

Recueil des résumés



WEBINAIRE organisé par :

Caty WEREY
José VAZQUEZ
Adrien WANKO
Gilles ISENMANN

(INRAE-ENGEES / GESTE)
(ENGEES / ICUBE)
(ENGEES / ICUBE)
(ENGEES / ICUBE)

9ème Journées Doctorales en Hydrologie Urbaine

26-27 mai 2021
STRASBOURG

France

Table des matières

MODELISATION DE L'HYDROLOGIE URBAINE	1
Définition d'un cadre de modélisation hydro-climatique à l'échelle de Paris et sa petite couronne, Bernard Émilie [et al.]	1
Les rivières de l'ouest lyonnais en 2050: impact de l'urbanisation et du changement climatique sur les régimes d'écoulement., Bonneau Jeremie [et al.]	4
Conséquences d'une systématisation des pratiques d'infiltration à la parcelle des pluies courantes à l'échelle de petits bassins versants - Apports de la modélisation intégrée, Pophillat William	7
Pluies en Haïti : évaluation de quatre produits satellitaires au pas de temps journalier, Bathelemy Ralph [et al.]	9
Evaporation et modélisation en milieu urbain : état des connaissances et première illustration sur un cas d'étude, Ouedraogo Ahmeda Assann	11
Des séries de pluies synthétiques pour évaluer les futures performances hydrologiques de toitures végétalisées sous scénario de changement climatique RCP8.5, Pons Vincent [et al.]	13
ASSAINISSEMENT EAUX USEES ET VALORISATION DES SOUS PRODUITS	15
Impacts sanitaires et environnementaux de mode de gestions des matières fécales humaines, Minier Paul	15
Transferts de médicaments et biocides par les épandages de boues urbaines et de lisiers : suivi de lysimètres in situ par un dispositif low-cost, Pernin Noémie [et al.]	18
Compréhension et modélisation de la dégradation de contaminants organiques émergents dans les systèmes naturels de filtration des eaux usées municipales, Guillemoto Quentin [et al.]	21

Influence du CO2 sur un consortium de microalgues-bactéries en termes de biomasse et de traitement des eaux usées, Farinacci Julie [et al.]	23
Surveillance hybride du système naturel de filtration aquifère des eaux usées traitées d'Agon-Coutainville (France), Picot-Colbeaux Géraldine [et al.]	26
MICROPOLLUANTS DANS LES EAUX PLUVIALES	29
Étude du stockage des micropolluants dans les sédiments d'un ouvrage de gestion des eaux pluviales., Lenormand Eloïse [et al.]	29
Devenir des micropolluants issus du trafic routier dans un filtre planté de roseaux, dédié à la gestion des eaux de ruissellement. Importance de l'activité microbienne., Roux Julia [et al.]	32
Dynamique du cuivre en gestion des eaux pluviales urbaines: spéciation et modélisation des transferts, Dang Du Phuc Tho [et al.]	35
La signature géochimique urbaine des sédiments de bassins d'infiltration et de rétention des eaux pluviales, Couvidat Julien [et al.]	39
DEVENIR DES MICROPOLLUANTS ORGANIQUES DANS LES SOLS DES OUVRAGES DE GESTION A LA SOURCE DES EAUX PLUVIALES : INTERACTIONS DIVERSITE MICROBIENNE ET BIODEGRADABILITE DES MICROPOLLUANTS, Oudot Andréa	41
STRATEGIES D'INFILTRATION DES EAUX PLUVIALES	43
TESTS DE STRATEGIES DE DECONNEXION DES EAUX PLUVIALES A L'ECHELLE D'UN BASSIN VERSANT POUR REDUIRE LES DEVERSEMENTS, Montoya Coronado Violeta Alexandra [et al.]	43
Evaluation des temps caractéristiques de fonctionnement hydrodynamique des bassins de rétention et d'infiltration : Intérêts croisés de la modélisation 0D/3D et d'une métrologie adaptée, Dil Manal [et al.]	45
Diagnostics des eaux souterraines dans un contexte d'infiltration des eaux pluviales routières: Etude de cas de la RD 45 à Wolfisheim, Cotinet Rémy [et al.]	47
TECHNIQUES ALTERNATIVES - AIDE A LA DECISION	49
Mesures d'évapotranspiration par eddy-covariance à basse hauteur en ville, Abiven Clarisse [et al.]	49

Station météorologique à bas coût pour le suivi de toitures végétalisées, Zhu Qingchuan [et al.]	52
Étude de la banque de graines des sédiments de mares de sédimentations destinées au traitement des eaux de pluie., Lenormand Eloïse [et al.]	54
L'analyse des coûts des techniques alternatives (TA) pour l'aide à la décision, Fusler Aliénor [et al.]	56
Guide méthodologique pour un choix pertinent des techniques alternatives pour la gestion des eaux pluviales: Etude de cas d'un bassin versant résidentiel à Strasbourg, Walaszek Milena [et al.]	60
Liste des participants	62
Liste des auteurs	63

MODELISATION DE L'HYDROLOGIE URBAINE

Définition d'un cadre de modélisation hydro-climatique à l'échelle de Paris et sa petite couronne

É. Bernard^{1,2}, C. de Munck¹, K. Chancibault², A. Mosset² & A. Lemonsu¹

¹Centre National de Recherches Météorologiques, Météo France-CNRS, Toulouse, France

²Université Gustave Eiffel - IFSTTAR, GERS-LEE, Nantes, France

Introduction

Les cycles énergétiques et hydrologiques sont étroitement liés en ville, au travers du processus d'évapotranspiration. Les solutions basées sur la nature reposent en partie sur ce processus, pour une gestion durable des eaux pluviales urbaines et améliorer le confort thermique (Armson *et al.*, 2012 ; Laforteza *et al.*, 2018).

Mieux comprendre et représenter le lien entre hydrologie et climat est donc essentiel pour l'adaptation des villes au changement climatique. Le modèle TEB (Town Energy Balance ; Masson, 2000), à base physique, a été initialement développé pour simuler les conditions microclimatiques urbaines à l'échelle de la ville et du quartier. Il considère désormais un sous-sol urbain, qui peut contenir un réseau d'assainissement (TEB-Hydro ; Stavropoulos-Laffaille *et al.*, 2018) tout en représentant explicitement la végétation urbaine herbacée (TEB-Veg, Lemonsu *et al.*, 2012) et arborée (TEB-Tree ; Redon *et al.*, 2017 ; Redon *et al.*, 2019). Couplées, ces nouvelles paramétrisations permettent d'améliorer la modélisation des processus physiques associés aux échanges d'eau et d'énergie tels que le flux de chaleur latente.

La texture du sol est un des paramètres difficiles à caractériser en milieu urbain, alors que le modèle y est très sensible (Stavropoulos-Laffaille *et al.*, 2018). Une étude de sensibilité du modèle à ces bases de données, disponibles à différentes échelles spatiales, permettrait d'identifier la résolution nécessaire pour la modélisation urbaine et la pertinence de l'utilisation de bases de données mondiales pour des études à méso-échelle. En outre, d'autres caractéristiques hydrologiques très variables selon la zone d'étude, sont difficiles à évaluer. Un processus de calage est alors nécessaire. La particularité de notre domaine d'étude est qu'il s'étend sur une zone métropolitaine nécessitant une approche multi-bassins versants, rarement appliquée en milieu urbain.

Méthodologie

Cette étude prendra comme cas d'étude l'agglomération parisienne. Avec l'utilisation du modèle TEB, il est possible d'atteindre une résolution horizontale de 250 m sur une zone de 72 km par 72 km. Un travail antérieur a permis de reconstruire le réseau d'assainissement urbain simplifié, bien que complexe, sur l'ensemble de cette zone (Chancibault *et al.*, 2019). Stavropoulos-Laffaille *et al.* (2018) ont mis en évidence les paramètres auxquels le modèle est le plus sensible et qui doivent donc être calés. Il s'agit de l'étanchéité des canalisations, du taux d'infiltration par la route, de la fraction de surfaces imperméables connectées au réseau et de la limitation du drainage profond.

- Étude de sensibilité du modèle à la texture du sol

Les paramètres qui seront calés ultérieurement sont fixés à des valeurs standard afin de distinguer les effets de la texture du sol sur la simulation hydro-climatique. Trois bases de données différentes sont sélectionnées pour cette étude de sensibilité. Il s'agit de HWSO (FAO *et al.*, 2012), LUCAS

(Ballabio *et al.*, 2016) et SoilGrids (Hengl *et al.*, 2017), étant définies à l'échelle mondiale ou européenne. Elles sont librement accessibles et donc disponibles pour des études similaires sur d'autres villes.

- Calage des paramètres du modèle

Sur la zone étudiée, des mesures de débit dans le réseau et au niveau des déversoirs d'orages ont été recueillies. Un processus de qualification a été appliqué en s'appuyant sur la pluviométrie et une analyse experte de ces données. Ensuite, un outil a permis la distinction des eaux claires parasites et des eaux de pluie à partir des mesures de débit du réseau unitaire. Cela permet d'étudier séparément les eaux pluviales et usées du réseau unitaire pour des comparaisons plus robustes entre les rejets observés et simulés. Cette zone présente de nombreux bassins et sous-bassins versants nécessitant un calage multi-bassins versants spécifique qui sera détaillé.

Conclusion

Cette étude de sensibilité met en évidence les caractéristiques concernant la base de données de texture de sols la plus adaptée à la modélisation de la dynamique hydro-climatique urbaine. Le calage multi-bassins versants permet d'affiner les paramètres hydrologiques pour la zone urbaine étudiée en développant une méthode encore peu appliquée en milieu urbain. Suite à cette étude, une évaluation hydro-climatique du modèle sera effectuée. Cela permettra l'étude des eaux urbaines de manière plus intégrée et d'évaluer les stratégies d'adaptation des villes.

Références

- Armson, D. & Stringer, Pete & Ennos, Roland. (2012). The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. *Urban Forestry & Urban Greening*. 11. 245–255. 10.1016/j.ufug.2012.05.002.
- Ballabio C., Panagos P., Montanarella L. (2016). Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database. *Geoderma*, 261, pp. 110-123.
- Chancibault K. et al. (2019) Reproduire le cycle de l'eau (petit et grand) à l'échelle de Paris et sa petite couronne, dans *Hydrologie urbaine, Rapports de synthèse de la phase VII du PIREN-Seine, Volume 3*.
- FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC. (2012). *Harmonized World Soil Database (version 1.2)*. FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
- Hengl T. et al. (2017). SoilGrids250m: global gridded soil information based on Machine Learning. *PLoS ONE* 12(2): e0169748.
- Laforteza, R., Chen, J., van den Bosch, C. K. & Randrup, T. B. (2018). Nature-based solutions for resilient landscapes and cities *Environmental Research*. 165, 431 – 441.
- Lemonsu A., Masson V., Shashua-Bar L., Erell E., Pearlmutter D. (2012). Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas. *Geoscientific Model Development*, 5, 1377–1393.
- Masson V. (2000). A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary Layer Meteorology*, 94, 357–397.
- Redon E. C., Lemonsu A., Masson V., Morille B., Musy M. (2017). Implementation of street trees within the solar radiative exchange parameterization of TEB in SURFEX v8.0. *Geoscientific Model Development*, 10 (1), 385–411.
- Redon E. C., Lemonsu A., Masson V. (2019). An urban trees parameterization for modelling microclimatic variables and thermal comfort conditions at street level with the teb model. *Geoscientific Model Development*.
- Stavropoulos-Laffaille X., Chancibault K., Brun J.M., Lemonsu A., Masson V., Boone A., Andrieu H. (2018). Improvements to the hydrological processes of the Town Energy Balance model (TEB-Veg, SURFEX v7. 3) for urban modelling and impact assessment. *Geoscientific Model Development*, 11(10), 4175–4194.

Les rivières de l'ouest lyonnais en 2050: impact de l'urbanisation et du changement climatique sur les régimes d'écoulement.

Jérémy Bonneau^{1,2,*}, Flora Branger¹, Hélène Castebrunet², Gislain Lipeme Kouyi²

¹ INRAE Lyon, 5 rue de la Doua, 69100 Villeurbanne, France

² Université de Lyon, INSA Lyon, DEEP, 11 rue de la Physique, 69100 Villeurbanne, France

* jeremie.bonneau@inrae.fr, jeremie.bonneau@insa-lyon.fr

Introduction

La population urbaine s'accroît et les villes s'agrandissent. L'occupation du sol change rapidement et les zones périphériques, en particulier, subissent la conversion de terres agricoles en habitat peu ou moyennement dense. Cette imperméabilisation des sols modifie le régime d'écoulement des cours d'eau péri-urbains, réduisant les débits d'étiage et augmentant fréquence et intensités des crues. Cette forte pression se combine à une pression liée aux changements climatiques : les changements de pluviométrie et d'évapotranspiration modifieront également les régimes d'écoulement des rivières péri-urbaines. L'objectif de cette étude est de modéliser et quantifier les changements induits par l'urbanisation et les changements climatiques sur le régime d'écoulement de deux cours d'eau péri-urbains.

Méthodologie

Les cours d'eau étudiés sont situés dans l'ouest de la métropole lyonnaise (Figure 1A). Le Mercier et le Ratier drainent des bassins versants de 9 et 20km² respectivement, le Mercier étant un affluent du Ratier. La pluviométrie annuelle est de 720 mm et l'évapotranspiration potentielle annuelle de 950 mm. L'altitude des bassins versants va de 750 m à 260 m. L'occupation du sol est mixte (Figure 1B), les bassins versants sont couverts de forêts à l'amont, et graduellement urbanisés à l'aval, avec des terres agricoles en pleine transition péri-urbaine. Les sols sont majoritairement des sables limoneux avec quelques alluvions autour des cours d'eau. Les sols sont peu profonds, et couvrent un socle rocheux d'origine métamorphique. Les débits des cours d'eau sont suivis par INRAE (ex-Irstea) et l'OTHU depuis plus d'une décennie (<http://www.graie.org/othu/>). Les surfaces imperméables sont principalement drainées par un réseau unitaire (Figure 1C).

L'hydrologie des bassins versants est modélisée avec le modèle semi distribué J2000P, développé par l'université de Lena et dans le cadre des travaux de thèse de Labbas (2015). Les bassins versants sont discrétisés en *Hydrological Responses Units* (HRU) par un outil SIG (HRU-delin), de sorte que chaque HRU soit homogène en termes d'occupation du sol, du type de sol, de la géologie (Figure 1B). A l'intérieur de chaque HRU sont modélisés les principaux processus hydrologiques (interception, ruissellement sur surfaces imperméables, recharge de nappe). Les transferts d'eau se font ainsi d'une unité HRU à une autre et peuvent transiter par le réseau et la rivière. Le modèle produit un ruissellement en plusieurs composants : ruissellement de surface (imperméable, par excès ou saturation), écoulement de subsurface peu profond, et débit de bases des nappes. Les simulations sont au pas de temps horaire.

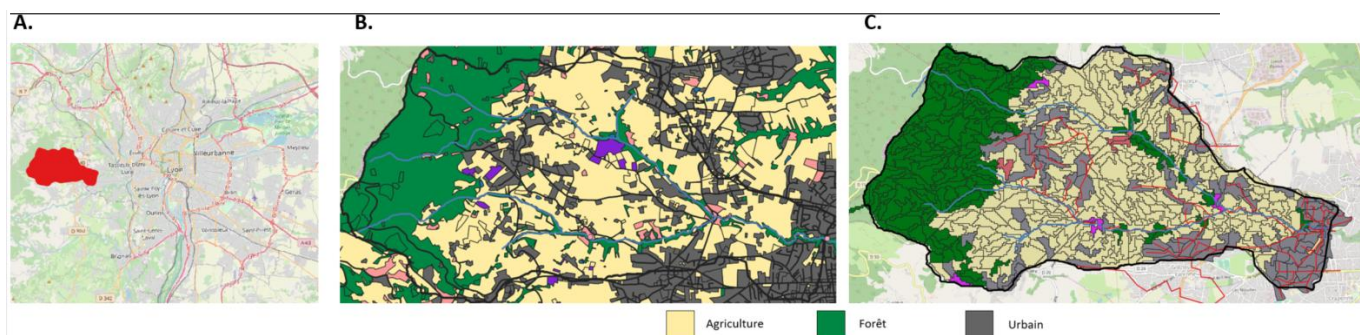


Figure 1 : A : Bassin versant dans la métropole lyonnaise (rouge) ; B : Carte des bassins versants et occupation des sols ; C : discrétisation en HRU et réseaux d'assainissement en rouge

Résultats

Le modèle est calé en utilisant des signatures hydrologiques variées (Horner, Branger et al. 2018). Plusieurs simulations *en scénarios tout-tuyau* sont effectuées avec des données météorologiques actuelles (1990–2018) ainsi que des projections climatiques du GIEC (2030-2060, scénarios RCP 2.6 et 8.5) désagrégées localement au pas de temps horaire. Plusieurs scénarios d'urbanisation future de la Métropole du Grand Lyon sont également testés. Ainsi, 16 scénarios sont comparés (4 scénarios climatiques * 4 scénarios d'urbanisation).

Les réponses du bassin versant aux différents scénarios sont quantifiées sous forme d'indicateurs hydrologiques représentant le régime d'écoulement: des indicateurs de bilan à l'échelle d'un bassin versant (parts respectives de l'évapotranspiration et du débit dans les cours d'eau et réseaux), les variations saisonnières de débit, la recharge moyenne de la nappe, ainsi que des indicateurs liés aux événements pluvieux (pourcentage de réduction de la fréquence et de la valeur des débits de pointe, pourcentage de réduction du nombre de déversements par les déversoirs d'orage). Les premiers résultats du modèle montrent que le modèle peu reproduire l'hydrologie actuelle du bassin versant.

Discussion et perspectives

Cette étude démontre quantitativement, via une modélisation spatialement semi-distribuée, l'ampleur des changements hydrologiques auxquels seront confrontées les rivières de l'ouest lyonnais dans les décennies à venir, si la gestion des eaux pluviales n'évolue pas. Hors, nous savons qu'une gestion basée sur des techniques naturelles a le potentiel de restaurer un régime d'écoulement plus naturel et écologiquement viable. La prochaine phase de ce projet est l'intégration des ouvrages de gestion à la source dans le modèle pour quantifier dans quelle mesure la mise en place d'une stratégie de déconnection à l'échelle du bassin versant est efficace pour contrer les pressions exercées par les régimes d'écoulement et les changements climatiques dans les décennies à venir.

Références

- Horner, I., F. Branger, O. Vannier and I. Braud (2018). Diagnostic-evaluation of a distributed model using hydrological signatures. AGU Fall Meeting Abstracts.
- Labbas, M. r. (2015). Modélisation hydrologique de bassins versants périurbains et influence de l'occupation du sol et de la gestion des eaux pluviales: Application au bassin de l'Yzeron (130km²), Université Grenoble Alpes.

Conséquences d'une systématisation des pratiques d'infiltration à la parcelle des pluies courantes à l'échelle de petits bassins versants - Apports de la modélisation intégrée

Doctorant : William Pophillat

Directeurs de thèse : Isabelle Braud (INRAE) – Fabrice Rodriguez (Université Gustave Eiffel)

Co-encadrant : Jérémie Sage (Cerema)

Résumé :

L'abattement à la source des pluies courantes via des techniques végétalisées et intégrées au milieu environnant est largement encouragé par les pouvoirs publics. Pourtant, si la capacité des ouvrages, pris individuellement, à maîtriser les flux d'eau et de polluants est aujourd'hui largement acceptée dans les milieux scientifiques et opérationnels (Sage, 2017), les conséquences d'une systématisation de ces pratiques à l'échelle de la ville ou du quartier restent mal maîtrisées. Différents travaux démontrent le risque d'introduire une recharge excessive des aquifères (Göbel et al., 2004) ou mettent en lumière les fortes incertitudes quant à la proportion participant effectivement à la recharge des nappes et aux débit de base, à celle empruntant des chemins d'écoulements préférentiels (Bonneau et al., 2018) ou à celle regagnant finalement le réseau d'assainissement par infiltration des eaux souterraines dans les réseaux d'assainissement (Kidmose et al., 2015). La modélisation hydrologique est un outil central dans l'évaluation des stratégies d'infiltration. Toutefois, peu de modèles hydrologiques urbains permettent de tenir compte du compartiment souterrain et l'évaluation des stratégies d'infiltration repose alors fréquemment sur une simplification forte du rôle de ce compartiment et des éléments le composant.

Le présent travail de thèse porte sur l'évaluation des conséquences d'un cumul d'ouvrages d'infiltration sur le fonctionnement hydrologique des bassins en ciblant plus particulièrement le compartiment souterrain. Il vise à préciser le rôle des choix techniques associés à ces stratégies relativement au contexte local. Il s'agit par ailleurs de questionner les apports de la modélisation intégrée du cycle de l'eau pour de telles évaluations. Le modèle URBS (Rodriguez et al., 2008) est utilisé pour répondre à ces objectifs. Il repose sur une approche de modélisation adaptée aux éléments structurant le fonctionnement hydrologique de surface des milieux urbains et intègre une représentation simplifiée du compartiment souterrain. La première partie de la thèse s'est concentrée sur la consolidation de ce compartiment. Un nouveau module de calcul des flux verticaux en zone non saturée a été ajouté. Il repose sur le couplage d'un modèle à réservoirs et d'un modèle de type Green-Ampt. Il permet de modéliser des sols hétérogènes verticalement et tient compte de la transpiration végétale et des remontées capillaires depuis la nappe. Le calcul des écoulements latéraux de nappe a été généralisé à des maillages irréguliers pour une meilleure adaptation aux formes urbaines. Des modifications ont également été apportées pour permettre de modéliser des sols hétérogènes ainsi que les interactions entre la nappe et différents ouvrages souterrains : réseaux d'assainissement, constructions souterraines imperméables ou drainantes et pompes.

Afin de mettre en évidence l'incidence de la prise en compte de ces éléments dans les résultats de modélisations, une application du modèle à un bassin urbain théorique a été réalisée. Ce bassin a une extension de 500 m x 500 m, une profondeur de 10 m et une pente de 0.5 %. La nappe est initialement à 2 m de profondeur. L'occupation des sols comprend des zones urbaines denses, commerciales, pavillonnaires et naturelles. Les eaux pluviales sont gérées par des ouvrages superficiels de type noue. Les réseaux d'assainissement sont situés sous les voiries à une profondeur de 2 m et trois bâtiments ont des fondations baignant dans la nappe (3 m de profondeur), associée pour l'un d'entre eux à un système de drainage. Trois scénarios alternatifs sont considérés : sans dispositif d'infiltration

(S1), sans ouvrages souterrains (S2) et sans aucune interaction avec la nappe (S3). Les simulations sont réalisées sur une année complète en considérant une chronique métrologique réelle (année 2013 – Trappes).

Scénario	Pluie	Infiltration (Noue)	Ruissellement	Evaporation (surface)	Transpiration végétale	Exhaure	Infiltration réseaux
Ref.	649	464 (283)	65	119	178	63	49
S1	649	181 (0)	345	122	161	34	0
S2	649	444 (263)	84	119	186	0	0
S3	649	519 (338)	11	114	120	0	0

Tableau 1: Variables hydrologiques globales (en mm) pour l'ensemble de la simulation.

Le scénario S1 montre par exemple que si la mise en place des ouvrages d'infiltration conduit à réduire d'un facteur 5 le ruissellement, l'accroissement corrélé du niveau de la nappe implique une multiplication par 3 des volumes drainés volontairement (exhaure) et involontairement (réseaux d'assainissement), ce qui représente 30 % des volumes infiltrés dans les noues. Ne pas modéliser les ouvrages souterrains ne permettrait pas d'estimer cet impact. De plus, le scénario S2 montre qu'une telle simplification conduit à une sous-estimation des flux infiltrés et une surestimation du ruissellement. En effet, ces ouvrages contribuent à diminuer le niveau global de la nappe, ce qui entraîne une diminution de la saturation en surface et tend à favoriser l'infiltration. Enfin, ne pas considérer du tout l'influence de la nappe (S3) conduit à une surestimation importante des volumes infiltrés. En effet, la présence de la nappe et son élévation en réponse à l'infiltration contribuent à élever le niveau de saturation en surface et à réduire les possibilités d'infiltration. Enfin, l'illustration 1 met en évidence l'influence considérable de ces hypothèses sur les niveaux de nappe en fin de simulation. Cet exemple illustre ainsi la forte influence que peut avoir la conceptualisation du compartiment souterrain dans une modélisation du cycle de l'eau en milieu urbain.

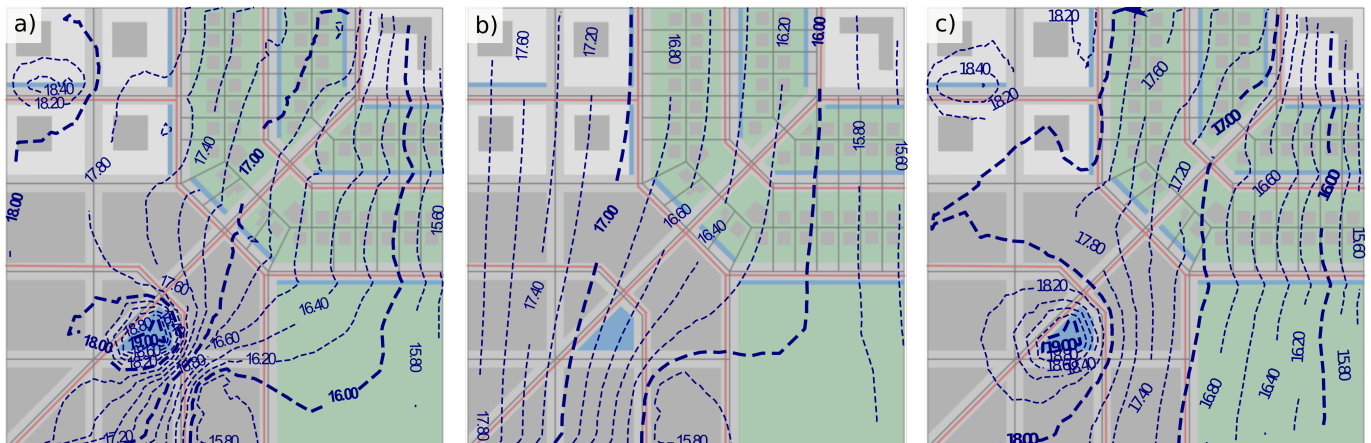


Illustration 1: Niveaux de nappe en fin de simulation pour le scénario de référence (a), le scénario sans noue (b) et le scénario sans ouvrage souterrain (c)

- Bonneau, J., Burns, M. J., Fletcher, T. D., Witt, R., Drysdale, R. N., & Costelloe, J. F. (2018). The impact of urbanization on subsurface flow paths – A paired-catchment isotopic study. *Journal of Hydrology*, 561, 413–426.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.022>
- Göbel, P., Stubbe, H., Weinert, M., Zimmermann, J., Fach, S., Dierkes, C., Kories, H., Messer, J., Mertsch, V., Geiger, W. F., & Coldewey, W. G. (2004). Near-natural stormwater management and its effects on the water budget and groundwater surface in urban areas taking account of the hydrogeological conditions. *Journal of Hydrology*, 299(3–4), 267–283.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.013>
- Kidmose, J., Trolborg, L., Refsgaard, J. C., & Bischoff, N. (2015). Coupling of a distributed hydrological model with an urban storm water model for impact analysis of forced infiltration. *Journal of Hydrology*, 525, 506–520.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.007>
- Rodriguez, F., Andrieu, H., & Morena, F. (2008). A distributed hydrological model for urbanized areas – Model development and application to case studies. *Journal of Hydrology*, 351(3–4), 268–287.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.007>
- Sage, J. (2017). Concevoir et optimiser la gestion hydrologique du ruissellement pour une maîtrise à la source de la contamination des eaux pluviales urbaines. 394.

