



PIREN-Seine  
Phase 6



## RAPPORTS D'ACTIVITE 2014



Actualisation de la base de données agricoles régionalisée sur le bassin Seine-Normandie .....	5
Modélisation de la pollution nitrique d'origine agricole des grands aquifères du bassin Seine-Normandie.....	8
Emissions de N <sub>2</sub> O d'un système de cultures biologique et conventionnelle et comparaison méthodologique en chambres manuelles et automatiques.....	11
Un réseau collaboratif de mesures de la lixiviation du nitrate dans des agrosystèmes biologiques et conventionnels du bassin de la Seine .....	14
Evaluation des performances agro-environnementales des systèmes de cultures du bassin de la Seine.....	17
Modélisation du transfert des pesticides dans les sols à partir du modèle agronomique STICS.....	20
Flux de transport de denrées agricoles en France en 2006.....	22
L'approvisionnement alimentaire parisien : tendances historiques et récents signaux faibles .....	25
METE'EAU : outil de médiation autour de l'enjeu eau .....	28
L'eau et l'azote dans un modèle agro-économique.....	30
Reconnecter l'élevage et la grande culture pour réduire les pertes en nitrate vers les eaux de surface et souterraines. ....	32
Scénarios agricoles pour la protection des captages de Flins-Aubergenville.....	36
Prospective de l'agriculture du bassin de la Seine .....	39
Développement d'un système de caractérisation in situ des propriétés hydrodynamiques et thermiques de la zone hyporhéique.....	43
Imagerie géophysique par méthodes électriques en courant continu (tomographie et sondage) pour la caractérisation des formations superficielles dans la plaine alluviale de la Bassée.....	45
Empreintes de l'évolution de la Seine méandriforme dans la plaine alluviale de la Bassée.....	47
Changement d'échelle des propriétés hydrodynamiques de la plaine alluviale. ...	50

Mise en place du dispositif de mesure des échanges eaux de surface -eaux souterraines dans la plaine alluviale de la Bassée .....	53
Définition explicite des plaines alluviales dans le modèle régional du bassin de la Seine. ....	57
Biogéochimie Haute Fréquence et calculs du métabolisme dans la Seine à l’aval de Paris. ....	59
Dynamiques du carbone, de l’azote et du phosphore à la traversée de l’agglomération parisienne (2007-2012) .....	62
Eutrophisation et phosphore dans la Marne et la Seine. ....	65
Calibration des sondes BBE Fluoroprobe et déconvolution des signaux bruts de fluorescence .....	69
Caractérisation de la dynamique des nitrites sur l’axe Seine : Apport de la biogéochimie isotopique .....	74
Exploration des communautés nitrifiantes de la Seine .....	78
La matière organique dans le bassin de la Seine : sources, variabilité spatio-temporelle et influence sur la spéciation des micropolluants .....	81
Dynamique de la contamination virale en Seine .....	84
Restauration de la continuité écologique des rivières du PNR de la Haute Vallée de Chevreuse .....	92
Approche intégrée pour l’évaluation de la qualité de l’axe Seine .....	95
Rôle de l’érosion dans le transfert des HAP depuis les sols vers les cours d’eau .	98
Contamination de l’atmosphère par les composés perturbateurs endocriniens en Ile de France .....	101
Contribution des sols à la contamination en métaux et HAP des rivières : approche multi-traceurs .....	104
Contamination des sols franciliens par les éléments métalliques et les polluants organiques .....	107
Caractérisation physico-chimique des oxydes de fer dans le bassin de la Seine	114
Evolution de la dynamique de Zn dans des sous-bassins versants spécifiques ..	117
Changement d’échelle des processus biogéochimiques .....	121

ComMod et SAGE .....	123
Faire de l'action publique une action collective. ....	125
Expertise et concertation pour la mise en œuvre des continuités écologiques sur les rivières périurbaines. ....	125
Les continuités écologiques dans la restauration des cours d'eau franciliens ....	127
Le site Archiseine .....	129
Étude historique de l'évolution du cours de la Seine et du fond de vallée entre Nogent-sur-Seine et Bray-sur-Seine du Moyen Âge à l'Époque moderne.....	131

# ACTUALISATION DE LA BASE DE DONNEES AGRICOLE REGIONALISEE SUR LE BASSIN SEINE-NORMANDIE

*Puech T., Schott C.\* , Mignolet C.*

*INRA Mirecourt, 662 avenue Louis Buffet 88500 Mirecourt*

*\* celine.schott@mirecourt.inra.fr*

## CONTEXTE ET OBJECTIFS

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE) prévoit une mise à jour de l'état des lieux des aquifères du bassin Seine-Normandie en 2015 servant de base à la préparation du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) et du Programme de Mesures 2016-2021.

Pour ce faire, l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN) mobilise des travaux menés depuis une dizaine d'années par l'unité de recherche ASTER Mirecourt dans le cadre du PIREN-Seine. Ces travaux ont abouti à une description spatialisée des systèmes de culture sur le bassin de la Seine et en Basse-Normandie sur plus de trois décennies (1970-2006).

L'objectif du travail mené est d'actualiser la description spatialisée des systèmes agricoles à l'échelle de l'ensemble du bassin Seine-Normandie pour disposer d'informations localisées utilisables pour l'évaluation des transferts de contaminants nitriques vers les aquifères souterrains (couplage STICS-MODCOU réalisé par ARMINES – MinesParisTech).

## SPATIALISATION DES SYSTEMES DE CULTURE

### Définition d'un maillage spatial

Une première étape du travail de spatialisation a permis, à partir d'une typologie des assolements communaux (Recensement agricole 2010) croisée avec la définition des petites régions agricoles (Agreste 1946) d'identifier 95 Unités de Modélisation Agricoles – UMA sur l'ensemble du bassin Seine-Normandie.

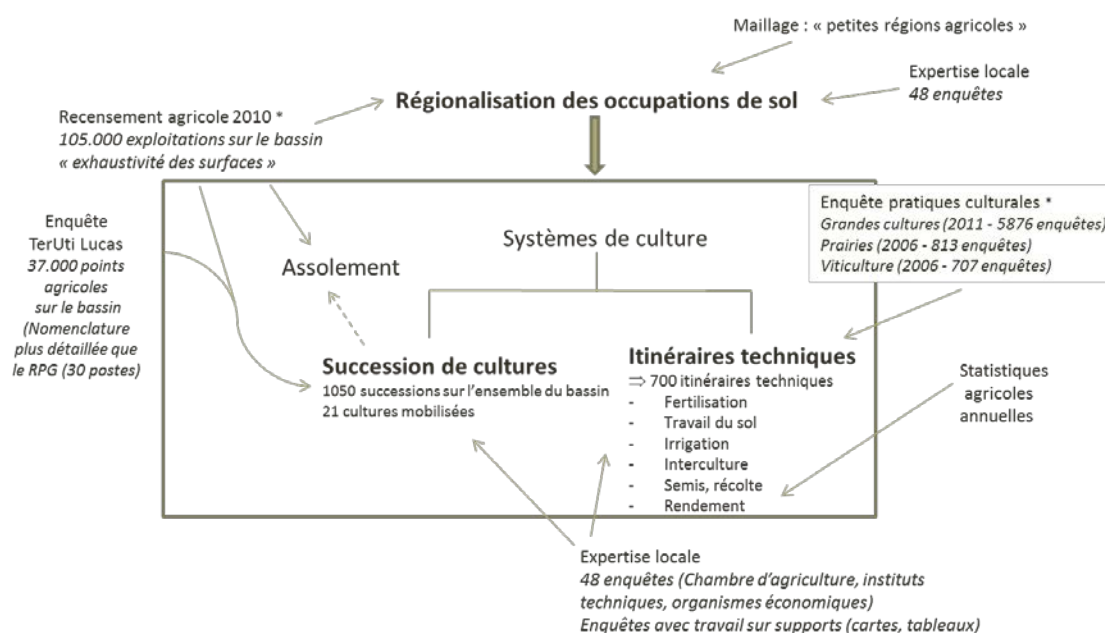
### Description des principales successions de cultures

Les principales successions de cultures présentes sur chaque UMA ( $\approx 10$  successions / UMA) ont été identifiées à partir de l'enquête d'occupation du sol TerUti Lucas (2006-2010).

### Description des itinéraires techniques

L'enquête sur les pratiques culturales a été utilisée à l'échelle de 7 grandes régions agricoles (Blé tendre, Blé dur, Betterave, Orge d'hiver, Orge de printemps, Colza, Pois, Prairies et Vigne)<sup>1</sup>.

Cette première partie ne permettant pas d'identifier les spécificités locales, une enquête auprès d'une cinquantaine de professionnels techniques agricoles a permis de compléter et d'affiner les modes de conduites à des échelles plus fines. Les systèmes de cultures décrits et spatialisés à l'échelle des 95 UMA sont structurés dans la base de données Agricole Régionalisée sur le bassin Seine-Normandie (ARSEINE) et mobilisables pour l'évaluation des transferts de contaminants nitriques (couplage STICS – MODCOU, Mines ParisTech).



La base de données contient la traçabilité de l'ensemble des itinéraires techniques ainsi que des éléments explicatifs sur les dynamiques locales collectés lors des entretiens auprès des professionnels rencontrés.

Les résultats précédemment acquis sont mobilisés pour simuler des modifications de pratiques spatialisées dans le cadre de la mise en place du programme de mesures de l'agence de l'eau. Ces mesures sont appliquées aux zones vulnérables nitrates (mise en place de couverts intermédiaires) et aux grandes Aires

<sup>1</sup> Fertilisation azotée (minérale et organique), travail du sol, irrigation, interculture, dates de semis ou le rendement

PIREN-Seine – Phase 6 – Rapports 2014

Axe 1 : L'agriculture de demain

Bloc 1 : Pratiques agricoles et cascades de contamination

d'Alimentation de Captages<sup>2</sup> (Réduction de 20% de la fertilisation sur 20% de la SAU, remise en herbe de 1% de la SAU).

---

<sup>2</sup> Pour des raisons de représentativité des systèmes de cultures décrits, le programme de mesures n'est évalué que sur les 37 UMA où la surface en AAC est significative (SAU des AAC > 10% SAU des UMA). Ainsi on modélise des modifications de pratiques sur 90% de la surface en AAC du bassin.

# MODELISATION DE LA POLLUTION NITRIQUE D'ORIGINE AGRICOLE DES GRANDS AQUIFERES DU BASSIN SEINE-NORMANDIE

Gallois N.<sup>1\*</sup>, Viennot P.<sup>1\*</sup>, Beaudoin N.<sup>3</sup>, Mary B.<sup>3</sup>, Le Bas C.<sup>4</sup>, Puech T.<sup>2</sup>, Schott C.<sup>2</sup>, Mignolet C.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> MINES ParisTech, Centre de Géosciences, Fontainebleau

<sup>2</sup> INRA SAD-Aster, Mirecourt

<sup>3</sup> INRA-AgroImpact, Laon

<sup>4</sup> INRA-US1105 Infosol, Orléans

\* [nicolas.gallois@mines-paristech.fr](mailto:nicolas.gallois@mines-paristech.fr), [pascal.viennot@mines-paristech.fr](mailto:pascal.viennot@mines-paristech.fr)

## CONTEXTE DE L'ETUDE

La DCE prévoit une réactualisation de l'état des aquifères du bassin Seine-Normandie en 2015 servant de base à la préparation du SDAGE et au programme de mesures 2016-2021 de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie. Dans ce contexte, la problématique d'évaluation des transferts de contaminants nitriques agricoles vers le domaine souterrain via l'utilisation de la chaîne STICS/Modcou<sup>1</sup> a imposé la mise à jour de cette dernière.

### Objectifs

L'objectif poursuivi ici est, à la fois, de reconstituer de façon spatio-temporelle l'évolution des concentrations en nitrates mesurées aux ouvrages dans l'ensemble des formations aquifères modélisées<sup>2</sup> et prévoir, via la simulation de scénarios tendanciels, les grandes évolutions des concentrations attendues à moyen terme, à partir des niveaux actuels reconstitués et de la reproduction de leurs dynamiques de mise en place.

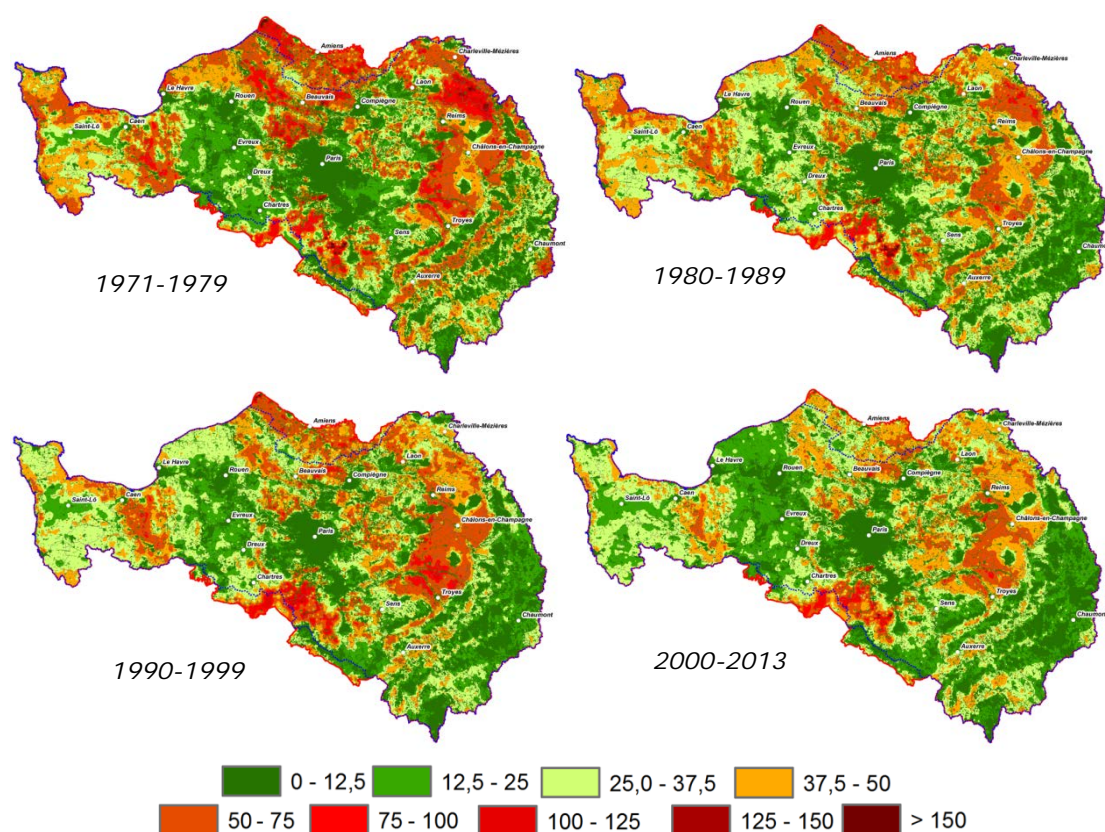
### Modélisation agronomique STICS

Cette actualisation de la plate-forme de modélisation s'est décomposée en plusieurs étapes principales, dont :

- L'implémentation au modèle agronomique (version 8.3-octobre 2014) d'une structure informatique permettant de le déployer à l'échelle du bassin (*spatialisation*) et de prendre en compte la variabilité spatio-temporelle des forçages météorologiques, des systèmes de cultures et des différentes catégories et types de sol. Cette nouvelle procédure, entièrement externalisée au code source du modèle permettra, à l'avenir de suivre les évolutions de STICS au fur et à mesure de leurs publications.
- L'utilisation des travaux de description spatialisée des systèmes de culture sur le bassin (*BDD ARSeiNe*, INRA-SAD Aster), également mis à jour sur la période 2006-2013. L'avancée en parallèle de cette étude avec ceux de la

modélisation a permis d'optimiser le mode d'utilisation des informations mobilisables pour le modèle agronomique.

- La réactualisation, entre autres, des classes de pédotransfert (INRA-Infosol) utilisées pour l'estimation des stocks d'azote organique via les données de mesures du RMQS (Réseau de Mesure de la Qualité des Sols), auxquels la lixiviation de l'azote s'avère particulièrement sensible.
- L'élaboration, en étroite collaboration avec l'INRA-AgroImpact, d'un protocole d'expertise détaillé des sorties de STICS afin d'en évaluer la fiabilité macro-régionale. Cette procédure a également visé, selon une méthode itérative, à décrire la variabilité spatio-temporelle d'indicateurs agronomiques, à étudier la cohérence entre entrées et sorties du modèle ainsi qu'à vérifier l'existence de relations robustes<sup>3</sup> entre variables.



• Figure 1 : Concentrations (en  $\text{mgNO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ ) sous-racinaires moyennes décennales (modulées par l'occupation du sol) en nitrates d'origine agricole

### Modélisation hydrogéologique MODCOU (en cours)

L'obtention de ces résultats entraîne une nouvelle phase de calage hydrodynamique (actuellement en cours), de l'ensemble des modèles couvrant le bassin Seine-Normandie (au nombre de 7) via des chroniques de mesures recensées sur près de 1000 ouvrages. Les résultats obtenus permettront de

mettre à jour les fiches synthétiques compilées à la masse d'eau et d'étudier l'influence des scénarios proposés sur l'évolution de la pollution nitrique.

### **Simulations tendanciennes (en cours)**

Les données climatiques utilisées (1950-2100) sont issues du modèle régional *Aladin-Climat* (CNRM). Elles sont associées à un ensemble de nouveaux profils représentatifs d'évolution de concentration de gaz à effets de serre définis dans le cadre du 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC<sup>4</sup>. Les données associées au profil intermédiaire défini ( $[\text{CO}_2]_{\text{éq-CO}_2}$  vers 2100 de 800 ppm) a été retenu pour les simulations réalisées dans le cadre de cette étude.

La mise en œuvre de simulations préliminaires visant à quantifier l'influence des données climatiques utilisées, par comparaison des principales variables d'intérêt simulées via STICS sous séries SAFRAN (observations) et Aladin-Climat (période de référence « temps présent ») pour la période 1970-2005 indiquent que près de 80% de la surface du domaine modélisé est soumis à un différentiel absolu très faible, inférieur à  $2 \text{ kgN.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ .

Outre la simulation de scénarios, sur la période 2014-2030, déjà mis en œuvre lors des précédentes applications de la chaîne<sup>2</sup> (maintien des pratiques actuelles, réduction globale de -10 et -20% des intrants azotés), il a été choisi d'évaluer l'impact du programme de mesures proposé par l'AESN sur les modifications de pratiques localisées sur le bassin. Celui-ci comporte deux types de mesures :

- au niveau des zones vulnérables (définies par les décrets d'application de la directive Nitrates) visant notamment la couverture des sols avant les cultures de printemps (= mise en place de CIPAN),
- au sein des AAC prioritaires du bassin<sup>3</sup> : réduction de 20% de la fertilisation sur 20% de la SAU et remise en herbe de 1% de la SAU.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

<sup>1</sup> Ledoux E. et al, Agriculture and groundwater nitrate contamination in the Seine basin: The STICS–MODCOU modelling chain, STOTEN, 2007, 375, p. 33-47.

<sup>2</sup> Viennot P., Abasq L., Modélisation de la pollution nitrique des grands aquifères du bassin de Seine-Normandie à l'échelle des masses d'eau, Rapport Armines, 2013, 173 p.

<sup>3</sup> Beaudoin N. et al., Evaluation of the soil crop model STICS over 8 years against the "on farm" database of Bruyères catchment, European Journal of Agronomy, 2008, 29, 1, p. 46-57.

<sup>4</sup> Jouzel J., Vautard R., Planton S., Jouini M., Deque M., Ouzeau G., Le climat de la France au XXI<sup>ème</sup> siècle, Volume 4 - Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 2014, 64 p.

---

<sup>3</sup> Pour des raisons de représentativité des systèmes de cultures décrits, le programme de mesures n'est évalué que sur les zones du bassin où la surface en AAC est significative. Ainsi, on modélise des modifications de pratiques sur 90% de la surface en AAC du bassin.

# EMISSIONS DE N<sub>2</sub>O D'UN SYSTEME DE CULTURES BIOLOGIQUE ET CONVENTIONNELLE ET COMPARAISON METHODOLOGIQUE EN CHAMBRES MANUELLES ET AUTOMATIQUES

*Benoit M.<sup>1</sup>, Garnier J.<sup>2</sup>, Billen G.<sup>2</sup>, Mercier B.<sup>1</sup>, Azougui A.<sup>1</sup>*

*1 UPMC, UMR Metis, Paris, FRANCE*

*2 CNRS, UMR Metis, Paris, FRANCE*

*\* marie.benoit@upmc.fr*

## INTRODUCTION

Les activités agricoles contribuent à 78 % aux émissions de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O). (Johnson et al. 2007), qui est un gaz à effets de serre (GES) dont le pouvoir de réchauffement global (PRG) est 298 fois supérieur à celui du CO<sub>2</sub>. Ce gaz est actuellement la première substance destructrice de l'ozone stratosphérique (Cicerone 1987; Ravishankara et al. 2009). L'agriculture biologique (AB), grâce à son cahier des charges bannissant tout intrant industriel, constitue un modèle à explorer pour réduire les émissions de N<sub>2</sub>O. L'objectif de cette étude est de (i) de quantifier les émissions de N<sub>2</sub>O dans une exploitation mixte du bassin de l'Orgeval sur une rotation en AB (huit cultures) et sur une rotation en agriculture conventionnelle (AC) de trois cultures et (ii) dans le cadre du projet EFEMAIR-N<sub>2</sub>O (financé par l'ADEME, coordonné par laboratoire Agro-Impact de l'INRA-Laon), de comparer les méthodes de mesures en chambres manuelles et en chambres automatiques.

## MATERIELS ET METHODES

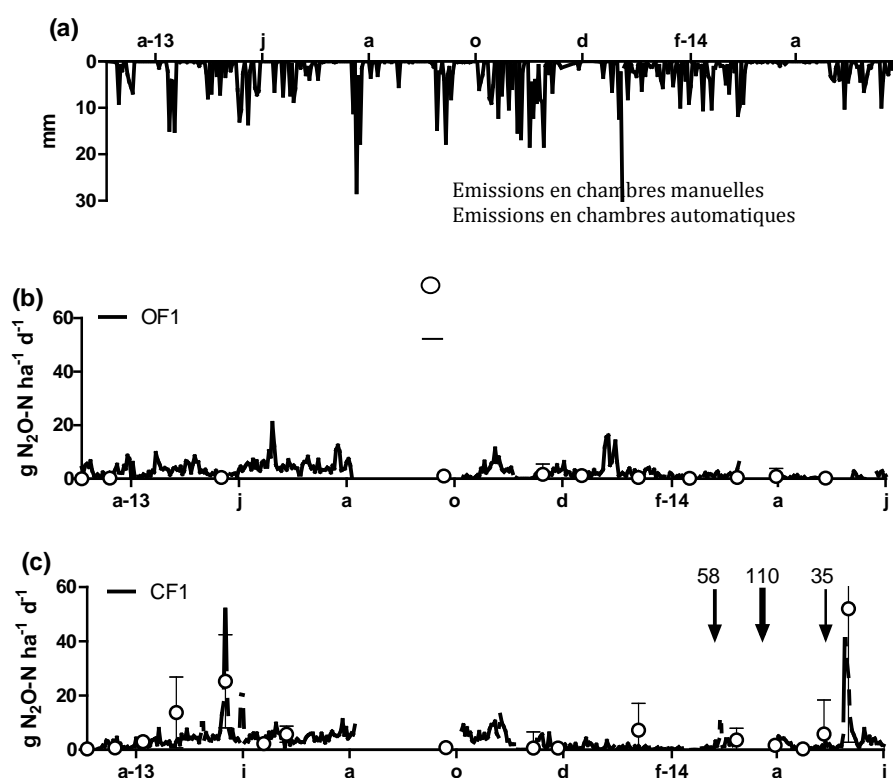
Les mesures de GES ont été réalisées de février 2011 à juillet 2014 sur différentes parcelles de la rotation biologique (luzerne 1 ; luzerne 2 ; blé ; légumineuse ; céréale ; féverole ; blé ; lin) et conventionnelle (légumineuse ; blé ; blé) en utilisant la technique des chambres d'accumulation statiques. Sur l'exploitation mixte, quatre séries de cinq chambres de base carrée (50 cm x 50 cm x 30 cm de hauteur) ont été implantées dans le sol à environ 15 cm, afin d'assurer l'étanchéité tout au long du développement de la culture. Les prélèvements ont été réalisés tous les 15 jours.

Depuis mars 2013, deux séries de trois chambres automatiques (70 cm x 70 cm x 22 cm de hauteur) ont été installées sur deux parcelles contiguës (AB et AC) afin de mesurer les flux de N<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub> de manière quasi-continue, soit 4 mesures de

20 min dans chaque chambre toutes les 6h (0-2h ; 6h-8h ; 12-14h ; 18h-20h). L'air passe à travers l'analyseur de CO<sub>2</sub> (LiCor 820: LiCor Biosciences, Lincoln, NE USA) et de N<sub>2</sub>O (Thermo 46C: Thermo Electron, Saint Aubon, France) avec des capteurs de sensibilité d'environ 0.5 ppm et 2 ppb respectivement (Oorts et al. 2007). Les flux de CO<sub>2</sub> et de N<sub>2</sub>O sont calculés via un modèle de régression linéaire ou exponentielle.

## RESULTATS ET DISCUSSION

Les mesures ponctuelles en chambres automatiques et manuelles ne présentent pas de différence significative lorsque les flux sont non négligeables (t-test, p-value=0.8). Toutefois, les chambres automatiques permettent d'améliorer le calcul des flux cumulés, en intégrant plus finement l'ensemble des variations de flux dues aux conditions climatiques, comme un événement pluvieux sur la parcelle biologique (OF1) ou lors des pratiques agricoles, tel que l'apport d'azote minéral sur la parcelle conventionnelle (CF1) (Figure 1).



• Figure 1. Pluviométrie (a) flux d'émissions de N<sub>2</sub>O en chambres manuelles et automatiques sur une parcelle biologique (b) et une parcelle conventionnelle (c) de mars 2013 à juin 2014. Les flèches indiquent les doses des apports de fertilisation minérale (kg N.ha<sup>-1</sup>).

En ce qui concerne, les émissions sur la rotation biologique (cinq cultures sur huit), elles sont en moyenne de  $0.65 \pm 0.33$  kg N<sub>2</sub>O-N.ha<sup>-1</sup> et de  $0.91 \pm 0.44$  kg N<sub>2</sub>O-N.ha<sup>-1</sup> sur la rotation conventionnelle (3 cultures).

## REMERCIEMENTS

Nous remercions la région Ile-de-France (DIM-Astrea), la Fédération FIRE (FR3020), la zone Atelier Seine (CNRS) ainsi que le projet EFEMAIR-N<sub>2</sub>O (Ademe) pour leurs soutiens.

## BIBLIOGRAPHIE

Cicerone R.J. (1987). Changes in Stratospheric Ozone. *Science* 237:35–42. doi: 10.1126/science.237.4810.35

Johnson J.M.-F., Franzluebbers A.J., Weyers S.L., Reicosky D.C. (2007). Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions. *Environ Pollut* 150:107–124. doi: 10.1016/j.envpol.2007.06.030.

Oorts K., Merckx R., Gréhan E., et al. (2007). Determinants of annual fluxes of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O in long-term no-tillage and conventional tillage systems in northern France. *Soil Tillage Res* 95:133–148.

Ravishankara A.R., Daniel J.S., Portmann R.W. (2009). Nitrous Oxide (N<sub>2</sub>O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century. *Science* 326:123–125. doi: 10.1126/science.1176985

# UN RESEAU COLLABORATIF DE MESURES DE LA LIXIVIATION DU NITRATE DANS DES AGROSYSTEMES BIOLOGIQUES ET CONVENTIONNELLES DU BASSIN DE LA SEINE

*Benoit M.<sup>1</sup>, Garnier J.<sup>2</sup>, Billen G.<sup>2</sup>, Mercier B.<sup>1</sup>, Azougui A.<sup>1</sup>*

*1 UPMC, UMR Metis, Paris, FRANCE,*

*2 CNRS, UMR Metis, Paris, FRANCE*

*\* marie.benoit@upmc.fr*

## INTRODUCTION

Les pratiques agricoles intensives de l'agriculture conventionnelle (AC) ont engendré des fuites d'azote dans l'environnement, se manifestant en particulier par la contamination des eaux de surface et souterraines via la lixiviation du nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), avec le dépassement de la norme de potabilité fixée à 11 mg N.l<sup>-1</sup> (ou 50 mg  $\text{NO}_3$ .l<sup>-1</sup>). Ainsi, la quasi-totalité du bassin de la Seine a été classé en zone vulnérable par la Directive Nitrate, qui vise au maintien de la qualité des ressources en eaux. Dans une perspective de changement de système agricole pour réduire la contamination nitrique des eaux, une hypothèse de ce travail était que l'agriculture biologique (AB) pouvait contribuer à réduire ces pertes. Les pertes azotées en AB sont bien moins documentées que celles en AC dans la littérature internationale, et tout particulièrement en France et dans le bassin de la Seine. En conséquence, l'objectif principal de ce projet de recherche a été de mesurer et quantifier dans le bassin de la Seine, ces fuites d'azote dans des exploitations de grandes cultures céréalières en AB, mais également en référence à l'AC, sur l'ensemble des cultures de leurs rotations, sous une forme collaborative avec les agriculteurs.

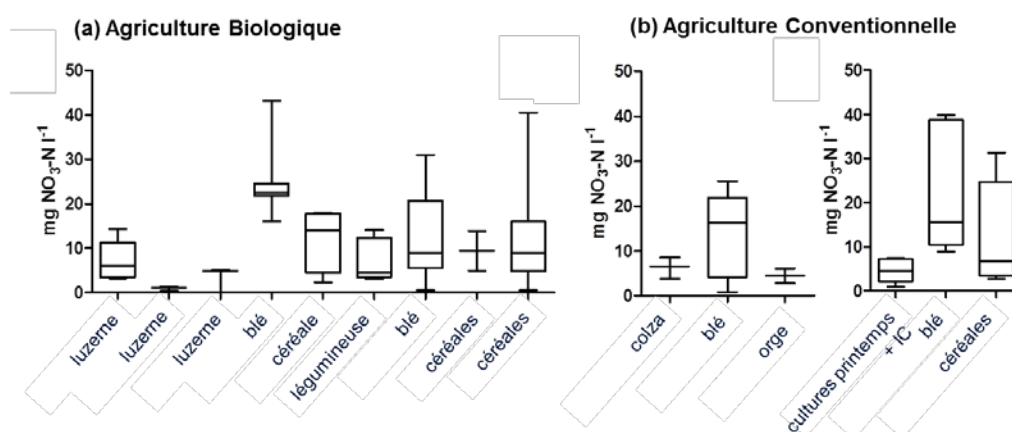
## MATERIELS ET METHODES

Le réseau ABAC est constitué de dix-huit systèmes de cultures (8 en AB et 10 en AC) répartis dans cinq pôles pédoclimatiques (Seine et Marne, Oise, Val d'Oise, Yvelines, Yonne et Centre) du bassin de la Seine. La lixiviation du  $\text{NO}_3^-$  a été permise via l'utilisation de bougies poreuses verticales sur l'ensemble des assolements représentatifs des rotations, soit un total de 78 parcelles équipées de six bougies poreuses dont 48 parcelles en AB et 30 en AC. Soit des systèmes différents par leurs gestions de l'azote, mais aussi par des rotations longues en AB (moyenne de 8 ans) comprenant une plus forte proportion de légumineuses, dont la luzerne. Les rotations conventionnelles sont représentées par des

rotations plu courtes (3 ans) dont notamment les successions colza-blé-orge et maïs/betterave-blé-blé, représentatives de la région.

## RESULTATS ET DISCUSSION

L'ensemble de ce réseau, a permis de différencier en termes de fuites vers les aquifères, les différentes cultures et pratiques (intensité de la fertilisation, présence d'intercultures et des légumineuses) au sein des rotations. Par exemple, les concentrations en azote sont minimales pour la luzerne et les cultures pièges à nitrate ( $< 5 \text{ mg N.l}^{-1}$ ) et maximales pour les blés semés après légumineuses ( $> 15 \text{ mg N.l}^{-1}$ ), résultats observés pour l'ensemble des contextes pédoclimatiques explorés dans le bassin de la Seine (Figure 1).



• Figure 1: Moyennes pondérées des cultures du réseau ABAC en 2013-2014.

A l'échelle des exploitations, les concentrations moyennes des rotations AB « avec 2 à 3 ans de luzerne » sont de  $9.6 \pm 3.4 \text{ mg N.l}^{-1}$  et celles des exploitations en AC sont de  $16.6 \pm 10.3 \text{ mg N.l}^{-1}$ . Ces concentrations, converties en flux, aboutissent à des quantités d'azote lixivié en AB de  $15.3 \pm 9.7 \text{ kg N.ha}^{-1}$  et en AC de  $27 \pm 24.7 \text{ kg N.ha}^{-1}$  selon les exploitations dans différents pôles pédoclimatiques du bassin de la Seine.

## CONCLUSION

En comparant les résultats obtenus à l'échelle de l'exploitation avec d'autres études réalisées en Europe (Hansen et al. 2000; Korsaeath and Eltun 2000; Stopes et al. 2002), on observe une diminution de la lixiviation du NO<sub>3</sub> dans les systèmes biologiques de l'ordre de 30% par rapport aux systèmes conventionnels.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions l'ensemble des agriculteurs qui participent au réseau ABAC, ainsi que la région Ile-de-France (DIM-Astrea), l'Agence de l'Eau Seine-Normandie et Eau-de-Paris pour leurs soutiens.

## BIBLIOGRAPHIE

Hansen B., Kristensen E.S., Grant R., et alO (2000). Nitrogen leaching from conventional versus organic farming systems—a systems modelling approach. *Eur J Agron* 13:65–82.

Korsaeth A., Eltun R. (2000). Nitrogen mass balances in conventional, integrated and ecological cropping systems and the relationship between balance calculations and nitrogen runoff in an 8-year field experiment in Norway. *Agric Ecosyst Environ* 79:199–214. doi: 10.1016/S0167-8809(00)00129-8.

Stopes C., Lord E.I., Philipps L., Woodward L. (2002). Nitrate leaching from organic farms and conventional farms following best practice. *Soil Use Manag* 18:256–263.

## EVALUATION DES PERFORMANCES AGRO-ENVIRONNEMENTALES DES SYSTEMES DE CULTURES DU BASSIN DE LA SEINE

*Anglade J. \*, Benoit M., Billen G. \*, Garnier J., Lassaletta L.*

*UPMC-CNRS UMR Metis, Paris*

*\*juliette.anglade@upmc.fr, gilles.billen@upmc.fr*

### CONTEXTE DE L'ETUDE

Face à l'ampleur des altérations de la qualité de l'eau causées par l'agriculture industrielle dans le bassin de la Seine, des outils sont de plus en plus nécessaires pour évaluer les performances des systèmes agricoles tant en termes de production que d'émission de polluants vers l'hydrosphère ou l'atmosphère. Il s'agit par exemple de pouvoir comparer divers systèmes de cultures sous l'angle double de leur production agronomique et de leurs pertes environnementales d'azote, ou de renseigner sur le long terme l'évolution de ces caractéristiques pour le système agricole dominant.

### OBJECTIFS ET METHODE

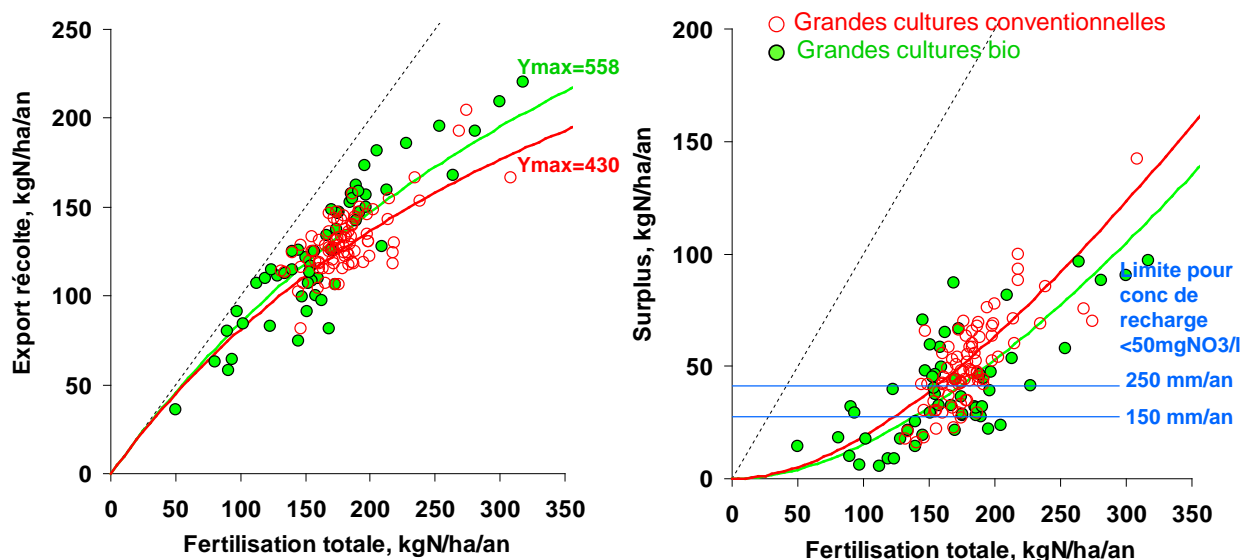
Le **bilan d'azote des sols**, (Soil Surface Balance, **SSB**), pour une parcelle donnée, l'ensemble des sols d'une exploitation, ou d'un territoire, tient compte d'une part du total des apports azotés au sol par les engrais de synthèse, les apports organiques, la fixation symbiotique, les dépôts atmosphériques et l'irrigation, et d'autre part des sorties d'azote par la récolte et le broutage. Intégré sur le temps long, au moins sur un cycle complet de rotation culturale pour prendre en compte les arrières effets des précédents culturaux, le solde de ce bilan définit un surplus non valorisé par la production, susceptible d'être entraîné vers l'hydrosystème par le ruissellement ou l'infiltration, volatilisé sous forme ammoniacale ou dénitrifié vers l'atmosphère ou encore accumulé dans le stock de matière organique du sol. Le rapport entre la fertilisation totale et le rendement, tous deux exprimés en kgN/ha/an, permet d'évaluer de manière intégrative l'efficacité d'utilisation de l'azote à l'échelle de la rotation culturale. Indicateur multi-scalaire, le bilan SSB permet ainsi de décrire et de prévoir les pressions exercées sur le milieu par divers systèmes de production, mais aussi d'évaluer les performances agro-environnementales de ces systèmes en examinant chacun des termes de ce bilan (le rendement, et les différents postes de fertilisation) et la nature de la relation qui les unit.

