en aval (Theil, aval de la station riv5) du bassin, avec des contributions de l'eau de nappe d'environ 80 %. Paret (2001) a également appliqué la méthode sur deux petits sous-bassins et a obtenu une proportion de 60-65 % de contribution d'eau de nappe en contexte agricole, contre 85-90 % en contexte forestier.

La limite la méthode est principalement la faible différence entre la composition isotopique de la pluie et celle de la rivière, qui si elle est trop faible, en particulier au printemps et à l'automne, ne permet pas d'utiliser l'Equation (4).

3.3 Nouveaux outils et perspectives

Des travaux récents (Kirchner, 2017) proposent une approche particulièrement intéressante de séparation des hydrogrammes à l'échelle du bassin versant. Cette nouvelle méthode permettra de déterminer une valeur moyenne de la fraction de la pluie du jour (ou de la semaine) qui se retrouve dans la rivière le jour (ou la semaine) même. Cette méthode permettra également d'estimer la distribution des âges de l'eau de la rivière.

Les paramètres de séparation obtenus avec les isotopes de l'eau pourront également être comparés avec ceux issus des données de chimie (Floury, 2017), et permettront de discuter l'importance éventuelle d'une troisième composante dans le modèle de mélange (drains agricoles ou ruissellement de sub-surface). Enfin, l'utilisation du radon pour la séparation des hydrogrammes est à envisager, car il existe un gradient de concentration entre l'eau de la rivière avant la crue qui contient un peu de radon, et l'eau de pluie-ruissellement, qui n'en contient pas et devrait donc entraîner une dilution.

4 Localisation et quantification des apports d'eau souterraine dans la rivière par la mesure du radon dissous

4.1 Principe de la méthode et modèle simple de bilan de masse

Le radon-222 est un gaz rare radioactif moyennement soluble de demi-vie 3.8 jours, issu de la chaîne de désintégration de l'uranium-238, naturellement présent dans les roches. Dans les aquifères, le radon-222 est produit par désintégration du radium-226, une fraction est libérée dans la porosité (processus d'émanation), et s'y accumule entraînant une activité élevée de plusieurs milliers de Bq m⁻³ en radon dans les eaux souterraines. Dans les eaux de surface, la production n'est en revanche plus soutenue, car la contribution du radium dissous est négligeable. La décroissance radioactive du radon et le dégazage vers l'atmosphère conduisent ainsi à des activités très faibles dans les eaux de surface. Il existe donc un fort gradient de concentration en radon entre les eaux souterraines et les eaux de surface, ce qui en fait un outil de choix pour localiser les apports d'eau souterraine dans les rivières (Cook et al., 2006, Lefebvre et al., 2015). Le bilan de matière qui régit l'évolution de l'activité en radon dissous C (en Bq m⁻³) le long d'une rivière s'écrit ainsi :

$$Q \frac{dc}{dx} = I(c_{gw} - c(t)) + w E c(t) + k w (S c_a - c(t)) - d w \lambda c(t) \quad (5)$$

Où Q est le débit de la rivière (en m³ s⁻¹), I les apports d'eau souterraine par unité de longueur de rivière (en m³ m⁻¹ s⁻¹), w la largeur de la rivière (en m), E l'évaporation (en m s⁻¹), k la constante de dégazage du radon (en m s⁻¹), S la solubilité du radon dans l'eau, c_{gw} (resp c_a) l'activité en radon dans les eaux souterraines (resp dans l'atmosphère) (en Bq m⁻³), d la profondeur de la rivière (en m), λ la constante de désintégration du radon (3.04 10⁻⁶ s⁻¹). La contribution des eaux souterraines ne peut ici pas être distinguée de celle issue des alluvions de la rivière.

Il est à noter que la mesure de l'activité en radon dans la rivière ne permet pas d'identifier les zones d'infiltration de la rivière vers la nappe, mais seulement les apports de la nappe à la rivière.