Pluies en Haïti : évaluation de quatre produits satellitaires au pas de temps journalier

BATHELEMY Ralph Kliftong^{a, b}, BRIGODE Pierre^b, TRIC Emmanuel^b, BOISSON Dominique^a

^a URGeo, Faculté des Sciences, Université d'Etat d'Haïti, Port-au-Prince, Haïti

^b Université Côte d'Azur, CNRS, OCA, IRD, Géoazur, Nice, France

Les inondations des dernières années ont mis en évidence la grande vulnérabilité des territoires haïtiens aux aléas hydrométéorologiques. Ainsi, l'ouragan Matthew, qui a traversé Haïti en octobre 2016, a entraîné la mort de plusieurs centaines de personnes (entre 500 et 1000) et a impacté 10% de la population du pays, selon l'Unicef. De plus, la grande majorité des zones urbaines à enjeux est dépourvue de référentiel hydrométéorologique permettant d'anticiper les dégâts que peuvent engendrer ces aléas. L'absence de données pluviométriques de qualité complexifie fortement la définition de valeurs de pluies de référence, valeurs qui seraient utiles, par exemple, pour la définition de zones inondables. Dans ce contexte, l'utilisation de données de pluies estimées par satellite est particulièrement intéressante. Ainsi, l'objectif de ce travail est de (i) comparer différents produits satellitaires de pluies aux données issues des pluviomètres disponibles en Haïti, puis de (ii) constituer une base de données de référence en combinant les différentes sources d'information disponibles.

Quatre produits satellitaires (MSWEP, SM2RAIN-ASCAT, TRMM et CHIRPS) ont été comparé à 23 séries temporelles de précipitations pluviométriques journalières de 2013 à 2018, du Centre National de l'Information Géo-Spatial (CNIGS), via plusieurs indicateurs statistiques tels que le biais, le coefficient de corrélation, l'erreur quadratique moyenne, la probabilité de détection des pluies et le taux de fausse alarme. Ces produits satellitaires estiment des quantités de précipitation de manière indirecte, en utilisant des capteurs infrarouges et/ou micro-ondes (Huffman et al. 2007), et/ou en utilisant des données d'humidités du sol (Brocca et al. 2019), et parfois en les couplant aux modèles de ré-analyse et aux données pluviométriques observées au sol (Beck et al. 2018 ; Katsanos et al. 2016).

Les résultats obtenus montrent que les estimations des quatre produits satellitaires utilisés sous-estiment les données pluviométriques de référence (des pluviomètres). La figure 1 présente, pour chaque produit satellitaire, la distribution des rapports entre les pluies satellitaires et les pluies de référence, pour cinq classes de pluies (pluies faibles à pluies fortes). Cette figure montre, qu'en moyenne, les estimations satellitaires ont tendance à sous-estimer les faibles pluies, et que cette sous-estimation décroît à mesure que les valeurs de pluies augmentent. Le produit MSWEP s'est révélé être le plus performant en fonction des tests statistiques effectués, et a donc été considéré comme pilier de constitution d'une base de données de référence. MSWEP a été corrigé selon la méthodologie développée par Brochart et Andréassian (2014) en Guyane : un facteur multiplicatif est considéré pour chaque classe de pluies et est égal au rapport moyen des pluies de références sur les pluies satellitaires (cf. figure 1). Cette correction n'affectant pas les pluies nulles, une correction additive a été considérée pour ces dernières.

Ce travail a permis de constituer une première base de données de pluies journalières en Haïti en combinant, sur la période 1979-2016, le produit satellitaire MSWEP et les données de 23 pluviomètres. Il est important de noter que la pertinence de cette base de données dépend fortement de la qualité et du nombre de séries issues de pluviomètres considérées. Cela dit, ce travail peut être considéré comme un premier pas permettant de mettre en exergue l'importance des estimations satellitaires pour l'analyse hydro-météorologique dans un pays comme Haïti qui est dépourvu de référence hydro-météorologique.

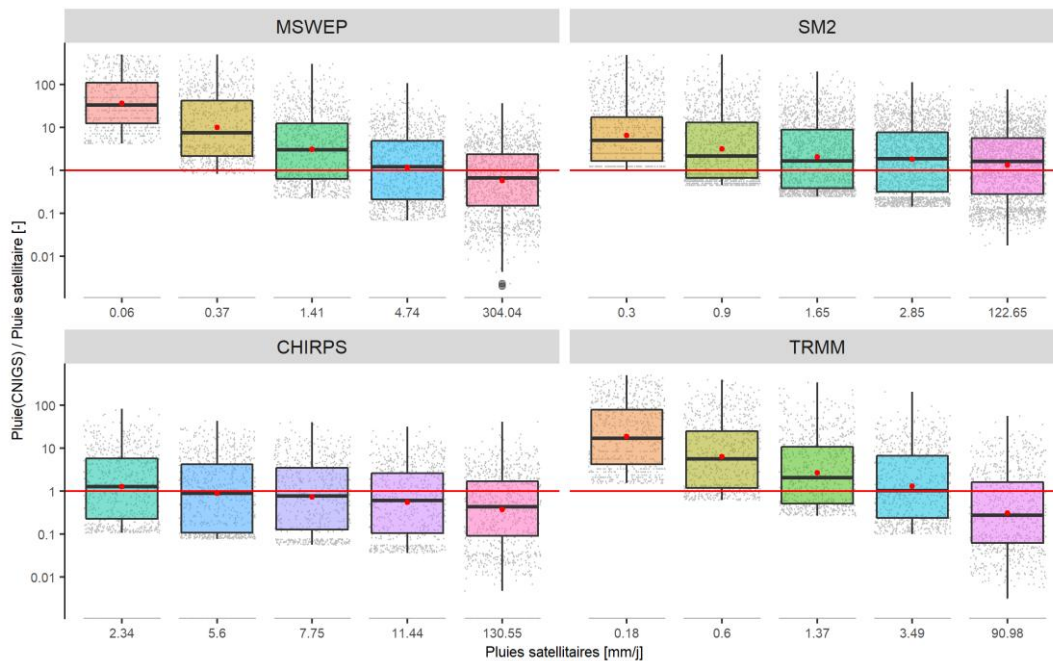


Figure 1: rapport des pluies de références (CNIGS) sur les estimations satellitaires en fonction des amplitudes des estimations satellitaires. Les précipitations situées au-dessus de la ligne rouge sont sous-estimées par les estimations satellitaires, tandis que celles qui sont en dessous sont surestimées.

Références

- Beck, Hylke E., Eric F. Wood, Ming Pan, Colby K. Fisher, Diego G. Miralles, Albert I.J.M. van Dijk, Tim R. McVicar, et Robert F. Adler. 2018. « MSWEP V2 global 3-hourly 0.1° precipitation: methodology and quantitative assessment ». *Bulletin of the American Meteorological Society*, septembre. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0138.1>.
- Brocca, Luca, Paolo Filippucci, Sebastian Hahn, Luca Ciabatta, Christian Massari, Stefania Camici, Lothar Schüller, Bojan Bojkov, et Wolfgang Wagner. 2019. « SM2RAIN–ASCAT (2007–2018): Global Daily Satellite Rainfall Data from ASCAT Soil Moisture Observations ». *Earth System Science Data* 11 (4): 1583- 1601. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1583-2019>.
- Brochart, D., et V. Andréassian. 2014. « Correction des estimations des pluies par satellite pour les bassins versants de Guyane française ». *Bulletin des Séances de l'Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer* 60 (2): 361–370.
- Huffman, George J., David T. Bolvin, Eric J. Nelkin, David B. Wolff, Robert F. Adler, Guojun Gu, Yang Hong, Kenneth P. Bowman, et Erich F. Stocker. 2007. « The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales ». *Journal of Hydrometeorology* 8 (1): 38- 55. <https://doi.org/10.1175/JHM560.1>.
- Katsanos, Dimitrios, Adrianos Retalis, Filippos Tymvios, et Silas Michaelides. 2016. « Analysis of Precipitation Extremes Based on Satellite (CHIRPS) and in Situ Dataset over Cyprus ». *Natural Hazards* 83 (1): 53- 63. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2335-8>.

Evaporation et modélisation en milieu urbain : état des connaissances et première illustration sur un cas d'étude

Doctorant en 1^{ère} Année: Ahmeda Assann OUEDRAOGO
Encadrants: Marie-Christine GROMMAIRE (LEESU) et Emmanuel BERTHIER (CEREMA)

Résumé

En 2050, plus de 60% de la population mondiale vivra en zone urbaine, un taux déjà atteint en Europe (Dumont, 2018). De grands enjeux dont celui de la gestion durable des eaux urbaine concernent les villes de demain souhaitées durables, agréables à vivre, vertes et résilientes. En effet, l'urbanisation croissantes est à l'origine de l'imperméabilisation des sols qui impactent significativement le cycle de l'eau en favorisant le ruissellement au détriment de l'infiltration et de l'évapotranspiration (ET). Ces modifications du milieu naturel vont entraîner des inondations, une détérioration de la qualité du milieu récepteurs et contribuer au réchauffement du milieu urbain. Des impacts qui risquent de s'exacerber les années à venir du fait des changements climatiques. Dans cette situation où les outils conventionnels de gestion des eaux urbaines (réservoirs, réseaux d'eaux pluviales, etc.) sont insuffisants, des méthodes nouvelles de gestion de l'eau urbaine comme la gestion à la source sont de plus en plus promues à travers des ouvrages végétalisés (noues d'infiltration, toitures, jardins de pluies, etc.). Ces nouveaux outils facilitent l'infiltration et l'évapotranspiration (ET), contribuant ainsi à réduire les impacts de l'artificialisation du milieu. Les grandes villes essaient d'intégrer ces méthodes dans la planification et l'aménagement urbain, et des actions sont mises en œuvre pour favoriser l'ET. Cependant, l'ingénierie actuelle est limitée quant à la prédiction, la conception et le dimensionnement des infrastructures permettant de favoriser et d'optimiser le flux d'ET.

Historiquement en milieu urbain, le flux d'ET a reçu peu d'attention de la part des chercheurs en hydrologie et en climatologie constituant de ce fait un des termes les moins connus du bilan en eau et du bilan en énergie. La plupart des modèles d'ET utilisés en milieu urbain provient du milieu agricole où ils ont été développés et ils ont recours au concept d'évapotranspiration potentielle (ETP) défini par Thornthwaite (1948) comme l'évaporation de l'eau à la surface du sol et la transpiration au-dessus d'un couvert végétal en pleine croissance et bien alimenté en eau. L'ET dans le milieu est évaluée à partir d'une ETP d'une surface de référence (typiquement un gazon ou de l'herbe de 5cm de hauteur), d'un coefficient cultural et de la disponibilité en eau dans le milieu (Allen et al., 1998). Des modèles d'ET potentielle ou d'ET de couvert de référence existent dans la littérature : ils sont basés principalement sur des concepts physiques de transferts de masse, de bilan d'énergie, de bilan en eau, de méthodes combinatoire (Monteith, 1965; Penman, 1948) ou des études statistiques.

D'autres modèles d'ET plus détaillés prennent en compte l'apport des différents comportements participant à l'évaporation et dans certains cas, la végétation est considérée comme un écran de partition de l'énergie rayonnante incidente (Shuttleworth and Wallace, 1985). L'évaporation totale est ainsi évaluée comme la somme de l'évaporation du sol et de la végétation. Si dans ce dernier cas, la végétation et le sol interagissent, d'autres modèles (Brenner and Incoll, 1997) envisagent des cas où l'évaporation du sol et la végétation sont évaluées distinctement. Une généralisation pour des couverts végétaux hétérogènes est aussi disponible dans la littérature (Lhomme et al., 2013; Wallace, 1997).

Ces modèles ou schémas d'ET sont parfois intégrés dans des modèles hydrologiques à l'échelle parcellaire (des toitures végétalisées et jardin de pluies par exemple) et ne tiennent pas toujours compte des particularités de l'environnement urbain. Ces dernières années, les auteurs, en confrontant les mesures d'ET en milieu urbain, ont constaté une difficulté de la plupart des schémas d'ET à reproduire correctement les données mesurées (notamment à pas de temps horaire) et plus particulièrement les périodes humides (plutôt une sous-estimation) et sèches (plutôt une surestimation). Des approches récentes consistent à prendre en compte l'espèce végétale, la densité de la végétation, et du microclimat propre aux surfaces. Les données météorologiques en entrée des modèles d'ET sont aussi parfois très variables spatialement et temporellement à l'intérieur des zones urbaines (effets aérauliques, effets d'ombrages, etc.). Les valeurs d'ET potentielles s'avèrent dans certains cas, sensibles à ces variabilités. Des reformulations à partir d'observation sont parfois entreprises par certains auteurs afin d'améliorer la simulation de l'ET, même si ces cas d'études restent peu nombreux en milieu urbain.

Dans l'état actuel du travail, il s'agira d'une part de présenter l'état de l'art de la modélisation de l'évapotranspiration en milieu urbain et d'autre part de fournir des illustrations et des réflexions à partir d'un cas d'étude de huit lysimètres de jardin de pluie suivi par la ville de Paris : chacun de ces lysimètres a une surface de 1m², une profondeur de 1m avec huit configurations différentes (modification de la végétation, d'une réserve d'eau à la base, et répliques). Un dispositif qui a permis le suivi à des pas de temps fins (2 minutes) du bilan en eau sur une période de 3 ans (novembre 2016 à novembre 2019). Les mesures en continu comprennent les données météorologiques et pour chaque jardin, des mesures du poids total, de la hauteur d'eau stockée dans l'éventuelle réserve, et des débits infiltrés à la base.

Mots clés : Evapotranspiration, hydrologie urbaine, modèle, jardin de pluie

Références

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao Rome 300, D05109.
- Brenner, A.J., Incoll, L.D., 1997. The effect of clumping and stomatal response on evaporation from sparsely vegetated shrublands. *Agric. For. Meteorol.* 84, 187–205. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(96\)02368-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(96)02368-4)
- Dumont, G.-F., 2018. Géographie des populations: concepts, dynamiques, perspectives. Armand Colin.
- Lhomme, J.P., Montes, C., Jacob, F., Prévot, L., 2013. Evaporation from multi-component canopies: Generalized formulations. *J. Hydrol.* 486, 315–320. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.038>
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment, in: *Symposia of the Society for Experimental Biology*. Cambridge University Press (CUP) Cambridge, pp. 205–234.
- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Sci.* 193, 120–145.
- Shuttleworth, W.J., Wallace, J.S., 1985. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory: EVAPORATION FROM SPARSE CROPS. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 111, 839–855. <https://doi.org/10.1002/qj.49711146910>
- Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38, 55–94.
- Wallace, J.S., 1997. Evaporation and radiation interception by neighbouring plants. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 123, 1885–1905. <https://doi.org/10.1002/qj.49712354306>

Des séries de pluies synthétiques pour évaluer les futures performances hydrologiques de toitures végétalisées sous scénario de changement climatique RCP8.5

V. Pons^{*,**^}, J.-L. Bertrand-Krajewski^{**}

* Department of Civil and Environmental Engineering, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), N-7491 Trondheim, Norway

** Univ Lyon, INSA Lyon, DEEP, EA7429, 11 rue de la Physique, F-69621, Villeurbanne cedex, France

[^]Corresponding author vincent.pons@ntnu.no

Résumé

Évaluer les performances hydrologiques des techniques de gestion à la source des eaux pluviales, notamment des toitures végétalisées, en tenant compte des scénarios de changement climatique nécessite des séries de pluies synthétiques adaptées, sur plusieurs années et à haute résolution. Trois modèles de cascade multiplicative aléatoire (MRC) ont été développés et évalués pour produire de telles séries locales à partir du scénario de changement climatique RCP8.5 et de modèles climatiques régionaux. Les modèles ont été appliqués à des toitures végétalisées situées dans différentes villes en Norvège. Le premier modèle (MC) testé est un modèle MRC de base. Le second modèle (MCT) ajoute une dépendance en température et le troisième (MCS) améliore la reproduction des structures temporelles des intensités de pluie. Les améliorations des modèles MCT et MCS entraînent une modification des prédictions des performances hydrologiques par rapport à celles du modèle MC qui reste négligeable devant la variabilité inhérente des modèles climatiques actuels.

Mots clés

Adaptation au changement climatique, descente d'échelle, gestion des eaux pluviales, modélisation numérique, techniques alternatives.

Introduction

Simuler le comportement hydrologique futur de techniques de gestion à la source des eaux pluviales telles que les toitures végétalisées en tenant compte du changement climatique nécessite des séries chronologiques de pluies locales et à haute résolution, en particulier pour modéliser les débits de sortie. Les séries générées par les modèles climatiques régionaux actuels sont généralement disponibles avec une résolution journalière, ce qui est insuffisant pour les besoins en hydrologie urbaine. Des méthodes de descente d'échelle statistique fondées sur des données observées à haute résolution peuvent être utilisées pour produire des séries à court pas de temps de l'ordre de la minute. L'objectif de cette étude est d'évaluer le potentiel de différentes méthodes de descente d'échelle par cascades multiplicatives (Bürger et al., 2019; Rupp et al., 2009) pour produire des séries de pluies synthétiques permettant i) de reproduire les performances de toitures végétalisées avec une série observée puis ii) de prédire leurs performances sous des conditions climatiques futures.

Méthodes

Le principe général des cascades multiplicatives consiste à répartir, selon des fonctions de répartition données et avec des dépendances éventuelles à d'autres grandeurs externes, une hauteur de pluie H précipitée durant une durée D en n hauteurs h_i ($i=1:n$) sur des durées d_i plus courtes, avec $n = 2$ et $d_i = D/n$ dans le cas le plus simple (cascade dyadique). Une structure générale pour trois modèles de cascade multiplicative aléatoire (MRC) a été développée. Le premier modèle (MC) inclut une dépendance en résolution et hauteur précipitée par pas de temps pour décrire la probabilité d'avoir une partition nulle, la fonction de répartition des partitions non nulles dépendant uniquement de la résolution temporelle. Le second modèle (MCT) ajoute une dépendance à la température pour décrire la probabilité d'avoir une partition nulle. Le dernier modèle (MCS) ajoute une fonction dépendant de la résolution temporelle pour ordonner les paires de partitions de chaque pas de temps en fonction des hauteurs précipitées durant les deux pas temps adjacents. Les données d'entrée des cascades sont deux séries chronologiques de précipitation et température mesurées à Trondheim (10722 jours) et Bergen (6150 jours) avec une résolution temporelle d'une minute, avec des pluviomètres à auget d'une résolution de 0.1 à 0.2 mm. Les dix séries futures du scénario de changement climatique RCP8.5 disponible en Norvège à une résolution journalière (Wong et al., 2016) ont été utilisées pour simuler le climat futur.

Un modèle conceptuel associant un réservoir non linéaire et la formule d'évapotranspiration d'Oudin (Johannessen et al., 2017; Oudin et al., 2005) a été développé, calé et validé avec des données expérimentales de précipitations extrêmes obtenues pour simuler deux toitures végétalisées décrites dans (Hamouz et al., 2020) : une toiture extensive classique et une toiture avec rétention. Les séries synthétiques ont été générées 50 fois pour les climats observé et futur de chaque ville et utilisées en entrée pour modéliser les deux toitures.

Résultats et discussion

Les différents modèles permettent d'estimer les performances obtenues avec une série chronologique observée en reproduisant les ordres de grandeur des fréquences de dépassement de seuils de débit de sortie. Le modèle MCS conduit à des prédictions plus pessimistes (débits de sortie élevés plus fréquents) sur la toiture végétalisée optimisée pour des rétentions longues (Figure 1). Pour la toiture végétalisée extensive, le modèle MCT est le plus pessimiste. Ces résultats sont cohérents avec les caractéristiques et la sensibilité de chaque toiture. Néanmoins ces différences de comportement sont négligeables en comparaison de la variabilité des performances hydrologiques due aux séries climatiques d'entrée et à la variabilité statistique des modèles de cascades aléatoires. Les performances des toitures changent d'ordre de grandeur à Bergen avec l'augmentation des précipitations. À Trondheim, les performances restent stables et proche des performances avec le climat observé actuel. Les effets du changement climatique doivent donc être pris en compte différemment suivant le lieu géographique considéré.

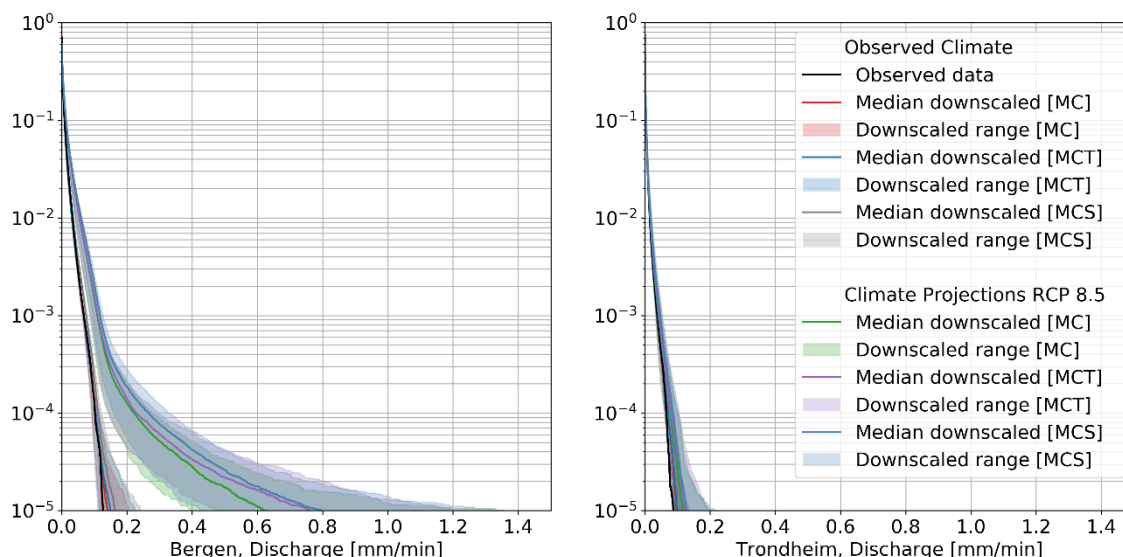


Figure 1: Distribution cumulative (fréquence de dépassement) du débit de sortie d'une toiture végétalisée avec rétention longue à Trondheim et Bergen pour différents modèles sur les périodes observée et future.

Conclusion

En appliquant des séries synthétiques futures issues des modèles climatiques régionaux selon le scénario RCP8.5, il est possible d'observer une différence dans les performances hydrologiques de deux toitures végétalisées différentes. Mais cette différence reste négligeable devant la variabilité inhérente aux modèles. Les différences pourraient néanmoins être plus marquées dans des endroits plus affectés par le changement climatique que les deux villes norvégiennes considérées (une application au cas de Lyon est en cours). Les performances futures des toitures à Trondheim restent du même ordre de grandeur que les performances actuelles alors qu'elles changent d'ordre de grandeur à Bergen. De telles différences doivent être prise en compte pour bâtir une ville résiliente et adaptée au changement climatique.

Remerciements : Cette étude a été réalisé au sein du Klima2050 Centre for Research-based Innovation (SFI) et financée par le Conseil de Recherche de Norvège et avec la collaboration de l'Institut Météorologique de Norvège (Met)

References

- Bürger, G., Pfister, A., & Bronstert, A. (2019). Temperature-driven rise in extreme sub-hourly rainfall. *Journal of Climate*. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0136.1>
- Hamouz, V., Pons, V., Sivertsen, E., Raspati, G. S., Bertrand-Krajewski, J.-L., & Muthanna, T. M. (2020). Detention-based green roofs for stormwater management under extreme precipitation due to climate change. *Blue-Green Systems*. <https://doi.org/10.2166/bgs.2020.101>
- Johannessen, B. G., Hanslin, H. M., & Muthanna, T. M. (2017). Green roof performance potential in cold and wet regions. *Ecological Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.011>
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>
- Rupp, D. E., Keim, R. F., Ossiander, M., Brugnach, M., & Selker, J. S. (2009). Time scale and intensity dependency in multiplicative cascades for temporal rainfall disaggregation. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/2008WR007321>
- Wong, W. K., Haddeland, I., Lawrence, D., & Beldring, S. (2016). Gridded 1 x 1 km climate and hydrological projections for Norway. *NVE*.

ASSAINISSEMENT EAUX USEES ET
VALORISATION DES SOUS
PRODUITS

Fiche descriptive de thèse	
Titre de la thèse	Impacts sanitaires et environnementaux des modes de gestion des matières fécales : Analyse de la contribution du tout-à-l'égout à l'hygiène et du potentiel de la séparation à la source
Doctorant :	Paul MINIER
Encadrement	Directeurs de thèse : Bruno TASSIN (LEESU) Konstantinos CHATZIS (LATTS) Encadrant : Fabien ESCULIER
Calendrier	Du 1/10/2020 jusqu'au 1/10/2023

Résumé

La séparation à la source dans la gestion des urines et matières fécales humaines consiste à gérer celles-ci par d'autres filières que les eaux usées, dans une logique de valorisation de matières et non de traitement de pollution. De nombreux exemples, historiques et contemporains, montrent qu'il est possible de gérer les matières fécales autrement que par la toilette à chasse d'eau et le tout-à-l'égout, même en ville, tout en garantissant la salubrité. Mais le verrouillage socio-technique autour de la toilette à chasse d'eau et du tout-à-l'égout a fait disparaître les excréments comme objets d'étude et les valorisations possibles (agronomiques, énergétiques, etc.) des matières fécales sont très peu connues. Après traitement, les matières fécales et le papier toilette séparés à la source peuvent permettre un amendement des sols avec un recyclage des nutriments sous forme organique. Elles peuvent aussi suivre des filières de valorisation énergétique ou matière. Cette thèse a ainsi pour objectifs (i) de déterminer la contribution spécifique de la toilette à chasse d'eau, du transport par égout et du rejet des pathogènes en rivières, à la diffusion de ces maladies, (ii) de proposer des paradigmes alternatifs au tout-à-l'égout, en étudiant plusieurs filières au complet, de la source aux débouchés, adaptées aux différents contextes possibles. Les matières produites seront caractérisées selon leur intérêt agronomique et/ou énergétique, leur composition en polluants (métaux, micropolluants organiques) et leurs risques microbiologiques. Le bilan environnemental des différentes filières sera évalué. Une évaluation critique, fondée sur l'étude de cas de passages au tout-à-l'égout, des avantages et inconvénients sanitaires des différents modes de gestion des matières fécales sera également menée.

