

FONCTION FILTRATION D'UN OUVRAGE URBAIN - CONSÉQUENCE SUR LA FORMATION D'UN ANTHROSOIL

FILTRATION FUNCTION OF AN URBAN STRUCTURE – CONSEQUENCE ON THE FORMATION OF AN ANTHROPOSOL

Thierry WINIARSKI

Laboratoire d'Écologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés (LEHNA)
UMR CNRS 5023 (CNRS/Univ.Lyon1/ENTPE)
- Equipe « Impact des Polluants sur les Écosystèmes » (IPE)

Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE)

Rue Maurice Audin
69518 Vaulx-en-Velin
Tél 04 72 04 70 89
Fax 04 72 04 77 43
thierry.winiarski@entpe.fr

Synthèse du rapport final
Novembre 2014

Numéro de contrat Ministère/ADEME : n° 190

CONTEXTE GENERAL

La construction et l'aménagement peuvent avoir des conséquences irréversibles sur la durabilité des sols et tendent à leur élimination. Chaque jour, l'Union Européenne perd environ 252 hectares de sols à cause de l'expansion urbaine et des infrastructures de transport, soit 11 000 kilomètres carré par an. L'effet qui en découle, le plus souvent, est une imperméabilisation et un ruissellement important qu'il faut compenser par des systèmes d'assainissement d'eaux pluviales. Depuis plusieurs années, se développent, en milieu urbain essentiellement, des techniques alternatives d'assainissement. Le caractère « alternatif » de ces techniques tiennent au fait qu'elles présentent des caractères à la fois innovants et paysagers au «tout tuyau» ; cette technique traditionnelle d'assainissement est, en effet, largement répandue sur le territoire national. Elle permet de canaliser les eaux pluviales et les eaux usées issues d'un bassin versant avant de les rejeter dans le milieu naturel. Par opposition au «tout tuyau», les techniques alternatives par infiltration se focalisent sur une eau exclusivement pluviale et s'affranchissent de grands collecteurs. Leur intérêt est double : elles contribuent à réduire le volume d'eau entrant dans les canalisations et elles favorisent la recharge des nappes souterraines urbaines fortement sollicitées pour les besoins domestiques. Leur application est par ailleurs multiple : nous les retrouvons dans les ouvrages routiers et dans les aménagements urbains ; à chaque fois, l'objectif recherché est de favoriser l'infiltration au profit du ruissellement avec le souci d'assurer la meilleure intégration paysagère possible. Parmi ces différentes techniques, les bassins d'infiltration constituent un compromis en rétablissant le cycle de l'eau. Ces systèmes d'infiltration se remplissent puis s'assèchent au rythme des événements pluviaux. A la surface, des dépôts de particules transportées par les eaux pluviales forment alors une couche de sédiments urbains. En effet, les eaux de ruissellement lessivent les surfaces urbaines et entraînent avec elles des particules organiques et minérales. Celles-ci, appelées parfois « poussières de route », sont générées par les usages de la ville, notamment le transport, mais aussi les systèmes de chauffage, les industries, etc. Elles contiennent des teneurs en polluants importantes (métaux lourds, hydrocarbures). En s'accumulant, ces particules peuvent constituer un lieu de transfert de l'eau et de rétention de solutés, un milieu colonisé par les végétaux, mais aussi un véritable « réacteur biologique » dans lequel les microorganismes participent au recyclage de la matière organique naturelle et/ou anthropique. De par son origine, nous considérons cette couche de sédiments urbains et l'horizon sous jacent influencé par la couche de surface, comme un anthroposol : sols fortement modifiés par l'homme, souvent en milieu urbain. Elle représente généralement de faibles superficies et est peu connue des pédologues, car il ne répond pas aux critères de pédogénèse des sols naturels ou cultivés. Cependant, des estimations et des enquêtes laissent penser que les tonnages de sédiments urbains sont importants ; chaque année, ce sont, au niveau national, plusieurs millions de tonnes de matières sèches, et à l'échelle d'une agglomération, plusieurs dizaines de milliers de tonnes, constituant ainsi, en termes de gestion de ces milieux, un enjeu important.

Ces techniques posent cependant deux types de problèmes : i) l'accumulation en surface de polluants qui, à terme, avec la formation géologique support (essentiellement des alluvions) forme, un sol pollué ; ii) la migration de polluants non retenus et/ou relargués par la couche de surface peut avoir un impact sur la qualité des eaux souterraines. La « fonction épuratrice » basée sur la « fonction filtration » de ces sols est alors souvent mise en avant. En effet, cette zone d'interface peut constituer un filtre physique (rétention de particules) et un filtre chimique (adsorption des polluants par exemple) pour les eaux s'infiltrant en direction des nappes. Cependant, en s'infiltrant, les polluants contenus dans les eaux pluviales peuvent, ou se retrouver dans les premiers mètres du sous-sol et il est alors difficile de connaître l'épaisseur de la zone impactée, ou atteindre la nappe. D'une manière générale, cette fonction peut donc se définir comme une fonction de régulation, d'échange et de filtre qui dépend des flux d'eau et de matière. Actuellement, peu de travaux se sont focalisés sur la caractérisation de ce type de sol et encore moins sur sa fonction filtration, rendant cette dernière difficilement qualifiable et quantifiable. Ce projet vise donc à améliorer la connaissance de cette fonction de filtration d'un tel milieu qui a comme conséquence la formation d'un anthroposol.

OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET

L'objectif général du projet est de caractériser et modéliser la fonction filtration d'un sol anthropique composé d'une couche de sédiments d'origine urbaine et d'un dépôt alluvionnaire de type fluvioglaciaire dans un contexte de bassin d'infiltration d'eaux pluviales de l'Est lyonnais. Dans ce contexte, la source d'éléments exogènes (eaux pluviales) se traduit par la formation d'un néosol en surface (horizon de particules fines) et par l'amendement des milieux alluvionnaires sous-jacents en particules fines ainsi qu'en polluants. Dans le cadre de ce projet, nous nous sommes basés d'une part sur une description des milieux alluvionnaires et de leur hétérogénéité structurale et d'autre part sur la caractérisation des sédiments de surface. Mais ces deux compartiments, qui forment un anthroposol, évoluent temporellement. L'objectif final est donc d'améliorer les connaissances sur son évolution dans le temps et dans l'espace (essentiellement en profondeur).

Ce travail, véritable association hydrogéophysique-géochimie-biologie-modélisation-pédologie est une démarche innovante de part son aspect pluridisciplinaire dans l'étude des sols urbains. L'approche proposée se concentre sur la caractérisation de l'état et du fonctionnement de la zone filtrante d'un bassin d'infiltration et vise à développer des connaissances et des analyses pertinentes sur ce milieu très hétérogène dont la représentation a été, jusqu'à ce jour, trop simpliste en regard du rôle crucial de zone tampon qu'il joue entre la ville et les ressources en eaux souterraines.

