



Les enjeux du Génie des Procédés pour la réutilisation des eaux usées traitées au sein du réseau REUSE d'INRAE – de la nécessité d'une approche pluridisciplinaire et multi-échelles

Nassim Ait-Mouheb, Sami Bouarfa, Anne-Laure Collard, Christelle Guigui, Jérôme Labille, Rémi Lombard-Latune, Jean-Denis Mathias, Bruno Molle, Pascal Molle, Jaime Nivala, et al.

► To cite this version:

Nassim Ait-Mouheb, Sami Bouarfa, Anne-Laure Collard, Christelle Guigui, Jérôme Labille, et al.. Les enjeux du Génie des Procédés pour la réutilisation des eaux usées traitées au sein du réseau REUSE d'INRAE – de la nécessité d'une approche pluridisciplinaire et multi-échelles. MATEC Web of Conferences, 2023, 379, 10.1051/mateconf/202337908001 . hal-04099633

HAL Id: hal-04099633

<https://amu.hal.science/hal-04099633>

Submitted on 17 May 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

The challenges of Process Engineering for the reuse of treated wastewater within INRAE's REUSE network - the need for a multidisciplinary and multi-scale approach.

Nassim AIT-MOUHEB¹, Sami BOUARFA¹, Anne-Laure COLLARD¹, Christelle GUIGUI², Jérôme LABILLE³, Rémi LOMBARD-LATUNE⁴, Jean-Denis MATHIAS⁵, Bruno MOLLE¹, Pascal MOLLE⁴, Jaime NIVALA⁴, Dominique PATUREAU⁶, Alain RAPAPORT⁷, Nicolas ROCHE^{3,8}, Mathieu SPERANDIO², Severine TOMAS¹, Jérôme HARMAND⁶

1 : UMR GEAU-INRAE, 361 rue Jean-François Breton 34196 Montpellier, France

2 : TBI - INSA Toulouse, 135 avenue de Rangueil, 31077 Toulouse CEDEX 04, France

3 : Aix-Marseille University, CNRS, IRD, INRAE, CEREGE, CEDEX 4, 13545 Aix-en-Provence, France

4 : INRAE, UR REVERSAAL Centre de Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes, France

5 : Université Clermont Auvergne, INRAE, UR LISC, Centre de Clermont-Ferrand, F-63178 Aubière

6 : LBE, INRAE, Univ. Montpellier, Narbonne, France

7 : UMR MISTEA, INRAE, Univ. Montpellier, Montpellier, France

8 : International Water Research Institute (IWRI), Université polytechnique Mohammed VI, Ben Guerir 43150, Maroc

Abstract: The reuse of wastewater aims to mobilize and treat, for certain uses and under certain conditions, water that has already been used. Rather than discharging wastewater into the natural environment, this practice aims to recover it by replacing the mobilization of water withdrawn from the environment [van Loosdrecht and Brdjanovic, 2014]. By moving from a linear logic of the mobilization and use of water to a circular approach, the objective pursued is to reduce the pressure, qualitative then quantitative, on the resources while limiting, as far as possible, the usage conflicts. It is in fact a question of passing from a simple competitive mode which strongly mobilizes resources, to a complex mode, known as "circular", of putting in complementarity of uses. This approach initially mainly concerned agricultural uses insofar as agricultural needs represent the majority of the water mobilized, including developed countries [UN Water 2018]. Cities integrate specific issues that are characterized by significantly different options from those that can be found in rural areas. In the city, the recovery of wastewater has both material aspects (water, nutrients, critical metals, biopolymers, etc.) and energy aspects (recovery of heat from the networks, production of energy by biological means and /or thermal,...) which should be integrated on an appropriate scale according to the problems addressed (housing, building, district, city, territory or hydrological basin). To study the conditions under which REUSE can develop and be implemented in a safe and sustainable manner, research is needed [Ait-Mouheb et al., 2018]. If it represents an opportunity in certain territories where wastewater can be mobilized, it is also necessary to underline the limits of this practice in territories where the wastewater discharged into the environment is necessary to maintain the low water levels of rivers and rivers, or where soils may be affected, for example, by the salinity of these waters. In addition, studies of the social, economic and environmental dimensions differ significantly depending on the uses envisaged and the situations considered. To meet these challenges, the REUSE network of INRAE (cf. www6.inrae.fr) proposes to adopt a multidisciplinary and multi-scale approach by mobilizing not only the disciplines that can be considered as falling within the field of technologies and environmental engineering but also all of those relating to the human and social sciences, economics, legal, and participatory sciences.