Transferts de médicaments et biocides par les épandages de boues urbaines et de lisiers : suivi de lysimètres *in situ* par un dispositif low-cost

Pernin Noémie^{*1}, Patureau Dominique^{}, Bertrand-Krajewski Jean-Luc^{*2}**

^{*} Université de Lyon, INSA Lyon, Laboratoire DEEP EA 7429, 11 rue de la physique, F-69621 Villeurbanne cedex, France, 1) noemie.pernin@insa-lyon.fr, 2) jean-luc.bertrand-krajewski@insa-lyon.fr

^{**} INRAE, UR0050, Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement (LBE), 102, avenue des étangs, F-11 100 Narbonne, France, dominique.patureau@inrae.fr

Résumé : La compréhension des processus impliqués dans le devenir des micropolluants (médicaments et biocides) après épandage de boues urbaines et de lisiers sur des parcelles agricoles permet de déterminer l'impact environnemental de ceux-ci. Le suivi de lysimètres expérimentaux *in situ* apporte une meilleure connaissance des mécanismes en jeu dans le sol et dans l'eau. Différentes grandeurs (température, teneur en eau du sol, conductivité, volume d'eau infiltrée) peuvent être mesurées en continu avec des capteurs. Un suivi performant génère un coût humain et matériel élevé, mais le développement de technologies open-source et low-cost (capteurs et logiciels) ouvre des possibilités intéressantes de réduction de ce coût. Ces systèmes doivent être adaptés aux contraintes *in situ* en termes d'alimentation, de communication, et de résistance aux agressions du milieu. Le projet Telesphore s'intéresse à l'acquisition de données et à leur communication en temps réel à distance. Des tests du dispositif sont conduits en laboratoire pour le suivi du volume d'eau infiltrée par des capteurs ultrasons, des sondes de température et des jauges de poids. Des cartes de développement Node MCU sont utilisées et la connexion Wi-Fi de leurs puces permet d'envoyer les données vers un serveur local. Les résultats obtenus valident les capteurs low-cost testés pour une étude sur site où ils sont répliqués par des sondes standards afin d'étudier leur fiabilité en conditions réelles. L'approche développée dans le projet Telesphore est adaptable à d'autres contextes en hydrologie urbaine, notamment le suivi des techniques alternatives.

Mots clé : lysimètre ; capteur low-cost ; suivi *in situ*.

Introduction

Des résidus de médicaments et biocides sont présents dans les boues des stations d'épuration urbaines, les fumiers et lisiers d'élevage. Les épandages de ces intrants sont une entrée de ces micropolluants dans l'environnement, essentiellement le sol et l'eau. Dans le cadre du projet Telesphore¹, les micropolluants étudiés sont des résidus de médicaments et biocides à usages humain et vétérinaire. Des boues d'épuration et des fumiers/lisiers sont épandus à la main, en concentration connue, sur des lysimètres *in situ* qui permettent de collecter l'eau infiltrée et des carottes de sol pour analyses. Plusieurs grandeurs hydrologiques, météorologiques et du sol sont suivies au cours du temps. Les capteurs standards pour effectuer un tel suivi sont onéreux ; pour réduire le coût matériel et humain, les capteurs low-cost sont une possibilité (Montserrat, 2013). Intéressants pour leur prix, leur performance dans un cadre scientifique reste à démontrer. Pour cela, un couplage de sondes standards et low-cost sur un dispositif expérimental est réalisé, après étalonnage en laboratoire. Le suivi des données en temps réel grâce à une communication adaptée est accessible à distance.

Matériels et méthodes

Les expériences menées visent à mesurer le volume d'eau collectée au fond de trois lysimètres (2 m × 2 m × 1 m) *in situ*, à Scientrier, France (46°07'14.1"N 6°18'37.1"E). Un système d'acquisition automatisée des données accessibles en temps réel depuis Lyon, France est requis pour suivre à distance et collecter l'eau infiltrée quand le volume infiltré est suffisant pour effectuer les analyses de micropolluants. Le volume d'eau infiltré pendant un mois de précipitation, basé sur la moyenne mensuelle maximum de la station météorologique de Bonneville située à 8.9 km, est de 68 litres en posant l'hypothèse d'un taux d'infiltration de 50 % des précipitations totales. Un bidon de 100 litres en polyéthylène haute densité est utilisé afin d'éviter l'adsorption de résidus de médicaments et biocides sur les parois.

Une revue de composants électroniques low-cost a permis de sélectionner des capteurs, des micro-contrôleurs et des puces de communication selon leur prix, le type de mesure possible, la facilité de prise en main et la disponibilité des fiches techniques. Pour le mesurage des hauteurs d'eau, une première phase d'étalonnage est réalisée en ajoutant des volumes d'eau connus mesurés par pesée au fur et à mesure dans le bidon, comme préconisé dans la littérature (Morris, 2012). Les essais en laboratoire écartent les capteurs ayant des incertitudes de mesures élevées sur les intervalles d'intérêt et valident les programmes codés en

¹ Le projet collaboratif Telesphore, financé par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse et l'école universitaire de Recherche H2O, regroupe l'INSA Lyon, l'INRAE Narbonne, le CNRS ISA, le SM3A – Syndicat Mixte d'Aménagement de l'Arve et de ses Affluents, le SRB - Syndicat des Eaux des Rocailles et de Bellecombe, la Chambre d'Agriculture Savoie Mont Blanc et le GRAIE.

Arduino ainsi que les circuits électroniques. Des essais en laboratoire et *in situ* sont nécessaires pour valider un système de mesure par capteur (Morawska *et al.*, 2018). Les capteurs validés suite à la première phase sont ensuite mis en place pour le suivi de trois cases lysimétriques. Deux capteurs JSNSR04T sont utilisés pour le mesurage des volumes d'eau infiltrée et un capteur DHT22 permet d'acquérir les données de température et d'humidité de l'air pour améliorer l'exactitude des mesurages par ultrasons (Fisher, 2012). La teneur en eau du sol et la température sont mesurées par des sondes SHT20 et DS18B20 placées à 10, 20 et 50 cm de profondeur, au centre des lysimètres. Le micro-contrôleur utilisé est une carte Node MCU de Amica, incluant une puce Wi-Fi ESP8366-12E. L'ensemble des capteurs low-cost est doublé par des sondes standards, avec une centrale d'acquisition CR1000X (Campbell Scientifique). Le dispositif permet d'évaluer la performance des capteurs low-cost dans le suivi des lysimètres (Figure 1). Les programmes écrits en Arduino utilisent des bibliothèques adaptées aux capteurs choisis et permettent l'envoi en protocole MQTT des valeurs mesurées. L'interface utilisateur est gérée par la plateforme Open Source Thingsboard, installée sur un serveur local. Les données reçues par Wi-Fi sont enregistrées dans une base de données SQL.

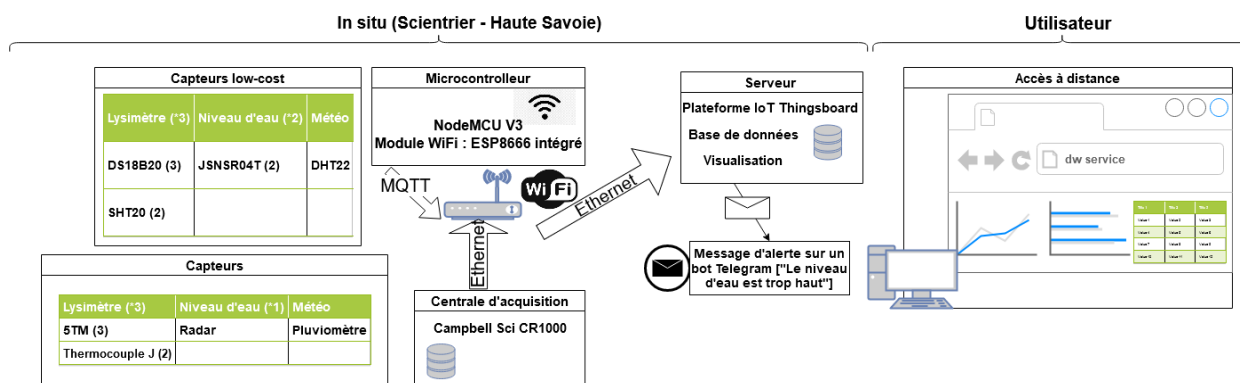


Figure 1 : Dispositif de suivi de six cases lysimétriques in situ

Résultats et perspectives

Les capteurs ultrasons JSNSR04T sont implantés pour le mesurage du volume d'eau infiltrée *in situ*, en raison de leur étanchéité et de l'absence de dérive au cours du temps. Les tests menés en laboratoire montrent que la position du capteur est un facteur impactant le mesurage. Le cône du capteur ultrason (70 °) et sa zone morte (25 cm) sont deux caractéristiques qui, lors de son utilisation au sein d'un espace restreint comme les bidons, contraignent fortement sa mise en place et engendrent une forte sensibilité des mesurages à la position angulaire.

Le capteur DHT22 pour le mesurage de la température et de l'humidité de l'air est utilisé pour la correction des données de conversion du temps de vol des ultrasons en distance. Les données sont filtrées et corrigées à posteriori à l'aide du logiciel Matlab 2020a (Mathworks). Les valeurs de mesurage du DHT22 seront comparées aux données locales de Météo France.

L'acquisition et la transmission de données ne montrent aucune erreur lors du fonctionnement des cartes. Cependant, des perturbations électriques dues à la présence de pompes d'exhaure à proximité créent des interférences au niveau de l'alimentation des microprocesseurs ; des plages de valeurs aléatoires, voire hors des intervalles de mesure des capteurs, sont enregistrées lors du fonctionnement des pompes.

Des améliorations itératives du dispositif sont nécessaires afin d'adapter le système aux conditions particulières du terrain, notamment la mise en place d'une alimentation autonome des cartes de développement. Les post-traitements des données acquises permettront une correction et une validation des valeurs.

Cette approche par des systèmes low-cost est transposable à d'autres contextes en hydrologie urbaine, comme le suivi des ouvrages de techniques alternatives ou la prévention du risque d'inondation.

Références

- Montserrat A. *et al.* (2013) Field validation of a new low-cost method for determining occurrence and duration of combined sewer overflows, *Sci. Total Environ.*, 463-464, 904–912.
- Morawska L. *et al.* (2018) Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone? *Environ. Int.*, 116, 286–299.
- Fisher D. K. (2012) Simple weighing lysimeters for measuring evapotranspiration and developing crop coefficients, *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, 5, 35–43.

Compréhension et modélisation de la dégradation de contaminants organiques émergents dans les systèmes naturels de filtration des eaux usées municipales.

Q. Guillemoto^{1,2}, G. Picot-Colbeaux¹, M. Pettenati¹, D. Valdès², W. Kloppmann¹, J-M. Mouche²

¹ BRGM Orléans

² Paris Sorbonne Université (UMR METIS)

quentin.guillemoto@orange.fr; q.guillemoto@brgm.fr

Les solutions fondées sur la nature font l'objet d'une attention croissante ces dernières années car elles peuvent présenter de nombreux avantages écologiques et sociaux-économiques (WWAP, 2018). La recharge artificielle (MAR, Managed Aquifer Recharge) combinée au traitement de l'eau par le sol et l'aquifère (SAT, Soil Aquifer Treatment) est une technique de purification de l'eau durable permettant de gérer des situations de stress dans la gestion de l'eau et de maîtriser la présence des micropolluants dans le milieu naturel (Dillon et al., 2019). Les contaminants organiques émergents tels que les composés pharmaceutiques, les produits personnels d'entretiens ou encore les antibiotiques peuvent avoir des effets négatifs sur l'environnement et l'homme (Verlicchi and Zambello, 2015). L'utilisation des systèmes SAT permettent le traitement et la dégradation de ces micropolluants contenues dans les eaux usées traitées (Amy and Drewes, 2007). En effet, de nombreux mécanismes contrôlent leur mobilité et leur dégradation dans les sites bénéficiant des systèmes SAT : sorption, biodégradation, respiration aérobie, transition des états redox, écoulements dans les milieux poreux non saturés et saturés en eau. Les modèles d'écoulement et de transport réactif de soluté aident à la compréhension du devenir de ces micropolluants dans ces systèmes naturels (Kloppmann et al., 2015, 2012). Néanmoins, d'importantes incertitudes résident dans le comportement de ces contaminants (Greskowiak et al., 2017). Les paramètres de calibration des modèles restent souvent spécifiques à un système défini et sont difficilement extrapolables d'un site à l'autre.

Avec le soutien du projet JPI-Water EVIBAN, une étude du comportement de micropolluants à partir d'une approche expérimentale et numérique est appliquée à la station d'épuration d'Agon-Coutainville (Normandie) utilisant un traitement additionnel final fondé sur la nature. Les eaux usées municipales traitées sont rejetées dans une roselière permettant l'infiltration dans un aquifère sableux. Dans ce contexte urbain et côtier, le passage des eaux usées traitées par la roselière et l'aquifère dunaire affine la qualité de l'eau à l'exutoire réduisant les effets de pollutions organiques sur l'écosystème côtier et marin très sensibles. Par ailleurs ce système augmente également la disponibilité en eau douce souterraine potentiellement réutilisable.

Les approches expérimentales sont développées à l'échelle du terrain et du laboratoire afin d'améliorer la compréhension des mécanismes mis en œuvre lors du passage de micropolluants dans l'aquifère. Complété aux mesures réglementaires liées au fonctionnement de la station d'épuration et de son rejet par le sol via la roselière, un monitoring spécifiquement adressé aux micropolluants a été mis en place de 2016 à 2019 sur le site à une fréquence de deux campagnes de prélèvements par an des eaux de surfaces et souterraines (Picot-Colbeaux et al., 2019). Les mesures et analyses effectuées reposent principalement sur les paramètres physico-chimiques (pH, Eh, T°, conductivité électrique), concentrations en polluants émergents, concentrations en éléments majeurs et traces et niveaux piézométriques. Des essais d'infiltrations et de traçages sont réalisés afin de caractériser les capacités d'infiltration, les écoulements dans la zone non saturée et saturée, et les temps de résidence des solutés à l'échelle du site dans l'aquifère. En parallèle, à moindre échelle, des essais en

colonnes utilisant les sables du site permettent de mettre en avant les principaux mécanismes mis en jeu lors du transfert de polluants organiques émergents l'aquifère.

En application des données acquises expérimentalement, est développé un outil numérique combinant les écoulements et le transport réactif de soluté à l'aide du couplage des codes PHREEQC et MARTHE (Parkhurst and Appelo, 1999; Thiéry, 2020, 2019) qui considère les principaux processus contrôlant le devenir des contaminants organiques émergents (Picot-Colbeaux et al., 2018).

L'outil développé permettra de mettre en avant les bénéfices des solutions fondées sur la nature vis-à-vis de la qualité de l'eau souterraine. Les combinaisons des traitements naturels et des processus d'ingénierie pourraient être améliorés en conséquence dans le but d'optimiser la gestion des eaux usées tout en tenant compte des impacts sur le bassin versant associé.

Références Bibliographiques:

- WWAP (Le Programme mondial des Nations Unies pour l'évaluation des ressources en eau)/ONU-Eau. 2018. Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2018 : Les solutions fondées sur la nature pour la gestion de l'eau. Paris, UNESCO.
- Dillon, P., Stuyfzand, P. et al., 2019. Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeol. J.* 27, 1–30.
- Amy, G., Drewes, J., 2007. Soil Aquifer Treatment (SAT) as a Natural and Sustainable Wastewater Reclamation/Reuse Technology: Fate of Wastewater Effluent Organic Matter (EfOM) and Trace Organic Compounds. *Environ. Monit. Assess.* 129, 19–26.
- Kloppmann, W., Aharoni, A., Chikurel, H., Dillon, P., Gaus, I., Guttman, J., Kraitzer, T., Kremer, S., Masciopinto, C., Pavelic, P., Picot-Colbeaux, G., Pettenati, M., Miotlinski, K., 2012. Use of groundwater models for prediction and optimisation of the behaviour of MAR sites, in: *Water Reclamation Technologies for Safe Managed Aquifer Recharge*. pp. 311–349.
- Kloppmann, W., Sandhu, C., Groeschke, M., Rajaveni, S.P., Picot-Colbeaux, G., Fahimuddin, M., Ahmed, S., Alazard, M., Amerasinghe, P., Bhole, P., Boisson, A., Lakshmanan, E., Feistel, U., Fischer, S., Ghosh, N., Grischek, T., Grützmacher, G., Hamann, E., Nair, I., Zabel, A., 2015. Modelling of Natural Water Treatment Systems in India: Learning from the Saph Pani Case Studies. pp. 227–250.
- Greskowiak, J., Hamann, E., Burke, V., Massmann, G., 2017. The uncertainty of biodegradation rate constants of emerging organic compounds in soil and groundwater – A compilation of literature values for 82 substances. *Water Research* 126, 122–133.
- Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J., 1999. User's guide to PHREEQC (Version 2) : a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. *Water-resources investigations report*, 99(4259), 312.
- Thiéry, D., 2020. Code de calcul MARTHE version 7.8 Modélisation 3D des écoulements et des transferts dans les hydrosystèmes. BRGM RP-69541-FR 344.
- Thiéry, D., 2019. Modélisation 3D du Transport Réactif avec le code de calcul MARTHE v7.5 couplé aux modules géochimiques de PHREEQC. BRGM RP-65010-FR 175.
- Picot-Colbeaux, G., Devau, N., Pettenati, M., Akrou, R., Blanc, P., Théry, D., 2018. FRAME. A novel framework to assess and manage contaminants of emerging concern in indirect potable reuse. Deliverable 3.2: Report on developments of a multi scale modeling tool to describe the fate and transport of CECs, TPs and pathogens through IPR strategies 47.
- Picot-Colbeaux, G., Pettenati, M., Soulier, C., Besselink, H., Baïssset, M., Appels, J., Togola, A., Thomas, L., Devau, N., Mathurin, F., 2019. Multidisciplinary subsurface monitoring for a better understanding of Soil Aquifer Treatment capacity applied on coastal operational wastewater treatment plant (Agon-Coutainville, France), in: *ISMAR 10 - The 10th International Symposium on Managed Aquifer Recharge*. Madrid, Spain.

Influence du CO₂ sur un consortium de microalgues-bactéries en termes de biomasse et de traitement des eaux usées

Julie Farinacci¹, Julien Laurent¹

1. ICube, UMR 7357, ENGEES, CNRS, Université de Strasbourg, 2 rue Boussingault, 67000 Strasbourg, France

Introduction

Au sein des filières conventionnelles de traitement des eaux usées, la présence de phosphore et d'azote dans les effluents nécessite soit l'ajout de réactifs, soit l'augmentation de la taille des bioréacteurs et de la dépense énergétique associée (notamment pour l'aération indispensable à la nitrification). Un procédé combinant des algues et des bactéries permet (a) de minimiser cette dépense énergétique, (b) une récupération accrue des nutriments au sein de la biomasse produite, (c) la production potentielle de biocarburants de 3^{ème} génération. Par photosynthèse, les microalgues convertissent le CO₂ et les nutriments présents en biomasse et en O₂. En parallèle, les bactéries utilisent l'O₂ produit par les algues pour dégrader des composés organiques et oxyder l'azote ammoniacal, tout en libérant les nitrates et le CO₂ nécessaires aux algues. Ce processus est appelé la respiration photosynthétique. L'avantage supplémentaire en combinant microalgues et bactéries est que la récupération de biomasse algale est facilitée par un phénomène de biofloculation. A l'échelle industrielle, ce consortium d'algues et de bactéries peut être mis en œuvre au sein d'un chenal à haut rendement algal (CHRA). La biomasse algale a un rapport C/N plus élevé (généralement 15/1) que les eaux usées (généralement 7/1) (Park and Craggs, 2010) : il y a donc une limitation par le carbone réduisant l'assimilation de l'azote par la biomasse algale (Craggs et al., 2014), ce qui est mis en évidence par des valeurs élevées de pH pendant le jour. Ainsi, Une injection de CO₂ améliorerait les performances de la biomasse algale tout en limitant la perte des nutriments par volatilisation d'ammoniac ou précipitation des phosphates à des valeurs élevées de pH. Concernant la production de biocarburants, l'injection de CO₂, semble avoir un impact sur la composition de la biomasse en termes de teneur en lipides (Posadas et al., 2015). L'objectif de cette étude est d'observer l'effet d'un apport en CO₂ sur une culture de microalgues-bactéries, en termes d'efficacité du traitement des eaux et de production et composition de la biomasse.

Matériel et Méthodes

Les essais sont menés dans deux réacteurs en verre (15L) mélangés en continu. Le réacteur R1 comporte une simple enveloppe. R2 est muni d'une double enveloppe qui impacte l'apport lumineux. Le but est de vérifier la reproductibilité des tendances observées avec/sans apport de CO₂ sur les deux réacteurs. L'inoculum consiste en un mélange d'algues et boues activées (Pham et al., 2019) prélevées respectivement sur la paroi du décanteur secondaire et le bassin d'aération d'une station de traitement des eaux usées (Rosheim, 67560). L'éclairage est assuré par des LED placées autour de chaque réacteur. Un cycle jour/nuite de 12h est géré par une prise programmable. Le pH, la température et l'oxygène dissous sont mesurés en continu. Le CO₂ est injecté à un débit fixe par un diffuseur poreux au fond du réacteur. Quand le pH dépasse 7.5 (Craggs et al., 2014), le CO₂ est injecté jusqu'à ce que la valeur revienne sous la consigne. Les deux cultures ont été démarrées en même temps. L'injection de CO₂ a été mise en place à J+89 dans R1, et J+129 dans R2. Les réacteurs sont exploités en mode séquentiel avec une durée de cycle de 48h. A la fin de chaque cycle, une partie de la culture en suspension est vidangée pour maintenir une concentration en biomasse de 1 g/L. Après 30 minutes de décantation, 7,5L de surnageant (eau traitée) est remplacé par de l'eau usée synthétique fraîchement préparée (DCO = 318 mg/L, NTK = 38 mgN/L, P-PO₄ = 7 mgP/L).

La productivité de la biomasse est évaluée par mesure des MES et MVS. Le surnageant est analysé pour mesurer les paramètres suivants : DCO, formes de l'azote (NTK, ions NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-) et du phosphore (PO_4^-), alcalinité. La composition de la biomasse est évaluée par mesure des lipides (Mishra et al., 2014), glucides (DuBois et al., 1956) et protéines (dosage du NTK).

Résultats et Discussion

R1 a fonctionné deux mois avec injection de CO_2 , et R2 a opéré un mois avec du CO_2 . Dans les deux réacteurs, l'activité photosynthétique des microalgues a été mise en évidence par des valeurs élevées d' O_2 jusqu'à 12 mg/L durant la journée, et des valeurs proches de 0 mg/L pendant la nuit. Le CO_2 a permis une maîtrise du pH. Avant l'injection de CO_2 , le pH a varié entre 7.2 et 8.3 dans R1, et entre 7.2 et 9 dans R2. Par la suite, le paramètre a été maintenu entre 7.2 et 7.9 dans R1, et entre 7.3 et 7.7 dans R2.

En termes de traitement des eaux, l'abattement moyen du NTK est passé de $86.5 \pm 12.3\%$ à $90.5 \pm 2.6\%$ dans R1, et de $90.8 \pm 2.8\%$ à $88.2 \pm 1.8\%$ dans R2. En moyenne, l'élimination des ions PO_4^{3-} est passée de $56.4 \pm 13.4\%$ à $67.4 \pm 22.7\%$ dans R1, et de $78.9 \pm 15.6\%$ à $76.1 \pm 17\%$ dans R2. L'abattement de l'azote global est passé de $69.9 \pm 17.8\%$ à $58.1 \pm 20.4\%$ dans R1, et de $46 \pm 23.7\%$ à $67.4 \pm 14.3\%$ dans R2. Ainsi, l'ajout de CO_2 n'a pas eu d'impact significatif sur l'efficacité d'épuration du système. Les performances ont été maintenues sur le long terme.

Les abattements élevés sur l'azote global suggèrent (a) une dénitrification lorsque la teneur en O_2 décroît la nuit (b) une assimilation de l'azote par la biomasse et/ou une volatilisation de l'azote ammoniacal. Cette dernière est cependant très certainement limitée après la mise en place de la régulation du pH par ajout de CO_2 . La production de biomasse est restée stable sur le long terme avec des valeurs de MES supérieures à 1 g/L dans les deux réacteurs. Les cultures ont cependant des productivités différentes, probablement du fait de l'accès à la lumière différencié. Après tracé des droites de tendance, la pente s'élève à 156 pour R1 et 246 pour R2. Dans les deux cas, l'ajout de CO_2 n'a pas semblé influencer la productivité. Ainsi, dans les conditions opératoires testées, le carbone ne constitue pas un nutriment limitant pour la biomasse.

Conclusion

Les résultats préliminaires n'ont montré aucune évolution significative des paramètres suite à l'ajout de CO_2 sur l'un ou l'autre des réacteurs. La distinction entre les deux cultures est le résultat d'un comportement de base différent dû à la géométrie légèrement différente des réacteurs. L'analyse de la composition de la biomasse (azote, protéines, glucides et lipides) ainsi que l'analyse détaillée des chroniques de pH et O_2 permettront d'évaluer le degré d'assimilation des nutriments par la biomasse et l'éventuelle modification de l'accumulation de lipides.

