EFFLUENTS HOSPITALIERS ET STATIONS D'EPURATION URBAINES : SEPT ANNEES DE SUIVI, D'ETUDES ET DE RECHERCHE SUR SIPIBEL *

Jean-Luc BERTRAND-KRAJEWSKI[1*], Rayan BOUCHALI[2], Agnès BOUCHEZ[3], Elodie BRELOT[4], Claire BRIVET[5], Christophe DAGOT[6], Pascal DI MAJO[7], Adriana GONZALEZ-OSPINA[8], Jérôme LABANOWSKI[9], Yves LÉVI[10], Anne-Claire MAURICE[11], Luc PATOIS[12], Yves PERRODIN[13], Claire TILLON[14], Laure WIEST[15]

[1]Université de Lyon, INSA Lyon, DEEP, EA 7429, 34 avenue des Arts, F-69621 Villeurbanne cedex, courriel : jean-luc.bertrand-krajewski@insa-lyon.fr, * auteur correspondant
[2]UMR Ecologie Microbienne, CNRS 5557, Inra 1418, UCBL - VetAgro Sup, Bâtiment principal, aile 3, F-69280 Marcy-l'Étoile, courriel : rayan.bouchali@vetagro-sup.fr
[3]UMR CARRTEL, Inra, USMB, 75 bis avenue de Corzent, F-74200 Thonon-les-Bains, courriel : agnes.bouchez@inra.fr
[4]GRAIE, 66 boulevard Niels Bohr, F-69100 Villeurbanne, courriel : elodie.brelot@graie.org
[5]SM3A – Syndicat Mixte d'Aménagement de l'Arve et de ses Affluents, 300 chemin des Prés Moulin, F-74800 Saint-Pierre-en-Faucigny, courriel : cbrivet@sm3a.com
[6]Université de Limoges, Faculté de médecine, UMR-Inserm 1092, 2 rue du Dr Marcland, F-87000 Limoges, courriel : christophe.dagot@unilim.fr
[7]CHAL – Centre Hospitalier Alpes Léman, 558 route de Findrol, BP 20500, F-74130 Contamine sur Arve, courriel : pdimajo@ch-alpes-leman.fr
[8]Suez – Treatment Infrastructure Wastewater Technical & Innovation Division, 183 avenue du 18 juin 1940, F-92500 Rueil-Malmaison, courriel : adriana.gonzalez-ospina@suez.com
[9]Université de Poitiers, ENSIP, UMR CNRS 7285, IC2MP, F-86073 Poitiers cedex courriel : jerome.labanowski@univ-poitiers.fr
[10]Université Paris Sud, Université Paris-Saclay, UMR 8079, CNRS, AgroParisTech, Faculté de pharmacie, 5 rue Jean-Baptiste Clément, F-92290 Chatenay-Malabry, courriel : yves.levi@u-psud.fr
[11]EHESP Rennes & EVS Labex IMU, Campus LyonTech la Doua – Atrium, 43 bd du 11 novembre 1918, F-69622 Villeurbanne cedex, courriel : anneclaire.maurice@gmail.com
[12]SRB – Syndicat des Eaux des Rocailles et de Bellecombe, 160 grande rue, F-74930 Reignier-Esery, courriel : lpatois@s-rb.fr
[13]Université de Lyon, ENTPE, CNRS, UMR 5023 LEHNA, rue Maurice Audin, F-69518 Vaulx-en-Velin cedex courriel : yves.perrodin@entpe.fr
[14]Claire Tillon Consulting, 18 place Tabareau, F-69004 Lyon, courriel : ctillon@gmail.com
[15]Université de Lyon, CNRS, université Claude Bernard Lyon 1, ENS de Lyon, Institut des sciences analytiques, UMR 5280, 5 rue de la Doua, F-69100 Villeurbanne, courriel : laure.wiest@isa-lyon.fr

I. INTRODUCTION

Cet article présente la genèse, la mise en place et le fonctionnement de l'observatoire SIPIBEL (Site Pilote de Bellecombe, en Haute Savoie) consacré aux résidus de médicaments, détergents et biocides dans l'eau (réseaux de transport des eaux usées urbaines et hospitalières, station de traitement des eaux usées, milieux aquatiques de surface et souterrains) et les enseignements que l'on peut tirer de son fonctionnement depuis 2011. Quelques-uns des résultats scientifiques de l'observatoire SIPIBEL sont illustrés par une série d'encarts graphiques commentés. Pour une information plus détaillée sur l'ensemble des résultats obtenus, nous renvoyons le lecteur aux articles et thèses publiés (notamment Lecomte *et al*., 2018, Bertrand-Krajewski *et al*., 2018) et au site internet www.sipibel.org où de nombreux documents sont disponibles.

II. LA GENESE ET LA MISE EN PLACE

La mise en place de l'observatoire SIPIBEL a été initiée par une problématique très concrète. En 2009, le Syndicat des Eaux des Rocailles et de Bellecombe (SRB), en Haute-Savoie (Figure 1), préparait une extension de sa station de traitement des eaux usées

* 23èmes JIE – Journées Information Eaux, Poitiers, France, 9-11 octobre, conférence plénière d'ouverture, pp. 03-1 – 03-18. ISBN 9782490657308

(STEU) de Bellecombe en vue notamment de recevoir et traiter les eaux usées du futur Centre Hospitalier Alpes Léman (CHAL) alors en construction. L'arrêté préfectoral du 7 mai 2009 relatif à cette extension comportait deux exigences, à mettre en œuvre sur une durée minimale de 3 ans : 1) un traitement entièrement séparé des futurs effluents hospitaliers et des autres effluents urbains, et 2) un suivi expérimental des effluents hospitaliers et de leur traitement afin de pouvoir fournir des éléments d'aide à la décision sur le regroupement ultérieur éventuel des effluents hospitaliers et urbains dans une seule file de traitement.

Ces exigences étaient fondées sur quelques interrogations clés : les effluents hospitaliers sont-ils fortement concentrés en résidus de médicaments, détergents et biocides qui seraient préjudiciables au bon fonctionnement de la STEU ? Les effluents hospitaliers sont-ils susceptibles de compromettre l'épandage agricole des boues ? Une filière spéciale de traitement est-elle nécessaire pour limiter les rejets de résidus de médicaments, détergents et biocides dans le milieu aquatique superficiel, en l'occurrence l'Arve ?

La première exigence nécessitait la création de deux files de traitement des eaux et des boues entièrement séparées au sein de la STEU, ce qui a été fait en réutilisant une file de traitement d'une capacité de 5 400 équivalents-habitants déjà existante sur la station, donc largement surdimensionnée pour le CHAL dont la capacité est de 450 lits. La file urbaine, de son côté, avait une capacité de 26 000 équivalents-habitants (Figure 3). La mise en place de la deuxième exigence nécessitait des compétences que le SRB ne possédait pas en interne. Ensemble, les responsables élus et techniques du SRB se sont alors tournés vers le GRAIE (Groupe de Recherche, Animation technique et Information sur l'Eau), structure expérimentée dans l'animation de dispositifs de recherche, pour trouver les partenaires, notamment scientifiques, susceptibles d'effectuer le suivi expérimental demandé et d'apporter les éléments de réponse pour une décision à prendre au terme du suivi de 3 ans. Dans un dialogue permanent et une approche de co-construction avec le CHAL, le Syndicat Mixte d'Aménagement de l'Arve et de ses Affluents (SM3A), et en lien étroit avec l'agence de l'eau, l'agence régionale de santé, les ministères en charge de la santé et de l'environnement, l'Onema / AFB et le département de Haute-Savoie, les bases du futur observatoire ont été posées par le SRB et le GRAIE.

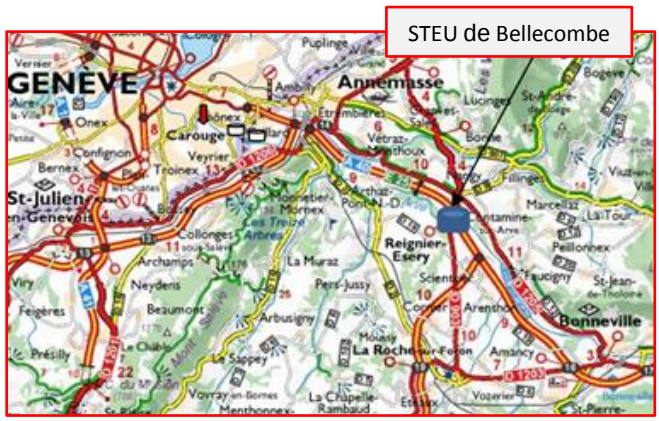


Figure 1 : Localisation de l'observatoire SIPIBEL en Haute-Savoie.