Les enjeux du Génie des Procédés pour la réutilisation des eaux usées traitées au sein du réseau REUSE d'INRAE – de la nécessité d'une approche pluridisciplinaire et multi-échelles

Nassim Ait-Mouheb¹, Sami Bouarfa¹, Anne-Laure Collard¹, Christelle Guigui², Jérôme Labille³, Rémi Lombard-Latune⁴, Jean-Denis Mathias⁵, Bruno Molle¹, Pascal Molle⁴, Jaime Nivala⁴, Dominique Patureau⁶, Alain Rapaport⁷, Nicolas Roche^{3,8}, Mathieu Sperandio², Severine Tomas¹, Jérôme Harmand⁶

¹UMR GEAU-INRAE, 361 rue Jean-François Breton 34196 Montpellier, France

²TBI - INSA Toulouse, 135 avenue de Rangueil, 31077 Toulouse CEDEX 04, France

³Aix-Marseille University, CNRS, IRD, INRAE, CEREGE, CEDEX 4, 13545 Aix-en-Provence, France

⁴INRAE, UR REVERSAAL Centre de Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes, France

⁵Université Clermont Auvergne, INRAE, UR LISC, Centre de Clermont-Ferrand, F-63178 Aubière

⁶LBE, INRAE, Univ. Montpellier, Narbonne, France

⁷UMR MISTEA, INRAE, Univ. Montpellier, Montpellier, France

⁸International Water Research Institute (IWRI), Université polytechnique Mohammed VI, Ben Guerir 43150, Maroc

Introduction

La réutilisation des eaux usées vise à mobiliser et à traiter, pour certains usages et dans certaines conditions, des eaux ayant au préalable déjà fait l'objet d'une utilisation. Plutôt que de rejeter les eaux usées dans le milieu naturel, cette pratique vise à les valoriser en substitution à la mobilisation des eaux prélevées dans le milieu [van Loosdrecht et Brdjanovic, 2014]. En passant d'une logique linéaire de la mobilisation et de l'utilisation de l'eau à une approche circulaire, l'objectif poursuivi est de baisser la pression, qualitative puis quantitative, sur les ressources tout en limitant, autant que possible, les conflits d'usages. Il s'agit en fait de passer d'un mode concurrentiel simple et fortement mobilisateur de ressources, à un mode complexe, dit "circulaire", de mise en complémentarité des usages. Cette approche a dans un premier temps majoritairement concerné des usages agricoles dans la mesure où les besoins en agriculture représentent la majorité de l'eau mobilisée, y compris dans les pays développés [UN Water 2018]. S'agissant des situations urbaines, des spécificités en termes d'usages et de besoins ont d'ores et déjà été mises en évidence. En effet, les villes intègrent des problématiques spécifiques qui se caractérisent par des options significativement différentes de celles que l'on peut trouver en milieu rural. En ville, la valorisation des eaux usées présente tout aussi bien des aspects matières (eau, nutriments, métaux critiques, biopolymères, ...) que des aspects énergétiques (récupération de la chaleur sur les réseaux, production d'énergie par voie biologique et/ou thermique,...) qu'il convient d'intégrer à une échelle appropriée selon les problèmes abordés (habitat, immeuble, quartier, ville, territoire ou encore bassin hydrologique). Cela peut donc se traduire, non seulement en termes d'usages, mais également dans des modalités alternatives de gestion des eaux usées comprenant notamment la "séparation à la source" (de l'urine, des eaux grises et des fèces). Cette approche, remet en cause les visions traditionnelles de mobilisation et de traitement dans les villes et permet d'envisager de nouveaux schémas de gestion de l'eau, des nutriments recyclables et des déchets. Mais ces pratiques, dont il faut au préalable s'assurer qu'elles

permettent effectivement de contribuer à économiser eau et énergie en fonction du contexte et des contraintes locales, peuvent présenter des risques sanitaires et environnementaux (pathogènes, résidus chimiques ou pharmaceutiques, nanoparticules, microplastiques, ...) ou de durabilité des dispositifs d'irrigation, qu'il s'agit d'anticiper et de maîtriser. Pour étudier les conditions dans lesquelles la REUSE peut se développer et être mise en place de manière sûre et durable, des recherches sont nécessaires [Ait-Mouheb *et coll.*, 2018]. Si elle représente une opportunité sur certains territoires où les eaux usées peuvent être mobilisées, il faut aussi souligner les limites de cette pratique dans les territoires où l'eau usée rejetée dans l'environnement est nécessaire au maintien des étiages des rivières et des fleuves, ou là où les sols peuvent être affectés par exemple par la salinité de ces eaux. En outre, les études des dimensions sociales, économiques et environnementales diffèrent significativement selon les usages envisagés et les situations considérées. Pour relever ces défis, le réseau REUSE d'INRAE¹ propose d'adopter une approche pluridisciplinaire et multi-échelles en mobilisant non seulement les disciplines pouvant être considérées comme rentrant dans le champ des technologies et de l'ingénierie environnementale mais également l'ensemble de celles relevant des sciences humaines et sociales, économiques, juridiques, et des sciences participatives.