Le temps de transit de l'eau dans la rivière, depuis l'amont vers l'aval, est de 1 à 2 jours en crue, et 3 à 4 jours en étiage, ce qui est plus court que la demi-vie du radon (3.8 jours). La décroissance radioactive du radon le long de la rivière est donc peu importante.

4.2 Résultats préliminaires

Les activités en radon mesurées dans les eaux de surface (Figure 6) sont comprises entre 100 et 2000 Bq m⁻³, 1 à 2 ordres de grandeur inférieures à celles dans les piézomètres de berge de l'aquifère de Brie, entre 1000 et 20 000 Bq m⁻³ (Figure 6).

L'activité en radon dans les eaux souterraines présente une variabilité pouvant aller jusqu'à un facteur 10, mais qui n'est pas la même d'un piézomètre à l'autre (Figure 6). Les plus faibles activités, comme en PZ4, pourraient être expliquées par des infiltrations d'eau de pluie ne contenant pas de radon.

L'activité en radon élevée dans les alluvions des berges indique une part importante d'eau souterraine, et moindre d'eau de rivière. L'activité est plus élevée dans les piézomètres de berge PZPS2/3, en amont du bassin où on sait que la nappe alimente la rivière, et un peu plus basse dans les piézomètres PZ12/13 en aval du bassin, où c'est la rivière qui s'écoule dans la nappe.