III. DES SITES EXPERIMENTAUX ET UN RESEAU D'ACTEURS OPERATIONNELS ET SCIENTIFIQUES

En mars 2010, l'observatoire SIPIBEL était créé (Figures 2 et 3), en regroupant des acteurs scientifiques, opérationnels et territoriaux complémentaires (Tableau 1), pour travailler de manière pluridisciplinaire sur un certain nombre de questions élargies par rapport aux exigences de l'arrêté préfectoral. Ce dispositif d'observatoire collaboratif sur les résidus de médicaments, détergents et biocides, et de projets de recherche associés, était précurseur

en France. Il avait pour ambition de répondre à la fois à des questions scientifiques pointues génériques et aux problématiques et applications pragmatiques locales, en parfaite adéquation également avec les plans régional et national en Santé Environnement.



Figure 2 : Les trois éléments principaux de l'observatoire SIPIBEL. De gauche à droite : la STEU de Bellecombe, le CHAL et l'Arve (crédits photo : GRAIE, CHAL, Suez).

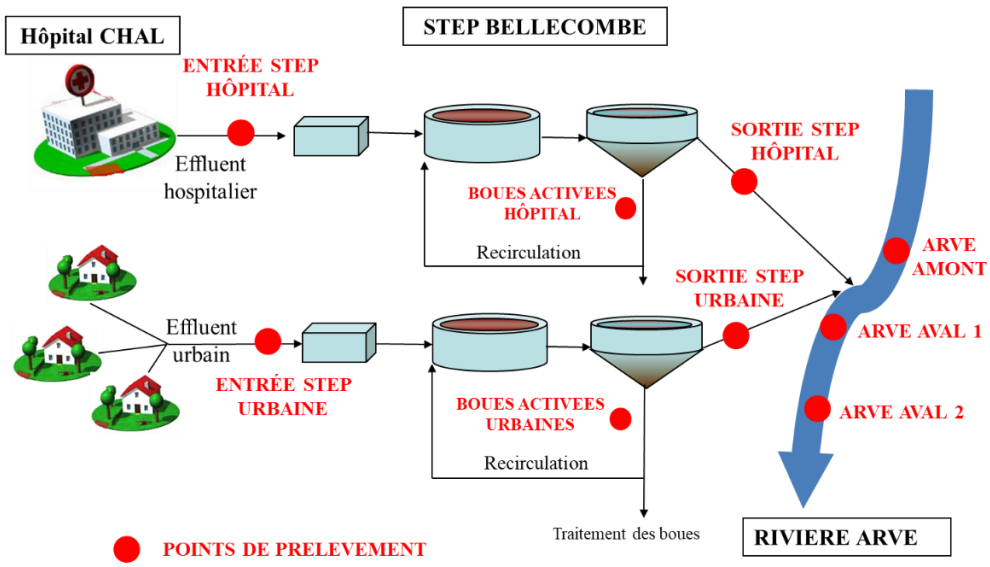


Figure 3 : Points de prélèvements des campagnes d'échantillonnage de l'observatoire SIPIBEL sur la STEU de Bellecombe et la rivière Arve.

Tableau 1 : Les membres et partenaires de l'observatoire SIPIBEL.

Membres territoriaux et industriels	Compétences / Spécialités
SRB (Syndicat des Eaux des Rocailles et de Bellecombe)	Co-porteur de SIPIBEL, gestionnaire de la STEU de Bellecombe
CHAL (Centre Hospitalier Alpes Léman)	Centre hospitalier raccordé à la STEU de Bellecombe
SM3A (Syndicat Mixte d'Aménagement de l'Arve et de ses Affluents)	Gestionnaire de la rivière Arve
Suez	Concepteur de la STEU de Bellecombe, pilotes de traitement
Membres du consortium scientifique	
INSA Lyon	Flux de micropolluants, métrologie et modélisation
ENTPE	Ecotoxicologie
Université de Limoges	Antibiorésistance, procédés de traitement
Université Paris-Sud	Caractérisation des flux, perturbation endocrinienne
ISA (Institut des Sciences Analytiques) - CNRS	Méthodes d'analyse des médicaments, détergents et biocides
Animation - coordination générale	
GRAIE	Co-porteur de SIPIBEL, coordinateur et animateur
Partenaires scientifiques et opérationnels	
Université de Poitiers	Procédés de traitement, microbiologie
VetAgroSup Lyon	Ecologie microbienne
INRA Thonon	Ecologie microbienne dans les milieux aquatiques, écotoxicologie
EHESP Rennes	Anthropologie sociale et urbaine
EVS – Labex IMU (Intelligence des Mondes Urbains) Lyon	Sciences humaines et sociales
Claire Tillon Consulting- Epipactis	Conseils aux collectivités, évaluation et conduite de projets

ENCART 1 : Quelques chiffres clés.





Crédits photo : https://fr.dreamstime.com

Plus de 130 paramètres physiques, chimiques et biologiques suivis, dont 15 médicaments.
Plus de 55 000 données bancarisées.
En tout, 32 membres et partenaires associés, dont 10 équipes ou laboratoires de recherche.
4 thèses, plus de 130 articles scientifiques et techniques en français et en anglais.
2 conférences de restitution.
1 portail internet : www.sipibel.org, avec plusieurs sites associés.

Les quatre axes de recherche principaux de SIPIBEL sont les suivants :

Axe 1 : Connaissance et modélisation des flux urbains et hospitaliers.
Axe 2 : Procédés de traitement des micropolluants en station de traitement des eaux usées.
Axe 3 : Risques écotoxicologiques, écologiques et sanitaires.
Axe 4 : Sociologie et changements de pratiques.

La STEU de Bellecombe a fait l'objet de campagnes mensuelles de prélèvements proportionnels aux volumes écoulés sur 24 h en entrée et sortie des files eau des effluents hospitaliers et urbains, ainsi que sur les boues des bassins d'aération correspondants. Les trois points dans l'Arve (amont, aval 1 et aval 2) ont été échantillonnés également sur 24 h, à raison de 3 campagnes par an. Des suivis des boues extraites des files eau, avant et après séchage, ont également été effectués. Sur chaque échantillon ont été effectuées des analyses physico-chimiques (polluants classiques, métaux, 15 médicaments, détergents & biocides) et biologiques (essais écotoxicologiques, perturbation endocrinienne, anti-biorésistance, etc.) portant sur plus d'une centaine de paramètres en tout.

A partir de 2013, les sites de l'observatoire SIPIBEL (Figure 3) ont été complétés par d'autres situés dans la partie aval du bassin versant de l'Arve et dans la nappe du Genevois, dans le cadre du projet Interreg IV franco-suisse IRMISE (Impact des Rejets de Micropolluants et résidus de médicaments Issus de Stations d'Epuration). Il s'agissait alors d'intégrer une échelle spatiale élargie, avec des points de mesure complémentaires sur l'Arve, les rejets de deux autres STEU (Ocybèle en France et Villette en Suisse), ainsi que la nappe du Genevois utilisée pour la production d'eau potable de la région (Figure 4). En effet, la nappe du Genevois étant sollicitée au-delà de ses capacités de réalimentation naturelle depuis les années 1970, une station de réalimentation transfrontalière a été construite à Vessy (Suisse) : elle prélève de l'eau de l'Arve, la filtre et l'injecte dans la nappe du Genevois, à raison de 9 millions de m^3/an, soit 60 % du volume annuel prélevé. La question posée était celle de l'éventuelle contamination de la nappe par des résidus de médicaments et des détergents. Les points additionnels aval sur l'Arve et le Rhône ont fait l'objet de 3 campagnes par an, la station de Vessy et les puits sur la nappe de 2 campagnes par an.

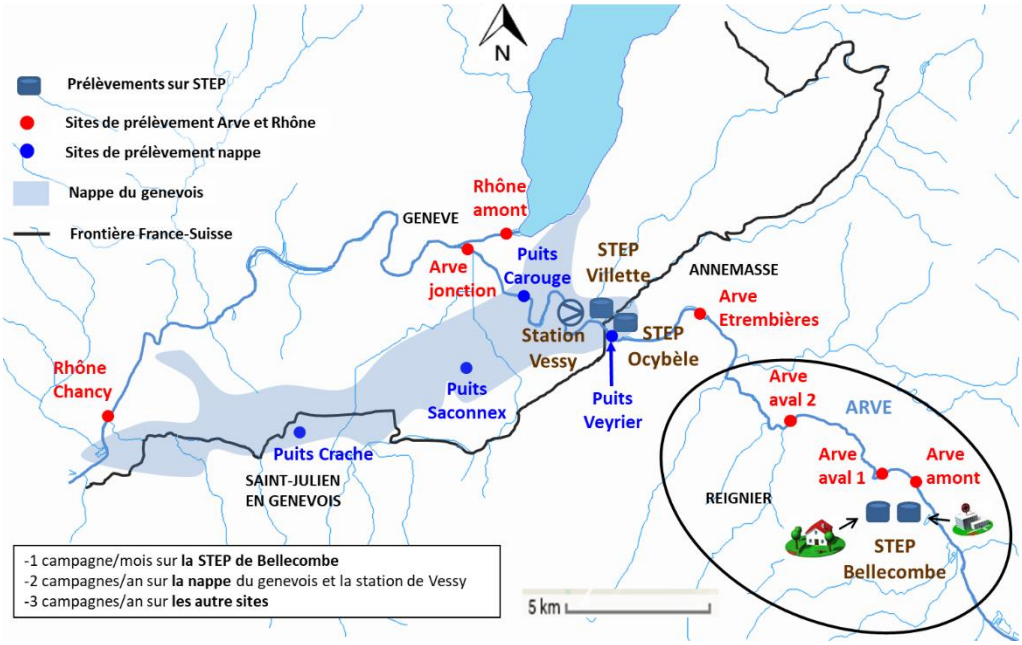


Figure 4 : Points de prélèvement SIPIBEL – IRMISE : rejets des STEU de Bellecombe, Ocybèle et Villette, 7 points sur l'Arve et le Rhône, et 4 puits dans la nappe du Genevois.