QUELQUES ELEMENTS DE METHODOLOGIE

Notre étude s'est essentiellement déroulée sur des sites réels, tous positionnés dans l'Est lyonnais sur le même dépôt fluvio-glaciaire.

Nous nous sommes **dans un premier temps**, focalisés sur un bassin d'infiltration d'eaux pluviales particulier : le bassin d'infiltration Django Reinhardt (DJR) qui constitue notre site de référence car étudié depuis une dizaine d'années dans le cadre de l'Observatoire de Terrain d'Hydrologie Urbaine sur le territoire du Grand Lyon (<http://www.graie.org/othu/>). Il se situe dans la plaine fluvio-glaciaire de l'Est lyonnais (figure 1.a, 1.b et 1.c). C'est sur ce site que nous avons particulièrement étudié les caractéristiques principales géochimiques et pédologiques de l'anthroposol en place (mesures des concentrations en phosphore, azote, C/N, matière organique -MO-, éléments traces métalliques -ETM-, hydrocarbures aromatiques polycycliques -HAP-, pesticides, polychlorobiphényles -PCB-, ...) en insistant particulièrement sur le continuum sédiments de surface / matériaux en place (alluvions fluvioglaciaires) grâce à une tranchée (une centaine de mesures d'ETM, de MO, de granulométrie). Nous avons aussi caractérisé, par des méthodes géophysiques (Radar Géologique -GPR-, Tomographie des Résistivités Electriques -ERT-, Résonance Magnétique Protonique -RMP-), l'architecture des hétérogénéités rencontrées dans les alluvions fluvioglaciaires (à l'échelle de la parcelle et du bassin) et leurs influences sur les écoulements de l'eau (seulement à l'échelle de la parcelle).

Ce mode d'assainissement alternatif au «tout tuyau» est particulièrement adapté à la nature perméable du terrain de l'Est lyonnais constitué essentiellement d'un dépôt fluvioglaciaire. Ainsi, pas moins de cent (100) ouvrages d'infiltration sont recensés sur le territoire du SAGE de la nappe de l'Est lyonnais et environ 35% de ces ouvrages d'infiltration peuvent être considérés «à risque». Afin de généraliser nos résultats, nous avons sélectionné, **dans un deuxième temps**, dix neuf (19) bassins d'infiltration (figure 1.d) à partir de données invariantes (type d'activités humaines, surface et pente moyenne du bassin versant, surface et volume du bassin d'infiltration, caractéristiques du réseau associé, etc.), ensuite nous les avons échantillonnés en réalisant des prélèvements représentatifs de la surface de chacun d'eux (suivant le guide technique du LCPC d'avril 2006 « Recommandations pratiques pour la gestion des produits de l'assainissement pluvial »), puis analysé les sédiments de surface (épaisseurs, mesures des concentration en phosphore, azote, C/N, MO, ETM, HAP,

pesticides, PCB, ...). Enfin, la colonisation par les végétaux sur l'ensemble des bassins d'infiltration a été caractérisée par la diversité et l'abondance des espèces rencontrées, ainsi que la surface couverte. A titre indicatif, une étude exploratoire concernant l'écologie des lombrics a été effectuée sur deux bassins.

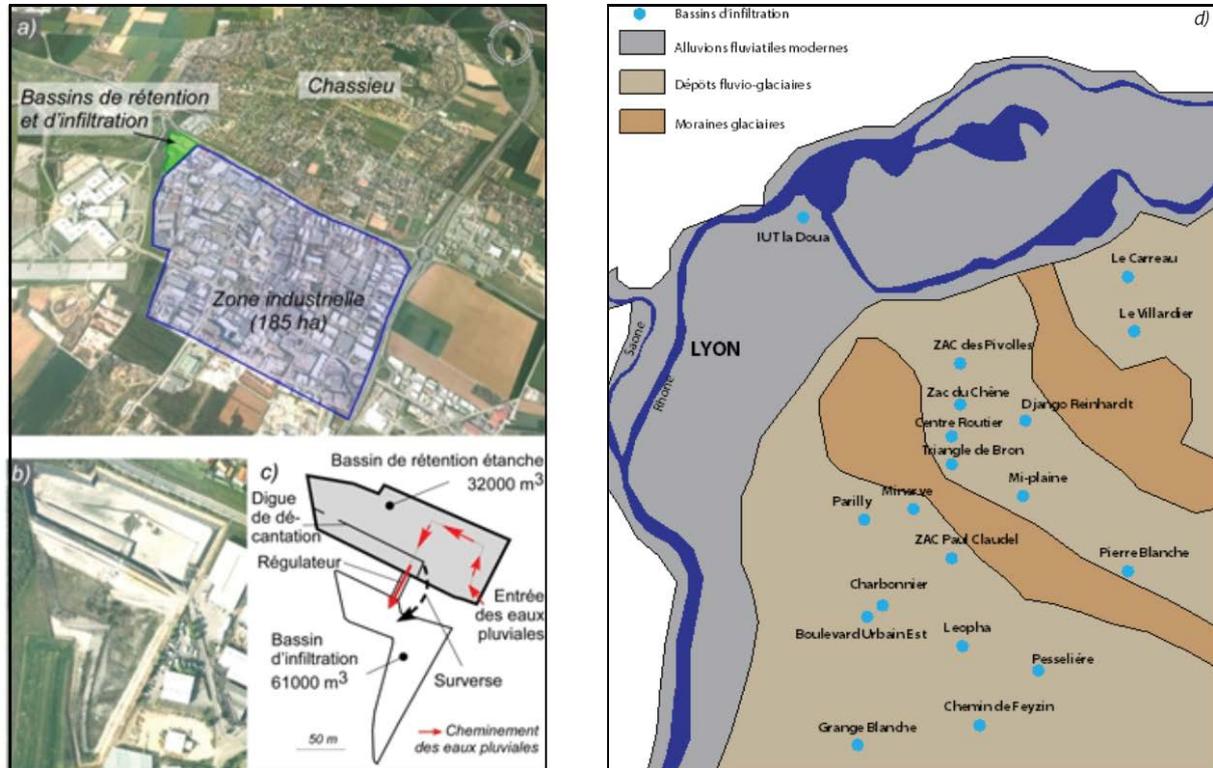


Figure 1 : a) situation des bassins de rétention/décantation et d'infiltration Django Reinhardt dans la zone industrielle située au sud de la ville de Chassieu à l'Est de l'agglomération lyonnaise ; b) Photo aérienne (image Google Earth de 2007) ; c) principe de fonctionnement des deux bassins ; d) position des bassins d'infiltration sélectionnés

Compte tenu des résultats obtenus concernant l'architecture des alluvions fluvioglaciales et de la qualité physico-chimique des sédiments urbains, nous avons tenté **dans un troisième temps**, d'observer un front d'infiltration en conditions maîtrisées et *in situ* en nous basant sur des méthodes géophysiques (GPR et ERT). De plus, la qualité des lixiviats issus des sédiments des dix neuf (19) bassins d'infiltration ainsi que leurs réactivités vis-à-vis des lithofaciés fluvioglaciales nous ont renseigné sur les mécanismes de rétention et de relargage des ETM (et plus spécifiquement du cuivre) et de la MO. Suite à ces deux types d'étude (géophysique et géochimique) et afin de faire le lien entre ces deux compartiments constituant l'anthroposol, un modèle hydrodynamique et de transfert (basé sur le code de calcul Hydrus) a été construit en conditions non saturées afin de connaître la répartition du Cu comme polluant «modèle» afin de tester la méthode.

