

---

**« Flux et temps de transfert de polluants du bassin-  
versant à la rivière. »  
Rapport final du projet  
Carnot M.I.N.E.S. 2015  
« Traversière »**




C. FRANKE, C. ALARY,  
A. BAUDIN, A. BELLES,  
K. CUCCHI, C. DE FOUQUET,  
N. FLIPO, S. GUILLON,  
N. LAGUERRE, L. MARLOT,  
N. MARTINEAU, E. PATAULT,  
A. RIVIERE,

*Références* : N°. R26022020CFRA  
Réf. ARMINES : 50501

MINES ParisTech – Centre de Géosciences  
35, rue Saint Honoré  
77300 Fontainebleau, France

Référence type:

Franke, C., Alary, C., Baudin, A., Belles, A., Cucchi, K., de Fouquet, C., Flipo, N., Guillon, S., Laguerre, N., Marlot, L., Martineau, N., Patault, E., Rivière, A., 2019. Flux et temps de transfert de polluants du bassin-versant à la rivière. » Rapport final du projet Carnot M.I.N.E.S. 2015 Traversière, Rapport technique n° R26022020CFRA, Centre de Géosciences, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, France.

Equipe	Géologie
Visa 	C Franke

# 1. Rappel du contexte, positionnement et objectifs du projet Carnot 2015

## 1.1 Contexte du projet « Traversière »

Les hydro-systèmes continentaux sont aujourd'hui soumis à de très fortes pressions anthropiques et climatiques qui menacent leur devenir et leur viabilité sur le moyen terme (*Flipo, 2013*). Au-delà de l'aspect quantitatif de réduction de la ressource du fait des modifications des champs de précipitations attendues par les prospections climatiques (*Asadieh & Krakauer, 2015*), les multiples pratiques anthropiques se traduisent par des apports de matière au système générant de fortes pollutions à la fois ponctuelles et diffuses (*Flipo, 2013*). Si les pollutions ponctuelles peuvent être maîtrisées dans des délais de l'ordre de quelques années, il n'en va pas de même des pollutions diffuses d'origine agricole qui alertent les gestionnaires de l'eau par leur persistance dans les aquifères, notamment pour les nitrates et les pesticides (*Garnier et al., 2005 ; Neal et al., 2008, 2012*). La revisite récente du cycle de l'eau montre que les zones d'interface entre les eaux de surface et les eaux souterraines sont des secteurs privilégiés d'élimination des pollutions diffuses nitriques (*Flipo et al., 2007a, 2007b*). Cependant le caractère multi-échelle des écoulements dans ces interfaces reste mal compris et nécessite une meilleure caractérisation des hétérogénéités physiques du milieu afin de les intégrer dans des outils de modélisations numériques comme formalisé par (*Flipo et al., 2014c*).

Du point de vue du réseau hydrographique, il a aussi été montré très récemment que le compartiment benthique (incarné par le lit des rivières et leurs sédiments associés) joue un rôle majeur dans le fonctionnement biogéochimique des rivières, et dans le devenir du carbone, et des principaux éléments nutritifs que sont l'azote et le phosphore (*Vilmin, 2014 ; Vilmin et al., 2015*). Il apparaît dès lors fondamental de décloisonner la rivière de son environnement en intégrant son fonctionnement métabolique dans la gestion quantitative (*Perkins & Sophocleous, 1999 ; Pryet et al., 2015*) et qualitative de la ressource en eau (*Flipo, 2013*).

La compréhension du fonctionnement biogéochimique des interfaces nappe-rivière représente donc aujourd'hui un enjeu majeur aussi bien pour la recherche environnementale, que pour les gestionnaires des milieux aquatiques, et les organismes de surveillance environnementale comme l'IRSN qui cherchent à s'approprier les outils nécessaires à la compréhension du transport réactif dans ces zones à enjeu majeur. Cette thématique est ainsi devenue une des thématiques d'intérêt majeur du Centre de Géosciences dans sa programmation pluri-annuelle soumise à l'AERES en 2013. Les activités de l'équipe Systèmes Hydrologiques et Réservoirs (SHR) du Centre de Géosciences ont depuis abouti à la mise en place de dispositifs de suivi haute fréquence des écoulements d'eau et de chaleur dans deux interfaces nappe-rivière du bassin de Paris (*Flipo & Mouhri, 2013 ; Flipo, 2014*), ainsi qu'au développement d'un outil de simulation numérique permettant l'emboîtement de modèles, libérant ainsi de la puissance de calcul disponible pour se concentrer sur les interfaces qui présentent une réactivité géochimique jusqu'à l'échelle millimétrique dans certaines situations où métabolisme du compartiment benthique est très important (*Flipo et al., 2007c*).

Si ces actions ont permis de positionner le Centre de Géosciences sur le devant de la scène nationale sur ces enjeux majeurs, il est toujours fondamental de poursuivre ces actions en proposant des méthodes de suivi et des outils de simulations, permettant de définir des indicateurs génériques de vulnérabilité du milieu. Le cœur de ce projet s'est donc appuyé sur cette notion de généricité, comme mise en place pour la caractérisation de la vulnérabilité du réseau hydrographique et des aquifères de surface à des pollutions potentielles des eaux de surface et souterraines (*Flipo et al., 2013, 2014a, 2014b ; Labarthe et al., 2014*). La généricité de ces indicateurs de vulnérabilité repose sur une caractérisation fine des chemins d'écoulement aux différentes échelles des hydro-systèmes continentaux.

Les « Moyens Expérimentaux » (MEX) du Centre des Géosciences/MINES ParisTech ont acquis depuis 2012 une expertise analytique autour de la mesure des isotopes stables du carbone et de l'oxygène des roches carbonatées (*Carrillo et al., 2014 ; Durand et al., 2015*) et sur les isotopes stables des échantillons d'eau (hydrogène, oxygène et carbone dissous). Ces mesures des isotopes ont été mise en œuvre sur les eaux souterraines et les eaux de surface. Nous avons développé dans un premier temps l'utilisation d'outils de traçage isotopique couplés à l'utilisation de modèles déterministes spatialisés comme support de la caractérisation des temps de transfert de l'eau dans les différents compartiments des hydro-systèmes continentaux.

Dans un second temps, nous nous sommes appuyés sur des infrastructures de recherche accessibles sur le bassin de l'Orgeval faisant partie du GIS ORACLE, dont SHR assure la vice-présidence du comité scientifique. Le bassin de l'Orgeval constituera un bassin test permettant de tester la faisabilité de ces méthodes novatrices à plus large échelle.

Profitant des synergies offertes par le Carnot M.I.N.E.S., un second bassin versant a fait l'objet de notre attention comme second cas réel d'application des méthodes développées dans ce projet : le bassin versant de la Canche dont un de ses sous-bassins versants élémentaires : le petit bassin versant de la Pommeroye (Nord-Pas de Calais) pour lequel l'étude du devenir des pollutions diffuses d'origine agricole représente un enjeu prioritaire. Une étude parallèle, qui s'est focalisée sur le flux de matière en surface, était menée entre l'IMT Lille-Douai et MINES ParisTech (projet QuASPER ; *Alary et al., 2018b, Patault et al. 2019a et b*). Ce projet a permis la mise à disposition et l'utilisation de la logistique d'un petit bassin versant bien instrumentalisé (bassin versant de la Pommeroye, environ 15 ha). Une étude de l'état de lieu en termes de polluants diffus s'est fait à l'aide de prélèvements des eaux de surface (pluie/ruissellement, rivière) et souterraines (piézomètres) avec le soutien technique de l'Agence d'Eau Artois-Picardie et du Symcéa (Syndicat Mixte de la Canche et Affluents). Pour ce bassin, et à titre illustratif des pollutions diffuses d'origine agricole, les pesticides étaient échantillonnés dans les différents compartiments du système.