Réutilisation des eaux usées traitées et génie des procédés

Afin de favoriser les échanges pluridisciplinaires et de "croiser les regards", le réseau est organisé en 4 "axes thématiques" que sont "Territoires et usages de l'eau", "Filières", "Risques" et "Acteurs". Ces 4 axes pluridisciplinaires contribuent à l'animation de 4 "domaines d'application" : "REUSE urbaine", "rurale", "industrielle", et pour les "pays du sud". Dans les projets portés dans chacun de ces axes, les outils du génie des procédés sont largement mobilisés à différentes échelles de temps et d'espace. En tout premier lieu, on trouve bien entendu les problématiques de la mise en œuvre de réactions biologiques et biochimiques complexes afin de traiter les eaux usées. La problématique de la flexibilité des systèmes, relativement récente dans le domaine de la réutilisation des eaux usées, pose ainsi des questions autour de la modélisation et du contrôle des systèmes ainsi que l'intégration de ces questions au niveau des réactions, des procédés mais également et surtout au niveau des filières de réutilisation. En second lieu, la problématique de spatialisation des phénomènes est omniprésente. Qu'il s'agisse de coupler des systèmes dont les temps caractéristiques sont différents ou de tirer parti de la complémentarité d'espèces microbiennes ou chimiques dans des localisations différentes des systèmes, la caractérisation du rôle de l'espace ou des mélanges, la caractérisation des temps de séjour des différentes phases réactionnelles dans les systèmes, sont des notions mobilisées pour la mise en œuvre de stratégies de REUSE. Enfin, toutes les méthodologies de développement et d'étude des systèmes dits "inspirés par la nature", "bioinspirés" ou faisant référence au "biomimétisme" sont largement utilisées, car présentant généralement un rapport "performances sur coûts" intéressant. Plusieurs projets passés ou en cours du réseau REUSE témoignent ainsi de la mise en œuvre de ces outils dans un contexte pluridisciplinaire et multi-échelles.

Vers une meilleure connaissance de la dynamique de transferts de contaminants des eaux vers les sols

Le projet NEREIDE (Etude multi-échelles du risque micropolluants dans un contexte de réutilisation d'eau usée traitée pour l'irrigation agricole, 2021-2024) étudie la dynamique de transferts de certains contaminants qui peuvent être présents dans les eaux usées traitées vers les sols. Dans ce projet, le

¹ www6.inrae.fr/reuse

scénario d'un effluent d'eaux usées domestiques traité et réutilisé pour l'irrigation agricole a été exploré. Une attention particulière a été accordée au risque associé au transfert de contaminants émergents que sont les produits pharmaceutiques. Notre approche comprenait à la fois (i) le développement de solutions de traitement des eaux inspirées par la nature, visant à éliminer les produits pharmaceutiques ; et (ii) l'étude de la mobilité et du devenir de ces molécules dans le système sol/plante irrigué. À cette fin, de nouveaux procédés de traitement de l'eau ont été développés et testés, basés sur des matériaux absorbants issus de ressources locales (argile, compost, charbon actif de noyau d'olive). Ils ont été testés pour l'élimination des produits pharmaceutiques en batch liquides, en colonnes de filtration à flux continu, et enfin en filtres plantés améliorés. En parallèle, des expériences de culture de laitue sur sol ont été réalisées en pots afin d'étudier l'atténuation naturelle de ces polluants pharmaceutiques dans le système sol-plante. Pour cela, le transfert des polluants pharmaceutiques de l'eau d'irrigation vers la matrice sol puis le végétal a été quantifié. Dans cette étude, l'effluent d'eau usée utilisé était synthétique afin de contrôler sa composition physicochimique et son bagage de polluants pharmaceutiques. Ce dernier était composé d'un cocktail de dix molécules représentatives des principales catégories de médicaments et typiquement retrouvées en eau usée traitée, dans le sol ou dans les plantes. Dans le projet ALLEA (2020-2023), après la barrière constituée par les procédés de traitement, nous proposons de maîtriser la croissance des biofilms le long des dispositifs de micro-irrigation. L'originalité est également de prendre en compte les diversités des qualités des eaux usées réutilisées : eaux usées brutes, traitements secondaires et tertiaires. Le postulat est que la cinétique de développement dépend de l'hydrodynamique et que les microorganismes impliqués dans la mise en place du biofilm interagissent avec certains indicateurs pathogènes, les gènes d'antibio-résistances et les polluants émergents (antibiotiques notamment) . En complément de l'effet du bio-encrassement dans les parties irrigation goutte à goutte, le sol est aussi un système vivant et les composés qu'il va recevoir par une irrigation avec des eaux usées traitées vont séjourner sur une durée bien supérieure (de 2 à 8 mois) au temps de rétention dans les systèmes de traitement. Il est donc légitime de s'interroger et de mesurer la biorémédiation que permet le sol. En effet, l'analyse des communautés microbiennes a révélé un fort impact de l'irrigation sur la structure de celles-ci avec notamment l'émergence de groupes indicateurs d'une fertilisation du sol. Les dernières recherches confirment que l'irrigation des sols par des eaux usées entraîne une modification significative des communautés microbiennes et que celles-ci s'adaptent à la présence régulière d'antibiotiques soit par l'acquisition de gènes de dégradation soit par l'acquisition de gènes d'antibiorésistance. On peut donc s'attendre à une évolution des cinétiques de biodégradation en fonction du temps et en fonction de l'évolution des communautés microbiennes.