RESULTATS OBTENUS

Une quantité considérable de données originales a pu être acquise lors de ce projet sur la qualité des anthroposols dans les bassins d'infiltration, jusqu'alors peu renseignée. Ce point est essentiel et, à lui

seul, permet de considérer le projet FAFF comme une base de connaissances qui sera très utile dans les années futures tant scientifiquement que pour les gestionnaires. Au regard des résultats acquis un certain nombre de points méritent d'être soulignés.

Définition de l'objet étudié. Sols ou sédiments ?

La nature et les dynamiques de mise en place et d'exportation des matériaux peuvent conduire à une difficulté sur la définition même de l'objet étudié. Il y a clairement des « traits pédologiques » qui amènent à considérer l'objet comme un sol, mais il y a également des « traits sédimentaires » qui amèneraient plutôt à considérer l'objet comme un sédiment. Cette incertitude sur la définition de l'objet peut conduire à des confusions, des incompréhensions. Il nous a semblé nécessaire à l'issue du travail de mieux définir l'objet (ou les objets) d'étude et le vocabulaire le désignant.

Le profil schématique (figure 2) de la surface des bassins d'infiltration met donc d'abord en évidence la superposition de deux matériaux parentaux distincts. Les matériaux de surface déposés lors du remplissage du bassin d'infiltration sont des matériaux récents dont l'épaisseur est une fonction de l'âge depuis le dernier curage, de la dynamique, du transfert et de la sédimentation (nature du bassin-versant, rapport bassin versant/surface du bassin d'infiltration ; nature et organisation des bassins de décantation, etc.). Ces matériaux de surface sont dans la plupart des cas très noirs et limoneux. La structure de ces matériaux est selon les bassins soit grumeleuse avec une très grande homogénéité de l'horizon, soit feuilletée avec une organisation sédimentaire laminée (succession des dépôts). Ce dépôt repose en transition abrupte sur le fluvioglaciaire. On constate cependant parfois des pénétrations de matières sédimentaires au sein de ce niveau, en particulier entre les éléments les plus grossiers. Les matériaux fluvioglaciaires sous-jacents sont des formations superficielles constituées de produits finement divisés. Les dynamiques de dépôts (tressage, chenalisation, phase érosive, etc.) de ces matériaux ont conduit à une grande hétérogénéité des lithofaciès et notamment de la distribution granulométrique dans ces matériaux.

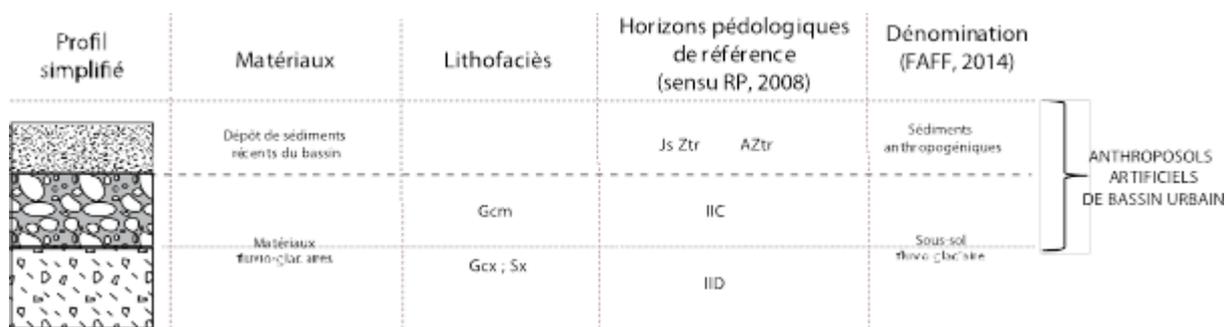


Figure 2 : Schéma conceptuel du sol observé selon le référentiel WRB

Le choix des termes utilisés pour désigner cet objet constitue une difficulté. Les matériaux de surface déposés dans les bassins d'infiltrations sont appelés généralement sédiments ou parfois sédiments anthropogéniques.

Les trois caractères spécifiques des matériaux de surface (extrême jeunesse, nature sédimentaire de l'horizon de surface, caractère anthropique) ne sauraient constituer des éléments pour exclure l'objet étudié de la couverture pédologique. Pour un pédologue, il ne fait pas de doute que le fond des bassins d'infiltration est constitué par des sols. Mais le sol du pédologue ne se limite alors pas à l'horizon superficiel constitué par des dépôts de sédiments plus ou moins anthropiques, il inclut naturellement les horizons sous-jacents fluvi-glaciaires subissant (et ayant subi) des processus de transformation de par la proximité de la surface et des dépôts qui s'y déroulent.

L'objet étudié étant défini comme un sol, le recours à la classification pour le dénommer et pour désigner les différents horizons est alors nécessaire. Plus qu'une simple question taxonomique, il s'agit ici de repérer des « traits pédologiques » spécifiques et déterminants.

Pour le RP 2008, il ne fait pas de doute que les bassins d'infiltration sont occupés par des «Anthroposols». En effet ces sols obéissent à la définition suivante : « solums très fortement transformés par les activités humaines : apports répétés de matériaux allochtones et/ou accumulation de matériaux terreux déplacés ». L'horizon de surface correspondant aux matériaux sédimentaires récents correspond à un horizon pédologique de surface jeune développé sur des matériaux anthropiques terreux : Horizon JsZtr sensu RP, 2008. Dans un certain nombre de cas, des horizons organo-minéraux plus développés sont rencontrés : AZtr. Ces horizons se développent sur des matériaux fluvioglaciaires d'une autre nature et le profil pédologique de base est donc la succession JsZtr ou AZtr/IIC/IID (D désignant des couches de matériaux fragmentés). Bien que la mise en place des matériaux terreux de surface se fasse par un mécanisme naturel (dépôt), on doit considérer que ces apports exogènes de matériaux terreux en contexte urbain conduisent à la formation d'un **anthroposol artificiel**. Il est évident cependant que le terme artificiel renvoie à une mise en place humaine des matériaux. Au groupe de référence il nous semble possible d'adjoindre les adjectifs urbain et éventuellement alluvial. Néanmoins aucun adjectif n'étant vraiment satisfaisant pour décrire la situation rencontrée, nous proposons d'ajouter ces sols de bassin à la liste des anthroposols. L'essentiel des sols étudiés correspond ainsi à des **ANTHROPOSOLS ARTIFICIELS de bassin urbain**. Des adjectifs plus classiques (carbonaté, limoneux, calcique, etc.) sont ensuite ajoutés selon les situations.