Par ailleurs, de très nombreuses mesures de concentrations (très coûteuses) sont effectuées chaque année pour le suivi de la qualité de l'eau (cours d'eau et nappes). Cependant, ces mesures ne reflètent que partiellement l'état biochimique des eaux. En effet, dans le cas des nutriments, la fréquence mensuelle est généralement insuffisante pour une estimation précise du quantile 90 que requiert la réglementation. Par ailleurs, à cause de leur coût, les mesures des concentrations en pesticides sont beaucoup moins fréquentes, ce qui généralement ne permet pas une estimation précise de la moyenne annuelle à la station de mesures. De plus, les limites de quantification sont telles que pour la somme de plusieurs pesticides, le cumul des incertitudes de mesure n'est plus négligeable par rapport au seuil de qualité. Incertitudes de mesure et faible fréquence des prélèvements se combinent pour rendre peu précises les estimations de la moyenne des concentrations, relativement aux seuils de qualité. Des informations auxiliaires peuvent donc permettre d'améliorer ces estimations, notamment en décrivant les discontinuités le long des cours d'eau (confluences, déversements). Une réflexion sur les réseaux de mesures (*Léonard & Crouzet, 1999*) et sur leur fréquence (*Bernard-Michel, 2006*) apparaît donc nécessaire et a fait l'objet de certaines actions du projet.

Enfin, les résultats des modèles hydrodynamiques diffèrent des observations. La modélisation géostatistique conjointe des résultats de modélisation et des observations permet de caractériser ces écarts tant pour les valeurs que pour la variabilité spatiale, temporelle ou spatio-temporelle (*de Fouquet et al., 2012*). L'analyse de ces écarts est riche d'enseignements, pour caractériser et quantifier les imperfections de la simulation déterministe. Préalablement, cette modélisation a été effectuée soit temporellement (qualité de l'air) soit spatialement (qualité de l'air, qualité de l'eau des cours d'eau) (*Polus-Lefebvre, 2010; Vilmin, 2014*). Lors du projet cette caractérisation était étendue au domaine spatio-temporel et à de nouvelles variables.

## 1.2 Positionnement

Le projet « Traversière » s'est appuyé sur des projets de recherche existant en termes d'organisation de campagnes de prélèvements et de suivi, et de connaissances des bassins versants étudiés :

- **PIREN-Seine** : Le programme de recherche PIREN Seine, dont Nicolas Flipo assure la direction scientifique depuis juin 2015, remplit un rôle de coordination des actions de recherche portant sur l'hydro-système Seine. A cet effet, le programme soutient de nombreux projets de recherche, dont notamment des actions de recherche sur le devenir des pollutions diffuses et l'hydrodynamique des interfaces nappe rivière. Cependant la phase 7 du programme n'a pas prévu de mesures isotopiques de l'eau comme effectué lors du projet, et qui sont valorisables du point de vue méthodologique auprès des gestionnaires du bassin : Agence de l'Eau Seine Normandie, Syndicat Intercommunal d'Assainissement de l'Agglomération Parisienne, Syndicat des Eaux d'Ile-de-France, Voies Navigables de France, EPTB Seine Grands Lacs, Lyonnaise des Eaux. Les stations MOLONARI ont été financées par le PIREN Seine et l'ONEMA, et sont entretenues et gérées par le Centre de Géosciences.

- **QuASPER** : projet financé par l'Agence de l'Eau Artois-Picardie sur la question d'érosion des sols agricoles. Le projet a permis de mettre à disposition l'infrastructure nécessaire pour l'étude « hydro-isotopique » du bassin versant de la Canche/Pommeroye. Si la question des polluants diffus s'impose, celle-ci n'était toutefois pas financée dans le projet QuASPER (la *soutenance de thèse d'Edouard Patault a eu lieu le 16 Novembre 2018*). Une collaboration avec l'Agence de l'Eau Artois-Picardie est actuellement en cours de montage autour de la problématique « polluants ».

- **GIS ORACLE** : Le GIS ORACLE, maintenu par l'Irstea, et dont MINES ParisTech est membre permanent, est un observatoire hydrologique et des pollutions diffuses. Dans ce cadre, le bassin de l'Orgeval bénéficie d'une infrastructure unique de suivi des variables hydrologiques de pluie, piézométrie, et débit en rivière. De même le GIS ORACLE maintient des infrastructures permettant un suivi asservi au débit de nombreux polluants d'origine agricole comme les nitrates et pesticides. Les infrastructures MOLONARI sont implantées sur ce site unique, ce qui permet de fournir un jeu de données très riches pour valider la modélisation déterministe qui est mise en œuvre dans « Traversière ».

- Enfin ce projet valorise l'acquis de l'**Inter-Carnot « IEPAP »** sur les concentrations en pesticides dans le bassin versant du Né (Charente).

### 1.3 Objectifs

- Caractériser les hétérogénéités structurelles de l'interface nappe rivière en utilisant la température comme traceur des écoulements par inversions numériques.
- Améliorer la compréhension du cycle de l'eau à l'aide de l'intégration des analyses des isotopes stables du deutérium/hydrogène, de l'oxygène dans le modèle existant du bassin versant de l'Orgeval et dans les zones d'interactions nappe-rivière
  - o Traçage des sources d'eau (surface/pluie, rivière, nappe, etc.)
  - o Temps de résidence des eaux dans le système
  - o Intégration dans le modèle numérique
- Application des connaissances des isotopes stables au bassin versant de la Canche/petit bassin versant de la Pommeroye en termes d'échanges nappe-rivière, et mise en relation avec des analyses de polluants agricoles (nitrates, pesticides)
- Comparer par analyse géostatistique les prévisions des simulations déterministes aux observations de température, pour caractériser la structure des différences.
- Analyse géostatistique des concentrations, pour en caractériser la variabilité spatiale et temporelle. L'interprétation des résultats en relation avec les échanges nappes-rivières posera la question de la précision des estimations, donc de l'adaptation des réseaux de mesures à l'échelle des bassins versants étudiés.

### 1.4 Verrous

- Compréhension des mécanismes des transferts nappe-rivière y compris de transport des polluants, avec une approche « hydro-isotopique » pour le bassin-versant de l'Orgeval.
- Application du modèle conceptuel « hydro-isotopique » au bassin-versant de la Canche/Pommeroye.
- Prélèvements des eaux aux différentes profondeurs dans la zone d'interface (développement technique).
- Modélisation géostatistique (spatio-temporelle et non-stationnaire) des relations entre mesures et résultats de simulations en termes de mesures in-situ (capteurs) et des paramètres de prélèvements (rapports isotopiques).

### 1.5 Résultats escomptés

- Le programme a permis d'élaborer des méthodes quantitatives, de l'analyse jusqu'aux modèles, qui ont apporté une meilleure compréhension des flux d'eau, des temps de transfert, et donc une quantification des flux de matière transportée (traceurs conservatifs) de la recharge jusqu'aux rivières. Cette description intègre de manière plus fine les effets des hétérogénéités locales, en particulier au niveau des interfaces nappe-rivière, y compris la part de transport superficiel.
- Les méthodologies qui ont été développées par le projet « Traversière » intéressent directement l'ensemble des organismes gestionnaires de l'eau (Agences de bassin, ONEMA, Voies Navigables de France, etc.) et les

entreprises du monde de l'eau, notamment les fournisseurs d'eau potable (Lyonnaise des Eaux, Véolia Water, etc.). Les gestionnaires de l'eau sont très demandeurs de ces développements, socle de base pour la quantification des transferts de polluants, diffus ou non, vers les rivières. Grâce aux développements par le projet, les laboratoires impliqués dans le Carnot se trouvent en position de proposer à ces gestionnaires des études intégrées sur des portions de territoire : dimensionnement, installation de réseaux de capteurs, analyse et intégration des données, construction de modèles de transfert performant avec une incertitude liée aux hétérogénéités bien inférieures à ce qui se pratique actuellement.