Références

- Craggs, R., Park, J., Heubeck, S., Sutherland, D., 2014. High rate algal pond systems for low-energy wastewater treatment, nutrient recovery and energy production. *N. Z. J. Bot.* 52, 60–73. <https://doi.org/10.1080/0028825X.2013.861855>
- DuBois, Michel., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A., Smith, Fred., 1956. Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Anal. Chem.* 28, 350–356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- Mishra, S.K., Suh, W.I., Farooq, W., Moon, M., Shrivastav, A., Park, M.S., Yang, J.-W., 2014. Rapid quantification of microalgal lipids in aqueous medium by a simple colorimetric method. *Bioresour. Technol.* 155, 330–333. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.077>
- Park, J.B.K., Craggs, R.J., 2010. Wastewater treatment and algal production in high rate algal ponds with carbon dioxide addition. *Water Sci. Technol.* 61, 633–639. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.951>
- Pham, L.A., Laurent, J., Bois, P., Wanko, A., 2019. Finding optimal algal/bacterial inoculation ratio to improve algal biomass growth with wastewater as nutrient source. *Water SA* 45. <https://doi.org/10.17159/wsa/2019.v45.i4.7543>

Posadas, E., Morales, M. del M., Gomez, C., Acién, F.G., Muñoz, R., 2015. Influence of pH and CO₂ source on the performance of microalgae-based secondary domestic wastewater treatment in outdoors pilot raceways. *Chem. Eng. J.* 265, 239–248. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.12.059>

Surveillance hybride du système naturel de filtration aquifère des eaux usées traitées d'Agon-Coutainville (France)

Géraldine Picot-Colbeaux¹, Frédéric Mathurin¹, Nicolas Devau¹, Coralie Soulier¹, Harrie Besselink², Matthieu Baisset³, Joep Appels⁴, Anne Togola¹, Quentin Guillemoto^{1,5}, Loïc Thomas⁶, Marie Pettenati¹

¹ BRGM, Orléans, France g.picot@brgm.fr; Tel.: +33-238-64-31-37

² BDS, Amsterdam, Netherlands

³ Imageau (SAUR), Montpellier, France

⁴ MicroLan, Waalwijk, Netherlands

⁵ Paris Sorbonne Université (UMR METIS), Paris, France

⁶ Antea Group, Olivet, France

Dans un contexte de changement global, avec un changement climatique engagé, les tensions sur les ressources en eau sont de plus en plus importantes notamment celles issues des aquifères principalement exploités pour l'approvisionnement en eau douce. A ces pressions s'ajoutent une augmentation de la demande en eau associée à des changements socio-économiques et démographiques : développement des villes et mégapoles, développement du tourisme sur les zones côtières, besoins en eau pour l'agriculture et pour le maintien des écosystèmes. La conceptualisation et la mise en œuvre de gestion active des aquifères deviennent alors indispensables à une gestion durable des ressources en eau et de l'environnement (WWAP, 2018). Parmi les différentes méthodes de gestion de l'eau, la recharge artificielle (MAR, Managed Aquifer Recharge) attire une attention et une reconnaissance scientifiques croissantes depuis 60 ans (Dillon et al., 2019 ; Zheng et al., 2020). Le MAR empêche l'intrusion de l'eau de mer dans les aquifères côtiers (Masciopinto, C., 2013), contribue à l'atténuation des inondations et fournit une solution complémentaire pour l'amélioration de la qualité lorsqu'il est combiné à une capacité d'épuration naturelle (SAT, Soil Aquifer Treatment ; Dillon, 2009). La MAR-SAT implique d'utiliser les propriétés de filtration naturelle du sol pour favoriser l'élimination naturelle de nombreux composés, tels que les micro-organismes, l'azote ou les micropolluants organiques (MPO) contenus dans les eaux infiltrées (Crites et al., 2006). Toutefois, l'efficacité du système MAR pourrait être mise en doute en raison de sa capacité à éliminer les polluants (Beganskas et al., 2017), et entraîner une perte d'eau douce due au mélange avec les eaux souterraines saumâtres en milieu côtier. Dans la station d'épuration opérationnelle d'Agon-Coutainville (Normandie, France), le système MAR a été intégré à grande échelle et durablement dans la ligne de traitement des eaux usées municipales depuis plus de 13 ans sous sa forme actuelle. Les eaux usées traitées, soit ~2000m³/jour, sont infiltrées alternativement dans trois zones naturelles de 35000m² de roselière avant d'atteindre l'aquifère des dunes de sable (Picot-Colbeaux et al., 2020). Ce système intégré de traitement des eaux évitant le rejet en mer des eaux usées traitées assure la pérennité des activités en bord de mer (production de fruits de mer, plage) et peut fournir localement de l'eau douce pour l'irrigation du terrain de golf.

Dans ce contexte, plusieurs questions se posent : comment évaluer, sur le long terme, l'efficacité de ce MAR-SAT et sa capacité à réduire la concentration en polluants des eaux issues de ce système, ou comment optimiser le potentiel du MAR-SAT pour utiliser les eaux souterraines à des fins d'irrigation locale ?

Pour évaluer les performances et l'efficacité de ce système intégré dans l'environnement naturel, les eaux ont été collectées et analysées avant et après le

système MAR-SAT à partir de puits d'observation (OW) dans l'aquifère sableux. La surveillance appliquée depuis près de 20 ans par l'opérateur SAUR pour répondre aux réglementations sanitaires et complétée par une surveillance hybride conçue et réalisée de 2016 à 2019. L'approche développée s'est concentrée sur la surveillance spatiale du panache d'eau douce généré par le système MAR-SAT; l'estimation du temps de séjour moyen de l'eau ; l'évaluation de la réactivité potentielle de MAR-SAT ; et la proposition d'amélioration du système actuel. Six campagnes spatiales de prélèvements des eaux et deux tests de traçage ont été menés pour une meilleure compréhension de l'efficacité de MAR-SAT. La surveillance de l'eau comprenait : 1) des mesures physico-chimiques et des analyses quantitatives de la chimie des eaux (éléments majeurs et éléments traces), de matières organiques et de micropolluants (dont pharmaceutiques) ; 2) des analyses non ciblées pour le dépistage des composés organiques (pharmaceutiques et pesticides) par spectrométrie de masse à haute résolution et base de données du BRGM ; 3) des bio-essais écotoxicologiques (CALUX) ; 4) un dispositif de surveillance souterraine en ligne dédié à l'intrusion saline (SMD et capteurs Pression Temperature Conductivité) et 5) un système de biosurveillance en ligne BACTcontrol® pour détecter E.Coli.

L'interprétation des données réglementées existantes a montré que le système MAR-SAT fournit une barrière d'eau douce dans l'aquifère qui est saisonnièrement affectée par l'intrusion saline et un traitement complémentaire de l'eau provenant de la station d'épuration. La surveillance à long terme confirme que la station d'épuration élimine de manière significative les polluants organiques et microbiens (matières solides totales en suspension, DCO, E.Coli, entérocoques). Les résultats de la surveillance hybride confirment le rôle complémentaire du système MAR-SAT en tant que barrière d'eau douce dans l'aquifère affecté par l'intrusion saline et la variation saisonnière de la recharge atmosphérique et anthropique. La diminution des concentrations est probablement due à l'effet combiné de la dilution des eaux infiltrées dans l'aquifère et à des mécanismes géochimiques (sorption et/ou dégradation) se produisant dans le sol ou la zone vadose. Le temps de séjour renforçant l'atténuation naturelle permet de maintenir la qualité des eaux souterraines récupérées, bien que certains composés ne soient que partiellement éliminés. Parmi le vaste ensemble de micropolluants détectés (jusqu'à 68) en aval du système MAR-SAT (dépistage des substances non ciblées), la carbamazépine et le diclofénac ont été identifiés comme les composés les plus préoccupants à l'échelle du site. Dans ce cas, un temps de séjour plus long serait recommandé dans l'aquifère. Les données collectées et stockées offrent des possibilités uniques de caractériser les propriétés de MAR-SAT spécifiques au site. Une telle caractérisation est une source d'information précieuse pour fournir des recommandations d'ajustement en fonction de l'utilisation spécifique de l'eau locale. Un module de prise de décision, basé sur la description statistique de l'ensemble des données existantes, a été développé pour fournir une image précise du classement de la qualité de l'eau sur le site, évaluer l'efficacité spatiale du système MAR-SAT actuel et identifier les lacunes potentielles du programme de surveillance du site en ce qui concerne la réglementation environnementale. Le module a fourni des indications importantes pour l'amélioration 1) du système MAR-SAT actuel et 2) de la réutilisation de l'eau dans un contexte d'irrigation du golf.

Dans une perspective à court terme, l'effet du système MAR-SAT sur cet écosystème côtier sera diffusé aux acteurs locaux (municipalité, agence de l'eau, agence de santé, producteurs de coquillages, golf et citoyens) afin de co-construire l'optimisation de l'utilisation des ressources en eau locales.

Remerciements : Les résultats sont issus du projet AquaNES ayant reçu un financement du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre de la convention de subvention n° 689450, du soutien de l'opérateur SAUR et des données partagées.

Références Bibliographiques:

Beganskas, S., & Fisher, A. T. (2017). Coupling distributed stormwater collection and managed aquifer recharge: Field application and implications. *Journal of Environmental Management*, 200, 366–379. doi:10.1016/j.jenvman.2017.05.058

Crites, R. W., Middlebrooks, E. J., & Reed, S. C. (2006). *Natural wastewater treatment systems*. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis.

Dillon, P., Stuyfzand, P. et al., 2019. Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeol. J.* 27, 1–30.

Dillon, P., & Arshad, M. (2016). Managed Aquifer Recharge in Integrated Water Resource Management. In A. J. Jakeman, O. Barreteau, R. J. Hunt, J.-D. Rinaudo, & A. Ross (Eds.), *Integrated Groundwater Management* (pp. 435–452). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-23576-9_17. <https://recharge.iah.org/60-years-history-mar>

Masciopinto, C. (2013). Management of aquifer recharge in Lebanon by removing seawater intrusion from coastal aquifers. *Journal of Environmental Management*, 130, 306–312. doi

Picot-Colbeaux G., Pettenati M., Mathurin F., Nakache F., Guillemoto Q., Baisset M., Devau N., Gosselin M., Allain D., Neyens D., Lartigaut C., Dufour E., Togola A., Depraz O. and Nauleau F. (2020). Sustainable coastal MAR-SAT system in Agon-Coutainville (Normandy), France. Case study 16 in Zheng et al (eds). Exemplary case studies of sustainable and economic managed aquifer recharge. UNESCO Publication, Contract No: 4500386254 (in press)

Zheng, Y., Ross, A., Villholth, K.G. and Dillon, P. (eds) (2020). Exemplary case studies of sustainable and economic managed aquifer recharge. UNESCO-IAH-GRIPP Publication, Contract No: 4500386254 (in press)

WWAP (Le Programme mondial des Nations Unies pour l'évaluation des ressources en eau)/ONU-Eau. 2018. *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2018 : Les solutions fondées sur la nature pour la gestion de l'eau*. Paris, UNESCO.

MICROPOLLUANTS DANS LES EAUX PLUVIALES

Étude du stockage des micropolluants dans les sédiments d'un ouvrage de gestion des eaux pluviales.

Éloïse LENORMAND^{1,2}; Isabelle COMBROUX²; Paul BOIS¹; Adrien WANKO¹

¹ICube, UMR 7357, ENGEES/CNRS/Université de Strasbourg, 2 rue Boussingault, 67000 Strasbourg, France.

²LIVE, UMR 7362, ENGEES/CNRS/Université de Strasbourg, 28 rue Goethe, 67000 Strasbourg, France.

Introduction : En milieu urbain, l'imperméabilisation de la plupart des surfaces empêche les eaux pluviales (EP) de s'infiltrer à leur arrivée au sol. De plus, l'urbanisation croissante rend parfois obsolètes certains réseaux unitaires qui ont tendance à trop solliciter les déversoirs d'orages lors d'événements pluvieux. C'est ainsi que les rejets urbains par temps de pluie (RUTP) se sont mués en un véritable enjeu d'urbanisme et de gestion des EP. Il s'agit donc de trouver des moyens de décharger les réseaux unitaires en stockant les volumes d'eau de RUTPS mais également d'abattre la pollution dont ces eaux se sont chargées en ruisselant en milieu urbain. La micropollution notamment aux éléments traces métalliques (ETMM) et hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) est particulièrement étudiée au regard de la directive dite 'substances prioritaires' (Directive n° 2013/39/UE). Dans cette optique, de nombreuses communes développent des réseaux décentralisés de gestion des RUTP appelés techniques alternatives (TA). L'Eurométropole de Strasbourg (EMS) a lancé en 2011 la construction de TA de type zones humides artificielles {mare + filtre planté de roseaux} qui assurent la triple fonction d'écrêtage du volume des pluies, de rétention et de traitement de ces eaux afin de protéger l'Ostwaldergraben, cours d'eau situé en aval des TA. Or, les mares de sédimentation en permettant la décantation des matières en suspension connaissent une accumulation de sédiments au fil du temps qui réduit leur volume et les comble progressivement. Cette accumulation doit être curée afin de régénérer la mare. Dans un souci de choisir un devenir approprié à ces sédiments curés, la connaissance de leurs propriétés qualitatives devient particulièrement intéressante voire obligatoire et représente un enjeu de taille pour les exploitants. L'objectif est double : (i) déterminer la composition des sédiments des mares pour pouvoir en disposer post-curage ; (ii) mais aussi la comparer avec celle des sédiments accumulés à différentes profondeurs dans les filtres afin d'étudier la dynamique de stockage des filières.

Description du site : *Bassin versant urbain* : Le site d'étude se situe au sud de Strasbourg en Alsace et draine trois bassins versants (BV) résidentiels urbains accolés appelés ici n°1, n°2 et n°3. *Systèmes de traitement* : Les mares de sédimentation des filières sont imperméabilisées par une couche d'argile et sont alimentées en EP par les canalisations du réseau séparatif pluvieux strict drainant chaque BV. L'eau transite dans la mare permettant un premier traitement par adsorption-décantation des polluants sur les matières en suspension (MES) et passe ensuite dans le filtre planté de roseaux (*Phragmites australis*) grâce à un dispositif hydraulique fonctionnant par bâchés. Les canalisations de sortie se trouvent au fond des filtres et se déversent dans une mare naturelle elle-même connectée à l'Ostwaldergraben.

Méthode de prélèvement & analyses réalisées : Des échantillons de sédiments ont été prélevés dans les trois mares mais aussi dans les filtres afin d'étudier l'évolution de leur composition le long de la filière. Des prélèvements ont été effectués en 2017, 2019 et 2020. Les filières ayant fait l'objet de prélèvement, les points de prélèvement ainsi que les paramètres mesurés pour chaque campagne sont précisés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques des campagnes de prélèvements de sédiments (N = 1 en 2017, N=1 en 2019 et N=1 en 2020 pour le moment)

Campagne	Filière	Points de prélèvement	Substances analysées de la Directive 2013/39/UE
2017	N°1	Mare : aplomb de la canalisation d'EP Filtre : entrée et sortie sur 3 couches	6 ETMM (Cr, Co, Cu, Ni, Pb, Zn) et 16 HAP
2019	N°1	Mare : aplomb de la canalisation d'EP Filtre : entrée et sortie sur 3 couches	Analyse non-ciblée sur plus de substances issues de la Directive 2013/39/UE : 7 ETMM, HAP par classes, PCB, 20 pesticides, benzène, toluène.

2020	N°1, 2, 3	Mare uniquement en 3 points et sur 2 profondeurs (boues & argile) : Entrée = aplomb de la canalisation d'EP Sortie = amont du déversoir flottant Zone morte = sas de béton support du déversoir	7 ETMM 16 HAP Matière Organique Macroéléments (N, P, K) <i>En cours, en mars 2020.</i>
-------------	-----------	--	--

Les analyses ont été réalisées par le laboratoire certifié COFRAC (ISO/CEI 17025) Eurofins Environnement. Les échantillons sont séchés, broyés puis tamisés à 2 mm (NF ISO 11464). Pour mesurer les ETMM, ils sont ensuite minéralisés à l'*aqua regia* (NF EN ISO 13346) avant d'être analysés par ICP-OES (NF EN ISO 11885). Pour mesurer les HAP, ces derniers sont extraits à l'acétone et à l'éther de pétrole (NF ISO 18287) avant d'être mesurés par CPG-SM (XP X33 – 012).

Concentrations en micropolluants dans la filière n°1 : Les HAP : En 2017, quatre HAP n'ont jamais été détectés dans les sédiments (naphtalène, acénaphthène, fluorène, dibenzo(a,h)anthracène). Parmi eux, trois ont un faible poids moléculaire et sont particulièrement volatiles ce qui pourrait expliquer leur absence dans les sédiments alors qu'ils sont détectés dans l'eau. Les quatorze autres HAP sont détectés dans la mare ainsi que dans la couche supérieure du filtre dans des concentrations allant de 10^{-1} à 10^0 mg.kgMS⁻¹ mais pas dans les couches profondes ce qui peut être expliqué par le fait que ce sont de grosses molécules retenues dans la couche superficielle du filtre et y sont dégradées. Les HAP ne sont pas analysés par molécule en 2019 mais par classe de carbone, ce qui ne permet pas de comparaison. **Quant aux ETMM,** ils sont tous détectés dans la mare dans des concentrations de l'ordre de 10^0 mg.kgMS⁻¹ pour Co, 10^1 mg.kgMS⁻¹ pour Ni & Cu, 10^2 mg.kgMS⁻¹ pour Pb et 10^3 mg.kgMS⁻¹ pour Zn. Ces ordres de grandeurs suivent les tendances de concentrations des ETMM dans l'eau du système, à savoir que le zinc est prédominant. Le Cr est détecté à 116 mg.kgMS⁻¹ en 2017 et à 30 mg.kgMS⁻¹ en 2019 ; cette différence drastique témoigne d'une présence moindre de Cr dans les sédiments donc d'un potentiel relargage de Cr dans l'eau au niveau de la mare en tout cas, ou encore une capture par les végétaux. Pour ces métaux, une accumulation dans la mare entre 2017 et 2019 n'est pas forcément claire. D'autres résultats permettraient peut-être de dégager une tendance : une hypothèse d'accumulation dans les végétaux n'est pas exclue. Dans le filtre, les concentrations sont moindres que dans la mare, parfois d'un facteur 10 (Cr, Cu, Pb, Zn) ce qui suggère un piégeage plus important dans la mare ou une présence des métaux du filtre dans le compartiment végétal. De plus, les couches supérieures en entrée comme en sortie du filtre sont plus contaminées que les couches inférieures. Par ailleurs, pour une couche donnée, la concentration en ETMM n'est pas forcément supérieure en entrée, ce qui ne permet donc pas de prouver une rétention horizontale dans le filtre. **Les autres substances prioritaires en 2019 :** ont toutes été détectées à des concentrations inférieures à leurs limites de quantification respectives.

Concentration dans les trois filières : Pour 2020, les analyses sont en cours. Elles sont ciblées sur les mares uniquement dans l'objectif d'orienter l'utilisation des sédiments curés. Elles sont faites sur deux profondeurs afin de déterminer si les micropolluants risquent de pénétrer dans le sol.

Conclusion : La maintenance d'ouvrages tels que les TA mettant en jeu des mares de sédimentation nécessite une prise en charge des sédiments curés. Actuellement, les analyses des sédiments de la mare n°1 permettent de détecter 4 ETMM et 12 HAP dans des valeurs inférieures aux seuils fixés pour l'épandage par l'Arrêté du 08/01/98. Les résultats de la campagne 2020 permettront de préciser ces résultats et de choisir une voie de valorisation. Par ailleurs, les suivis réalisés permettent, de mieux comprendre leurs dynamiques de fonctionnement, d'organiser au mieux les programmes de maintenance, mais aussi de mieux pouvoir dimensionner de semblables ouvrages par la suite. De plus, les données récoltées permettront peut-être un jour d'alimenter et de faire évoluer la législation en matière de gestion des eaux pluviales.

DEVENIR DES MICROPOLLUANTS ISSUS DU TRAFIC ROUTIER DANS UN FILTRE PLANTÉ DE ROSEAUX DÉDIÉ A LA GESTION DES EAUX DE RUISSELLEMENT. IMPORTANCE DE L'ACTIVITÉ MICROBIENNE.

Julia Roux ^{1,2,*} (Doctorante, 1^{ère} année), Martin Seidl ¹, Pascale Neveu ²,
Noureddine Bousserhine ¹

¹ LEESU, MA 102, Ecole des Ponts ParisTech et Université Paris-Est Créteil

² Direction de la Propreté et de l'Eau, Ville de Paris

* julia.roux@univ-paris-est.fr



MOTS CLÉS

Contaminants ; techniques alternatives ; biofiltration ; biodégradation ; diversité microbienne.

RÉSUMÉ

Introduction. Le développement urbain est à l'origine de nombreux impacts sur les eaux pluviales. L'imperméabilisation des sols a modifié le bilan hydrologique de surface, causant un accroissement des volumes d'eaux ruisselés aux dépens de ceux infiltrés, et le lessivage de l'atmosphère et des surfaces urbaines chargées en polluants a provoqué une contamination diffuse des eaux de ruissellement. Afin de limiter ces flux, des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales à la source se sont développées dans les années 1990 (Chocat, 2008). Ces techniques reposent en général sur des ouvrages localisés, construits majoritairement en terre et couverts d'une couche végétalisée. Ils permettent le stockage temporaire des eaux de ruissellement diminuant ainsi les volumes d'eau en aval des bassins versants, et/ou l'infiltration dans les sols permettant de retenir une partie des polluants contenus dans les eaux.

De nombreuses études ont démontré la capacité de ces ouvrages à réduire les flux des éléments-traces métalliques (ETM), hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), nutriments, et matières en suspension essentiellement (Walaszek et al., 2018 ; Lange et al., 2020 ; Flanagan et al., 2018). Concernant le devenir des polluants dans les ouvrages, moins de recherches s'y sont intéressées. Pourtant, le devenir des contaminants sur le long terme (accumulation, relargage, dégradation et transformation) et le transfert éventuel de certains composés et sous-produits vers le sous-sol et la chaîne trophique présentent un intérêt environnemental et sanitaire. Le rôle de la flore microbienne dans les transformations observées en fait un maillon essentiel à considérer. Tous ces aspects présentent de réels enjeux en raison du risque environnemental et sanitaire associé à l'ouvrage et des coûts d'élimination des substrats et dépôts contaminés (LeFevre et al., 2012).

Parmi les dispositifs de plus en plus utilisés pour le traitement de ces eaux, on retrouve les filtres plantés de roseaux, dans lesquels les processus biogéochimiques du système eau / sol / plante contrôlent le volume d'eau et la rétention des polluants (Flanagan et al., 2018). Pour mieux connaître la performance et les enjeux de ces ouvrages, un filtre planté de roseaux a été construit dans le cadre du projet Européen LIFE-ADSORB par la Ville de Paris en 2019. Ce projet, centré sur la mise en œuvre et l'évaluation d'un biofiltre paysager dépolluant dans le bois de Boulogne (de 1300 m² environ), vise à réduire les charges polluantes d'eaux pluviales issues du boulevard périphérique, rejetées actuellement en Seine sans traitement. L'accent est notamment mis sur l'insertion d'un substrat innovant (@Rainclean) au sein du filtre permettant une réduction significative des micropolluants présents dans les eaux de ruissellement de voirie (Deshayes et al., 2017). Enfin, comprendre le rôle de la communauté microbienne colonisant ce dispositif dans l'abattement des polluants est également un objectif à atteindre.

Dans ce contexte, l'objectif principal de la thèse est d'identifier et de caractériser les mécanismes biogéochimiques de séquestration et relargage des principaux micropolluants du filtre planté de roseaux en vue de l'optimisation de la gestion dans le temps de ses composants. Ainsi, les principaux questionnements de recherche liés sont les suivants : (1) Où et comment sont séquestrés les micropolluants véhiculés par les eaux de ruissellement dans le filtre ? (2) Quels sont la stabilité et le risque de relargage de ces micropolluants à moyen et à court terme ? (3) Quel est le rôle des communautés microbiennes autochtones dans la transformation, la séquestration et l'inactivation des micropolluants dans le filtre ? (4) Quelles sont les filières possibles pour la gestion du substrat, des végétaux et des dépôts du filtre en fin de vie ?

Méthodologie. Pour répondre à ces objectifs, la thèse s'articulera autour de 4 actions. La première sera de caractériser la nature et le niveau de contamination des substrats, sédiments et végétaux du filtre au cours du temps. Pour cela, les concentrations en micropolluants organiques et métalliques seront évaluées dans les différents compartiments du filtre à différentes périodes. La seconde action évaluera le risque de relargage et de mobilité des ETM dans le temps. Cela se traduit par l'évaluation de leur mobilité dans le filtre, à l'aide d'extractions chimiques séquentielles et des mesures des paramètres cinétiques. La troisième action sera d'évaluer la stabilité des micropolluants organiques choisis (bisphénol-A (BPA), alkylphénols (AP), phtalates (PAE) et HAP), c'est-à-dire leur biodégradation dans l'ouvrage. Elle sera déterminée par des essais de biodégradabilité en mésocosmes en conditions contrôlées afin d'optimiser la biodégradation et en déterminer les paramètres cinétiques. Le dernier

objectif sera de caractériser les communautés microbiennes du filtre et leur dynamique dans le temps et dans l'espace, et de lier cette évolution à celles des transformations observées des micropolluants. Pour cela, les communautés microbiennes, leur biomasse, leurs performances et spécificités de biodégradation seront caractérisées par les techniques OMICS couplées à des mesures de biomasse microbienne et d'activités enzymatiques. Enfin, outre la compréhension et l'optimisation du fonctionnement du dispositif étudié, les résultats de la thèse serviront à alimenter les modèles mathématiques de transformation de polluants dans les dispositifs de traitement d'eau de ruissellement de type filtres plantés et à mieux connaître leur cycle de vie et les voies d'élimination des sous-produits contaminés (substrats et végétaux).

Résultats préliminaires. Parmi les récentes recherches concernant le devenir des micropolluants au travers des techniques alternatives en France, on peut citer Tedoldi (Tedoldi, 2017) et Flanagan (Flanagan, 2018). Leurs recherches ont montré que les zones les plus contaminées des ouvrages, en ETM et HAP, sont localisées dans la partie superficielle (les 10 à 40 premiers cm de l'ouvrage), et au niveau des points d'entrée d'eau. La répartition spatiale des autres micropolluants n'a pas encore été abordée. De plus, la rétention de la phase dissoute des micropolluants est généralement moins efficace que celle de la phase particulaire, conduisant à des concentrations élevées pour certains micropolluants présents sous forme dissoute comme le BPA, les AP et les PAE en sortie (Flanagan et al. 2018). Concernant la biodégradation des micropolluants organiques dans ces ouvrages, les études ont essentiellement porté sur celle des HAP (LeFevre et al., 2012 ; Leroy et al., 2015). La biodégradation des autres micropolluants organiques par les communautés microbiennes d'ouvrages est encore peu documentée. Seules des études traitant de leur biodégradation en milieu liquide existent, et elles ont dans la majorité des cas porté sur l'action d'un seul micro-organisme (souche pure) (Wang et al., 2014 ; Sakai et al., 2007), alors que la biodégradation et son efficacité sont l'œuvre de communautés diverses agissant souvent en synergie (Eio et al., 2014 ; Peng et al., 2015). Aujourd'hui, des études portant sur la biodégradation par des consortiums microbiens issus de sols d'ouvrages s'avèrent donc indispensables car elles reflèteraient l'action de la diversité des communautés réellement présentes dans l'écosystème.

Une première étude de la caractérisation des communautés microbiennes présentes dans un sol issu d'un ouvrage de gestion des eaux pluviales, et de l'évaluation de leur potentiel de biodégradation des micropolluants organiques (AP et BPA) par un accotement routier filtrant les eaux de ruissellement a été entreprise par Roux (Roux, 2019). Elle a permis de mettre au point dans un premier temps les méthodes expérimentales pouvant être mises en place pour évaluer un potentiel de biodégradation dans les substrats d'ouvrages. Elle a également montré une hétérogénéité de potentiels de biodégradation en fonction de la quantité d'eau de ruissellement reçue et selon la configuration de l'ouvrage. De tels paramètres seront donc à considérer lors de l'étude des potentiels de dégradation dans le filtre planté. Concernant l'étude microbiologique, si des différences d'activités enzymatiques totales ont été observées selon les volumes d'eau reçus et la configuration de l'ouvrage, aucune différence significative n'a été observée au niveau de la diversité fonctionnelle. La diversité génétique n'a pas encore été explorée. Biomasse microbienne, activités enzymatiques (notamment celles impliquées dans la biodégradation), diversité fonctionnelle et génétique sont autant de paramètres décrivant la qualité et la performance d'un ouvrage qui seront également étudiés dans le filtre planté de roseaux.

La présentation proposera de revenir plus en détail sur le dispositif de recherche, la méthodologie et les résultats issus d'études préliminaires.