## LA FIXATION SYMBIOTIQUE

La principale difficulté méthodologique réside dans l'appréciation de la fixation d'azote atmosphérique, souvent ignorée ou sous-estimée dans les calculs de bilan. Une revue détaillée de la littérature à ce sujet a débouché sur la formulation de relations simples et robustes pour l'estimation de la quantité d'azote fixée par les légumineuses graines et fourragères (Anglade et al., 2015).

## LA RELATION RENDEMENT FERTILISATION

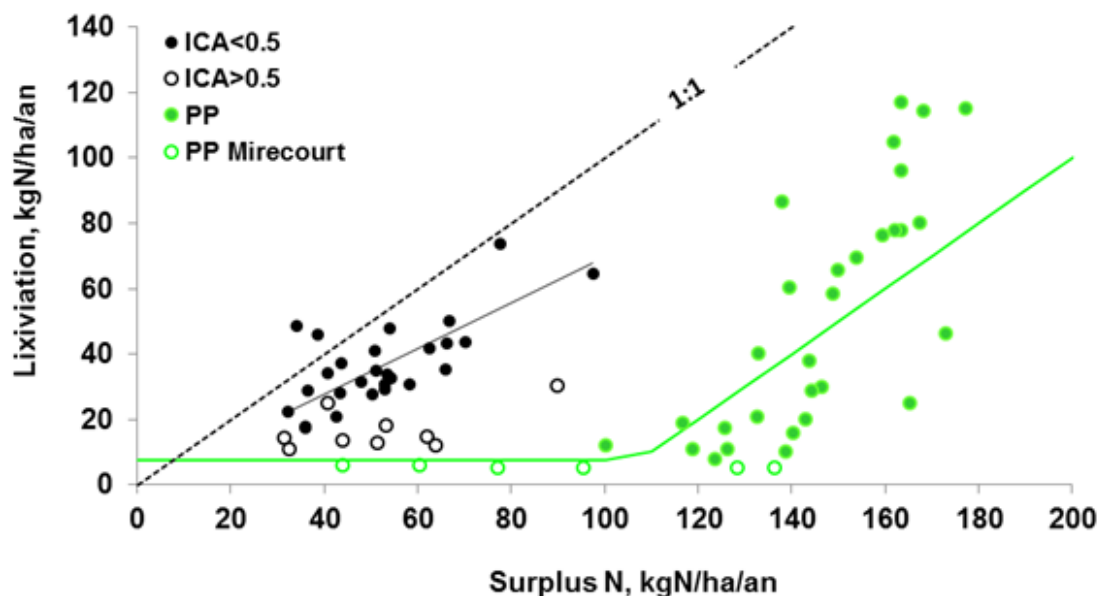
Nous avons montré qu'existe, pour un système agricole et dans un contexte pédo-climatique donnés, une relation robuste entre le total des apports d'azote au sol ( $F$ , kgN/ha/an) et le rendement en protéines ( $Y$ , kgN/ha/an) intégré sur le cycle de rotation culturale. Une fonction hyperbolique à un seul paramètre  $Y = Y_{max} \cdot F / (F + Y_{max})$  rend bien compte de cette relation (Lassaletta et al., 2014). L'application de cette relation sur base d'enquêtes réalisées dans une centaine d'exploitations biologiques du bassin de la Seine montre que celles-ci sont agronomiquement aussi performantes (en termes de  $Y_{max}$ ) et présentent un surplus azoté généralement moindre que les rotations conventionnelles même respectant l'équilibre réglementaire de fertilisation (Anglade et al., soumis) (Fig. 1).



• Figure 1 : Relation rendement fertilisation, et surplus fertilisation de systèmes de grande culture conventionnels (en rouge) et biologique (en vert) dans le bassin parisien. (Anglade et al., soumis)

## LA RELATION SURPLUS LIXIVIATION

Nous avons mis en évidence la relation qui existe entre surplus, lixiviation et concentration des eaux de drainage sur terres arables. Un indice de couverture automnale a été proposé pour prendre en compte l'effet des CIPAN sur cette relation (Fig. 2).



• Figure 2 : Relations entre le surplus en kgN/ha/an et la lixiviation en kgN/ha/an pour différentes successions culturales du bassin de la Seine et valeurs d'indices de couverture automnale (ICA < ou > 0.5) et sur prairies.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Lassaletta L., Billen G., Grizzetti B., Anglade J., Garnier J. (2014). 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland. *Environ. Res. Lett.* 9. DOI:10.1088/1748-9326/9/10/105011

Anglade J., Billen G., Garnier J. (2015). Relationships for estimating N<sub>2</sub> fixation in legumes: incidence for N balance of legume-based cropping systems in Europe. *Ecosphere* (accepted)

Anglade J., Billen G., Garnier J., Makridis T., Puech T. & Tittel C. (subm). Agro-environmental performance of organic compared to conventional cash crop farming in the Seine watershed. *Agricultural Systems*. (subm)

## MODELISATION DU TRANSFERT DES PESTICIDES DANS LES SOLS A PARTIR DU MODELE AGRONOMIQUE STICS

Queyrel W.<sup>1, 2\*</sup>, Habets F.<sup>1</sup>, Blanchoud H.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, CNRS, EPHE, UMR 7619 Metis, 4 place Jussieu, 75005 PARIS, France

<sup>2</sup> AgroSup Dijon, UMR1347 Agroécologie, BP 86510, F-21000 Dijon, France

\* [wilfried.queyrel@agrosupdijon.fr](mailto:wilfried.queyrel@agrosupdijon.fr)

### CONTEXTE

Le module PeStics a été développé au sein du modèle agronomique STICS afin de simuler le transfert réactif de produits phytosanitaires dans les sols agricoles en prenant en compte explicitement les pratiques agricoles et le développement de la plante (Queyrel, 2014). Plusieurs pesticides ainsi que leurs produits de dégradation peuvent être gérés simultanément. Les formalismes utilisés pour simuler les processus d'adsorption et de dégradation sont issus de la littérature scientifique et ont été évalués en particulier issus des travaux du groupe FOCUS (Boesten et al., 1997; FOCUS, 2010).

Pestics est conçu comme une option du modèle STICS qui nécessite des données supplémentaire en entrée du modèle : le calendrier des apports en pesticides ; les caractéristiques physico-chimiques des matières actives; le profil détaillé en carbone organique du sol.

### EVALUATION

Pestics a à ce jour était utilisé sur 4 herbicides (atrazine, isoproturon, bentazone, chlortoluron) et un métabolite (DEA). Il a fait l'objet de tests de sensibilité, d'une évaluation détaillée sur trois sites expérimentaux, et d'une modélisation simplifiée mais longue durée du bassin versant de l'Orgeval. L'évaluation sur les sites expérimentaux ont montré que les résultats obtenus par le modèle sont comparables à ceux obtenus par les autres modèles. L'étude de sensibilité a montré l'intérêt d'une bonne connaissance des caractéristiques physico-chimiques des matières actives, et a également permis de quantifier les erreurs associées à l'utilisation de paramètres moyens. Cette application longue durée a notamment permis d'étudier les interactions entre les processus de dégradation et d'adsorption/désorption qui conduisent à retrouver des molécules dans les hydrosystèmes 10 ans après leur dernières utilisations (Queyrel et al., 2014a).

## **EXPLOITATION**

L'enjeu est maintenant d'utiliser le modèle Pestic à l'échelle d'un bassin versant. Cela permettra notamment de simuler de façon simultanée la pollution par les nitrates et celles par les pesticides. Une première étape a été menée en se sens en s'intéressant sur une parcelle à l'effet des CIPANS sur la lixiviation des pesticides et des nitrates. La réduction des flux d'eau infiltrés permet une réduction des deux flux d'atrazine et de DEA. Selon les propriétés des pesticides et métabolite, une plus grande fraction peut alors être dégradée avant lixiviation.

## **TRANSFERT**

Afin de faciliter le transfert du code Pestic à la communauté STICS, un effort d'intégration dans les modules de STICS a été réalisé. De plus, une notice détaillée a été rédigée (Queyrel et al., 2014b). Le code a ainsi été transféré à l'INRA et à Mines-Paristech.

## **CONCLUSIONS**

Les travaux menés avec Pestic doivent être complétés, d'une part, via une application à l'échelle du bassin versant, qui sera réalisée par Mines-Paristech sur le bassin versant du Champigny, et d'autre part, via l'intégration de nouveaux processus comme la volatilisation ou la sensibilité au PH afin de pouvoir traiter un plus grand nombre de molécules. Ces travaux seront menés dans la prochaine phase du PIREN.

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- Boesten J., Helweg A., Businelli M., Bergstrom L., Schaefer H., Delmas A., Kloskowski R., Walker A., Travis K., and Smeets L. (1997). Soil persistence models and EU registration.
- FOCUS (2010). Assessing potential for movement of active substances and their metabolites to ground water in the EU. FOCUS Sanco/13144/2010.
- Queyrel W. (2014), Modélisation du devenir des pesticides dans les sols à partir d'un modèle agronomique : évaluation sur le long terme. Thèse de doctorat Université Pierre et Marie Curie, 233 p
- Queyrel W., Habets F., Blanchoud H., Schott C., Nicola L., (2014a). Simulation de la dissipation des pesticides dans les sols sur le long terme : application au bassin versant de l'Orgeval. Rapport GDR PIREN-Seine 2014, 24 p.
- Queyrel W., Habets F., Blanchoud H. (2014b) Notice utilisateur PeStics. Rapport AESN, 50p.

# FLUX DE TRANSPORT DE DENREES AGRICOLES EN FRANCE EN 2006

*Le Noe J. \*, Billen G. \*, Lassaletta L., Garnier J.*

*UPMC-CNRS UMR Metis, Paris*

*\*julia.lenoe@gmail.com; gilles.billen@upmc.fr*

## CONTEXTE DE L'ETUDE

L'analyse des flux commerciaux de protéines contenus dans les denrées agricoles, à partir de la base de données du commerce international de la FAO, montre une spécialisation internationale très accentuée, où un petit nombre de pays exportateurs (Brésil, Argentine, Amérique du Nord) assure les besoins en alimentation animale d'un grand nombre de pays déficitaires (Burke et al., 2009 ; Lassaletta et al., 2014). L'application de cette démarche à l'agriculture nationale est paradoxalement plus difficile, à cause de l'absence de données sur les échanges intra-nationaux de produits agricoles. Pourtant, les échanges de marchandises entre départements français sont recensés depuis plusieurs décennies dans la base SitraM, établie par les services ministériels en charge de la gestion des transports. Cette base n'a que rarement été exploitée dans le cadre d'études scientifiques sur la structure du système agricole. Nous présentons ici pour la première fois, une description complète des flux de denrées agricoles entre départements français, exprimés par leur contenu en protéines, une unité générique qui permet de les comparer entre eux et avec les flux majeurs de la cascade de l'azote induite par l'agriculture. Cette analyse met l'accent sur la spécialisation à l'export des régions agricoles françaises, particulièrement dans le bassin parisien et le Grand Ouest, qu'elle permet de quantifier en termes de flux d'azote, éclairant le fonctionnement du système agro-alimentaire national sous un angle inhabituel.

## METHODES

Le logiciel AmstraM, mis au point par Silvestre et al. (2012), permet l'interrogation automatisée des bases SitraM (<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sources-methodes/>) et Agreste ([www.agreste.agriculture.gouv.fr/](http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/)), et la combinaison de leurs informations pour l'évaluation des flux bruts et nets de transport de 7 groupes de produits agricoles (céréales, maïs grain, fruits et légumes, aliments pour animaux, viande, produits laitiers et animaux vivants). Le détail de la méthode et l'ensemble des résultats, sous forme de 7 matrices des importations brutes et nettes depuis et vers 33 territoires agricoles français (définis par regroupement de départements aux

caractéristiques similaires) et 25 regroupements de pays étrangers, font l'objet d'une publication (Le Noé et al., soumis).

## **UNE GEOGRAPHIE DES ECHANGES DE PROTEINES**

La somme des flux d'azote associés aux différents produits agricoles fournit une image synthétique des échanges entre territoires et avec l'étranger. Globalement, la France apparaît comme exportatrice nette du point de vue de ses échanges de protéines avec l'étranger, important 284 ktonN/an d'aliments pour bétail et exportant 390 ktonN/an sous forme de céréales, de fruits et légumes et de produits animaux. L'importation de graines et de tourteaux de soja du Brésil et d'Argentine constituent la plus grande partie des importations nettes de protéines, qui alimentent l'élevage dans toute la moitié Ouest du pays. Les exportations de protéines sont pour leur part largement dominées par les céréales à destination du Maghreb et de l'Asie Mineure, de l'Europe du Nord et de l'Europe méditerranéenne (Figure 1). On peut clairement distinguer dans le pays des territoires importateurs nets de protéines (territoires hétérotrophes, au sens de Billen et al., 2010), exportateurs nets (territoires autotrophes) ou équilibrés. Les territoires importateurs nets le sont soit à cause de leur spécialisation dans l'élevage (le Grand Ouest), soit à cause d'une concentration de population très importante (Ile-de-France, Région lyonnaise, Marseille-Côte d'Azur, Gironde). Parmi les territoires les plus autotrophes, on trouve ceux du bassin parisien et du bassin aquitain, ainsi que le Nord et l'Alsace.

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

Billen G., Beusen A., Bouwman L., Garnier J., 2010. Anthropogenic nitrogen autotrophy and heterotrophy of the world's watersheds: Past, present, and future trends. *Global Biogeochemical Cycles*, 24, GB0A11, doi:10.1029/2009GB003702.

Billen G., Garnier J., Benoit M., Anglade J., 2013b. La cascade de l'azote dans les territoires de grande culture du Nord de la France. *Cahiers Agricultures* 22: 272-81. Doi: 10.1684/agr.2013.0640

Burke M., Oleson K., McCullough E., Gaskell J., 2009. A global model tracking water, nitrogen, and land inputs and virtual transfers from industrialized meat production and trade. *Environmental Modeling and Assessment*. 14:179–193

Lassaletta L., Billen G., Grizzetti B., Garnier J., Leach A.M., Galloway J.M., 2014a. Food and feed as a driver in the global nitrogen cycle : 50-year trends. *Biogeochemistry* 118 : 225-241.

Silvestre M., Billen G., Garnier J., 2012. Evaluation de la provenance des marchandises consommées par un territoire: Amstram, une application de webmapping basée sur les statistiques de transport et de production. Conférence Interdisciplinaire sur l'Ecologie Industrielle et Territoriale, 17 – 18 octobre 2012, Troyes, France. 9pp.



## **L'APPROVISIONNEMENT ALIMENTAIRE PARISIEN : TENDANCES HISTORIQUES ET RECENTS SIGNAUX FAIBLES**

*Bognon S. \*, Barles S.*

*UMR 8504, Géographie Cités*

*\* [sabine.bognon@parisgeo.cnrs.fr](mailto:sabine.bognon@parisgeo.cnrs.fr)*

Si la société, récemment et de manière de plus en plus prégnante, est mobilisée pour une relocalisation de l'approvisionnement alimentaire, force est de constater que le système qui sustente les villes actuelles n'a pas toujours été mondial. Il s'agit dès lors de constituer le récit de la trajectoire de l'approvisionnement alimentaire parisien de la fin de l'Ancien Régime au début du XXI<sup>e</sup> siècle pour comprendre la manière dont s'est mu le système alimentaire, le sentier suivi par sa trajectoire, en prenant en compte la coévolution de l'aire de ravitaillement et des modalités du gouvernement puis de la gouvernance des flux alimentaires (Bognon, 2014).

De la fin de l'Ancien Régime à nos jours, l'organisation de l'approvisionnement alimentaire est continuellement redéfinie pour répondre aux exigences de la subsistance de la population dans la région capitale. La prérogative alimentaire qui occupait une place prépondérante dans les attributions des pouvoirs publics, est peu à peu réduite à des contrôles d'intérêt général, de plus en plus éloignés des enjeux stratégiques qui sous-tendaient un approvisionnement suffisant, régulier et de qualité. L'approvisionnement alimentaire est aujourd'hui régi par des intérêts privés et les modalités de parachèvement de celui-ci deviennent de plus en plus opaques. La privatisation généralisée de l'organisation de l'approvisionnement parisien a été permise par un faisceau de facteurs, parmi lesquels la révolution agricole et industrielle, puis commerciale. Le débat public autour de l'approvisionnement s'estompe peu à peu du fait de la capacité des entreprises privées à maintenir une certaine fluidité en amont du métabolisme alimentaire. D'un gouvernement alimentaire quasi entièrement géré par un pouvoir central et dans une moindre mesure par le pouvoir local, l'on passe en trois siècles à la gouvernance du système par des acteurs très variés et dont les intérêts sont guidés par le paysage général de l'économie capitalistique.

La notion d'hinterland dans son acception littérale (Van Cleef, 1941) a lieu d'être appliquée telle quelle à la fin de l'Ancien Régime puisque les contours de l'aire d'approvisionnement de la région capitale correspondaient à des régions principalement situées dans le bassin-versant séquanien qui contribuait à

l'acheminement des denrées. Les progrès scientifiques et techniques dans la transformation, la conservation et les transports des marchandises alimentaires, associés à l'évolution de la consommation des Parisiens (élévation générale du niveau de vie) conduisent à la déterritorialisation des aires d'approvisionnement. Les liens de l'approvisionnement alimentaire de la capitale avec les déterminants naturels de la biosphère qui permettent de le parachever sont de plus en plus distendus. Le cœur de la métropole parisienne a adopté un métabolisme qui met en jeu des provenances globalisées, désaisonnalisées et relativement uniformisées au sein des pays les plus riches. La gouvernance de l'approvisionnement s'affranchit des logiques de provenances qui émanaient, jusqu'au début du XXe siècle, de raisonnements territoriaux planifiés à une échelle nationale. La trajectoire de l'approvisionnement alimentaire parisien témoigne de l'externalisation territoriale du métabolisme afférant aux régimes qui s'y sont succédés, notamment du fait de leur dimension de plus en plus infrastructurale (Barles, 2013).

La société capitaliste modèle un système alimentaire si efficace qu'il compense l'essor démographique de la métropole et la question de la quantité de nourriture disponible pour les citoyens des pays riches n'est plus un problème. Cependant, il semble que cette déterritorialisation du système alimentaire fasse l'objet d'une remise en question depuis le début du XXIe siècle.

Aujourd'hui, les territoires de la production et ceux de la consommation ne sont plus liés par autre chose que par la recherche du profit économique maximum, globalement assurée par un monopole des groupes privés, sous le contrôle lointain et minimum de la puissance publique. La production, la distribution et la consommation semblent donc extraits de tout contexte territorial – voire tout simplement spatial – puisque les capacités technologiques de la société leur permettent de se détacher des conditions de nature qui présidaient au système alimentaire dans un monde peu industrialisé et encore moins tertiarisé.

Les tenants d'une reterritorialisation du système alimentaire émergent depuis quelques décennies, et plus particulièrement depuis le courant des années 2000. D'abord reléguées à l'arrière-plan du développement du système alimentaire, ces alternatives au régime dominant prennent de l'ampleur. Leur capacité d'adaptation à des contextes territoriaux précis laisse présager une originalité et la non reproductibilité stricte des expériences à l'identique dans tous les territoires. Les choix d'orientations dans leur structuration sont souvent opérés par la négociation, le dialogue, plus que par la contractualisation top-down. Enfin, elles témoignent d'une capacité d'adaptation au régime conventionnel dominant : le fait que les acteurs dominants du système s'emparent de la promotion de l'enracinement territorial de l'approvisionnement alimentaire est caractéristique.

Sans forcément être en opposition radicale avec le système alimentaire dominant, voire même en y étant incluses, ces démarches tendraient-elles à déstabiliser un système inscrit de manière séculaire dans la trajectoire alimentaire ?

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Barles S., 2013. "Socio-ecological trajectories: the urban dimension. Paris, 18th-20th centuries" (17 p.). *Actes du colloque de l'European Society for Ecological Economics "Ecological Economics and Institutional Dynamics"*, Lille, 17-21 juin 2013.

Bognon S., 2014. Les transformations de l'approvisionnement alimentaire de la métropole parisienne. Trajectoire socio-écologique et construction de proximités. Thèse de doctorat en Géographie et Aménagement (S. Barles dir.), Université Paris 1, 412 p.

Van Cleef E., 1941. "Hinterland and Umland", *Geographical Review*, vol. 2, n. 31, p. 308-311.

## **METE'EAU : OUTIL DE MEDIATION AUTOUR DE L'ENJEU EAU**

*Arrighi A., Barataud F.\**

*UR 055 INRA ASTER, Mirecourt*

*\* [fabienne.barataud@mirecourt.inra.fr](mailto:fabienne.barataud@mirecourt.inra.fr)*

### **PRESENTATION DE L'OUTIL METE'EAU**

Sur les territoires à enjeu eau les acteurs locaux se heurtent souvent à la difficulté qu'ils ont à partager leurs points de vue sur la question de la protection de la ressource. L'outil METE'EAU a donc été conçu de manière à permettre l'expression des éléments jugés comme pertinents pour chaque acteur pour caractériser son « territoire de l'eau ».

L'outil METE'EAU se présente sous la forme d'un jeu de 25 cartes à jouer, chacune composée de pictogrammes illustrant une large gamme de thématiques liées à la question de la qualité de l'eau :

- des cartes centrées sur l'eau : caractérisation de la pollution et du milieu biophysique, importance/localisation de la population, régie, etc. ;
- des cartes centrées sur les territoires: occupation du sol, formes d'agriculture, structurations administratives locales, etc.;
- des cartes centrées sur les acteurs et la démarche de protection de la ressource: types d'actions, porteur de projet, suivis des actions, etc.

Les cartes ont été conçues de manière à proposer un visuel le plus neutre possible: elles peuvent donc « absorber » des discours très variables selon les personnes enquêtées.

Les cartes sont présentées à l'enquêté avec pour consigne d'en choisir six (en 2 temps successifs) qui permettent de caractériser son AAC, d'en dresser le portrait-robot. Ces cartes doivent être justifiées. Ce sont ainsi à la fois les choix de cartes qui sont analysés mais aussi et surtout le discours porté pour chacune. Le choix du tirage limité de carte suppose un travail fort de structuration et de hiérarchisation de la part de l'enquêté pour ne faire émerger que les éléments qu'il juge essentiels, qui relèvent de son appropriation de la question et du territoire.

METE'EAU permet ainsi de faire émerger les éléments structurants du territoire aux yeux de chacun des acteurs locaux en prenant en compte les facteurs humains et historiques qui permettent d'éclairer certaines situations (origines, évolutions).

## **RESTITUTIONS AUX COLLECTIFS MOBILISES EN 2013**

Le développement de l'outil METE'EAU dans des entretiens individuels en 2013 a été suivi en 2014 par un temps de retour/restitutions aux enquêtés, permettant ainsi de présenter à l'ensemble du comité de pilotage les éléments mis en évidence par son utilisation individuellement. Ces temps de réflexion en collectif ont conforté la validité de l'outil pour définir les points clés d'un territoire à enjeu eau et ont confirmé l'intérêt de développer des moyens pour favoriser la construction d'une vision territoriale partagée entre les acteurs de ces territoires.

## **DEVELOPPEMENT ET ADAPTATION DE L'OUTIL POUR LE BUREAU D'ETUDES ENVILYS**

Le bureau d'études Envilys basé à Montpellier a la vocation d'accompagner des gestionnaires de l'eau dans leur démarche de préservation ou de reconquête de la qualité de l'eau. Ce dernier souhaite se saisir de nouveaux outils/nouvelles démarches pour favoriser l'expression des acteurs.

C'est dans cette optique que l'outil METE'EAU a fait de notre part l'objet d'un travail d'adaptation, afin de le mobiliser dans l'évaluation d'un SAGE en Vendée et l'évaluation d'un contrat territorial pour la ville de la Rochelle. METE'EAU a donc fait l'objet de modifications : création de cartes (« Efficacité des actions » par exemple), modification des cartes déjà existantes (« Suivi des actions dans le temps » par exemple). Des réflexions ont également été menées sur la conduite des entretiens individuels, ainsi que sur le traitement des données qualitatives issues de ces entretiens. Ce sont ainsi 90 entretiens qui ont été menés au sein des comités de pilotage des projets cités précédemment.

## **DEVELOPPEMENT DE L'OUTIL DANS DES DEMARCHES COLLECTIVES**

Un travail a été mené avec l'animatrice du service eau de l'agglomération de Carcassonne afin de tester des modalités d'utilisation de l'outil METE'EAU auprès d'un groupe d'une vingtaine d'agriculteurs concernés par un captage prioritaire situé sur la commune de La Redorte.

La mobilisation de ce collectif d'agriculteurs a permis de faire émerger des éléments essentiels dans la conduite ce type de démarche : réflexions sur l'adaptabilité des cartes à des territoires touchés par des problématiques qualitatives et quantitatives avec des formes d'agriculture intégrant la conduite de vignes, réflexions sur la gestion des temps de parole au sein de gros collectifs, ou encore réflexion sur le positionnement de l'animateur de réunion.

## L'EAU ET L'AZOTE DANS UN MODELE AGRO-ECONOMIQUE

*Humblot P., Jayet P.A. \*, Petsakos A.*

*UMR Economie Publique INRA-AgroParisTech*

*\* jayet@grignon.inra.fr*

### PROBLEMATIQUE

Dans le cadre du développement du modèle AROPAJ, dédié à la représentation et la simulation des systèmes d'exploitation agricole, la problématique est l'intégration de l'eau dans le modèle agro-économique comme intrant, au même titre que l'azote. L'eau est alors perçue à la fois sur un plan quantitatif et sur un plan qualitatif (avec l'évaluation des pollutions d'origine agricole). La modélisation agro-économique offre l'opportunité de compléter le peu de données technico-économiques disponibles. Elle offre à terme un moyen d'évaluer les conséquences des changements économiques et physiques sur les systèmes de production, et corollairement sur l'offre de produits et la demande d'intrants, y compris l'eau d'irrigation. Ce travail nécessite des développements spécifiques qui sont intégrés à l'axe transversal "modélisation" et viennent en soutien au pilier "agriculture" du PIREN-Seine dans sa phase VI. Ce travail devrait être amplifié dans la phase suivante si les partenaires en conviennent.

### ENJEUX DE LA MODELISATION

A la différence de l'azote, pour lequel on dispose de prix marchés via les fertilisants minéraux, l'eau, nécessaire à la production agricole, est un bien essentiellement non marchand. L'azote est en grande partie fourni sous forme d'amendements minéraux, même si une part notable provient de l'exploitation agricole elle-même via les effluents d'élevage. Sur la bassin de la Seine, l'eau provient principalement des précipitations. Une partie peut être apportée par l'irrigation, avec des coûts fixes associés à l'investissement et des coûts variables pour accéder à l'eau (pompes électriques). La ressource proprement dite n'est en général pas directement facturée sur la base de la quantité, mais sous forme de redevance payée aux agences de l'eau.

La modélisation économétrique qui ne reposerait que sur des relations « prix – quantités » serait donc difficile à élaborer. Par ailleurs, les apports d'une approche biophysique des relations entre apports d'azote et rendements ont été étudiés (Godard et al., 2008, Leclère et al., 2013). Mais l'anticipation de changements globaux susceptibles de fortement impacter la partie renouvelable de la ressource en eau conduit à mieux explorer cette voie. Nous proposons de généraliser la

forme fonctionnelle retenue pour la réponse des rendements de cultures aux apports d'azote, fonctionnelle proposée également pour traiter des effets du changement climatique. Une fonction de la forme suivante est retenue :

$$y(W, N; W_0, N_0; \sigma, \tau, \phi) = \phi \left(1 - e^{-\sigma(W_0+W)}\right) \left(1 - e^{-\tau(N_0+N)}\right)$$

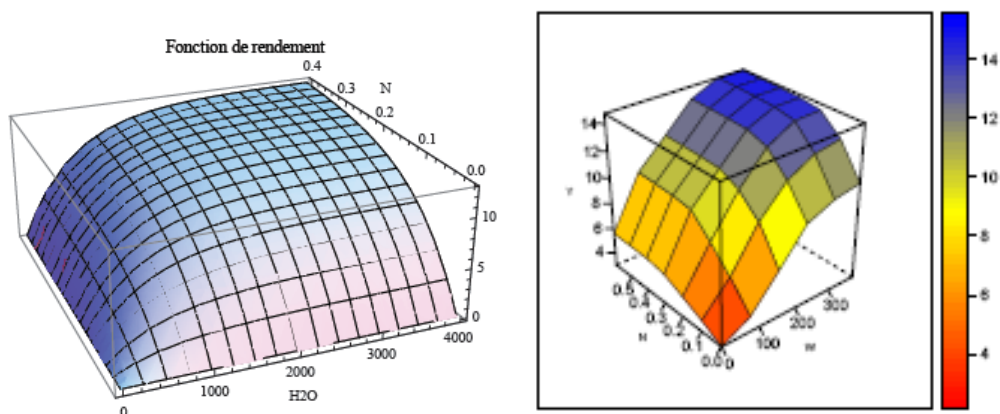
$W$ : eau ajoutée ( $m^3$ )	$W_0$ : eau initiale / précip. ( $m^3$ )	$\sigma$ : efficacité ( $m^{-3}$ )
$N$ : azote ajouté ( $t$ )	$N_0$ : azote initial / sol ( $t$ )	$\tau$ : efficacité ( $t^{-1}$ )
$\phi$ : potentiel agronomique ( $t$ )	$y$ : rendement ( $t$ )	$y, \phi, W, N$ quantités par ha

Nous proposons que l'estimation des paramètres soit réalisée à l'aide du modèle culture STICS, déjà utilisé pour l'azote. En complément, un important travail d'estimation des charges variables est en phase de validation, avec un poste dédié à l'irrigation.

## RESULTATS PRELIMINAIRES

La base de données ArTiX, regroupant les données AROPAJ et les données physiques nécessaires au fonctionnement de STICS, est entièrement reformatée. Les applications gérant les simulations du modèle de culture et l'ajustement statistique des résultats selon la forme fonctionnelle choisie sont en cours d'élaboration (thèse de Pierre Humblot).

Les premières estimations ont porté sur la culture de maïs dans la région Centre.



- Les figures représentent la forme fonctionnelle théorique (à gauche) et les résultats de simulations STICS (à droite).

# RECONNECTER L'ÉLEVAGE ET LA GRANDE CULTURE POUR REDUIRE LES PERTES EN NITRATE VERS LES EAUX DE SURFACE ET SOUTERRAINES.

*Garnier J.<sup>1, 2\*</sup>, Passy P.<sup>3</sup>, Anglade J.<sup>2</sup>, Billen G.<sup>1, 2</sup>, Benoit M.<sup>2</sup>, Schott C.<sup>4</sup>, Silvestre M.<sup>3</sup>, Lassaletta L.<sup>2</sup>, Tallec G.<sup>5</sup>*

*1 CNRS, Metis, Paris*

*2 UPMC, Metis, Paris*

*3 CNRS FIRE, Paris*

*4 INRA, Mirecourt*

*5 IRSTEA, Antony*

*\* josette.garnier@upmc.fr*

## CADRE GENERAL ET OBJECTIFS

L'utilisation des fertilisants chimiques et la spécialisation des territoires vers l'élevage, comme en Bretagne, ou vers les cultures céréalières comme dans le bassin de la Seine, ont conduit à accroître considérablement les quantités d'azote réactif qui cheminent depuis les terres agricoles vers tous les compartiments de la biosphère (Sutton et al., 2011). La contamination nitrique des eaux est un problème majeur du bassin de la Seine, jusqu'à la zone côtière. Nous avons montré précédemment que l'amélioration de la qualité de l'eau nécessiterait un changement drastique des systèmes agricoles. L'objectif est ici de montrer que la reconnection de l'élevage et de la culture céréalière pourrait aussi être une voie à emprunter (Tomich et al., 2011; Bonaudo et al., 2014), surtout quand l'élevage a été bien implanté par le passé. Nous avons centré notre étude sur le bassin de l'Orgeval (~100 km<sup>2</sup>), représentatif de l'agriculture céréalière conventionnelle du bassin de la Seine et typiquement située en Brie laitière.

## MATERIELS ET METHODES

Les terres agricoles cultivées occupent 82% de la surface du bassin de l'Orgeval avec des cultures dominantes (blé, maïs, féverolle,...) en système conventionnel utilisant environ 150 kgN.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>, d'azote minéral. L'étude est basée à la fois sur l'approche des bilans d'azote des sols (surplus) et sur la modélisation Seneque/Riverstrahler permettant de relier les fuites par l'agriculture et la qualité de l'eau. Les bilans sont documentés par des résultats de questionnaires d'agriculteurs individuels (Base de données APOCA- Inra-Aster pour les systèmes

conventionnels, comprenant les rotations de cultures, la fertilisation et le rendement, toutes ces données étant représentatives des 10 dernières années). Quelques exploitations biologiques ont également été renseignées. Nous avons aussi utilisé des données de la littérature et celles des statistiques agricoles, ainsi que nos mesures effectuées dans le cadre du programme PIREN-Seine (Benoit et al., 2014; Garnier et al., 2014).

## RESULTATS ET DISCUSSION

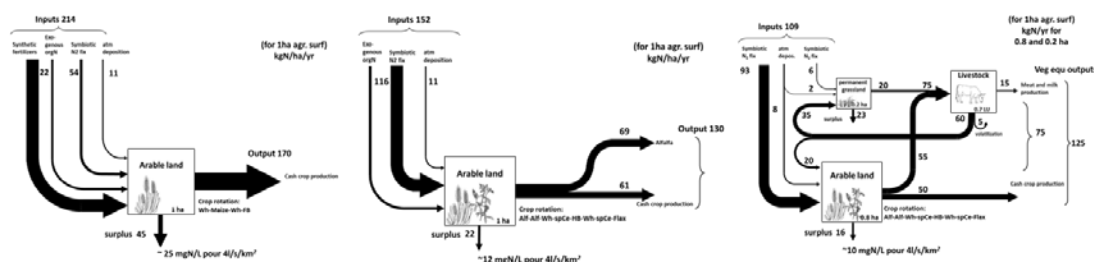
Contrairement à l'agriculture conventionnelle, l'agriculture biologique n'utilise pas d'intrants minéraux ni de pesticides, et se caractérise par des rotations de 7 à 9 ans (contre 2 à 4 ans en conventionnel).

Bilan en agriculture conventionnelle, AC. Nous avons considéré la rotation dominante maïs/blé/blé/féverolles ou betterave. Sur un total de 214 kgN/ha/an en apports azotés, la fertilisation minérale est de l'ordre de 60 %, la fixation par les légumineuses est de 25 %, mais possiblement surestimée quand la betterave remplace la féverolle (Figure 1a). Les 15 % restants sont répartis entre le dépôt atmosphérique (5%) et la fertilisation organique exogène (10% en vinasse, fientes, etc.). La récolte est de 170 kgN/ha/an ce qui définit un surplus de 45 kgN/ha/an correspondant à une concentration sous-racinaire de 25 mgN/L avec une lame d'eau de 4 l/s/km<sup>2</sup> en moyenne pour la région (Figure 1a).

### **Bilan en agriculture biologique, AB.**

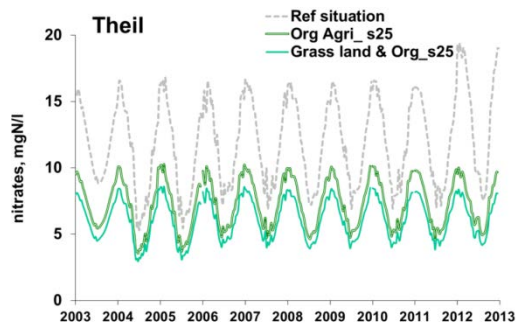
La rotation typique de ce bassin est de 8 ans, caractérisée par 2 années de luzerne en tête de rotation, puis par une succession de blé/céréale de printemps/féverolle/Blé/céréale de printemps/lin textile (Figure 1b). Les agriculteurs enquêtés nous ont permis de calculer un apport total de 109 kgN/ha/an dont 76% provient de la fixation biologique et 16% par les apports organiques exogènes. Le dépôt atmosphérique, évidemment identique en AB et en AC, représente ici 10 %. La récolte est de 130 kgN/ha/an, 24% en moins que le conventionnel et répartie de manière équivalente entre la luzerne et les cultures de rente. Toutefois, le surplus est bien moindre en AB qu'en AC (-50 %). Reconnection de l'élevage avec la grande culture. Sur la base des spécifications de l'agriculture biologique, le cheptel est calibré pour 2 UGB par ha de surface agricole, et 20% de prairie comme c'était le cas dans les années 1950. Les 80 % de surface en grandes cultures produisent 55 kgN/an en luzerne et 50 kgN/an en cultures de rente (Figure 1c). Avec un taux d'excrétion de 85 kgN/UGB et un facteur de conversion de 20% du végétal en animal, le cheptel consomme 75 kgN/ha (20 kgN et 55 kgN provenant respectivement des 0.2 ha de prairie et 0.8 ha de grandes cultures). Les intrants proviennent surtout de la fixation biologique, y compris en prairie. En considérant que le cheptel passe 7 mois par

an dans les prés, l'excrétion est de 35 kgN/an sur les 20 % de prairie et de 20 kgN/an sur les 80% de terres arables, soit sous forme de fumier (considérant 20% of volatilisation lors de sa gestion) ou sous forme d'excrétion directe lorsque que le cheptel sort paître sur la luzerne). Le surplus est dans ce cas de l'ordre de 15 kgN/ha/an, sur les terres arables. Il est plus élevé sur les prairies, mais y reste en dessous du seuil où lixiviation devient importante. Le cheptel devient alors un bon débouché local pour la luzerne avec une production locale de produits animaux et de céréales (Figure 1c).



• Figure 1. Bilan de surface du sol a. en agriculture conventionnelle, b. en agriculture biologique et c. en reconnection de l'élevage et de la grande culture.

Après une étape de validation sur la situation de référence en conventionnel (Garnier et al., 2014), la réponse du modèle Seneque-Riverstrahler a été explorée avec les surplus des 2 autres systèmes. L'agriculture biologique diminue considérablement les teneurs en nitrate des eaux de surface à l'exutoire du bassin de l'Orgeval, et plus encore si l'on effectue une reconnection de l'élevage (Figure 2).