Vers une remise en question des schémas de gestion de l'eau en ville

La réutilisation des eaux en milieu urbain nous amène à remettre en question le concept systématique et historique du tout à l'égout. Elle ouvre la question de la mise en œuvre de traitements décentralisés et adaptés aux différentes eaux usées et aux différents usages. En effet, les usages potentiels sont multiples (nettoyage de voirie, arrosage, usage industriel, chasses d'eau,...) et la production d'une eau adaptée au plus près du besoin est à privilégier. Pour cette raison, les approches de séparation à la source sont également intéressantes à considérer car elles permettent de mieux adapter le traitement à la qualité de l'eau usée. D'autant plus que si la réutilisation des eaux usées s'est développée dans les régions ou pays à forte pression hydrique dans le monde, elle doit maintenant s'envisager dans un contexte beaucoup plus contraint d'abaissement complet des consommations énergétiques et des besoins en combustibles fossiles. Il faut donc l'éco-concevoir tout en considérant le considérable patrimoine lié aux infrastructures existantes ainsi que les services

associés. Ainsi plusieurs approches peuvent être envisagées et comparées à l'échelle de la ville : traiter une eau usée sur la station d'épuration et la transporter vers les usages, puiser directement dans le réseau d'eaux usées et faire un traitement d'eau brute décentralisé, faire une séparation à la source dans le bâtiment et un traitement spécifique plus adapté des eaux grises. Pour cela il s'agit premièrement de développer des approches intégratives et deuxièmement des optimisations de procédés spécifiques adaptés à ce contexte. Pour évaluer ces scénarios, les approches de modélisation des flux (en dynamique ou en régime permanent) associées à une simulation des filières de traitement permettent de fournir des données pour réaliser des analyses techniques, économiques et environnementales. Les outils d'aide à la décision doivent ainsi s'appuyer sur des approches multicritères. Considérant les investissements que représentent les infrastructures de collecte et traitement des eaux, la recherche en génie des procédés doit ainsi développer des approches très intégratives, qui permettent d'analyser le métabolisme urbain. C'est le cas des travaux basés sur le couplage de l'analyse de cycle de vie et la modélisation de filières, à l'échelle de la station d'épuration et du quartier (Besson *et coll.*, 2022, 2021). Ces travaux permettent de comparer des scénarios de traitement et réusage, en intégrant tout le système collecte et traitement à l'échelle urbaine. Ces travaux montrent que les bénéfices de la séparation à la source (urine, eaux noires, eaux grises) peuvent être significatifs sur le plan environnemental, mais ils dépendent des technologies utilisées et des modalités de collecte et de transport. Les résultats dépendent également de la densité de l'urbanisme et du poids des réseaux dans le bilan global. Dans l'état actuel des connaissances, il ressort que pour traiter les eaux grises de manière décentralisée il n'est pas judicieux de généraliser un déploiement à petite échelle d'exactement les mêmes techniques que celles utilisées à grande échelle. En effet la diminution en échelle implique des consommations d'énergie spécifiques importantes et peut conduire à un bilan négatif sur le plan du réchauffement climatique. Or, la préservation de la ressource en eau ne peut se faire au détriment des autres impacts. Ainsi, à l'heure actuelle, l'analyse au cas par cas est essentielle pour la réutilisation des eaux grises. Il faut donc réinterroger les procédés de traitement dans ce nouveau contexte. D'une part des nouveaux procédés se développent pour traiter les eaux usées concentrées (urine et eaux noires) dans le but de valoriser leur contenu (nutriment et matière organique). D'autre part les eaux grises ou les eaux brutes doivent faire l'objet d'études comparant et combinant des procédés moins énergivores (végétalisés ou basés sur la nature par exemple) et de technologies plus intensives pour abaisser les coûts énergétiques et d'infrastructure, et au final les impacts environnementaux. Dans le cas des effluents concentrés, la digestion anaérobie est étudiée et a été déjà installée à l'échelle de quartiers (quartier de Noorderhoek au Pays-Bas, Flintenbreite et Jenfelder Au en Allemagne, et en projet sur Schipperskaai et H+ respectivement en Belgique et Suède (Skambraks *et coll.*, 2017)) avec des technologies qu'il faut optimiser à petite échelle (UASB par exemple). La valorisation des nutriments de l'urine ou des digestats peut s'appuyer sur des technologies permettant de les extraire et/ou de les concentrer (Harder *et coll.*, 2019; Larsen *et coll.*, 2021; Martin *et coll.*, 2020) avec pour double contrainte de produire des solutions liquides ou des produits solides valorisables en engrais et de garantir des conditions sanitaires satisfaisantes et l'absence de contaminants dans les produits (chimiques et microbiens). Jusqu'à présent les filières proposées peuvent combiner le traitement biologique (nitrification partielle et stabilisation de l'azote (Fumasoli *et coll.*, 2016)), la précipitation (formation de struvite, (Hug et Udert, 2013; Udert *et coll.*, 2016)), la concentration par des techniques de distillation (Udert et Wächter, 2012), les procédés électrochimiques (De Paepe *et coll.*, 2020; Liu *et coll.*, 2022; Zamora *et coll.*, 2017) puis plus récemment l'extraction de l'ammoniaque par chemiosorption membranaire (Gonzalez-Salgado *et coll.*, 2020; Pradhan *et coll.*, 2019), et enfin le charbon actif ou l'ozonation pour le traitement des micropolluants (Larsen *et coll.*, 2021). Si ces filières commencent à voir le jour avec de premières démonstrations à l'échelle européenne, il est essentiel de maintenir une recherche active pour diminuer les besoins énergétiques de ces procédés