- Les développements effectués par « Traversière » ouvrent également la porte à la modélisation de transferts depuis des sources identifiées. EDF (pour ses dossiers de sûreté), l'IRSN (dans sa mission de contrôle mais aussi dans sa mission de recherche par exemple sur Tchernobyl) sont confrontés à l'analyse fine des temps de transfert. La réduction de l'incertitude géologique des modèles par une meilleure caractérisation de l'hétérogénéité du milieu et des interfaces est donc un élément très important, et pour ces entreprises représentent un enjeu de tout premier plan.
- Les résultats des simulations déterministes diffèrent des observations. L'analyse géostatistique de ces différences permet de quantifier les imperfections des modèles, en termes de valeurs comme de variabilité spatio-temporelle des températures. Le recalage des résultats de simulation aux observations permet d'évaluer les incertitudes associées et de proposer des schémas d'échantillonnage complémentaires et d'application à la caractérisation des concentrations dans les rivières, en termes de valeurs et de variabilité. Le projet a permis de répondre aux questions : Quel est l'apport d'une meilleure description de ces échanges pour la réduction des incertitudes d'estimation ? Quelles en sont les conséquences pour un meilleur suivi des concentrations : implantation et fréquence des mesures, utilisation de co-variables dans la modélisation géostatistique ?

## **2. Rappel du programme scientifique/technique et résultats du projet Carnot 2015**

### **2.1 Décomposition/description des tâches**

La définition des indicateurs génériques de vulnérabilité nécessite de réaliser des développements méthodologiques, métrologiques, et numériques. Dans une revue bibliographique récente, (*McGuire & McDonnell, 2006*) soulignent la nécessité de définir une méthode robuste de calcul des temps de transfert de l'eau à l'échelle des bassins versants car ils contraignent les mécanismes de transport dissous non réactifs. Les temps de transfert de l'eau sont donc de bons indicateurs de pollution des eaux pour des polluants non-réactifs. L'intérêt majeur d'un travail spécifique aux temps de transfert est sa généralité puisque sa quantification ne nécessite pas la quantification des flux de polluants apportés au système, ce qui pour les pollutions diffuses, en nitrates et pesticides, constitue une source d'incertitude majeure qui biaise significativement la crédibilité des résultats de simulations, et rend l'élaboration et l'acceptabilité de programmes d'actions et de mesures très délicates. A ces temps de transfert, il est alors possible de greffer des processus de rétention, de transformation, voire d'élimination biologique.

Dans cette optique, le projet « Traversière » était structuré en cinq parties principales pour construire des indicateurs de vulnérabilité des eaux sur la base de la compréhension des écarts entre des concentrations résultant d'un transfert non-réactif (i.e. référence résultant d'un transfert non réactif) et des concentrations mesurées dans le milieu. A cet effet, le premier volet du projet s'est intéressé à des méthodes permettant de caractériser les hétérogénéités structurelles du milieu qui contrôlent les temps de transfert de l'eau. Ensuite, des mesures des isotopes stables de l'eau étaient couplées à des modélisations du fonctionnement hydrologique des bassins versants afin de déterminer des lois de mélange et des temps de transfert de l'eau dans les différents compartiments de ces systèmes. Une famille de polluants diffus phare (les pesticides) a fait l'objet d'un suivi basse fréquence dans la troisième partie du projet, avant d'aborder la transformation de ces pollutions par la mesure haute fréquence du métabolisme des interfaces nappe-rivière qui sont le siège d'une activité biogéochimique très intense. Pour finir, des méthodes géostatistiques ont été mises en œuvre pour réduire les incertitudes sur l'estimation du devenir des pollutions diffuses, et affiner l'indicateur générique de vulnérabilité.

En résumé, les résultats du projet reposent sur :

- Le traceur thermique et hétérogénéité (sur le site de l'Orgeval) : mesure et modélisation inverses pour contraindre l'hétérogénéité du milieu,
- les isotopes de l'eau (site de l'Orgeval & de la Canche) : analyse et détermination des bilans d'eau dans le système,
- le suivi de pesticides (site de la Canche) : capteurs passifs, analyse des résultats suivant les modèles de transfert de traceurs établis, et analyse géostatistique des mesures.
- l'intégration géostatistique des mesures et simulations déterministes.

## 2.2. Résultats de l'action 2.1.1. : Traceur thermique et hétérogénéités

Afin de caractériser les temps de transfert de l'eau dans le bassin de l'Orgeval, nous nous sommes appuyés sur :

- Un modèle hydrologique-hydrogéologique couplé du bassin en cours de développement par l'équipe SHR de type CaWaQS (Flipo, 2005; Flipo et al., 2005, 2007a) et EauDyssée (Saleh et al., 2011; Flipo et al., 2012; Pryet et al., 2015) ;
- un dispositif de suivi hydro-géophysique en continu des échanges d'eau et de chaleur haute fréquence, mis en place par l'équipe SHR, pour 6 kilomètres de réseau hydrographique du bassin agricole de l'Orgeval (Mouhri et al., 2013a, 2013b). Ce dispositif unique permet de suivre la température et la pression de l'eau en cinq points du réseau hydrographique recoupant un système aquifère multi-couche. En chacun des points est implantée une station MOLONARI (MONitoring LOCAL des échanges NAppe-Rivière) ;
- un modèle hydro-thermique couplé permettant d'interpréter localement les mesures des stations MOLONARI, en termes de flux hydrique (Goblet, 2010; Mouhri et al., 2013a) ;

La quantification des temps de transfert de l'eau dans un hydro-système continental est réalisée à l'aide de traceurs des écoulements. Les dispositifs MOLONARI utilisent la température comme traceur des écoulements. La quantification des flux d'eau relève alors de l'interprétation des mesures de température à l'aide d'approches inverses dont la qualité des résultats est contrainte par une bonne caractérisation des hétérogénéités structurelles du milieu.

Les hétérogénéités structurelles des unités aquifères du bassin sont évaluées par une approche inverse classique mettant en œuvre d'une méthode d'inversion basée sur l'estimation successive des flux (Pasquier & Marcotte, 2006; Flipo et al., 2012) pour laquelle l'estimation de la recharge sera effectuée à l'aide des chroniques de plus du bassin acquises par le GIS ORACLE depuis 1950 entrées en forçage du modèle CaWaQS (Flipo, 2005; Flipo et al., 2005, 2007).

Les hétérogénéités à grande échelle caractérisent les interfaces nappe-rivière. A cet effet, des dispositifs flottants, basés sur une série de capteurs de température distribués verticalement et d'un capteur de pression différentielle, sont construits et déployés en une quarantaine de points du bassin de l'Orgeval pour déterminer les propriétés du lit de la rivière. Ces mesures ont été couplées avec une mesure distribuée mettant en œuvre des fibres optiques (Kalbus et al., 2006; Selker et al., 2006). La combinaison de ces deux systèmes permet de valoriser une méthodologie très innovante de spatialisation des échanges nappe-rivière à l'échelle du tronçon de rivière.

Grâce au déploiement longitudinal des capteurs en une quarantaine de points, il est alors possible de paramétrer le modèle contrôlant les échanges entre eaux de surface et eaux souterraines à l'échelle du bassin de l'Orgeval, ce qui constitue le support de modélisation à base physique des temps de transfert de l'eau.

### Actions menés en bref :

- post-doc de Karina Cucchi en 2015 & 2016
- capteurs de température (et pression) LOMOS-mini en BV Orgeval
- couplage model numérique
- suivi des mesures terrain BV les Avenelles



⇒ **publication d'un article de « rang A » :**

- Cucchi, K., Rivière, A., Baudin, A., Berrhouma, A., Durand, V., Rejiba, F., Rubin, Y., Flipo, N., 2018. LOMOS-mini: A coupled system quantifying transient water and heat exchanges in streambeds, *Journal of Hydrology*, 561, 1037–1047, doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.10.074.

### 2.3. Résultats de l'action 2.1.2. : « Isotopes stables de l'eau » : analyse et détermination des bilans d'eau dans le système (site de l'Orgeval)

Dans le cadre du projet « Traversière » les traceurs des isotopes stables de l'hydrogène et de l'oxygène étaient utilisés.