• Figure 2. Simulation des concentrations interannuelles en nitrate à l'exutoire du bassin de l'Orgeval pour la situation de référence (AC), pour une conversion à l'AB (Org Agri) et pour une reconnection de l'élevage (Grass land).

## CONCLUSIONS

Le changement d'agriculture vers une fertilisation basée essentiellement sur des engrais synthétiques a conduit à une grande spécialisation du bassin de la Seine qui exporte 80% de sa production céréalière mais doit importer de l'Ouest et du Nord de la France la plus grande partie des protéines animales nécessaires à l'alimentation de sa population (Billen et al., 2012). Nous montrons que l'Orgeval est un bassin bien adapté pour tester des scénarios de changements de pratiques

et de systèmes, permettant de diversifier les paysages et les activités agricoles. De tels changements pourraient être explorés à l'échelle du bassin. D'autres scénarios devraient être également construits, permettant de tester l'effet d'autres débouchés de la luzerne, comme par exemple sa méthanisation avec recyclage des produits résiduels vers les terres agricoles.

## REFERENCES

Benoit M., Garnier J., Anglade J., Billen G. (2014). Nitrate leaching from organic and conventional arable crop farms in the Seine Basin (France). *Nutrient Cycling in Agrosystems*. *Nutr Cycl Agroecosyst* DOI 10.1007/s10705-014-9650-9

Billen G., Garnier J., Thieu V., Silvestre M., Barles, Chatzimpiros P. (2012). Localising the nitrogen imprint of Paris food supply: the potential of organic farming and changes in human diet. *Biogeoscience*, 9, 607–616, 2012.

Bonaudo T., Bendahan A.B., Sabatier R., Ryschawy J., Bellon S., Leger F., Magda D. and Tichit M., 2014. A groecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems *Eur. J. Agron.* 57 43–51

Garnier J., Billen G., Vilain G., Benoit M., Passy P., Tallec G., Tournebize J., Anglade J., et al. (2014). Assessing nitrogen transfers and transformations for sustainable watershed-scale management: the case of a small agricultural basin of the Seine River (the Orgeval basin). *J. Environmental Management*.

Sutton M.A., Howarth C.M., Erisman J.W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., van Grinsven H., Grizzetti B., 2011. *The European Nitrogen Assessment: Sources, Effect and Policy perspectives*. Cambridge Univ Press. 612 pp.

Tomich T.P., Brodt S., Ferris H., Galt R., Horwath W.R., Kebreab E., Leveau J.H.J., Liptzin D., Lubell M., Merel P., Michelmore R., Rosenstock T. Scow K., Six J., Williams N., Yang L., (2011). *Agroecology: A Review from a Global-Change Perspective*. *Annu. Rev. Environ. Resour.* , 36:193–222

## SCENARIOS AGRICOLES POUR LA PROTECTION DES CAPTAGES DE FLINS- AUBERGENVILLE

*Anglade J.<sup>1\*</sup>, Billen G.<sup>1\*</sup>, Garnier J.<sup>1</sup>, Loiseau J.B.<sup>2</sup>, Lemaire A.<sup>2</sup>, Gaillard O.<sup>3</sup> et  
Chaegard L.<sup>3</sup> et Vergnaud V.<sup>4</sup>*

*1 UPMC-CNRS UMR Metis, Paris*

*2 Lyonnaise des Eaux*

*3 SAFEGE;*

*4 OSUR Rennes 1*

*\*juliette.anglade@upmc.fr; gilles.billen@upmc.fr*

### CONTEXTE DE L'ETUDE

Les captages Lyonnaise des Eaux (LDE) du site de Flins-Aubergenville approvisionnent plus de 600 000 habitants de l'Ouest Parisien. Depuis les années 1990, on observe dans les eaux brutes qui alimentent les forages, des teneurs en pesticides qui dépassent régulièrement les normes de potabilité, et une très nette tendance à la hausse des concentrations en nitrates. Les eaux d'exhaure des 40 forages sont acheminées vers une usine dans laquelle l'eau est traitée. Pour les nitrates, un procédé de géofiltration sur berge de l'eau de Seine et de réalimentation artificielle de la nappe mis en place en 2006 permet de réduire les concentrations d'environ 25 %, en exploitant le processus naturel de dénitrification. La LDE (2012) s'est engagée fin 2009 dans une démarche proactive de réduction des pollutions diffuses, notamment par la promotion de l'agriculture biologique.

L'aire d'alimentation des captages de Flins-Aubergenville s'étend sur près de 10 000 ha (Archambaud, 2011) et est entièrement incluse dans le territoire « Seine-Aval » qui s'étend sur 400 km<sup>2</sup> et fait l'objet d'une Opération d'intérêt National (OIN) (Audas, 2010) lancée par l'Etat en 2006, dans le cadre de la constitution du « Grand Paris », pour concentrer l'action publique en vue d'un développement accéléré dont l'objectif premier est la relance économique ainsi que la mise en valeur et la préservation de l'environnement, avec notamment le redéveloppement d'une agriculture périurbaine et le soutien à l'agriculture maraîchère et biologique. L'OIN est pilotée par l'EPAMSA (Établissement Public d'Aménagement du Mantois Seine Aval) et réunit l'Etat, le Conseil régional d'Ile-de-France, le Conseil Général des Yvelines, et compte près de 390 000 habitants sur 51 communes.

## OBJECTIFS

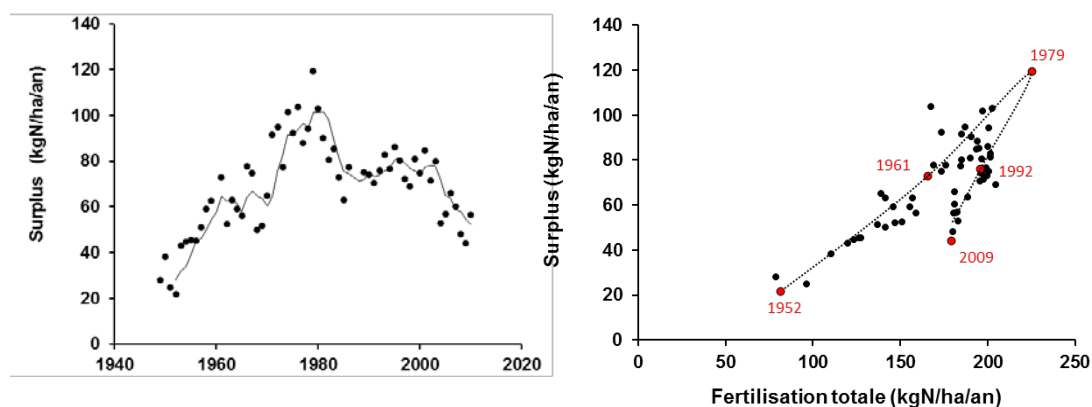
L'objectif de l'étude était d'évaluer l'impact des modifications de pratiques agricoles sur la qualité de la ressource, le délai nécessaire à la manifestation de ces impacts et les modifications de filières de valorisation locales des productions agricoles nécessaires pour assurer la viabilité des systèmes agricoles proposés.

## HISTORIQUE DES PRATIQUES CULTURALES

Un historique des pratiques culturales dans le secteur a été réalisé. Il a permis de renseigner un modèle (sous Modflow) des transferts de nitrates dans le système aquifère du champ captant au cours des 50 dernières années.

Dans cette modélisation, on tient compte d'une vitesse de transfert des flux sous-racinaires de 1 m/an dans la zone non saturée, d'épaisseur très variable entre le haut du plateau et le bord de la paline alluviale ; la datation de l'eau par dosage des CFC donne un âge moyen de 25 ans.

La simulation montre bien que la contamination nitrique actuelle est essentiellement le fait des pratiques agricoles intensives des années 1975-1980.



• Figure 1: Evolution du surplus azoté et de la fertilisation totale des terres arables dans le département des Yvelines depuis 1952. (Anglade, thèse 2015)

## SCENARIOS PROSPECTIFS

Deux scénarios d'évolution des pratiques ont été construits pour une modélisation prospective de la contamination azotée : le premier (A) consiste en l'application stricte des récentes prescriptions réglementaires de fertilisation, et d'obligation de couverture automnale des sols de la Directive Nitrates sur l'ensemble des parcelles cultivées. Le second scénario (B) prévoit une conversion généralisée des sols cultivés des coteaux en grandes cultures biologiques. Il tient également

compte de la ferme de la Haye déjà en agriculture biologique depuis 2010, ainsi que de l'installation prévue en 2015 d'une exploitation en maraîchage biologique. Grâce au raisonnement de la fertilisation généralisé dans les années 2000, on simule une amélioration nette de la situation en 2080, même si aucun changement en surface n'est réalisé. Cependant, les concentrations restent comprises entre 40 et 65 mgNO<sub>3</sub>/l dans les zones les plus influencées par les pratiques agricoles. La poursuite de la gestion de la fertilisation azotée minérale et l'implantation de CIPAN dans le cadre du scénario A devrait permettre d'améliorer encore sensiblement la situation. Mais les résultats les plus probants sont obtenus dans le scénario B qui prévoit une conversion à l'agriculture biologique et permet aux concentrations des eaux des coteaux du sud de descendre en dessous du seuil de 25 mgNO<sub>3</sub>/l.

## **ASSURER LA VIABILITE DE L'AGRICULTURE BIOLOGIQUE**

Assurer des débouchés aux nouvelles cultures produites dans le cadre du scénario B est une condition essentielle de son acceptabilité et de sa durabilité.

La restauration collective est souvent considérée comme un levier essentiel, aux mains des collectivités locales, pour orienter des changements de système agricole dans un territoire. Ce levier existe dans l'OIN, mais la restauration collective ne pourra absorber que 10% des légumes et céréales produits dans l'AAC. Par contre l'ensemble des besoins de la population de l'OIN dépasse très largement la production de l'AAC.

La valorisation de la luzerne, culture clé de la rotation bio pour maîtriser les adventices, et contribuer à l'autonomie azotée grâce à la fixation symbiotique, est plus problématique, dans une région où l'élevage a quasiment disparu au profit des grandes cultures céréalières. Trois pistes de réflexions doivent être menées à ce sujet : (1) le développement des filières de déshydratation, (2) la relocalisation des activités d'élevage dans le territoire limitrophe du Parc Naturel Régional (PNR) du Vexin, (3) la méthanisation des légumineuses, avec valorisation sous forme de gaz de ville ou d'électricité du gaz et retour des résidus au champ.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

Archambault, Suez Environnement, Terralys, Lyonnaise des Eaux, 2011. Champ captant de la nappe d'eau souterraine d'Aubergenville. Etude de l'aire d'alimentation des captages. (No. CNTO2409).

Audas, 2010. Seine Aval IDF. Un territoire de développement majeur pour l'axe Seine.

LDE, 2012. Mesures Agro-environnementales Territorialisées à Enjeu Eau. Cahier des charges ouvert sur la zone prioritaire de l'aire d'alimentation des captages de Flins-Aubergenville.

# PROSPECTIVE DE L'AGRICULTURE DU BASSIN DE LA SEINE

*Billen G.\* , Garnier J., Lassaletta L.*

*UPMC-CNRS UMR Metis, Paris*

*gilles.billen@upmc.fr*

## CONTEXTE ET OBJECTIFS

Le thème Agriculture du programme PIREN-Seine 6, visait « à se doter d'outils permettant de comprendre dans son ensemble le fonctionnement actuel de l'Agro-système Seine et d'appréhender les changements en cours [...]. Il s'agira en particulier d'instruire des scénarios contrastés de l'évolution du système et d'évaluer leurs conséquences environnementales et économique-sociales ». Un atelier a été organisé en décembre 2013 pour préciser le rôle du programme PIREN-Seine 6 dans une réflexion prospective sur l'agriculture du bassin. Les recommandations portaient sur la nécessité (1) de définir des indicateurs d'état du système, permettant le pilotage du changement; (2) de privilégier l'échelle du bassin dans son ensemble, tout en y distinguant des territoires fonctionnels homogènes. Il a été en outre reconnu que le PIREN-Seine n'avait pas vocation à entreprendre une démarche participative de co-construction de scénarios avec les agriculteurs, mais plutôt de faire la synthèse et d'évaluer des propositions prospectives émanant d'organismes, de chercheurs ou d'associations. La question de la transition (c.-à-d. des étapes à suivre pour atteindre l'état décrit par un scénario depuis la situation actuelle) été délibérément remise à la phase prochaine du programme.

## METHODES

Les outils de modélisation de l'effet des pratiques agricoles sur la contamination en nitrates et pesticides des hydrosystèmes à l'échelle du bassin (chaîne de modélisation ([PE]STICS-MODCOU) font partie des acquis les plus emblématiques du PIREN. Parallèlement a été développée une approche simplifiée de modélisation des flux d'azote à travers le système hydro-agro-alimentaire dans son ensemble, distinguant les systèmes de culture et d'élevage, la consommation alimentaire humaine et le commerce inter-territorial (GRAFS, Billen et al., 2014).

## **UNE STABILISATION DE LA PRESSION NITRIQUE DE L'AGRICULTURE CONVENTIONNELLE**

Plusieurs indicateurs montrent une diminution de la pression azotée de l'agriculture du bassin de la Seine depuis le début des années 1980, et une stabilisation depuis une dizaine d'années. Le délai de réponse de l'hydrosystème fait que la diminution dans les masses d'eau ne s'amorce qu'actuellement ; dans l'hypothèse d'une stabilisation des pratiques en conformité avec les préconisations réglementaires actuelles, l'état de contamination nitrique auquel elle aboutira restera supérieur au niveau souhaité pour le bon état écologique du milieu. Par ailleurs la pression en termes de pesticides ne montre aucune tendance à la baisse. Un changement plus radical du système agricole est donc nécessaire.

## **LA PLACE DU BASSIN DE LA SEINE DANS LE SYSTEME ALIMENTAIRE MONDIAL**

Le Bassin Parisien et le Grand Ouest, qui forment l'aire principale d'approvisionnement alimentaire de l'agglomération parisienne (Billen et al., 2009), constituent aussi des zones hautement spécialisées ouvertes sur les marchés internationaux de denrées agricoles (Le Noé et al., *subm*). La France, au contraire de l'Europe est exportatrice nette de protéines. Ses exportations concernent principalement les céréales à destination du reste de l'Europe, et pour un tiers seulement du Maghreb et de l'Asie Mineure qui peuvent difficilement s'en passer. Par contre, comme la France, comme le reste de l'Europe, importe massivement du soja Brésilien et Argentin destiné à l'alimentation du bétail (Lassaletta et al., 2014), le bilan net doit être nuancé. Nous avons ainsi montré que parmi les scénarios du système agro-alimentaire mondial permettant de nourrir la population à l'horizon 2050, ceux qui ont le moins recours aux échanges internationaux de denrées agricoles sont ceux qui donnent lieu au moins de contamination azotée (Billen et al., 2015), ce qui justifie la considération de scénarios impliquant une relocalisation de la production agricole et sa reconnexion à la demande locale.

## **LES SCENARIOS DE SOBRIETE ALIMENTAIRE ET DE RECONNEXION**

La démarche GRAFS a permis par exemple de construire un scénario régionalisé du système agro-alimentaire français dit "Bio-Local et Demitarian", du nom donné à une première version, non régionalisée, de ce scénario pour le bassin de la Seine (Billen et al., 2012). Ce scénario ne doit pas être considéré comme un scénario prescriptif, mais seulement comme une manière d'explorer les

conséquences d'un choix extrême de généralisation de pratiques déjà existantes mais minoritaires. Le tableau 1 résume quelques grands traits de ce scénario au niveau national : une forte réduction du cheptel, en raison d'une diminution de moitié de la consommation de protéines animales, une production agricole légèrement diminuée, mais un plus grand potentiel d'exportation de protéines et surtout des pertes environnementales d'azote fortement réduites en raison d'un plus faible surplus d'azote aux sols arables (Fig. 1).

La convergence avec le scénario Afterres2050 (Solagro, 2013), en cours de régionalisation, est frappante. Les différences portent principalement sur la destination des cultures légumineuses fourragères produites en agriculture biologique, que le scénario Afterres considère être essentiellement méthanisés avec retour des résidus aux sols agricoles.

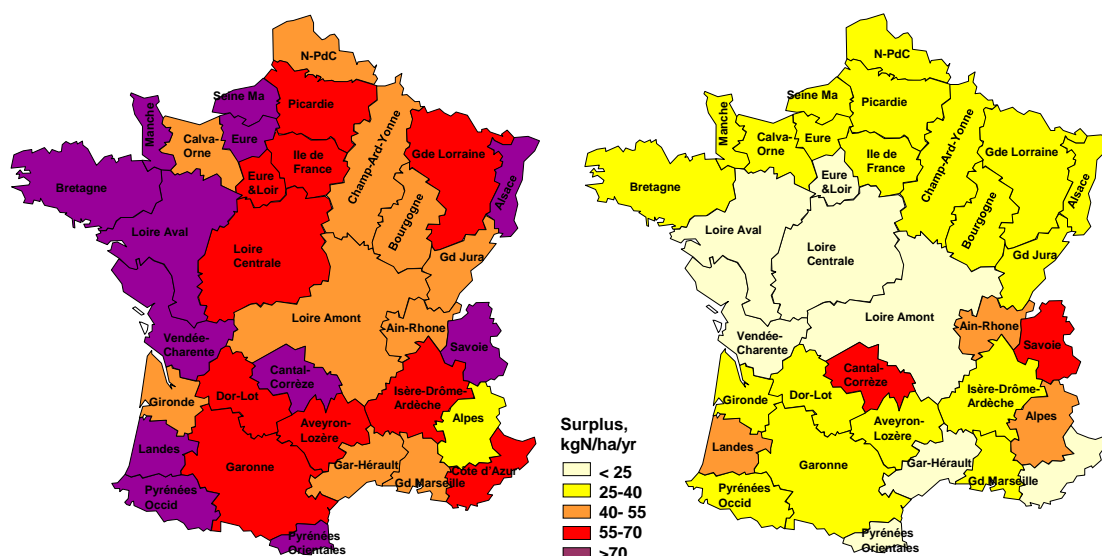
• Table 1. Résultats d'un scénario bio-local et demitarien à l'échelle de la France.

		2006	BioLocalDemitarien
<b>Population</b>	Mhab	64	64
<b>Surface agricole</b>	M ha	26	26
<b>Prairies permanentes</b>	%	31	33
<b>Bétail</b>	M LU	21	10
<b>Production de viande et lait</b>	ktN/an	335	162
<b>Disponible à l'export</b>	ktN/an	56	26
<b>Production d'herbe</b>	ktN/an	769	517
<i><b>fraction des besoins du bétail</b></i>	%	37	51
<b>Production des cultures</b>	ktN/an	1708	1183
<b>dont légumineuses</b>	ktN/an	545	941
<b>céréales</b>	ktN/an	1163	241
<i><b>fraction des besoins humains</b></i>	%	726	102
<b>Disponible pr export/ô usages</b>	ktN/an	222	448
<b>Surplus d'N terres arables</b>	ktN/an	1298	480
<b>Surplus d'N prairies</b>	ktN/an	705	232

## Cropland N soil surplus (kgN/ha/yr)

2006

Scn LocOrgDem



• Figure 1 : Distribution du surplus azoté moyen des terres arables dans la situation actuelle (à gauche) et dans le scénario Bio-Local et demiotarien (à droite).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Billen, G., Barles, S., Chatzimpiros, P., Garnier, J. (2011). Grain, meat and vegetables to feed Paris: where did and do they come from? Localising Paris food supply areas from the eighteenth to the twenty-first century. *Regional Environmental Changes*. 12 : 325-336.

Billen G.; Garnier J., Silvestre M., Thieu V., Barles S., Chatzimpiros P. (2012). Localising the nitrogen imprint of Paris food supply: the potential of organic farming and changes in human diet. *Biogeosciences* 9, 607–616.

Billen G., Lasseletta L. & Garnier J., (2014). A biogeochemical view of the global agro-food system: Nitrogen flows associated with protein production, consumption and trade. *Global Food Security*, 3: 209-219. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gfs.2014.08.003>

Billen G., Lassaletta L. & Garnier J., (2015). A vast range of opportunities for feeding the world in 2050: trade-off between diet, N contamination and international trade. *Envir. Res. Letters* 10: 025001 doi:10.1088/1748-9326/10/2/025001

Lassaletta L., Billen G., Grizzetti B., Garnier J., Leach A.M., Galloway J.N. (2014). Food and feed trade as a driver in the global nitrogen cycle: 50-year trends. *Biogeochemistry*, 118:225–241 (DOI 10.1007/s10533-013-9923-4)

Solagro (2013). *Aferrres2050: un scenario soutenable pour l'agriculture et pour l'utilisation des terres en France à l'horizon 2050*.

## **DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME DE CARACTERISATION IN SITU DES PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES ET THERMIQUES DE LA ZONE HYPORHEIQUE.**

*Rivière A.<sup>1,\*</sup>, Mouhri A.<sup>1, 2</sup>, Baudin A.<sup>1</sup>, Berrhouma A.<sup>1</sup>, Bodet L.<sup>2</sup>, Cucchi K.<sup>3</sup>,  
Cuisinier E.<sup>1</sup>, Durand V.<sup>4</sup>, Hovhannissian G.<sup>5</sup>, Rejiba F.<sup>2</sup>, Rubin Y.<sup>4</sup>, Flipo N.<sup>1,\*</sup>*

*1 MINES ParisTech, PSL Research University, Centre de Géosciences, 35 rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau, France.*

*2 UPMC/CNRS, UMR 7619 METIS, 4 place Jussieu, 75005 Paris, France.*

*3 University of California, Department of Civil and Environmental Engineering, Berkeley, USA*

*4 Univ Paris-Sud/CNRS, UMR 8148 IDES, 91405 Orsay, France*

*5 IRD UMR 242 IESEP, Centre Nord de l'IRD, 32, Av. Henri Varagnat, 93143 Bondy cedex, France*

*\* agnès.riviere@mines-paristech.fr; nicolas.flipo@mines-paristech.fr*

Cette action a permis de développer un dispositif de mesure flottant des propriétés de conduction de l'eau et de la chaleur au niveau de la zone hyporhéique en se basant sur une mesure verticale conjointe de la température discrétisée en 4 profondeurs (jusqu'à 40 ou 60 cm sous le lit de la rivière) et de la pression différentielle entre la rivière et le capteur le plus profond. Les paramètres hydrodynamiques (perméabilité et porosité) et thermiques (conductivité thermique et capacité calorifique spécifique) sont ensuite déterminés par inversion hydro-thermique 1D, sur la base d'une hypothèse de milieu poreux équivalent sur toute la profondeur étudiée.

Pour les mesures in situ, des capteurs de pression différentiels ont été construits pour mesurer la différence de pression entre la rivière et la zone hyporhéiques. Le profil de température ont été mesurés grâce à des PT100 fixes sur une tige PVC à intervalle régulier. La technique utilisée pour mettre en place le capteur de pression différentiel est une méthode d'enfoncement à l'avancement (technique des cônes perdus). Ceci permet de peu perturber la structure du milieu. La composition du cône n'est pas réactive avec l'environnement. Lors de cette étude, un script shell sous linux a été développé afin de directement inverser les données de terrain en paramètres hydrodynamiques et thermiques en utilisant un code couplant les écoulements au transport de la chaleur sur la base d'un schéma numérique en volumes finis. Cette méthode a été utilisée au niveau des dispositifs expérimentaux pérennes (stations MOLONARI) et de quelques points intermédiaires.

Les résultats obtenus sont très satisfaisants en termes de corrélations entre les simulations et les mesures observées. Aux stations MOLONARI, les valeurs obtenues ont été vérifiées en répétant l'opération de calibration sur une autre période plus ancienne, durant laquelle la différence de pression entre la zone hyporhéique et la rivière a été estimée à l'aide des données piézométriques relevées en permanence aux stations. Cette vérification a permis de confirmer les ordres de grandeur des perméabilités et de conductivités thermiques obtenus.

Si cette méthodologie ouvre des perspectives solides pour l'étude spatiale le long d'un réseau hydrographique des propriétés de la zone hyporhéique, certains problèmes techniques restent à résoudre pour un déploiement intensif des dispositifs. En premier lieu, nous avons rencontrés de nombreux problèmes d'étanchéité des boîtiers immergés, qui doivent être améliorés dans les mois qui viennent. En second lieu, les sondes multi-paramètres (température, résistivité électrique) développées et construites en 2014, doivent encore être testées et validées avant déploiement sur le terrain. Ces sondes permettront d'acquérir des informations sur la résistivité électrique apparente du milieu au niveau des capteurs de température, et permettra, entre autres de mieux contraindre les inversions 1D mentionnées ci-dessus, ouvrant la voie à une caractérisation 3D des hétérogénéités de la zone hyporhéique des petites rivières.

# **IMAGERIE GEOPHYSIQUE PAR METHODES ELECTRIQUES EN COURANT CONTINU (TOMOGRAPHIE ET SONDAGE) POUR LA CARACTERISATION DES FORMATIONS SUPERFICIELLES DANS LA PLAINE ALLUVIALE DE LA BASSEE.**

*Rejiba F.<sup>1,\*</sup>, Carduner P.<sup>1</sup>, Bodet L.<sup>1</sup>, Hovhannissian G.<sup>2</sup>, Mouhri A.<sup>1,3</sup>, Pasquet S.<sup>1</sup>*

*1 UPMC/CNRS, UMR 7619 METIS, 4 place Jussieu, 75005 Paris, France.*

*2 IRD UMR 242 IEES, Centre Nord de l'IRD, 32, Av. Henri Varagnat, 93143 Bondy cedex, France*

*3 MINES ParisTech, PSL Research University, Centre de Géosciences, 35 rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau, France.*

*\* faycal.rejiba@upmc.fr*

Cette action a permis d'améliorer l'identification et l'organisation des formations géologiques à proximité immédiate du système fluviale à trois endroits représentatifs disposant de piézomètres du dispositif expérimental de suivi des échanges nappe-rivière implanté lors de la fin de la phase 6, bénéficiant du soutien du CNES. L'approche géophysique adoptée sur les actions précédentes sur le bassin de l'Orgeval a été mise en œuvre durant cette action afin de valider l'homogénéité relative des structures au niveau des piézomètres.

Trois sites situés respectivement à Conflans-sur-Seine, Saron-sur-Aube et Marcilly-sur-Seine ont fait l'objet d'imagerie par tomographie de résistivité électrique parallèlement aux cours d'eau, ainsi que d'un certain nombre de sondages électriques afin d'évaluer l'hypothèse de tabularité (sur un peu moins de 200m de linéaire) des formations géologiques au niveau des piézomètres, ainsi que la succession des horizons observés dans les logs lorsque ceux-ci ont été enregistrés.

Les différentes méthodes permettent de couvrir des résolutions en profondeur et latéral entre 1m et 1,5m en tomographie, et décimétrique pour les terrains les plus superficiels en sondage électrique. Les sondages permettant d'identifier très clairement l'évolution des sols puis des formations (limoneuses) jusqu'à quelques mètres ; la tomographie de résistivités électriques ont permis de délimiter l'épaisseur des horizons limoneux de surface et la craie jusqu'à un peu plus de 20m de profondeur, avec à certains endroits des discontinuités illustrées par des contrastes latéraux de résistivités électriques laissant présager de l'existence d'ancienne barre de méandre (site de Conflans-sur-Seine).

Les dispositifs de mesures de la résistivité électrique confirment parfaitement leur potentiel identifié lors des prospections précédemment effectués sur le bassin de

l'Orgeval pour l'imagerie haute résolution des formations superficielles dans le contexte de plaine alluviale. Ces campagnes sont aussi totalement cohérentes avec les estimations de la géométrie de la paléo vallée alluviale qui s'est remplie au cours du temps pour former la plaine alluviale actuelle.

Deleplancque B., Weill P. and Cojan I., 2013. Genèse et hétérogénéités sédimentaires de la plaine alluviale de la Bassée. PIREN-Seine.

## **EMPREINTES DE L'EVOLUTION DE LA SEINE MEANDRIFORME DANS LA PLAINE ALLUVIALE DE LA BASSEE**

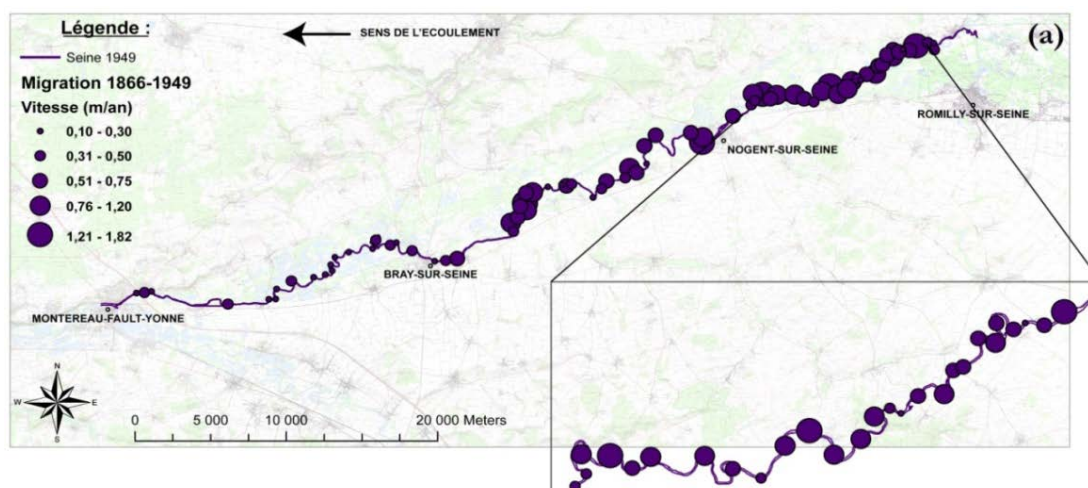
*Weill P.\* , Deleplanque B., Amestoy J., Cojan I.*

*MINES ParisTech, Centre de Géosciences, 35 rue Saint-Honoré, 77 300 Fontainebleau*

*\* pierre.weill@mines-paristech.fr*

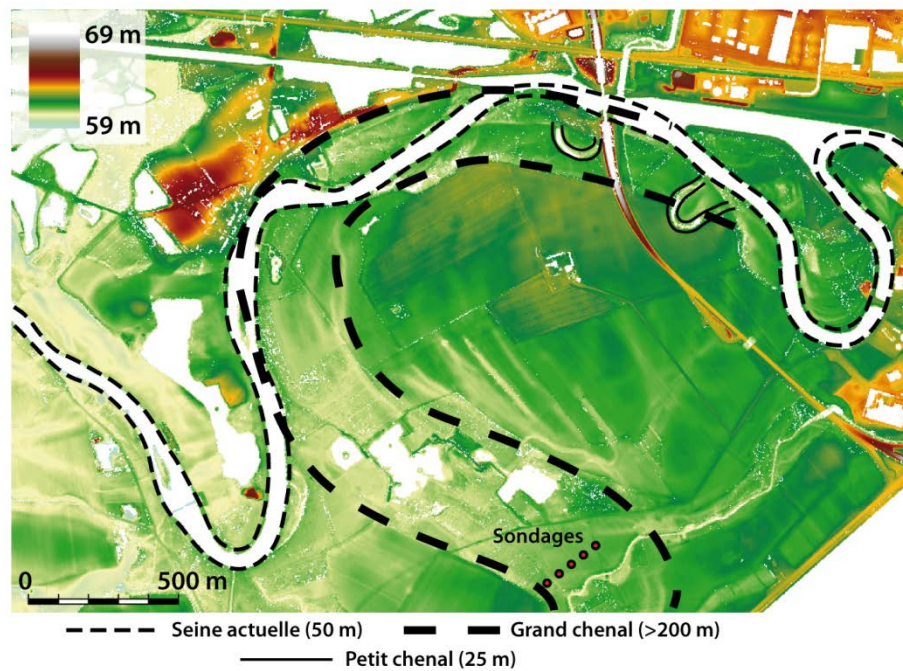
Dans le cadre de la caractérisation des hétérogénéités sédimentaires de la plaine alluviale de la Bassée, nous nous sommes attachés en 2014 à décrire l'évolution de la Seine supérieure au cours de l'Holocène, afin de comprendre sous quelles formes la dynamique fluviale méandriforme a remanié les dépôts alluviaux anté-holocènes (Tardi-Glaciaire). Ces travaux reposent sur une analyse de photographies aériennes et de relevés Lidar, validée par de la prospection par géoradar, et des sondages à la tarière.

A l'échelle séculaire, les vitesses de migration et les caractéristiques géométriques d'une centaine de méandres ont été analysées à l'aide de chroniques de photographies aériennes et de cartes anciennes, permettant de suivre l'évolution du système méandriforme depuis la seconde moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle. Les résultats montrent que la vitesse de migration moyenne dans la Bassée est de l'ordre de  $0,5 \text{ m.an}^{-1}$  avec une diminution progressive observée d'amont en aval. La variabilité temporelle de ces vitesses de migration est corrélée avec la baisse d'intensité des débits morphogènes induit par les ouvrages anthropiques.



- Vitesse de migration annuelle de la Seine pour la période anté-"grands aménagements" 1866 – 1949. Les cercles représentent la vitesse de migration calculée sur un méandre actif.

A l'échelle pluri-millénaire, des tracés de paléo-chenaux et de paléo-méandres sont identifiés sur l'ensemble de la Bassée par analyse de photographies aériennes et de relevés Lidar. L'étude de leurs dimensions permet, grâce à des reconstitutions paléo-hydrologiques, de mettre en évidence une variabilité de la dynamique de la Seine méandriforme à l'Holocène. Des datations au Carbone 14 sont en cours pour dater précisément chacune des phases identifiées. Il en résulte une imbrication d'échelles des hétérogénéités créées par les méandres abandonnés comblés de sédiments fins.



- Dalle Lidar au sud de la centrale de Nogent-sur-Seine montrant l'imbrication de paléo-chenaux de dimensions très contrastées, résultant de la variabilité climatique à l'Holocène. Des analyses 14C sont en cours pour établir un cadre chronologique de l'évolution morphologique de la Seine.

## **CHANGEMENT D'ECHELLE DES PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES DE LA PLAINE ALLUVIALE.**

*Labarthe B.\* , de Fouquet C., Baratelli F., Flipo N.\**

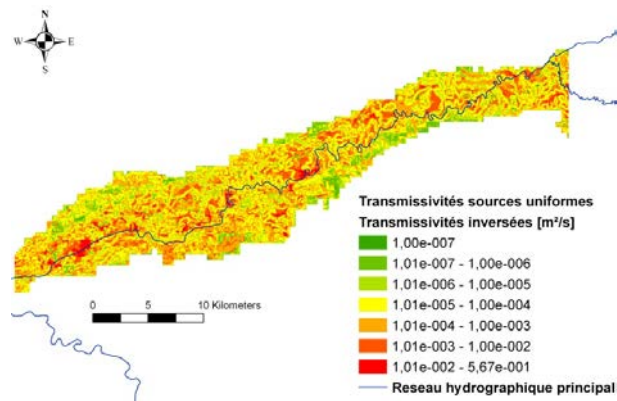
*MINES ParisTech, Centre de Géosciences, 35 rue Saint-Honoré, 77 300 Fontainebleau*

*\*baptiste.labarthe@mines-paristech.fr; nicolas.flipo@mines-paristech.fr*

Les flux hydriques échangés entre le réseau hydrographique et les systèmes aquifères dépendent à la fois de processus locaux et régionaux.

Les systèmes aquifères régionaux fournissent un débit de base au réseau hydrographique qui les draine via la plaine alluviale. Les processus hydro-sédimentaires à l'origine des dépôts fluviatiles, confèrent à la plaine alluviale des propriétés hydrodynamiques locales très hétérogènes [1]. Ces hétérogénéités structurales du milieu contrôlent la dynamique des écoulements au sein de la plaine alluviale et finalement celle des échanges nappe-rivière. Afin de prendre en compte ces processus multi-échelles dans la quantification des échanges nappe-rivière, nous nous sommes attachés en 2014 à définir une procédure de changement d'échelle visant à mettre en cohérence les propriétés hydrodynamiques définies à l'échelle intermédiaire (~10 à 100 km<sup>2</sup>) et celles utilisées dans le modèle régional de la Seine (>100 000 km<sup>2</sup>) [2]. Ces travaux se sont appuyés sur les études précédentes du Piren-Seine qui ont notamment permis la caractérisation des hétérogénéités hydrodynamiques dans la plaine alluviale de la Bassée [3].

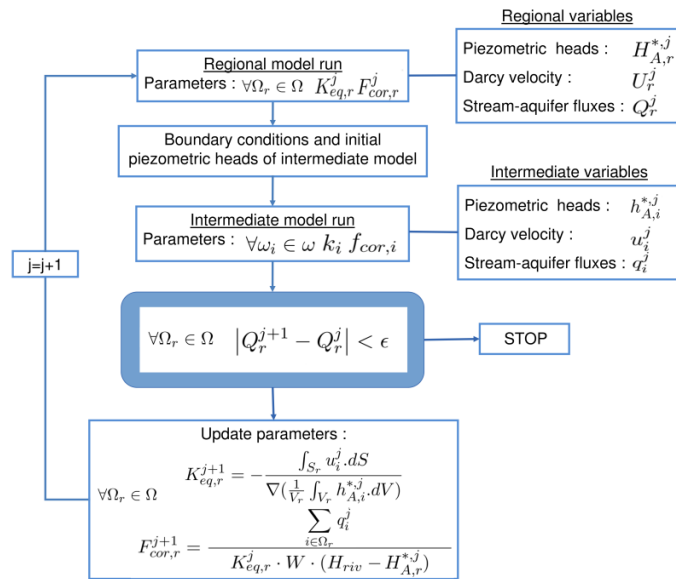
La procédure de changement d'échelle mise en place vise à assurer la conservation du débit échangé entre le réseau hydrographique et son aquifère sous-jacent quelque soit l'échelle de simulation.



- Carte des transmissivités de la plaine alluviale de la Bassée de résolution 31.25\*31.25 m. Cette carte des transmissivité est issue d'une procédure d'inversion décrite dans Labarthe et al. 2014 [3].