qui sont toujours un point critique. Les procédés de traitement des eaux brutes et des eaux grises pour la réutilisation dans la ville sont aussi étudiés. Les retours d'expérience sur les bioréacteurs à membranes par exemple, opérés à petite échelle, montrent des consommations d'énergie élevées (Jefferson *et coll.*, 2001; Lesjean et Gnirss, 2006; Merz *et coll.*, 2007; Peter-Fröhlich *et coll.*, 2007). Les solutions de nanofiltration sont à l'étude (projet WoD du défi clef WOC de la région Occitanie). En parallèle des travaux sont en cours pour optimiser les solutions fondées sur la nature pour le traitement des eaux usées (filtres plantés de roseaux, organismes bioturbateurs, murs végétalisés...), cf. le projet BIOROC du défi clef WOC. Dans le cadre du projet européen Multisources, des filtres plantés à aération forcée sont à l'étude, en particulier les mécanismes d'abattement des microorganismes (bactéries, virus, parasites) ainsi que l'optimisation du traitement de l'azote. L'objectif est d'améliorer la qualité sanitaire des eaux usées traitées tout en réduisant l'empreinte foncière des procédés de manière à faciliter leur intégration dans le milieu urbain. Avec une empreinte environnementale réduite, ces procédés offrent également de potentielles autres fonctions : verdissement urbain, lutte contre les îlots de chaleur ...