BIBLIOGRAPHIE

- Chocat, B. 2008. Etat de l'art sur la gestion urbaine des eaux pluviales et leur valorisation. *Rapport d'étude. Convention ONEMA OIEau*. 36 p.
- Deshayes, S., D Tedoldi, et J Fabure. 2017. Deversoire d'orage Bugeaud - Etude pour l'optimisation de la constitution du filtre et définition des moyens de suivi de son fonctionnement. *Rapport d'étude*.
- Eio, E. J., Kawai, M., Tsuchiya, K., Yamamoto, S., & Toda, T. 2014. Biodegradation of bisphenol A by bacterial consortia. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 96, 166-173.
- Flanagan, K. 2018. *Evaluation de la rétention et du devenir d'un panel diversifié de micropolluants dans un ouvrage de biofiltration des eaux de ruissellement de voirie* (Thèse de doctorat, Paris Est). 357 p.
- Flanagan, K., Branchu, P., Boudahmane, L., Caupos, E., Demare, D., Deshayes, S., ... & Gromaire, M. C. 2018. Field performance of two biofiltration systems treating micropollutants from road runoff. *Water research*, 145, 562-578.
- Lange, K., Österlund, H., Viklander, M., & Blecken, G. T. 2020. Metal speciation in stormwater bioretention: Removal of particulate, colloidal and truly dissolved metals. *Science of The Total Environment*, 138121.
- LeFevre, G. H., Hozalski, R. M., & Novak, P. J. 2012. The role of biodegradation in limiting the accumulation of petroleum hydrocarbons in raingarden soils. *Water research*, 46(20), 6753-6762.
- Leroy, M. C., Legras, M., Marcotte, S., Moncond'Huy, V., Machour, N., Le Derf, F., & Portet-Koltalo, F. 2015. Assessment of PAH dissipation processes in large-scale outdoor mesocosms simulating vegetated roadside swales. *Science of the Total Environment*, 520, 146-153.
- Peng, Y. H., Chen, Y. J., Chang, Y. J., & Shih, Y. H. 2015. Biodegradation of bisphenol A with diverse microorganisms from river sediment. *Journal of hazardous materials*, 286, 285-290.
- Roux, J. 2019. *Caractérisation des communautés microbiennes autochtones des sols d'un ouvrage de gestion à la source des eaux pluviales, et évaluation de leur potentiel de biodégradation des micropolluants*

organiques. Rapport de stage de Master 2. Créteil : LEESU. 65 p.

- Sakai, K., Yamanaka, H., Moriyoshi, K., Ohmoto, T., & Ohe, T. 2007. Biodegradation of bisphenol A and related compounds by *Sphingomonas* sp. strain BP-7 isolated from seawater. *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*, 0612070212-0612070212.
- Tedoldi, D. 2017. *Mesure et modélisation de la contamination du sol dans les ouvrages de gestion à la source du ruissellement urbain* (Thèse de doctorat, Paris Est). 257 p.
- Walaszek, M., Bois, P., Laurent, J., Lenormand, E., & Wanko, A. 2018. Micropollutants removal and storage efficiencies in urban stormwater constructed wetland. *Science of the Total Environment*, 645, 854-864.
- Wang, Z., Yang, Y., Sun, W., & Xie, S. 2014. Biodegradation of nonylphenol by two alphaproteobacterial strains in liquid culture and sediment microcosm. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 92, 1-5.

DYNAMIQUE DU CUIVRE EN GESTION DES EAUX PLUVIALES URBAINES : SPÉCIATION ET MODÉLISATION DES TRANSFERTS

Du Phuc Tho Dang^{1, 2}, Béatrice Béchet^{1, 2}, Jean-Soro Liliane^{1, 2}

¹GERS-LEE, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, F-44344 Bouguenais, France

²IRSTV – CNRS FR2488

du-phuc-tho.dang@univ-eiffel.fr

Case à cocher pour le premier auteur :

- 1^{ère} année de thèse 2^{ème} année de thèse
 3^{ème} année de thèse 4^{ème} année de thèse ou plus
 Post-doctorat

Mots clés :

Eaux de ruissellement, sédiments, cuivre, spéciation, transferts

Résumé

Contexte et questions scientifiques

Les eaux de ruissellement en milieu urbain font partie d'une importante source diffuse de contaminants présents dans les milieux aquatiques terrestres, plus particulièrement le long du continuum terre-mer. La gestion des eaux de ruissellement est devenue l'une des préoccupations majeures, confortée au cours de ces dernières années par la Directive Cadre sur l'Eau (Directive 2000/60/CE). Différentes études portant sur des polluants des eaux de ruissellement ont montré des concentrations importantes en éléments trace métalliques Pb, Zn, Cd, Cr, Cu, Ni, etc., dépassant globalement les valeurs seuils des normes de qualité environnementales des eaux de surface (NQE) permettant d'assurer un bon état chimique d'une masse d'eau (Gaspero et al., 2014 ; LeFevre et al., 2015 ; Huber et al., 2016 ; Huber and Helmreich, 2016). Même si les concentrations en polluants dans les ouvrages de gestion des eaux de ruissellement subiront un effet de dilution au niveau de l'exutoire, les flux importants issus du milieu urbain entraînent des concentrations élevées dans des zones, comme les estuaires. Le cuivre (Cu) et le zinc (Zn) sont les deux éléments trace choisis fréquemment pour évaluer, comparer l'efficacité des traitements des eaux de ruissellement dans les ouvrages de gestion des eaux pluviales en milieu urbain (Ingvertsen et al., 2011). Ces deux éléments, Cu et Zn, causent 90% de la toxicité dans les expériences où des espèces aquatiques ont été exposées directement à des eaux de ruissellement routier (Kayhanian et al., 2008). Le cuivre est un oligo-élément indispensable pour les organismes vivants, pourtant, à forte dose, il a une action toxique par inhalation, ingestion, par voies cutanée et oculaire. Il a aussi un rôle antifongique lors de son usage dans la bouillie bordelaise en viticulture. Le cuivre présent dans l'environnement se retrouve à 97% dans le sol, quasiment à 3% dans les eaux et à 0,04% dans l'air (INERIS, 2005). En 2017, 92% des émissions atmosphériques de Cu en France métropolitaine provenaient des transports, dont 70% du transport routier (CITEPA, 2019). Les dépôts atmosphériques contribuent à 30-50% des teneurs de Cu dans les eaux de ruissellement (Wu et al., 1998).

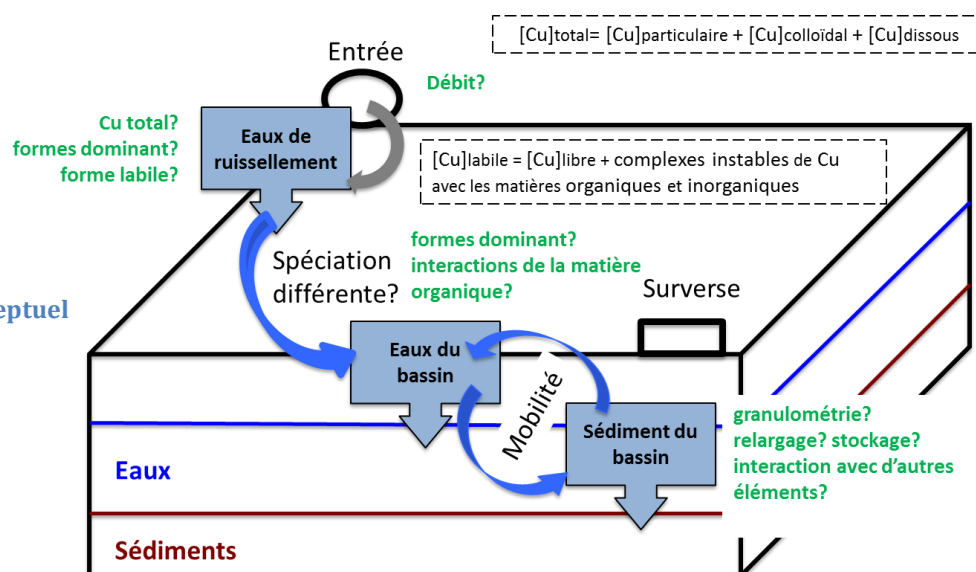
La spéciation des polluants a une forte influence sur leur réactivité aux interfaces des substrats et sur leur biodisponibilité. C'est un paramètre majeur dans l'étude de l'efficacité épuratoire des ouvrages de gestion des eaux pluviales. Le cuivre est un micropolluant inorganique, souvent présent sous forme particulière colloïdale, due à son association avec les matières en suspension des eaux et/ou avec d'autres fractions particulaires plus fines (Durin et al., 2007). La taille des particules joue un rôle important pour évaluer précisément la mobilisation, la déposition et la dispersion des substances métalliques potentiellement toxiques dans les écosystèmes urbains (Unda-Calvo et al., 2019). Les éléments grossiers de taille 250-2000µm, issus des surfaces urbanisées, pourraient être désagrégés

pendant les précipitations et les ruissellements. Leur contribution au relargage des éléments trace est alors différée selon les événements pluvieux et les sites d'étude (Borris et al., 2016). Une forte corrélation entre la concentration de cuivre et les fractions fines <20µm des sédiments déposés sur la route de la ville de Wels, en Autriche, a été détectée lors de l'étude menée par Lanzerstorfer (2018). Il est aussi important de s'intéresser à la proportion des particules de taille nanométrique dans les ruissellements en milieu urbain à cause de leurs fortes concentrations en polluants, de leurs mobilités et de leurs biodisponibilités (Wang et al., 2017).

Les études sur le transport colloïdal de polluants métalliques en assainissement routier (Durin et al., 2007) et du rôle des sédiments organiques sur le fonctionnement hydrodynamique des bassins d'infiltration d'eau de ruissellement (Anaïs Coulon, 2012) effectuées sur le bassin de Cheviré ont mis en évidence la nécessité de prendre en compte à la fois le polluant métallique et des matières organiques dans l'étude de la dynamique du cuivre. Le travail méthodologique de Durin qui ne concerne que des conditions saturées, a montré l'importance des cycles de séchage/ré-humectation du sédiment, de variation de l'état de saturation du milieu poreux, dans le transport des polluants sous forme colloïdale. Le rôle des particules organiques dans la spéciation du cuivre est une première grande question à étudier. La seconde question abordée est celle de la modélisation représentant les transferts du cuivre au sein d'un ouvrage de gestion des eaux de ruissellement couplant des flux hydriques avec la géochimie du milieu, afin de mieux appréhender le comportement des micropolluants et de proposer des outils adaptés à l'évaluation des risques en milieu urbain. La figure 1 présente un schéma conceptuel du transfert du cuivre et positionne les questions scientifiques.

Matériel et méthode

Figure 1: Schéma conceptuel du transfert de Cu



Afin de répondre aux questions posées, le travail se base sur l'étude des trois composantes principales dans le transfert du cuivre : les eaux de ruissellement, les eaux du bassin et le sédiment (Fig.1). Dans un premier temps, les flux du cuivre au sein d'un bassin de rétention et d'infiltration seront étudiés. Le bassin d'étude situé au sud du pont de Cheviré à Nantes recueille les eaux de ruissellement de la partie sud du pont. L'acquisition des données des eaux et de sédiments doit tenir compte des propriétés hydrodynamiques du bassin, du régime hydrologique du site d'étude afin de différencier les conditions saturées et non saturées. Comme le bassin est situé en milieu urbain, les apports atmosphériques jouent un rôle important dans la dynamique du cuivre dans les eaux de ruissellement puisque les émissions proviennent principalement du trafic automobile (Gonzalez et al., 2016). La répartition du cuivre entre différentes tailles granulométriques des échantillons d'eaux et sédiments doit être mesurée. Les

concentrations de Cu des échantillons mis en solution seront mesurées en ICP-MS. La spéciation du cuivre sera étudiée dans un second temps. La méthode de micro-fluorescence des rayons X pourrait être appliquée pour évaluer l'association de Cu avec d'autres éléments du sédiment. Chaque ETM ayant un comportement propre avec les différentes phases porteuses, la complémentarité de deux types d'extractions séquentielles et cinétiques est essentielle pour une meilleure compréhension de la distribution des ETM entre les phases solides (Mufleh et al., 2010). L'évolution de la spéciation du cuivre au sein du bassin avec les paramètres influençant, comme le pH, la température, la force ionique, le potentiel redox et aussi la matière organique dissoute, sera étudiée. La détermination de la spéciation pourrait être réalisée en utilisant une technique spectroscopique EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure) et/ou μ EXAFS (Panfili, 2004). La fraction labile des complexes du cuivre en milieu aquatique pourrait être estimée en appliquant une technique par diffusivité gradient in thin film (DGT) (Ferreira et al., 2013, Hayman et al., 2019). La modélisation des transferts de cuivre, dans un troisième temps, sera étudiée par un modèle de flux puis en fonction des résultats sur la spéciation du cuivre, nous pourrions envisager de modéliser les transferts couplés hydrodynamique- géochimie en utilisant le code HP1 (couplage du code Hydrus 1D-un modèle d'écoulement et de transport avec le modèle Phreeqc-un code de calcul géochimique ..

Résultats attendus et conclusion

Les résultats attendus des expérimentations sont des données (1) de la répartition physico-chimique du cuivre des eaux de ruissellement au sein d'un bassin de rétention et d'infiltration, (2) des transferts de Cu entre les deux matrices eaux et sédiments.. Ces données pourront servir à comprendre le flux global du cuivre dans un ouvrage de gestion des eaux pluviales proche de la source, en présence de matière organique abondante. Le travail contribuera à la compréhension des flux de cuivre dans le continuum terre-mer en renseignant l'apport du territoire urbain.

Bibliographie

- Borris, M., Österlund, H., Marsalek, J., Viklander, M., 2016. Contribution of coarse particles from road surfaces to dissolved and particle-bound heavy metal loads in runoff: A laboratory leaching study with synthetic stormwater. *Science of The Total Environment* 573, 212–221. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.062>
- CITEPA, 2019. Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2017. Rapport national d'inventaire/Format Secten.
- Coulon, Anaïs, 2102. Rôle des sédiments organiques sur le fonctionnement hydrodynamique des bassins d'infiltration d'eaux pluviales. Thèse: Agrocampus Ouest, Université Nantes Angers Le Mans, 2012.
- Durin, B., Béchet, B., Legret, M., Le Cloirec, P., 2007. Role of colloids in heavy metal transfer through a retention-infiltration basin. *Water Science and Technology* 56, 91–99. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.762>
- Ferreira, D., Ciffroy, P., Tusseau-Vuillemin, M.-H., Bourgeault, A., Garnier, J.-M., 2013. DGT as surrogate of biomonitors for predicting the bioavailability of copper in freshwaters: An ex situ validation study. *Chemosphere* 91, 241–247. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.10.016>
- Gasperi, J., Sebastian, C., Ruban, V., Delamain, M., Percot, S., Wiest, L., Mirande, C., Caupos, E., Demare, D., Kessoo, M.D.K., Saad, M., Schwartz, J.J., Dubois, P., Fratta, C., Wolff, H., Moilleron, R., Chebbo, G., Cren, C., Millet, M., Barraud, S., Gromaire, M.C., 2014. Micropollutants in urban stormwater: occurrence, concentrations, and atmospheric contributions for a wide range of contaminants in three French catchments. *Environ Sci Pollut Res* 21, 5267–5281. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2396-0>

- Gonzalez, R.O., Strekopytov, S., Amato, F., Querol, X., Reche, C., Weiss, D., 2016. New Insights from Zinc and Copper Isotopic Compositions into the Sources of Atmospheric Particulate Matter from Two Major European Cities. *Environ. Sci. Technol.* 50, 9816–9824. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00863>
- Hayman, N.T., Rosen, G., Strivens, J.E., 2019. Evaluating the efficacy of DGT to quantify copper in stormwater at end-of-pipe. *Chemosphere* 235, 1125–1133. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.07.009>
- Huber, M., Helmreich, B., 2016. Stormwater Management: Calculation of Traffic Area Runoff Loads and Traffic Related Emissions. *Water* 8, 294. <https://doi.org/10.3390/w8070294>
- Huber, M., Welker, A., Helmreich, B., 2016. Critical review of heavy metal pollution of traffic area runoff: Occurrence, influencing factors, and partitioning. *Science of The Total Environment* 541, 895–919. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.033>
- Ingvertsen, S.T., Jensen, M.B., Magid, J., 2011. A Minimum Data Set of Water Quality Parameters to Assess and Compare Treatment Efficiency of Stormwater Facilities. *J. Environ. Qual.* 40, 1488–1502. <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0420>
- INERIS, 2005. Cuivre et ses dérivés. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques. INERIS-DRC -02025590-02DF54.doc, version N 1-5-mars 2005.
- Kayhanian, M., Stransky, C., Bay, S., Lau, S.-L., Stenstrom, M.K., 2008. Toxicity of urban highway runoff with respect to storm duration. *Science of The Total Environment* 389, 386–406. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.08.052>
- Lanzerstorfer, C., 2018. Heavy metals in the finest size fractions of road-deposited sediments. *Environmental Pollution* 239, 522–531. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.063>
- LeFevre, G.H., Paus, K.H., Natarajan, P., Gulliver, J.S., Novak, P.J., Hozalski, R.M., 2015. Review of Dissolved Pollutants in Urban Storm Water and Their Removal and Fate in Bioretention Cells. *J. Environ. Eng.* 141, 04014050. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000876](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000876)
- El-Mufleh A., **Béchet B.**, Ruban V., Legret M., Clozel B., Barraud S., Gonzalez-Merchan C., Bedell J.P., and Delolme C., Review on Physical and Chemical Characterizations of Contaminated Sediments from Urban Stormwater Infiltration Basins within the Framework of the French Observatory for Urban Hydrology (Soere Urbis), *Environmental Science and Pollution Research*, 21 (8): 5329-5346
- Panfil, F., 2004. Etude de l'évolution de la spéciation du zinc dans la phase solide d'un sédiment de curage contaminé, induit par phytostabilisation 227.
- Unda-Calvo, J., Ruiz-Romera, E., Fdez-Ortiz de Vallejuelo, S., Martínez-Santos, M., Gredilla, A., 2019. Evaluating the role of particle size on urban environmental geochemistry of metals in surface sediments. *Science of The Total Environment* 646, 121–133. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.172>
- Wang, Q., Zhang, Q., Wu, Y., Wang, X.C., 2017. Physicochemical conditions and properties of particles in urban runoff and rivers: Implications for runoff pollution. *Chemosphere* 173, 318–325. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.066>
- Wu, J.S., Allan, C.J., Saunders, W.L., Evett, J.B., 1998. Characterization and Pollutant Loading Estimation for Highway Runoff. *Journal of Environmental Engineering* 124, 584–592. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1998\)124:7\(584\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1998)124:7(584))

La signature géochimique urbaine des sédiments de bassins d'infiltration et de rétention des eaux pluviales

Julien COUVIDAT^a, Qiufang Zhan^a, Vincent CHATAIN^a, Cécile DELOME^a, Mathieu GAUTIER^a, Gislain LIPEME KOUYI^a, Thierry WINIARSKI^b

^a Univ Lyon, INSA Lyon, Laboratoire DEEP (Déchets Eaux Environnement Pollutions), EA 7429, 69621 Villeurbanne, France

^b Univ Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, ENTPE, UMR5023 LEHNA, F-69622 Villeurbanne, France

Auteur correspondant : julien.couvidat@insa-lyon.fr

Mots-clés : Sédiments urbains, Réactivité géochimique, Eléments Traces Minéraux, Polluants organiques, Gestion sédimentaire

1. Résumé

Avec l'urbanisation croissante, les sols sont imperméabilisés de manière accrue, rendant la gestion de l'eau indispensable au bon fonctionnement des environnements urbains. Les eaux de pluie en particulier nécessitent une attention particulière du fait des risques d'inondation ou de pollution des milieux récepteurs. L'utilisation du stockage temporaire dans des bassins de rétention et leur infiltration est une technique développée depuis les années 90 dans le cadre de la gestion alternative des eaux pluviales.

A un rôle d'écrêtage des pics de débit pour limiter les inondations, un second rôle de dépollution des eaux infiltrées s'ajoute, autorisant le rechargement des nappes sous-jacentes de manière sécuritaire. De même que pour la plupart des ouvrages en eau, ces bassins sont soumis à un phénomène d'accumulation de sédiments entraînés depuis les surfaces lessivées. Dans les ouvrages d'infiltration, ces sédiments sont susceptibles de créer un colmatage en étant piégés dans les couches superficielles du bassin, ou de contaminer les strates sous-jacentes par migration de particules fines et de colloïdes.

La gestion usuelle de ces ouvrages est de réaliser l'extraction mécanique des sédiments. Cette approche pose question quant à la mise en œuvre opérationnelle et au devenir des matières enlevées, du fait de la classification réglementaire comme déchets lorsque les sédiments sont sortis des ouvrages (article L 541-1 du Code l'Environnement). Ce statut limite fortement les possibilités de réutilisation ultérieures, et dans une majorité des cas contraint le traitement et/ou le stockage en décharges adaptées. Ces modes de gestion courants sont un coût évident pour les collectivités et les gestionnaires, alors que ces sédiments peuvent également constituer une ressource minérale potentielle dans un contexte de soutenabilité de l'exploitation des ressources naturelles.

Les milieux urbains qui constituent le bassin versant de ces ouvrages sont des sources multiples et très diversifiées de contaminants à la fois organiques et minéraux, ces contaminants se retrouvant ensuite dans les sédiments accumulés au fond des ouvrages. Les sédiments excavés sont ainsi le plus souvent enrichis en éléments traces minéraux (ETM - Fe, Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, Ti, Ni, Cd...), et en polluants organiques (HAP, PCB, PBDE, dioxines, alkylphénols, pesticides...) [1-6]. Bien que diversement caractérisés, l'approfondissement des connaissances du comportement géochimique et des spécificités de ces sédiments en constitue un premier enjeu, notamment à travers une étude prenant en compte une grande variété de bassins. Un second enjeu concerne l'identification des filières de gestion et de valorisation de ces résidus, encore mal déterminées aujourd'hui. Ces

sédiments sont aujourd'hui souvent mélangés aux boues des stations d'épuration, subissant par la suite un lavage susceptible de laisser filtrer des particules contaminés.

Les attentes suscitées par la résolution de ces problématiques sont à l'origine du projet DÉsir (Développement et évaluation de stratégies de gestion durable des sédiments de bassins d'infiltration et de rétention des eaux pluviales) lancé fin 2019, pour une durée de deux ans en partenariat avec l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse. L'amélioration des connaissances sur le fonctionnement géochimique de ces interfaces sédimentaires urbaines (composition géochimique, réactivité, mobilité potentielle) doit permettre dans un second temps de proposer les solutions de gestion des ouvrages et des sédiments les plus adaptées. Au-delà de la simple fonction de gestion des ressources en eau, la notion de « fonction » de ces ouvrages doit permettre de prendre en compte les impacts positifs des sédiments en tant que constituants des bassins, limiter leur excavation, et favoriser les filières de valorisation les plus adaptées le cas échéant.

Dans ce contexte, l'étude porte sur les sédiments d'un ensemble de bassins majoritairement issus de l'Est Lyonnais (Rhône – France). Une caractérisation géochimique de ces sédiments sera présentée, suivant une approche expérimentale pluridisciplinaire (spéciation des ETM, mobilisation potentielle et réactivité, importance du Fe dans la géochimie globale) suivi d'une lecture statistique du jeu de données produit [7-9].

2. Remerciements

Cette recherche est effectuée dans le cadre du projet DESIR, qui s'inscrit dans l'accord-cadre de coopération entre l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse (RMC) et l'observatoire de terrain en hydrologie urbaine (OTHU).

De plus, ce travail a été réalisé au sein de l'EUR H2O'Lyon (ANR-17-EURE-0018) de l'Université de Lyon (UdL), dans le cadre du programme "Investissements d'Avenir " géré par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR).

3. Références

- [1] T. WINIARSKI, J.P. BEDELL, C. DELOLME, Y. PERRODIN, *Hydrogeol J*, 2006, 14 (7), 1244–1251
- [2] C. DELOLME, T. LEGENDRE, M. GAUTIER, V. CHATAIN, C. GONZALEZ-MERCHAN, et al. *European Geosciences Union (EGU) General Assembly*, 2015, Vienna, Austria. 17, *Geophysical Research Abstracts*.
- [3] A.-L. BADIN, J.-P. BEDELL, C. DELOLME, *J. of Soils and Sediments*, 2009, 9, 653-663.
- [4] B. CLOZEL, V. RUBAN, C. DURAND, P. CONIL, *Appl Geochem*, 2006, 21:1781–1798
- [5] A. EL-MUFLEH, B. BÉCHET, V. RUBAN, M. LEGRET, B. CLOZEL, S. BARRAUD et al. *Env Sci Pollut Res*, 2014, 21, 5329-5346
- [6] C. DRAPEAU, C. DELOLME, V. CHATAIN, M. GAUTIER, D. BLANC, M. BENZAAZOUA, L. LASSABATERE, *Open Journal of Soil Science*, 2017, 7(11), 347-365
- [7] V. CHATAIN, M. BENZAAZOUA, M. LOUSTAU CAZALET, H. BOUZHACHAH, C. DELOLME, M. GAUTIER, D. BLANC, C. DE BRAUER, *Environ Sci Pollut R.*, 2013, 20 (1) 1-9
- [8] B. KIM, M. GAUTIER, A. SIMIDOFF, C. SANGLAR, V. CHATAIN, P. MICHEL, R. GOURDON, *J of Env Manag*, 2016, 183, 175-181
- [9] J. COUVIDAT, V. CHATAIN, H. BOUZHACHAH, M. BENZAAZOUA, *Sci Tot Env*, 2018, 624, pp.323-332.

DEVENIR DES MICROPOLLUANTS ORGANIQUES DANS LES SOLS DES OUVRAGES DE GESTION A LA SOURCE DES EAUX PLUVIALES : INTERACTIONS DIVERSITE MICROBIENNE ET BIODEGRADABILITE DES MICROPOLLUANTS

Andréa Oudot

1^{ère} année de thèse

andrea.oudot@u-pec.fr

LEESU (Laboratoire Eau, Environnement et Systèmes Urbains)
Université Paris-Est Créteil. Faculté des Sciences et Technologie.
61 avenue du Général de Gaulle
94010 Créteil Cedex. France



MOTS CLES

Ouvrages de gestion des eaux pluviales à la source, biodégradation, micropolluant, caractérisation microbienne

RESUME

Introduction

La gestion à la source des eaux pluviales dans des ouvrages favorisant la filtration par le sol naturel ou un substrat adapté (ouvrages d'infiltration ou de biorétention) s'avère un moyen efficace pour lutter contre la pollution diffuse des milieux aquatiques (Flanagan et *al.*, 2018). Elle permet en effet la rétention des micropolluants dans la couche superficielle du substrat. Dans le cas des métaux, cela conduit à une augmentation progressive des teneurs de la couche de surface du sol, essentiellement dans la zone d'arrivée d'eau (Tedoldi et *al.*, 2017). Dans le cas des micropolluants organiques, des processus de biodégradation des polluants retenus dans cette couche de sol/substrats entrent en jeu, et pourraient limiter la vitesse d'accumulation.

Le comportement des micropolluants organiques dans ces ouvrages (accumulation, dégradation, relargages possibles) reste cependant encore peu documenté (Le Fevre et *al.*, 2015). De rares études ont été menées sur la biodégradation des hydrocarbures et des HAP dans le sol des ouvrages de filtration/infiltration (Leroy et *al.*, 2015). Elles soulignent le lien existant entre la nature du couvert végétal, la diversité et les fonctionnalités des communautés microbiennes en place et le devenir des polluants organiques.