Evolution des sols et pédogenèse

Les sols des bassins d'infiltration sont donc des sols bilithiques car on distingue sans ambiguïté deux matériaux superposés. L'apport de sédiments anthropogéniques conduit donc à la formation progressive d'un anthroposol artificiel de bassin urbain. Bien qu'il n'ait pas été possible d'établir de véritable chronoséquence de développement de ces sols, nous avons observé la **rapide accumulation de matières organiques dès les stades précoces de développement** notamment dans les situations avec très forte activité biologique. Les accumulations de matières organiques se font dans un contexte de saturation en eau des niveaux superficiels une partie de l'année. Au caractère précédemment décrit pour ces matériaux sédimentaires de surface (jeunesse des matériaux, dépôt sédimentaires, nature anthropique) se surimpose une **hydromorphie de surface**. L'accumulation de matières organiques dans les bassins est donc clairement d'abord à mettre en relation avec la dynamique hydrique. Des processus d'hydromorphie marquent les sols de bassins. Il faut toutefois noter que le caractère hydromorphe de ces sols ne semble se marquer qu'au sein de l'horizon de surface et que la nature drainante des matériaux sous-jacents (l'infiltration étant évidemment ici l'objectif même de l'aménagement) empêche l'apparition de traits d'oxydo-réduction dans le niveau fluvi-glaciaire. Les saturations temporaires par l'eau des niveaux de surface, les accumulations de matières organiques et le développement de végétation de zones humides sont dûs naturellement à l'existence de colmatage des niveaux fluvioglaciaires par des matériaux sédimentaires fins. C'est d'ailleurs l'existence même de ce processus qui justifie l'opération de curage. Cette migration de particules fines au sein des horizons inférieurs s'apparente à **un processus de lessivage**. On a noté la présence de ces matériaux originaires de la surface dans le niveau IIC. Le phénomène est cependant beaucoup trop discret pour que l'on parle réellement de lessivage généralisé pouvant conduire à la formation d'un horizon d'accumulation par suite d'apports illuviaux. Compte tenu de l'âge des ouvrages (au maximum d'une trentaine d'années), il est logique que les traits de lessivage soit de très faibles ampleurs. Sans que nous l'ayons réellement mesuré, la vitesse de ce processus semble en revanche élevée. Le suivi et l'analyse de ce phénomène de lessivage devrait être utilement envisagés dans le futur. De la même manière, la part relative des migrations particulières et en solution sur les accumulations de matières organiques et de polluants (organiques et minéraux) dans les matériaux fluvioglaciaires devrait être étudiée.

Un rôle de l'hétérogénéité des formations alluviales sur la répartition des polluants

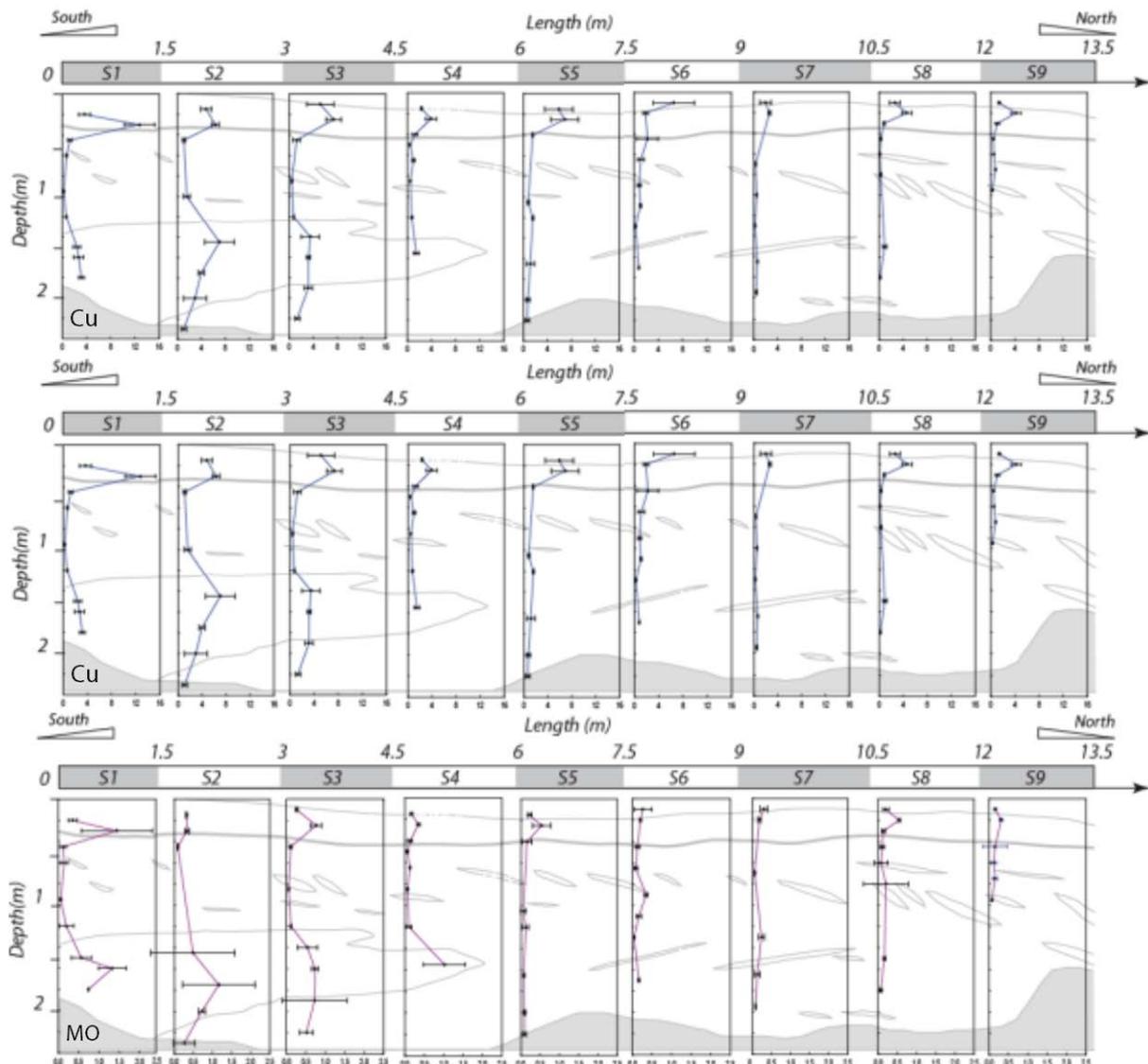


Figure 3 : Moyennes et écart types de la concentration en cuivre et des teneurs en matières organiques (MO) de la tranchée réalisée dans le bassin d'infiltration Django Reinhardt. Sx : lentille de sable ; Gcm,b : mélange bimodale de sable et galets ; Gcm : mélange de sable et galets ; Ggc,o : graviers à structure ouverte.