IV. VERS DES CHANGEMENTS DE PRATIQUES

Le premier résultat pratique de SIPIBEL a été de répondre à la question posée par l'arrêté préfectoral de 2009 : il est préférable de traiter les effluents hospitaliers à la STEU, avec les autres effluents urbains, en cohérence avec les conclusions similaires d'autres projets comme PILLS par exemple. En raison notamment de la part prépondérante des rejets urbains non hospitaliers dans les flux totaux, il n'est pas efficace de traiter spécifiquement les micropolluants des effluents hospitaliers. Il est important aujourd'hui de partager ces enseignements pour éviter des investissements publics inefficaces au regard de l'objectif de réduction des flux de micropolluants dans l'eau. SIPIBEL a également motivé les exploitants pour une gestion fine de la STEU de Bellecombe, qui, bien qu'étant de type classique à boues activées, peut avoir des rendements optimisés sur certains micropolluants.

Le CHAL, ouvert en 2012, était fortement engagé dans une démarche de réduction de l'utilisation des détergents et biocides, remplacés notamment par la vapeur pour un certain nombre d'usages. SIPIBEL a permis d'assoir cette stratégie, en mettant en lumière les enjeux environnementaux, dont les risques sanitaires à grande échelle avec le développement de l'antibiorésistance. Il a contribué à sensibiliser et mobiliser les services techniques et les soignants pour œuvrer ensemble dans cette direction.

Les solutions techniques de traitement des micropolluants dans l'eau (et des médicaments en particulier) existent et sont efficaces. Mais le principal enseignement de ce programme est peut-être que ces solutions ne peuvent pas seules nous prémunir des risques de pollution des milieux aquatiques et de nos ressources en eau. Il est essentiel de rechercher des solutions de réduction à la source, multiples et diversifiées. Pour ce faire, chacun, dans ses pratiques professionnelles et domestiques, doit être acteur de la préservation de la qualité de notre environnement.

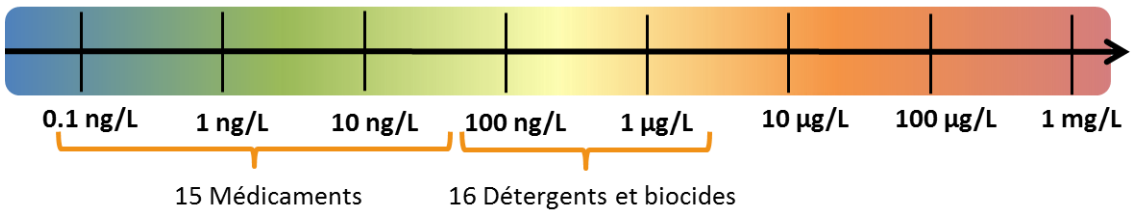
De nombreuses pistes existent : un meilleur usage et dosage des médicaments en lien avec la pharmacocinétique, la conception de molécules rendant le même niveau de service médical mais ayant des effets et impacts réduits sur l'environnement, la séparation

éventuelle des urines et excrétas des patients qui suivent des traitements avec des molécules au fort impact environnemental, une meilleure formation et information des professionnels de l'eau et de la santé, la sensibilisation des citoyens qui sont tous des patients à un moment ou un autre, etc.

La question des apports diffus de micropolluants, au-delà des seuls médicaments, a été un fil conducteur au cours de ces 7 années de recherches, études et réflexions. Elle a motivé la création de supports pédagogiques sur ce sujet si particulier, avec le sentiment de traiter un sujet orphelin, qui se doit d'être pris en compte dans des réflexions plus larges : l'incorporation de micropolluants dans la composition de très nombreux produits et leur diffusion dans l'environnement, ou l'utilisation des médicaments dans les pratiques de santé. Les acteurs du territoire du SRB et du SM3A sont prêts à s'emparer de ce sujet vis-à-vis de leurs habitants, mais en douceur, avec les précautions nécessaires pour ne stigmatiser ni le territoire, ni les patients, ni les soignants.

La diffusion des supports pédagogiques MédiATeS a permis de partager les principaux messages avec des professionnels de santé d'autres territoires (sur les régions Auvergne-Rhône-Alpes et PACA et à l'EHESP). Elle a suscité des questionnements nouveaux sur deux principaux aspects du sujet : la perception des risques liés à la présence de médicaments dans l'environnement et la capacité des professionnels de santé à participer à la réduction de ce risque en situation professionnelle.

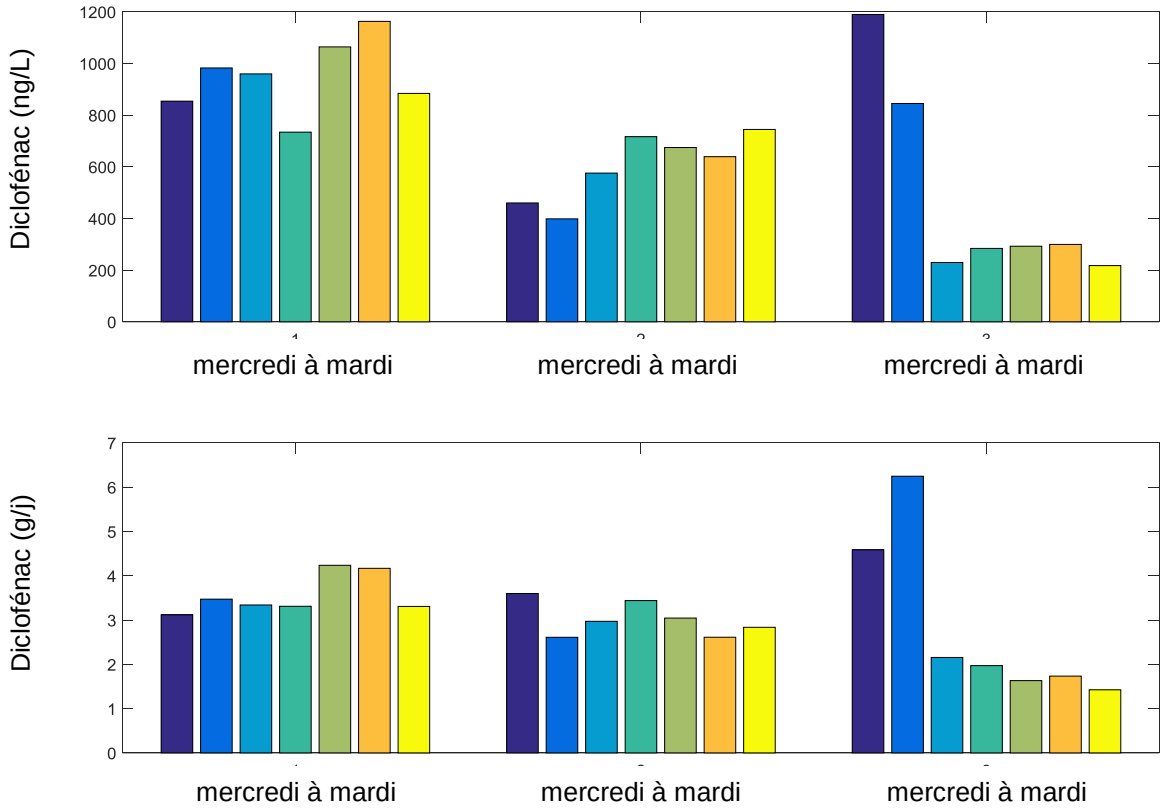
ENCART 2 : Développement de méthodes analytiques.



Limites de quantification des médicaments, détergents et biocides dans les eaux usées.