Pour cela, après avoir déterminé les équations régissant les transferts hydriques aux deux échelles, les flux sont égalisés afin de déterminer la fonction de transfert des paramètres hydrodynamiques. La fonction de transfert dépend des variables d'état calculées à l'échelle intermédiaire, qui dépendent elles-mêmes des flux calculés à l'échelle régionale. Une procédure itérative doit donc être mise en place afin de réaliser le changement d'échelle des propriétés hydrodynamiques de l'échelle intermédiaire vers l'échelle régionale tout en assurant la conservation des flux entre les deux échelles de modélisation.

Cette procédure de changement d'échelle est une étape charnière vers la modélisation multi-échelle des échanges nappe-rivière de l'hydrosystème Seine. L'algorithme de changement d'échelle est en cours d'implémentation dans la nouvelle version de EauDyssée, et sera testé en 2015.



- Méthodologie de changement d'échelle des paramètres hydrodynamiques entre l'échelle intermédiaire et l'échelle régionale [2]. La fonction de transfert permettant de modifier les paramètres régionaux dépend des variables d'état calculées à l'échelle intermédiaire. Une procédure itérative est mise en place dont le critère d'arrêt est l'égalisation des flux échangés aux deux échelles de modélisation.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Deleplancque B., Weill P., Cojan I., Labarthe B. and Flipo N., 2014. Architecture et hétérogénéités sédimentaires de la plaine alluviale de la Bassée. PIREN-Seine.

Flipo N., Mouhri A., Labarthe B., Biancamaria S., Rivière A. and Weill P., 2014. Continental hydrosystem modelling : the concept of nested stream-aquifer interfaces. Hydrology and Earth System Sciences. 18, (2014), 3121–3149.

Labarthe B., Flipo N., Abasq L., Deleplancque B., Mouhri A., Jost A. and de Fouquet C., 2014. Première caractérisation hydrodynamique des échanges dans la plaine alluviale de la Bassée. PIREN-Seine.

## **MISE EN PLACE DU DISPOSITIF DE MESURE DES ECHANGES EAUX DE SURFACE -EAUX SOUTERRAINES DANS LA PLAINE ALLUVIALE DE LA BASSEE**

*Mouhri A.<sup>1, 2 \*</sup>, Abasq L.<sup>1</sup>, Berrhouma A.<sup>1</sup>, Cuisinier E.<sup>1</sup>, Gueho Y.<sup>2</sup>, Jost A.<sup>2</sup>,  
Labarthe B.<sup>1</sup>, Rivière A.<sup>1</sup>, Flipo N.<sup>1,\*</sup>*

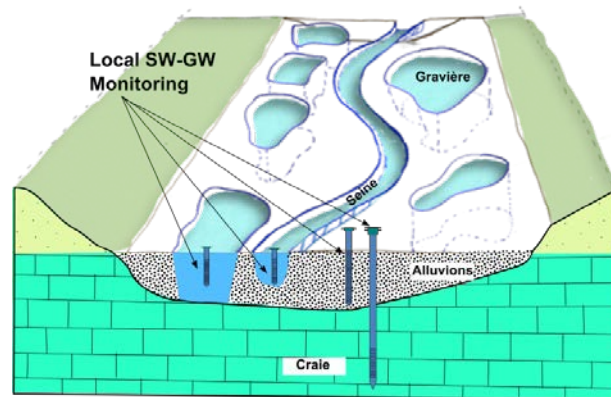
*1 MINES ParisTech, PSL Research University, Centre de Géosciences, 35 rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau, France.*

*2 UPMC/CNRS, UMR 7619 METIS, 4 place Jussieu, 75005 Paris, France.*

*\*amer.mouhri@upmc.fr; nicolas.flipo@mines-paristech.fr*

Le dispositif de mesure des échanges de flux d'eau entre les eaux de surface et les eaux souterraines dans la plaine alluviale de la Bassée est aujourd'hui quasiment déployé grâce aux soutiens financiers du PIREN-Seine, et du CNES via le projet TOSCA SWOT. La Bassée, qui est actuellement un territoire à très forts enjeux en termes d'aménagement du territoire (mise au grand gabarit du canal de navigation Nogent-Bray sur Seine, casiers excréteurs de crue, réserve d'eau stratégique) bénéficiera ainsi d'un dispositif de suivi haute fréquence des échanges eaux de surface- eaux souterraines. Ce dispositif bénéficiera aussi dans un futur très proche du dispositif d'observation mis en place dans la partie centrale de la plaine alluviale par VNF. Il s'agira alors d'une infrastructure d'observation hydrologique unique au monde vue la dimension du système considéré (environ 100 km de plaine alluviale, représentant environ 140 kilomètres de linéaire principal de la Seine, et ses annexes hydrauliques). A ce titre la Bassée devrait rester dans le futur un site de référence pilote pour le couplage entre observations spatiales et mesures haute fréquence in situ.

Le système de mesure retenu pour surveiller les échanges entre eaux de surface et eaux souterraines est présenté figure 1. Ce dispositif comprend des points de mesure des eaux de surface (rivières et gravières) et des eaux souterraines. Les eaux souterraines sont suivies dans les piézomètres des alluvions et dans ceux de la craie sous-jacente afin d'évaluer également les échanges entre la nappe des alluvions et celle de la craie (fig.1). Les points seront équipés de sondes mini-Diver de mesure conjointe de la température et de la pression.



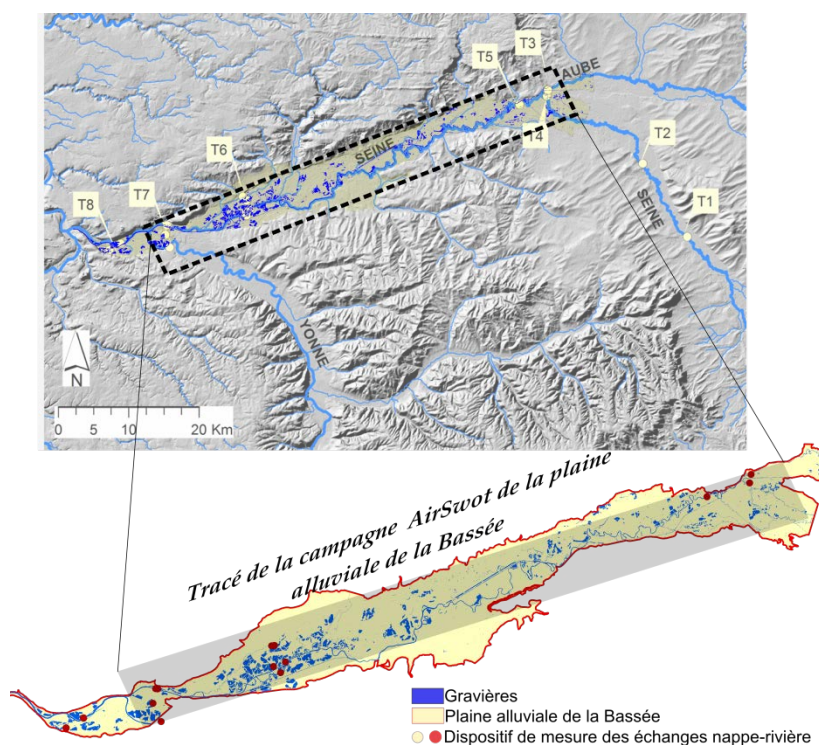
• Figure 1 : dispositif de mesure des échanges de flux d'eau entre la surface et le souterrain dans la Plaine de la Bassée.

Huit transects (figure 2) situés entre La Grande Paroisse en aval et Troyes en amont, ont été sélectionnés pour l'implantation de dispositifs de mesure hydrogéophysique s'inspirant des stations de Monitoring Local des échanges Nappe-Rivière déployées à plus petite échelle sur l'Orgeval [2]. La zone d'étude peut être divisée en 3 grandes parties :

Une zone Amont (T1 à T5), allant de Troyes à Romilly-sur-Seine et incluant la confluence avec l'Aube. Malheureusement nous n'avons pas pu déployer le transect T2 faute d'accord des propriétaires des parcelles accessibles bordant la rivière;

Une zone centrale (T5 à T6), qui sera gérée par VNF, à la suite de l'installation d'un réseau de mesure dans le cadre de la mise à grand gabarit de la Seine entre Bray-sur-Seine et Nogent. Cette zone n'est pas équipée dans le cadre de cette action.

Une zone Aval (T6 à T8), allant du secteur Egligny-Balloy à l'aval de la confluence Seine-Yonne au niveau de la Grande Paroisse.



- Figure 2 : Zone d'étude et emplacement des points de mesure des échanges de flux entre les eaux de surface et les eaux souterraines (en bas : le contour de la plaine alluviale de la Bassée et les gravières qui représentent 10 % de la surface de la plaine alluviale)

Au total, 21 piézomètres (13 dans les alluvions et 8 dans la craie), 11 points de mesure en rivières (6 en Seine (T1, T4, T5, T6, T7, et T8), 1 en Vielle Seine(T6), 1 dans un bras mort de la Seine (T6), 1 en Aube (T3) et 1 en Yonne (T7)) et 4 points gravière (2 en T6 et 2 en T7) ont été installés et équipés dans le cadre du programme PIREN-Seine. Les 6 points Seine sont constitués d'un doublet de piézomètres (alluvion et craie) et par une conduite en PVC (utilisée comme puits de tranquillisation de eaux des rivières et gravières) servant à mesurer la pression et la température de l'eau au pas de temps du ¼ d'heure pour commencer. Les autres points rivières et les gravières sont constitués par un piézomètre alluvion seulement et d'une conduite rivière ou gravière. Le pas de temps de suivi sera adapté dans les mois qui viennent afin de ne retenir que l'information nécessaire à la compréhension du fonctionnement du système.

Le système d'observation de la Bassée, permettra de mieux comprendre l'effet du creusement de nouvelles gravières sur la dynamique des échanges complexes aquifère régional-aquifère alluvial-eaux de surface, et de conceptualiser la modification des paramètres d'échange nappe-rivière associés. A cet effet, l'étude de la prise en compte explicite des gravières dans le modèle de circulation d'eau dans la plaine alluviale de la Bassée a été initiée en 2014 par la réalisation de

modélisations hydrodynamiques simplifiées [1]. Ce travail de fond, visant à mieux décrire les paysages hydrologiques complexes dans les modèles du PIREN-Seine, se poursuivra dans la prochaine phase du programme.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

Gueho Y., 2014. Les impacts hydrodynamiques des gravières sur la nappe alluviale de la Bassée. Université Pierre et Marie Curie.

Mouhri A., Flipo N., Rejiba F., de Fouquet C., Bodet L., Goblet P., Kurtulus B., Ansart P., Tallec G., Durand V. & Jost A., 2013. Designing a multi-scale sampling system of stream-aquifer interfaces in a sedimentary basin. *Journal of Hydrology*. 504, (2013), 194–206.

## **DEFINITION EXPLICITE DES PLAINES ALLUVIALES DANS LE MODELE REGIONAL DU BASSIN DE LA SEINE.**

*Labarthe B.\* , de Fouquet C., Baratelli F., Flipo N.*

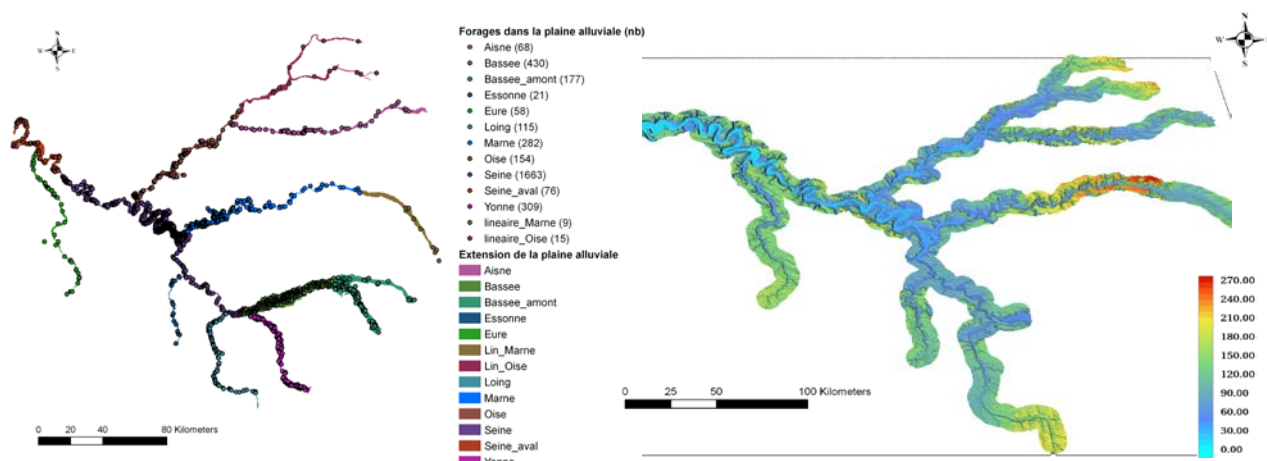
*MINES ParisTech, Centre de Géosciences, 35 rue Saint-Honoré, 77 300 Fontainebleau*

*\*baptiste.labarthe@mines-paristech.fr*

Afin d'améliorer la quantification des échanges nappe-rivière à l'échelle de l'hydrosystème Seine, l'implémentation explicite de l'interface entre les écoulements souterrains et les écoulements de surface est primordiale. C'est pourquoi, nous nous sommes attachés en 2014 à décrire physiquement les plaines alluviales au sein du modèle régional « Seine ». Ces travaux se sont appuyés sur l'analyse des bases de données du référentiel hydrogéologique français afin d'estimer la géométrie de l'aquifère alluvial lié aux principaux cours d'eau du bassin versant de la Seine. Ainsi les systèmes alluviaux de la Seine, de la Marne, de l'Oise, de l'Yonne, de l'Aisne, de l'Aube et de l'Eure ont été reproduits dans le modèle.

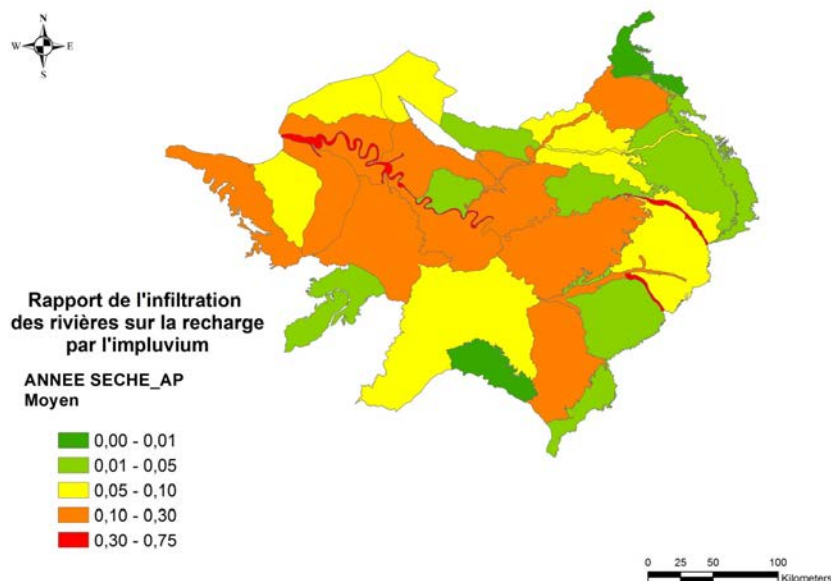
Pour cela environ 3400 forages interceptant les aquifères alluviaux ont été recensés sur le bassin. L'épaisseur de la plaine alluviale a ensuite été estimée sur l'ensemble de ces forages afin de réaliser une interpolation géostatistique de la géométrie de la plaine alluviale. Cette interpolation révèle un gradient de l'amont vers l'aval de l'épaisseur de l'aquifère alluvial, qui présente une puissance moyenne de 7 mètres sur la Seine et de 5 mètres sur l'Oise et la Marne.

Une fois la géométrie des aquifères alluviaux reproduite dans le modèle Seine, un modèle d'équivalence a été appliqué afin de déterminer les paramètres hydrodynamiques des plaines alluviales sur le bassin. De plus les fluctuations des niveaux d'eau variables en rivière ont été implémentées sur l'ensemble du réseau hydrographique simulé (14000km). La nouvelle quantification des échanges nappe rivière sur le bassin de la Seine a ensuite été réalisée. Elle ne présente pas de modifications majeures par rapport aux précédentes estimations. On note toutefois une diminution de la vulnérabilité aux pollutions de surface des plaines alluviales lors de scénario extrêmes sec et humide.



- Nombre de forages recensés interceptant l'aquifère alluvial lié aux principaux cours d'eau du bassin de la Seine (A) et estimation de la géométrie 3D des aquifères alluviaux.

La représentation physique de l'interface nappe-rivière à l'échelle régionale est un premier pas vers une modélisation multi-échelle, emboîtée autour du corridor fluvial, qui permettra une prise en compte des processus locaux et régionaux, caractéristique des échanges nappe-rivière. A cet effet un algorithme itératif de couplage a été développé afin d'assurer la cohérence des flux entre ces deux échelles. Il conviendra maintenant de le tester à l'échelle de la Bassée.



- Rapport de l'infiltration des rivières vers les aquifères sur le bassin sur la recharge par l'impluvium. Ce rapport constitue un indice de la vulnérabilité des aquifères aux pollutions de surfaces. En année sèche la vulnérabilité des aquifères alluviaux reste élevée.

## BIOGEOCHIMIE HAUTE FREQUENCE ET CALCULS DU METABOLISME DANS LA SEINE A L'AVAL DE PARIS.

Groleau A.<sup>1\*</sup>, Escoffier N.<sup>1</sup>, Auge A.<sup>1</sup>, Rocher V.<sup>2</sup>, Vilmin L.<sup>3</sup>, Flipo N.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut de Physique du Globe de Paris, Sorbonne Paris Cité, Univ Paris Diderot, UMR 7154 CNRS, F-75005 Paris, France.

<sup>2</sup> SIAAP - Direction du Développement et de la Prospective, 82 avenue Kléber - 92700 – Colombes.

<sup>3</sup> MINES ParisTech, PSL Research University, Centre de Géosciences, 35 rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau, France

\* [groleau@ipgp.fr](mailto:groleau@ipgp.fr)

Les actions Biogéochimie Haute Fréquence de l'axe BAF lors de la phase 6 ont consisté à développer une approche intégrée d'étude de la dynamique biogéochimique de la Seine, à partir de mesures *in situ* à haute fréquence (HF) de paramètres de qualité de l'eau. Les principaux objectifs ont été de qualifier/valider le déploiement d'un réseau de mesures multi-instrumenté, d'étudier la contribution de la production primaire phytoplanctonique à la dynamique du carbone de l'écosystème et d'en développer des indicateurs quantitatifs de fonctionnement trophique afin d'investiguer la variabilité temporelle associée.

Trois stations de mesures multi-paramètres HF (15 min) ont été installées sur un bief de 55 km de Seine à l'aval de Paris et enregistrent, en plus des paramètres météorologiques, les principaux paramètres physiques et biochimiques (conductivité, température, pH, oxygène dissous, turbidité) mais également des paramètres plus novateurs tels que la chlorophylle *a* (Chl*a*) multi classes d'algues et le phosphate réactif soluble (PRS). Des procédures spécifiques ont été développées afin de qualifier l'ensemble de la chaîne de transmission des données, de la vérification métrologique *in situ* jusqu'à leur intégration et qualification en base de données ([www.carboseine.fr](http://www.carboseine.fr)) en vue de la restitution vers les chercheurs ou opérateurs (Groleau et al., 2014).

La quantification par spectrofluorimétrie de la Chl*a* associée aux communautés phytoplanctoniques a fait l'objet d'une étude approfondie. Le capteur FluoroProbe a été calibré avec deux espèces phytoplanctoniques représentatives du milieu Seine et des expérimentations *in vitro* réalisées afin de contraindre la variabilité de mesure associée à l'état physiologique des espèces ainsi qu'aux limites technologiques de l'instrument liées à l'utilisation de signatures spectrales de fluorescence (SFS) spécifiques. (Escoffier et al., 2015).

L'étude de la dynamique du cycle du carbone a été appréhendée par la méthode des courbes de variations journalières d'O<sub>2</sub> enregistrées à une station de mesures. Calculé à partir des données à pas de temps fin (15 min), le fonctionnement trophique (ou métabolisme) du fleuve a été intégré à différentes échelles de temps (journée, saison, année) via trois indicateurs quantitatifs (Production Brute (GPP), Respiration (ER) et leur résultante, la Production Nette de l'Ecosystème (NEM)) obtenus sur 65 % des jours de l'année 2011. (Escoffier, 2015)

Les évènements transitoires tels que blooms phytoplanctoniques et évènements pluvieux associés ou non à des rejets urbains ont correspondu aux périodes de plus forte variabilité du métabolisme en alternance avec des situations plus stationnaires. Les résultats ont démontré un fonctionnement annuel hétérotrophe avec dominance des processus de minéralisation de matière organique par rapport aux processus d'assimilation photosynthétique néanmoins associé à des périodes d'autotrophie à plus courte échelle de temps (jour, saison) durant les blooms phytoplanctoniques (durées caractéristiques de 7 à 30 jours). Le couplage des taux de GPP avec les données de Chl*a* qualifiées a permis de documenter une forte variabilité de productivité des cortèges d'espèces phytoplanctoniques associée à différentes typologies de fonctionnement trophique de l'écosystème en 2011.

Dans le contexte actuel d'évaluation de la qualité des eaux de surface, l'intégration de la variabilité de ces processus réalisée, à différentes échelles de temps, grâce aux mesures HF constitue un outil robuste pour la compréhension et la gestion du fonctionnement d'écosystèmes fluviaux anthropisés tels que la Seine. Cette action a également permis d'établir que le lien entre mesures HF et modélisation était à double sens. D'une part les observations HF constituent à la fois des conditions limites nécessaires au modèle ProSe-RIVE ainsi que des données précieuses pour revisiter la conceptualisation des processus modélisés (Vilmin, 2014). D'autre part, l'interprétation des mesures HF ne peut être réalisée sans certaines informations physiques que seul le modèle peut fournir.

**Mots clés:** Mesures haute fréquence, qualité de l'eau, O<sub>2</sub>, phytoplancton, fluorescence, métabolisme, écosystèmes lotiques urbains.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Escoffier N., Bernard C., Hamlaoui S., Groleau A., Catherine A., (2015). Quantifying phytoplankton communities using spectral fluorescence: the effects of species composition and physiological state. *J. Plankton Res.* 37(1): 233–247.

Escoffier N., (2014). Apports de la Biogéochimie Haute Fréquence pour l'étude de la qualité de l'eau et la quantification du fonctionnement trophique de la Seine. Thèse de doctorat de l'Institut de Physique du Globe de Paris – Sorbonne Paris Cité.

Groleau A., Escoffier N., Vilmin L., Auge A., Bensoussan N., Poulin M., Rocher V., Métivier F., & Flipo N., 2014. Apports croisés des mesures haute fréquence pour le calcul d'indicateurs et pour la modélisation du fonctionnement trophique de la Seine à l'aval de Paris, PIREN-Seine.

Vilmin L., 2015. Modélisation du fonctionnement biogéochimique de la Seine de l'agglomération parisienne à l'estuaire à différentes échelles temporelles, MINES ParisTech.

## **DYNAMIQUES DU CARBONE, DE L'AZOTE ET DU PHOSPHORE A LA TRAVERSEE DE L'AGGLOMERATION PARISIENNE (2007- 2012)**

*Vilmin L., Flipo N.\**

*MINES ParisTech, PSL Research University, Centre de Géosciences, 35 rue Saint-Honoré, 77305 Fontainebleau, France*

*\* nicolas.flipo@mines-paristech.fr*

Au cours de la phase 6 du PIREN-Seine, de nouveaux processus ont été intégrés dans ProSe (adsorption du phosphore sur la phase minérale des matières en suspension, production et consommation de nitrite par nitrification). Suite aux évolutions du réseau hydrographique de la Seine et au réaménagement de la station d'épuration (STEP) de Seine Aval en 2007, certaines espèces du modèle RIVE ont aussi été entièrement réajustées, soit en se basant directement sur des expériences de laboratoire, soit en optimisant numériquement certains paramètres du modèle. Ainsi, les flux de matières en suspension (Vilmin et al., 2015a), les dynamiques du phosphore réactif dissous (Vilmin et al., 2015b) et du nitrite (Raimonet et al., 2015), ainsi que les populations de producteurs primaires (Groleau et al., 2014), ont été entièrement recalibrés.

L'ensemble de ces travaux de fond a permis de dresser, avec ProSe, le bilan du fonctionnement biogéochimique du fleuve (Vilmin, 2015). Le fonctionnement biogéochimique a été caractérisé en amont et en aval du rejet de la STEP Seine Aval, pour différentes conditions hydrologiques (basses et hautes eaux), dans les compartiments pélagique et benthique.

Les flux hydro-sédimentaires, qui jouent un rôle majeur dans le fonctionnement biogéochimique des systèmes aquatiques (Golterman et al., 1983; Walling 2005, Bilotta and Brazier, 2008), ont tout d'abord été quantifiés pour l'ensemble du domaine simulé. L'impact du rejet de la STEP Seine Aval sur la composition des sédiments a été étudié.

Le métabolisme global du fleuve en amont et en aval de la STEP Seine Aval a été déterminé pour des conditions de basses et de hautes eaux, grâce à un bilan des flux de carbone. La simulation d'un compartiment benthique permet d'estimer la part des flux benthiques et pélagiques dans le métabolisme global du fleuve mais aussi dans les cycles de l'azote et du phosphore.

Enfin, la quantification des flux liés aux différents processus biogéochimiques a permis d'estimer la part des processus biotiques et abiotiques dans les cycles des éléments nutritifs fortement influencés par les processus hydro-sédimentaires, comme le phosphore.

L'analyse du bilan de fonctionnement de la Seine sur la période de 6 années (2007-2012) montre que :

Le fonctionnement moyen du système Seine entre l'agglomération parisienne et l'estuaire est hétérotrophe en basses eaux comme en hautes eaux.

La respiration benthique représente en moyenne un tiers de la respiration écosystémique globale.

Le carbone organique est principalement présent sous forme dissoute (à plus de 70 %). 75 % de l'export de Carbone Organique Dissous (COD) à l'estuaire a lieu en hautes eaux. Le rejet de Seine aval constitue en moyenne 16 % des apports en COD et 22 % des apports en Carbone Organique Particulaire (COP) détritique. La Seine agit comme un puits de carbone organique : le COD a tendance à être consommé dans la colonne d'eau par les bactéries hétérotrophes, tandis que le COP sédimente dans le lit de la Seine et est principalement dégradé dans le compartiment benthique.

Le rejet de Seine Aval constitue 75 % des apports en ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) entre l'agglomération parisienne et Poses. La Seine agit comme un puits de  $\text{NH}_4^+$  : 9 % des apports totaux en  $\text{NH}_4^+$  sont consommés dans le milieu. Cette auto-épuration du milieu vis-à-vis du  $\text{NH}_4^+$  est due à 50 % à des processus pélagiques et à 50 % à des processus benthiques.

Le rejet de Seine Aval constitue 64 % des apports en nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) entre l'agglomération parisienne et Poses. Un quart de l'augmentation du flux de  $\text{NO}_2^-$  entre l'amont de l'agglomération parisienne et Poses est lié aux processus de nitrification dans le milieu. 40 % en basses eaux et un quart en hautes eaux de cette production de  $\text{NO}_2^-$  a lieu dans le compartiment benthique.

Le rejet de Seine Aval constitue un quart des apports en Phosphore Réactif Dissous (PRD) entre l'agglomération parisienne et Poses. Le réacteur Seine agit comme une source de PRD et un puits de Phosphore Inorganique Particulaire (PIP). Un quart de l'augmentation du flux de PRD entre l'amont de l'agglomération parisienne et Poses est expliqué par le relargage de PRD par le compartiment benthique. Ces flux de relargage sont plus de 2 fois supérieurs à l'apport en PRD par le rejet de Seine Aval. 25 % des apports en PIP en basses eaux sont accumulés dans le système, contre 7 % en hautes eaux.

À l'échelle pluri-annuelle, les processus d'adsorption et de désorption du PRD dans la colonne d'eau et le compartiment benthique, ainsi que les échanges à l'interface entre ces deux compartiments, constituent le principal contrôle des flux de PRD dans le milieu, aussi bien en amont qu'en aval de Seine Aval et pour toutes les conditions hydrologiques.

Les flux de production de PRD par minéralisation de la matière organique sont significatifs en période de basses eaux, lorsque l'activité bactérienne est plus intense, surtout en aval de la STEP Seine Aval. À l'échelle d'événements fortement transitoires comme des blooms algaux, ces flux de production biotique peuvent constituer le principal contrôle des flux de PRD dans le milieu.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bilotta G. S., and Brazier R. E., 2008. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water Research* 42:2849–2861.

Golterman H. L., Sly P. G., and Thomas R. L., 1983. Study of the relationship between water quality and sediment transport. . Unesco.

Groleau A., Escoffier N., Vilmin L., Auge A., Bensoussan N., Poulin M., Rocher V., Métivier F., and Flipo N., 2014. Apports croisés des mesures haute fréquence pour le calcul d'indicateurs et pour la modélisation du fonctionnement trophique de la Seine à l'aval de Paris. . PIREN-Seine.

Raimonet M., Vilmin L., Flipo N., Rocher V., and Laverman A. M., 2015. Modelling the fate of nitrite in an urbanized river using experimentally obtained nitrifier growth parameters. *Water Research* 73:373–387.

Vilmin L., 2015. Modélisation du fonctionnement biogéochimique de la Seine de l'agglomération parisienne à l'estuaire à différentes échelles temporelles. MINES ParisTech.

Vilmin L., Flipo N., de Fouquet C., and Poulin M., 2015a. Pluri-annual sediment budget in a navigated river system: the Seine River (France). *Sciences of Total Environment* 502:48–59.

Vilmin L., Aissa-Grouz N., Garnier J., Billen G., Mouchel J.-M., Poulin M., and Flipo N., 2015b. Impact of hydro-sedimentary processes on the dynamics of soluble reactive phosphorus in the Seine River. *Biogeochemistry* 122:229–251.

Walling D. E., 2005. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems. *Science of the Total Environment* 344:159–184.

## **EUTROPHISATION ET PHOSPHORE DANS LA MARNE ET LA SEINE.**

*Aïssa-Grouz, N.\* , Hilaire F., Billen G.\* , Garnier J.*

*1 UPMC-CNRS UMR Metis, Paris*

*\* najla.grouz-jerbi@upmc.fr; gilles.billen@upmc.fr*

### **CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE**

L'amélioration du traitement des eaux usées urbaine dans le bassin de la Seine, et l'agglomération parisienne en particulier, a profondément modifié les apports de nutriments azotés et phosphorés au réseau hydrographique. Quel en a été l'impact sur les processus de croissance algale dans les grands axes de rivière ? Telle est la question abordée dans cette étude.

### **METHODE**

L'analyse des chroniques longues de mesure du phosphore total et de la biomasse algale (concentration en chlorophylle a) dans la Marne et dans la Seine en aval de Paris permet de mesurer l'ampleur des modifications d'apports ponctuels et diffus de phosphore au milieu aquatique. L'étude des propriétés d'adsorption des ortho-phosphates sur la matière en suspension permet de paramétrer la relation entre P inorganique total (la forme principale du P présent en Seine en dehors des périodes de bloom intense) et ortho-phosphate libre (la forme de P disponible pour la croissance algale).

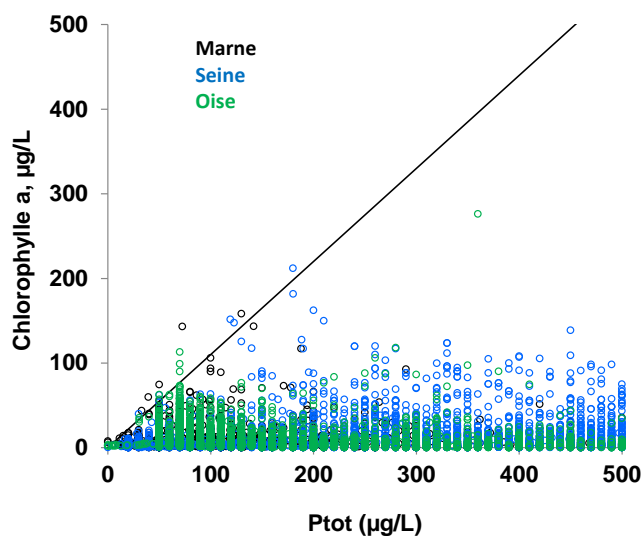
### **UNE DIMINUTION MANIFESTE DES TENEURS EN P DANS LA SEINE**

L'observation des chroniques de concentration disponibles depuis la fin des années 1980 tant en amont qu'en aval de Paris montre une nette diminution des concentrations en phosphore total dans le réseau hydrographique de la Seine (Passy et al., 2013).

### **LA RELATION ENTRE BIOMASSE ALGALE ET P TOTAL**

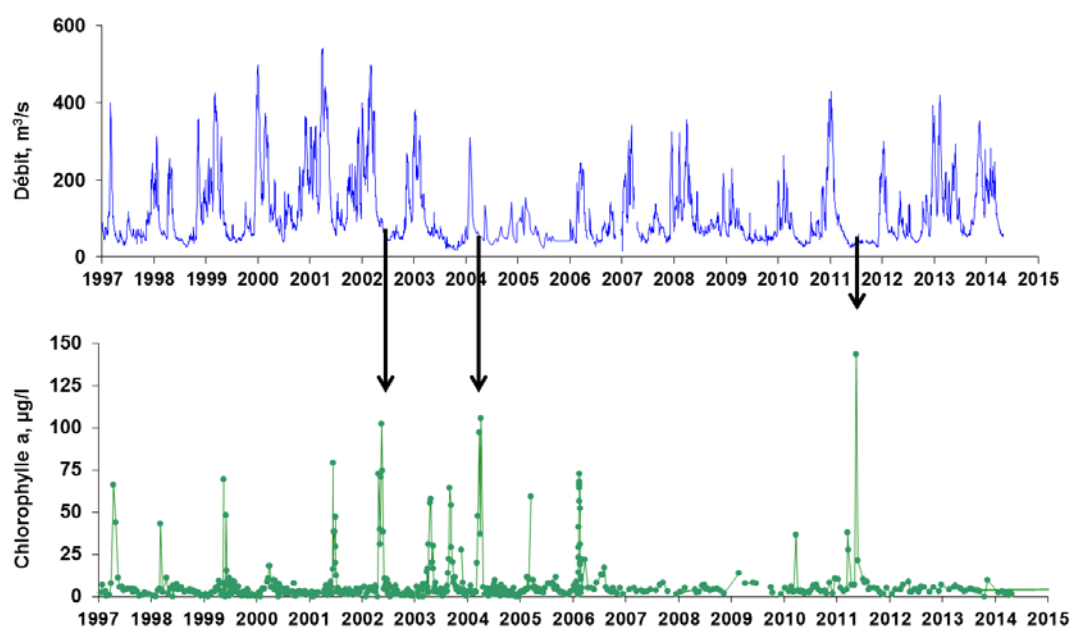
La mesure du P total inclut le P contenu dans la biomasse algale. Compte tenu d'un rapport C/chla de 45 et d'un rapport molaire C/P de 106, 100 µg de Chla correspond à 110 µg de Ptot. Sur l'ensemble des couples de mesures de P total et de chlorophylle a disponibles dans la base AESN des mesures dans la Marne,

l'Oise et la Seine depuis 1990, on montre en effet que les teneurs de biomasse algale atteignent occasionnellement le même niveau en Ptot (ce qui indique la séquestration de tout le phosphore du milieu dans la biomasse algale) sans jamais le dépasser (Fig. 1). Ces situations de complète limitation par le P sont exceptionnelles : la plupart du temps, d'autres facteurs limitent la croissance algale.



- Figure 1: Relation entre chlorophylle a et P total dans la Marne, l'Oise et la Seine depuis 1990. La droite représente l'équivalence en Ptot de la chlorophylle a.

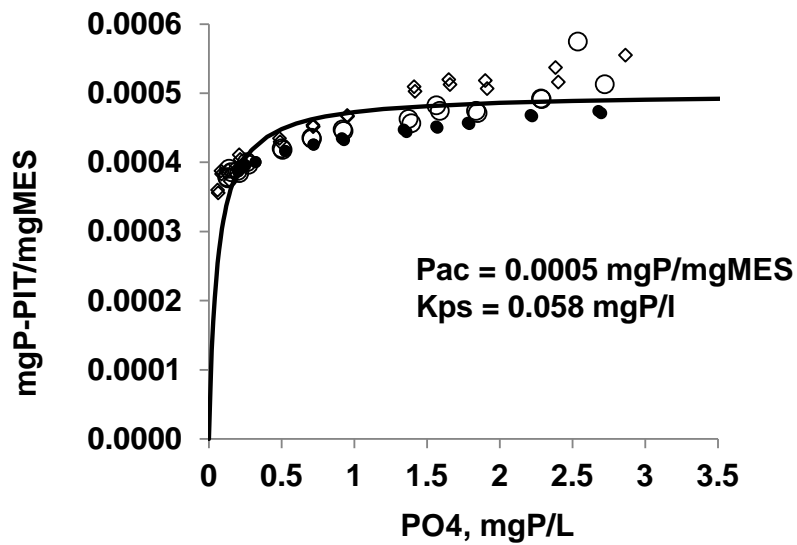
Dans les rivières amont de Paris, les blooms algaux ont généralement lieu au printemps, au moment de la chute du débit, et pour autant que celui-ci atteigne une valeur suffisamment basse (Fig. 2).



- Figure 2: Pics de biomasse algale dans la Marne à Saint Maurice depuis 1997. Des années sans blooms sont observées de plus en plus souvent dans ce secteur.

## L'ADSORPTION DES O-PHOSPHATES SUR LA MATIÈRE EN SUSPENSION.

L'adsorption des o-phosphates sur la matière en suspension est, avec le prélèvement actif par la croissance algale, l'un des deux processus qui peut conduire à la rétention du phosphore et son accumulation temporaire ou définitive dans la phase benthique (Vilmin et al., 2014). Des expériences d'ajout d'orthophosphates sur les échantillons concentrés de matière en suspension ont permis de déterminer les paramètres cinétique de cette adsorption (Fig. 3).