Les travaux sur la tranchée dans le bassin Django Reinhardt (Figure 3) montrent des concentrations importantes sur les cinquante (50) premiers centimètres du terrain naturel. Cette étude permet de mettre en évidence une corrélation entre les concentrations en ETM, la teneur en particules inférieures à 105µm et la teneur en MO dans une moindre mesure. Ils ne montrent pas de corrélation entre la profondeur et la concentration en ETM. Ainsi, les variations de concentrations en métaux lourds sont davantage liées aux teneurs en limons et en MO. Outre une pollution importante des sédiments de surface, les résultats relatifs aux ETM et à la MO montrent plusieurs phénomènes : des concentrations faibles dans les matériaux les plus grossiers et des concentrations importantes au niveau d'une zone située à environ 20 cm de profondeur et dans la lentille de sable (située entre 1 m et 2 m de profondeur). L'accumulation des sédiments d'origine anthropique en surface du bassin a un effet sur le sous-sol sous-jacent. L'eau entraîne des éléments d'origine anthropique (ETM et MO notamment) dans le sous-sol ; il y a donc anthropisation du filtre. Cette anthropisation n'est pas

uniforme en fonction de la profondeur, elle est influencée par la structure et la texture du sous-sol. La nature hétérogène du sous-sol a une influence sur l'anthropisation.

Peut-on ainsi considérer que l'anthroposol est seulement constitué du compartiment « sédiments urbains » ? A la vue des résultats concernant la MO et les ETM, il semble que non. En effet certains lithofaciés (couche composée de sable et graviers sur les premières dizaines de centimètres et lentilles de sables) ont des caractéristiques proches des sédiments de surface. L'anthroposol serait donc constitué de deux compartiments : l'un très récent et d'origine urbaine, l'autre naturel avec une empreinte urbaine forte.

Une signature urbaine globale des sédiments de surface

Grace à un échantillonnage basé sur des paramètres invariants représentatifs des bassins d'infiltration de l'Est lyonnais (taille des bassins versant et des bassins d'infiltration, activités humaines, etc.), nous avons obtenu un jeu de données très riche et unique. L'analyse simultanée de nombreux paramètres géochimiques et structuraux sur la surface de dix neuf (19) bassins d'infiltration n'a à notre connaissance jamais été réalisée en France. Ces nouveaux résultats nous permettent de valider ou confirmer des spécificités que nous avons constatées sur le bassin d'infiltration DjR et d'être en mesure de commencer à avancer quelques résultats. Les surfaces des bassins d'infiltration sont globalement riches voire très riches en matières organiques. Cette MO est caractérisée d'une part par une contribution "naturelle" provenant des débris végétaux et terres lessivées sur le bassin versant et/ou apportée directement par les plantes ayant colonisé les bassins, et d'autre part par une contribution anthropique provenant de l'ensemble des rejets atmosphériques (hydrocarbures aliphatiques, aromatiques, PCB, Dioxines, pesticides) ou apports en surface (pesticides, alkylphénols). L'aggrégation des sédiments de la surface des bassins peut être expliquée par les alternances d'infiltration/drainage des eaux pluviales, la forte teneur en MO, l'activité biologique et les variations fortes d'humidité. Il est à noter que les teneurs en P (total et disponible) sont élevées par rapport à des références de teneurs dans des sols. Ces différentes caractéristiques montrent que les bassins peuvent être de bons supports à la colonisation des plantes quelles que soient les typologies de bassin versant drainé.

Malgré une relative hétérogénéité des niveaux de concentrations des éléments majeurs et micropolluants organiques ou minéraux, nous pouvons dire que les paramètres descriptifs des bassins versants drainant les eaux pluviales infiltrées ne permettent pas de discriminer fortement les propriétés géochimiques des matériaux de surface. La présence systématique de certains éléments (Corg, Ptot, Polsen, TiO₂, ETM, HAP, Dioxines, PCB, Alkylphénols) est spécifique aux dix neuf (19) bassins et la typologie de l'activité ou des caractéristiques physiques du bassin versant n'est pas un critère discriminant. La surface des bassins présente donc une "signature chimique urbaine" et concentre sur des petites surfaces de sols les éléments chimiques qui circulent en milieu urbain. Le domaine de "l'urban geochemistry" est en train de se développer dans la communauté scientifique internationale et ces résultats en sont une illustration. La concentration forte en métaux lourds et HAP dans les eaux de lessivage des milieux urbains est connue depuis longtemps et la capacité des bassins d'infiltration à piéger ces contaminants en surface est reconnue. Ceci est vérifié ici dans les dix neuf (19) bassins. Ce travail permet de montrer la capacité de ces surfaces à piéger d'autres contaminants (PCB, dioxines, pesticides, alkylphénols, TiO₂) peu étudiée jusqu'à présent dans ces sols.

Le GPR : un outil d'évaluation des hétérogénéités d'écoulement

Malgré des résultats prometteurs, l'utilisation des méthodes géophysiques (GPR, ERT, RMP) pour évaluer les hétérogénéités d'écoulement sont encore en développement : la mesure de la teneur en eau *in situ* n'est pas encore d'actualité. Cependant, elles donnent, pour la première fois, des résultats quant à la mise en évidence des chemins préférentiels de l'eau ; l'influence de la couche sableuse sur le sens des écoulements en est un exemple (Figure 4). Ces méthodes permettent de nous renseigner

sur les zones les plus sollicitées en termes de flux et les zones de rétention d'eau. Ces informations aident à la compréhension des phénomènes chimiques dans la zone non saturée.

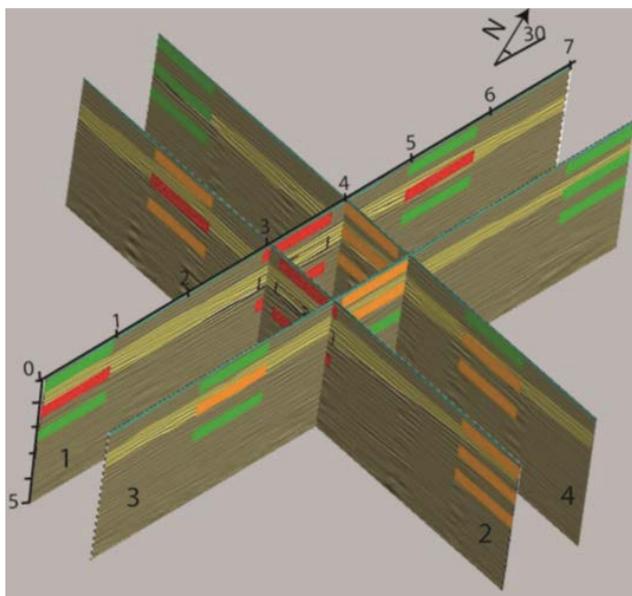


Figure 4 : Suivi par GPR (antenne de 400 MHz) montrant l'hétérogénéité des teneurs en eau à la suite d'un essai d'infiltration réalisé dans le bassin Django Reinhardt. En rouge : zone proche de la saturation ; en orange : zone moyennement saturée ; en vert : zone peu saturée.