Simulation, modélisation, contrôle, optimisation et pilotage des systèmes

Comme déjà évoqué, parmi les questions d'actualité pour la réutilisation des eaux usées traitées, on trouve la mise au point d'approches décentralisées de traitement afin d'adapter la qualité de l'eau aux usages. Pour cela, il est nécessaire de disposer de systèmes "flexibles" qui peuvent être contrôlés pour moduler la qualité de l'eau. Dans un contexte rural ou d'agriculture urbaine, on va par exemple souhaiter adapter la quantité de nutriments apportés aux cultures aux besoins spécifiques des plantes, selon leur stade d'avancement et les saisons ainsi que représenté schématiquement sur la figure 1, ou éventuellement optimiser un mélange entre des eaux retraitées et claires. Plusieurs projets du réseau s'intéressent à cette question, à l'aide des outils de l'automatique qui s'appuie sur des modèles mathématiques. Les projets Control4Reuse (soutenu par le programme JPI Water 2017, cf. control4reuse.net) et IVA-WASTE (financé par la Fondation AGROPOLIS de Montpellier) visaient ainsi à développer des méthodes et des outils pour tester ce nouveau paradigme. Le problème est de considérer des "leviers d'action" (actionneurs) via lesquels nous pouvons agir sur le système (ici une "bioraffinerie"). L'idée du projet est basée sur le fait que, en profitant des prévisions météorologiques sur un court ou moyen terme, nous sommes capables d'utiliser des modèles de culture pour prédire l'avancement de la culture et les besoins de la plante, dans un contexte dynamique. Lorsque de tels modèles sont disponibles, une approche classique de contrôle consisterait à coupler les modèles disponibles de la bioraffinerie aux modèles des plantes : les entrées - non contrôlées - du système sont les caractéristiques des eaux usées, d'une part, et les prévisions météorologiques, d'autre part. Le vecteur d'entrée du contrôle est l'ensemble des leviers d'action disponibles : ce sont typiquement des puissances d'aération, des vannes, des débits de recirculation ou de soutirage... Le vecteur de sortie du système est l'ensemble des états dont certains présentent un intérêt particulier du point de vue de la performance du système, en termes de production agricole et d'énergie dépensée. Par exemple, le modèle de culture peut être utilisé pour prédire leur productivité [Haddon *et coll.*, 2022], en minimisant l'apport d'engrais ou d'eau fraîche. Cependant, comme les modèles correspondants sont de nature différente - ils n'ont pas été développés par les mêmes communautés de chercheurs et ils ne contiennent pas les mêmes variables - ils sont très difficiles à coupler. Une alternative est certes de tirer parti de la connaissance des modèles disponibles mais, au lieu du couplage direct mentionné précédemment, de les coupler indirectement. Ainsi, le modèle de la culture est utilisé dans un problème de contrôle optimal sur l'horizon de la saison [Boumaza et al, 2021] pour générer des points de consigne qui seront des

entrées pour le modèle de bioraffinerie. Plus précisément, supposons que notre objectif soit de maximiser la biomasse produite.

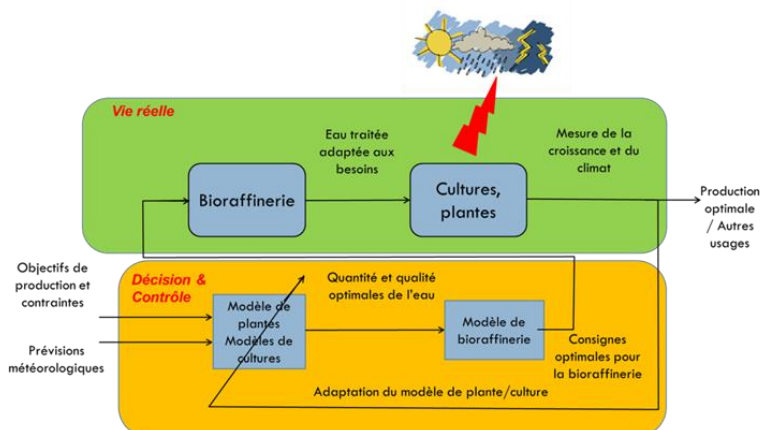


Figure 1 : représentation schématique d'un contrôleur adaptatif pour adapter la qualité de l'eau aux usages

D'abord, étant donné le scénario climatique le plus probable, nous considérons le modèle de culture et nous résolvons un problème de contrôle optimal où nous calculons les trajectoires optimales des nutriments et de l'eau pour maximiser la biomasse produite sur un horizon de temps donné, par exemple une saison de production. Ensuite, nous appliquons ces solutions comme consignes à suivre pour la bioraffinerie, [Neto *et coll.*, 2021]. Une question qui s'est posée dans le cadre de ce projet était la suivante : quel procédé pourrait être utilisé pour moduler la qualité de l'eau traitée ? Par "qualité de l'eau", on entend ici sa composition en termes de différentes formes d'azote (ammonium, nitrite et/ou nitrate) assimilables par les plantes. Un tel système doit inclure des capacités de nitrification, nitratisation et dénitrification et a été proposée dans la thèse de Farouk Aichouche, *cf.* [Aichouche 2021]. Il s'agit d'un procédé composé de plusieurs réacteurs biologiques interconnectés par des vannes et des pompes, [Aichouche *et coll.*, 2020; Héran *et coll.*, 2022]. En fonction de la position d'un certain nombre de vannes, le procédé permet de traiter l'azote et d'en contrôler les différentes formes grâce à l'utilisation des degrés de liberté disponibles (débit d'entrée, débits de recirculation, débit des boues résiduelles, etc...), illustrant la notion de flexibilité requise dans l'approche intégrée proposée. A noter qu'au sein de ce même projet, des alternatives ont été proposées en utilisant d'autres configurations de traitement, comme le modèle bien connu BSM1 (*cf.* [Neto *et coll.*, 2021]) alors que dans le cadre du projet IVA-WASTE, plusieurs stratégies de contrôle optimal et de stratégies « viables » ont été étudiées pour optimiser la production de plusieurs filières agricoles comme l'oléiculture, [Kalboussi *et coll.*, 2018].