- Figure 3: Cinétique de l'adsorption des ortho-phosphates sur la matière en suspension. (Echantillon de matière en suspension de Saint Maurice)

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Passy P., Gypens N., Billen G., Garnier J., Thieu V., Rousseau V., Callens J., Parent J-Y., Lancelot C., (2013). A model reconstruction of riverine nutrient fluxes and eutrophication in the Belgian Coastal Zone since 1984. *J. Mar Syst.* 128 :106–122 (DOI 10.1016/j.jmarsys.2013.05.005)

Vilmin L., Aissa-Grouz N., Garnier J., Billen G., Mouchel J.-M., Poulin M., Flipo N. (2014). Impact of hydro-sedimentary processes on the dynamics of soluble reactive phosphorus in the Seine River. *Biogeochemistry* DOI 10.1007/s1053-014-0038-3.

## **CALIBRATION DES SONDES BBE FLUOROPROBE ET DECONVOLUTION DES SIGNAUX BRUTS DE FLUORESCENCE**

*Escoffier N., Groleau A.\**

*Institut de Physique du Globe de Paris, Sorbonne Paris Cité, Univ Paris Diderot, UMR 7154 CNRS, F-75005 Paris, France.*

*\* groleau@ipgp.fr*

Les spectrofluorimètres in situ constituent des outils privilégiés pour le monitoring haute-fréquence des communautés phytoplanctoniques des écosystèmes aquatiques. Parmi les produits disponibles sur le marché, le capteur multi longueurs d'onde FluoroProbe (FP ; bbe-Moldaenke, Allemagne) est l'un des plus commercialisé car il permet à la fois l'estimation de la chlorophylle a (Chla) totale des communautés mais également de discriminer la contribution relative de quatre familles phytoplanctoniques sur la base de leur propriétés spectrales.

Les travaux menés lors de la thèse de Nicolas Escoffier en collaboration avec l'équipe de C. Bernard (CCE, MNHN) dans le cadre du projet CarboSeine ont montré la pertinence de réaliser des calibrations « écosystème dépendantes », à savoir en fonction d'un cortège d'espèces représentatives du milieu d'étude, pour améliorer la qualité des données fournies par ce type d'instruments vis-à-vis des méthodes normées de référence. Ce travail a été réalisé sur la sonde FP II initialement installée sur la station de Bougival et des expérimentations in vitro complémentaires ont également été menées afin de contraindre la variabilité de mesure associée à différents facteurs de biais (Escoffier et al., 2015).

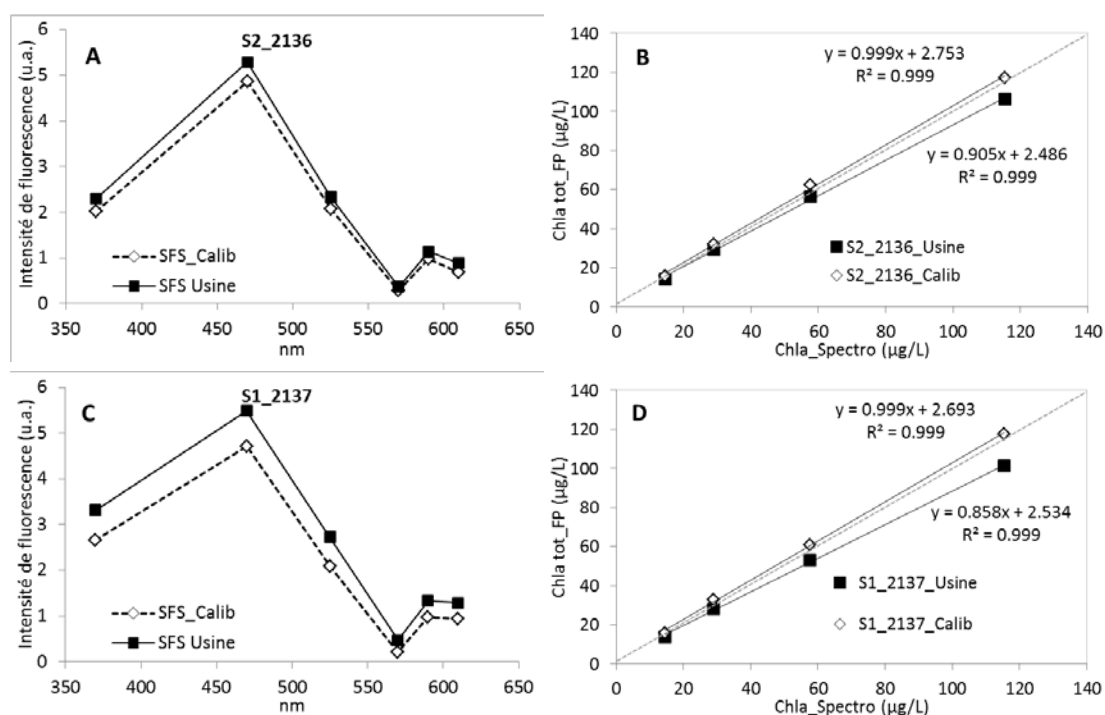
Concernant les sondes FP III désormais déployées à Suresnes (S1\_2137) et Bougival (S2\_2136), la lourdeur des expérimentations in vitro a conduit à réaliser une calibration a posteriori, objet du présent rapport.

Les deux capteurs ont ainsi été intercalibrés (en collaboration avec le MNHN) avec la diatomée *Nitzschia palea* représentative des blooms dominants en Seine (Escoffier, 2014) et selon la procédure précédemment décrite (Escoffier et al., 2015).

En synthèse, des mesures de fluorescence ont été réalisées avec les deux capteurs sur une gamme de calibration de Chla préparée à partir de la culture mère de la diatomée et les concentrations en Chla réelles déterminées par dosage spectrophotométrique selon une adaptation de la référence normative (NF T90-117, 1999) utilisant l'éthanol comme solvant d'extraction. A chaque longueur d'onde d'excitation (i.e., 370, 470, 525, 570, 590 et 610 nm), les valeurs brutes de fluorescence ont été confrontées aux valeurs de concentrations en Chla par

régressions linéaires. Les valeurs de pente ainsi obtenues correspondent aux coefficients pondérateurs composant la Signature de Fluorescence Spécifique (SFS) de la diatomée d'intérêt. Appliquée à chaque capteur, cette SFS permet de calibrer toutes données enregistrées a posteriori et de vérifier la pertinence de ces calibrations par comparaison avec les résultats obtenus selon les réglages d'usine par défaut. Ceci concerne deux aspects que sont la quantification de la Chla totale et son attribution aux différentes classes phytoplanctoniques discriminées par l'instrument (i.e., 'Green' : Chlorophycées&Euglenophycées ; 'Blue' : Cyanobactéries ; 'Brown' : Diatomées&Dinophycées ; 'Red' : Cryptophycées). Les deux aspects de correction sont présentés séparément ci-après pour plus de clarté mais sont en pratique réalisés conjointement à chaque mesure.

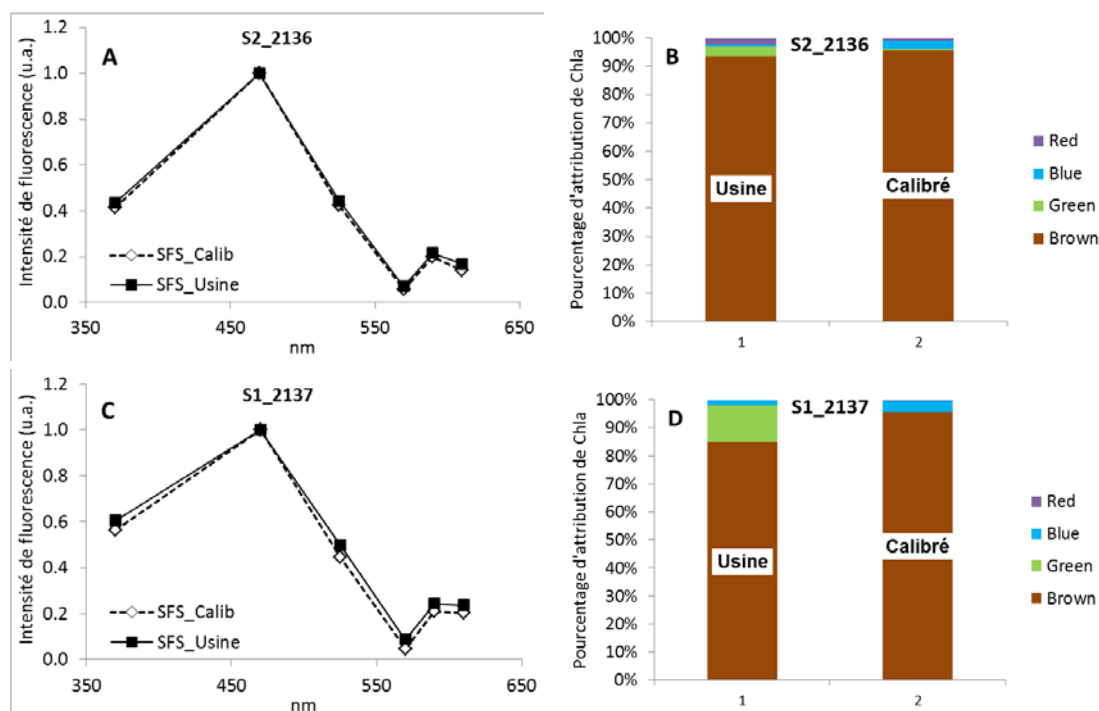
La Figure 1 représente, pour chaque capteur, les valeurs absolues des SFS 'Brown' d'usine ou calibrée spécifiquement dans le cadre de ce travail ainsi que les résultats de quantification de Chla totale de la diatomée considérée selon leur utilisation.



• Figure 1. (A, C) SFS diatomée issue de la calibration ou d'usine pour les FPIII Bouyval (S2\_2136) et Suresnes (S1\_2137) et (B, D) comparaison des quantifications de Chla pour chaque capteur avec les résultats de dosage spectrophotométrique selon l'utilisation de ces différentes SFS.

Pour chaque capteur, les SFS calibrées démontrent des valeurs de coefficients inférieures à celles des SFS définies en usine (Figure 1A, C). La valeur absolue de ces coefficients conditionnant la quantification de la Chla totale mesurée par l'instrument, l'utilisation des SFS d'usine conduit à une sous-estimation de la Chla totale déterminée par dosage spectrophotométrique (Figure 1B, D). Quoique variable entre les deux capteurs, ce type de sous-estimation par les sondes FP est fréquemment reporté dans la littérature (Catherine et al., 2012 ; Escoffier et al., 2015) et est à relier aux protocoles de calibration utilisés en usine, bien qu'aucune information détaillée ne soit disponible. L'adéquation des mesures de l'instrument selon les réglages d'usine avec les résultats de dosage spectrophotométrique est également tributaire du choix du solvant utilisé qui conditionne différents rendements d'extraction pigmentaire (Papista et al., 2002). L'application des SFS calibrées permet de corriger les estimations de Chla des deux capteurs avec des valeurs de pente proches du rapport 1:1 vis-à-vis des résultats de dosage (Figure 1B, D).

La Figure 2 illustre ces mêmes SFS calibrées ou d'usine mais normalisées à leur valeur maximale de fluorescence selon les différentes longueurs d'onde d'excitation du capteur. Cette représentation permet de focaliser cette fois sur la forme des différentes SFS, aspect qui contrôle l'attribution de la Chla totale mesurée entre les différentes classes phytoplanctoniques activées au sein du capteur.



• Figure 2. (A, C) SFS diatomée calibrée et d'usine normalisées pour les FPIII Bougival (S2\_2136) et Suresnes (S1\_2137) et (B, D) comparaison de l'attribution de Chla totale pour chaque capteur selon l'utilisation de ces différentes SFS.

Concernant le capteur Bougival (S2\_2136), les formes des SFS d'usine et calibrées se sont montrées très similaires (Figure 2A) et occasionnent des performances d'attribution comparables selon le réglage utilisé (Figure 2B). La calibration a toutefois entraîné une légère amélioration de l'attribution de Chla vers la diatomée puisque suite à l'application de la SFS correspondante, l'erreur d'attribution n'est plus que de 4.4% vers les autres classes, contre 6.6% avec les réglages d'usine.

La différence de forme entre SFS s'est montrée plus importante concernant le capteur Suresnes (S1\_2137) avec notamment une variation des intensités relatives de fluorescence suite à l'excitation dans la gamme 525-610 nm (Figure 2C). Ceci s'est traduit par des disparités de performances d'attribution selon les réglages utilisés. Avec la SFS d'usine, l'erreur d'attribution moyenne est de 15.2%, majoritairement vers la classe 'Green' tandis que l'application de la SFS calibrée permet de réduire cette erreur à une valeur moyenne de 4.5% (Figure 2D), tout à fait cohérente avec les résultats obtenus pour le capteur Bougival. Ces pourcentages d'erreurs sont moyennés à partir des résultats obtenus sur les quatre points de gamme utilisés lors de la calibration et il est important de préciser que quel que soit les SFS ou capteurs utilisés, les plus importantes erreurs d'attribution sont toujours observées à faible concentration en Chla.

Pour résumer, les différents capteurs considérés ont démontré des performances variables pour quantifier et attribuer la Chl<sub>a</sub> de la diatomée d'intérêt selon les SFS d'usine ; le capteur Bougival (S2\_2136) présentant de meilleures performances sur ces 2 aspects selon ces réglages. L'application des SFS calibrées au cours de ce travail permet de corriger significativement les erreurs de mesure identifiées et d'obtenir des résultats consistants entre les deux capteurs et avec ceux obtenus par la référence normative. Tel qu'illustré en Figure 1 et 2, pour une même espèce, les SFS calibrées pour Bougival et Suresnes sont toutefois variables et se doivent d'être établies expérimentalement pour chaque capteur. Des travaux supplémentaires restent ainsi nécessaires pour établir dans quelle mesure il serait possible de constituer une bibliothèque générique de SFS à partir d'une ou plusieurs sondes FluoroProbe, adaptable à toute sonde par calculs et non plus par la contraignante calibration expérimentale qui nécessite des ressources importantes, notamment en termes de cultures phytoplanctoniques. Quoiqu'il en soit, l'intercalibration des capteurs réalisée au cours de ce travail permet désormais une plus juste évaluation de la dynamique temporelle et spatiale des communautés phytoplanctoniques de diatomées dominantes en Seine.

## REFERENCES

Catherine A., Escoffier N., Belhocine A. et al. (2012). On the use of the FluoroProbe (R), a phytoplankton quantification method based on fluorescence excitation spectra for large-scale surveys of lakes and reservoirs. *Water Res.*, 46, 1771–1784

Escoffier N., Bernard C., Hamlaoui S., Groleau A., Catherine A. (2015). Quantifying phytoplankton communities using spectral fluorescence: the effects of species composition and physiological state. *J. Plankton Res.* (2015) 37(1): 233–247.

Escoffier N. (2014). Apports de la Biogéochimie Haute Fréquence pour l'étude de la qualité de l'eau et la quantification du fonctionnement trophique de la Seine. Thèse de doctorat de l'Institut de Physique du Globe de Paris – Sorbonne Paris Cité.

NF T90-117. (1999). Qualité de l'eau – Dosage de la chlorophylle a et d'un indice phéopigments – Méthode par spectrométrie d'absorption moléculaire. AFNOR.

Papista E., Ásc E. and Böddi B. (2002). Chlorophyll-a determination with ethanol – a critical test. *Hydrobiologia*, 485, 191–198

## CARACTERISATION DE LA DYNAMIQUE DES NITRITES SUR L'AXE SEINE : APPORT DE LA BIOGEOCHIMIE ISOTOPIQUE

Sebilo M.<sup>1,\*</sup>, Laverman A.<sup>2</sup>, Vaury V.<sup>1</sup>, Mothet A.<sup>1</sup>, Perrin E.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, IEES, 4 Place Jussieu, 75005 Paris

<sup>2</sup> ECOBIO, Université de Rennes 1, 263 Avenue du Général Leclerc 35042 RENNES

\* mathieu.sebilo@upmc.fr

### INTRODUCTION

L'ion nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) est considéré comme particulièrement toxique et sa présence, même à des concentrations faibles est susceptible d'avoir des répercussions sur la santé humaine, comme par exemple des détresses respiratoires et favoriser le développement de cancers. En raison de cette forte toxicité, l'Union Européenne a imposé un critère européen de la qualité de l'eau fixé à 0,15 mg N- $\text{NO}_2^-$ /L pour les eaux potables.

Du fait des faibles concentrations dans l'environnement et qu'il était considéré comme très réactif, le nitrite et sa dynamique n'ont que très peu été étudiés. En effet, dans les eaux de surface, les conditions sont favorables à la réaction de nitrification et les nitrites présents dans cette eau se retrouvent directement transformés en nitrate.

Cependant, plusieurs études menées dans les systèmes hydrographiques, notamment sur le bassin de la Seine, ont montré que les concentrations en nitrite pouvaient demeurer significatives (Garnier et al., 2008, 2010, 2011). Il est vraisemblable que l'augmentation des concentrations en nitrite dans les eaux de surface de l'axe Seine serait liée aux modifications des traitements de l'azote dans les stations d'épuration, dont Seine Aval à Achères.

Une question demeure : quelle est le processus majoritairement responsable de la production du nitrite dans les systèmes hydrographiques. La nitrification, processus autotrophe, d'oxydation de l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) en aérobie ? Ou la dénitrification, processus hétérotrophe de réduction du nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) en anaérobie ?

La mesure seule des concentrations ne permet pas de répondre à cette question.

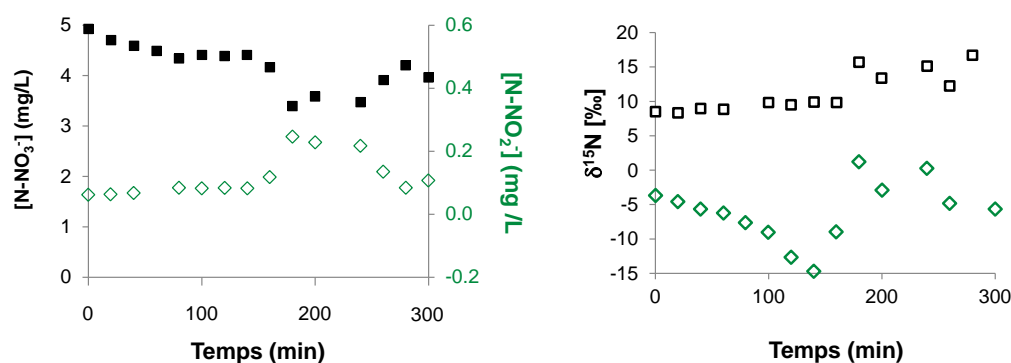
La biogéochimie isotopique a pour objet d'expliquer la composition isotopique des éléments présents dans les stocks naturels de substances environnementales, en tenant compte d'une part de l'origine de ces éléments, et d'autre part des modifications apportées à cette composition lors des processus de transformations qu'ils subissent. Le traçage isotopique naturel est donc, pour la compréhension du fonctionnement des systèmes naturels, un outil très puissant

permettant de mettre à l'épreuve les conclusions issues des méthodes plus conventionnelles de diagnostic et d'établissement de bilans de circulation de matière.

L'objectif de cette étude était de tester la faisabilité de l'outil isotopique pour tracer le processus de dénitrification.

## RESULTATS & DISCUSSION

Des expérimentations en batch ont été réalisées dans un premier temps avec du nitrate comme substrat. Cette première expérimentation a permis de valider la méthode d'analyse. Les suivis des concentrations en nitrate, nitrite et leurs compositions isotopiques associées ont été mesurées (Figure 1).

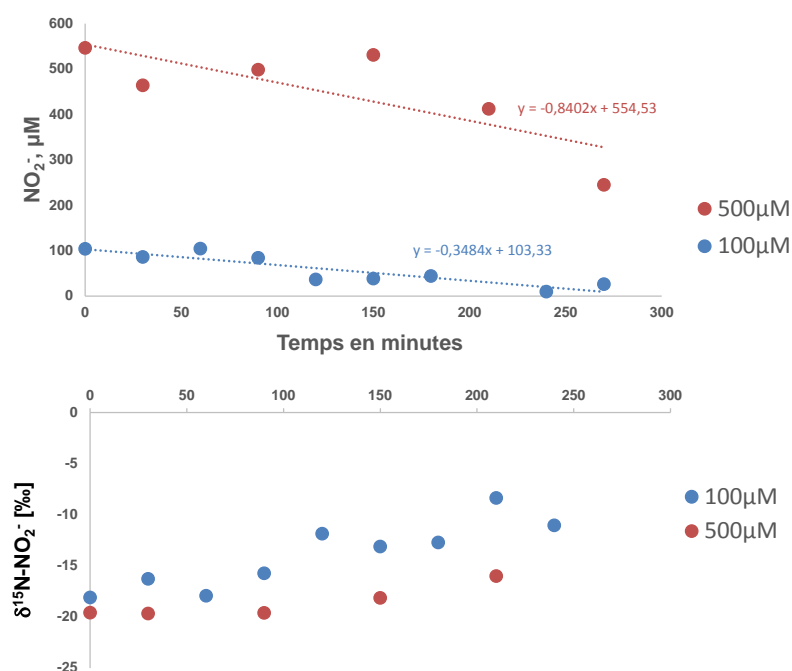


• Figure 1. Variations des concentrations en nitrate et nitrite et de la composition isotopique de l'azote au cours de l'expérimentation de dénitrification.

La diminution des concentrations en nitrate s'accompagne d'une augmentation du  $\delta^{15}\text{N}$  résiduel, traduisant comme attendu le processus de dénitrification. Concernant les nitrites, deux tendances sont observées. Une augmentation des concentrations puis une diminution. Tout au cours de la dénitrification et de la réduction des nitrates, des nitrites sont produits et réduits. L'augmentation des concentrations en nitrite traduit un taux de production supérieur à celui de leur réduction. Compte tenu de la superposition des processus de production et de réduction des nitrites, la mesure seule de leur  $\delta^{15}\text{N}$  ne permet pas de déterminer un fractionnement isotopique.

C'est pour cette raison qu'une deuxième série d'expérimentations en batch ont été réalisées en conditions dénitrifiantes (sédiment en anaérobie) avec comme seule source d'azote du nitrite (100 et 550  $\mu\text{M}$ ).

La figure 2 présente les variations observées.



• Figure 2. Variations des concentrations en nitrite et  $\delta^{15}\text{N}$  associées au cours d'une expérimentation de dénitrification avec comme seule source de l'azote une solution de nitrite (100 et 550  $\mu\text{M}$ ).

Bien que les cinétiques chimiques soient très différentes, les variations isotopiques sont du même ordre. Le coefficient de fractionnement isotopique calculé pour les deux batch est  $\delta = -4\text{‰}$ .

Il conviendra de rééditer cette expérimentation pour confirmer le faible fractionnement isotopique associé à la réduction du nitrite au cours de la dénitrification.

## CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

L'objectif de ce travail était de tester l'utilité de la biogéochimie isotopique comme traceur de l'origine des nitrites dans les hydrosystèmes (nitrification vs. dénitrification). Après une mise au point de méthode, les premières analyses ont permis de déterminer le fractionnement isotopique associé à la réduction du nitrite au cours de la dénitrification. Il est prévu de reconduire les expérimentations de dénitrification afin de confirmer ce faible fractionnement observé. Compte tenu du fractionnement isotopique de la réduction du nitrate et du nitrite, il sera alors possible de déterminer celui associé à la production de nitrite à partir de la réduction des nitrates.

Il est également prévu de tester la même approche lors du processus de nitrification et de réaliser des mesures in situ à l'aval immédiat des rejets de STEP.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Garnier J., Mounier E., Martinez A., Laverman A., Martin J., Cremer C., Sebilio M., Lot K., Billen G., Silvestre M., Amsaleg C., Herbal M., Vilain G. & Chollet J. (2008). Facteurs de contrôle de N<sub>2</sub>O par dénitrification. Bilans des émissions à l'échelle du bassin. Rapport Piren-Seine. 23 pp.

Garnier J., Mounier E., Laverman A. & Billrn G. (2010). Potential denitrification and nitrous oxide production in the sediments of the Seine River drainage network (France). J. Environ. Qual. 39 : 449-459.

Garnier J., Billen G., Aissa-Grouz N., Romero E., Martinez A., Mercier B., Tronquart O. & Rolland A. (2011). Qualité de l'eau de l'axe Seine : quels changements depuis la mise aux normes des STEPS

## EXPLORATION DES COMMUNAUTE NITRIFIANTES DE LA SEINE

Cazier T.<sup>\*, 1</sup>, Roose-Amsaleg C.<sup>1</sup>, Raimonet M.<sup>1</sup>, Rocher V.<sup>2</sup>, Garnier J.<sup>1</sup>, Laverman A.<sup>1, 3</sup>

<sup>1</sup> UMR 7619 METIS, UPMC, Paris

<sup>2</sup> SIAAP, Direction du Développement et de la Prospective, Colombes

<sup>3</sup> ECOBIO, Université de Rennes 1, 263 Avenue du Général Leclerc

35042 RENNES Cedex

\* [thibaut.cazier@upmc.fr](mailto:thibaut.cazier@upmc.fr)

### CONTEXTE DE L'ETUDE

Le cycle de l'azote est l'un des cycles biogéochimiques majeurs de la biosphère, et principalement lié à l'activité microbienne. Malgré les traitements des eaux usées domestiques en station d'épuration (STEP) les eaux traitées et rejetées perturbent les cours d'eau et le cycle de l'azote. Un des intermédiaires d'intérêt du cycle de l'azote est le nitrite, une forme toxique de l'azote, qui est l'objet d'une surveillance dans le cadre de la "Directive Cadre de l'Eau" (DCE). L'ajout de traitements de l'azote dans les STEP de l'agglomération parisienne a conduit à une augmentation des rejets de nitrite en aval jusqu'à dépasser le critère de bon état écologique de l'eau ( $>1\mu\text{M}$  ou  $0,09\text{ mg N/L}$ ) sur plusieurs dizaines de km en aval. Pourtant, le nitrite est un élément très réactif et est donc supposé être rapidement métabolisé.

Pour comprendre les causes de cette persistance, les communautés microbiennes impliquées dans la dynamique du nitrite dans la colonne d'eau de la Seine ont été analysées en huit points (six issus de l'environnement de Choisy en amont de Paris à Méricourt, deux autres points en provenance de rejet des stations d'épuration (STEP) de Seine Amont (SAM) et Seine Aval (SAV)). La colonne d'eau de la Seine étant un milieu oxygéné, les groupes étudiés ont été les microorganismes nitrifiants. Ces microorganismes sont répartis en 2 groupes prenant en charge les deux étapes de la nitrification, l'oxydation de l'ammonium en nitrite et l'oxydation du nitrite en nitrate.

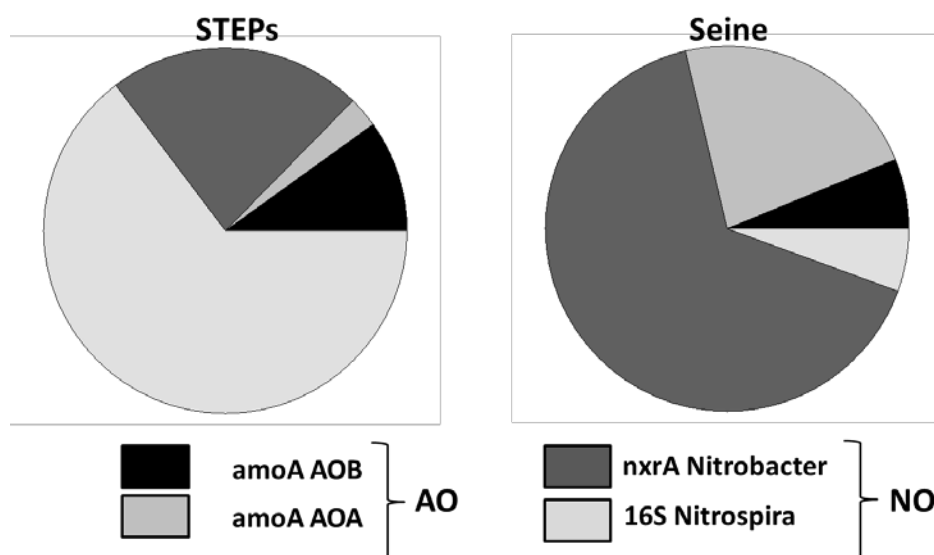
### METHODOLOGIE

L'étude de ces groupes a été effectuée selon deux axes: le long de l'axe de la Seine pour observer l'impact de l'agglomération Parisienne, et mensuellement pendant un an pour suivre l'effet saisonnier. La quantification de ces groupes de microorganismes ainsi que de l'ensemble des procaryotes par PCR quantitative

(qPCR) a ainsi permis d'étudier l'importance relative de ces différents groupes dans la Seine.

## RESULTATS

Les résultats obtenus sur les prélèvements de 2012 à 2013 montrent une plus forte abondance des nitrite oxydants (NO). Cette dominance des NO est causée par la surabondance du genre *Nitrospira* dans les effluents de STEP, ou du genre *Nitrobacter* dans l'eau de Seine (Figure 1). La dominance du groupe *Nitrospira* dans les STEP peut s'expliquer par sa moins grande sensibilité aux stress que *Nitrobacter*, tels que de fortes concentrations d'ammonium (Cabezas, Draper et al. 2009).



• Figure 1. Proportions moyenne des différents groupes bactériens nitrifiants en STEPS et en Seine (AOA, Archées ammonium oxydantes; AOB, Bactéries ammonium oxydantes (AO), Nitrobacter et Nitrospira, bactéries (NO)).

Dans la Seine, la dominance de *Nitrobacter* n'est pas accompagnée d'une plus forte activité des NO par rapport aux ammonium oxydants (AO) (Raimonet et al., in prep). Cette différence entre abondance des NO et activité d'oxydation du nitrite est probablement due à la capacité des bactéries du genre *Nitrobacter* d'avoir un comportement mixotrophe (Winkler, Bassin et al., 2012). L'observation des profils longitudinaux de la Seine effectués en Août et Décembre 2012 a permis de montrer une influence de l'agglomération Parisienne sur les communautés nitrifiantes de la Seine. L'étude réalisée sur 12 mois en 4 points de prélèvement a permis de montrer des variations saisonnières des communautés nitrifiantes, tant dans les rejets de STEP que dans la Seine en amont et en aval de SAV.

## CONCLUSION

Cette étude a ainsi permis de montrer une plus forte abondance des NO par rapport aux AO, tant dans les rejets de STEP que dans l'environnement. Cette dominance de NO par rapport aux AO avaient seulement été montrée pour l'environnement (Cebron, Coci et al., 2004; Cebron and Garnier, 2005). Les archées étudiées pour la première fois, peu représentées en STEP, représentent  $\frac{1}{4}$  des populations nitrifiantes dans l'environnement.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Cabezas A., P. Draper et al. (2009). "Fluctuation of microbial activities after influent load variations in a full-scale SBR: recovery of the biomass after starvation." *Applied Microbiology and Biotechnology* 84(6): 1191-1202.

Cebron A., M. Coci, et al. (2004). "Denaturing gradient gel electrophoretic analysis of ammonia-oxidizing bacterial community structure in the lower Seine River: Impact of Paris wastewater effluents." *Applied and Environmental Microbiology* 70(11): 6726-6737.

Cebron A. and J. Garnier (2005). "Nitrobacter and Nitrospira genera as representatives of nitrite-oxidizing bacteria: Detection, quantification and growth along the lower Seine River (France)." *Water Research* 39(20): 4979-4992.

Winkler M. K. H., Bassin J. P. et al., (2012). "Unravelling the reasons for disproportion in the ratio of AOB and NOB in aerobic granular sludge." *Applied Microbiology and Biotechnology* 94(6): 1657-1666.

# LA MATIÈRE ORGANIQUE DANS LE BASSIN DE LA SEINE : SOURCES, VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE ET INFLUENCE SUR LA SPÉCIATION DES MICROPOLLUANTS

*Varrault G.\*<sup>1</sup>, Parlanti E.<sup>2</sup>, Benedetti M.<sup>3</sup>, Garnier J.<sup>4</sup>, Derenne S.<sup>4</sup>, Gelabert A.<sup>3</sup>, Bressy A.<sup>1</sup>, Soares-Pereira C.<sup>1</sup>, Bonnot C.<sup>3</sup>, Boudahmane L.<sup>1</sup>*

*1 LEESU, UPEC, ENPC, AgroParisTech, UMR MA 102*

*2 EPOC, Bordeaux 1, Bordeaux 4, EPHE, CNRS, UMR 5805*

*3 Equipe Géochimie des Eaux, Univ. Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, Institut de Physique du Globe - UMR 7154, Paris*

*4 METIS, UPMC, EPHE, CNRS, UMR 7619*

*\* varrault@u-pec.fr*

## INTRODUCTION

La matière organique dissoute (MOD) joue un rôle important sur la qualité des milieux aquatiques à plusieurs niveaux. Son rôle est notamment très important sur la biogéochimie des micropolluants métalliques et organiques. Par ailleurs, en excès dans les eaux de surface sous une forme biodégradable, elle peut conduire à des déficits en oxygène lors de sa minéralisation. En outre, d'un point de vue opérationnel, la matière organique est un paramètre clé lors de la potabilisation des eaux.

Les objectifs des travaux menés en 2014 sont doubles. Il s'agit d'une part d'estimer la variabilité spatio-temporelle des qualités et quantités de matière organique dans le bassin de la Seine et également de caractériser ses sources. Il s'agit d'autre part de caractériser l'influence de la matière organique, selon sa nature, sur la spéciation des micropolluants dans les cours d'eau.

## CARACTÉRISATION DE LA VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE ET DE SES SOURCES DANS LE BASSIN DE LA SEINE

Afin d'identifier les sources de matière organique dans le bassin de la Seine, trois campagnes snapshot y ont été menées en basses eaux (novembre 2011 et août 2012) et en hautes eaux (février 2013). Ces campagnes ont été menées sur un grand nombre de sites localisés principalement à l'amont de l'agglomération parisienne. Des outils de caractérisation très performants (spectrofluorescence 3D, RMN du <sup>13</sup>C, Py-GC/MS, fractionnement sur résines, AF4,...) ont été utilisés

sur les échantillons acquis lors de ces campagnes. Une cartographie spatio-temporelle permet la mise en évidence des variations des qualités et des quantités de la matière organique selon les conditions hydrologiques (crue, étiage), selon le bassin considéré et la localisation dans le bassin. La diversité des types de matière organique a nécessité de poursuivre en 2014 l'analyse complexe des données de caractérisation pour préciser les sources et pour évaluer la nature des processus qui gouvernent cette variabilité spatio-temporelle.

En complément à ces travaux expérimentaux, l'analyse de deux séries de données acquises sur de longues périodes de temps a été initiée en 2014. La première, mise à notre disposition par le SEDIF, comprend des données de qualité (COT, absorbance UV, conductivité, ions majeurs,...) aux prises d'eau des stations de potabilisation de Méry-sur-Oise, Neuilly-sur-Marne et Choisy-le-Roi sur la période 2002-2013 avec une fréquence d'échantillonnage quasi-quotidienne. Ces données permettent notamment de bien identifier les dynamiques de qualité d'eau en période de crue, notamment celles de l'Oise, de la Seine et de la Marne sur toute la période (Gérard, 2014, master 2).

La seconde série de données, mise à notre disposition plus tardivement par la DRIEE, comprend des données de qualité (paramètres globaux, COD, DBO<sub>5</sub>, DCO, ions majeurs,...) sur un grand nombre de stations du bassin de la Seine en particulier sur l'Oise, l'Aisne, la Marne et la Seine à l'amont de l'agglomération parisienne sur la période (1971-2014) avec une fréquence d'échantillonnage variable selon les stations mais qui peut être bimensuelle pour les périodes les plus récentes (à partir des années 1990) et les stations les plus suivies.

Enfin, les parts contributives du ruissellement et de l'alimentation souterraine aux débits journaliers de l'Oise, la Marne et de la Seine au niveau des prises d'eau des stations de potabilisation évoquées ci-dessus sur la période 2002-2013 nous ont été fournies par le pilier « Interfaces Nappe-Rivière » du Piren-Seine. Les données de concentrations en matière organique (données SEDIF) ont commencé à être réinterprétées en lien avec l'origine de l'eau (ruissellement ou alimentation souterraine).

La caractérisation des matières organiques de la plaine alluviale prévue dans un premier temps en 2014 grâce aux piézomètres installés dans la Bassée est reportée, probablement à la prochaine phase du Piren-Seine.

## **CARACTERISATION DES INTERACTIONS ENTRE LA MATIERE ORGANIQUE DISSOUE, LES PARTICULES ET LES CONTAMINANTS**

Le rôle de la MOD sur d'une part la spéciation en phase dissoute des contaminants et d'autre part leur sorption sur des particules du milieu aquatique (goethite, montmorillonite, calcite) a été investigué (thèse de C. Soares-Pereira en cours). Dans ce cadre, différents types de MOD ont été utilisés avec notamment de la MOD de nature fulvique<sup>4</sup> et de la MOD issue des rejets de la station d'épuration Seine-Aval. Les acides fulviques de la rivière Suwannee sont représentatifs d'une MOD d'origine naturelle. L'utilisation de ces MOD dont la nature est très différente permet de caractériser l'influence de la MOD de la Seine d'origine urbaine, très peu étudiée, sur la spéciation des contaminants dans les zones fortement anthropisées. Les contaminants étudiés sont les métaux traces (Cu, Cd, Ni, Pb, Zn), l'arsenic, les HAP et le sulfaméthoxazole qui est un produit pharmaceutique très fréquemment retrouvé dans les eaux usées et assez peu éliminé par les traitements épuratoires. Ces interactions ont été étudiées grâce à des protocoles expérimentaux en partie développés pendant la thèse comme par exemple la micro-extraction sur phase solide (SPME) couplée à la GC/MSMS et l'utilisation de produits marqués au <sup>14</sup>C détectés par scintillation liquide. Les résultats obtenus durant l'année 2014 montrent dans certains cas que les interactions MOD/particules/contaminants sont fortement influencées par la nature de la MOD (origine urbaine ou naturelle).

## **CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

Cette phase du PIREN-Seine a permis d'acquérir une masse considérable d'informations sur la matière organique dans le bassin de la Seine. Ces informations concernent la variabilité spatio-temporelle des qualités et quantités de matière organique mais aussi ses interactions avec les micropolluants métalliques et organiques. Les données obtenues proviennent de campagnes menées dans le cadre de cette phase du PIREN-Seine avec le déploiement de nombreux outils analytiques. Elles proviennent également d'organismes tels que le SEDIF et la DRIEE par qui elles ont été acquises sur des périodes beaucoup plus importantes. Ces données très diverses sont actuellement en cours d'interprétation et les principaux résultats seront exposés dans le rapport de synthèse de cette phase 6.