Les méthodes utilisées pour analyser les médicaments et les détergents-biocides comprennent une extraction sur phase solide dans le cas de la fraction dissoute et une extraction solide liquide dans le cas de la fraction particulaire, suivie par une analyse par chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem (LC-MS/MS). Ces méthodologies permettent d'obtenir des limites de quantification très basses, pour certaines inférieures au nanogramme par litre (ng/L), comme illustré ci-dessus pour les analyses des eaux usées. Les fractions dissoutes et particulaires des eaux usées sont séparées par filtration et extraites selon deux protocoles différents. L'analyse séparée des deux fractions des eaux usées est d'autant plus importante pour certains détergents-biocides, tels que les ammoniums quaternaires, que leurs fractions particulaires sont supérieures à 70 %. L'enjeu est moindre en ce qui concerne les médicaments, plus hydrophiles. La particularité des médicaments vient plutôt du fait qu'ils sont souvent excrétés du corps humain sous forme de métabolites qui doivent également être surveillés. En effet, dans le corps humain et dès qu'ils sont introduits dans les réseaux et l'environnement, les produits pharmaceutiques subissent des processus de métabolisation et/ou de dégradation. Le suivi des métabolites du sulfaméthoxazole dans les échantillons de SIPIBEL a notamment montré la présence d'acétyl-sulfaméthoxazole en concentrations équivalentes voire supérieurs à la molécule parente.

ENCART 3 : Variabilité des concentrations moyennes et des flux journaliers de résidus de médicaments à l'entrée de la station de traitement des eaux usées de Bellecombe en provenance du bassin versant urbain. Importance d'un suivi de long terme.



Les concentrations moyennes journalières et les flux journaliers des résidus de médicaments sont très variables pour l'ensemble des 15 molécules étudiées. Cette forte variabilité est due à la fois à la variabilité des débits (temps sec / temps de pluie, semaines / week-ends, etc.) et à la variabilité élevée des consommations de médicaments. La figure ci-dessus illustre cette variabilité dans le cas du diclofénac, dont les concentrations moyennes journalières (graphiques du haut) ont été mesurées pendant 7 jours consécutifs (du mercredi au mardi) et sur trois semaines différentes non consécutives. En deuxième semaine, on observe notamment une montée progressive des concentrations, alors que les flux (graphique du bas) sont relativement stables ; cela est dû à des événements pluvieux au début de la campagne qui diluent les effluents avec un retour progressif aux conditions de temps sec. Ces variations importantes des concentrations et des flux montrent que la compréhension des phénomènes en jeu ne peut pas être correcte avec seulement quelques campagnes de mesure : un suivi de long terme de type observatoire est indispensable.

V. RESULTATS PRINCIPAUX ET ENSEIGNEMENTS

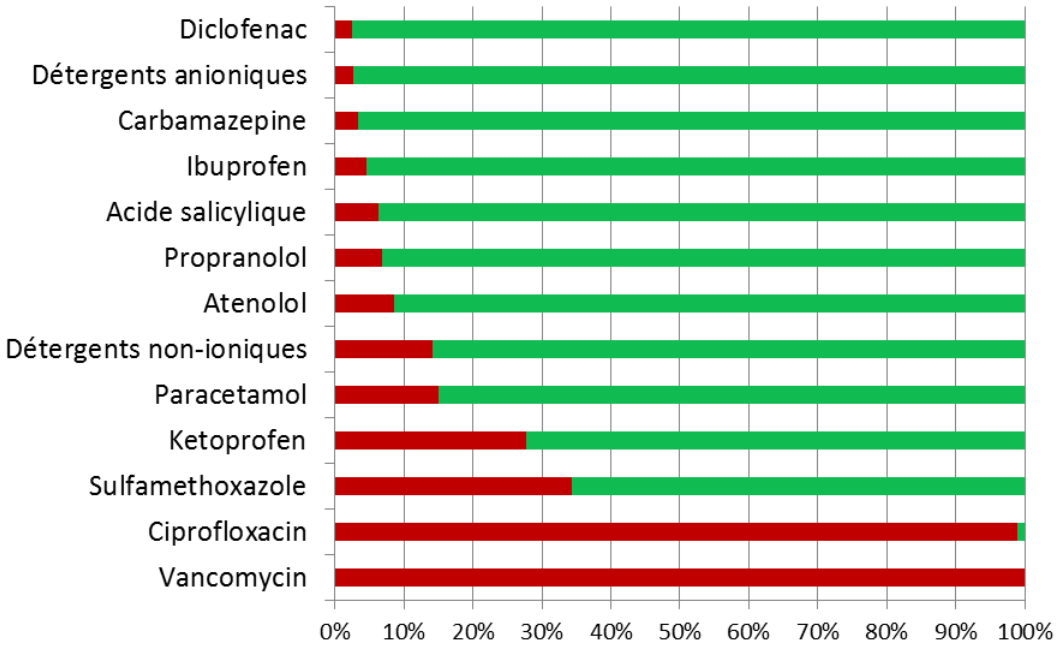
Les résultats principaux de l'observatoire SIPIBEL et des projets de recherche associés (IRMISE, RILACT, MediATeS, Persist-Env) sont les suivants :

- Des développements analytiques nouveaux ont permis de mesurer des médicaments et des détergents dans les phases dissoutes et particulaires, ainsi que les métabolites de certains médicaments (diclofénac et sulfaméthoxazole), dans différentes matrices (eaux usées, eau de rivière et de nappes, boues activées, etc.).
- Le suivi des phases dissoutes et particulaires, et plus encore des métabolites, est indispensable pour estimer correctement des flux totaux et établir des bilans de masse. Toute analyse de données portant uniquement sur les phases dissoutes et ne tenant pas compte des métabolites éventuels doit être regardée avec précaution.
- Les réseaux d'assainissement doivent être considérés comme des réacteurs bio-physico-chimiques, certains résidus de médicaments étant déjà partiellement dégradés

et les équilibres entre molécules mères et métabolites pouvant être significativement affectés, lors de leur transfert dans les collecteurs, en conditions tant aérobies (écoulements gravitaires) qu'anaérobies (conduites de refoulement).

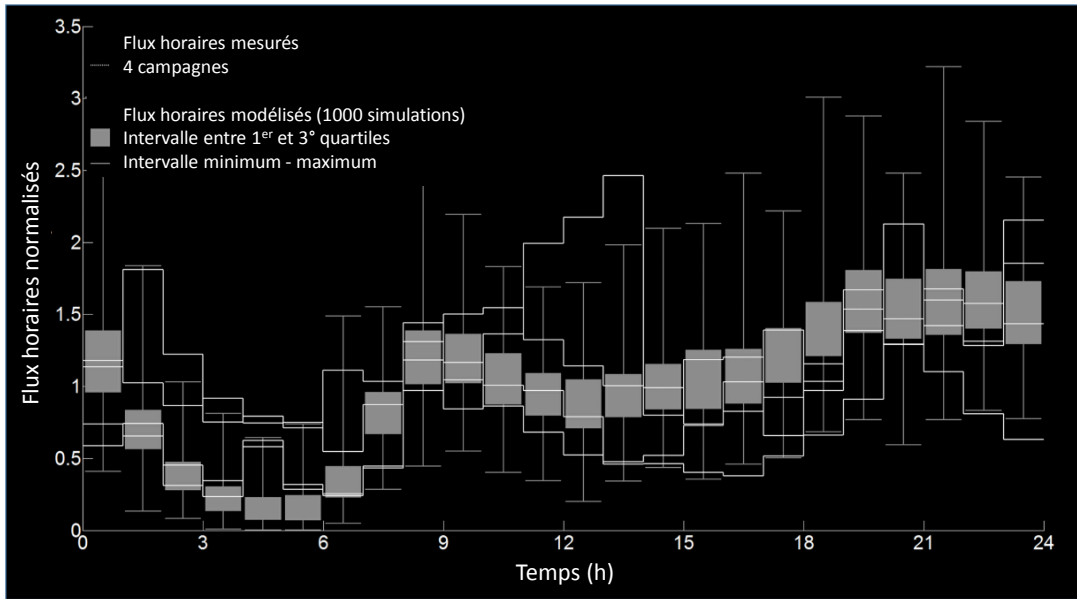
- Un nouveau modèle stochastique d'estimation des flux horaires et journaliers de résidus de médicaments dans les eaux usées a été proposé, avec une amélioration des résultats par rapport aux modèles classiques faisant l'hypothèse d'une simple proportionnalité entre les ventes de médicaments et les concentrations dans les eaux usées.
- La majorité des flux journaliers de résidus de médicaments et de détergents arrivant à la STEU de Bellecombe proviennent des effluents urbains, les effluents hospitaliers n'étant une contribution majoritaire que pour certaines molécules utilisées spécifiquement à l'hôpital.
- Des avancées significatives ont été faites sur les méthodes d'estimation de l'écotoxicité et du potentiel de perturbation endocrinienne des eaux usées hospitalières et urbaines.
- Les effluents urbains et hospitaliers sont source de dissémination de gènes et de bactéries dans l'environnement. Les boues issues de la file de traitement des effluents hospitaliers sont plus riches en gènes de résistance que celles de la file des effluents urbains.
- Le traitement par boues activées des effluents urbains et hospitaliers est efficace pour certaines molécules (par exemple paracétamol), mais peu pour d'autres qui sont difficilement biodégradables (par exemple la carbamazépine).