L'analyse des isotopes stables de l'eau ( $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$  et  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ ) peut à la fois servir comme traceurs des différentes masses/sources d'eau, car chaque « source » porte une signature isotopique spécifique selon les différents processus qui la contrôlent, principalement par fractionnement isotopique par gradients en diffusion et température (e.g. *Criss, 1999*). Par exemple, la signature isotopique de l'eau de pluie est plus « appauvrie » en isotopes lourdes par rapport à l'eau dans les différents niveaux du sol/nappe et la rivière etc.

Principalement, les compositions isotopiques de différents réservoirs d'eau du système « surfaces continentales » est le résultat de différents paramètres, comme :

- la composition des précipitations dans le bassin versant,
- la proportion des précipitations/pluviométrie qui devient du drainage/infiltration ou du ruissèlement,
- l'enrichissement isotopique de l'eau du sol avant drainage,
- l'apport d'eau par les nappes,
- l'apport d'eau par les fontes de neige,
- le temps de résidence des eaux dans les différents réservoirs,
- la température du milieu.

Pour pouvoir déconvoluer la composition d'une eau (hydrogène et oxygène) à un endroit défini dans le sous-sol, il est donc nécessaire d'effectuer des calculs des « équations de bilan de masse » en comparaison avec des valeurs isotopiques des différentes sources possibles (piézomètres, pluviomètres, rivière, drains) et les données bibliographiques.

Comme l'évaporation directe du sol induit un fractionnement, l'eau du sol est souvent enrichie par rapport à la précipitation. Ce contraste isotopique peut permettre d'évaluer la proportion de l'eau d'une crue d'une rivière venant directement de l'eau du sol de celui venant d'une nouvelle précipitation (*Wels et al., 1991 ; Millet et al., 1997*). L'enrichissement du sol par évaporation est surtout fort en surface (*Barnes & Allison, 1988*). Ces différentes compositions isotopiques selon la profondeur peuvent permettre de mieux comprendre les transferts verticaux d'eau dans le sol (*Gazis & Geng, 2004*).

En même temps les isotopes de l'hydrogène peuvent servir aussi pour donner des indications de temps de résidence de l'eau en question, ce qui est un important paramètre pour la modélisation hydrologique du cycle de l'eau dans un bassin versant.

Pour obtenir ces valeurs/résultats, des échantillons d'eau à des différentes profondeurs des stations « hydro » du bassin versant de l'Orgeval étaient échantillonnés à des intervalles réguliers, pour faire l'interprétation spatio-temporelle de ces paramètres isotopiques et construire un modèle conceptuel « hydro-isotopique ». A la suite de cette étape expérimentale, les résultats isotopiques sont intégrés dans le modèle numérique d'écoulement du bassin versant de l'Orgeval en couplage avec les autres paramètres physiques (pression, température).



Les traceurs isotopiques sur la phase liquide/dissoute sont donc un outil supplémentaire qui peut être utilisé à la fois pour connaître l'origine d'eau dans le contexte du suivi et quantification des flux de matière (projet QuASPER), ainsi que sur la distinction de la signature de « surface » des pollutions diffuses/agricoles par rapport à l'apport par les nappes.

Cette action a donc fait le lien direct avec l'action 2.1.3. de suivi des concentrations des pesticides en milieu agricole, car les traceurs isotopiques permettront d'améliorer le développement d'un modèle conceptuel pour le bassin versant de la Pommeroye, sous-bassin de la Canche.

Les prélèvements des eaux de surface se sont faits avec la même logistique des campagnes « snap shots » lors de l'échantillonnage des matières en suspension dans le cadre du projet QuASPER (thèse *Patault, 2018*). Une collaboration avec l'Agence de l'Eau Artois-Picardie était établie autour des échantillonnages des eaux de sub-surface (piézomètres existants).

#### Actions menés en bref :

- installation préleveur automatique en Orgeval/Avenelles en mars 2017
- installation de pluviomètre à la Pommeroye, Fontainebleau et IRSTEA
- prélèvements des eaux en BV Orgeval/Avenelles entre 03/2017–03/2018
- prélèvements ponctuels BV Canche lors des 4 campagnes saisonné en 2016
- prélèvements haute résolution BV Canche à Brimeux (février à juillet 2017)

#### ⇒ **publication de rapport PIREN-Seine 2017 :**

- Guillon, S., Rivière, A., Flipo, N., 2017. Premiers retours sur la faisabilité du traçage des écoulements à l'aide des isotopes stables de l'eau et du radon, *PIREN-Seine phase VII - rapport 2017*

#### ⇒ **article de « rang A » en cours de rédaction :**

- Alary, C., Franke, C., Guillon, S., Belles, A., et al., High resolution pesticides and isotopes monitoring during 2017 in the Canche River catchment, *article in prep for submission to Water MDPI*.

## **2.4. Résultats de l'action 2.1.3.: « Méthodologie de suivi des concentrations en pesticides en milieu agricole »**

L'objectif était de développer l'analyse des pesticides à travers l'utilisation de préleveurs passifs et construire une méthodologie de mesures qui soit adaptée aux temps de transferts des polluants dans le milieu.

L'approche était appliquée au bassin versant de la Canche en vue de tracer les sources de pesticides et leur cheminement dans l'environnement. Le bassin versant du Pommeroye (par ailleurs instrumenté dans le cadre de L'Inter-Carnot INDECO « FluvioMagTrack » (2014-2017); *Franke et al., in press*) entre MINES Douai et MINES ParisTech/ Géosciences) était plus particulièrement étudié pour comprendre à plus petite échelle le transfert des pesticides depuis les parcelles cultivées vers les cours d'eau.

Les substances ciblées étaient des pesticides de familles diverses ainsi que certains produits de dégradation en vue d'élucider le parcours des substances dans l'environnement et de dater leur émission en s'appuyant sur le rapport de concentration entre métabolites et molécules mères (*Phillips et al., 1999*).

Des herbicides (triazines, chloroacétamides) sont recherchés principalement en raison de leur nature polaire qui les rend plus sujets au processus de lessivage et transfert entre compartiments. Une attention particulière était apportée à l'atrazine (triazine) qui avec ses métabolites est encore détectée dans les cours d'eau malgré une décennie d'interdiction en Europe (*Lissalde et al., 2014*). Des pesticides de familles emblématiques telles que les triazoles (fongicides) ont aussi été recherchés en raison de leur nature plus hydrophobe qui pourrait se traduire par une contamination des cours d'eau de type diffuse et persistante. Enfin des substances de la famille des strobilurines (fongicides de nouvelle génération) étaient aussi suivies en raison de leur récente apparition sur le marché et de leur

forte promotion auprès des agriculteurs qui pourraient être à l'origine de contaminations différentes des familles précédemment citées.

Des échantillonneurs passifs de type POCIS (Polar Organic Chemical Integrative Samplers) pour les contaminants émergents ainsi que des configurations améliorées de ces outils étaient déployés in situ (post-doc d'Angel Belles). Des méthodologies de préleveurs passifs étaient mises en œuvre pour la mesure des concentrations en pesticide et de tests d'adéquation avec la dynamique des polluants dans le bassin versant.

Les résultats escomptés sont la mesure de la contamination moyenne durant des intervalles de temps pouvant atteindre le mois. La mesure des concentrations à deux échelles temporelles simultanément met en évidence la contamination chronique historique ainsi que les pics consécutifs à des événements transitoires (épandages, lessivage des sols) pour le BV de la Canche.

L'acquisition de mesures complémentaires instantanées, moins onéreuses était menée en parallèle pour constituer des séries à petit pas de temps, en vue de les relier aux dates d'épandage et à la pluviosité. Ces mesures étaient comparées à celles par échantillonneurs passifs. (Belles, 2014 ; Belles et al., 2017 et 2018).