Une confirmation de l'hétérogénéité des écoulements par modélisation

Afin de simuler l'aspect dynamique de la fonction filtration, nous proposons un modèle de fonctionnement hydrodynamique basé sur la géométrie obtenue à partir de la tranchée. A partir de deux phases typiques d'évènements pluvieux (infiltration et drainage) nous modélisons la redistribution de l'eau dans le profil. La modélisation confirme les résultats géophysiques concernant l'effet des hétérogénéités du dépôt sur les écoulements en zone non saturée (effet de la lentille de sable de dimensions décimétriques, Figure 5). Ils montrent également que ce sont les conditions de faibles débits en surface ou de conditions hydriques sèches qui sont les plus propices à l'établissement des écoulements préférentiels.

Mais l'étude de la fonction filtration d'un sol ne s'arrête pas à l'aspect hydraulique, les résultats des essais de lixiviation montrent que la MO et le Cu qui ont été spécifiquement suivis sont mobiles. La capacité de désorption de la couche de surface dépend de sa concentration initiale, de la nature et du degré d'humification de la MO et de l'âge du bassin d'infiltration. Dans les sites anciens et fortement pollués, se produit une accumulation importante du cuivre, avec une mobilité faible. En revanche, dans les sites récents, la rétention est assez peu efficace car les processus de diffusion et d'adsorption du polluant sont très lents. Le métal est facilement solubilisable et la mobilité est donc importante. En ce qui concerne la rétention de ces polluants mobilisés dans le sous-sol, les études des relations solide-liquide sur différents lithofaciès montrent des résultats intéressants et permettent de mettre en évidence certains mécanismes chimiques de rétention (rétention sous forme de précipités d'oxy-hydroxydes ou de carbonate de cuivre). La modélisation des transferts d'eau et de solutés permet de valider l'hypothèse selon laquelle l'hétérogénéité des écoulements peut expliquer la régionalisation de la rétention des polluants.

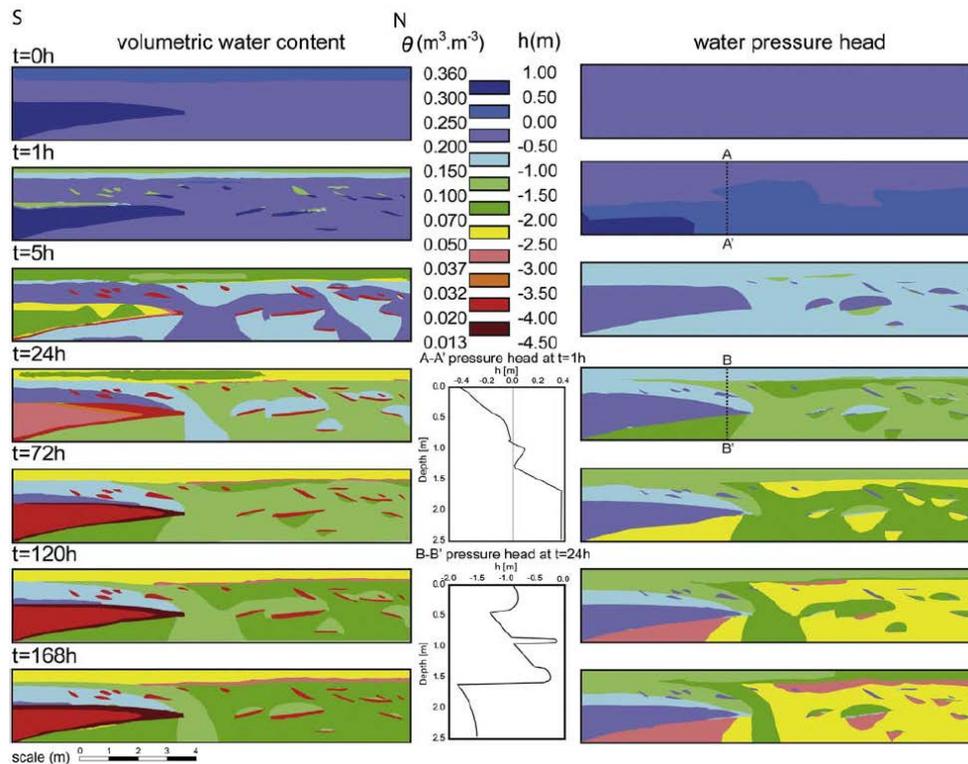


Figure 5 : Modélisation numérique 2D des champs de teneur en eau (volumetric water content) et du potentiel de pression (water pressure head) en fonction du temps pour le cas de la géométrie de la tranchée réalisée dans le bassin d'infiltration Django Reinhardt.

IMPLICATIONS PRATIQUES, RECOMMANDATIONS, REALISATIONS PRATIQUES, VALORISATION

L'étude des concentrations en contaminants des anthroposols de bassin d'infiltration de l'Est lyonnais permet de confirmer, d'un point de vue opérationnel, la nécessité d'un suivi régulier de ces anthroposols par les gestionnaires. Le projet a permis d'identifier des outils ou des paramètres de suivi de la pollution de ces sols. Actuellement, le principe de précaution implique toutefois la réalisation d'opérations de curage régulières afin de limiter le risque de migration des contaminants en profondeur. Ce projet ouvre des perspectives en matière d'utilisation des végétaux et de la faune contenue dans les anthroposols de bassins comme bioindicateurs de pollution. Toutefois, l'avancement actuel des recherches ne permet pas d'envisager un transfert opérationnel à court ou moyen terme.

Importance des caractéristiques de la zone non saturée

Les résultats du projet FAFF montrent ainsi qu'il serait préférable de définir l'épaisseur minimale de la zone non-saturée non plus uniquement en fonction de la profondeur de la nappe et de l'aire des surfaces d'infiltration, mais également en fonction des caractéristiques du compartiment filtre constitué par la formation en place (hétérogénéité des lithofaciés, géochimie, granulométrie, hydrofaciés, etc.). Par défaut, une épaisseur nominale minimale de zone non-saturée de un mètre (1) pourrait être considérée (épaisseur minimale généralement considérée actuellement). Cette épaisseur nominale pourrait être augmentée par l'application de coefficients pondérateurs défavorables, fonctions des caractéristiques du compartiment « filtre » constitué de la formation en place. A minima, les caractéristiques suivantes seraient à considérer :

- degré d'hétérogénéité de la formation en place : un fort degré d'hétérogénéité, pouvant conduire à l'existence de chemins préférentiels, impliquerait l'application d'un coefficient pondérateur défavorable sur l'épaisseur nominale de la zone non-saturée,
- présence de végétaux en surface des ouvrages d'infiltration : les chemins préférentiels de l'eau et les particules transportées sous forme dissoute ou particulaire le long des racines des végétaux impliquant une accumulation à la base de l'appareil racinaire, un coefficient pondérateur défavorable pourrait être appliqué sur l'épaisseur nominale de la zone non-saturée,
- nature géochimique de la formation en place : les sols carbonatés assurant une bonne rétention des ETM, l'infiltration dans des formations de natures géochimiques différentes pourrait également impliquer l'application d'un coefficient pondérateur défavorable sur l'épaisseur nominale de la zone non-saturée.