ENCART 4 : Prédominance des flux urbains par rapport aux flux hospitaliers.



La station de traitement des eaux usées de Bellecombe reçoit séparément les eaux usées hospitalières du CHAL (capacité de 450 lits) et les eaux usées domestiques urbaines de 16000 habitants raccordés (environ 15 % des habitants ne sont pas raccordés et disposent d'installations d'assainissement non collectif). La figure ci-dessus représente les fractions respectives hospitalières (en rouge) et urbaines (en vert) des flux journaliers moyens de résidus de médicaments et de détergents arrivant à la STEU. Le débit journalier moyen des eaux usées hospitalières étant environ 40 fois plus faible que le débit journalier moyen des eaux usées urbaines, la contribution de l'effluent hospitalier aux flux de résidus de médicaments et de détergents (en g/j) entrant à la STEU varie de moins de 5 % (pour le diclofénac) à 35 % (pour le sulfaméthoxazole). Deux exceptions apparaissent pour deux antibiotiques spécifiquement utilisés en milieu hospitalier : la ciprofloxacine et la vancomycine. Ces valeurs ont été déterminées à partir de 27 campagnes d'échantillonnage moyen journalier proportionnel aux volumes écoulés réalisées du 25/06/2013 au 08/12/2015.

ENCART 5 : Modélisation des flux horaires à l'entrée de la station de traitement des eaux usées de Bellecombe en provenance du bassin versant urbain. Exemple du diclofénac.



Un modèle stochastique de calcul des flux horaires des résidus de médicaments en entrée de la station de traitement des eaux usées (STEU) de Bellecombe a été développé dans les projets IRMISE et RILACT (Pouzol, 2018). Fonctionnant au pas de temps de la minute, et s'appuyant sur les données expérimentales de SIPIBEL, il comprend les étapes principales suivantes : estimation des ventes journalières de médicaments, usages de l'eau par les habitants dont les toilettes, usages de l'eau non domestiques, métabolisme humain (systèmes digestif et sanguin, accumulation dans la vessie) et rejet des résidus de médicaments dans les urines, transfert des résidus de médicaments le long du réseau jusqu'à la STEU. La figure ci-dessus compare d'une part les flux horaires de diclofénac mesurés pendant 4 campagnes, et d'autre part les flux horaires modélisés au moyen de 1000 simulations stochastiques. On observe une très bonne concordance des profils journaliers. Le modèle est considéré comme satisfaisant si le ratio entre flux modélisés et flux mesurés est compris entre 0.5 et 2. Pour le diclofénac, et en tenant compte des métabolites glucuro-conjugués, le ratio est de 1.64. Les ratios sont compris entre 0.5 et 2 pour 8 molécules modélisées sur 9, ce qui est mieux que les modèles classiques déterminant les flux de manière directement proportionnelle aux ventes. Une des pistes principales d'amélioration du modèle est la prise en compte des processus de transformation pendant le transfert en réseau.

- Les résidus de certains médicaments sont en partie transférés vers et adsorbés sur les boues au cours du traitement (par exemple éconazole et ciprofloxacine).
- Les boues présentent une écotoxicité importante mais avec une variabilité forte, les boues séchées l'étant souvent un peu plus que les boues fraiches.
- Les effluents et les boues présentent un potentiel de perturbation endocrinienne très faible à faible et sont vecteurs d'un transfert significatif de gènes d'antibiorésistance vers l'environnement.
- Des essais pilote de traitement complémentaire conduits sur la STEU de Bellecombe ont montré que des technologies mettant en œuvre des ultraviolets et de l'ozonation étaient capables d'éliminer les résidus de médicaments avec des niveaux de performance plus élevés si cela devait s'avérer nécessaire.
- Traiter séparément les effluents hospitaliers et urbains n'est pas une solution appropriée : après un suivi de longue durée des deux files séparées, puis de différentes proportions d'effluents urbains et hospitaliers mélangés, il a été conclu que les deux effluents pouvaient être mélangés dans une seule file de traitement, tant pour l'eau que pour les boues, sans incidence sur les rejets de la STEU et la valorisation agricole des

boues. Ces réponses concrètes apportées à l'arrêté préfectoral de 2009 ont conduit à mettre en place une file unique de traitement sur la STEU à partir d'avril 2016.

- Des résidus de médicaments ont été retrouvés et quantifiés dans l'Arve, à des concentrations similaires voire inférieures à celles observées dans différentes eaux de surface à travers le monde. Les rejets de la STEU de Bellecombe ne contribuent pas à une hausse détectable des concentrations observées dans l'Arve, qui s'expliquent par l'ensemble des rejets effectués en amont.
- Des traces faibles de résidus de médicaments ont été retrouvées et quantifiées dans la nappe du Genevois (principalement du sulfaméthoxazole) dans laquelle de l'eau de l'Arve est injectée pour satisfaire à la demande en eau potable du secteur.
- Des outils de sensibilisation et de formation, ainsi que des pistes pour un changement des pratiques, ont été proposés, en lien avec les professionnels de l'eau et de la santé.
- On observe que les professionnels sont tous prêts à faire évoluer leurs pratiques, notamment les acteurs de la santé qui étaient au départ très éloignés des problématiques environnementales.

Innovant et original dès sa genèse, co-porté par le SRB et le GRAIE, SIPIBEL a montré que la collaboration effective sur le terrain, la confiance réciproque et la synergie entre acteurs opérationnels territoriaux et scientifiques pluridisciplinaires étaient des éléments déterminants pour la co-construction, la conduite effective des actions et projets de recherche, et l'atteinte des objectifs fixés, tant scientifiques qu'opérationnels. SIPIBEL a couplé des analyses physico-chimiques de pointe et des essais biologiques et écotoxicologiques sur les eaux et les boues pendant de très nombreuses campagnes réalisées sur plusieurs années, constituant une base de données extrêmement riche, voire unique, et conduisant à des résultats très nombreux pour chacune des disciplines scientifiques concernées. Les sciences humaines ont contribué de manière déterminante aux analyses de risques, à l'étude des pratiques des professionnels de santé et des patients et à leurs évolutions envisageables. Des liens nouveaux ont été créés entre professionnels de l'eau et professionnels de la santé, notamment à travers les conférences de restitution des résultats de SIPIBEL. Des collaborations ont été établies avec d'autres projets (REMPAR à Arcachon, REGARD à Bordeaux) financés par l'AFB et les Agences de l'Eau, et d'autre programmes sont en perspective dans la continuité de cette dynamique fructueuse.

ENCART 6 : Concentrations en résidus de médicaments dans l'Arve et la nappe du Genevois.

Entre 2011 et 2015, 11 campagnes réalisées en amont, en aval immédiat et en aval éloigné du rejet de la STEU de Bellecombe (voir Figure 3) ont permis d'évaluer son impact sur la rivière Arve. Au cours de ce suivi, 8 médicaments, listés dans le tableau ci-dessous, ont été détectés à des fréquences supérieures à 50 %. Les concentrations mesurées sont similaires, voire inférieures, aux concentrations médianes observées dans des eaux de surface à travers le monde (Hughes *et al.*, 2013). Comparées aux PNEC (concentrations prévisibles sans effet sur l'environnement) et aux NQE (normes de qualité environnementales) ou aux VGE (valeurs guide environnementales) disponibles, elles sont nettement inférieures, hormis pour le diclofénac.

…/…

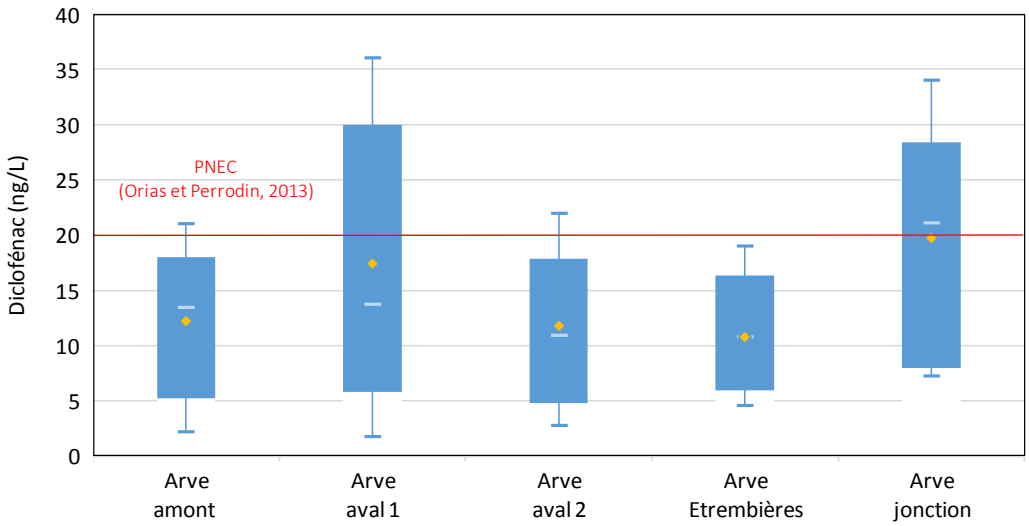
…/…

	SIPIBEL Arve amont	Arve aval 1	Arve aval 2	Concentrations médianes eaux de surface à travers le monde	PNEC	NQE ou VGE
Paracétamol	0.112	0.123	0.137	0.148	6.92	
Kétoprofène	0.003	0.007	0.003	0.097	2	
Diclofenac	0.010	0.017	0.012	0.136	0.02	0.1
Ibuprofène	0.017	0.018	0.016	0.504	0.2	
Aténolol	0.013	0.020	0.015	0.091		
Propranolol	0.003	0.005	0.003	0.019	0.05	
Carbamazépine	0.006	0.014	0.008	0.174	2	2.5
Sulfamethoxazole	0.003	0.005	0.002	0.083	0.59	