#### Actions menés en bref :

- post-doc d'Angel Belles (01/2016-07/2017)
- capteurs passifs, développement technique et mise en action Canche mars 2016
- prélèvements ponctuels et mesures en capteurs lors des 4 campagnes saisonnières en BV Canche en 2016
- prélèvements haute résolution Canche à Brimeux (février à juillet 2017)
- stage M2 de Nelaïdeve Laguerre en 2017

#### ⇒ **rapport de stage M2 Nelaïdeve Laguerre 2017 :**

- Laguerre, N., 2017. Transfert des micropolluants dans les cours d'eau : Monitoring des concentrations par l'utilisation d'échantillonneurs passifs, rapport de stage M2, Université d'Orléans, Master II Energie et Matériaux - Spécialité CPRE, maîtres de stage : Claire Alary, IMT Lille Douai, LGCGE – GCE, Angel Belles-Limeuil, Mines ParisTech. Tuteur Universitaire : Stéphanie de Persis, ICMN

#### ⇒ **3 articles de « rang A » (3 publiés + 1 re-soumis) et un résumé étendu conférence internationale :**

- Alary, C., Belles, A., Franke, C., 2018a. Role of sediment and suspended matter in the fate of flagrances from WWTP-effluent, extended abstract, *6th I2SM –Chiapas, Mexico, June 19-24, 2018*.
- Belles, A., Alary, C., Aminot, Y., Readman, J.W., Franke, C., 2017. Calibration and response of a novel agarose gel based passive sampler to record short pulses of aquatic pollutants, *Talanta*, 165, 1-9. doi: 10.1016/j.talanta.2016.
- Belles, A., Franke, C., Alary, C., Aminot, Y., Readman, J.W., 2018. Understanding and predicting the diffusivity of organic compounds in polydimethylsiloxane material for passive sampler application using a simple QSPR model, *Environmental Toxicology and Chemistry*, doi: 10.1002/etc.4101.
- Belles, A., Alary, C., Flipo, N., Guillon, S., Patault, E., Rivière, A., Franke, C., 2019. Transfer pathway and fluxes of water-soluble pesticides in different compartments of the agricultural catchment of the Canche River (northern France), *Water*, 11, 1428, doi:10.3390/w11071428.
- Belles, A., Alary, C., Laguerre, N., Franke, C. Analyzing the uncertainty of diffusive gel based passive samplers as tools for evaluating the average contamination of surface water by organic pollutants, *in rev. / re-submission to Chemosphere*.

## 2.5. Action 2.1.4. « Réactivité biologique de l'interface nappe-rivière »

Les deux premiers volets du projet « Traversière » ont permis de déterminer les temps de transfert de l'eau dans les différents compartiments des deux hydro-systèmes étudiés grâce à la caractérisation des hétérogénéités du milieu, mais aussi grâce à l'utilisation de mesures isotopiques. Les actions du troisième volet ont illustré l'intérêt de ces estimations pour une famille de polluants emblématiques des pollutions diffuses que sont les pesticides.

Dans le quatrième volet (2.1.4.) de « Traversière », nous avons proposé des actions pour tenter de quantifier la réactivité biogéochimique de l'interface nappe rivière. Pour cela nous voulons quantifier le métabolisme de cette zone grâce au développement d'une méthodologie de mesure de l'oxygène dissous dans les eaux de l'interface nappe rivière. Il s'agirait de développer un outil de mesure basé sur l'utilisation de la technologie optode couplée à une fibre optique introduite dans des mini piézomètres implantés en flûte de pan à différentes profondeurs de l'interface.

Ces mesures d'oxygène dissoutes étaient prévues pour être réalisées au droit des stations de suivi haut fréquence des échanges nappe-rivière. Les lois de mélanges des eaux dans cette zone étaient prévues d'être déterminées à l'aide des isotopes de l'eau et de la caractérisation des hétérogénéités structurelles. Les hétérogénéités structurelles étaient prévues d'être transformées en hétérogénéités hydrodynamiques grâce aux outils développés dans le cadre du projet Carnot Sed2hydro en cours de réalisation par les équipes Géologie et SHR du Centre de Géosciences. Le modèle de transport METIS (*Goblet, 2010*) était prévu d'être mis en œuvre pour simuler le transport passif de l'oxygène au droit des stations. Les écarts entre concentrations en oxygène simulées et concentrations mesurées dans la zone étaient prévus d'être interprétés comme le métabolisme de la zone d'interface. Ces premiers résultats étaient prévus de fournir une base de réflexion pour conceptualiser un module de fonctionnement biogéochimique de l'interface nappe-rivière dialoguant avec les outils de simulation déterministe ProSe et CaWaQS, développés au Centre de Géosciences/MINES ParisTech.

Pour des raisons budgétaires ainsi que des restrictions de temps/personnel, cette action n'a pas pu être mise en œuvre lors du projet Carnot 2015 et sera donc réalisée dans un projet futur envisagé par l'équipe SHR au Centre de Géosciences, MINES ParisTech.

## 2.6. Résultats de l'action 2.1.5. « Intégration géostatistique mesures/simulations déterministes »

La modélisation géostatistique des données résultats du projet est divisée en deux étapes :

### A) Modélisation des relations entre simulation déterministe et observations

La modélisation géostatistique des relations entre simulations déterministes et observations, examinée pour les concentrations (cours d'eau, pollution de l'air) a montré que les simulations « se trompent » sur l'amplitude relative des différentes composantes spatiales ou temporelles constituant le phénomène aux différentes échelles. Dans ce projet il était proposé d'enrichir le modèle géostatistique par l'introduction de corrélations différées (spatialement ou temporellement), et de l'appliquer à de nouvelles variables : les paramètres (température, charge...) mesurés par les capteurs, et les rapports isotopiques des prélèvements dans les nappes et les cours d'eau.

Le modèle variographique spatio-temporel construit était ensuite utilisé pour interpréter les différences entre observations et simulation déterministe (en termes de moyennes ainsi que d'amplitude, de corrélation et de translation des différentes composantes) puis recalcr les simulations aux observations, et en examiner les conséquences sur la description du fonctionnement des bassins versants.

La nouveauté réside dans la modélisation spatio-temporelle (et non plus spatiale ou temporelle séparément), ainsi que sur la contribution du modèle géostatistique observations-simulations à une meilleure quantification des temps de transfert de l'eau dans les hydro-systèmes.

### B) Etude géostatistique exploratoire de mesures de concentrations dans les cours d'eau

Les études antérieures (Carnot « IEPAP » par exemple) ont montré les difficultés inhérentes à l'étude des concentrations en pesticides dans les cours d'eau. Du fait de leur coût et de la diversité des produits, les mesures de concentrations en pesticides sont peu nombreuses et non systématiques, ou alors à une fréquence très faible.

Les mesures de concentrations (pesticides) dans les cours d'eau des deux bassins versants étudiés sont en cours de donner lieu à une analyse exploratoire, effectuée a priori puis réinterprétée en fonction des résultats des échanges nappes-rivières. Ces mesures sont complétées par les données disponibles dans les bases de données, ce qui permet d'examiner l'évolution temporelle des concentrations durant plus d'une année.

On sait que la variabilité (spatiale ou temporelle) d'une grandeur dépend de son support. L'analyse exploratoire des concentrations est focalisée sur la comparaison (valeurs, variabilité spatiale ou temporelle) des mesures de concentrations selon le type de mesures (sur prélèvements, ou par capteurs passifs). Ces différentes mesures qui diffèrent par leur support temporel, doivent-elles être considérées comme des co-variables, que l'on ne peut mélanger dans le cadre du rapportage environnemental ? La réponse à cette question a d'importantes conséquences pour l'échantillonnage. En effet, pour l'estimation de la moyenne annuelle (critère réglementaire actuel pour la qualité de l'eau pour les pesticides) les capteurs passifs présentent l'intérêt d'une meilleure couverture temporelle que les mesures sur prélèvements. Mais si les valeurs diffèrent (niveau, variabilité), il devra en être tenu compte pour l'estimation.

L'étude de la variabilité spatiale ou temporelle conjointe recherche également la présence d'éventuelles corrélations différées (spatialement ou temporellement) entre différentes substances, qu'il faudra alors interpréter.