Conclusions et perspectives

L'étude de la réutilisation des eaux usées traitées nécessite la mobilisation de nombreux outils du génie des procédés. Mais de nombreuses questions restent en suspens : sous quel angle doit-on aborder la station du futur? Comment intégrer et coupler les différents systèmes unitaires? Quelles stratégies de contrôle sont les plus adaptées?... Le réseau REUSE, en promouvant une approche intégrée et multiéchelle, illustre la manière dont les sciences de l'ingénieur en général, et du génie des procédés en particulier, contribuent à proposer et développer des approches en rupture pour relever les défis liés à l'eau. Ouvrant pour une reconnaissance des eaux usées comme une ressource en tant que telle, toutes les pistes disponibles sont poursuivies pour diminuer la pression

anthropique sur les ressources en passant d'un schéma linéaire à une économie circulaire de l'eau et des nutriments s'inscrivant dans le nexus eau-matière-énergie.

Références bibliographiques

- Aichouche, F., B. Benyahia, M. Héran and J. Harmand (2020b) Flexibility of Waste Resource Recovery Facilities for water Reuse," 2020 European Control Conference (ECC), Saint Petersburg, Russia, 2020, pp. 570-574, doi: 10.23919/ECC51009.2020.9143734.
- Aichouche, F. (2021) Contribution of modelling and control approaches to improve the flexibility of treatment systems for REUSE of treated wastewater in agriculture, PhD Thesis, Univ. of Montpellier, defended on the 2nd of March 2021.
- Ait Mouheb, N., G. Bourrié, B. Ben Thayer, B. Benyahia, B. Cherki, N. Condom, R. Declercq, M. Héran, R. Khalifa, B. Molle, D. Patureau, P. Renault, B. Romagny, C. Sinfort, J. P. Steyer, T. Sari, N. Wery and J. Harmand (2018) The reuse of reclaimed water for irrigation around the Mediterranean Rim: a step towards a more virtuous cycle?, Regional Environmental Change, Vol. 18, No. 3, pp. 693-705, DOI: 10.1007/s10113-018-1292-z
- Besson, M., S. Berger, L. Tiruta-barna, E. Paul, M. Spérandio (2021) Environmental assessment of urine, black and grey water separation for resource recovery in a new district compared to centralized wastewater resources recovery plant. Journal of Cleaner Production 301, 126868. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126868>
- Boumaza, K., Kalboussi, N. Rapaport, A., Roux, S. Sinfort, C. (2021) Optimal control of a crop irrigation model under water scarcity. Optimal Control, Applications and Methods, 42(6), 1612-1632 <https://doi.org/10.1002/oca.2749>
- Besson, M., L. Tiruta-Barna, E. Paul, M. Sperandio (2022) La séparation à la source pour une récupération des ressources : outil d'évaluation environnementale: Source separation for resource recovery: a tool for environmental assessment. TSM 5, 41–48. <https://doi.org/10.36904/tsm/202205041>
- Haddon, A., J. Harmand, A. Rapaport, S. Roux. Control models for crop management: Application to Wastewater Reuse. British Applied Mathematics Colloquium, 11-13 April 2022, <https://bamc2022.lboro.ac.uk/>
- Heran, M., W. Dai, G. Lesage, J. Harmand (2022) Comment orienter les procédés pour offrir de la flexibilité dans nos unités de traitement pour valoriser au mieux les nutriments ?, SFGP2022, 7-10 Novembre 2022, Toulouse.
- De Paepe, J., K. De Paepe, F. Gòdia, K. Rabaey, S.E. Vlaeminck, P. Clauwaert (2020) Bio-electrochemical COD removal for energy-efficient, maximum and robust nitrogen recovery from urine through membrane aerated nitrification, Water Research, 185, 116223. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116223>
- Fumasoli, A., B. Etter, B. Sterkele, E. Morgenroth, K. M. Udert, 2016. Operating a pilot-scale nitrification/distillation plant for complete nutrient recovery from urine. Water Science and Technology 73, 215–222. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.485>
- Gonzalez-Salgado, I., X. Lefebvre, M. Bounouba, E. Mengelle, S. Dubos, O. Lorain, E. Trouvé, C. Guigui, M. Spérandio (2020) N and P Recovery from Urine and Digestate by Struvite Formation and Transmembrane Chemisorption. Presented at the IWA Nutrient removal and recovery conference, Helsinki, Finland.
- Harder, R., R. Wielemaker, T.A. Larsen, G. Zeeman, G. Öberg (2019) Recycling nutrients contained in human excreta to agriculture: Pathways, processes, and products. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 49, 695–743. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1558889>
- Hug, A. et K.M. Udert (2013) Struvite precipitation from urine with electrochemical magnesium dosage. Water Research 47, 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.09.036>
- Jefferson, B., A.L. Laine, T. Stephenson, S.J. Judd (2001) Advanced biological unit processes for domestic water recycling. Water Sci. Technol. 43, 211–218.