Rejet STEU Bellecombe

PNEC : Predicted No-Effect Concentration
NQE : Norme de Qualité Environnementale
VGE : Valeur Guide Environnementale

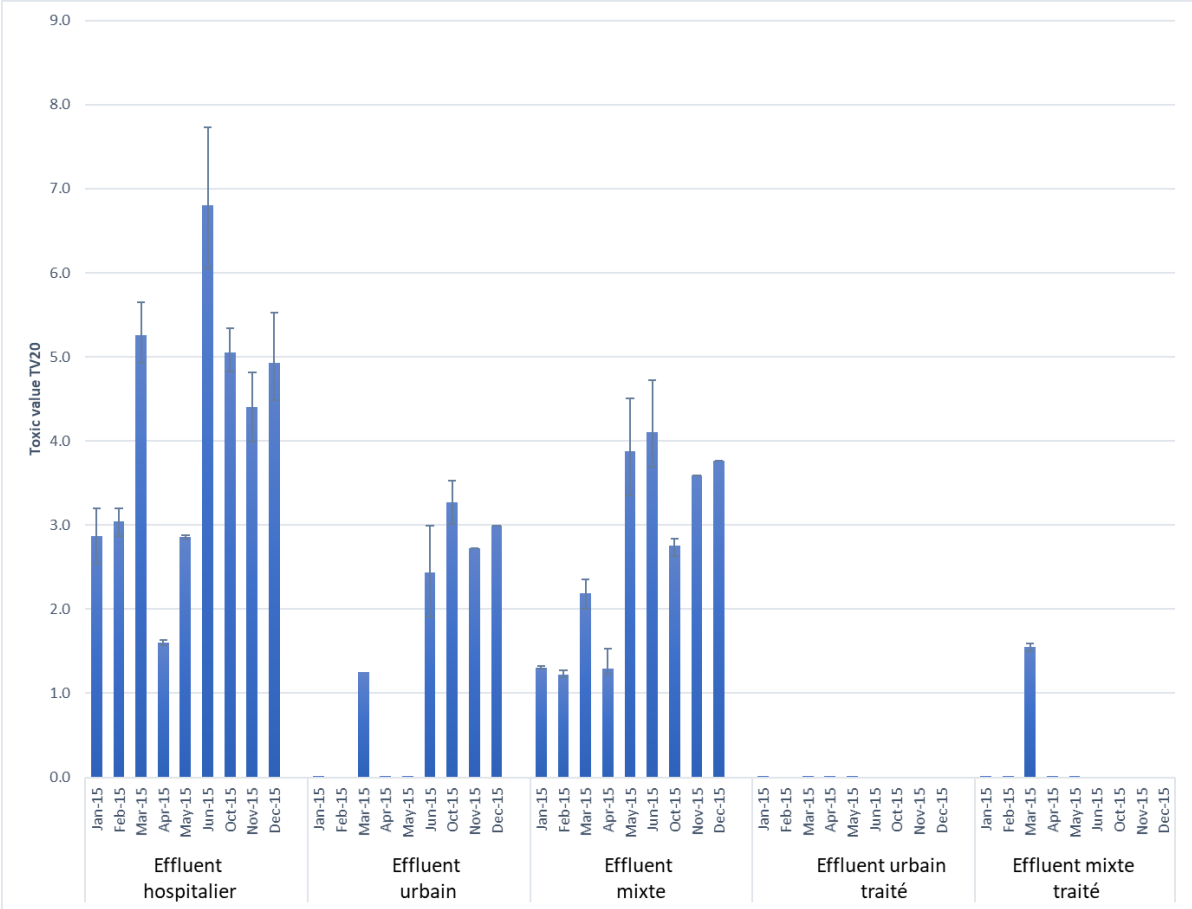
Concentrations moyennes mesurées dans l'Arve (11 campagnes moyennes journalières de février 2011 à janvier 2015), concentrations médianes mesurées dans des eaux de surface à travers le monde (Hughes et al., 2013), PNEC (Orias et Perrodin, 2013) et NQE ou *VGE (INERIS) en µg/L.*



Concentrations en diclofénac (ng/L) en différents points de l'Arve (11 campagnes de février 2011 à janvier 2015)

Aucune variation temporelle significative des concentrations dans l'Arve n'a été observée depuis l'ouverture du CHAL en 2012 et les données montrent que la contamination en médicaments est déjà présente en amont de la STEP de Bellecombe. De très faibles traces de résidus de médicaments ont également été détectées dans les eaux souterraines de la nappe du Genevois (7 campagnes réalisées entre janvier 2013 et janvier 2015). Quatre substances ont été détectées : trois très hydrophiles, le paracétamol, l'acide salicylique et le sulfaméthoxazole et un contaminant ubiquitaire, la carbamazépine. Seul le sulfaméthoxazole a été détecté sur les 5 sites et quantifié, avec des concentrations très inférieures à la PNEC. La présence de cet antibiotique dans les eaux souterraines a déjà été reportée dans la littérature (Barnes et *al*., 2008), ainsi que la mise en évidence de son caractère particulièrement mobile (Banzhaf et *al*., 2013).

ENCART 7 : Comparaison de l'écotoxicité des effluents séparés et mixtes : cas du bio-essai sur micro-algues.



Essai de croissance sur micro-algues (Pseudokirchneriella subcapitata). Mesure après 72 h d'exposition - Valeur inverse de la concentration toxique pour 20 % de la population (Toxic Value TV20).

L'écotoxicité des effluents hospitaliers, urbains et mixtes a été suivie tout au long de l'année 2015 (9 prélèvements) à l'aide de quatre bio-essais normalisés ou standardisés : essai de mobilité sur microcrustacé (Daphnia magna), essai de croissance sur micro-algues (Pseudokirchneriella subcapitata), essai de reproduction sur rotifères (Brachionus calyciflorus), essai de génotoxicité sur bactéries (SOS Chromotest). La figure ci-dessus présente, à titre d'exemple, le résultat obtenu avec l'essai micro-algues. Les résultats obtenus avec les autres bio-essais sont présentés en détail dans la conférence de ce colloque consacrée à l'écotoxicité des effluents. Concernant la comparaison de l'écotoxicité des effluents séparés et mixtes, la tendance est la suivante : le mélange des effluents étudiés conduit en général à des valeurs intermédiaires entre la toxicité de l'effluent hospitalier (le plus écotoxique) et la toxicité de l'effluent urbain. Ces résultats n'ont pas permis de mettre en évidence de phénomènes de synergie ou d'antagonisme. Du point de vue de l'écotoxicité, le traitement séparé des effluents hospitaliers ne se justifie donc pas, tant sur le plan technique que sur le plan économique.

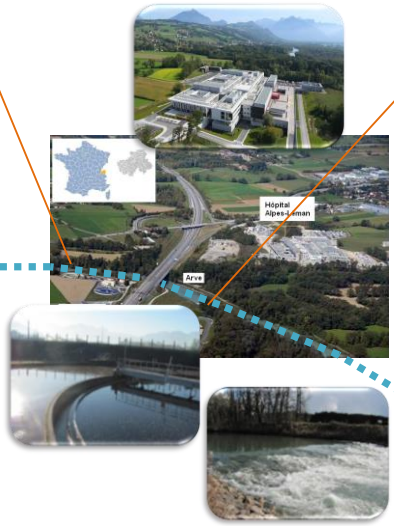
ENCART 8 : Teneurs en médicaments et en organismes pathogènes (Pseudomonas aeruginosa) observées dans les biofilms de la rivière Arve en amont et en aval du point de rejet de la STEU de Bellecombe.