Cette analyse exploratoire est menée à la fois dans la perspective du « rapportage environnemental », qui définit les grandeurs statistiques caractérisant les masses d'eau, au sens de la directive cadre européenne (quantile 90 pour les nutriments, moyenne annuelle par substance et leur somme pour les pesticides), ainsi que pour caractériser l'évolution amont-aval des concentrations en relation avec le fonctionnement d'un hydro-système (notamment avec les échanges nappes-rivières).

Pour les pesticides, la présence de nombreuses valeurs inférieures au seuil de quantification est problématique pour la comparaison de la somme des concentrations à un seuil de qualité. De plus, les substances mesurées varient au cours du temps, la composition du mélange représentée par la somme varie au cours du temps, ce qui complique la caractérisation de l'évolution temporelle des concentrations. Ces deux questions seront examinées conjointement

sur les mesures sur prélèvement (complétées par des extractions de bases de données pour des mesures anciennes) et sur les résultats des capteurs passifs.

Enfin, pour tenir compte des limites de quantification, on cherche à adapter les modèles seuillés, avec un ajustement indirect du variogramme sous-jacent (*Desassis & Renard, soumis*), pour effectuer les estimations de moyennes annuelles et de leurs variations. Pour la somme des concentrations, un modèle à composantes variables est examiné. Pour ces deux problématiques, le projet devrait aboutir à des méthodes valides du point de vue théorique, pour lesquelles des simplifications seront ensuite recherchées. Les agences de bassin, l'Onema et l'OIEau sont directement concernées par ces avancées.

La modélisation géostatistique permet alors d'évaluer les incertitudes pour l'estimation de grandeurs moyennes spatiales ou temporelles. Une réflexion est menée sur l'utilisation conjointe de différents types de mesures pour caractériser les concentrations : utilisation de témoins, relation précision/coût des mesures.

### **Vers la décomposition géostatistique d'hydrogramme par analyse krigeante.**

Ce travail dirigé par Ch. de Fouquet (géostatistique, Centre de Géosciences, MINES ParisTech) a donné lieu à un stage M2 de moins de quatre mois. La référence du rapport de stage M2, confidentiel, est la suivante :

⇒ **rapport de stage M2 Bourgeon, E., Pouya, J., 2019 :**

- Bourgeon, E., Pouya, J., 2019. Décomposition par analyse krigeante de données de débit du bassin versant de la Canche (Manche), *rapport de stage M2*, Polytech Sorbonne, spécialité Sciences de la Terre, (tuteur de stage : Chantal de Fouquet, Mines ParisTech).

### **Principe**

L'analyse krigeante consiste à décomposer une variable, modélisée par une Fonction Aléatoire, en différentes échelles de variabilité. Cette décomposition repose sur l'étude variographique monovariante ou multivariante.

La fonction aléatoire représentant le débit au cours du temps en une station s'écrit :

$$Q(t) = B(t) + R(t)$$

t désignant le temps, Q, B et R respectivement le débit total, le débit « de base » et le ruissellement. Lorsque les deux composantes peuvent être supposées temporellement non corrélées, le variogramme du débit total est la somme des variogrammes des deux composantes :

$$\gamma_Q(\tau) = \gamma_B(\tau) + \gamma_R(\tau)$$

Dans le cas d'un schéma gigogne, le variogramme de petite portée est attribué au ruissellement, et celui « à grande portée » (ou non stationnaire) au débit de base.

En pratique, il est nécessaire de tenir compte de la présence d'éventuelles périodicités (annuelle notamment), ainsi que des covariables, notamment la pluviométrie.

Pour simplifier la présentation, supposons le débit total, et donc aussi ses deux composantes, stationnaire. Dans l'analyse krigeante usuelle, la moyenne (l'espérance)  $m_Q = m$  est attribuée à la composante « de grande portée », ce qui revient à supposer nulle l'espérance de la composante à petite portée :  $m_B = m$  et  $m_R = 0$ . Par suite, le débit de ruissellement peut prendre des valeurs négatives, ce qui est physiquement non réaliste. Noter que les conditions de non-biais du krigeage diffèrent pour l'estimation des deux composantes.

Différentes solutions sont envisageables pour corriger cet artefact, qui sont à implémenter et à évaluer.

### **Contexte de l'étude**

La décomposition d'hydrogramme vise à faire la part, en une station d'un cours d'eau au cours du temps, du débit dû au ruissellement et de celui dû à l'alimentation par la nappe. Selon la saison, l'occupation des sols et le type de

cultures, ainsi que les dates de traitement, les concentrations en pesticides apparaissent en effet liées au ruissellement.

Le travail du stage M2 était d'abord complémentaire à celui effectué par Sophie Guillon à partir de la concentration isotopique (action 2.1.2.). Une étape de synthèse a permis de combiner les deux décompositions, en vue d'améliorer les résultats.

L'étude géostatistique approfondie est à terminer. Les résultats apparaissent prometteurs, mais il est important que les deux débits partiels estimés soient positifs, ce qui n'est pas le cas dans la version usuelle de l'analyse krigeante. Une piste méthodologique a été proposée, mais n'a pu être réalisée dans le cadre du stage M2 (*Bourgeon & Pouya, 2019*), par manque de temps pour la programmation en fin de projet.

### **Application au bassin versant de la Canche**

Deux fichiers des données ont été travaillés :

- Brimeux, avec des débits journaliers (ainsi qu'à pas temporel plus fin) et des précipitations journalières, de début février 2016 à fin juillet 2017 ;
- Attin, avec des débits et des précipitations journaliers, début février 2016 à fin mars 2017.

L'analyse exploratoire a été effectuée sur l'ensemble des données, et la décomposition par analyse krigeante sur les seules données du fichier Attin, pour comparaison à la décomposition isotopique.

Les résultats sont détaillés dans le rapport de stage M2, rapport confidentiel, les données n'ayant pas encore été publiées par ceux les ayant acquises au moment de sa remise.

La liaison entre précipitations et débit apparaît évidente, l'analyse krigeante multivariable fournissant une estimation réaliste du ruissellement, à l'artefact près sur la moyenne.

### **Perspectives**

Les étapes du stage en cours de Kong Hong sont les suivantes :

- Programmation de l'estimation par analyse krigeante, avec une variante simple (voire simpliste) sur la décomposition de la moyenne ;
- Test : les composantes estimées sont-elles positives ?
- Si oui, comparaison à la décomposition isotopique ; si non, amélioration de la modélisation par la prise en compte explicite de la positivité des composantes.
- Combinaison à la décomposition isotopique.

### 3. Conclusions et perspectives

Les travaux effectués lors des différentes actions scientifiques du projet Traversière ont permis de :

- Avancer dans la compréhension des mécanismes des transferts nappe-rivière et du transport des polluants lié via l'approche « hydro-isotopique » pour le bassin versant de l'Orgeval.
- Obtenir les résultats pour le bassin versant de la Canche qui ont permis d'établir un modèle conceptuel « hydro-isotopique » des processus des transferts de certains polluants de la phase dissoute (pesticides hydrophiles).
- Développer la technique des prélèvements des eaux aux différentes profondeurs dans la zone d'interface était avancé appliqué au bassin-versant de l'Orgeval.
- Comparer entre les mesures in-situ (capteurs) et des prélèvements ponctuels bassin versant de la Canche.
- Paramétrer les prélèvements (rapports isotopiques).
- La modélisation géostatistique (spatio-temporelle et non-stationnaire) des relations entre mesures et résultats de simulations en termes de mesures in-situ (capteurs) et des paramètres de prélèvements (rapports isotopiques).

Le projet a permis d'élaborer des méthodes quantitatives, de l'analyse jusqu'aux modèles, qui apportent une meilleure compréhension des flux d'eau, des temps de transfert, et donc une quantification des flux de matière transportée (traceurs conservatifs) de la recharge jusqu'aux rivières. Cette description intègre de manière plus fine les effets des hétérogénéités locales, en particulier au niveau des interfaces nappe-rivière, y compris la part de transport superficiel.