L'importance de ce phénomène de biodégradation pour différents micropolluants organiques, l'analyse des facteurs qui le conditionnent, et ses conséquences en termes de transfert du polluant ciblé ou de ses produits de dégradation restent insuffisamment documentés à ce jour. Une meilleure connaissance des communautés microbiennes se développant dans les ouvrages et une meilleure compréhension des processus microbiens en jeu sont pourtant indispensables pour améliorer la conception et la gestion de ces ouvrages.

L'objectif de ce travail de thèse qui prend place au sein de la phase 5 du projet OPUR (Observatoire d'hydrologie urbaine en ile de France) est donc d'étudier les mécanismes biologiques qui prennent place dans les sols de ces ouvrages. Etudier les mécanismes de biodégradation des micropolluants par les microorganismes au sein des ouvrages afin de vérifier leur efficacité et pour permettre à terme une meilleure gestion.

Approche envisagée

Le travail de cette thèse se repartira en deux grandes parties :

Partie 1 : Caractérisation de la diversité fonctionnelle et génétique des communautés microbiennes présentes dans les sols des ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales.

Ce travail s'appuiera sur l'échantillonnage de sols dans un panel diversifié d'ouvrages d'infiltrations, en service depuis plusieurs années. Il s'agit d'évaluer la biomasse présente dans ces sols, de caractériser les communautés microbiennes en termes de diversité génétique (approche métabarcoding) et de diversité fonctionnelle (tests MicroRespTM), de relier cette composition à la nature (propriétés physiques et agronomiques, teneurs en nutriments et en polluants) et aux conditions du sol (humidité, température). Afin de mieux déterminer les facteurs explicatifs des variations des communautés observées, les échantillons seront prélevés dans des ouvrages contrastés en distinguant dans chaque ouvrage 2 à 3 zones correspondant à des fréquences d'inondation et donc des niveaux de contamination différents. Les prélèvements pourront au besoin être répétés au cours de l'année afin de couvrir des conditions climatiques différentes. Pour le choix des sites et des points de prélèvements, on capitalisera sur les connaissances précédemment acquises pour une dizaine d'ouvrages d'infiltration dans le cadre de la thèse de Damien Tedoldi (2017).

Partie 2 : Etablissement, au moyen d'essais en batch au laboratoire, des cinétiques de biodégradation ainsi que des expériences en colonnes

Le potentiel de dégradation des micropolluants organiques par les communautés microbiennes présentes dans les sols sera tout d'abord évalué à partir d'essais en batch. Trois sols, correspondants à 3 communautés microbiennes différentes, seront retenus sur la base des résultats de la phase 1. Des extraits de sols contenant ces communautés microbiennes représentatives des sols seront mis en contact dans des batch avec de l'eau dopée en concentrations connues de micropolluants. Trois à quatre molécules modèles, choisies parmi les micropolluants organiques emblématiques du ruissellement urbain, et présentant des propriétés physico-chimiques différentes (temps 1/2 vie, Kow) seront sélectionnées. Le suivi de la dégradation des polluants dans le batch se fera par des analyses ciblées et non ciblées, afin d'identifier la formation éventuelle de métabolites (cinétiques d'un mois, 4 points de mesure dans le temps). Il sera associé à un suivi du métabolisme bactérien (par mesure de la production de CO₂) et des paramètres physico-chimiques du milieu (pH, Eh). Une étude spécifique de l'effet de la température sur la cinétique de dégradation sera réalisée pour un des sols étudiés.

Suite aux essais en batch, des expériences en colonnes seront réalisées afin de retrouver des conditions plus proches de la réalité.

Bibliographie

Flanagan, K., Branchu, P., Boudahmane, L., Caupos, E., Demare, D., Deshayes, S., Dubois, P., Meffray, L., Partibane, C., Saad, M., Gromaire, M.-C., 2018. Field performance of two biofiltration systems treating micropollutants from road runoff. *Water Res.* 145, 562–578. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.08.064>

Le Fevre, G.H., Paus, K.H., Natarajan, P., Gulliver, J.S., Novak, P.J., Hozalski, R.M., 2015. Review of dissolved pollutants in urban storm water and their removal and fate in bioretention cells. *J. Environ. Eng. U. S.* 141. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000876](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000876)

Leroy, M.C., Legras, M., Marcotte, S., Moncond'huy, V., Machour, N., Le Derf, F., Portet-Koltalo, F., 2015. Assessment of PAH dissipation processes in large-scale outdoor mesocosms simulating vegetated road-side swales. *Sci. Total Environ.* 520, 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.020>

Tedoldi, D., Chebbo, G., Pierlot, D., Branchu, P., Kovacs, Y., Gromaire, M.-C., 2017. Spatial distribution of heavy metals in the surface soil of source-control stormwater infiltration devices – Inter-site comparison. *Sci. Total Environ.* 579, 881–892. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.226>

STRATEGIES D'INFILTRATION DES EAUX PLUVIALES

TESTS DE STRATEGIES DE DECONNEXION DES EAUX PLUVIALES A L'ECHELLE D'UN BASSIN VERSANT POUR REDUIRE LES DEVERSEMENTS

Violeta A. Montoya-Coronado¹, Hélène Castebrunet¹, Gislain Lipeme-Kouyi¹

¹ Univ Lyon, INSA Lyon, DEEP, EA7429, 69621 Villeurbanne, France, violeta-alexandra.montoya-coronado@insa-lyon.fr, helene.castebrunet@insa-lyon.fr, gislain.lipeme-kouyi@insa-lyon.fr

Abstract :

La gestion des eaux pluviales est un des enjeux majeurs de la Métropole de Lyon. Un des systèmes qui permet de gérer ces eaux pluviales est le réseau unitaire. Cependant, ce système unitaire peut être à l'origine de plusieurs dysfonctionnements (inondations par débordement du réseau, déversements et pollution des milieux aquatiques).

La déconnexion des eaux pluviales du réseau unitaire est une stratégie utilisée pour réduire les volumes déversés et l'impact associé sur les milieux récepteurs. Les bénéfices de ces stratégies sont évalués à l'aide des critères de conformité de l'autosurveillance réglementaire fixés dans l'arrêté du 21 juillet 2015 (réduction de la fréquence des déversements, réduction des volumes déversés, réduction des flux de polluants déversés). Le test de différents scénarios de déconnexion peut se faire en utilisant la modélisation hydrologique à l'échelle d'un territoire donné.

Cette étude a pour objectif de tester plusieurs stratégies de déconnexion dans le but de réduire le nombre et le volume de déversements en temps de pluie (critères fixés par l'arrêté du 21 juillet 2015). Les stratégies testées sont la désimperméabilisation d'un pourcentage de surface imperméable connectée au réseau unitaire et l'abattement des 15 premiers millimètres de pluie. L'efficacité de ces stratégies sera évaluée dans le cadre d'un scénario d'augmentation de la population. L'évaluation de ces différentes stratégies sera réalisée à l'aide de deux indicateurs annuels (fréquence de déversement et volume).

Ces différentes stratégies de déconnexion ont été testées sur le bassin versant d'Ecully situé dans la banlieue ouest de Lyon. Ce bassin versant résidentiel, d'une surface de 245 ha, est drainé par un réseau d'assainissement unitaire et équipée de cinq déversoirs d'orage (DO) dont celui de Valvert situé à l'exutoire. Ce DO a été instrument   et surveillé par l'OTHU (Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine) entre 2002 et 2020. L'évaluation des différentes stratégies a été réalisée à l'aide des simulations hydrologiques réalisées par le logiciel CANOE (<http://www.canoe-hydro.com>). Le modèle CANOE a été calé et validé au préalable en exploitant les données OTHU sur 2007 et 2008 (Métadier, 2012). Trois scénarios de déconnexion ont été évalués : diminutions de la surface imperméable de 5% et 10% et abattement des 15 premiers millimètres de pluies tombées sur le bassin versant. L'efficacité de ces stratégies a été testée sur un scénario futuriste : une augmentation de la population en 50 ans et une augmentation de 10% des surfaces imperméables connectées représentant l'accroissement de l'urbanisation.

Les premiers résultats montrent que la stratégie fondée sur l'abattement des 15 premiers millimètres de pluie permet de réduire la fréquence de déversement de 40 à 15 par an et le volume annuel de près de 56 %, tandis que les scénarios de désimperméabilisation de 5% et 10 % de la surface imperméable directement connectée au réseau entraînent 7 déversements en moins pour les deux scénarios et une réduction des volumes déversés annuels de 15% et 32% respectivement. Ces trois stratégies de déconnexion appliquées à un scénario futur prenant en compte une augmentation de la population et des surfaces imperméables du bassin versant montre des résultats similaires, démontrant la robustesse de cette stratégie face à une urbanisation croissante.

La prochaine étape de cette étude serait d'étudier des scénarios de changements globaux plus complets, en termes de changement climatique, d'urbanisation et de croissance démographique.

MOTS CLES : Réseau unitaire, déconnexion des eaux pluviales, désimperméabilisation, gestion des eaux pluviales.

Evaluation des temps caractéristiques de fonctionnement hydrodynamique des bassins de rétention et d'infiltration :

Intérêts croisés de la modélisation 0D/3D et d'une métrologie adaptée

Manal DIL¹, Angel MANJARRES², Matthieu DUFRESNE², Adrien WANKO¹

¹ ICube, UMR 7357, ENGEES, CNRS, Université de Strasbourg, 2 rue Boussingault, 67000 Strasbourg, France

² 3D EAU, 21 rue Jacobi-Netter 67200 STRASBOURG

Introduction

Les méthodes de gestion des eaux pluviales en milieu urbain visent habituellement à évacuer les eaux sur des distances importantes dans des délais courts. La croissance des périphéries urbaines pousse ces logiques à leurs limites par l'accroissement non maîtrisé de l'imperméabilisation. Une autre limite, économique cette fois, s'avère parfois être un facteur limitant très contraignant pour les aménageurs publics et ce dans un contexte réglementaire toujours plus strict et obligatoire. Le constat de ces limites (distance, durée d'évacuation, impacts sur les milieux, coût) souligne l'importance d'élargir le spectre des méthodes de gestion des eaux pluviales.

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE, 2000) et l'ensemble des dispositifs réglementaires en matière de protection des eaux superficielles et souterraines constituent à l'échelle européenne un arsenal législatif important. Devant les limites des logiques de gestion des eaux, ces dispositifs réglementaires tendent à favoriser des techniques de gestion in situ, sous forme par exemple d'infiltration des eaux de ruissellement, connues sous le nom de techniques alternatives. Répondant aux problèmes de gestion des volumes, de réduction des débits, de limitation du lessivage de contaminants, de charge en matières en suspension transportées, ces techniques s'avèrent également très rentables d'un point de vue économique car autonomes vis-à-vis des réseaux existants, flexibles dans leur aménagement et leur destination d'usages. Les nouveaux espaces aménagés pour la gestion de l'eau peuvent jouer un rôle structurant et paysager. Ils peuvent constituer des espaces de vie collectifs (jardins, terrains de sport...) et donnent à l'eau une vraie place dans la ville et la société.

Dans ce contexte, grâce au financement de l'Agence de l'Eau Rhin Meuse, un consortium associant des laboratoires de recherche, l'ENGEES et l'Eurométropole de Strasbourg s'est constitué en vue d'une expertise technique et scientifique des bassins de rétention et d'infiltration recevant les eaux pluviales routières de la départementale RD45 à Wolfisheim. Cette communication fait un focus sur le volet hydrodynamique dont l'objectif est i) de proposer une méthodologie de suivi hydrodynamique s'appuyant sur une modélisation 0D et 3D associée à une métrologie adaptée, ii) de déterminer un bilan complet des flux hydrodynamiques transitant à travers ces bassins, ii) de définir et d'évaluer des temps caractéristiques de fonctionnement hydrodynamique de ces ouvrages.

Matériels et méthodes

Présentation du site

Cette étude concerne 2 des quatre filières d'infiltration des eaux de ruissellement issues de la RD 45 (coordonnées GPS en Lambert 2 - filière no 1 : X = 991023,65 m et Y = 2411866,73 m) qui récupèrent la totalité des eaux de voirie. L'hydrogéologie sous-jacente est constituée du Grand système aquifère Plio-Quaternaire de la plaine d'Alsace et du Grand domaine hydrogéologique Oligocène du Fossé Rhénan (SIGES Aquifère rhénan). Les profondeurs de la nappe au droit du site sont comprises entre 12 et 14 m. Les 2 filières sont composées chacune : d'un bassin de rétention (120m² et 142m²) étanchéifié, dimensionné pour une pluie biennale et équipé d'un «peigne végétal» puis d'un bassin d'infiltration (210 m² et 360 m²) végétalisé avec des espèces spécifiques (joncs des chaisiers, baldingères, iris des marais et roseaux), dimensionné pour une pluie décennale. Une voie de contournement permet de protéger le premier bassin le cas échéant.

Instrumentation du site

Les paramètres météorologiques du site sont suivis grâce à une station météo in situ (ADCON, Klosterneuburg, Autriche). Des capteurs ultrason (IJINUS) de mesure de hauteur d'eau ont été installés en amont et aval des déversoirs compris dans les regards amont de chaque bassin. Des infiltromètres double anneau ont été utilisés pour la détermination des vitesses de percolation des bassins d'infiltration.

Méthodologie

La caractérisation des évènements pluvieux en termes de durée, hauteur de lame d'eau, durée de temps sec, intensité moyenne/maximale, période de retour a été réalisée à partir de la définition d'un évènement pluvieux de Sebastian (2002), et des coefficients de Montana fournis par l'Eurométropole de Strasbourg et. Par la suite, le calcul des bilans hydriques des bassins de rétention et d'infiltration a nécessité la connaissance de différents écoulements :

- i. Les flux de ruissèlement de la voirie. Ils sont déterminés au terme d'un processus en 4 phases : un relevé topographique suivi d'une analyse hydraulique pour le positionnement des capteurs ; l'installation des supports et capteurs ultrasons dans les regards et en entrée du bassin étanche ; l'élaboration des lois hauteurs-débits au niveau des déversoirs à l'aide d'une modélisation 3D (figure 1) en entrée du bassin étanche et OD en entrée du bassin d'infiltration ; et enfin la vérification et la validation des flux estimés.
- ii. Les flux d'évaporation et d'évapotranspiration à l'aide respectivement des formules de Rohwer, de Penman-Monteith et des données de la station météo
- iii. Les flux de précipitations directes à l'aide des caractéristiques des bassins et des données météo
- iv. Les flux d'infiltration grâce aux tests d'infiltromètres doubles anneaux réalisés à différentes locations des bassins d'infiltration.

Dès lors les bilans hydriques connus, la détermination des temps caractéristiques de fonctionnement hydrodynamique de ces ouvrages permettra une gestion optimale. Il s'agit : des temps d'alimentation, des temps de vidange, des temps d'infiltration qui sont comparés aux temps caractéristiques des évènements pluvieux

Résultats et discussion

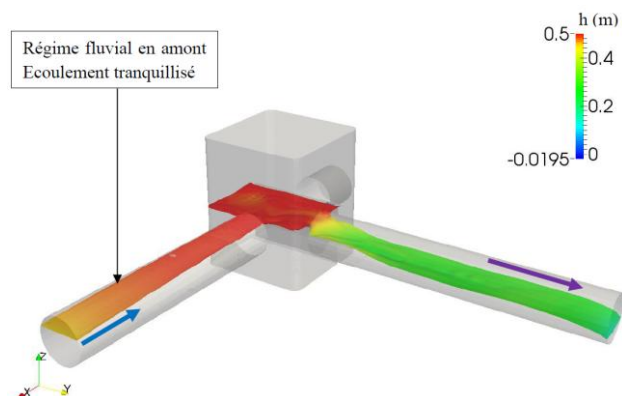


Figure 1 : Modélisation 3D des écoulements dans le regard amont du bassin étanche ($Q_{\text{amont}} = 0.24\text{m}^3/\text{s}$)

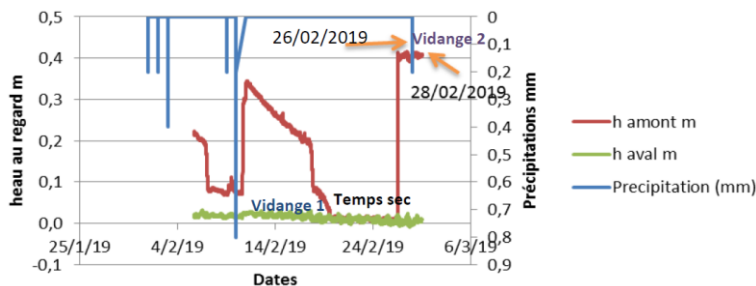


Figure 2 : Illustration des temps caractéristiques d'évènement pluvieux et d'alimentation et de vidange du bassin étanche

Outre l'estimation des flux de ruissèlement des voiries, la modélisation 3D a permis de déterminer la nature du fonctionnement hydraulique des déversoirs (noyés ou dénoyés) et par conséquent les sollicitations du by-pass, ainsi que la nature des écoulements (en charge ou à surface libre) dans les conduites d'amenée des regards amont et la conduite d'alimentation du bassin étanche. La propagation des incertitudes de mesures à l'estimation des flux a permis de mettre en évidence le fait que le calcul des volumes ruisselés est d'autant plus précis que la différence des hauteurs amont et aval du regard amont du bassin de rétention est supérieure à 5 cm. Le cas échéant, une estimation théorique des flux serait préférable. Les flux évaporés et évapotranspirés sont négligeables par rapport aux flux d'infiltration. Les durées de vidange des bassins étanches (figure 2) sont relativement très lentes par rapport aux durées d'alimentations et aux temps caractéristiques des évènements pluvieux : en cause, le dimensionnement de l'orifice d'évacuation du bassin étanche vers le bassin d'infiltration. Au final, l'intérêt et l'efficacité des bassins en termes de gestion des eaux pluviales routières sont connus en termes de volumes infiltrés par saison.

Diagnostique des eaux souterraines dans un contexte d'infiltration des eaux pluviales routières: *Etude de cas de la RD 45 à Wolfisheim*

Rémy COTINET¹, Fabien TOULET¹, Didier LIHRMANN¹ et Adrien WANKO²

¹ APRONA, Site du Biopôle, 28 Rue de Herrlisheim, 68000 Colmar

² ICube, UMR 7357, ENGEES, CNRS, Université de Strasbourg, 2 rue Boussingault, 67000 Strasbourg, France

Introduction

La Route Départementale 451 est une déviation permettant le contournement d'Oberschaeffolsheim et Wolfisheim afin de rejoindre l'autoroute A351. Située à l'ouest de l'agglomération strasbourgeoise, cette zone présente une circulation dense, notamment aux heures de pointe, liée aux trajets pendulaires. Cette route fait l'objet d'un suivi expérimental dans le cadre du projet EPROW qui a pour objectif de réaliser des diagnostics techniques et scientifiques de l'infiltration des eaux routières dans la nappe rhénane.

Le système de gestion d'eaux pluviales routières a été mis en place entre septembre 2012 et avril 2014. Il est constitué d'une filière de traitement des eaux pluviales routières associant un bassin de décantation (ou de rétention) à un bassin d'infiltration.

Le premier bassin permet de recueillir les eaux de ruissellements collectées par les fossés. Il piège par décantation les matières en suspension, sur lesquelles une partie des polluants routiers sont adsorbés. Son rôle est aussi de contenir le flux d'un événement pluvieux pour le libérer progressivement vers le bassin d'infiltration avant qu'il rejoigne la nappe. Le sol du bassin d'infiltration est utilisé comme filtre en adsorbant une partie des polluants restants. La présence de plantes permet de ralentir les flux d'eau et de piéger une autre partie des polluants.

Les eaux ainsi infiltrées retournent vers la nappe, avec une vitesse d'infiltration variant, selon la nature du sol et sa saturation en eau principalement. Ce procédé permet un retour de l'eau vers l'environnement sans impacter le régime hydrologique des cours d'eau, ni apporter de polluants concentrés.

L'objet de l'étude a été de caractériser le contexte hydrogéologique permettant d'évaluer l'impact des eaux routières infiltrées sur la nappe au droit des installations.

Matériels et méthodes

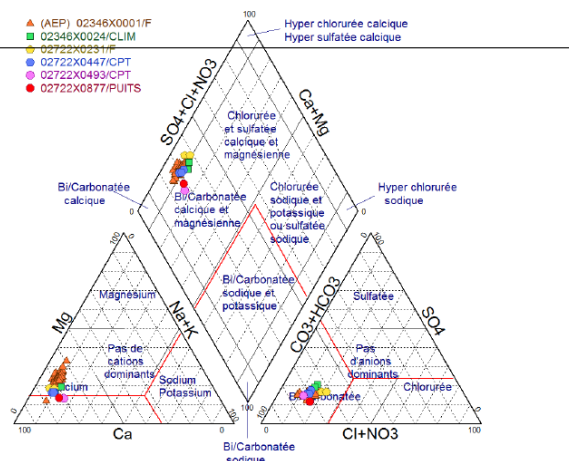
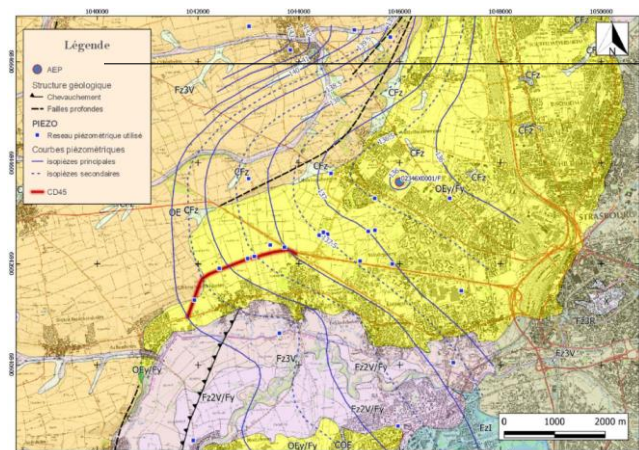
Une étude bibliographique approfondie a permis de dresser le contexte hydrogéologique du secteur grâce aux informations disponibles sur la BSS (Banque de données du Sous-Sol) et les notices des cartes géologiques du BRGM. Les propriétés hydrogéologiques des terrains concernés par les eaux d'infiltration ont pu être approchées par l'interprétation des essais de pompage disponibles et des estimations basées sur la littérature recensée.

Cette première étape a été complétée par une étude hydrodynamique de la nappe, basée sur la construction d'une carte piézométrique qui a conduit à caractériser le sens des écoulements et la répartition des gradients hydrauliques de la nappe. Sur la base de ces éléments, une première estimation des vitesses de circulation verticale et horizontale des eaux a pu être faite.

Un suivi piézométrique de la nappe a été entrepris dès 2013. Ce suivi a permis d'étudier le comportement saisonnier de la nappe vis-à-vis des précipitations. La méthode de fluctuation de la nappe (Water Table Fluctuation) a été utilisée pour estimer la recharge annuelle de la nappe de 2015 à 2018. Cette estimation a contribué à estimer le taux de dilution apporté par les eaux infiltrées dans les premiers mètres de la nappe.

Un état chimique de référence a pu être établi à partir des qualitomètres du secteur captant la nappe supérieure. Cet état initial s'est focalisé sur les paramètres principalement retrouvés dans les systèmes de gestion d'eau pluviale et tient compte de la variabilité spatiale et temporelle des concentrations retrouvées avant la mise en fonctionnement des bassins. Cela a permis de comparer la qualité des eaux de la nappe avant et après l'installation des bassins. Une campagne de prélèvement réalisée courant cette étude a permis de mettre en évidence une évolution significative de la qualité de l'eau.

Résultats et discussions



Carte piézométrique du secteur de Wolfisheim - 23 mai 2018 (Source : APRONA), Fond géologique harmonisé (Source : BRGM). Faciès chimique des eaux de l'aquifère supérieur - terrasse de wolfisheim (état initial).

La terrasse de Wolfisheim abrite une nappe phréatique importante en connexion avec la nappe d'Alsace. Elle est recouverte de limons hétérogènes d'une dizaine de mètres d'épaisseur par lesquels transitent les eaux d'infiltration des bassins aménagés le long de la CD45.

Les perméabilités des alluvions aquifères sont comprises entre 10^{-3} et 10^{-4} m/s et les vitesses de circulation de la nappe dans ce secteur sont de l'ordre de 0,5 m/jr. Il a été montré que les limons de couverture sont relativement perméables. Le temps de transfert des eaux infiltrées vers la nappe au droit des bassins est de 1 à 2 mois, en condition saturée, confirmant ainsi la gamme de vitesse verticale estimées par le calcul. Le signal piézométrique a montré des battements de faible amplitudes (> 1 m) et des périodes de recharge allant de novembre à mai. L'état initial a montré qu'au cours de cette période, la minéralité de l'eau de la nappe semble légèrement diluée, sans pour autant que son faciès bicarbonaté-calcique soit modifié (Cf. FIGURE de droite ci-dessus).

D'après nos estimations, les eaux d'infiltration seraient diluées environ 3 fois par la nappe à l'aplomb du bassin. Malgré ce taux de dilution, les analyses d'eaux souterraines réalisées en mai 2019 montrent que les eaux de la nappe au droit des bassins, en période de basses eaux, sont significativement plus riches en sodium et en chlorure que le fond géochimique de référence (Cf. tableau ci-dessous). Le salage des routes pourrait en être l'origine. Si tel est le cas, cela signifierait que les transferts des solutés sont continus plusieurs mois après leur dépôt en surface.

La campagne d'analyses des eaux souterraines réalisée sur 4 piézomètres de suivi fait ressortir l'impact des activités anthropiques du secteur sur la nappe, en particulier l'agriculture. Par ailleurs, aucun HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), ni COV (Composés organo-halogénés volatils), ni composés benzéniques polluants, n'ont pas été quantifiés dans la nappe.

Les concentrations retrouvées d'amont en aval suggèrent la compétition entre plusieurs mécanismes : la dégradation des molécules mères, la dilution des eaux de la nappe par les eaux infiltrées et le transfert direct de molécules provenant de la surface.

	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4	NO3	T (°C)	pH
02721X0330/PZ1	FG	FG	++	FG	FG	++++	---	FG	(+)	FG
02722X1229/PZ3	(+)	(+)	++	FG	FG	+++	++	FG	FG	FG
02722X1230/PZ4	FG	(+)	++	FG	FG	+++	++	+	FG	FG
02722X1232/PZ6	(+)	FG	+	FG	FG	+++	++	+	FG	FG

Résultats de la comparaison entre la composition en ions majeurs des eaux de nappe en basses eaux (05/2019) et le fond géochimique. FG : fond géochimique ; (+) très légèrement supérieur ; + légèrement supérieur ; ++ supérieur ; +++ fortement supérieur ; ++++ très fortement supérieur ; --- fortement inférieur.

TECHNIQUES ALTERNATIVES - AIDÉ A LA DECISION

MESURES D'EVAPOTRANSPIRATION PAR EDDY-COVARIANCE À BASSE HAUTEUR EN VILLE

Noms du(des) auteur(s) : Abiven Clarisse^a, Ramier David^b, Rodriguez Fabrice^a

Organisme(s) et adresse(s) mél : clarisse.abiven@univ-eiffel.fr
 a) Université Gustave Eiffel, GERS/LEE, Campus de Bouguenais
 b) CEREMA Ile de France, TEAM, Trappes

Case à cocher pour le premier auteur :

- 1^{ère} année de thèse 2^{ème} année de thèse
 3^{ème} année de thèse 4^{ème} année de thèse ou plus
 Post-doctorat



MOTS CLES

Eddy-covariance ; évapotranspiration ; flux de chaleur.