AVAL proche

Concentration (ng/g)	**2011** *(état zéro)*	**2012** *(11 mois)*
Lévofloxacine	11	22
Carbamazépine	17	<LD
Dénombrement (NPP/100mL)	**2013** *(21 mois)*	**2014** *(25 mois)*
P. Aeruginosa	< 3	< 3

AMONT proche

Concentration (ng/g)	**2011** *(état zéro)*	**2012** *(11 mois)*
Lévofloxacine	10	8
Carbamazépine	<LD	<LD
Dénombrement (NPP/100mL)	**2013** *(21 mois)*	**2014** *(25 mois)*
P. Aeruginosa	< 3	< 3



AVAL lointain

Concentration (ng/g)	**2011** *(état zéro)*	**2012** *(11 mois)*
Lévofloxacine	3	11
Carbamazépine	<LD	<LD
Dénombrement (NPP/100mL)	**2013** *(21 mois)*	**2014** *(25 mois)*
P. Aeruginosa	< 3	< 3

AMONT lointain

Concentration (ng/g)	**2011** *(état zéro)*	**2012** *(11 mois)*
Lévofloxacine	6	10
Carbamazépine	<LD	<LD
Concentration **(ng/g)**	**2013** *(21 mois)*	**2014** *(25 mois)*
P. Aeruginosa	nd	nd

Le projet Persist-Env (APR ANSES N°2012/2/149) s'est attaché à prendre en considération l'impact des rejets de la STEU de Bellecombe sur le milieu aquatique récepteur comme critère d'évaluation de l'efficacité du traitement séparé des effluents hospitaliers. Les conclusions majeures acquises au cours de ce projet indiquent que :

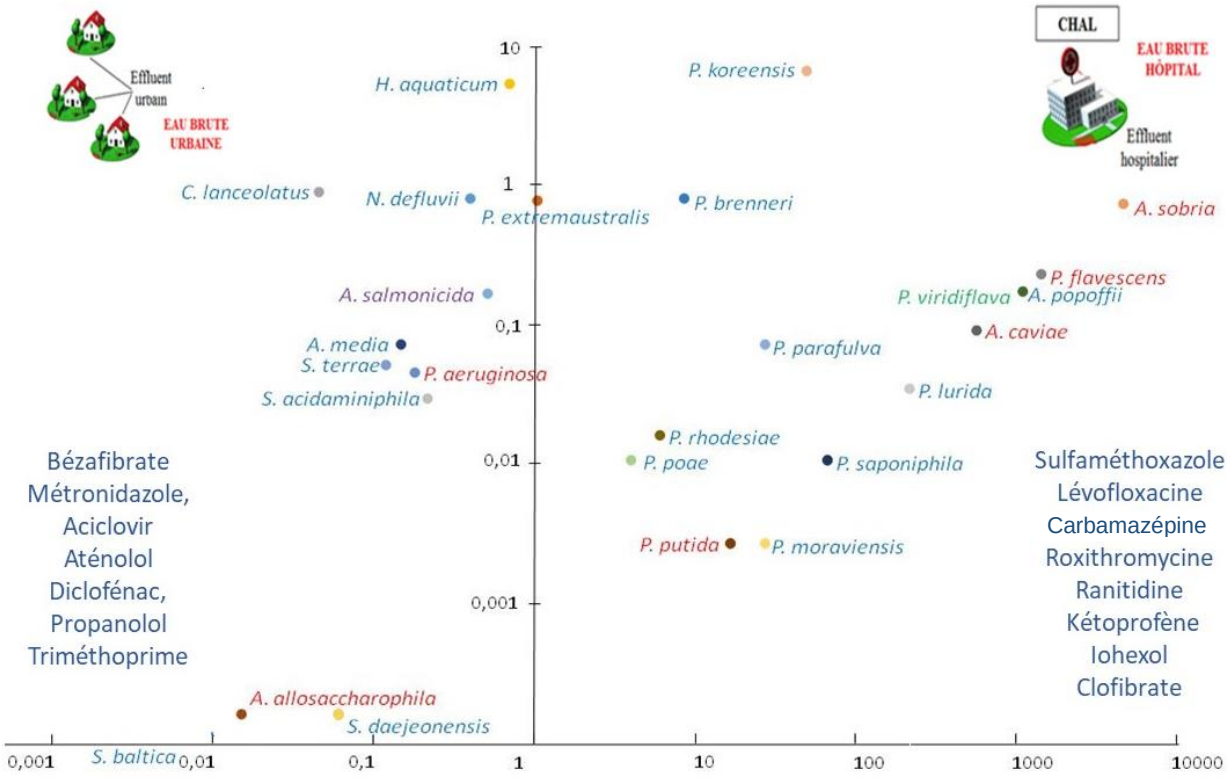
- l'apport de l'effluent hospitalier (depuis février 2012) n'a pas conduit à une contamination additionnelle des biofilms de la rivière par des médicaments et par des organismes pathogènes (*Pseudomonas aeruginosa* – Pae, *Aeromonas caviae* - Aca). Les teneurs en contaminants chimiques (eg. carbamazépine) ou en agents pathogènes (eg. Pae) observées dans le milieu naturel en aval du rejet n'ont pas évolué plus que les « variations » induites par d'autres rejets urbains localisés plus en amont dans le bassin versant.
- un impact du rejet de la STEU sur le milieu aquatique est cependant perceptible au regard des modifications observées dans la structure des communautés microbiennes entre l'amont et l'aval. Les conséquences de cet impact n'ont pas été évaluées mais les résultats montrent qu'il existait déjà avant l'implantation du CHAL et qu'il est désormais statistiquement différent depuis la mise en route de l'activité hospitalière.

ENCART 9 : Distribution des bactéries en fonction des files d'épuration de la STEU de Bellecombe.

Une analyse des différences de distribution des bactéries en fonction des files d'épuration de la STEU de Bellecombe a été effectuée par une approche métacodes-barres (séquençage massif d'amplicons d'ADN) utilisant un marqueur (nommé *tpm*) permettant une différentiation au niveau de l'espèce. L'ADN des biofilms se développant dans les clarificateurs a été utilisé pour ces analyses. L'axe des abscisses de la figure ci-dessous représente la valeur du ratio entre l'abondance des séquences *tpm* des biofilms de la file hospitalière versus celle de la file urbaine pour une espèce donnée. L'axe des ordonnées représente l'abondance relative d'une espèce selon les séquences *tpm* des biofilms de la file hospitalière. Plus les points sont placés en haut à droite, plus le nombre de séquences est élevé dans la file hospitalière.

…/…

…/…



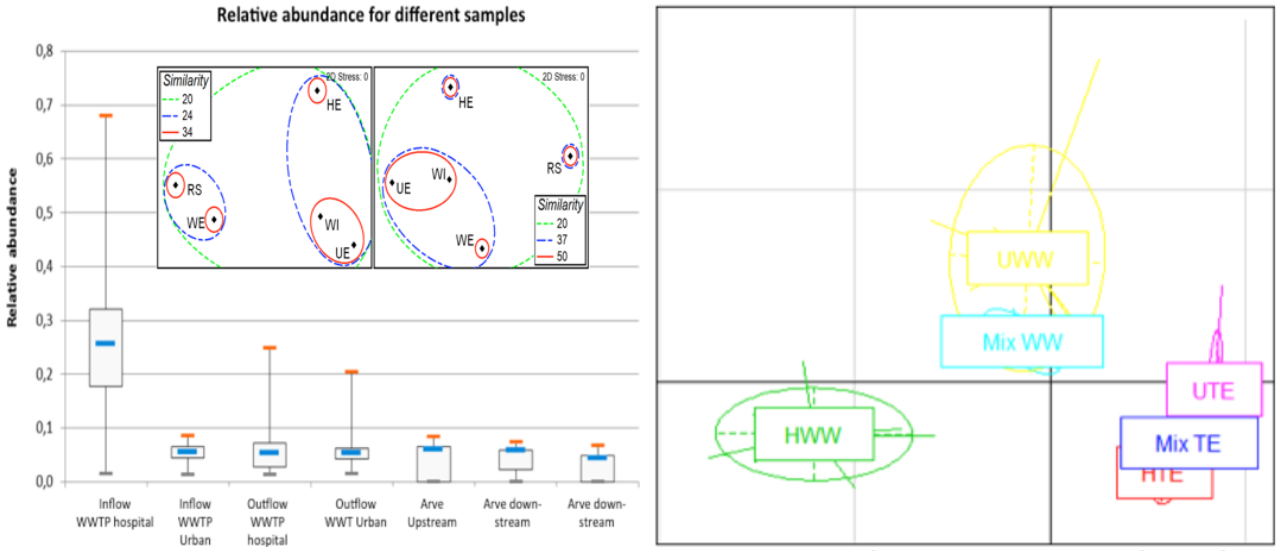
Les séquences des amplicons *tpm* des biofilms ont été classées principalement dans trois genres bactériens : *Herbaspirillum* (H), *Pseudomonas* (P) et *Aeromonas* (A). Une richesse en type de séquences *tpm* moins importante a été observée dans la file hospitalière, et des organisations de séquences permettant de différencier les files ont été obtenues. Ainsi, une occurrence plus élevée de plusieurs espèces de *Pseudomonas* dans les biofilms de la file hospitalière a été déduite. De plus, les nombres de séquences classés dans l'espèce *A. sobria* ont montré un enrichissement dans les biofilms de la file hospitalière. Certaines séquences observées dans ce jeu de données ont été classées au sein d'espèces pathogènes opportunistes de l'être humain, comme *Aeromonas sobria*, *Aeromonas caviae*, *Pseudomonas putida* et *Pseudomonas flavescens* ou de plantes comme *Pseudomonas viridiflava*. Les séquences classées dans l'espèce *Pseudomonas aeruginosa* ont montré une occurrence similaire dans les biofilms des files urbaines et hospitalières. Une analyse phylogénétique a été réalisée pour préciser leur proximité avec les séquences déposées dans les banques de données pour cette espèce. Cette analyse a montré que deux groupes de séquences présents dans les échantillons pouvaient être reliés aux sous-clades PA14 (pouvant produire la cytotoxine *exoU*) et LESB58 (pouvant produire la cytotoxine *exoS*).