Les méthodologies qui ont été développées par le projet « Traversière » intéressent directement l'ensemble des organismes gestionnaires de l'eau (Agences de bassin, ONEMA, Voies Navigables de France, etc.) et les entreprises du monde de l'eau, notamment les fournisseurs d'eau potable (Lyonnaise des Eaux, Véolia Water, etc.). Les gestionnaires de l'eau sont très demandeurs de ces développements, socle de base pour la quantification des transferts de polluants, diffus ou non, vers les rivières. Grâce aux développements mise en oeuvre par le projet, les laboratoires impliqués dans le Carnot se trouvent en position de proposer à ces gestionnaires des études intégrées sur des portions de territoire : dimensionnement, installation de réseaux de capteurs, analyse et intégration des données, construction de modèles de transfert performant avec une incertitude liée aux hétérogénéités bien inférieure à ce qui se pratique actuellement.

Les développements mise en oeuvre par le projet « Traversière » ouvrent également la porte à la modélisation de transferts depuis des sources identifiées. EDF (pour ses dossiers de sûreté), l'IRSN (dans sa mission de contrôle mais aussi dans sa mission de recherche par exemple sur Tchernobyl) sont confrontés à l'analyse fine des temps de transfert. La réduction de l'incertitude géologique des modèles par une meilleure caractérisation de l'hétérogénéité du milieu et des interfaces est donc un élément très important, et pour ces entreprises représentent un enjeu de tout premier plan.

Les résultats des simulations déterministes diffèrent des observations. L'analyse géostatistique de ces différences permet de quantifier les imperfections des modèles, en termes de valeurs comme de variabilité spatio-temporelle des températures. Le recalage des résultats de simulation aux observations permet d'évaluer les incertitudes associées et de proposer des schémas d'échantillonnage complémentaires.



#### 4. Résumé des publications scientifiques du projet Carnot « Traversière » 2015-2018 :

- Alary, C., Belles, A., Franke, C., 2018a. Role of sediment and suspended matter in the fate of fragrances from WWTP-effluent, extended abstract, *6th I2SM –Chiapas, Mexico, June 19-24, 2018*
- Belles, A., Alary, C., Aminot, Y., Readman, J.W., Franke, C., 2017. Calibration and response of a novel agarose gel based passive sampler to record short pulses of aquatic pollutants, *Talanta*, 165:1-9. doi: 10.1016/j.talanta.2016.
- Belles, A., Franke, C., Alary, C., Aminot, Y., Readman, J.W., 2018. Understanding and predicting the diffusivity of organic compounds in polydimethylsiloxane material for passive sampler application using a simple QSPR model, *Environmental Toxicology and Chemistry*, doi: 10.1002/etc.4101
- Belles, A., Alary, C., Flipo, N., Guillon, S., Patault, E., Rivière, A., Franke, C., 2019. Transfer pathway and fluxes of water-soluble pesticides in different compartments of the agricultural catchment of the Canche River (northern France), *Water*, 11, 1428, doi:10.3390/w11071428.
- Belles, A., Alary, C., Laguerre, N., Franke, C. Analyzing the uncertainty of diffusive gel based passive samplers as tools for evaluating the average contamination of surface water by organic pollutants, *in rev. / re-submission to Chemosphere*.
- Bourgeon, E., Pouya, J., 2019. Décomposition par analyse krigéante de données de débit du bassin versant de la Canche (Manche), *rapport de stage*, Polytech Sorbonne, spécialité Sciences de la Terre, (tuteur de stage : Chantal de Fouquet, Mines ParisTech).
- Cucchi, K., Rivière, A., Baudin, A., Berrhouma, A., Durand, V., Rejiba, F., Rubin, Y., Flipo, N., 2018. LOMOS-mini: A coupled system quantifying transient water and heat exchanges in streambeds, *Journal of Hydrology*, 561, 1037–1047, doi: 10.1016/j.hydrol.2017.10.074.
- Guillon, S., Rivière, A., Flipo, N., 2017. Premiers retours sur la faisabilité du traçage des écoulements à l'aide des isotopes stables de l'eau et du radon, *PIREN-Seine phase VII - rapport 2017*.
- Laguerre, N., 2017. Transfert des micropolluants dans les cours d'eau : Monitoring des concentrations par l'utilisation d'échantillonneurs passifs. *rapport de stage M2*, Université d'Orléans, Master II Energie et Matériaux - Spécialité CPRE, (Maître de stage : Claire Alary, IMT Lille Douai, LGCGE – GCE, Angel Belles-Limeuil, Mines ParisTech. Tuteur Universitaire : Stéphanie de Persis, ICMN).

## Autres publications associés au projet :

- Alary, C., Patault, E., Franke, C., Abriak, N.-E., 2018b, Projet QuASPER Quantification, Analyse et Suivi des Processus Erosifs : bassin versant de la Canche, Rapport final, IMT Lille-Douai.
- Franke, C., Patault, E., Alary, C., Abriak, N.-E., Lacroix, F., 2020. Magnetic fingerprinting of fluvial suspended particles in the context of fertile soil erosion: example of the Canche River watershed (Nord-Pas-de-Calais, France), *Geochem. Geophys. Geosyst.*, in press.
- Patault, E., 2018. Analyse multi-échelle des processus d'érosion hydrique et de transferts sédimentaires en territoire agricole: exemple du bassin versant de la Canche. Thèse de doctorat. IMT Lille-Douai, France, 300 pp.
- Patault, E., Alary, C., Franke, C., Abriak, N.-E., 2019. Quantification of sub-basin contributions using a confluence-based sediment fingerprinting approach on the Canche river catchment (France), *Science of the Total Environment*, 668, 457–469, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.458
- Patault, E., Alary, C., Franke, C., Gauthier, A., Abriak, N.-E., 2018. Assessing temporal variability and controlling factors of the sediment budget of a small agricultural catchment in Northern France (the Pommeroye), *Heliyon*, 5 (3), pp.e01407, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01407.

## Références utilisés dans le texte du rapport

- Asadieh, B., and N. Y. Krakauer. 2015. Global trends in extreme precipitation: climate models versus observations. *Hydrology and Earth System Sciences* 19:877–891.
- Barnes, C. and Allison, G., 1988. Tracing of water movement in the unsaturated zone using stable isotopes of hydrogen and oxygen. *J. Hydrol*, 100 : 143–176.
- Belles. A., 2014. Développement et applications environnementales des échantillonneurs passifs pour la surveillance des écosystèmes aquatiques. *Chemical sciences*. Université de Bordeaux, 2014. French. <NNT : 2012BOR14723>
- Bernard-Michel, C., 2006. Indicateurs géostatistiques de la pollution dans les cours d'eau. Doctorat en Géostatistique, Ecole nationale supérieure des Mines de Paris.
- Carrillo, N., Cojan, I., de Dieuleveult, C., Durand, N., Franke, C., Lagneau, V., Martineau, N., Mehl, C., 2014. « Projet Carnot 2012 »: Compréhension des mécanismes d'interaction eau-roche par analyse et modélisation du fractionnement isotopique du carbone, rapport d'avancement année 2014, Centre de Géosciences, Mines Paris Tech, Fontainebleau, France.
- Criss, R. E., 1999. Principles of stable isotope distribution. Oxford University Press.
- Durand, N., Cojan, I., Mehl, C., 2015. Influences de la compaction chimique sur la composition en isotopes stables des alternances marno-calcaires (Marnes Bleues apto-albiennes, bassin du SE, France), 15e Congrès Français de Sédimentologie (13-15 Octobre 2015, Chambéry, France).
- de Fouquet C., Flipo N., Létinois L., Malherbe L., Polus-Lefèbvre E., Poulin M., Ung, A., 2012. Which relations between deterministic simulations and observations? 9 International geostatistics congress, Oslo 11-15 June 2012.
- Phillips P.J., Wall G.R., Thurman E.M., Eckhardt D.A., 1999. Metolachlor and Its Metabolites in Tile Drain and Stream Runoff in the Canajoharie Creek Watershed. *Environ. Sci. Technol.* 33(20): 3531-3537.
- Lissalde S., Mazzella N., Mazellier P., 2014. Polar organic chemical integrative samplers for pesticides monitoring: Impacts of field exposure conditions. *Sci. Total Environ.* 488: 188-196.
- Léonard et Crouzet, 1999. Construction d'un réseau de stations de mesures représentatives. Sélection pondération? Rapport IFEN.
- Kalbus E., Reinstorf F., Schirmer M., 2006. Measuring methods for groundwater, surface water and their interactions: a review. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 3, 1809–1850
- Polus-Lefebvre, E., 2010. Apports croisés de la modélisation géostatistique et déterministe. Exemple des nitrates et de l'oxygène dissous dans un réseau hydrographique. Ecole nationale supérieure des Mines de Paris.
- Flipo, N. 2005. Modélisation intégrée des transferts d'azote dans les aquifères et les rivières : Application au bassin du Grand Morin. . Centre d'Informatique Géologique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