---

<sup>4</sup> Acides fulviques de la rivière Suwannee fournie par l'IHSS (2S101F)

## DYNAMIQUE DE LA CONTAMINATION VIRALE EN SEINE

*Prevost B.<sup>1</sup>, Lucas F.S.<sup>1</sup>, Goncalves A.<sup>2</sup>, Richard F.<sup>2</sup>, Moulin L.<sup>3</sup>, Wurtzer S.<sup>3</sup>*

*1 LEESU (UMR MA 102, Université Paris-Est, Agro ParisTech), Université Paris-Est Créteil, 61, Avenue du Général-de-Gaulle, 94010 Créteil cedex, France*

*2 SIAAP, Direction du développement et de la prospective, 82, Avenue Kléber, 92700 Colombes, France*

*3 Eau de Paris, DRDQE, R&D biologie, 33, Avenue Jean Jaurès, 94200 Ivry sur seine, France*

*\* Laurent.Moulin@eaudeparis.fr*

De nombreuses espèces de virus sont présentes dans le milieu hydrique, que ce soit dans les eaux douces ou marines. Parmi ces virus, un certain nombre d'entre eux sont susceptibles de se répliquer dans le système digestif humain et sont regroupés sous la dénomination de virus entériques. La stabilité des virions aux pH acides favorise le passage de la barrière gastrique et l'infection du tractus intestinal, ouvrant potentiellement la porte à une dissémination à d'autres organes cibles. Ces virus sont essentiellement responsables de gastroentérites ou d'hépatites. Dans de rares, des atteintes pléiotropiques peuvent survenir telles que des insuffisances respiratoires ou encore des atteintes neurologiques, cutanées ou oculaires. Toutefois, les infections asymptomatiques et paucisymptomatiques extrêmement fréquentes conduisent à une très large sous-estimation de ces infections virales. Les virus entériques sont donc des pathogènes à surveiller de près d'autant plus que leurs doses minimales infectieuses sont généralement inférieures à 50 virus infectieux ingérés.

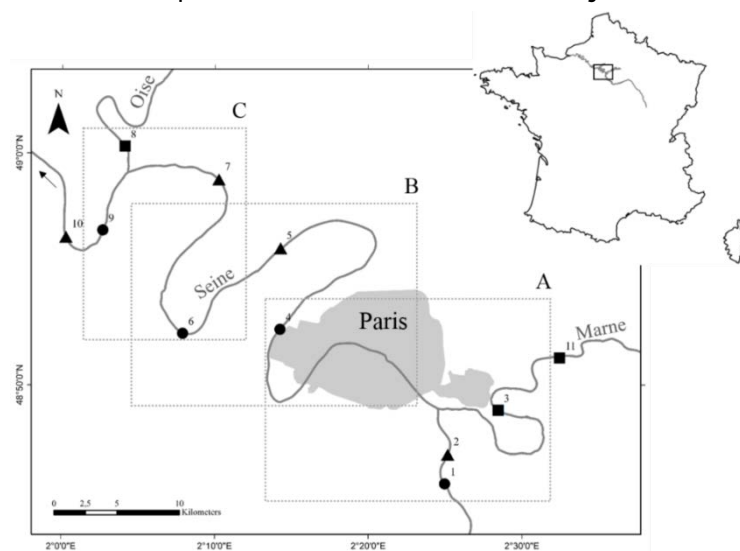
Une personne infectée par un virus entérique excrète dans ses fèces jusqu'à 108 particules virales par gramme de selles. Les virus excrétés dans les selles se retrouvent ainsi dans les eaux usées. Les cours d'eau d'Ile de France (la Seine et la Marne), étant les principaux réceptacles des eaux usées traitées de l'agglomération parisienne, s'en retrouvent directement impactés. Ces virus hydriques sont très résistants dans l'environnement extérieur et leurs génomes peuvent être détectés dans l'eau durant plusieurs mois, voire années pour les virus les plus résistants (Kotwal, 2014). La contamination virale de ces ressources naturelles, utilisées par EAU DE PARIS pour la production d'eau potable, constitue un challenge à prendre en considération (Gibson, 2014). Bon nombre d'interrogations subsistent à propos de ces virus pathogènes. L'efficacité des filières de potabilisation, notamment lorsque celles-ci sont confrontées à des pics de contamination des eaux de surface, est très peu connue (Abbaszadegan, 2008). Si bien que des cas de contamination virale par le biais du réseau d'eau potable sont sporadiquement rapportés de façon rétrospective (Fongaro, 2013;

Haramoto, 2012; Haramoto, 2013; Jack, 2013; Li, 2013; Mattioli, 2014; Vecchia, 2013; Ye, 2012). Mais la distance potentielle et des temps d'incubation parfois relativement longs conduisent vraisemblablement à une large sous-estimation de ces événements.

Les travaux conduits durant l'année 2014 ont porté sur l'étude de la contamination virale des ressources en eaux de surface et de la contribution des rejets d'eaux usées traitées.

## EVALUATION DE LA CONTAMINATION VIRALE DE LA SEINE

Les cours d'eau d'Ile-de-France (la Seine et la Marne) sont les principaux exutoires des eaux usées traitées de l'agglomération parisienne, mais plus généralement de l'ensemble des rejets urbains. La charge, la persistance et la dynamique des virus humains dans les bassins versants urbanisés ainsi que l'impact de ces rejets urbains restent encore mal connues. À l'heure de l'utilisation des eaux de surfaces comme ressources pour la production d'eau potable et de la réouverture du réseau d'eau non potable parisien, il paraît nécessaire de disposer de davantage de données concernant cette problématique. De ce fait, la surveillance et la gestion de ces particules virales potentiellement infectieuses pour l'Homme sont de réels enjeux de santé publique.



• Figure 1. Cartographie des points de prélèvement sur la Seine ●, ses affluents ■ et les stations d'épuration ▲. Cette portion d'étude la Seine a été subdivisée en 3 sections notées A, B et C.

Les résultats présentés sont issus d'une campagne de prélèvement initiée en 2013 et d'une durée d'un an, essentiellement basée sur la Seine et ses principaux affluents. Ce suivi a permis d'une part de caractériser les variations temporelles de la charge virale et de la diversité des populations circulantes. D'autre part, l'influence des rejets de stations d'épuration (STEP) sur la contamination virale de

ce cours d'eau a également été évaluée. Un contrôle global de la méthode, basé sur un adénovirus 5 modifié, a été utilisé. Des contrôles spécifiques des étapes d'extraction des acides nucléiques et d'amplification génomique ont été inclus également.

Les résultats présentés sur la figure 2 montrent que les adénovirus, les astrovirus, les rotavirus, ainsi que les norovirus de génogroupe I et II constituaient les populations virales les plus abondantes et présentant les plus fortes occurrences dans les échantillons d'eau de Seine (2.a), d'eau d'affluents (2.b) et de rejets de station d'épuration (2.c). Pour la première fois, une étude française met en évidence la présence de virus Aichi, de cosavirus et dans une moindre mesure de salivirus dans des effluents de station d'épuration, ainsi que dans des eaux de surface. Aucun virus des hépatites A et E n'a été mis en évidence au cours de cette étude. L'analyse des indicateurs fécaux bactériens (*E. coli* et *Enterococcus intestinalis*) n'a pas permis de mettre en évidence une corrélation significative entre la présence de pathogènes viraux et celle de ces indicateurs de contamination fécale (figure 3).

- **Figure 2.** Concentrations et occurrences de virus entériques mesurées dans les échantillons d'eau de Seine (a), d'affluents de la Seine (b) et d'effluents de station d'épuration (c)

/ 1 0 0 m L

- Figure 3. Corrélation entre les charges virales mesurées et la quantité d'indicateurs fécaux (E. coli et intestinal enterococcus ) dans des eaux de surface (n = 150)

- Figure 4. Comparaison des charges virales en amont ( ) et en aval ( ) de l'agglomération parisienne

L'influence de l'agglomération parisienne a été estimée en comparant les charges virales mesurées dans les échantillons les plus en amont et en aval sur la Seine de cette étude (figure 4). La figure 4 montre que les charges virales en aval étaient significativement plus élevées que celles mesurées en amont pour les populations virales majoritaires retrouvées.

L'analyse du flux viral journalier a permis d'étudier l'impact réel des rejets de stations d'épuration sur la contamination viral de la Seine. Pour modéliser la contribution des affluents et des effluents de STEP, la Seine a été scindée en 3 sections notées A, B et C (figure 1). Les résultats présentés sur la figure 5 montrent que, pour chacune des sections analysées, le flux viral mesuré en aval de la portion correspond à la somme du flux mesuré en amont, du flux viral provenant des effluents de STEP et du flux viral issu des affluents (cas des sections A et C uniquement). Les résultats soulignaient également la contribution majoritaire des effluents de STEP à la contamination de la Seine, tandis que la contribution des affluents (Marne et Oise) demeurait l'essentiel du temps très minoritaire.

De plus, les flux viraux les plus importants ont été enregistrés sur la période de décembre 2013 à mars 2014 et résultaient principalement d'une augmentation des flux viraux issus des effluents de STEP. Par ailleurs, l'augmentation des taux d'incidence des diarrhées aiguës en Ile de France (données issues du réseau Sentinelles) était en accord avec l'augmentation des flux viraux dans les effluents de STEP sur la même période.

- Figure 5. Flux viraux mesurés pour les populations virales majoritaires sur différentes portions de la Seine. Pour chaque série de prélèvements, l'histogramme de gauche correspondait à la somme du flux viral amont, du flux viral des effluents de STEP et du flux d'un affluent. L'histogramme de droite représente le flux viral mesuré en aval de la section de Seine. Le taux d'incidence de diarrhées aiguës au sein de la population en Ile de France était représenté par la courbe.

Section A

AdV

NVGI

NVGII

RV-A

Section B

Section C

a l f l u x / d a y

## CONCLUSIONS

Les travaux conduits au cours de l'année 2014 s'inscrivent dans la continuité de ceux entamés en 2013. L'étude de la contamination virale d'une des ressources utilisées par Eau de Paris pour produire de l'eau potable a permis de mieux connaître le niveau de cette pollution virale, son évolution au cours de l'année et d'en identifier clairement l'origine. L'ensemble des résultats présentés dans ce rapport ont été acceptés pour publication dans le journal *Environment International* sous l'intitulé suivant "Large scale survey of enteric viruses in river and waste water underlines the health status of the local population". Des travaux complémentaires sont en cours de réalisation afin de caractériser de manière plus fine les types de virus détectés lors de cette campagne.

Abbaszadegan M., Monteiro P., Nwachuku N., Alum A. and Ryu H. (2008). "Removal of adenovirus, calicivirus, and bacteriophages by conventional drinking water treatment." *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng* 43(2): 171-177.

Fongaro, G., Nascimento M. A., Rigotto C., Ritterbusch G., da Silva A. D., Esteves P. A. and Barardi C. R., (2013). "Evaluation and molecular characterization of human adenovirus in drinking water supplies: viral integrity and viability assays." *Virol J* 10: 166.

Gibson K. E., (2014). "Viral pathogens in water: occurrence, public health impact, and available control strategies." *Curr Opin Virol* 4C: 50-57.

Haramoto E., Kitajima M., Kishida N., Katayama H., Asami M. and Akiba M., (2012). "Occurrence of viruses and protozoa in drinking water sources of Japan and their relationship to indicator microorganisms." *Food Environ Virol* 4(3): 93-101.

Haramoto E., Kitajima M., Kishida N., Konno Y., Katayama H., Asami M. and Akiba M., (2013). "Occurrence of pepper mild mottle virus in drinking water sources in Japan." *Appl Environ Microbiol* 79(23): 7413-7418.

Jack S., Bell D. and Hewitt J., (2013). "Norovirus contamination of a drinking water supply at a hotel resort." *N Z Med J* 126(1387): 98-107.

Kotwal G. and Cannon J. L., (2014). "Environmental persistence and transfer of enteric viruses." *Curr Opin Virol* 4C: 37-43.

Li Y., Guo H., Xu Z., Zhou X., Zhang H., Zhang L., Miao J. and Pan Y., (2013). "An outbreak of norovirus gastroenteritis associated with a secondary water supply system in a factory in south China." *BMC Public Health* 13: 283.

Mattioli M. C., Boehm A. B., Davis J., Harris A. R., Mrisho M. and Pickering A. J., (2014). "Enteric Pathogens in Stored Drinking Water and on Caregiver's Hands in Tanzanian Households with and without Reported Cases of Child Diarrhea." *PLoS One* 9(1): e84939.

Vecchia A. D., Kluge M., dos Santos da Silva J. V., Comerlato J., Rodrigues M. T., Fleck J. D., da Luz R. B., Teixeira T. F., Roehe P. M., Capalonga R., Oliveira A. B. and Spilki F. R., (2013). "Presence of Torque teno virus (TTV) in tap water in public schools from Southern Brazil." *Food Environ Virol* 5(1): 41-45.

Ye X. Y., Ming X., Zhang Y. L., Xiao W. Q., Huang X. N., Cao Y. G. and Gu K. D., (2012). "Real-time PCR detection of enteric viruses in source water and treated drinking water in Wuhan, China." *Curr Microbiol* 65(3): 244-253.

## **RESTAURATION DE LA CONTINUITÉ ÉCOLOGIQUE DES RIVIÈRES DU PNR DE LA HAUTE VALLÉE DE CHEVREUSE**

*Le Pichon C. \*, Roy M., Chevalier R., Belliard J. et Tales E.*

*Irstea UR Hydrosystèmes et bioprocédés 1 rue Pierre Gilles de Gennes, CS10030, 92761 Antony cedex*

*\* celine.lepichon@irstea.fr*

Le Parc Naturel Régional de la Haute Vallée de Chevreuse (PNRHVC) mène un vaste projet de restauration de la continuité écologique de ses rivières. En partenariat avec l'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (Irstea), un protocole de suivi de ces restaurations a été établi sur deux cours d'eau, l'Aulne et la Mérantaise (Bassin de l'Yvette) afin d'évaluer l'efficacité des mesures mises en œuvre. Il comprend l'étude des compartiments hydromorphologique, hydraulique et biologique.

Les opérations de restauration ayant pris du retard par rapport au calendrier initial, il ne nous était pas possible en 2014 de réaliser le suivi post-restauration et de conclure sur les effets de ces opérations. Des exercices de simulation d'effacement des ouvrages pour rétablir la continuité vis-à-vis des peuplements de poissons ont été menés afin de pallier à l'absence de travaux. Leurs résultats serviront d'éléments de comparaison et de réflexion pour l'analyse des effets grandeur nature quand les travaux seront réalisés.

La modélisation a concerné deux aspects relatifs au rétablissement de la continuité écologique mais uniquement dans la Mérantaise : 1/ la modification des conditions de reproduction de la truite suite à l'accessibilité de nouveaux habitats et 2/ une analyse de viabilité des populations de truite en lien avec le décloisonnement potentiel du cours d'eau.

### **MODELISATION DES PROBABILITES DE RECOLONISATION DES FRAYÈRES À TRUITE POTENTIELLES SUITE À LA RESTAURATION DE LA CONTINUITÉ ÉCOLOGIQUE DE LA MÉRANTAISE**

Douze ouvrages jalonnent la Mérantaise, dont trois sont considérés comme infranchissables par les poissons. La répartition actuelle de la truite fario dans ce cours d'eau est d'ailleurs réduite à sa portion aval, la limite amont correspondant au premier obstacle infranchissable, dit du moulin d'Ors, dont l'effacement est envisagé. Le logiciel Anaqualand 2.0 a été utilisé : basé sur la réalisation du cycle de vie des espèces de poissons, il permet d'évaluer la connectivité entre habitats

dans les cours d'eau au moyen de données stockées et analysées sous SIG. Les paramètres de modélisation ne sont pas détaillés ici.

La connectivité aux zones de frayères pour la truite augmente effectivement après effacement des obstacles sur le cours de la Mérantaise. Elle augmente nettement avec l'effacement du seuil d'Ors en lien avec la disponibilité des frayères alors que l'effacement des obstacles situés plus en amont apporte peu de gain de connectivité. Le gain de connectivité obtenu par ces effacements est toutefois lié à la mobilité des individus qui a été paramétrée dans la simulation. Il est significatif quand on a des individus très mobiles, ce qui correspond aux adultes pendant ou en dehors de la période de reproduction. Ainsi, l'aménagement prévu du seuil d'Ors est celui qui offre un bénéfice maximal à l'accessibilité des frayères situées dans le secteur amont, et qui pourrait donc contribuer au maintien, voire à l'accroissement de la population de truites en place.

## **MODELISATION DE LA VIABILITE DES POPULATIONS DE TRUITES DE LA MERANTAISE**

Pour réaliser cette analyse de viabilité, le logiciel Vortex a été utilisé. Il repose sur le concept de fonctionnement en métapopulations, c'est-à-dire l'existence de plusieurs sous-populations connectées via des échanges d'individus plus ou moins importants. Trois scénarios ont été testés. Une projection de la situation actuelle (scénario 1 sans rétablissement de continuité) indique que la taille des populations de truite décline, menant à terme à leur disparition sur une durée simulée de 100 ans. L'aménagement simulé des obstacles (scénario 2), notamment leur franchissabilité vers l'amont (montaison) conduit en revanche à une augmentation de la taille des populations : l'effet est sensible dès que les aménagements permettent un taux de migration vers l'amont de 1.25%. Enfin, une alternative a été simulée, qui consiste à préférer la réintroduction d'individus en amont des obstacles à leur effacement (scénario 3). En dépit de ces réintroductions, la probabilité de survie des populations les plus isolées en amont est faible et décroissante, indiquant que cette alternative n'est pas une solution au maintien durable des populations de truite.

## **CONCLUSIONS**

Les deux exercices de modélisation réalisés durant 2014 sont complémentaires. Leurs résultats convergent et indiquent que l'effacement des obstacles les plus pénalisants pour la circulation des truites est la meilleure option possible pour le maintien de cette espèce dans la Mérantaise. Ils permettent ainsi de hiérarchiser

PIREN-Seine – Phase 6 – Rapports 2014

Axe 4 : Ecologie et écotoxicologie

Bloc 1 : Evolutions passées et à venir de l'état écologique des cours d'eau

les actions de restauration de la continuité écologique à l'échelle de l'ensemble du cours d'eau, voire d'un bassin versant.

## APPROCHE INTEGREE POUR L'EVALUATION DE LA QUALITE DE L'AXE SEINE

Barjhoux I.<sup>1</sup>, Berthe T.<sup>2</sup>, Bimbot M.<sup>3</sup>, Budzinski H.<sup>4</sup>, Cachot J.<sup>4</sup>, Charron L.<sup>1</sup>, Clérandeau C.<sup>4</sup>, Dedourge-Geffard O.<sup>1</sup>, Fechner L.<sup>5</sup>, François A.<sup>6</sup>, Geffard A.<sup>1\*</sup>, Geffard O.<sup>6</sup>, Georges I.<sup>7</sup>, Huteau V.<sup>3</sup>, Labadie P.<sup>4</sup>, Landi L.<sup>4</sup>, Lebrun J.<sup>5</sup>, Levi Y.<sup>3</sup>, Munoz G.<sup>4</sup>, Oziol L.<sup>3</sup>, Peluhet L.<sup>4</sup>, Petit F.<sup>2</sup>, Servais P.<sup>7</sup>

1 Université Reims Champagne Ardenne, UMR-I 02 SEBIO

2 Université de Rouen UMR 6143 M2C

3 Université Paris Sud 11 UMR8079 ESE

4 Université Bordeaux, UMR 5805 EPOC

5 Irstea Antony

6 Irstea Lyon

7 Université Libre de Bruxelles ESA

\* [alain.geffard@univ-reims.fr](mailto:alain.geffard@univ-reims.fr)

### CONTEXTE

Les actions menées au sein des blocs 2 et 3 de l'Axe 4 du PIREN-Seine: "Les déterminants de la qualité écologique du milieu aquatique" visent à une meilleure compréhension des causes et conséquences des perturbations biologiques *in situ* liées aux activités anthropiques. Pour ceci, une approche intégrée a été proposée incluant d'une part la caractérisation de l'exposition des organismes (intégrateurs passifs, mesure dans le biote...) et d'autre part les réponses biologiques à différents niveaux d'organisation (individuel et communauté) par des approches *in situ* et en conditions contrôlées. Cette approche intégrée a été mise en place selon deux stratégies :

- sur l'axe Seine, avec trois sites sont situés le long du gradient de pression urbaine (Marnay, Bougival et Triel) en prenant également en considération la variabilité temporelle avec une campagne par saison entre 2011 et 2012 (Bloc 2)

- la prise en compte du bassin versant, avec une vingtaine de sites suivis annuellement en période automnale (Bloc 3 : projet Biomarqu'Indic financé par l'AESN).

#### **Mise en place d'une base de données sur les campagnes de l'axe Seine (Marnay, Bougival et Triel ; Bloc 2)**

Les quatre campagnes de l'axe Seine ont conduit à l'obtention d'une très grande quantité de données originales et de nature très diverse (chimie, biologie, écologie). Aussi l'année 2014 a été consacrée, outre l'acquisition des dernières données, à la mise en place d'une base de données qui sera à la disposition de l'ensemble des membres et partenaires du PIREN-Seine. Toutes les informations

concernant les techniques analytiques et d'échantillonnage ont été synthétisées et seront annexées aux bases de données. L'ensemble des données générées au cours des différentes campagnes a été rassemblé au sein de bases de données exhaustives organisées comme suit :

- Base de données ABIOTIQUE.xlsx : le fichier rassemble l'ensemble de données physico-chimiques et les teneurs en contaminants organiques et métalliques acquises sur le compartiment abiotique (*i.e.* eau et sédiment), campagne par campagne. Lorsque les données sont disponibles, les mesures obtenues pour chaque prélèvement ponctuel sont mentionnées et une valeur moyenne par site et par campagne est indiquée pour chaque paramètre.

- Base de données BIOTIQUE.xlsx : le fichier regroupe toutes les données acquises sur le biota, que ce soit chez les organismes exposés *in situ* (gammare, communautés bactériennes et biofilms y compris l'occurrence/abondance de gènes de résistance aux métaux traces) ou en laboratoire (medaka, bactéries, tests *in vitro*). Les valeurs mentionnées dans la base de données sont les moyennes issues de réplicats expérimentaux. Le détail des données acquises pour chaque test est accessible dans un fichier propre à chaque laboratoire en charge des analyses (par ex. : DONNEES BIO Irstea Lyon.xlsx).

La suite du travail consistera en un traitement de l'ensemble du jeu de données ainsi constitué à l'aide d'analyses statistiques descriptives et multivariées en composante principale ou régression PLS (Partial Least squares) afin de i) préciser la variabilité saisonnière et spatiale (inter-sites) des paramètres et ii) d'identifier les paramètres pouvant expliquer les réponses biologiques mesurées.

### **Projet Biomarqu'indic (Bloc 3)**

Pour mémoire, ce projet piloté par Irstea d'Antony est mené dans le cadre du programme BioMarqIndic mené en parallèle aux activités du PIREN-Seine, et qui fait l'objet d'une aide spécifique de l'AESN. Il implique également différents partenaires du PIREN-Seine (URCA – SEBIO, LPTC – UMR EPOC, SPE – UMR 8079) et la société Vigicell.

L'objectif de cette étude est de combiner différents outils, d'une part utilisés dans le cadre des réseaux DCE (bioindicateurs, mesures chimiques), mais aussi développés par les équipes de recherche pour estimer l'effet des contaminants sur les organismes aquatiques tels les gammare (biomarqueurs) et améliorer la caractérisation du risque chimique (échantillonneurs passifs, biotests). Des outils conçus indépendamment, mais qui une fois associés, pourraient permettre d'avoir une vue d'ensemble de la qualité des cours d'eau.

Ces différents types d'outils ont été utilisés sur des sites communs correspondant à des gradients croisés relatifs aux pressions anthropiques liées à un enrichissement en nutriments et à la présence de micropolluants. Les sites ont été choisis parmi les stations de mesures de l'AESN puisque de nombreux

paramètres physico-chimiques y sont déjà connus (données 2009-2010). Une vingtaine de sites ont été répartis en 4 lots correspondant à 2 niveaux de contamination et 2 niveaux d'état physico-chimique, et instrumentés par Irstea d'Antony en été 2012 pour un suivi continu de la température et du niveau d'eau. Sur chaque site, les mesures suivantes ont été réalisées au cours de trois campagnes annuelles consécutives (octobre 2012, 2013 et 2014) pour intégrer la variabilité temporelle :

- la qualité physico-chimique de l'eau (données des réseaux de l'AESN)
- la contamination chimique : suivi réglementaire, et déploiement d'échantillonneurs passifs DGT (métaux), SPMD (HAP) et POCIS (composés hydrophiles)
- le potentiel toxique de l'eau par des approches bio-analytiques
- les réponses écotoxiques chez un invertébré modèle, le gammare : bioaccumulation et biomarqueurs
- les bio-indicateurs suivis dans le cadre de la DCE (diatomées, macrophytes, invertébrés, poisson).

Actuellement, l'acquisition des données de la dernière campagne de 2014 est en cours. L'exploitation intégrée de ces résultats obtenus sur une large échelle spatio-temporelle, prévue courant 2015, permettra ainsi de tester la complémentarité de ces approches écologiques et écotoxicologiques pour diagnostiquer l'état santé des écosystèmes.

# ROLE DE L'ÉROSION DANS LE TRANSFERT DES HAP DEPUIS LES SOLS VERS LES COURS D'EAU

*Cassagnole M., Gateuille D., Alliot F., Moreau-Guigon E., Mouchel J.M.\**

*UPMC Univ Paris 06, CNRS, EPHE, UMR 7619 Metis, 4 place Jussieu, 75005 PARIS, FRANCE*

*\* jean-marie.mouchel@upmc.fr*

## INTRODUCTION

Le transfert et la rémanence des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans le bassin amont de la Seine ont été étudiés au cours des dernières années dans le cadre du doctorat de David Gateuille (Gateuille, 2013). David Gateuille a cherché à expliquer les quantités de HAP présents dans les MES des cours par trois processus ; (i) un enrichissement des teneurs des particules érodées des sols, la teneur en matière organique des MES des cours d'eau étant significativement supérieure à celle des sols, (ii) une dilution par des particules issues des berges, supposées pauvres en HAP car moins exposées à la retombée atmosphérique et (iii) divers apports locaux directs (ruissellement sur routes, villages...). Le processus (i) a été vérifié expérimentalement (Zheng et al., 2012) et des facteurs d'enrichissement de 1 à 4 ont été obtenus. David Gateuille a montré que l'origine des particules expliquait pour partie les concentrations mesurées dans le cours d'eau. En particulier, l'érosion des berges conduit à une dilution des matières en suspension (MES) en provenance des sols. Cependant, cette relation n'a été montrée qu'en période d'étiage et en considérant des teneurs moyennes. Afin de compléter ces travaux, des analyses supplémentaires ont été effectuées afin de mieux appréhender le rôle de l'érosion des sols dans le transfert des HAP dans les cours d'eau.

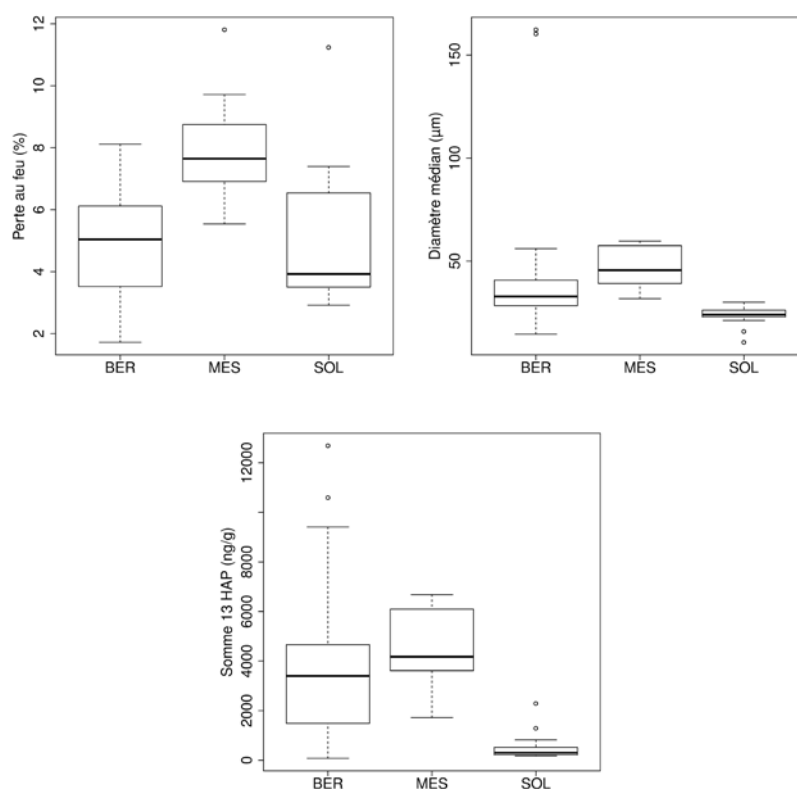
## METHODES

Soixante et un échantillons de MES, de sols agricoles et de berges ont été prélevés entre le 24 février et le 4 avril 2014 sur le bassin de l'Orgeval (77) le long du ru des Avenelles (ordre 1 à 2). Les prélèvements sont effectués sur 12 sites allant de l'amont à l'aval du bassin versant (Cassagnole, 2014). Les teneurs en HAP parents et alkylés ont été déterminés par une extraction aux ultrasons, suivie par une purification et une analyse par chromatographie gazeuse couplée à la spectrométrie de masse, et ont été corrigés par les rendements d'extraction obtenus sur un échantillon certifié de sédiments de rivière (LGC6188). La teneur en matière organique (par perte au feu), en  $^{137}\text{Cs}$  et la granulométrie ont également été analysés.

## RESULTATS

Les teneurs en matières organiques dans les MES et dans les sols sont de l'ordre de grandeur de celles qu'avaient obtenues David Gateuille. Les teneurs en HAP sont également similaires : les ordres de grandeurs obtenus dans les MES sont dans la plage des valeurs moyennes les plus élevée obtenues par David Gateuille, cette faible différence pourrait être expliquée par un effet saisonnier (émissions plus fortes d'HAP en hiver par le chauffage). Les sols sont significativement plus fins et nettement moins chargés en HAP, ce qui est encore cohérent avec les résultats préalables de David Gateuille qui donnait un ordre de grandeur de 100 à 400 ng/g dans les sols pour la somme des 13 HAP. Les sols ont des teneurs en matière organique nettement inférieurs à celles des MES. La granulométrie des sols est également inférieure à celle des MES. Les relations entre granulométrie et teneur en matière organique ne sont pas simples à analyser. Dans des environnements constitués de dépôts de sédiments, on peut d'attendre à ce que les échantillons les plus fins soient les plus riches en matière organique (ce qu'on n'observe pas ici), mais la présence de résidus organiques macroscopiques peut fortement modifier ces relations.

Les travaux réalisés au cours de cette année apportent des éléments nouveaux quant aux teneurs dans les berges. Les teneurs en HAP apparaissent beaucoup plus proches des teneurs observées dans les MES que des teneurs observées dans les sols. Il apparaît aussi que les MES sont plus chargées en matières organiques que les berges, d'une granulométrie légèrement plus élevée également, et plus chargées en HAP. Ces éléments sont cohérents entre eux et ne mettent pas en évidence deux pools de matériel nettement différents, les différences de granulométrie pouvant être dues aux modalités d'échantillonnage des MES dans des mini-trappes à sédiments. Par contre, les sols sont très différents.



Les teneurs en  $^{137}\text{Cs}$  mesurées dans les MES du bassin d'Orgeval sont faibles ce qui tend à prouver qu'elles sont issues principalement des berges et très peu des sols de surface. Ce constat est cohérent la relative homogénéité des teneurs en HAP observées dans les berges et les MES, mais pas dans les sols.

Ces résultats confirment l'importance des berges dans les apports de MES et de contaminants associés à ces MES. Reste à mieux comprendre pourquoi les berges sont si fortement chargées en HAP comparées aux sols, alors que le flux d'apports atmosphériques qu'elle reçoivent est plus limité que celui des sols en raison de leur pente.

## BIBLIOGRAPHIE

Cassagnole M., 2014. Détermination des concentrations en HAP alkylés et parents dans les sédiments du bassin d'Orgeval: Univ Paris 06 Rapport de stage, 46 p.

Gateuille D., 2013. Rémanence et transferts des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques dans le bassin amont de la Seine [Doctorat]: Univ Paris 06, 304 p.

# CONTAMINATION DE L'ATMOSPHERE PAR LES COMPOSES PERTURBATEURS ENDOCRINIENS EN ILE DE FRANCE

*Moreau-Guigon E.<sup>1\*</sup>, Alliot F.<sup>1</sup>, Gasperi J.<sup>2</sup>, Labadie P.<sup>3</sup>, Teil M.J.<sup>1</sup>, Blanchard M.<sup>1</sup>, Bourges C.<sup>1</sup>, Desportes A.<sup>1</sup> et Chevreuil M.<sup>1</sup>*

*1 UPMC Univ Paris 06, CNRS, EPHE, UMR 7619 Metis, 4 place Jussieu, 75005 PARIS, France*

*2 Université Paris-Est, AgroParisTech, UMR-MA102 LEESU, 61 avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil, France*

*3 Université de Bordeaux, UMR 5805 EPOC, 351 crs de la Libération, 33405 Talence, France*

*\* elodie.moreau-guigon@upmc.fr*

## INTRODUCTION

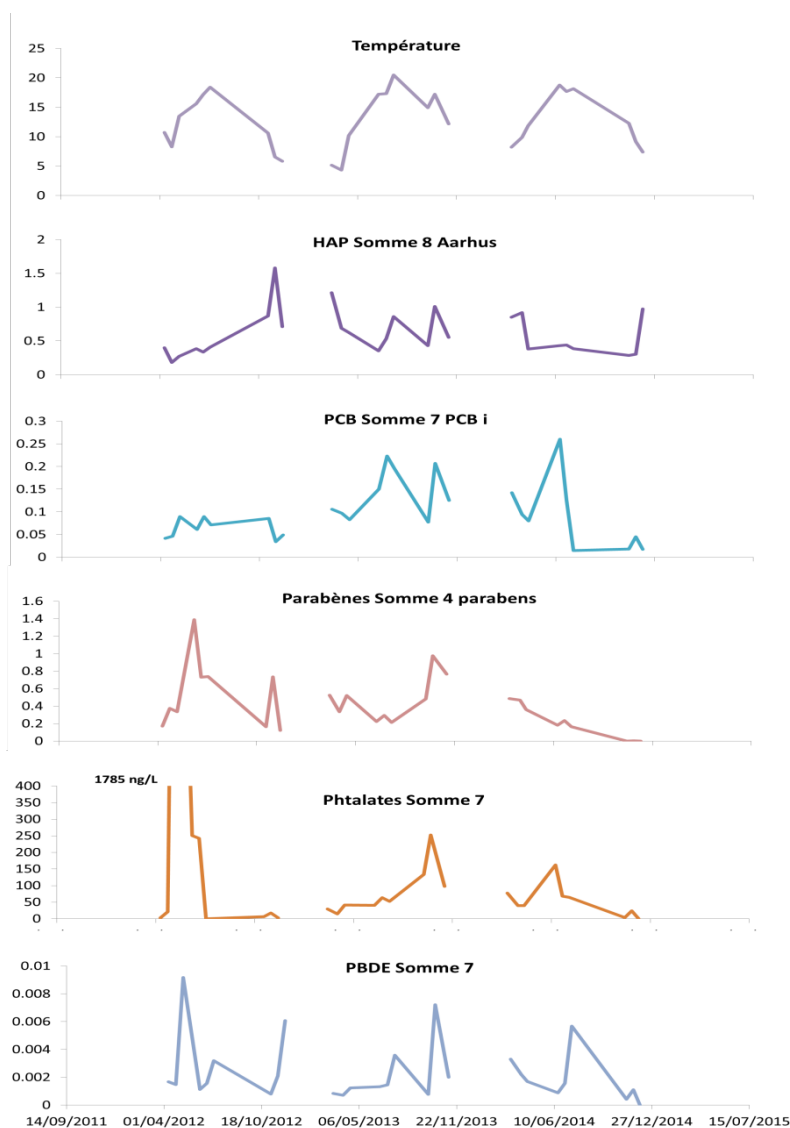
Lors de nos précédents travaux, nous avons pu mettre en évidence l'importance du transport atmosphérique dans le transfert des micropolluants organiques, en particulier pour les zones éloignées d'activités anthropiques (Moreau-Guigon et al., 2011; Tlili et al., 2012; Motelay-Massei et al., 2007). Au cours de cette phase, nous avons étudié la contamination de l'atmosphère en Ile-de-France à différentes saisons et suivant différents indicateurs: l'air ambiant, les retombées atmosphériques totales et les feuilles de platanes. L'année 2014 a permis de compléter les expérimentations poursuivies depuis 2010.

## METHODES

Des prélèvements d'air ambiant et de retombées totales ont été réalisés de 2010 à 2014 à Paris (13<sup>ème</sup>), en Seine et Marne (Boissy-le-Châtel, Doue, Lognes) et en forêt de Fontainebleau à raison de 3 campagnes annuelles. Ils résident en 3 prélèvements consécutifs de 15 jours par campagne en fonction des saisons. Les prélèvements de feuilles de platanes, servant de bio-indicateurs de la qualité de l'air, ont été effectués annuellement en novembre au moment de la chute des feuilles, afin d'obtenir une intégration de la qualité de l'air au cours du cycle de vie de ces feuilles (de l'ordre de 8 mois). Environ quatre-vingt sites ont été échantillonnés sur la région Ile-de-France et une dizaine en France et en Europe. Pour ces différents échantillons, 60 micropolluants organiques ont été analysés (HAP, alkyphénols, PCB, PBDE, phtalates, parabènes...). Les données 2014 sont encore en cours d'analyse.

## RESULTATS

Ce rapport d'activité est un aperçu des résultats acquis au cours de la phase VI du Piren.