- Kalboussi, N., Roux, S., Cheviron, B., Harmand, J., Rapaport, A., Sinfort, C. (2018) Apport de la modélisation pour l'aide à la décision en vue de la réutilisation agricole des eaux usées traitées. *Journal International Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement*, Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement en Tunisie, 3 (1), 102-107. [hal-01975462v3](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01975462v3)
- Larsen, T.A., M.E. Riechmann, K.M. Udert (2021) State of the art of urine treatment technologies: A critical review. *Water Research X* 13, 100114. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2021.100114>
- Lesjean, B. et R. Gnirss (2006) Grey water treatment with a membrane bioreactor operated at low SRT and low HRT. *Desalination* 199, 432–434. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.204>
- Liu, Y., L.F. He, Y.Y. Deng, Q. Zhang, G.M. Jiang, H. Liu (2022) Recent progress on the recovery of valuable resources from source-separated urine on-site using electrochemical technologies: A review. *Chemical Engineering Journal* 442, 136200. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136200>
- Martin, T.M.P., F. Esculier, F. Levavasseur, S. Houot (2020) Human urine-based fertilizers: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 1–47. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1838214>
- Merz, C., R. Scheumann, B. El Hamouri, M. Kraume (2007) Membrane bioreactor technology for the treatment of greywater from a sports and leisure club. *Desalination* 215, 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.10.026>
- Neto, Otacílio B.L., A. Haddon, F. Aichouche, J. Harmand, M. Mulas, F. Corona (2021) Predictive control of activated sludge plants to supply nitrogen for optimal crop growth IFAC-PapersOnLine, Volume 54, No. 3, pp. 200-205, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.242>
- Peter-Fröhlich, A., L. Pawlowski, A. Bonhomme, M. Oldenburg (2007) EU demonstration project for separate discharge and treatment of urine, faeces and greywater – Part I: Results. *Water Science and Technology* 56, 239–249. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.577>
- Pradhan, S., S.G. Al-Ghamdi, H.R. Mackey (2019) Greywater recycling in buildings using living walls and green roofs: A review of the applicability and challenges. *Science of The Total Environment* 652, 330–344. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.226>
- Skambraks, A.-K., H. Kjerstadius, M. Meier, Å. Davidsson, M. Wuttke, T. Giese (2017) Source separation sewage systems as a trend in urban wastewater management: Drivers for the implementation of pilot areas in Northern Europe. *Sustainable Cities and Society* 28, 287–296. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.09.013>
- Udert, K.M., C.A. Buckley, M. Wächter, C.S. McArdell, T. Kohn, L. Strande, H. Zöllig, A. Fumasoli, A. Oberson, B. Etter (2016) Technologies for the treatment of source-separated urine in the eThekweni Municipality. *Water SA* 41, 212. <https://doi.org/10.4314/wsa.v41i2.06>
- Udert, K.M., M. Wächter (2012) Complete nutrient recovery from source-separated urine by nitrification and distillation. *Water Research* 46, 453–464. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.020>
- Zamora, P., T. Georgieva, A. Ter Heijne, T.H.J.A. Sleutels, A.W. Jeremiasse, M. Saakes, C.J.N. Buisman, P. Kuntke (2017) Ammonia recovery from urine in a scaled-up Microbial Electrolysis Cell. *Journal of Power Sources* 356, 491–499. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.02.089>
- UN Water (2018) Sustainable Development Goal 6 - Synthesis Report on Water and Sanitation, Published by the United Nations New York, New York 10017, United States of America.
- Van Loosdrecht, M. C. M. et D. Brdjanovic (2014) Anticipating the next century of wastewater treatment, *Science*, Vol. 344, pp. 1452, doi.org/10.1126/science.1255183

Remerciements

Le projet NEREIDE bénéficie d'un financement de l'Institut Carnot Eau et Environnement. Les projets WoD et BIOROC bénéficient de financements de la Région Occitanie dans le cadre du défi clé WATER Occitanie, de la Fondation AGROPOLIS et d'INRAE.