- Flipo, N. 2013, June. Modélisation des Hydrosystèmes Continentaux pour une Gestion Durable de la Ressource en Eau. Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, [http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/87/94/49/PDF/flipo2013\\_hdr.pdf](http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/87/94/49/PDF/flipo2013_hdr.pdf).
- Flipo, N. 2014. Résumé des travaux de l'axe Interfaces Nappe-Rivière. . PIREN Seine.
- Flipo, N., S. Even, M. Poulin, and E. Ledoux. 2005. Hydrological part of CaWaQS (CAatchment WAter Quality Simulator): fitting on a small sedimentary basin. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 29:768–772.
- Flipo, N., S. Even, M. Poulin, S. Théry, and E. Ledoux. 2007a. Modelling nitrate fluxes at the catchment scale using the integrated tool CaWaQS. *Sciences of Total Environment* 375:69–79.
- Flipo, N., N. Jeannée, M. Poulin, S. Even, and E. Ledoux. 2007b. Assessment of nitrate pollution in the Grand Morin aquifers (France): combined use of geostatistics and physically-based modeling. *Environ. Pollut.* 146:241–256.
- Flipo, N., B. Labarthe, and F. Baratelli. 2014a. Relations eaux souterraines – réseau hydrographique du bassin Seine-Normandie : Calcul des anomalies de débit. . ARMINES-MINES ParisTech.
- Flipo, N., B. Labarthe, F. Baratelli, and A. Pryet. 2014b. Relations eaux souterraines – réseau hydrographique du bassin Seine-Normandie : Intégration de la dynamique des plaines alluviales. . ARMINES-MINES ParisTech.
- Flipo, N., B. Labarthe, F. Saleh, A. Pryet, P. Goblet, P. Viennot, and L. Abasq. 2013. Relations eaux souterraines-réseau hydrographique sur le bassin Seine Normandie : Quantification des flux hydriques. . ARMINES-MINES ParisTech.
- Flipo, N., C. Monteil, M. Poulin, C. de Fouquet, and M. Krimissa. 2012. Hybrid fitting of a hydrosystem model: long term insight into the Beauce aquifer functioning (France). *Water Resources Research* 48:W05509.
- Flipo, N., and A. Mouhri. 2013. Avancement des travaux de l'axe "Interfaces nappe-rivière. . PIREN Seine.
- Flipo, N., A. Mouhri, B. Labarthe, S. Biancamaria, A. Rivière, and P. Weill. 2014c. Continental hydrosystem modelling : the concept of nested stream-aquifer interfaces. *Hydrology and Earth System Sciences* 18:3121–3149.
- Flipo, N., C. Rabouille, M. Poulin, S. Even, M. H. Tusseau-Vuillemin, and M. Lalande. 2007c. Primary production in headwater streams of the Seine basin: the Grand Morin case study. *Sciences of Total Environment* 375:98–109.
- Garnier, J., J. Némery, G. Billen, and S. Théry. 2005. Nutrient dynamics and control of eutrophication in the Marne River system: modelling the role of exchangeable phosphorus. *Journal of Hydrology* 304:397–412.
- Gazis, C. and Geng, X. (2004). A stable isotope study of soil water : evidence for mixing and preferential flow paths. *Geoderma*, 119 :97–111.
- Goblet, P. 2010. Programme METIS - Simulation d'écoulement et de transport miscible en milieu poreux et fracturé - Notice de conception mise à jour le 6/09/10. . Centre de Géosciences - Ecole des Mines de Paris.
- Kalbus, E., F. Reinstof, and M. Schirner. 2006. Measuring methods for groundwater - surface water interactions: a review. *Hydrology and Earth System Sciences* 10:873–887.
- Labarthe, B., A. Pryet, F. Saleh, M. Akopian, and N. Flipo. 2014. Engineering Geology for society and Territory- Vol 3. in G. E. G. Massimo Arrattano Massimo Rinaldi Orazio Giustolisi Jean-Christophe Marechal Giorgio Lollino, editor. springer.
- McGuire, K. J., and J. J. McDonnell. 2006. A review and evaluation of catchment transit time modeling. *Journal of Hydrology* 330:543–563.
- Millet, A., Bariac, T., Ladouche, B., Mathieu, R., Grimaldi, C., Grimaldi, M., Hubert, P., Molicova, H., Bruckler, L., Valles, V a, d. B. P., Brunet, Y., and Boul`egue, J. (1997). Influence of deforestation on the hydrological behavior of small tropical watersheds. *Revue des Sciences de l'Eau*, 1 :61–84.
- Mouhri, A., N. Flipo, F. Rejiba, C. de Fouquet, L. Bodet, P. Goblet, B. Kurtulus, P. Ansart, G. Tallec, V. Durand, and A. Jost. 2013a. Designing a multi-scale sampling system of stream-aquifer interfaces in a sedimentary basin. *Journal of Hydrology* 504:194–206.
- Mouhri, A., N. Flipo, Q. Vitale, L. Bodet, G. Tallec, P. Ansart, and F. Rejiba. 2013b. L'observation long terme en environnement – Exemple du bassin versant de l'Orgeval. in C. Loumagne and G. Tallec, editors. QUAE.
- Neal, C., M. Bowes, H. P. Jarvie, P. Scholefield, G. Leeks, M. Neal, P. Rowland, H. Wickham, S. Harman, L. Armstrong, D. Sleep, A. Lawlor, and C. E. Davies. 2012. Lowland river water quality: a new UK data resource for process and environmental management analysis. *Hydrological Processes* 26:949–960.

- Neal, C., H. P. Jarvie, A. Love, M. Neal, H. Wickham, and S. Harman. 2008. Water quality along a river continuum subject to point and diffuse sources. *Journal of Hydrology* 350:154–165.
- Pasquier, P., and D. Marcotte. 2006. Steady- and transient-state inversion in hydrogeology by successive flux estimation. *Advances in Water Resources* 29:1934–1952.
- Perkins, S. P., and M. Sophocleous. 1999. Development of a Comprehensive Watershed Model Applied to Study Stream Yield under Drought Conditions. *Ground Water* 37:418–426.
- Pryet, A., B. Labarthe, F. Saleh, M. Akopian, and N. Flipo. 2015. Reporting of stream-aquifer flow distribution at the regional scale with a distributed process-based model. *Water Resources Management* 29:139–159.
- Saleh, F., N. Flipo, F. Habets, A. Ducharne, L. Oudin, P. Viennot, and E. Ledoux. 2011. Modeling the impact of in-stream water level fluctuations on stream-aquifer interactions at the regional scale. *Journal of Hydrology* 400:490–500.
- Vilmin, L. 2014. Modélisation du fonctionnement biogéochimique de la Seine de l’agglomération parisienne à l’estuaire à différentes échelles temporelles. . MINES ParisTech.
- Vilmin, L., N. Aissa-Grouz, J. Garnier, G. Billen, J.-M. Mouchel, M. Poulin, and N. Flipo. 2015. Impact of hydro-sedimentary processes on the dynamics of soluble reactive phosphorus in the Seine River. *Biogeochemistry* 122:229–251.
- Wels, C., Cornett, J., and Lazerte, B. D. (1991). Hydrograph separation : a comparison of geochemical and isotopic tracers. *J. Hydrol.*, 122 :253–274.