Nécessité de caractériser le degré d'hétérogénéité des formations en place

Le radar géologique est une méthode à haut rendement, permettant la reconnaissance rapide de vastes surfaces. Des fréquences d'antenne comprises entre 100 MHz et 400 MHz sont préconisées pour la caractérisation du degré d'hétérogénéité. Celui-ci pourrait être apprécié par l'intermédiaire de la densité des principaux réflecteurs associés aux interfaces entre macroformes, ainsi que par la densité des réflecteurs de forte amplitude (traduisant un contraste fort en termes de granulométrie, généralement associé à un contraste de teneurs en eau). La tomographie de résistivité électrique permet quant à elle de localiser aisément la profondeur du toit de la nappe, si cette information n'est pas connue. Elle peut permettre également de caractériser le degré d'hétérogénéité d'une formation alluvionnaire à l'échelle métrique ou plurimétrique.

Nécessité d'homogénéiser la surface de la zone non saturée

Les modélisations numériques d'écoulement réalisées dans le cadre de ce projet ont permis de montrer que ce sont les hétérogénéités de dimensions métriques à plurimétriques qui ont une influence sur les flux infiltrés. Il semble donc que, d'un point de vue opérationnel, le degré d'hétérogénéité doit être évalué à cette échelle métrique à décimétrique. Afin de limiter les phénomènes d'écoulements préférentiels, il est préconisé de favoriser sur les premières dizaines de centimètres sous la surface des écoulements homogènes par une homogénéisation des premiers centimètres du sous-sol par passage d'un engin mécanique et/ou par la mise en place en surface d'un matériau homogène de nature carbonatée dans la mesure du possible, avec éventuellement la mise en place d'un géotextile ayant pour fonction d'homogénéiser les écoulements.

PARTENARIATS MIS EN PLACE, PROJETS, ENVISAGES

Le projet FAFF a permis de mettre en place un consortium de chercheurs qui ont pu partager leurs expériences. Il constitue une des bases de collaborations actuelles sur d'autres projets notamment **un projet international CAPES-COFECUB** (coordinateur français : T. Winiarski) avec la ville de Recife au Brésil et l'Universidade Federal de Pernambuco : « Evaluation du potentiel d'infiltration et de stockage d'eau pluviale de la ville de Recife – Nord-Est du Brésil ». Par ailleurs, **le projet WATURBAN** mis en place avec des spécialistes des sciences du sol et des géophysiciens du consortium, mais également des biologistes spécialistes des organismes souterrains et des microbiologistes spécialistes des germes pathogènes, a été retenu à l'appel à préproposition de l'ANR « Gestion sobre des ressources et adaptation au changement climatique ». **Un projet EC2CO** (INSU CNRS 2013-2014, C. Delolme, L. Lassabatere) avec des chercheurs du LGCIE (INSA de Lyon) et l'UQAT(Québec) a pour objectif de comprendre et modéliser l'évolution des surfaces des bassins d'infiltration et leurs rôles dans la mobilité des métaux traces.

LISTE DES OPERATIONS DE VALORISATION

Au cours de ce projet quatre (5) articles ont été publiés dans des revues à comité de lecture et nous avons participé à huit (8) colloques ou congrès. A travers trois (3) thèses et onze (11) TFE/ Master, ce projet a permis la formation par et à la recherche de plusieurs étudiants français et étrangers, ingénieurs et universitaires.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Publications scientifiques parues

Coutinho A.P., Lassabatere L. and Winiarski T. (*in press*) Vadose zone heterogeneity effect on unsaturated water flow modeling at meso-scale. *Journal of Water Resource and Protection*.

Chevalier A., Legchenko A., Girard J-F. and Descloitres M., (2014). Monte Carlo inversion of 3D Magnetic Resonance measurements, *Geophysical Journal International*. doi: 10.1093/gji/ggu091.

Bedell J.-P., Mourier B., Provot J. and Winiarski T. (2013). Dominant vegetation and influence by the type of urban tissue on its establishment in several stormwater infiltration basins of the East Lyon. *Water Science and Technology*. 68 : 12, 2576-2583.

Goutaland D., Winiarski T., Lassabatere L., Dubé J.-S. and Angulo-Jaramillo R. (2013). Sedimentary and hydraulic characterization of a heterogeneous fluvioglacial deposit: application to the modeling of unsaturated flow. *Engineering Geology* 166 (2013) pp 127-139.

Winiarski T., Lassabatere L., Angulo-Jaramillo R. and Goutaland D. (2013). Characterization of the heterogeneous flow and pollutant transfer in the unsaturated zone in the fluvio-glacial deposit. *Procedia Environmental Sciences* Vol 19, 955 – 964.

Publications scientifiques prévues (titre, auteur et journal provisoires)

Bedell JP, Mourier B, Piron D, Sarles L, Marchand P, Winiarski T. Earthworms in stormwater sediment of infiltration basin: Evidence, distribution and bioaccumulation. *Chemosphere ou Ecotoxicology and Environmental Safety*.

Bedell JP, Mourier B, Delolme C, Bastide T, Hammada M, Winiarski T. Bioaccumulation of trace elements in wild plants of infiltration basins. *Environmental monitoring assessment ou Environmental Pollution*.

Coutinho, A.P., Winiarski, T., Prédélus, D., Cabral, J., Lassabatère, L., Antonino, A.C.D., Angulo-Jaramillo, R. Effect of the GPR resolution in the estimation of the vadose zone structural heterogeneity for flow modeling. *Engineering Geology (or Journal of Water Resource and Protection)*.

Coutinho, A.P., Angulo-Jaramillo, R., Antonino, A.C.D., Winiarski, T., Lassabatère, L. Introduction of a vadose zone structural heterogeneity index to assess vadose zone water flow. *Water Research, Journal of Hydrology or Advances in Water Resources*.

Delolme, Poulénard, Bedell, Winiarski. Qualité de sédiments de bassin d'infiltration : étude des bassins d'infiltration de l'Est Lyonnais.

Delolme, Lassabatere, Winiarski, Poulenard : mobilité spécifique du cuivre en milieu urbain : expériences et modélisation.

Lassabatere, Delolme, Winiarski : mesure et modélisation de la rétention du cuivre en solution simple ou complexe dans des sols carbonatés.

Winiarski, Goutaland, Lassabatere, Angulo. Modélisation des écoulements et observation in situ par GPR et ERT d'un front d'infiltration en lieu hétérogène.

Winiarski et tous les partenaires : rédaction d'un article de synthèse sur la fonction épuratrice/filtration des bassins d'infiltration d'eaux pluviales basés sur les principaux résultats de notre projet.