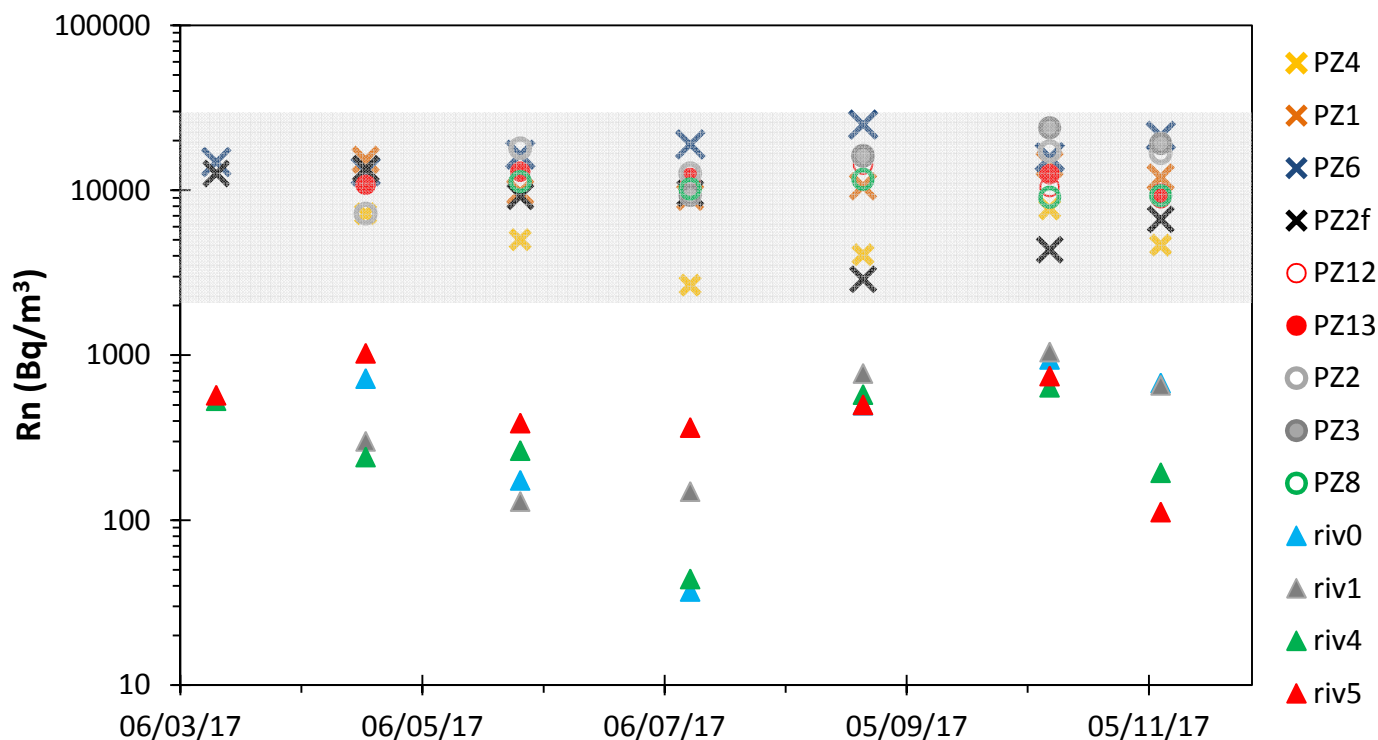


Figure 6 : Evolution de l'activité en radon-222 dissous dans les eaux de surface (triangles) et les piézomètres de berge associés (cercles) et dans l'aquifère de Brie (croix).

Dans la rivière, on observe également une variabilité spatiale et temporelle. Les activités sont plutôt élevées en août et octobre 2017, période de basses eaux, où on attend la contribution la plus forte des eaux souterraines. Cependant, les activités mesurées en juillet 2017 sont basses, alors que les débits étaient faibles (Figure 2). L'occurrence d'événements pluvieux dans les jours ayant précédé les campagnes d'échantillonnages (Figure 2) pourrait expliquer ces valeurs faibles, avec une dilution par les eaux de surface.

L'évolution du radon de l'amont vers l'aval apparaît variable au vu des données obtenues jusqu'à présent. La variabilité temporelle en chaque point semble s'atténuer de l'amont vers l'aval (Figure 6), indiquant une augmentation de la contribution des eaux souterraines au débit de la rivière.

4.3 Perspectives pour le suivi

Le suivi de l'activité en radon passera par une campagne d'échantillonnage plus détaillée, en particulier des sources, et avec un profil plus détaillé le long de la rivière (en basses eaux). Ceci permettra d'identifier plus précisément les zones d'apport d'eaux souterraines, en relation avec les résultats du modèle CaWaQS. Les processus de dégazage du radon pourront également être mieux contraints, en particulier au niveau de petites zones de reliefs du fond de la rivière, qui entraînent la formation de remous pouvant entraîner un dégazage important.

A l'exutoire du bassin des Avenelles (au niveau du River Lab-station riv5), un suivi continu pourra également être mis en place pendant plusieurs dizaines de jours à l'aide du dispositif RAD Aqua couplé à l'instrument de mesure RAD 7 (DurrIDGE). Ce suivi pourrait servir à la fois pour la séparation des hydrogrammes de crue, ainsi que pour le suivi des évolutions saisonnières des apports en eaux souterraines.