RÉSUMÉ

Le milieu urbain est actuellement sous l'influence de changements globaux que sont le changement climatique et l'urbanisation croissante. Pour contrer les effets de ces changements, des solutions d'aménagement végétalisées sont mises en place dans les villes. Les modifications des bilans hydrologique et énergétique engendrées par ces nouvelles pratiques sont pourtant mal connues à ce jour. Toutefois, il y a un réel besoin de la part des aménageurs et des collectivités de connaître plus précisément les gains engendrés par les techniques d'aménagement végétalisées vis-à-vis des enjeux liés au ruissellement et au confort thermique, à une échelle locale. D'autre part, du point de vue scientifique, la fiabilité des modèles hydrologiques et climatologiques spatialement distribués doit être améliorée, en particulier en s'appuyant sur des mesures locales de l'évapotranspiration (Ramamurthy et al., 2014). Cette thèse vise à quantifier l'évapotranspiration qui intervient dans les bilans hydrologique et énergétique, et si possible grâce à une mesure en continu, sur diverses surfaces urbaines de faible superficie (de l'ordre de 100m²).

Parmi les méthodes existantes de mesure de l'évapotranspiration, la méthode de mesure par eddy-covariance (Aubinet, 2012) permet d'effectuer des mesures en continu durant de longues périodes, et le système de mesure est déplaçable sur diverses surfaces. Elle semble donc la plus appropriée pour l'étude. Néanmoins, elle a été développée à l'origine pour des surfaces homogènes, puis adaptée uniquement à de grandes surfaces urbaines. L'objectif principal de la thèse est de développer et d'évaluer une méthodologie de mesure de l'évapotranspiration par eddy-covariance adaptée aux petites surfaces urbaines, avec pour principale problématique la validité de la méthode pour de basses hauteurs de mesure, de l'ordre de 1m. Pour cela, le travail consiste tout d'abord à déterminer dans quelles conditions la méthode de mesure par eddy-covariance peut être appliquée sur de petites surfaces urbaines. Ensuite, des mesures seront réalisées dans l'optique de les comparer aux simulations de l'évapotranspiration issues de modèles hydrologiques distribués adaptés au milieu urbain.

Cette communication présente le volet méthodologique de la thèse. Elle s'appuie sur l'analyse d'un jeu de données mesurées par eddy-covariance à différentes hauteurs (0,8 m, 1,5 m et 2,5 m) sur le site du SIRTA, site expérimental dédié aux mesures atmosphériques, pendant le printemps et l'été 2016. Le traitement des données a été réalisé par les outils classiques de l'eddy-covariance en utilisant Eddypro Software (LI-COR, Inc., USA). Dans une première étape, la sensibilité de l'estimation des flux de chaleur latente (LE) et sensible (H) a été évaluée par rapport (i) aux conditions de pluie et de vent, (ii) à la période de moyennage des flux, et (iii) aux critères de qualité attribués aux données (Mauder et Foken, 2006) pour deux systèmes de mesure (CSAT-3/LI7500 et Irgason). Le système CSAT-3/LI7500 a été placé à une hauteur fixe de 2,5 m pendant 3 mois et le capteur Irgason était positionné à 3 hauteurs différentes durant une période de 3 à 4 semaines. La détermination de la zone source des mesures (ou footprint) montre que 50 % du flux total mesuré provient d'une surface située à moins de 50m du point de mesure (hauteur de 0,8 m), mais dépasse 100m pour une hauteur de 1,5 m (Figure 1), voire plus de 150m à 2,50m. Dans une seconde étape, une analyse spectrale des données a été réalisée pour étudier l'effet des conditions expérimentales sur la composition fréquentielle des mesures. Les spectres fréquentiels expérimentaux ont été comparés à des spectres fréquentiels de référence issus du modèle de Kaimal et al. (1972). Enfin les flux de chaleur sensible et latente estimés par eddy-covariance ont été comparés pour les deux systèmes de mesure et les trois hauteurs. Cette comparaison montre qu'une légère sous-estimation des flux de chaleur avec l'Irgason apparaît pour les 3 hauteurs de mesure (Figure 2). Cet écart est notamment lié, pour les hauteurs de 0,8 et 1,5m, à

la position plus basse des capteurs, qui implique des pertes spectrales en particulier dans les plus hautes fréquences.

En conclusion, l'analyse des mesures faites sur le site du SIRTA à différentes hauteurs a montré qu'il était possible de faire des mesures à basse hauteur afin de réduire la surface des zones contributives. La mesure par eddy-covariance pourrait donc être utilisée sur des surfaces plus petites que celles pour lesquelles elle est généralement employée. La méthodologie de mesure doit cependant être approfondie avant de transposer cette mesure, car les flux pourraient être sous-estimés, et nécessiteraient peut-être d'être corrigés (pas de temps de moyennage à adapter, corrections fréquentielles, ...). Cela constitue la perspective de la thèse, dans laquelle de nouvelles mesures devraient être réalisées en 2020 sur un site réel afin de conforter la méthodologie.

BIBLIOGRAPHIE

Aubinet, M., Vesala, T., Papale, D., editors. Eddy Covariance. Springer Netherlands, Dordrecht, 2012. ISBN 978-94-007-2350-4 978-94-007-2351-1.

Kaimal, J.C., Wyngaard, J.C., Izumi, Y., Coté, O.R., 1972. Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 98, 563–589. <https://doi.org/10.1002/qj.49709841707>

Kormann, R. et Meixner, F.X. 2001. An Analytical Footprint Model For Non-Neutral Stratification. *Boundary-Layer Meteorology*, 99(2) :207–224.

Mauder, M. et Foken, T., 2006. Impact of post-field data processing on eddy covariance flux estimates and energy balance closure. *Meteorologische Zeitschrift*, pages 597–609.

Ramamurthy, P., Bou-Zeid, E., 2014. Contribution of impervious surfaces to urban evaporation. *Water Resources Research* 50, 2889–2902. doi:10.1002/2013WR013909

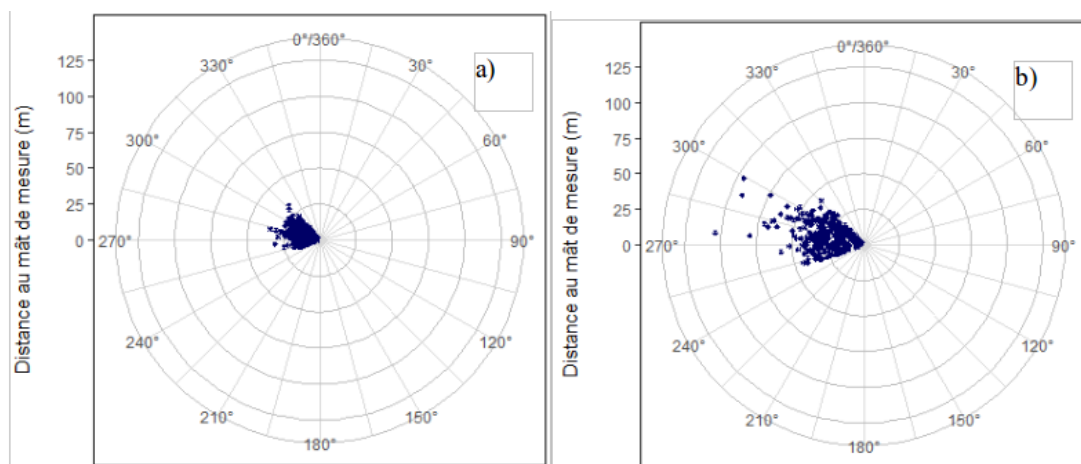


Figure 1 – Footprints des mesures Irgason réalisées à deux hauteurs de mesure, pour une période de moyennage des flux de 15 min et sur le secteur des vents dominants, et estimés par la méthode de Kormann et Meixner (2001) : distance par rapport au mât de mesure délimitant la surface contributive contribuant à 50 % au flux mesuré au niveau du mât, a) à 0,8 m et b) à 1,5 m de hauteur.

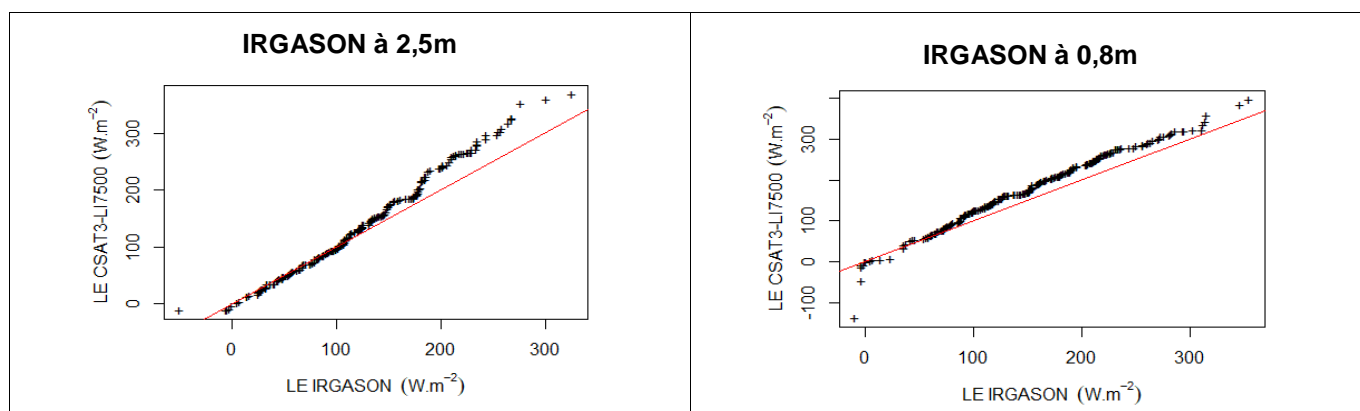


Figure 2 – Diagrammes quantile-quantile des flux d'évapotranspiration mesurés par le système CSAT-3/LI7500 et l'Irgason, à 2,5 m et 0,8 m de hauteur.

Station météorologique à bas coût pour le suivi de toitures végétalisées

Q. Zhu*, F. Cherqui et J.-L. Bertrand-Krajewski

Univ Lyon, INSA Lyon, DEEP, EA 7429, F-69621 Villeurbanne, France

(E-mail: qingchuan.zhu@insa-lyon.fr, frederic.cherqui@insa-lyon.fr, jean-luc.bertrand-krajewski@insa-lyon.fr)

*Auteur correspondant

Résumé : Le suivi météorologique et hydrologique de toitures végétalisées utilisées pour la gestion des eaux pluviales urbaines est nécessaire pour mieux comprendre leur fonctionnement et améliorer les modèles. Mais la généralisation des stations de mesure classiques est coûteuse. L'article présente la mise en place d'une station météorologique à bas coût, l'étalonnage du pluviographe, et les premiers résultats obtenus pour diverses grandeurs (pluie, température, humidité, vent, rayonnement solaire, etc.). L'objectif est d'évaluer les performances et la fiabilité de cette instrumentation à bas coût par comparaison avec une instrumentation classique installée sur le même site.

Mots-clés : eaux pluviales, instrumentation à bas coût, métrologie, pluviographe, station météorologique, toitures végétalisées.

Introduction

Les toitures végétalisées ont montré leurs nombreux bénéfices pour la gestion des eaux pluviales et l'environnement urbain (Berardi *et al.*, 2014). La connaissance des grandeurs météorologiques sur site, dont la pluviométrie (Nawaz *et al.*, 2015) ainsi que l'estimation de l'évapotranspiration potentielle locale, couplées à des mesurages des volumes stockés et des débits évacués, peuvent contribuer à optimiser leur fonctionnement (régulation du débit, gestion du volume stocké, gestion des arrosages). Les coûts des instruments météorologiques classiques limitent leur généralisation aux toitures végétalisées (Farhat *et al.*, 2017). Les avancées technologiques en métrologie ont conduit à la miniaturisation des systèmes, à une forte réduction des coûts et au développement de la programmation open source (Delaine *et al.*, 2019). Ces avancées offrent de nouvelles perspectives pour le suivi en temps réel des ouvrages de gestion des eaux pluviales. Ce travail vise à adapter une station météorologique à bas coût au contexte spécifique du suivi des toitures végétalisées, avec mesurage des paramètres suivants : température, humidité, pression, vitesse du vent, pluviométrie et rayonnement solaire. Les données obtenues seront comparées à celles fournies par une station classique dont les performances sont connues.

Matériels et méthodes

Site

Le site expérimental est le banc test de toitures végétalisées GROOF installé sur le toit d'un bâtiment du campus de l'INSA Lyon à Villeurbanne. La Figure 1 montre la station à bas coût avec en arrière-plan une des plateformes qui sera équipée d'un pilote de toiture végétalisée.

Capteurs

Les capteurs de la station météorologique à bas coût sont un pluviomètre à augets WH-SP-RG, un anémoscope WH-SP-WD, un anémomètre WH-SP-WS01 (Misol Electronics, Province de Guangdong, Chine), un capteur de température, d'humidité et de pression BME280 (BOSCH, Stuttgart, Allemagne) recommandé pour ses performances, et un pyranomètre JXBS-3001-ZFS (JXCT Electronics, Ville de Weihai, Chine). Une station classique est également installée sur le même site. Le Tableau 1 indique pour chaque grandeur mesurée les modèles de capteurs de référence et à bas coût utilisés et leurs prix respectifs.



Figure 1. Station météorologique à bas coût installée sur la plateforme expérimentale GROOF avec (de gauche à droite et de haut en bas) : anémoscope, anémomètre, pluviomètre (à l'arrière), pyranomètre, et capteur de température, humidité et pression de l'air.

Tableau 1. Capteurs traditionnels et à bas coût installés sur la plateforme expérimentale GROOF.

Paramètre mesuré	Capteurs classiques	Gamme de prix	Capteurs à bas coût	Gamme de prix
Pluviométrie	OTTPluvio2L	~ 4250 €	WH-SP-RG	~ 15 €
Vitesse du vent et direction	Campbell Scientific 03002	~ 750 €	WH-SP-WS01, WH-SP-WD	~ 15-20 €
Température et humidité de l'air	Campbell Scientific CS215	~ 280 €	BME280	< 5 €
Pression barométrique	Non	Non	BME280	< 5 €
Rayonnement solaire	Campbell Scientific CS300	~ 300 €	JXBS-3001-ZFS	~ 100 €

Acquisition des données

Un microcontrôleur Arduino Nano (Arduino, New York, NY, États-Unis) est utilisé pour la communication avec les différents capteurs. Il est directement connecté par liaison USB à un ordinateur qui acquiert les données au pas de temps d'une minute.

Étalonnage du pluviographe

Un étalonnage dynamique du pluviographe WH-SP-RG a été effectué sur la gamme de 20 à 140 mm/h. La réponse du capteur est linéaire : $I_m = b \cdot I_t$ avec I_m et I_t respectivement les intensités mesurée et d'étalonnage (mm/h) et b la pente de la droite d'étalonnage : $b = 0.9764$ avec une incertitude type $u(b) = 0.0039$.

Premiers résultats

La station météorologique à bas coût a été installée à la mi-mars 2021. Les résultats des premiers jours de fonctionnement sont illustrés Figure 2.

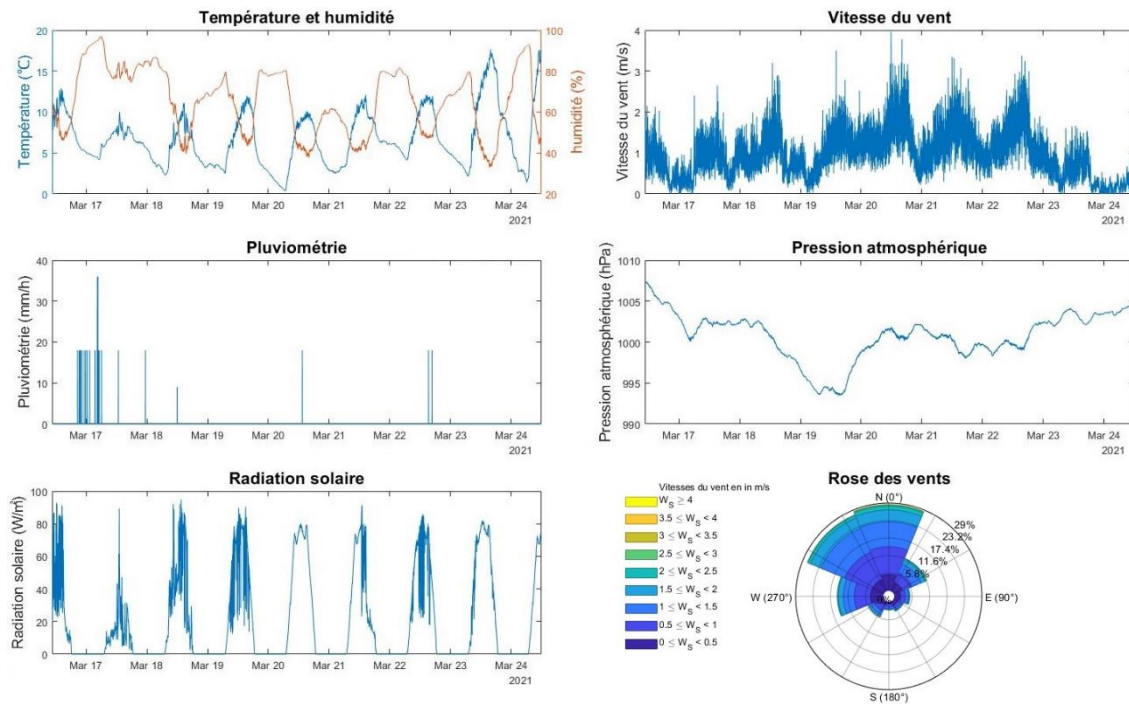


Figure 2. Premières données obtenues avec la station météorologique à bas coût.

Poursuite des recherches

L'évaluation et la qualification de la station météorologique à bas coût est prévue sur une durée minimale d'une année complète, avec comparaison avec les données de la station classique. Les données permettront de caractériser les conditions climatiques locales auxquelles sont exposées les toitures végétalisées de la plateforme expérimentale GROOF et de déterminer des valeurs de l'évapotranspiration potentielle.

Remerciements

La bourse de thèse de Qingchuan Zhu est financée par le China Scholarship Council (Dossier 201806560056). Les recherches sont financées par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée-Corse (projet Cheap'eau) et le programme européen Horizon 2020 (Grant Agreement no. 786566 - <https://mind4stormwater.org>), et sont conduites dans le cadre de l'OTHU (Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine) et de l'EUR H2O Lyon (ANR-17-EURE-0018).

Références

- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A.H., GhaffarianHoseini, A., 2014. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Appl. Energy* 115, 411–428. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>
- Delaine, F., Lebental, B., Rivano, H., 2019. In Situ Calibration Algorithms for Environmental Sensor Networks: A Review. *IEEE Sens. J.* 19, 5968–5978. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2910317>
- Farhat, M., Abdul-Niby, M., Abdullah, M., Nazzal, A., 2017. A Low Cost Automated Weather Station for Real Time Local Measurements. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* 7, 1615–1618. <https://doi.org/10.48084/etasr.1187>
- Nawaz, R., McDonald, A., Postoyko, S., 2015. Hydrological performance of a full-scale extensive green roof located in a temperate climate. *Ecol. Eng.* 82, 66–80. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.061>

Estimation de la banque de diaspores de mares de sédimentations destinées au traitement des eaux de pluie, résultats préliminaires.

Éloïse LENORMAND^{1,2} ; Adrien WANKO¹ ; Paul BOIS¹ ; Isabelle COMBROUX²

¹ICube, UMR 7357, ENGEES/CNRS/Université de Strasbourg, 2 rue Boussingault, 67000 Strasbourg, France.

²LIVE, UMR 7362, ENGEES/CNRS/Université de Strasbourg, 28 rue Goethe, 67000 Strasbourg, France.

Résumé : Les sédiments accumulés après 8 ans de fonctionnement dans les mares de trois ouvrages de gestion des eaux pluviales ont été récoltés afin d'en étudier la banque de graines par la méthode d'émergence par germination. Un protocole faisant intervenir quatre traitements (milieu inondé, alterné, saturé et terrestre) a été mis en place afin de pouvoir faire émerger un maximum d'espèces. L'expérience, mise en route en mars 2020 en est à ses débuts mais offre déjà des premiers résultats. Cette approche d'étude de la matrice végétale des TA est encore peu développée mais néanmoins nécessaire dans une optique de meilleure gestion.

Introduction : En milieu urbain, les rejets urbains par temps de pluie (RUTP) se sont mués en un véritable enjeu d'urbanisme. Dans cette optique, de nombreuses communes développent des réseaux décentralisés de gestion des RUTP appelés techniques alternatives (TA). L'Eurométropole de Strasbourg (EMS) a lancé en 2011 la construction de TA de type zones humides artificielles {mare + filtre planté de roseaux} qui assurent la triple fonction d'écrêtage du volume des pluies, de rétention et de traitement de ces eaux afin de protéger l'Ostwaldergraben, cours d'eau situé en aval des TA. Si les filtres sont artificiellement végétalisés, les mares de décantation initialement non végétalisées ont vu une nouvelle végétation se développer spontanément. Il s'agit donc d'écosystèmes « artificiels » (*constructed wetlands*), qui au cours du temps se sont dotés d'une biocénose autonome et fonctionnelle. Ils répondent à ce titre à la définition des nouveaux écosystèmes (*novel ecosystem*). Si ces nouveaux types d'écosystèmes sont bien reconnus depuis maintenant une décennie, leur fonctionnement et notamment la dynamique de la végétation reste sous-exploré. Dans le cas des mares de décantation, l'exploration de la dynamique de la biocénose végétale et donc son apport potentiel au fonctionnement de la TA, passe par un inventaire de la végétation émergée mais aussi par l'estimation de la banque de diaspores accumulée dans les sédiments des mares et qui est un compartiment à part entière de la phytocénose.

Description du site : *Bassins versants urbains* : Le site d'étude se situe au sud de Strasbourg en Alsace et draine trois bassins versants résidentiels urbains accolés appelés n°1, n°2 et n°3. *Systèmes de traitement* : Les mares de sédimentation des filières sont imperméabilisées par une couche d'argile et sont alimentées en eaux pluviales (EP) par les canalisations du réseau séparatif pluvieux strict drainant les BV. L'eau transite dans la mare permettant un premier traitement par adsorption-décantation des polluants sur les matières en suspension et passe ensuite dans le filtre planté de roseaux (*Phragmites australis*) grâce à un dispositif hydraulique fonctionnant par bâchés. Les trois mares sont situées à quelques dizaines de mètres les unes des autres mais présentent pourtant en 2019 trois types de végétations différentes : la mare n°1 est dominée par des lentilles d'eau *Lemna minor*, la mare n°2 par une association d'hydrophytes *Lemna minor* et *Callitriche obtusangula* et la mare n°3 par le roseau, *P. australis*. Leur taux de sédimentation est également très différent. Les profondeurs de sédiments grossièrement mesurées sur les mares n°1, 2 en octobre 2019 étaient respectivement de 25 et 10 cm ; la mare n°3 étant totalement comblée.

Méthode d'estimation de la banque de diaspores : La banque de diaspores a été estimée par la méthode de *seedling emergence*. Des prélèvements de sédiments sont effectués dans les trois mares, avant la période de repousse printanière et après la stratification hivernale. Chaque mare a été divisée en trois zones : amont (arrivée d'EP), milieu, et aval. Pour chaque zone, vingt carottes de sédiments (4 cm de diamètre, 5cm de profondeur) ont été prélevées à l'aide d'un carottier. Les vingt carottes sont ensuite mélangées afin de former un échantillon représentatif de la zone prélevée. Un traitement a été appliqué afin de disperser les argiles afin de favoriser l'homogénéisation des échantillons et de favoriser la germination des graines contenues dans les échantillons. Chaque échantillon est ensuite divisé en 4 sous-échantillons identiques et soumis à quatre traitements permettant de soumettre les diaspores à une large gamme de conditions de germination et donc d'obtenir une estimation de la composition de la banque de diaspores totale : (i) inondé : milieu aquatique

maintenu à hauteur d'eau constante, (ii) alterné : milieu à hauteur d'eau variable, (iii) saturé : substrat saturé d'eau, (iv) terrestre : arrosage épisodique. Chaque sous-échantillon est déposé sur 2 cm de sable stérilisé (24h à 120°C) pour augmenter la profondeur d'enracinement. Les échantillons sont mis en culture avec une répartition aléatoire sous serre (température et luminosité naturelles, maintenue entre 15°C et 35°C et lumière supplémentaire en L/D 12/12). Les germinations et repousses de diaspores végétatives sont régulièrement identifiées (espèce et type de diaspores) tout au long de la saison de végétation.

Des résultats préliminaires de l'estimation de la composition de la banque de diaspores accumulée dans les sédiments des mares de décantation seront présentés.

Conclusions : L'étude de la banque de diaspores couplée à l'inventaire floristique des espèces émergées (dont un déjà réalisé en octobre 2019) permettra d'avoir une connaissance plus complète du compartiment végétal de nos TA et de son fonctionnement. L'objectif futur est d'étudier l'origine, la structure et les fonctionnalités des communautés végétales qui se sont implantées sur nos ouvrages. Le but est de comprendre comment ces communautés interagissent avec les fonctionnalités-cibles (stockage et traitement des EP) et quelle est leur valeur ajoutée environnementale, des thèmes trop rarement abordés en ingénierie écologique et pourtant nécessaires à la conception et au bon entretien des ouvrages. Cette étude permettra également d'élargir le point de vue sur nos TA : elles ne sont pas de 'simples' ouvrages au rôle de réservoir traitant les eaux de pluie, mais de véritables écosystèmes s'intégrant parfaitement au paysage et apportant des îlots de fraîcheur dans un milieu urbain plus que jamais soumis aux événements climatiques extrêmes.