COLLOQUES

Participations passées à des colloques

Coutinho A., Prédélus D., Lassabatere L., Slimene E., Antonino A., Winiarski T., Cabral J. and Angulo-Jaramillo R. (2014). Effect of the method of estimation of soil saturated hydraulic conductivity with regards to the design of stormwater infiltration trenches. European Geosciences Union General Assembly 2014 Vienna, Austria, 27 April – 02 May 2014.

Bedell J.-P., Mourier B., Provot J. et Winiarski T. (2013).Vegetation of several stormwater infiltration basins in the Eastern part of Lyon: parameters influencing the dominant species establishment. HydroEco, Rennes, 13 au 16 mai 2013.

Bedell J.-P., Mourier B., Provot J. et Winiarski T. (2013).Végétation dominante et influence du type de tissu urbain sur son établissement dans plusieurs bassins d'infiltration des eaux pluviales de l'Est Lyonnais. NOVATEC 2013, Lyon, France.

Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R., Winiarski, T., Yilmaz, D. (2013). BEST method: Characterization of soil unsaturated hydraulic properties Advances in Unsaturated Soils - Proceedings of the 1st Pan-American Conference on Unsaturated Soils, Cartagena de Indias (Colombia), PanAmUNSAT 2013 , pp. 527-532

Legchenko A., Girard J.F., Perttu N., Vouillamoz J.M., Baltassat J.M. and Morlighem S., (2013), Experimental Verification of Advanced SNMR Modeling, Near Surface Geoscience 2013 – 19th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, 9-11 September, Bochum, Germany,, paper We S2b 04.

Winiarski T., Lassabatere L., Angulo-Jaramillo R., Goutaland D., (2011). Modelling heterogeneous flow in the vadoze zone underneath a stormwater infiltration basin. AGU 2011, Full meeting, San Fransisco, USA, 5-6 décembre 2011.

Chevalier, A. Legchenko and M. Boucher, (2012), 3D Monte Carlo inversion of magnetic resonance measurements applied to karst conduit imaging, European Geosciences Union General Assembly 2012, Vienna, Austria, 22 – 27 April 2012, Geophysical Research Abstracts, EGU2012-8924.

Delolme C, Poulenard J., Dorioz J.M., Bedell J.P., and Winiarski T. Is there a specific geochemical signature of urban soils dedicated to stormwater infiltration ? Geophysical Research Abstracts, Vol. 16. European Geosciences Union General Assembly 2014, Vienna, Austria, 22 – 27 April 2014

ENCADREMENTS DE TRAVAUX

TFE/Master effectués durant le projet

- Sarles L. (2013). Essai de suivi des Lombriciens communs à la surface des bassins d'infiltration des eaux pluviales. Master Ecosciences, microbiologie, Université Claude Bernard, Lyon 1.
- Thole R. (2013). Éléments traces métalliques dans des racines de plantes prélevées dans des bassins d'infiltration d'eau pluviale : Extraction et microlocalisation. Travail de Fin d'Etudes (TFE), Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat.
- Provot J. (2012). Etude de la végétation dans des bassins d'infiltration des eaux pluviales de l'Est Lyonnais. Master Ecosciences, microbiologie, Université Claude Bernard, Lyon 1.
- Berruezo C. (2012). Caractérisation de la matière organique de bassin d'infiltration. Master Chimie de l'Environnement et Du Développement Durable, Université de Savoie.
- Gillet H. (2012). Intérêt de l'utilisation de l'imagerie de résistivité électrique pour le suivi d'infiltration en zone non-saturée. École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy.
- De Rouck A.-C. (2012). Rétention des polluants issus d'eaux pluviales dans un dépôt fluvioglaciaire support à divers ouvrages d'infiltration. Couplage écoulements préférentiels/interactions géochimiques pour une meilleure prédiction des transferts réactifs. Travail de Fin d'Etudes (TFE), Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat
- Sage J. (2012). Mobilité des métaux et du carbone organique dans des matériaux de l'assainissement pluvial de la région Lyonnaise. Travail de Fin d'Etudes (TFE), Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat.
- Miossec V. (2012). Caractérisation des hétérogénéités fluvio-glaciaires du bassin d'infiltration Django Reinhardt : Proposition d'une géométrie 3D. Master 2 Recherche Sciences de l'Environnement Industriel et Urbain, Master co-habilité INSA de Lyon, Ecole des Mines de Saint Etienne, ENTPE.
- Tauzy dit Lonne S. (2012) Les bassins d'infiltration d'eaux pluviales : facteurs géo-environnementaux et caractéristiques physico-chimiques des sédiments accumulés. Travail de Fin d'Etudes (TFE), Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat.
- Furmanek N. (2011). Caractérisation des hétérogénéités fluvio-glaciaires dans la zone non saturée sous-jacente au bassin d'infiltration Django Reinhardt. Travail de Fin d'Etudes (TFE), Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat.
- Labonne C. (2010). Modélisation des écoulements en milieu hétérogène non saturée. Influence du degré d'hétérogénéité sur les champs d'écoulement. Mise au point du modèle et résultats préliminaires. Master 2 Recherche Sciences de l'Environnement Industriel et Urbain, Master co-habilité INSA de Lyon, Ecole des Mines de Saint Etienne, ENTPE.

Thèses

- Ben Slimene E. (soutenance prévue fin 2015). Modélisation de l'impact d'écoulements préférentiels sur les transferts des polluants dans un dépôt fluvio-glaciaire (titre provisoire). Thèse de doctorat, Ecole doctorale Chimie de Lyon, Spécialité : Sciences de l'Environnement Industriel et Urbain.
- Artur Paiva Coutinho (26 février 2015). Effet de l'hétérogénéité du sous sol sur l'écoulement de l'eau A Application à un bassin d'infiltration d'eaux pluviales. Thèse de doctorat de l'Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Brésil.

Antoine Chevalier (02 juillet 2014). Imagerie 2D/3D de la teneur en eau en milieux hétérogènes par méthode RMP : biais et incertitudes. Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble.

ENSEIGNEMENT – FORMATION

Des travaux issus de ce projet illustrent les enseignements dispensés dans nos établissements, en voici quelques un à titre d'exemple :

L'impact de l'urbanisation sur l'environnement souterrain L'exemple de l'eau. Cours dispenser à l'ENTPE - 3A, dans le cadre du cours : bâtiment et environnement urbain et à l'Université F. Rabelais dans le cadre du M2 Ingénierie des hydrosystèmes et des bassins versants

METHODOLOGIES (GUIDES...)

Une action particulière a été menée en direction des aménageurs et des gestionnaires qui est présentée dans la partie D : valorisation du rapport final. Il est prévu le 7 mai 2015, une restitution de nos principaux résultats auprès des services techniques du Grand Lyon en collaboration avec le GRAIE et l'OTHU. En parallèle, nous produirons un document de bonne facture (brochure, guide) à diffuser auprès des aménageurs et gestionnaires d'ici la fin avril 2015.