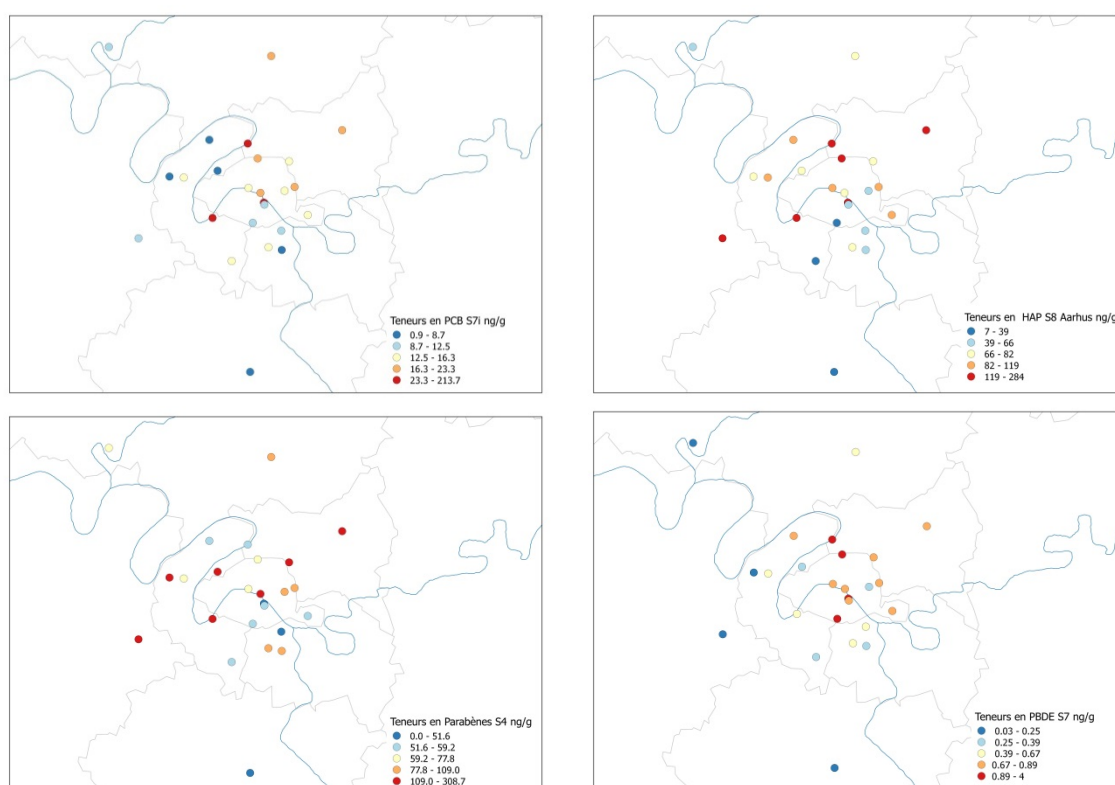


• Figure 2 : Evolution des concentrations en micropolluants organiques (ng/m<sup>3</sup>) sur Paris entre 2012 et 2014

Les concentrations en micropolluants présentent des variations saisonnières mais aussi interannuelles (Figure 2). Les concentrations en HAP sont plus élevées lors des basses températures et du fonctionnement du chauffage. À l'inverse, les autres micropolluants présentent les plus fortes concentrations en période estivales lorsque les processus de volatilisation passive sont plus importants.

Les feuilles de platanes paraissent constituer de bons bio-indicateurs pour la qualité de l'air vis-à-vis des composés étudiés. L'air au Nord-Est de Paris se révèle être plus contaminé en PCB et PBDE. Cela peut s'expliquer par une

ancienne zone historique d'activités industrielles et d'entreprises (Ogé et Simon, 2004). Pour les HAP, les teneurs dans les feuilles varient surtout en fonction de la qualité de l'air ambiant suivant l'éloignement des axes routiers. Ainsi, des feuilles échantillonnées au sein d'un parc urbain pourront présenter des teneurs inférieures à celles de feuilles prélevées dans son environnement.



• Figure 3 : Teneurs (ng/g) dans les feuilles de platanes en Ile de France

## BIBLIOGRAPHIE

Moreau-Guigon E., Labadie P., Gasperi J., Blanchard M., Cladière M., Teil M.-J., Tlili K., Desportes A., Bourges C., Alliot F., Lorgeoux C., and Chevreuil M., 2011. Diffusion de perturbateurs endocriniens par le compartiment atmosphérique et les amendements agricoles, contamination des sols et transferts hydriques : exemple des PCB, HAP, PBDE, alkylphénols, phtalates et du BPA. PIREN-Seine Rapport de synthèse 2007-2010, 34 p.

Motelay-Massei A., Ollivon D., Garban B., Tiphagne-Larcher K., Zimmerlin I., and Chevreuil M., 2007. PAHs in the bulk atmospheric deposition of the Seine river basin: Source identification and apportionment by ratios, multivariate statistical techniques and scanning electron microscopy. *Chemosphere*, v. 67, p. 312–321.

Ogé F., and Simon P., 2004. Sites pollués en France : Enquête sur un scandale sanitaire: Paris. J'ai lu, 93 p.

Tlili K., Labadie P., Alliot F., Bourges C., Desportes A., and Chevreuil M., 2012. Polybrominated Diphenyl Ether Dynamics in Ambient Air and Atmospheric Bulk/Wet Deposition in Downtown Paris (France). *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 223, p. 1543–1553.

# CONTRIBUTION DES SOLS A LA CONTAMINATION EN METAUX ET HAP DES RIVIERES : APPROCHE MULTI-TRACEURS

Quantin C.<sup>1,\*</sup>, Monvoisin G.<sup>1</sup>, Durand V.<sup>1</sup>, Ayrault S.<sup>2</sup>, Bordier L.<sup>2</sup>, Evrard O.<sup>2</sup>,  
Lorgeoux C.<sup>3</sup>, Mansuy-Huault L.<sup>4</sup>

*1 UMR 8148 IDES, Univ. Paris Sud – CNRS, bât. 504, 91405 Orsay Cedex*

*2 UMR 8212 LSCE, CEA – CNRS – UVSQ, bât. 12, 91198 Gif-sur-Yvette*

*3 UMR 7359 GeoRessources, Univ. Lorraine – CNRS, 54506 Vandoeuvre Les Nancy*

*4 UMR 7360 LIEC, Univ. Lorraine – CNRS, 54506 Vandoeuvre Les Nancy*

*\* cecile.quantin@u-psud.fr*

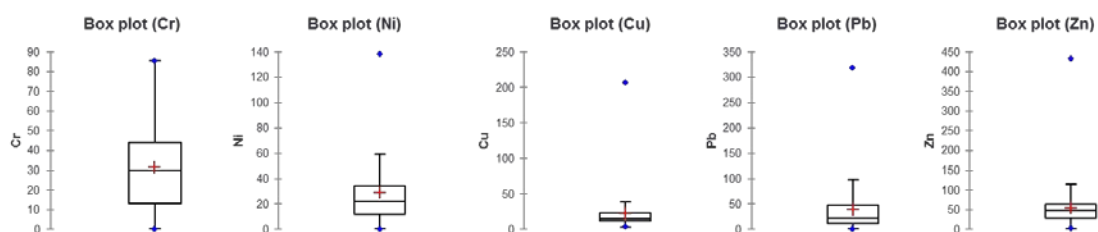
## INTRODUCTION

Notre projet a pour objectif d'étudier la dynamique des polluants métalliques et organiques dans le continuum sol-rivière dans un petit bassin versant (BV de l'Orge, sous-bassin de la Seine amont), afin d'appréhender la résilience des écosystèmes face à des pollutions anciennes. Ce BV présente un continuum d'usages contrastés des sols (forestier, agricole, urbain diffus à dense) et permettra de déterminer la dynamique saisonnière des polluants dans chacun des contextes. Les polluants choisis pour cette étude, les HAP et le plomb, ont de multiples origines anthropiques, dont le trafic routier est l'une des principales. Les signatures isotopiques du Pb (rapport  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ ) et des rapports spécifiques entre composés (HAP) permettront de distinguer la contribution relative des différentes sources.

Cette étude repose donc sur une approche couplée sol-rivière permettant d'identifier des temps de résidence et les processus principaux de transfert de contaminants, par voies particulaire et dissoute, dans des conditions hydrologiques contrastées (crue hivernale, orages en étiage). Elle tient compte explicitement des sols, de leur diversité et de l'évolution de leurs caractéristiques avec la profondeur, en couplant l'étude de traceurs de contamination mixte, de sources et d'indicateurs de temps de transfert.

## RESULTATS 2014

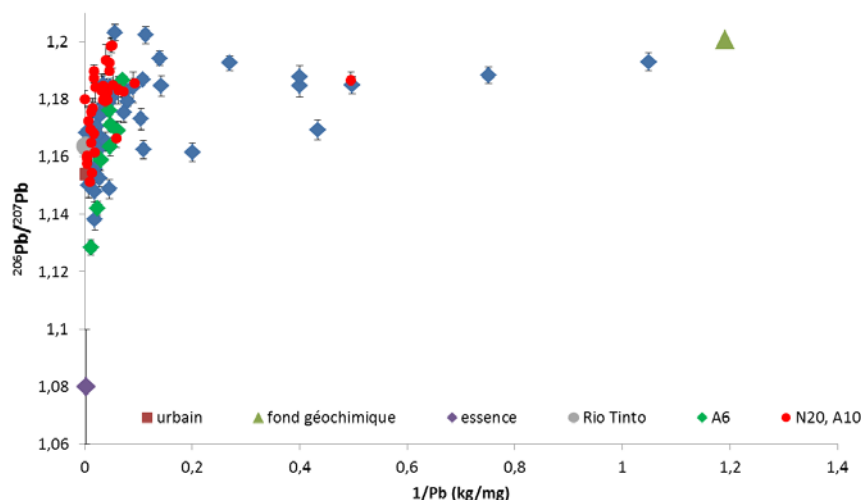
Les travaux 2014 se sont focalisés sur les sols. Les principaux métaux présents dans les sols du BV de l'Orge sont Zn, Pb, Cu pour les métaux « urbains » et Cr et Ni pour les métaux issus du fond géochimique (fig. 1).



• Fig. 1. Concentration en métaux dans les horizons de surface A (ou L en contexte cultivé), et C des sols du BV de l'Orge (n=82)

Les concentrations en métaux des horizons de surface sont systématiquement plus élevées qu'en profondeur. En outre, elles sont plus élevées dans les sols urbains et podzoliques. A proximité des routes, les concentrations en Pb diminuent fortement avec la profondeur et l'éloignement à la route. Les concentrations en 16 HAP réglementaires suivent la même tendance.

Le rapport  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  montre que les sols situés à proximité de la N20 et de l'A10 sont moins marqués par le Pb essence que les sols situés à proximité de l'A6. De plus, il indique l'existence d'une contribution « historique » qui est probablement liée à la combustion du charbon, ainsi que celle d'une contribution agricole issue des engrais (fig. 2). Tous ces points sont actuellement en cours d'investigation.



• Fig. 2. Signature isotopique vs 1/Pb des différents échantillons de sols et des sources de référence

Les rapports d'HAP classiquement utilisés ne suffisent pas pour discriminer sans ambiguïté les sources de HAP (combustion vs produits pétroliers). L'analyse de l'extrait organique total en GC/MS montre que la plupart des échantillons présente une distribution moléculaire où les composés polaires caractéristiques de la matière organique des sols dominent (acides et alcools gras, stérols, hopènes et hopanoïdes), avec peu de marqueurs de la matière organique fossile (n-alcane C10-C20, hopanes ou stéranes). Cependant, certains échantillons présentent une nette contribution d'hydrocarbures pétroliers qui a pu être

identifiée par l'abondance des n-alcanes C10-C20. Une étude plus approfondie de ces signatures permettra d'obtenir des informations plus précises sur les sources après fractionnement (aliphatique, aromatique et polaire) des extraits.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les résultats obtenus au cours de la première année semblent indiquer que la migration verticale du Pb est limitée dans les sols. Certains podzols et sols podzoliques présentent des concentrations importantes de Pb en surface et leur forte acidité ainsi que la migration de complexes organo-métalliques peuvent contribuer à la migration verticale du Pb, qu'il convient de quantifier. De plus, la distinction des sources ancienne et récente du Pb mobilisé dans ces sols est essentielle afin d'établir les risques que la contamination récente des sols représente pour (la qualité) des eaux souterraines et de surface. Des extractions de la fraction mobile de Pb ainsi que la mesure de ses isotopes sont en cours.

Deux campagnes d'échantillonnage de la colonne d'eau au niveau des 7 stations de mesure seront réalisées en 2015 afin de couvrir une année hydrologique complète et de prendre en compte l'impact des événements extrêmes comme les orages en période d'étiage ou les inondations (hivernales).

Afin d'obtenir des quantités plus importantes de MES, les prélèvements seront réalisés avec une centrifugeuse de terrain. Par ailleurs, des trappes à sédiments seront déployées pendant 2 à 4 semaines en dehors des périodes hydrologiques « extrêmes » afin d'évaluer le transfert de contaminants en période d'écoulement de base. Les concentrations en Pb (et en autres métaux), les rapports  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ , les teneurs en HAP et en radionucléides seront déterminés sur l'ensemble des échantillons obtenus. Suite aux résultats des tests de faisabilité du dosage des HAP dans l'eau, ces composés seront également mesurés dans les eaux, prélevées à l'étiage et en crue. Par ailleurs, deux pluviomètres vont être utilisés pour la quantification des retombées atmosphériques, humides et sèches. Les échantillons seront collectés sur une base bimensuelle et leurs teneurs en contaminants seront analysées. La spatialisation des teneurs en Pb des sols a été faite, celle des teneurs en HAP sera faite en 2015.

# CONTAMINATION DES SOLS FRANCILIENS PAR LES ELEMENTS METALLIQUES ET LES POLLUANTS ORGANIQUES

*Gaspéri J.<sup>1\*</sup>, Ayrault S.<sup>2</sup>, Moreau-Guigon E.<sup>3</sup>, Alliot F.<sup>3</sup>, Labadie P.<sup>4</sup>, Budzinski H.<sup>4</sup>, Blanchard M.<sup>3</sup>, Teil M.J.<sup>3</sup>, Bourges C.<sup>3</sup>, Desportes A.<sup>3</sup>, Chevreuril M.<sup>3</sup> et Moilleron R.<sup>1</sup>*

*1 LEESU, Université Paris-Est, UMR-MA102 -AgroParisTech, 61 avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil.*

*2 LSCE, CEA-CNRS-UVSQ/IPSL, Gif-sur-Yvette.*

*3 UMR Metis, Université Paris et Marie Curie, Tour 46/56 4ème ét. 4 place Jussieu 75005 Paris - EPHE, Laboratoire Hydrologie Environnement.*

*4 UMR 5805 EPOC, Equipe LPTC, Université de Bordeaux, 351 crs de la Libération, 33405 Talence.*

*\* gasperi@u-pec.fr*

## INTRODUCTION

Si aujourd'hui certaines bases de données nationales (base de données Gis Sol gérée par le BRGM, base de donnée BASOL du Ministère de l'Écologie, du Développement, etc.) existent pour la contamination des sols par des polluants tels que les éléments traces métalliques, les HAP, les polychlorobiphényles - PCB, les dioxines et les pesticides organochlorés, la contamination du sols reste méconnue pour des molécules émergentes comme les plastifiants (phtalates et bisphénol A), les tensio-actifs (alkylphénols), les retardateurs de flamme polybromés (polybromodiphényléthers- PBDE) ou les composés perfluorés (PFAS). Le PIREN-Seine a entrepris une action pionnière de « Cartographie de la contamination des sols » à large échelle spatiale englobant contaminants historiques et contaminants émergents.

La stratégie d'échantillonnage visait d'une part à étudier l'influence de l'occupation des sols en comparant la qualité des sols urbains à celles des sols agricoles. D'autre part, en prélevant des sols selon un axe sud-ouest / nord-est, l'étude avait également pour but d'évaluer si les sols localisés sous le panache des vents dominants d'Ile-de-France étaient globalement plus contaminés. Après la phase de collecte et d'analyses chimiques, la dernière partie de ce travail décrit la contamination en micropolluants des sols et tente de la relier à la contamination observée pour le compartiment atmosphérique.

Au cours de la phase 6, 32 sols répartis dans toute la région Ile-de-France ont été analysés, dont 10 en 2014. L'objectif de ce rapport d'activité 2014 est de présenter très succinctement les premiers résultats obtenus. Il n'est donc question ici que des niveaux de contamination globale des sols pour les métaux et les polluants organiques analysés. Une exploitation plus approfondie des données sera menée pour le rapport de synthèse 2015.

## MATERIELS ET METHODES

### Sites d'étude et campagnes d'échantillonnage

Afin de couvrir la diversité de natures d'occupation des sols la plus complète, 2 sols ont été prélevés en forêt, 10 sur des parcelles agricoles, 18 en zones urbaines denses et 2 dans des zones industrielles. Les sols ont été prélevés au moyen d'une tarière sur les dix premiers centimètres du sol. Dans l'objectif de s'affranchir de l'hétérogénéité spatiale des sols sur un même site, trois points situés dans un rayon de 10 mètres ont été échantillonnés et les prélèvements, homogénéisés. Le Tableau 1 récapitule les sols considérés (position et type de terrain).

• Tableau 1 : Description des sols prélevés en Île-de-France

Site	Description	Catégorie*	Coordonnées	
Beauvais	Forêt	de F	48°30'9.19"N	2°28'9.27"E
	Fontainebleau			
Rambouillet	Sous-bois	F	48°38'28.82"N	1°51'39.73"E
Rozay en Brie	Parcelle agricole	PA	48°41'4.60"N	2°56'53.20"E
Chatillon la Borde	Parcelle agricole	PA	48°32'30.54"N	2°48'44.83"E
Magny en Vexin	Parcelle agricole	PA	49° 9'25.33"N	1°48'25.14"E
Viels Maisons	Parcelle agricole	PA	48°53'56.90"N	3°22'51.80"E
La Ferté Gaucher	Parcelle agricole	PA	48°47'26.75"N	3°18'11.79"E
Egly/Arpajon	Parcelle agricole	PA	48°34'40.56"N	2°12'46.55"E
La Tombe	Parcelle agricole	PA	48°23'10.26"N	3° 5'25.77"E
Chateau-Landon	Parcelle agricole	PA	48° 8'40.46"N	2°42'42.85"E
Angerville	Parcelle agricole	PA	48°19'55.46"N	1°59'30.35"E
Orvilliers	Parcelle agricole	PA	48°51'44.07"N	1°38'29.85"E
Provins	Terrain municipal	Urb	48°33'23.62"N	3°18'9.51"E
Lésigny	Pelouse urbaine	Urb	48°44'47.69"N	2°37'3.23"E
Luzarches	Pelouse urbaine	Urb	49° 6'47.47"N	2°25'34.42"E
Pontoise	Pelouse urbaine	Urb	49° 2'49.87"N	2° 6'0.26"E
St Germain en Laye	Pelouse urbaine	Urb	48°53'36.40"N	2° 4'52.11"E
Orgeval	Friche	Urb	48°55'53.14"N	1°58'14.74"E
Dammartin en Goële	Centre-ville	Urb	49° 3'21.13"N	2°41'0.28"E
Mantes la Jolie	Ville (Jardins ouvriers)	Urb	48°59'21.80"N	1°43'50.41"E
Palaiseau	Parcelle mixte	Urb	48°43'8.24"N	2°14'5.88"E
SENIA	Zone urbaine	Urb	48°44'54.99"N	2°22'19.39"E
Choisy-le-Roi	Zone urbaine	Urb	48°46'13.85"N	2°25'40.03"E
Versailles	Zone urbaine	Urb	48°48'10.56"N	2° 7'41.73"E
Argenteuil	Zone urbaine	Urb	48°56'16.94"N	2°14'49.04"E
Villepinte	Zone urbaine	Urb	48°57'59.78"N	2°29'54.59"E
Claye-Souilly	Zone urbaine	Urb	48°56'40.50"N	2°39'54.71"E

Meaux	Zone urbaine	Urb	48°57'42.41"N	2°52'45.32"E
Noisiel	Zone urbaine	Urb	48°51'10.90"N	2°37'35.64"E
Jardin Tuileries	Zone urbaine	Urb	48°51'44.67"N	48°51'44.67"E
ZI Mitry Compans	Zone industrielle	ZI	49° 0'10.20"N	2°37'49.29"E
ZI Brice sous Forêt	Zone industrielle	ZI	48°59'27.19"N	2°21'41.02"E

\*: F: couvert forestier, PA: parcelle agricole, Urb: urbain, ZI: Zone industrielle

### Polluants analysés et méthodes analytiques

La liste des composés étudiés sur les sols et leurs abréviations usuelles sont données dans le Tableau 2. Au total, 104 molécules ont été recherchées, incluant les métaux et éléments majeurs (n=22), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP, n=15), les polychlorobiphényles (PCB, n=19), les polybromodiphényléthers (PBDE, n=8), les alkylphénols (n=7), les composés perfluorés (PFAS, n=22) et 4 substances individuelles (bisphénol A (BPA), tétrabromobisphénol A (TBBPA), hexachlorobenzène (HCB) et pentachlorobenzène (PeCB)).

Les métaux ont été analysés par ICP-MS après digestion totale. Les polluants organiques ont été dosés, selon les molécules, par chromatographie gazeuse ou liquide couplée à un spectromètre de masse simple ou en tandem. Toutes les molécules ont été quantifiées par étalonnage interne. Pour chaque famille, une ou plusieurs références bibliographiques sont disponibles pour le détail des protocoles analytiques.

• Tableau 2 : Composés étudiés sur les sols franciliens

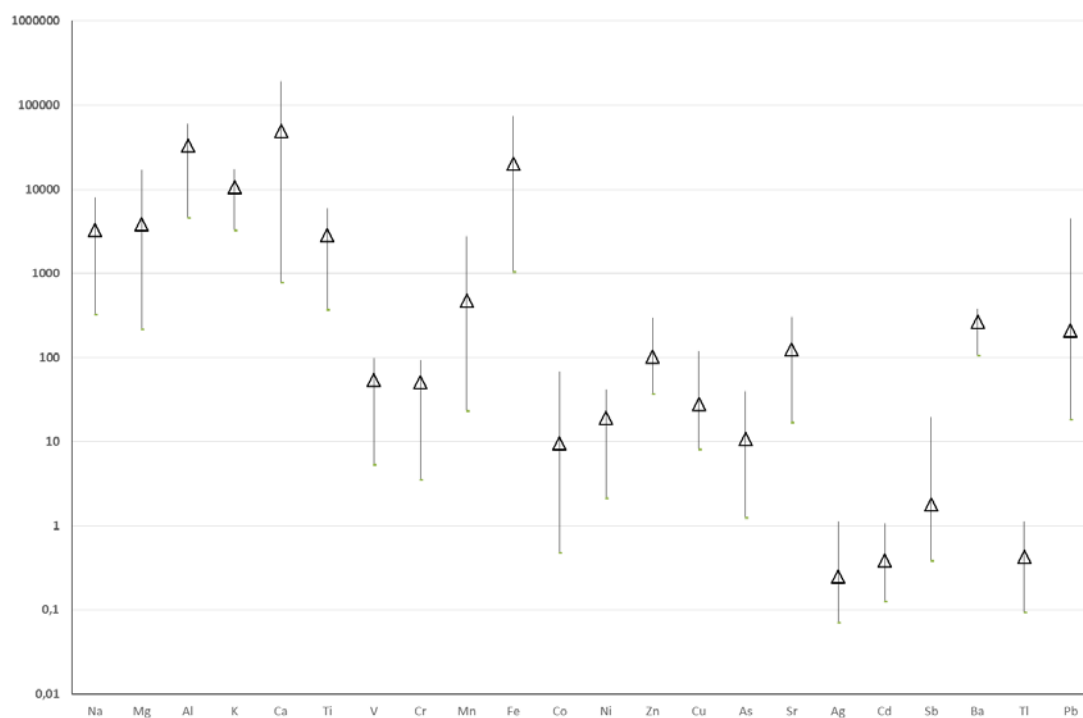
Familles	Laboratoire	Liste des composés et abréviations
Majeurs et métaux 22 éléments	LSCE	Sodium (Na), magnésium (Mg), aluminium (Al), potassium (K), calcium (Ca), titane (Ti), vanadium (V), chrome (Cr), manganèse (Mn), fer (Fe), cobalt (Co), nickel (Ni), zinc (Zn), cuivre (Cu), arsenic (As), strontium (Sr), argent (Ag), cadmium (Cd), antimoine (Sb), baryum (Ba), thallium (Tl), plomb (Pb)
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) 15 composés	EPHE	acénaphthylène (ACY), acénaphène (ACE), Fluorène (FLU), phénanthrène (PHE), anthracène (ANT), fluoranthène (FTH), pyrène (PYR), benzo(a)anthracène (BaA), chrysène (CHR), benzo(b)fluoranthène (BbF), benzo(k)fluoranthène (BkF), benzo(a)pyrène (BaP), indéno(cd)pyrène (IcdP), dibenzo(ah)anthracène (DahA), benzo(ghi)perylène (BghiP)
Polychlorobiphényles (PCB) 19 congénères	EPHE	PCB28, PCB52, PCB77, PCB81, PCB101, PCB110, PCB105, PCB118, PCB153, PCB114, PCB138, PCB123, PCB126, PCB180, PCB156, PCB157, PCB167, PCB169, PCB189
Phtalates (PAE) 7 composés	EPHE	di-méthyl phtalate (DMP), di-éthyl phtalate (DEP), di-iso-butyl phtalate (DiBP), di-n-butyl phtalate (DnBP), butyl-benzyl phtalate (BBP), di-éthyl-hexyl phtalate

		(DEHP), di-n-octyl phtalate (DnOP)
Polybromodiphényléthers (PBDE) 8 congénères	LEESU	BDE 28, BDE 47, BDE 99, BDE 100, BDE 153, BDE 154, BDE 183, BDE 209
Alkylphénols 7 composés	LEESU	nonylphénols (NP), nonylphénol monoéthoxylé (NP1EO), nonylphénol diéthoxylé (NP2EO) octylphénols (OP), octylphénol monoéthoxylé (OP1EO), octylphénol diéthoxylé (OP2EO) acide nonylphénoxy acétique (NP1EC)
Composés perfluorés (PFAS) 22 composés	EPOC	acide perfluorobutanoïque (PFBA), acide perfluoropentanoïque (PFPeA), acide perfluorohexanoïque (PFHxA), acide perfluorobutane sulfonique (PFBS), acide perfluoroheptanoïque (PFHpA), acide perfluoroheptanoïque 6:2 fluorotélomère sulfonate (6:2 FTS), acide perfluorooctanoïque (PFOA), acide perfluorohexane sulfonique (PFHxS), acide perfluoronoanoïque (PFNA), acide perfluoroheptane sulfonique (PFHpS), acide perfluorodécanoïque (PFDA), acide N-Methyl perfluorooctane sulfonamidoacétique (MeFOSAA), acide perfluorooctane sulfonique (PFOS), acide N-Ethyl perfluorooctane sulfonamidoacétique (EtFOSAA), acide perfluoroundécanoïque (PFUnA), acide perfluorododécanoïque (PFDoA), acide perfluorodécane sulfonique (PFDS), acide perfluorotridécanoïque (PFTrDA), perfluorooctanesulfonamide (FOSA), acide perfluorotétradécanoïque (PFTeDA), N-Methyl perfluorooctane sulfonamide (MeFOSA), N-Ethyl perfluorooctane sulfonamide (EtFOSA)
Autres 4 composés	LEESU EPHE	bisphénol A (BPA) tétrabromobisphénol A (TBBPA), hexachlorobenzène (HCB) et pentachlorobenzène (PeCB)

## PREMIERS RESULTATS

### Contamination globale des sols en métaux

Les niveaux de contaminations en métaux et éléments majeurs (n=22) sont illustrés Figure 1 (concentrations minimales, maximales et moyennes). Les teneurs sont exprimées en mg/kg. Les niveaux de contaminations observés dans les sols franciliens permettent de quantifier systématiquement tous les éléments traces et majeurs visés.



• Figure 1 : Contamination en métaux et éléments majeurs des 32 sols franciliens (teneurs en mg/kg)

Selon leurs niveaux de concentration, trois groupes de métaux peuvent être identifiés. Le premier groupe, constitué de l'Ag, Cd, Sb et Tl, présente des teneurs relativement faibles dans les sols variant typiquement entre 0,1 et 10 mg/kg. Le second groupe réunit 11 éléments (V, Cr, Mn, Co, Ni, Zn, Cu, As, Sr, Ba et Pb) pour lesquels des teneurs variant entre 1 et 200 mg/kg sont typiquement observées. Le dernier groupe (Na, Mg, Al, K, Ti et Fe) présente les plus fortes teneurs (300-100000 mg/kg).

Au regard des ratios d90/d10 (premier et dernier déciles des teneurs), la contamination métallique des sols varie peu parmi les sols étudiés. Pour 17 des 22 éléments analysés, les ratios d90/d10 sont inférieurs à 5. Une variabilité plus importante est observée pour le Ca (d90/d10 = 39), le Pb (d90/d10=14), l'Ag ou le Sb (d90/d10 = 10) ou dans une plus faible mesure pour le Cu (d90/d10 = 6).

### **Contamination globale des sols en polluants organiques**

Les niveaux de contamination en polluants organiques des sols analysés sont illustrés Figure 2 (concentrations minimales, maximales et moyennes). Les teneurs sont exprimées en ng/kg.

L'ensemble des composés individuels est illustré. Pour chaque famille, quelques polluants indicateurs peuvent être considérés comme le nonylphénol pour les

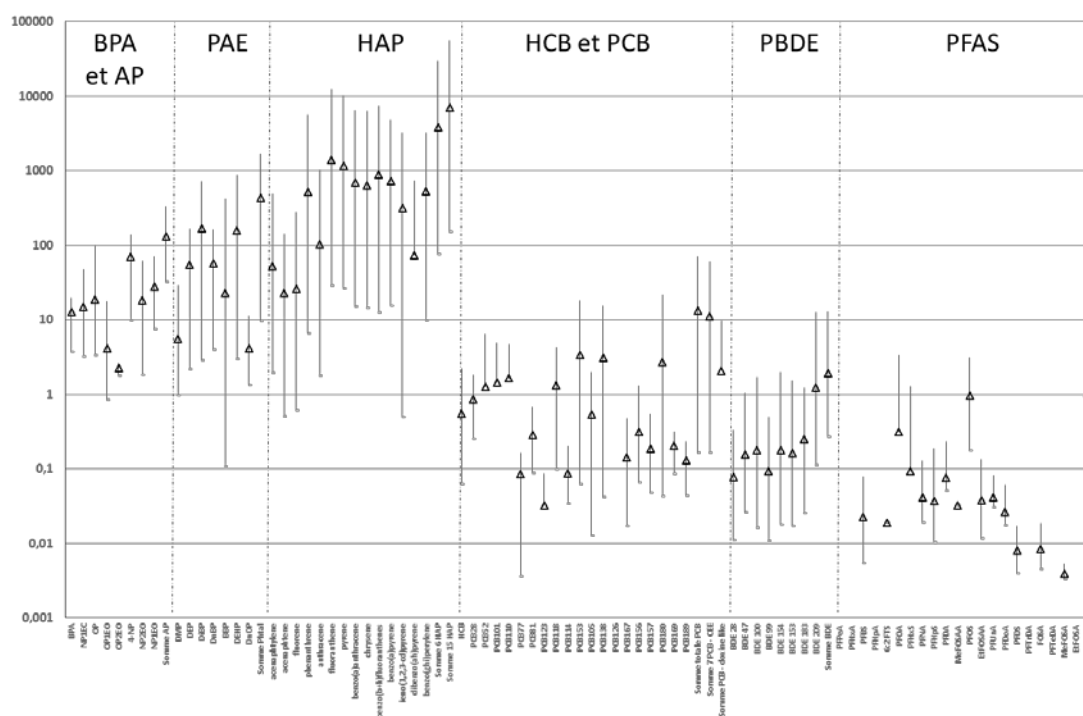
alkylphénols, le DEHP pour les phtalates, le fluoranthène pour les HAP, ou le BDE-209 pour les PBDE. Pour les HAP, la somme totale et la somme des 6 HAP de la norme française (FTH, BbF, BkF, BaP, IcdP, BghiP) sont indiquées. De même pour les PCB, la somme totale, la somme des 7 PCB de la norme française (PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180) et la somme des PCB « dioxin-like » (PCB 28, 33, 70, 77, 105, 118, 105 et 170) sont représentées.

Sur les 78 substances recherchées, seules 14 substances présentent une fréquence de quantification inférieure à 25 %. Il s'agit pour la plupart des composés perfluorés (9 composés) ou de certains PCB (5 composés), témoignant de niveaux de contamination inférieurs aux limites de quantifications. A l'inverse des molécules telles que le nonylphénol, le DEP, quelques HAP (ACY, PHE, ANT, FTH, PYR, BaA, CHR, BbF+BkF, BaP) ou les PBDE 47 et 209 sont systématiquement quantifiés dans les échantillons de sols.

Globalement, la contamination des sols est caractérisée par la prédominance des HAP ( $\Sigma$  15 HAP, 150-55000 ng/g, teneurs min-max), suivis par les phtalates ( $\Sigma$  7 PAE, 10-1700 ng/g) et les AP ( $\Sigma$  7 AP, 30-330 ng/g). A un niveau moindre de ce premier groupe, on retrouve les PCB ( $\Sigma$  21 PCB, 1-71 ng/g) suivis par les PBDE ( $\Sigma$  8 PBDE, 0,3-13 ng/g). Les PFAS sont très nettement minoritaires avec des teneurs variant entre 0,2 et 3,2 ng/g.

Alors que la contamination des sols par les AP, les phtalates et les composés perfluorés ne semble varier que faiblement ( $d_{90}/d_{10} < 10$ ), les niveaux de contamination pour les PCB et PBDE ( $d_{90}/d_{10} > 20$ ) fluctuent plus fortement. Les HAP présentent la plus forte variabilité spatiale comme en témoigne le ratio  $d_{90}/d_{10}$  supérieur à 100.

De manière générale, les niveaux médians de contamination observés s'avèrent comparables aux niveaux que l'on peut rencontrer dans la littérature à l'échelle nationale ou internationale. Il faut cependant souligner que les niveaux rapportés dans la littérature varient fortement d'un pays à un autre, d'un type de sol à un autre, ou, par exemple, dans le cas des PCB, d'une année à une autre pour un même site. De même, les fortes teneurs sur certains sites franciliens peuvent être comparables à certains maxima dans les diverses études disponibles dans la littérature.



• Figure 2 : Contamination en polluants organiques des 32 sols franciliens (teneurs en ng/g)

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'objectif de ce rapport d'activité 2014 était de présenter très succinctement les premiers résultats obtenus. Il n'est donc question que de contamination globale des sols pour les métaux et les polluants organiques analysés.

Une exploitation plus poussée des données sera réalisée à l'occasion du rapport de synthèse 2015. Des tentatives de corrélations entre composés ou entre composés et carbone organique ou black carbone seront testées. De même, les différences de contaminations entre sols urbains et ruraux seront appréciées. Enfin, les stocks de polluants contenus dans les premiers centimètres du sol seront évalués et comparés aux flux atmosphériques.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier Régis Moillon (LEESU) pour la mise à disposition des sols IDF.

# CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES OXYDES DE FER DANS LE BASSIN DE LA SEINE

*Kayvantash D.<sup>1, 2\*</sup>, Cojan I.<sup>1</sup>, Kissel C.<sup>2</sup>, Franke C.<sup>1</sup>*

*1 MINES ParisTech, PSL Research University, Centre de Géosciences, Fontainebleau.*

*2 Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement/IPSL (CEA/CNRS/UVSQ), Gif-sur-Yvette.*

*\* dariouche.kayvantash@mines-parisetch.fr*

Cette thèse, issue d'une collaboration entre MINES ParisTech et le LSCE fait suite aux précédentes études effectuées dans le cadre du PIREN-Seine sur la caractérisation des particules ferrugineuses contenues dans les matières en suspension (MES) de la Seine. Les différents outils magnétiques permettent une discrimination minéralogique, morphologique et granulométrique et de ce fait un traçage des différentes sources naturelles (érosion des roches et sols, particules biogéniques) et anthropiques (activité industrielle, ruissellement en sols urbains et agricoles...). Durant la première année de thèse les précédentes campagnes d'échantillonnage de MES ont été valorisées, et les premiers résultats d'analyses magnétiques ont montré la nécessité de : 1) se concentrer en 2014 sur la relation entre les paramètres magnétiques et l'hydrologie du système ; 2) déconvoluer le signal magnétique pour comprendre sa signification minéralogique et les éventuelles hétérogénéités granulométriques.

## **ANALYSE HYDROLOGIQUE**

Les signatures magnétiques des échantillons prélevés sur 15 sites le long de la Seine et sur 6 affluents (Aube, Yonne, Loing, Orge, Marne et Oise) ont été comparées aux chroniques de débits journaliers associées. Pour un site donné, le signal est localement stable et ne se corrèle pas avec les variations hydrologiques. La comparaison des valeurs moyennes d'aimantation rémanente à saturation ( $M_{rs}$ ) le long de la Seine met en évidence la complexité du système, qui ne se limite pas à un simple effet de mélange lors des confluences ni à une augmentation d'amont en aval : la signature magnétique mesurée à la sortie de Paris (site de Bougival) diminue fortement après la confluence de l'Oise. Ces observations révèlent la nécessité d'un complément d'échantillonnage centré sur l'agglomération parisienne.

## **ANALYSES MAGNETIQUES**

Les premiers diagrammes de First Order Reversal Curves (FORCs) utilisés dans cette étude pour caractériser l'hétérogénéité granulo-magnétique se sont montrés concluants, malgré la faible quantité de particules magnétiques. En amont (Marnay-sur-Seine) le signal semble correspondre à un mélange de particules magnétiques fines (dites « mono-domaines ») et moyennes (« pseudomonodomaines »). En aval (Bougival), il correspondrait à un mélange de particules moyennes et grossières (« multi-domaines ») dont la nature est supposée anthropique.

## **MINERALOGIE MAGNETIQUE**

Les premières analyses minéralogiques par désaimantation thermique de l'aimantation rémanente isotherme (ARI) confirment la présence de magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) (chute d'aimantation nette à  $580^\circ\text{C}$ , température de Curie de la magnétite) dans tous les échantillons de la Seine et de ses affluents. La présence de goethite ( $\text{FeOOH}$ ), hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), titano-magnétites ( $\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$ ) et de sulfures n'est cependant pas à exclure, mais leur caractérisation nécessitera des analyses complémentaires (balance de Curie, analyses microscopiques...).