L'analyse des coûts de gestion des techniques alternatives (TA) pour l'aide à la décision

Consolidation de la méthode d'analyse, pratiques et retours d'expérience de collectivités

Aliénor Fussler*, Caty Werey*,

*UMR GESTE (INRAE, ENGEES) – 1, quai Koch – 67000 Strasbourg
alienor.fussler@engees.unistra.fr, caty.werey@inrae.fr

1 Introduction

La gestion des eaux de pluie est un enjeu majeur pour toutes les collectivités publiques. Depuis des années, l'urbanisation croissante a eu tendance à augmenter le taux d'imperméabilisation des sols, ce qui a généré de plus grands volumes d'eau de pluie à gérer. Les systèmes d'assainissement se retrouvent donc surchargés, et il n'est économiquement pas envisageable de redimensionner tout le patrimoine des collectivités pour accueillir un volume toujours croissant en temps de pluie. Les techniques alternatives (TA) au réseau d'évacuation des eaux pluviales (alternatives au système classique du « tout-tuyau ») reposent sur les principes généraux suivants: stockage provisoire, évacuation à débit contrôlé et infiltration (Chocat et Cherqui, 2018 TSM). Ce sont des systèmes de collecte, stockage, ralentissement de ruissellement, dépollution et transport des eaux pluviales, se substituant ou complétant ainsi les systèmes de gestion classique ou traditionnelle par canalisations enterrées (CUB, 2014). Selon les ouvrages, les **techniques alternatives** (TA) reposent soit sur un phénomène de rétention soit sur un phénomène d'infiltration. On distingue également les TA de gestion à la source, décentralisées (au plus près de là où tombe la pluie, limitant le ruissellement) et les TA centralisées (bassins associés à des grandes surfaces de bassins versants). Les TA de gestion des eaux pluviales, se multiplient depuis plusieurs dizaines d'années en France et à l'échelle internationale pour diverses raisons : prévention des inondations, lutte contre les îlots de chaleur, combinaison avec d'autres fonctions urbaines (fonctions paysagères, récréatives), dépollution, gestion durable. En effet, toutes les TA d'infiltration jouent un rôle d'abattement de la pollution, car l'« infiltration permet de traiter une grande partie de la pollution pluviale particulière par piégeage et dégradation dans les 1ers centimètres de sol, notamment les métaux lourds et la pollution carbonée (dont les hydrocarbures) » (Grand Lyon ville perméable, 2017). On distingue plusieurs types de TA (dont **noues, fossés, bassins, structures réservoirs, tranchées drainantes, puits d'infiltration et toitures stockantes**). Les coûts de gestion varient plus ou moins fortement selon celles-ci. Les bassins enterrés nécessitent un entretien qui génère en général un coût plus important que les autres types de TA (noues, bassins à ciel ouvert, tranchées drainantes, ...). En outre, les TA en surface et végétalisées ont un caractère multifonctionnel intéressant. Les noues, bassins secs à ciel ouvert mais aussi puits d'infiltration sont très répandus. Par ailleurs, pour un même type de TA (exemple type noue), le choix de la végétalisation peut avoir des conséquences importantes en termes d'entretien (régulier et préventif) et donc de variation de coûts selon les plantations. L'analyse des coûts d'entretien des TA alimente aussi l'aide à la décision pour les choix d'investissements (TA/tuyaux) et la gestion patrimoniale.

2 Méthodes et outils

Les travaux actuels portent sur l'approfondissement de la méthode d'analyse de coûts de TA (méthode des coûts complets), en comptabilité analytique multiservices (assainissement, espace vert, voies publiques, propreté) et multi-budgets (budget principal et budget annexe assainissement). En effet, le caractère multifonctionnel des TA implique l'intervention de plusieurs services, dont le nombre diffère

aussi selon la répartition des activités au sein de chaque collectivité. C'est aussi pourquoi, il importe d'identifier tous les services (dont l'appellation varie selon la collectivité), et organismes ou collectivités (communes, métropole, syndicat par exemple), impliqués et impactés par les charges de fonctionnement et dépenses d'investissement.

Cette méthode des coûts complets (Dubrulle, 1987 et ASTEE, 2017) permet une prise en compte de l'ensemble des charges : charges directes et indirectes, qu'elles soient fixes (assurance, maintenance matériel, ...) ou variables (matières premières, traitement des boues, électricité, ...). Les charges directes sont des charges directement ou facilement affectables à l'objet de coûts. Quant aux charges indirectes, elles ne peuvent pas être affectées au produit sans calculs intermédiaires (application de ratio ou clé de répartition).

Dans le cadre d'une première analyse de coûts sur des ouvrages géographiques définis, pris chacun individuellement (F. Bahy, 2017), notre méthode s'appuie sur les heures de main d'oeuvre et d'utilisation d'engins, et sur la ventilation des charges indirectes (assurances, amortissement des engins, fournitures, ...) en fonction d'une clé (temps d'entretien de la TA rapporté au temps annuel de tous les emplois du service assainissement, pour l'entretien de la partie hydraulique). La méthode est appliquée dans chaque service ou département intervenant dans l'entretien TA. Cela mobilise donc des temps de main d'oeuvre (fréquence de tonte ou de fauchage par ex., catégorie de personnel mobilisé) et d'utilisation d'engins (tondeuse tractée ou motorisée...) ainsi que les coûts salariaux et les coûts horaires d'utilisation d'engins pour chaque service. De plus, les charges indirectes correspondantes sont ajoutées. On peut ainsi obtenir le coût d'entretien d'un ouvrage TA donné, et rapporter le résultat sur la surface de cet ouvrage précis, pour aboutir au final à un coût unitaire ($\text{€}/\text{m}^2/\text{an}$). Suite à l'application de cette méthode sur plusieurs types d'ouvrages TA, la question suivante se pose aujourd'hui : comment peut-on monter en généralité cette méthode à l'échelle de tout le patrimoine TA de la collectivité ? Cette étude faite sur plusieurs types d'ouvrages précis apporte une réflexion sur le coût d'entretien des TA dans ces cas particuliers et ne pourra être extrapolée à des cas généraux. En effet, elle s'appuie sur des hypothèses établies dans un contexte spécifique. Par ailleurs, à noter, que l'analyse des charges indirectes peut être réalisée relativement aisément sur le budget annexe assainissement (séparé et dédié au service d'assainissement) alors que l'analyse précise des charges indirectes issues du budget général l'est moins. Ensuite, concernant l'entretien de TA, les charges indirectes considérées prennent aussi en compte les charges de fonctionnement du (des) service(s) directement impliqué(s), ainsi que les frais généraux et les charges de services support (charges de structure). Enfin, dans le cadre de l'analyse des coûts, on distingue également les interventions en régie et celles externalisées. Dans le cas des travaux concernés effectués en régie, il est recherché avant tout des temps agents mobilisés dans chaque service de la collectivité (métropole par exemple). Tandis que dans le cas d'externalisation, il est recherché le montant total des dépenses concernées réalisées via le marché public, tout en tenant compte des temps de contrôle, suivi et pilotage de marchés passés par des agents de la collectivité. La méthode pratiquée d'évaluation des coûts peut aussi diverger selon le service ou département concerné. D'une part, il y a, par intervention sur un ouvrage identifié, le relevé réel des temps agents et temps matériels/engins, associé à des coûts horaires, avec en plus la prise en compte du montant des fournitures sortis de stock, puis la prise en compte des charges indirectes de structure (taux délibéré appliqué). Toutefois, dans nos investigations (dans 2 collectivités), d'autres méthodes de coûts complets ont été identifiées. Il s'agit par exemple de calculer le coût de gestion des espaces verts au m^2 , réalisée par un département (incluant masse salariale, prestations externes, matériels et charges indirectes). Puis ce coût ($\text{€}/\text{m}^2/\text{an}$) est multiplié par la surface totale des TA entretenues dans le périmètre du département compétent. L'inventaire des TA occupe une place importante dans cette démarche : nécessité d'utiliser certaines données (surface, type de TA, localisation, ...) pour l'application de la méthode.

3 Résultats et retours d'expérience

On distingue plusieurs types d'entretien sur les TA : entretien « hydraulique », entretien de la partie « espaces verts » ainsi que nettoyage et ramassage de déchets. En pratique, il y a peu d'entretien « hydraulique » sur les TA et il n'y a que certaines TA (pas toutes les noues par exemple) qui ont des organes hydrauliques. Les organes hydrauliques concernés et donc à entretenir peuvent être typiquement des buses (entres certaines noues par exemple), puisards (sur certaines noues), vannes (sur certains bassins), limiteurs de débit, décanteurs, etc. Dans ces cas, on retrouve généralement un contrôle, graissage et/ou nettoyage (avec fréquence autour d' 1 fois/an) de manière préventive. Autrement, les interventions pratiquées sur les TA au niveau de la partie hydraulique sont assez rares et n'ont lieu que lorsqu'il y a un dysfonctionnement (par exemple : inondation, colmatage). L'entretien des TA se résume essentiellement à de l'entretien pour la partie espaces verts. En général, il est pratiqué de la tonte et/ou du fauchage 2 fois/an (entretien préventif) voire d'autres types d'interventions (faucardage, talutage, curage, élagage, ...) selon le site et les plantations. En outre, il a été constaté au fil des années une évolution des pratiques d'entretien et de fréquences de certaines interventions. Le retour d'expérience actuel des collectivités montre que lorsqu'il y a un dysfonctionnement significatif constaté sur une TA, il y a un entretien curatif avec reprise de l'ouvrage ou la plupart du temps un renouvellement de la TA. Cela nous a donc conduits à nous pencher sur la question de l'amortissement des ouvrages. Des préconisations (ASTEE, 2015) de durées d'amortissement indiquent des durées d'amortissement variant de 20 ans (noues, bassins EP paysagers) à 100 ans (bassins EP en génie civil) selon les types de TA.

Selon les services et les départements concernés, les interventions sont en régie et/ou externalisées. Pour tracer les données techniques et comptables, les outils utilisés sont divers : fichiers tableur, gestion de maintenance assisté par ordinateur (GMAO), système d'information géographique (SIG), progiciel de gestion intégré (ERP), logiciels spécifiques (pour les demandes de travaux par exemple). La GMAO permet de tracer l'historique des interventions avec, selon leur configuration et utilisation, des données recherchées de type : heures agents et matériels, types de matériels, types de travaux, date et lieu d'intervention, ouvrage concerné. Des outils adaptés facilitent le recueil de données et l'analyse à l'échelle de tout le patrimoine au plus près de la réalité. Le SIG permet d'extraire des données diverses, liées aux caractéristiques des ouvrages TA (date de création, type de TA, commune de localisation, surface, domaine public/privé, date d'intégration, ...). Il est possible d'extraire du SIG des surfaces totales par type de TA. Cet outil permet aussi de visualiser des ouvrages TA (affichage 2D). Les capacités et la mise en œuvre du SIG varient selon les collectivités. L'ERP fera le lien avec les données comptables.

4 Conclusion

Le choix de la méthode d'analyse de coûts des TA dépend, de l'enjeu et de la raison pour laquelle ce coût est recherché. Que veut-on faire avec le montant obtenu ? Il existe plusieurs enjeux. Ces travaux s'inscrivent tout d'abord dans une démarche de gestion patrimoniale. Dans un contexte de gestion intégrée des eaux pluviales et de développement durable, le nombre des TA augmente et cette tendance va se poursuivre. Il est ainsi intéressant de pouvoir anticiper ce que représentera cette augmentation en termes de coûts. L'investigation des flux financiers et des pratiques (entretien des TA, outils déployés pour l'enregistrement des informations, organisation de la collectivité par rapport à la gestion des TA) permet de comprendre, comment la gestion des eaux pluviales (y compris TA) est actuellement financée et comment elle pourra l'être. La recherche des coûts peut aussi avoir pour objectif de choisir entre plusieurs types de TA selon les contextes. L'enjeu peut aussi être de choisir entre des TA ou le recours au système classique d'assainissement (« tout-tuyau » ou réseaux). La démarche d'analyse montre que les TA

peuvent s'avérer souvent plus avantageuses et intéressantes économiquement en terme d'entretien et de « coût global » à moyen et long terme (Ville perméable 2017 et C. Wery et al., 2016). On constate que certaines collectivités identifient les coûts d'entretien des TA alors que d'autres ont plus une approche de « coût global » des TA (incluant coûts d'investissement, d'exploitation, de maintenance et de fin de vie). L'analyse des coûts des TA à l'échelle de la collectivité sur l'ensemble du patrimoine nécessite d'avoir un système d'information (SIG, GMAO, et/ou ERP, ...) pour les données techniques et comptables ainsi que de pouvoir faire le lien entre données techniques et financières. Il est aussi important de relier les retours d'analyse de coûts d'entretien à l'inventaire des TA. On constate que le patrimoine des TA est très variable selon les collectivités : certaines ont un grand nombre de bassins (Nantes Métropole, Métropole du Grand Lyon) alors que d'autres ont d'avantage de noues et de puits d'infiltration (Eurométropole de Strasbourg).

5 Perspectives

C'est sur la qualité des données disponibles que repose la fiabilité et la pertinence de l'analyse. L'objectif est d'avoir une meilleure visibilité et maîtrise des dépenses. Il est indispensable de faire en sorte que les informations saisies en amont soient aussi exactes que possibles. Il se pose la question de comment « capturer l'information analytique » le plus près possible de sa source, en fonction de l'organisation en place et de la complexité de l'entité et du système d'information. La méthode est ainsi appliquée et adaptée en fonction du contexte, de l'organisation, des moyens et outils (disponibles ou à venir). Par exemple, un outil (type embarqué sur smartphone) relié au SIG et de suivi par ouvrage peut être déployé. Cet outil, qui serait utilisé par les agents de collectivité, contiendrait des informations sur ce qui est fait en régie et aussi externalisé. On déploierait ainsi le SIG sur le smartphone (permettant aussi des saisies sur place relatives à des interventions notamment sur TA, identifiées par leur n° d'ouvrage SIG).

Bibliographie

- Chocat B., Cherqui F., 2018. « Proposition d'une typologie systématique des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales », TSM, 6 p.
- Communauté urbaine de Bordeaux, 2014. « Les solutions compensatoires d'assainissement pluvial – Guide de conception et de réalisation à l'usage des professionnels », 202 p.
- Dubrulle L., Servan R., 1987. « Comptabilité analytique de gestion », Manuel pratique Dunod,
- ASTEE, 2017, « Gestion patrimoniale au sein des services d'eau et d'assainissement - Approche croisée par le suivi des activités et l'analyse des coûts du service », 151 p.
- Bahy F., 2017. « Elaboration d'une méthode de calcul des coûts de gestion des ouvrages d'eaux pluviales : étude exploratoire appliquée sur les sites de l'Eurométropole de Strasbourg et de la Métropole du GrandLyon », Rapport GESTE M2 Université de Besançon, 85 p.
- Grand Lyon, 2017. «Projet de ville perméable : Guide d'aide à la conception et à l'entretien », 82 p.
https://www.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/media/pdf/eau/20170926_guide-projet-ville-permeable.pdf
- ASTEE, 2015. « Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement – Bonnes pratiques aspects techniques et financiers », Guide, 247 p.
- Wery C., Rulleau B., Mattar M., IRSTEA-AFB, 2016, «coûts de la gestion des eaux pluviales : Méthodes d'évaluation des externalités associées aux techniques alternatives», 70 p.

Guide méthodologique pour un choix pertinent des techniques alternatives pour la gestion des eaux pluviales:

Etude de cas d'un bassin versant résidentiel à Strasbourg

Milena WALASZEK¹, Adrien WANKO²

¹ University of Lille, LASIR UMR 8516, Campus Cité scientifique, Bâtiment C5, 59655 Villeneuve d'Ascq, France

² ICube, UMR 7357, ENGEES, CNRS, Université de Strasbourg, 2 rue Boussingault, 67000 Strasbourg, France

1. Introduction

Les techniques alternatives (TA) gèrent les volumes d'eaux pluviales au niveau de la parcelle, du sous-bassin versant ou du petit bassin versant. Ce sont des ouvrages de stockage et parfois d'infiltration. Dans le cas des TA, les eaux pluviales sont constituées uniquement des eaux de pluie et des eaux de ruissellement sur les surfaces imperméabilisées. L'Eurométropole de Strasbourg (EMS) a inclus dans ses aménagements des TA de gestion des eaux pluviales sur l'ensemble de son territoire (Figure 1). Il existe une grande diversité des TA utilisées par l'EMS car les enjeux et les conditions d'installation diffèrent d'un bassin versant à l'autre. La question de répliquer tel type d'ouvrage dans telles conditions est un problème encore non résolu.

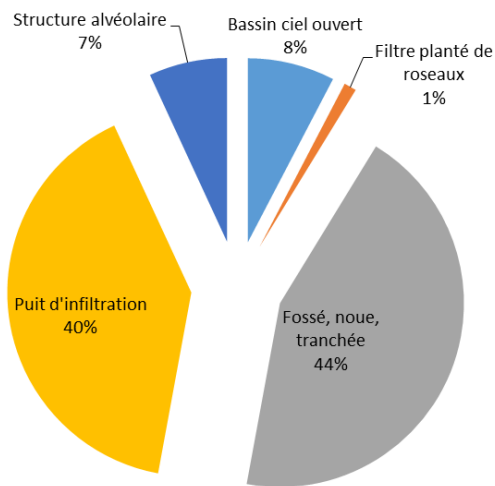


Figure 1: Recensement des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales sur le territoire de l'Eurométropole de Strasbourg (Source : données EMS)

La gestion alternative des eaux pluviales, en opposition à leur gestion traditionnelle via les réseaux d'assainissement unitaires, est une pratique croissante dans les collectivités. En effet, l'augmentation des volumes d'eaux pluviales à gérer, de par l'accroissement des surfaces imperméabilisées, oblige les gestionnaires à penser différemment la gestion des eaux pluviales. Cette gestion alternative peut être réalisée avant ruissellement (toit stockant, bassin enterré), à la parcelle (chaussée réservoir, noue, tranchée drainante) ou à l'exutoire d'un réseau séparatif (filtre à sable, filtre planté de roseaux, bassin de rétention en eau ou à sec)

et permettent l'infiltration des eaux directement sur place ou leur rejet dans un milieu naturel. La variété de techniques alternatives disponibles nécessite le développement d'un outil d'aide à la décision pour les collectivités. En fonction du contexte du site d'implémentation, de ses caractéristiques et des préférences du gestionnaire, une analyse multicritères permet de faciliter le choix entre différents ouvrages de gestion des eaux pluviales.

2. Matériels et méthodes

Les méthodes employées pour l'analyse multicritères des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales sont diverses. Ces méthodes diffèrent principalement par les critères pris en compte. Dans une étude française réalisée par le laboratoire ponts et chaussées utilisant la méthode ELECTRE (Martin *et al.*, 2007), les critères pris en compte sont l'efficacité hydraulique, l'abattement de la pollution, l'impact environnemental, la maintenance, l'investissement économique, la durabilité et l'aspect social en milieu urbain. Tous ces critères ont été évalués par « dire » d'experts pour des ouvrages en France. Des résultats de modèles hydrologiques (Ahmed *et al.*, 2012) et de ruissellement (Joksimovic and Alam, 2014) peuvent être aussi pris en compte. Les critères d'évaluation des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales sont classés en quatre catégories : les critères concernant les performances de l'ouvrage, ses impacts environnementaux, son acceptation sociale et ses coûts économiques. Ces critères peuvent être issus de données issues de mesures obtenues directement sur des ouvrages existant (diminution des volumes, amélioration de la qualité des eaux, coûts) ou alors par « dire d'experts » (impact sur la biodiversité, loisirs, etc). En plus de ces critères d'évaluation, des critères d'exclusion peuvent être pris en compte

dans l'analyse, ceux proposés par Ellis *et al.* (2004) ont été utilisés. En effet, certaines techniques ne sont pas utilisables dans des contextes donnés précis. La démarche générale suivie dans le cadre de cette étude est illustrée dans la figure ci-dessous

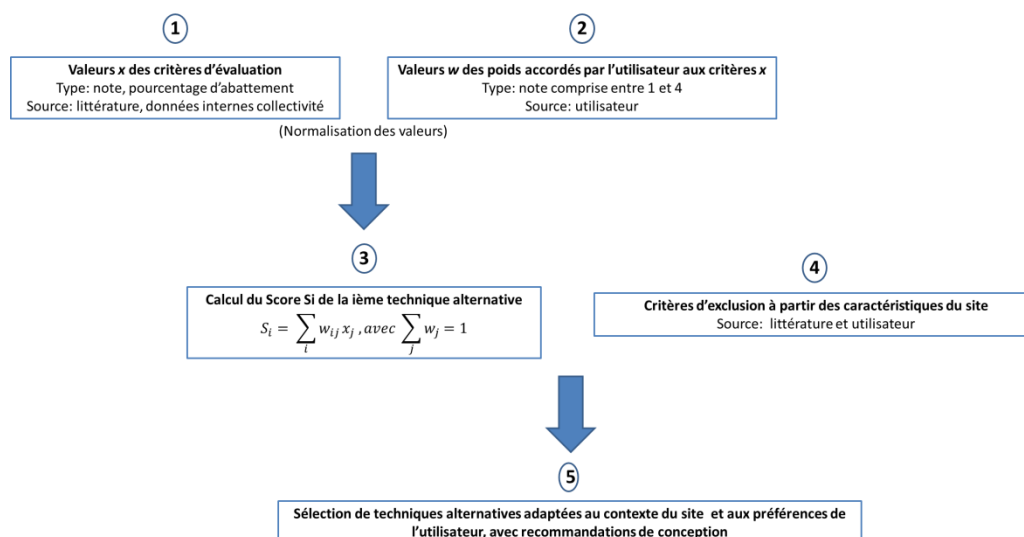


Figure 2: Méthodologie de choix des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales

Au final, 11 critères d'évaluation classés en quatre catégories ont été sélectionnés : coûts (investissement et entretien), efficacités hydraulique et de traitement, bénéfices supplémentaires. Les données sont issues soit des campagnes de mesure (7 critères concernés), soit calculés (2 critères) et soit à « dire d'experts » (2 critères). Le résultat final est la combinaison entre le classement des techniques alternatives, obtenu à partir du calcul de leur score, et les recommandations d'installation, obtenues à partir des caractéristiques du site. Ainsi, une technique alternative avec un excellent score ne pourra pas être installée sur le site à cause d'une restriction d'installation. A partir de ces deux informations, l'utilisateur peut réaliser son choix final pour l'installation d'une technique alternative sur un site donné.

3. Etude de Cas : un bassin versant résidentiel à strasbourg

L'application de la méthode exposée sur un bassin versant résidentiel de Strasbourg conduit au résultat ci-dessous.

Technique alternative	Score	Recommandation
	Calcul à partir des données bibliographiques et préférences de l'utilisateur	Calcul à partir des données du site
Bassin de rétention à sec	2,4	recommandé sous conditions
Mare de rétention en eau	3,6	recommandé sous conditions
Bassin d'infiltration	3,0	non recommandé
Noeue d'infiltration	2,8	non recommandé
Filtre planté de roseaux	4,4	recommandé sous conditions
Chaussée poreuse	3,5	non recommandé
Moyenne des scores	3,3	

Figure 3 : Scores et recommandations d'installation des techniques alternatives sur un site strasbourgeois

La méthode appliquée peut être améliorée en augmentant le panel de TA analysées tout en s'assurant de la disponibilité des informations pour l'évaluation des critères.

Cette étude a été réalisée grâce au financement du projet Lumieau-Stra (lutte contre les micropolluants dans les eaux urbaines à

Strasbourg), lauréat de l'appel à projets national "innovation et changement de pratiques - Lutte contre les micropolluants des eaux urbaines", lancé en juin 2013 par l'Agence française pour la biodiversité (AFB), les Agences de l'eau et le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire.

- Ahammed, F., Hewa, G.A., Argue, J.R., 2012. Applying multi-criteria decision analysis to select WSUD and LID technologies. *Water Sci. Technol. Water Supply* 12, 844–853.
- Ellis, J.B., Deutsch, J.-C., Mouchel, J.-M., Scholes, L., Revitt, M.D., 2004. Multicriteria decision approaches to support sustainable drainage options for the treatment of highway and urban runoff. *Sci. Total Environ.* 334, 251–260.
- Joksimovic, D., Alam, Z., 2014. Cost efficiency of low impact development (LID) stormwater management practices. *Procedia Eng.* 89, 734–741.
- Martin, C., Ruperd, Y., Legret, M., 2007. Urban stormwater drainage management: The development of a multicriteria decision aid approach for best management practices. *Eur. J. Oper. Res.* 181, 338–349.

Liste des participants

- Abiven Clarisse
- Bathelemy Ralph
- Benhaddad Massinissa
- Bernard Emilie
- Berthier Emmanuel
- Bertrand-Krajewski Jean-Luc
- Bonneau Jeremie
- Cherqui Frédéric
- Corroto Cynthia
- Cotinet Rémy
- Couvidat Julien
- Dang Du Phuc Tho
- Ernest Achim
- Farinacci Julie
- Fussler Aliénor
- Ghassan Chebbo
- Guillemoto Quentin
- Jullien Vincent
- Lenormand Eloïse
- Manjarres Angel
- Minier Paul
- Montoya-Coronado Violeta A.
- Tahiri Mohamed
- Techer Didier
- Oudot Andréa

- Ouedraogo Ahmeda Assann
- Pernin Noémie
- Picot-Colbeaux Géraldine
- Pomies Maxime
- Pons Vincent
- Pophillat William
- Ramier David
- Rodriguez Fabrice
- Roux Julia
- Roux Julia
- Roux Christian
- Vazquez José
- Wanko Adrien
- Werey Caty
- Zhu Qingchuan

Liste des auteurs

- Abiven Clarisse, 50, 51
Appels Joep, 26–28
- Bathelemy Ralph, 9, 10
Baïssat Matthieu, 26–28
Bernard Émilie, 2, 3
Bertrand-Krajewski Jean-Luc, 13, 14, 18–20, 52, 53
Besselink Harrie, 26–28
Bois Paul, 30, 31, 54, 55
Boisson Dominique, 9, 10
Bonneau Jeremie, 4–6
Bousserrhine Noureddine, 32–34
Branger Flora, 4–6
Brigode Pierre, 9, 10
Béchet Béatrice, 35–38
- Castebrunet Hélène, 4–6, 44
Chancibault Katia, 2, 3
Chatain Vincent, 39, 40
Cherqui Frédéric, 52, 53
Combroux Isabelle, 30, 31, 54, 55
Cotinet Rémy, 47, 48
Couvidat Julien, 39, 40
Cécile Delolme, 39, 40
- Dang Du Phuc Tho, 35–38
De Munck Cécile, 2, 3
Devau Nicolas, 26–28
Dil Manal, 45, 46
Dufresne Matthieu, 45, 46
- Farinacci Julie, 23–25
Fussler Aliénor, 56–59
- Gautier Mathieu, 39, 40
Guillemoto Quentin, 21, 22, 26–28
- Jean-Soro Liliane, 35–38
- Laurent Julien, 23–25
Lemonsu Aude, 2, 3
Lenormand Eloïse, 30, 31, 54, 55
Lipeme Kouyi Gislain, 4–6, 39, 40, 44
- Manjarres Angel, 45, 46
Mathurin Frédéric, 26–28
Minier Paul, 16, 17
Montoya Coronado Violeta Alexandra, 44
Mosset Alexandra, 2, 3
Mouchel Jean-Marie, 21, 22
- Neveu Pascale, 32–34
- Oudot Andréa, 41, 42
Ouedraogo Ahmeda Assann, 11, 12
- Patureau Dominique, 18–20
Pernin Noémie, 18–20
Pettenati Marie, 21, 22, 26–28
Picot Géraldine, 21, 22
Picot-Colbeaux Géraldine, 26–28
Pons Vincent, 13, 14
Pophillat William, 7, 8
- Ramier David, 50, 51
Rodriguez Fabrice, 50, 51
Roux Julia, 32–34
- Seidl Martin, 32–34
Soulier Coralie, 26–28
- Thomas Loic, 26–28
Togola Anne, 26–28
Tric Emmanuel, 9, 10
- Valdès Danièle, 21, 22
- Walaszek Milena, 60, 61
Wanko Adrien, 30, 31, 45–48, 54, 55, 60, 61
Werey Caty, 56–59
Winiarski Thierry, 39, 40
Wolfram Kloppman, 21, 22
- Zhan Qiufang, 39, 40
Zhu Qingchuan, 52, 53