ENCART 10 : Évolution de l'antibiorésistance.

L'apparition de germes de résistance aux antibiotiques devient un problème de santé publique à l'échelle mondiale. SIPIBEL est un des premiers sites où l'antibiorésistance a été suivie de manière spatio-temporelle à partir du rejet d'effluents urbains et hospitaliers. Il a participé à la validation d'un indicateur de la dissémination de la résistance dans l'environnement, les intégrons de résistance, éléments génétiques pouvant à la fois acquérir, échanger et exprimer des gènes présents sous forme de cassettes. Le suivi des intégrons de résistance a montré qu'il était possible de discriminer les différents effluents, l'effluent brut hospitalier présentant une abondance relative (AR) (nombre d'intégrons normé par la quantité d'ARN16S eq. bactérie) plus importante que celle de l'effluent brut urbain, les effluents traités ayant quant à eux des AR équivalentes et plus faibles, l'effluent mixte (effluents urbain et hospitalier mélangés) révélant une AR proportionnelle aux proportions des deux effluents.

…/…

…/…



Evolution de l'abondance relative entre 2011 et 2016 dans les différentes matrices. Spécificité des différents effluents par analyse multiparamétriques (HWW, UWW, Mix WW: effluent hospitalier, urbain, et en ménage. UTE, HTE et Mix TE : effluents urbain, hospitalier et mélangé traités)

L'AR des boues issues de la STEU est spécifique : un enrichissement des boues en intégrons a été constaté. Les quantités d'intégrons mesurées dans l'Arve en amont et en aval des points de rejets des STEU sont extrêmement faibles et très voisines, ne permettant pas de constater un « effet station ». Tous les échantillons collectés pendant les campagnes de mesure ont été analysés afin de caractériser l'évolution des résistomes, des mobilomes et des microbiomes dans les différentes matrices. Cela a permis d'établir des corrélations avec les différentes concentrations des molécules médicamenteuses analysées.

ENCART 11 : Enquête anthropologique sur le soin à domicile.

Une enquête qualitative en sciences humaines a été menée en 2017 sur l'organisation du soin à domicile, principalement sur le territoire du CHAL. L'objectif était d'adopter une démarche d'anticipation en proposant, à partir de l'analyse des perceptions, des pratiques et de l'organisation associées aux objets issus du soin chargés en résidus de médicaments (médicaments non consommés, selles, urines), des scénarios pour limiter la contamination aquatique via leurs rejets. L'enquête a notamment souligné :

-le besoin de renforcer la formation des soignants libéraux, qui peuvent disposer de connaissances erronées sur le tri des déchets du soin ainsi que des médicaments non utilisés (MNU) en ville, et douter de leurs connaissances exactes dans le contexte d'interactions avec leurs patients.

- un fort sentiment chez les soignants qu'il serait indispensable d'impliquer davantage les pharmacies de ville (par ex. une meilleure signalisation du réseau Cyclamed) pour limiter les retraits systématiques de tous les médicaments prescrits (certains étant en surstock chez le patient et/ou prescrits en « si besoin ») ou limiter l'embarras de patients à l'idée de rapporter leurs MNU.

- les rares informations fournies aux patients sur la présence de résidus de médicaments dans les excrétas ou les réticences à les fournir, alors que certains organismes (hôpitaux de pays anglophones par ex.) en transmettent pour certains traitements anticancéreux. Ces informations présentent cependant souvent l'eau comme véhicule permettant d'évacuer le risque chimique (par ex. bien nettoyer les textiles), plus que comme ressource polluable ; lorsque cela est possible des alternatives pourraient être trouvées (draps jetables par ex.), et les difficultés à évoquer l'exposition humaine à des résidus de médicaments pourraient être traitées avec celles relatives à évoquer l'exposition environnementale à ces résidus.

- fréquemment, soignants libéraux et organismes d'hospitalisation à domicile enquêtés tendent à négocier la prise en charge du retrait des déchets de soins à domicile par des services extérieurs, la temporalité et les exigences d'organisation du soin rendant plus aisée cette option. Soutenir les services de récupération des déchets de soins semble nécessaire dans un scénario de collecte à domicile d'excrétas pour certains traitements particulièrement préoccupants pour l'environnement.

ENCART 12 : Médicaments dans l'eau : les bonnes questions à se poser.



Le projet MédiATeS – Animation Territoriale et Sensibilisation à la question des Médicaments dans l'eau - a fait l'objet d'un travail collaboratif rassemblant des professionnels de la santé et de l'eau, des élus et des habitants du territoire. Il a pris la forme de ressources pédagogiques sur la question des résidus de médicaments dans l'eau : des vidéos dessinées, un site internet dédié (www.medicamentsdansleau.org) et des ressources complémentaires pour s'adresser à différents publics : éducateurs en environnement, professionnels, citoyens. MédiATeS comprend deux kits : 1) Mieux comprendre les phénomènes, 2) Amorcer le changement des pratiques.

VI. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les partenaires de SIPIBEL – Site Pilote de Bellecombe sur les effluents hospitaliers et stations d'épuration - (SRB, CHAL, SM3A, INSA Lyon, ISA, ENTPE, Université de Limoges, EHESP, Université Paris Sud, EVS-IMU, SUEZ) pour la fourniture de données ainsi que l'Agence de l'Eau RMC, la région Auvergne-Rhône-Alpes, l'AFB, l'Union Européenne, les Ministères en charge de la Santé et de l'Ecologie, le Département 74 et l'ARS. Ainsi que les dizaines de personnes qui ont contribué aux travaux et résultats de SIPIBEL et que nous n'avons pas pu lister intégralement comme co-auteurs de cet article : les enseignants-chercheurs et chercheurs permanents et en CDD des laboratoires, les ingénieurs d'étude, les doctorants, post-doctorants, stagiaires Master et de fin d'étude, les personnels techniques des syndicats, des entreprises, du GRAIE, et les élus du territoire.

VII. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Banzhaf S., Krein A., Scheytt T. (2013). Using selected pharmaceutical compounds as indi-cators for surface water and groundwater interaction in the hyporheic zone of a low permeability riverbank. *Hydrological Processes*, 27(20), 2892-2902.

Barnes K.K., Kolpin D.W., Furlong E.T., Zaugg S.D., Meyer M.T., Barber L.B. (2008). A national reconnaissance of pharmaceuticals and other organic wastewater contaminants in the United States - I) Groundwater. *Science of the Total Environment*, 402(2-3), 192-200.

Bertrand-Krajewski J.-L. (Guest editor) *et al*. (2018). SIPIBEL Special Issue. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(10), 9195-9264

Hughes S.R., Kay P., Brown L.E. (2013). Global Synthesis and Critical Evaluation of Pharma-ceutical Data Sets Collected from River Systems. *Environmental Science & Technology*, 47(2), 661-677.

INERIS. Portail Substances Chimiques - http://www.ineris.fr/substances/fr/page/9. Consulté le 13/07/2018.

Lecomte V., Bertrand-Krajewski J.-L., Bouchez A., Cournoyer B., Dagot C., Gonzalez-Ospina A., Labanowski J., Lévi Y., Perrodin Y., Wiest L. (2017). SIPIBEL : un site pilote pour l'étude des effluents hospitaliers et urbains. *Environnement, Risques et Santé*, 17(S1), 59-74. doi 10.1684/ers.2017.1074.

Orias F., Perrodin Y. (2013). Characterisation of the ecotoxicity of hospital effluents: A review. *Science of the Total Environment*, 454-455, 250-276.

Pouzol T. (2018). *Monitoring and modelling of pharmaceuticals in wastewater: Daily and hourly loads in both hospital and urban wastewater*. PhD thesis: INSA Lyon, France, 306 p.