Une étude comparative de la signature des différentes sources, aussi bien naturelles (roches et sédiments) qu'anthropiques (scories, rejets de STEPs) est également prévue pour comprendre l'origine des particules de différentes tailles.

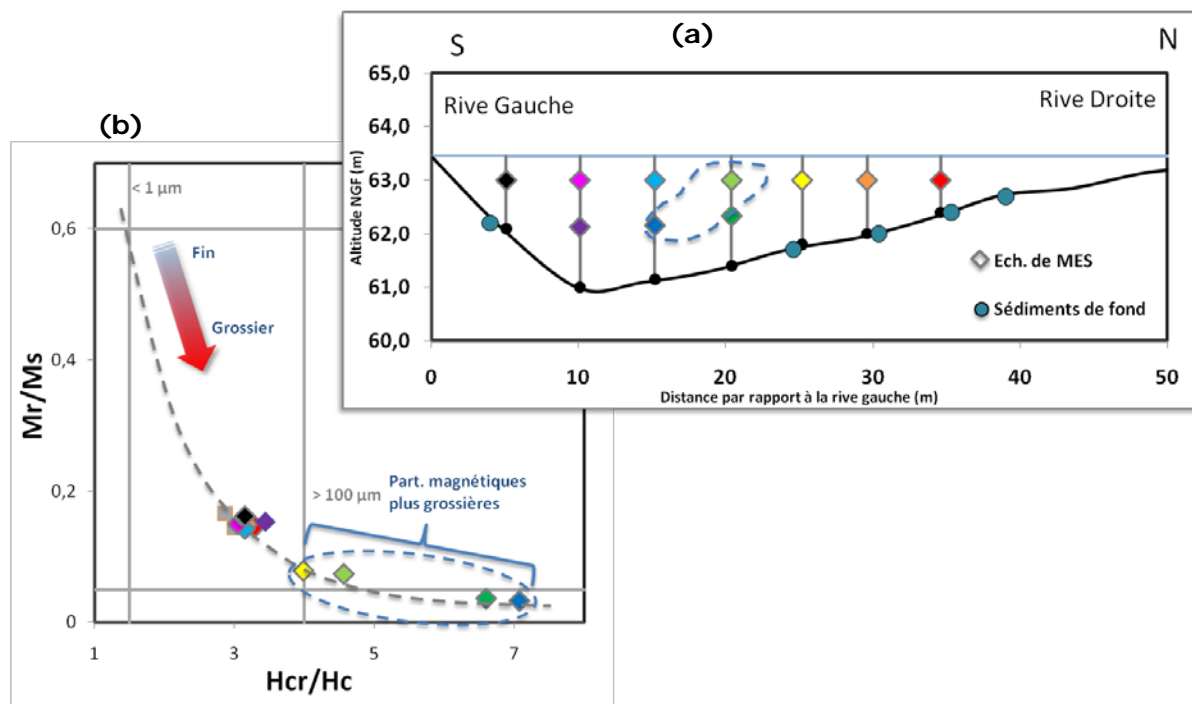
## **VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE A L'ECHELLE D'UN SITE**

L'analyse de la variation spatiale de la signature sur une section de la Seine a été effectuée près de Marnay-sur-Seine, où la navigation est pratiquement inexistante, facilitant ainsi la logistique et les interprétations de ce premier type d'étude. Si la signature est peu variable dans le temps (les paramètres d'hystérésis magnétique sont similaires entre les campagnes 2011-2012 et 2014), les échantillons prélevés dans la partie centrale du cours d'eau ont révélé des particules magnétiques de tailles moyennes significativement plus élevées que sur les berges (voir figure). Cette relation entre flux particulaire transversal et signature magnétique est une observation originale et mérite d'être confirmée par des mesures de courant.

## **PROGRAMME 2015**

Le site de Marnay fera l'objet d'une nouvelle campagne d'échantillonnage, programmée en début 2015, permettant ainsi une comparaison entre hautes et

basses eaux. Lors de cette campagne, des mesures courantométriques par ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) seront effectuées en parallèle, en partenariat avec l'Université de Tours. Le complément d'échantillonnage en agglomération parisienne sera effectué durant la même période. Un travail d'amélioration de la netteté du signal des FORCs est encore en cours et des analyses microscopiques minéralogiques sont prévues.



- (a) Emplacement des trappes à MES prélevées en avril-mai 2014 sur le profil transversal de la rivière.
- (b) Diagramme de Day: taille moyenne des magnétites contenues dans ces échantillons. Les magnétites prélevées au milieu du cours d'eau ont des tailles moyennes significativement plus élevées qu'à proximité des rives.

## **EVOLUTION DE LA DYNAMIQUE DE ZN DANS DES SOUS-BASSINS VERSANTS SPECIFIQUES**

*Gélabert A.<sup>1\*</sup>, Bonnot C.<sup>1</sup>, Cordier L.<sup>1</sup>, Tharaud M.<sup>1</sup>, Louvat P.<sup>1</sup>, Morin G.<sup>2</sup>, Benedetti M.F.<sup>1</sup>*

*1 Institut de Physique du Globe de Paris, UMR 7154, Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, Paris*

*2 Institut de Minéralogie et de Physique des Milieux Condensés (IMPMC), UMR 7590 CNRS-UPMC-IRD, Paris*

\* [gelabert@ipgp.fr](mailto:gelabert@ipgp.fr)

### **INTRODUCTION**

La compréhension de l'évolution des concentrations en éléments métalliques dissouts et particulaires dans un grand fleuve urbain tel que la Seine nécessite une connaissance fine des sources métalliques et des processus physico-chimiques associés au transport de ces métaux. Par le passé, de nombreuses études se sont focalisées sur la dynamique des métaux en Seine, notamment leur concentration dans les phases particulaire et dissoute, dans les sédiments de fond ou les dépôts de crues. En particulier, les données collectées récemment dans l'ensemble du bassin versant de la Seine lors de trois campagnes « snapshot » ont montré le rôle important du régime hydrique sur les concentrations en Zn des matières en suspension (MES), sur le facteur d'enrichissement et sur la proportion de Zn transporté par les MES. Au contraire il a pu être montré que les concentrations en Zn dans la fraction dissoute sont peu dépendantes du régime hydrique mais sont plutôt influencées par les apports de l'agglomération parisienne. Afin de développer une interprétation plus aboutie de ces données collectées sur l'ensemble du bassin de la Seine, il a semblé important de définir de manière précise le lien entre occupation du territoire, spéciation et composition isotopique du zinc. Pour ce faire, trois sous-bassins caractéristiques présentant tous la même lithologie mais des occupations contrastées (urbain, agricole et forestier), ont été échantillonnés tous les deux mois.

### **MATERIELS ET METHODES**

Trois sous-bassins versants ont été échantillonnés durant un an. Les caractéristiques de ces sous-bassins sont données dans le tableau 1.

• Tableau 1 : caractéristiques des sous-bassins versants

Type	Urbain	Agricole	Forestier
Lieu de prélèvement	La maladrerie	Montchauvet	Gambaiseuil
Rivière	Rû de gally	La vaucouleurs	R. des Ponts quantins
Superficie (km <sup>2</sup> )	116	22	17
Occupation du sol	Territoires artificialisés	37%	6%
	Territoires agricoles	44%	72%
	Forêts et milieux semi-naturels	19%	22%
	Surfaces en eau	-	-
Lithologie	Calcaire, marnes et gypse	63%	67%
	Craie	20%	-
	Sable	17%	33%
			92%
			3%
			-
			-
			100%

Les déterminations de signature isotopique  $\delta^{66}\text{Zn}$  à l'Institut de Physique du Globe de Paris et les mesures en spectroscopie d'absorption des rayons X (EXAFS) à l'ESRF (Grenoble) ont été effectuées suivant les protocoles décrits dans Bonnot et al., 2013 (rapport Piren 2013).

## RESULTATS

Les matières en suspension du sous-bassin urbain contiennent une concentration importante en éléments traces métalliques (Zn, Cu, Pb) comparé aux sous-bassins agricole et forestier, ce qui confirme une origine anthropique fortement marquée pour ces éléments. En revanche, le potassium est présent principalement dans le sous-bassin agricole, probablement du fait de son incorporation dans les engrais. Enfin on observe une plus forte concentration en fer, manganèse et dans une moindre mesure cobalt, dans les échantillons provenant du sous-bassin forestier. De même que pour les éléments présents dans la phase particulaire, la concentration de certains éléments présents dans la phase dissoute est dépendante du sous-bassin échantillonné. Les mêmes éléments métalliques (Zn, Cu, Pb ainsi que Li, Sb, Mo) sont présents dans la phase dissoute en forte concentration relative dans le sous-bassin urbain. En revanche des éléments tels qu'As, Se et V se retrouvent particulièrement enrichis dans le sous-bassin agricole. Enfin on observe une plus forte concentration en fer, manganèse et dans une moindre mesure en titane, dans les échantillons provenant du sous-bassin forestier.

L'analyse des signatures isotopiques du zinc dans les échantillons de MES de chacun de ces trois sous-bassins caractéristiques a révélé des valeurs très contrastées reportées dans le tableau 2.

- Tableau 2 : Signatures isotopiques du zinc ( $\delta^{66}\text{Zn}$  en ‰) exprimées par rapport au standard IPGP pour les échantillons de MES (incertitudes moyennes sur la mesure :  $\pm 0,04\%$ )

	29/07/13	09/10/13	16/12/13
La Maladrerie (urbain)	0,00	-0,01	0,00
Monchauvet (agricole)	0,05	0,10	0,11
Gambaiseuil (forestier)	0,13	0,15	0,15

On observe une signature présentant un enrichissement en isotopes légers pour le sous-bassin urbain ce qui est cohérent avec ce que l'on observe dans le cas d'échantillons provenant de sources anthropiques (cf. Résultats liés aux campagnes « snapshots »). Au contraire les échantillons provenant du sous-bassin forestier ont des signatures isotopiques plutôt « lourdes » ce qui est cohérent avec ce que l'on observe pour des échantillons plus naturels (Chen et al., 2009). Le sous-bassin agricole présente une signature isotopique intermédiaire.

Les résultats des mesures de spéciation de Zn par spectroscopie d'absorption des rayons X conduites sur les MES de ces trois bassins sont reportés dans le tableau 3. Ces mesures montrent un environnement chimique différent pour Zn entre le sous-bassin urbain (présence de ZnS amorphe et une forte composante de complexes avec les molécules organiques) et le sous-bassin naturel (forestier dominé par la sorption sur les oxy(hydroxi) de fer).

- Tableau 3: Résultats des combinaisons linéaires des spectres EXAFS (U=urbain, A=agricole, F=forestier).

	ZnS amorphe	Zn sorbé sur calcite	Zn: phyllosilicates	Zn associé à ferrihydrite	Zn sorbé sur goethite	Zn associé à la MO	Rf
U03	33%	20%	18%	-	-	21%	0.02
U07	10%	22%	20%	-	-	38%	0.02
A03	6%	23%	-	35%	29%	-	0.03
A07	5%	31%	23%	17%	18%	-	0.05
F03	9%	-	18%	41%	21%	-	0.03
F07	5%	16%	10%	49%	17%	-	0.04

## **CONCLUSION**

Pour les phases dissoutes, la présence de la plupart des éléments est contrôlée par les activités anthropiques. Les données de spéciation montrent une évolution des bassins naturels vers les bassins anthropiques avec notamment l'association avec la matière organique dans les zones urbaines ainsi que la présence de ZnS amorphe. Cette association avec la matière organique en zone urbaine, et beaucoup moins en zone forestière qui contient pourtant aussi de la MO, pourrait trouver son origine dans la nature de la matière organique urbaine (plus hydrophile) par rapport à la matière organique forestière (substances humiques plus hydrophobes). Cette hypothèse reste cependant à confirmer.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

Bonnot C., Gélabert A., Cordier L., Tharaud M., Louvat P., Morin G., Benedetti M. F.. Dynamique de zinc dans le bassin de la Seine et sources associées. rapport PIREN-Seine 2013

Chen J.; Gaillardet J.; Louvat P.; Huon S.. Zn isotopes in the suspended load of the Seine River, France: Isotopic variations and source determination. *Geochim. Cosmochim. Acta* 2009, 73 (14), 4060-4076.

## CHANGEMENT D'ECHELLE DES PROCESSUS BIOGEOCHIMIQUES

*Tallec G. \*, Blanchouin A., Ansart P., Delaigue O., Guérin A.*

*1 Irstea, UR HBAN équipe ORACLE, 1 rue Gilles de Gennes, 92761 Antony*

*\*gaelle.tallec@irstea.fr*

Si une observation fine des processus hydrologiques est déjà en place sur le bassin de la Seine et ses sites expérimentaux, les données biogéochimiques et écologiques disponibles n'étaient pas assez pertinentes pour permettre une bonne représentation des processus, ou encore nourrir une réflexion sur les changements d'échelle. Une première étape de ce Bloc a donc consisté à mettre en place un système idoine d'observation biogéochimique.

### MISE EN PLACE DE LA PREMIERE STATION HAUTE-FREQUENCE DU BASSIN AMONT ORGEVAL

Pour les processus biogéochimiques, une station de mesure haute fréquence et in situ de la qualité de l'eau a été mise en place en 2014 (cf. Figure 1). Le but est à terme de mettre en place deux autres stations de mesure biogéochimique, pérenne, in situ et haute fréquence, sur le continuum de bassins versants emboîtés de l'observatoire ORACLE/BVRE Orgeval (Mélarchez, Avenelles, Orgeval). Ce réseau de mesure complète celui déjà mis en place sur la Seine dans le cadre du Projet CARBOSEINE et devrait être complété par la mise en place d'une station de mesure in situ et haute fréquence sur la Marne. Nous aurons ainsi 1) un réseau de surveillance complet de la Seine et ses bassins, de l'amont à l'aval, 2) des données qui nous permettront d'améliorer la modélisation et 3) un continuum de station de mesures haute fréquence nous permettant d'appréhender finement les changements d'échelle des processus biogéochimiques. Cette station est adaptée au suivi haute fréquence des petits bassins amont de la Seine et présente des caractéristiques propres et novatrices. Son installation a été cofinancé par le projet Réseau-BHF, Région Ile-de-France (soit 230k€/3an) et le projet ANR d'équipement d'excellence CRITEX (250k€). Au cours de l'année 2014 nous avons rédigé le cahier technique de la station, suivi sa mise en œuvre, pour une mise en place en Novembre 2014. Cette dernière est en fonctionnement réelle depuis Janvier 2015.

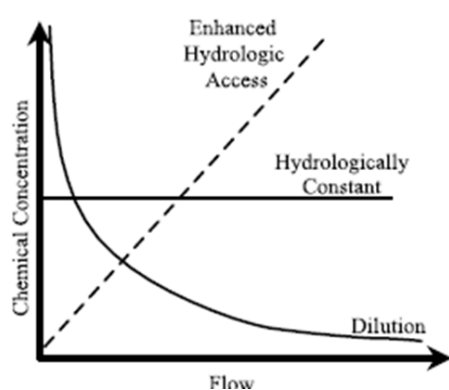
Une première analyse des données du bassin de l'Orgeval et notamment des relations concentration –débits a été menée au cours de l'année 2014, sur des données Haute-fréquence provenant d'une autre station de l'Orgeval.



• Figure 1: Mise en place de la station Haute-Fréquence sur le sous-bassin versant des Avenelles (Observatoire ORACLE/BVRE Orgeval), financée par l'ANR CRITEX

## LA MODELISATION CONCENTRATION/DEBIT (ARNAUD BLANCHOUIN)

Le modèle construit doit répondre à une question opérationnelle, mais aussi scientifique: comment amplifier mes données physico-chimiques lorsque je n'ai pas les moyens de faire des mesures sur le terrain et que je veux avoir une bonne estimation de la qualité des eaux de surfaces ? Les modèles concentration/débit, principalement conceptuel ont pour seule variable d'entrée, le débit (Barco et al., 2008; House et Warwick, 1997; Salmon et al., 2001). House et Warwick (1997) présentent une modélisation de différents éléments



(nitrate, phosphate, silice, nitrite, ammonium et calcium) des événements de crues qui permet de représenter l'effet d'hystérésis. Barco et al., (2008) et Salmon et al., (2001) tentent de modéliser l'ensemble d'une chronique en utilisant la formule proposée par Johnson et al., (1969). Le principe de la formule est basé sur trois types de réponse chimique, l'entraînement par le débit, la dilution ou l'indépendance au débit (la

concentration reste constante quel que soit le débit) (Figure 2: Réponse schématique des éléments chimiques au débit (Salmon et al., 2001)). Les tests de cette modélisation ont été réalisés sur des données de concentration en nitrate recueillis par une sonde Scan sur une période de 5 mois (Janvier 2009-Mai 2009) et pour un pas de temps de 15min. Cette sonde était placée au niveau d'un drain agricole.

## COMMODO ET SAGE

*Becu N.<sup>1\*</sup>, de Coninck A.<sup>2</sup>, Carré C.<sup>3</sup>, Deroubaix J.F.<sup>2</sup>, Tallec G.<sup>4</sup>*

*1 UMR LIENSs 7266, 2 rue Olympe de Gouges, 17000 La Rochelle*

*2 Leesu, Université Paris-Est Marne-la-Vallée*

*3 Université Paris 1, Laboratoire LADYSS*

*4 Irstea, UR HBAN*

*\*nicolas.becu@cnrs.fr*

*En 2013, un workshop a été organisé dans le cadre du PIREN-Seine et du Labex DynamiTe qui visait à débattre entre scientifiques et institutionnels des résultats produits par différents projets de modélisation d'accompagnement conduit récemment dans le cadre de Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE). Suite à ce séminaire au cours duquel de nombreuses questions sur l'outil ont été posées, nous avons décidé de créer un groupe de travail réunissant les expérimentateurs, les animateurs et les personnes d'intérêt au processus ComMod. Ce groupe, réunit le 14/10/2014 avait pour but de construire une évaluation collective et de donner les recommandations et limites pour de futures applications potentielles des processus ComMod dans le cadre de SAGE.*

### **GROUPE DE TRAVAIL ET METHODE**

L'objectif du groupe de travail mis en place était de construire une évaluation collective, impliquant scientifiques et gestionnaires, des processus ComMod ayant été conduit dans des SAGE et d'établir des recommandations pour de futures applications potentielles. Le groupe est constitué d'observateurs, de scientifiques et de gestionnaires en lien avec les procédures des SAGE, ayant été impliqués, de près ou de loin, dans les cas d'études retenus : Sciences et SAGE (PIREN-Seine), INTERSAGE, Thau SURGE et Ruis'EAU. Il s'est réuni à Paris sur une journée ce qui a permis de répondre aux objectifs tout en mettant en œuvre une procédure de co-construction illustrant la démarche.

Le groupe avait accès dès le début de la journée à une page descriptive de la modélisation d'accompagnement, une fiche par cas d'étude, un document sur les principes et les choix éthiques des démarches ComMod et à une page sur les types de résultats produits au niveau des SAGE.

La première moitié de la journée a été consacrée à la présentation des résultats et témoignages autour des différents cas, suivi de trois présentations croisant les résultats de ces quatre démarches autour de différents thèmes génériques tels

que mesurer les effets de la démarche sur les participants et les décisions en lien avec le SAGE ou encore Généraliser et diffuser la démarche.

La deuxième moitié de la journée a été consacrée à la co-construction d'une évaluation (ce que peut apporter une démarche comMod à un SAGE) et de recommandations (comment réussir la mise en œuvre d'une démarche ComMod dans un SAGE et quels sont les pièges à éviter).

## **EVALUATION COLLECTIVE DE L'OUTIL**

Un document a été produit suite à la réflexion du groupe constitué de praticiens et de chercheurs faisant l'évaluation de plusieurs projets de modélisation d'accompagnement menés dans le cadre de SAGEs entre 2009 et 2014. Il énonce des recommandations à destination de futurs porteurs de projets (animateurs de SAGE, bureau d'études,...) et des organismes associés (agences de l'eau, syndicat,...) pour le déploiement de la modélisation d'accompagnement dans les contextes de SAGE.

Le rapprochement entre la démarche ComMod et la démarche de SAGE est naturel. En effet, les caractéristiques d'un SAGE (phasage, concertation, partage de connaissances permettant l'émission d'avis,...) sont des objectifs communs à ceux des démarches ComMod. Ces dernières ont la spécificité de permettre l'expression des composantes sociales existant de fait dans toute démarche de SAGE.

Le document produit répond aux questions suivantes: 1) Dans quels cas et à quelle(s) étape(s) du SAGE utiliser ComMod? 2) Comment déployer les démarches ComMod? 3) Quelle posture adopter pour mettre en place une démarche ComMod ?

## **FAIRE DE L'ACTION PUBLIQUE UNE ACTION COLLECTIVE.**

### **EXPERTISE ET CONCERTATION POUR LA MISE EN ŒUVRE DES CONTINUITES ECOLOGIQUES SUR LES RIVIERES PERIURBAINES.**

*de Coninck A.<sup>2</sup>, Becu N.<sup>1\*</sup>, Carré C.<sup>3</sup>, Deroubaix J.F.<sup>2</sup>, Tallec G.<sup>4</sup>*

*1 UMR LIENSs 7266, 2 rue Olympe de Gouges, 17000 La Rochelle*

*2 Leesu, Université Paris-Est Marne-la-Vallée*

*3 Université Paris 1, Laboratoire LADYSS*

*4 Irstea, UR HBAN*

*\* deconina@cereve.enpc.fr*

Les politiques de préservation de la biodiversité (Grenelle 1 et 2, trames vertes et bleues) et les politiques de gestion de l'eau et des milieux aquatiques (Directive cadre européenne sur l'eau, LEMA) enjoignent les collectivités de protéger et restaurer des corridors écologiques. Cependant, dans le cas de rivières fortement modifiées, comme c'est le cas des rivières périurbaines d'Ile-de-France, cette mesure fait l'objet de controverses quant à la faisabilité hydraulique des restaurations (risques d'assecs et d'inondations) et à leur intérêt en termes de qualité de l'eau. Les différents acteurs en charge de la gestion de ces rivières, mais également les scientifiques travaillant sur ces rivières (écologues, hydrologues, géographes,...) ne parviennent pas à construire une expertise partagée pour définir les conséquences, bénéfiques ou négatives, de cette restauration écologique.

Nous avons fait l'hypothèse que les controverses autour de l'idée de restauration des cours d'eau, étaient en grande partie structurées par la mobilisation de différents types de connaissances et de représentations pour gérer ces cours d'eau. Il nous a dès lors semblé intéressant de mener, dans deux cas de figure très différents, deux démarches de concertation dans le but de favoriser une confrontation de ces expertises et représentations. Nous avons ensuite observé les effets produits par ces dispositifs sur la construction d'une expertise locale permettant une action collective en vue d'une restauration des continuités.

Dans un cas, nous avons mené une démarche de « modélisation d'accompagnement » sur la rivière du Grand Morin, pour discuter de la restauration de la continuité longitudinale, en mêlant les expertises de chercheurs, d'élus, de représentants de l'Etat et de représentants d'usagers.

Dans un second cas, nous avons mené une démarche de « jury citoyen » sur la vallée de l'Orge, visant à débattre de la restauration de la continuité latérale (trames vertes et bleues) avec des gestionnaires (syndicats, techniciens,...), des élus, des représentants d'associations et des citoyens. Ces arènes de concertation étaient des lieux privilégiés pour observer les échanges et les possibilités de co-construire des connaissances. Elles nous ont aussi permis d'étudier la mise en œuvre de la continuité écologique au niveau local en zone périurbaine, et d'étudier comment cette politique publique pouvait devenir l'objet d'une action collective entre tous les acteurs concernés.

Nous avons choisi d'explorer les débats et les échanges entre les participants d'une manière dynamique, du point de vue des acteurs qui y participent, afin de voir comment se forge une action collective. Nous réalisons une comparaison entre les positions des participants avant et après les démarches de concertation.

L'hybridation de savoirs permise par ces procédures produit des apprentissages chez les participants. Elle permet d'explicitier les valeurs et représentations qui sont derrière les connaissances de chacun. Ces démarches facilitent la construction d'une représentation commune du système. Elles permettent de débattre des incertitudes, de montrer ce qu'on ne sait pas, et donc de (re)poser des choix politiques face aux lacunes de connaissances techniques. Elles permettent d'approfondir la définition de la continuité écologique, et d'alterner des moments de politisation et dépolitisation de cet objet technique. Bien que ces procédures ne changent pas fondamentalement le cours de la décision publique, elles permettent un recadrage de la question, une forme de légitimation et d'appropriation de la continuité écologique. Elles permettent de construire une certaine confiance entre les participants, en changeant le collectif et la dynamique des débats. En ce sens on peut dire qu'elles facilitent l'action collective, en transformant un objet technique en objet socio-technique.

## **LES CONTINUITES ECOLOGIQUES DANS LA RESTAURATION DES COURS D'EAU FRANCILIENS**

*Carré C.*

*Université Paris 1, Laboratoire LADYSS*

*carre@univ-paris1.fr*

### **UN RETOUR D'EXPERIENCE D'OPERATIONS DE RESTAURATION DES COURS D'EAU EN ÎLE-DE-FRANCE**

Les cours d'eau franciliens font l'objet d'opération d'aménagement et de restauration, sans pour l'instant faire l'objet d'un retour d'expérience d'ensemble. Cette absence n'est pas spécifique à ces cours d'eau, les retours d'expérience des opérations de restauration restant peu nombreux en France. L'objet de l'étude (stage de M2 d'achim Ernest) était donc de recueillir les objectifs des maîtres d'ouvrage et l'appréciation qu'ils portaient sur ces opérations. Un second point portait sur la dimension sociale de ces opérations à côté des objectifs de restauration écologique, à travers la place faite aux enjeux sociaux et à l'appréciation des opérations cette fois-ci par les habitants.

Durant le premier semestre 2014, pour 18 opérations en Ile-de-France ont été rencontrées 19 structures ayant conduit ou accompagné une restauration d'un cours d'eau (techniciens de rivières, animateurs de SAGE, services municipaux), 5 élus ayant porté une opération et 4 personnes de l'agence de l'eau et des services de l'Etat (Police de l'eau, Inspection des sites, ONEMA) partenaires de ces opérations. A travers les entretiens il ressort que si les gestionnaires ne peuvent pas concevoir une opération de restauration qui n'améliorerait pas le cadre et la qualité de vie du territoire, pourtant l'enjeu social n'est pas prioritaire dans les objectifs qu'ils énoncent, à l'inverse du coût du projet, de l'atteinte du bon état écologique et de la maîtrise des exigences juridiques (Loi sur l'eau, DIG, DCE ...). Les gestionnaires constatent qu'ils rencontrent d'ailleurs très peu d'opposition. Quant à l'évaluation du projet une fois effectué, il se base sur les qualités écologique et biologique du cours d'eau, la qualité physico-chimique de l'eau et très rarement les usages.

Pour saisir l'appréciation qu'ont les habitants de ces opérations, nous avons effectué une enquête dans une partie de l'Orge réaménagée depuis quelques années par le SIVOA (parc du Perray). Le questionnaire comprenait des questions pour faire le lien entre les objectifs écologiques et sociaux. La trentaine d'entretiens effectués a montré que les usagers valorisent aujourd'hui une biodiversité ordinaire, une richesse d'espèces présentes (tant floristique que faunistique), acceptent de ne pas accéder à tout le linéaire du cours d'eau, appréciant une ripisylve d'autant qu'elle apporte ombrage et fraîcheur, mais ne

font pas toujours le lien entre les zones humides et un espace de débordement « naturel » du cours d'eau. Il ressort donc un besoin déjà bien identifié de communication, mais aussi la possibilité de valoriser auprès du grand public des études techniques (comme les inventaires faunistiques et floristiques).

On peut alors conclure en interrogeant la capacité des maitres d'ouvrage à faire valoir leur propre priorité dans les projets de restauration. L'application de la DCE dans le cadre des projets portés par l'ensemble des acteurs semble bien avoir permis de préciser les enjeux de restauration écologique, les priorités d'intervention dans un souci de cohérence et d'efficacité, mais en réduisant la capacité de proposition de ces gestionnaires et de leurs partenaires locaux.

Les résultats de ce travail ont fait l'objet d'une communication à l'association Arceau-IDF le 25 septembre 2014 et d'une intervention au forum de la commission territoriale IDF organisée par l'AESN le 5 février 2015.

## LE SITE ARCHISEINE

*Galibert A., Davodet J., Brault A., Bonnet C., Marty P., Mouchel J.M., Lestel L.\**

*Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, CNRS, EPHE, UMR 7619 Metis, 4 place Jussieu, 75005 PARIS, FRANCE*

*\* laurence.lestel@upmc.fr*

### ARCHITECTURE DU SITE ARCHISEINE

Il se compose de deux interfaces de visualisation:

- l'interface du CMS open source Drupal à l'adresse [archiseine.sisyphes.jussieu.fr](http://archiseine.sisyphes.jussieu.fr) qui héberge des renseignements généraux sur le fonctionnement du site, des expositions virtuelles présentant le contexte de la genèse des cartes présentées, le lien vers l'interface de visualisation des cartes géoréférencées, un thésaurus et un extrait des métadonnées des cartes permettant une première sélection des cartes à afficher;

- l'interface de visualisation des cartes géoréférencées gérée par le logiciel open source GeOrchestra de type IDS (Infrastructure de données spatiales destinée à la gestion de l'information géographique). Cette partie comprend également un catalogue des cartes, leurs métadonnées de type INSPIRE et un module de recherche par mot-clé ou par zone géographique.

Derrière ces deux interfaces de visualisation se trouvent plusieurs serveurs (serveur HTTP Apache, Apache Tomcat 6, GeoServer) et plusieurs types de base de données (MySQL pour la partie CMS, PostgreSQL/PostGIS pour les cartes en format vecteur), qui rendent le système complexe, particulièrement pour son installation. Ce choix technique s'est cependant imposé par rapport à une solution « maison », moins riche de possibilités, ou par rapport à des solutions commerciales jusqu'à présent peu adaptées à la mise à disposition d'un grand nombre de cartes au format raster. Cette solution est utilisée par d'autres projets français comme GeoBretagne. La pérenniser impliquera probablement de participer de manière active à l'amélioration de ce logiciel open source.

### DE LA CARTE A SA PRESENTATION SUR LE SITE

La particularité de ce site est de mettre à disposition un grand nombre de cartes anciennes des XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles qui ont été numérisées par les Archives Nationales dans le cadre d'un partenariat. Ce sont donc des cartes rasters qui nécessitent un traitement en plusieurs étapes avant de pouvoir être présentées sur le site.

- traitement des bords de la carte pour ne garder que celle-ci, même lorsqu'elle est déformée par le géoréférencement, pour éviter l'affichage de

bandes noires encadrant la carte sur le site de visualisation. Cette opération est effectuée grâce au logiciel GIMP.

- géoréférencement par superposition avec un fonds contemporain, en projection Lambert 93, grâce au logiciel QGis.

Le géoréférencement peut nécessiter des rotations de l'ordre de 180° et provoquer un accroissement considérable de la taille de la carte si elle est conservée en format TIFF. La très haute résolution de ces cartes conduit à des fichiers d'environ 100 Mo avant traitement et jusqu'à 800 Mo après traitement. Certaines cartes sont donc sauvegardées en format png pour garder une taille globale inférieure à 300 Mo (limite arbitraire).

- chargement de la carte grâce à un module réservé à l'administrateur du site, qui doit s'accompagner obligatoirement de la métadonnée pour que la carte puisse être publiée.

Environ un tiers des 300 cartes du premier lot fourni par les Archives Nationales ont pu être géoréférencées, les autres étant souvent des plans à échelle trop locale pour pouvoir être rattachées à un territoire. Leur mise sur le site se fait progressivement depuis le basculement du site sur le serveur public fin décembre 2014.

## **LE CONTEXTE DES CARTES**

Ces cartes sont issues en grande partie du fonds F/14/ des Archives Nationales, c'est-à-dire de dépôts de travaux des ingénieurs des Ponts et Chaussées. Quatre expositions virtuelles ont été réalisées dans le cadre d'un stage en collaboration avec le master Technologies numériques appliquées à l'histoire » de l'École des Chartes. Elles s'appuient sur la lecture de ce fonds cartographique et permettent de mieux en comprendre le contenu.

- Appréhender le relief : histoire du nivellement
- Les couleurs et symboles des cartes XVIII-XIXe siècles
- Les cartes et plans des Ponts et Chaussées témoins de l'aménagement des voies fluviales
- La concurrence rail-navigation au XIXe siècle : l'équilibre impossible.

# **ETUDE HISTORIQUE DE L'EVOLUTION DU COURS DE LA SEINE ET DU FOND DE VALLEE ENTRE NOGENT-SUR-SEINE ET BRAY-SUR-SEINE DU MOYEN AGE A L'EPOQUE MODERNE**

*Rouillard J.*

*Docteur en histoire médiévale*

*josephine.rouillard@orange.fr*

## **PROBLEMATIQUE, SOURCES DE L'ÉTUDE ET RÉSULTATS EN GRANDES LIGNES**

Le cours de la Seine en Bassée a connu de nombreuses modifications, mis depuis longtemps en évidence par la géologie, la morphologie et l'archéologie. La présence d'un fleuve capricieux n'a pas empêché une implantation humaine précoce et importante. Si la Préhistoire et la Protohistoire de la Bassée ont bénéficié de nombreuses études depuis une trentaine d'années (équipes de D. Mordant et de l'Inrap, entre autres), en revanche, notre connaissance de l'histoire des réseaux hydrographiques et de l'occupation du sol en Bassée aux époques historiques est très faible. La recherche actuelle, en cours, tente de donner un aperçu des modifications naturelles et anthropiques de la Seine et de ses affluents avant l'ère industrielle et de mettre en valeur certains usages du fond de vallée liés à l'eau. Cette première étude historique est centrée entre Nogent-sur-Seine et Bray-sur-Seine, un tronçon de la Seine navigué depuis des temps anciens, actuellement en cours de réaménagement pour la navigation et qui bénéficient de riches sources documentaires.

Au-delà d'une synthèse bibliographique (acquis des études archéologiques et géologiques), l'étude s'attache à exploiter les sources primaires textuelles et iconographiques qui éclairent la période historique allant de l'époque carolingienne au début du XVIII<sup>e</sup> siècle. Les fonds disponibles sont conservés en majeure partie aux Archives départementales de l'Aube (en particulier les fonds de la Motte-Tilly, du duché de Nemours, de l'abbaye du Paraclet), aux Archives départementales de l'Yonne (notamment les fonds du chapitre cathédral de Sens, des abbayes de la Cour-Notre-Dame et de Vauluisant), des Archives départementales de Seine-et-Marne (notamment le fond du prieuré de Saint-Sauveur-lès-Bray) et les Archives nationales (notamment Q<sup>1</sup> 53, Titres domaniaux de l'arrondissement de Nogent-sur-Seine). Les dépouillements effectués montrent d'une part l'ampleur de la tâche, d'importants fonds manuscrits disponibles mais jamais exploités pour ce sujet et d'autre part un déséquilibre documentaire important en fonction du lieu. Textes et plans abondent pour certaines localités, mais sont rares ou inexistantes pour d'autres.

Nogent-sur-Seine et la seigneurie de la Motte-Tilly, pour exemples, sont surdocumentés par rapport à d'autres localités comme Bray-sur-Seine. En outre, les plans anciens disponibles (XVI<sup>e</sup>-XVIII<sup>e</sup> siècle) apportent des informations historiques des informations historiques sur le cours de la Seine, les noues et l'occupation du fond de vallée en quantité et qualité très importantes, mais ne sont pas, a priori et dans leur immense majorité, géoréférencables.

L'analyse des sources textuelles et iconographiques montre notamment :

1. une utilisation tardive du fleuve pour la meunerie. Ce n'est qu'à partir du Moyen Âge central que s'installent dans le cours de la Seine des moulins. Ces moulins sont dès le départ importants – ils comportent plusieurs roues – pour compenser leur faible nombre. Les textes montrent le partage du fleuve au Moyen Âge et à l'Époque moderne entre moulins, pêcheries et navigation, avec une place grandissante de la navigation au fil du temps. Les moulins de la Seine en Bassée sont systématiquement pendants sous des ponts, seule solution technique adaptée au régime du fleuve, avec des pertuis pour le passage des bateaux et le payement des droits associés. Les ruisseaux de la Bassée affluents de la Seine (ru de Choyau, ruisseau de Villenauxe, Ardusson...) comportent quant à eux des moulins moins importants mais plus nombreux, assis au fil de l'eau ou sur bief ;
2. l'installation d'imposantes pêcheries fixes en V dans le cours de la Seine, à proximité des moulins des centres urbains, ainsi à Nogent-sur-Seine, Pont-sur-Seine ou Bray-sur-Seine. Ces pêcheries appelées gords sont destinées à prendre de grandes quantités de poissons migrateurs, ici des anguilles, lors de leur descente de la Seine. Ce type de pêcherie est déjà en usage pendant la période antique en Bassée, comme le montrent les découvertes archéologiques récentes. La présence de grandes pêcheries fixes compense la rareté des étangs piscicoles en Bassée. La pêche dans les noues apporte un complément alimentaire aux riverains de la Seine ;
3. un aménagement précoce de la Seine pour la navigation. Cette étude s'attache à retrouver l'histoire des ouvrages effectués avant les canaux du XIX<sup>e</sup> siècle. Les sources textuelles montrent le souci permanent de l'amélioration des conditions de navigation et de flottage, dans une région où le commerce (foin et bois en particulier) vers Paris est fondamental. Au fil des siècles, et ce depuis le début du XIV<sup>e</sup> siècle, de nombreuses tentatives de rectification et de canalisation de la Seine ont été menées sur la Seine en Bassée par le pouvoir central, avec plus ou moins de succès selon les entreprises ;
4. un aménagement du fond de vallée majoritairement tourné vers la production de foin, pour la consommation locale mais surtout pour l'exportation vers Paris. Au Moyen Âge comme à l'Époque moderne, apparaît un parcellaire laniéré de petites parcelles de prés de fauche, qui utilisent largement les noues, aux cours canalisés, pour une irrigation de

complément en saison froide. Les textes médiévaux montrent en certains cas l'évolution de zones marécageuses en zones drainées et cultivées ;

5. un cours de la Seine changeant et des noues aux cours anthropisés. Les textes, mais surtout les plans du début du XVIII<sup>e</sup> siècle, montrent les anciens méandres du fleuve, les "accrués" ou "atterrissements" qui en résultent et qui sont utilisés par les riverains comme prairies humides ou ozières.