Bibliographie

- Barnes, C. J. and G. B. Allison (1988). "Tracing of water-movement in the unsaturated zone using stable isotopes of hydrogen and oxygen." *Journal of Hydrology* 100(1-3): 143-176.
- Berrhouma, A., A. Rivière, K. Cucchi, P. Goblet and N. Flipo (2016). Estimation des flux d'énergie à l'interface nappe-rivière des Avenelles. PIREN-Seine - Phase VII - Rapport 2016. 23p.
- Berghuijs, W. R. and J. W. Kirchner (2017). "The relationship between contrasting ages of groundwater and streamflow." *Geophysical Research Letters* 44(17): 8925-8935.
- Cook, P. G., S. Lamontagne, D. Berhane and J. F. Clark (2006). "Quantifying groundwater discharge to Cockburn River, southeastern Australia, using dissolved gas tracers Rn-222 and SF6." *Water Resources Research* 42(10).
- Floury, P. (2017). La dynamique des bassins versants sous l'angle de l'analyse chimique haute fréquence des rivières. PhD thesis, IPGP.
- Groening, M., H. O. Lutz, Z. Roller-Lutz, M. Kralik, L. Gourcy and L. Poltenstein (2012). "A simple rain collector preventing water re-evaporation dedicated for d18O and d2H analysis of cumulative precipitation samples." *Journal of Hydrology* 448-449: 195-200.
- Hrachowitz, M., H. Savenije, T. A. Bogaard, D. Tetzlaff and C. Soulsby (2013). "What can flux tracking teach us about water age distribution patterns and their temporal dynamics?" *Hydrology and Earth System Sciences* 17(2): 533-564.
- Kirchner, J. W. (2016). "Aggregation in environmental systems-Part 1: Seasonal tracer cycles quantify young water fractions, but not mean transit times, in spatially heterogeneous catchments." *Hydrology and Earth System Sciences* 20(1): 279-297.
- Kirchner J. W. (2017) Catchment storage and transport on timescales from minutes to months, traced by stable water isotopes, EGU Leonardo Conf. Water stable isotopes in the hydrological cycle. Black Forest, Germany. Oral presentation
- Labarthe, B. and N. Flipo (2016). Dynamique des échanges hydriques entre un réseau hydrographique, une plaine alluviale, et leur aquifère régional. PIREN-Seine - Phase VII - Rapport 2016: 23p.
- Lefebvre, K., F. Barbecot, M. Larocque and M. Gillon (2015). "Combining isotopic tracers (^{222}Rn and $\delta^{13}\text{C}$) for improved modelling of groundwater discharge to small rivers." *Hydrological Processes* 29(12): 2814-2822.
- Mouchel, J.-M., S. Rocha, A. Rivière and G. Tallec (2016). Caractérisation de la géochimie des interfaces nappe-rivière du bassin des Avenelles. PIREN-Seine - Phase VII - Rapport 2016: 27 p.
- Mouhri, A., N. Flipo, F. Rejiba, C. de Fouquet, L. Bodet, B. Kurtulus, G. Tallec, V. Durand, A. Jost, P. Ansart and P. Goblet (2013). "Designing a multi-scale sampling system of stream-aquifer interfaces in a sedimentary basin." *Journal of Hydrology* 504: 194-206.
- Mouhri, A., N. Flipo, F. Rejiba, L. Bodet, A. Jost, V. Durand and P. Goblet (2013). Caractérisation et quantification spatio-temporelle des échanges hydriques dans la vallée incisée des Avenelles. PIREN-Seine - Phase VI - Rapport 2013: 31p.
- Paret, S. (2001). Étude du fonctionnement de petits bassins versants agricoles et forestiers de l'Orgeval. Apport des isotopes stables. DEA, Université Paris Sud Orsay.
- Rivière, A., A. Mouhri, A. Baudin, A. Berrhouma, L. Bodet, K. Cucchi, E. Cuisinier, V. Durand, G. Hovhannissian, F. Rejiba, Y. Rubin and N. Flipo (2014). Développement d'un système de caractérisation in situ des propriétés hydrodynamiques et thermiques de la zone hyporhéique. PIREN Seine-Phase 6. Paris, France.
- Roussel, C. (1995). Séparation des composantes d'un hydrogramme de crue par l'utilisation de traceurs chimiques et isotopiques sur le sous-bassin amont (Mélarchez) et à l'exutoire principal du bassin versant de l'Orgeval. DEA, Université Paris Sud Orsay.
- Sprenger, M., D. Tetzlaff and C. Soulsby (2017). "Soil water stable isotopes reveal evaporation dynamics at the soil-plant-atmosphere interface of the critical zone." *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21(7): 3839-3858.
- Von Freyberg J. (2017), High-frequency analysis of isotopes and water quality in streamflow and precipitation at a snowmelt-dominated headwater catchment. EGU Leonardo Conf. Water stable isotopes in the hydrological cycle. Black Forest, Germany. Poster