

Proposition de sujet de thèse 2026

(A remplir par les équipes d'accueil et à retourner à Isabelle HAMMAD : hammad@cerege.fr
*à renseigner obligatoirement pour la validation du sujet, (1) : A remplir lors de la campagne d'attribution des allocations, à l'issue de la session de juin des Masters

Sujet de doctorat proposé *: Devenir des contaminants chimiques dans l'environnement après irrigation de sols agricoles avec des eaux usées traitées et désinfectées

Encadrant(s), nom, prénom, adresse mail *: Bruno Coulomb (LCE) bruno.coulomb@univ-amu.fr; Jean-Luc Boudenne (LCE) jean-luc.boudenne@univ-amu.fr

Laboratoire *: Laboratoire de Chimie de l'Environnement (LCE)

Tableau récapitulatif du sujet

Candidat(e)⁽¹⁾	
Nom - Prénom :	
Date de naissance :	
Licence (origine, années, mention) :	
Mention et classement au Master 1 année (Xème sur Y)	
Mention et classement au S3 du Master 2 (Xème sur Y)	
Mention et classement au S4 du Master 2 (Xème sur Y)	
Mention et classement au M2 (année) (Xème sur Y)	
MASTER (nom, université)	
Sujet de doctorat proposé*	
Encadrants (2 max, indiquer si HDR ou pas)*	Bruno Coulomb (non HDR), Jean-Luc Boudenne (HDR)
Laboratoire*	LCE (UMR7376)
Programme finançant la recherche (indiqué si obtenu ou envisagé) (1)	ANR ACCEPT-REUSE (2026-2029) [obtenu]

Sujet de doctorat proposé*

Intitulé* : Devenir des contaminants chimiques dans l'environnement après irrigation de sols agricoles avec des eaux usées traitées et désinfectées.

Descriptif *:

Contexte :

La raréfaction des ressources en eau implique la recherche de nouvelles ressources en eau notamment pour l'irrigation en agriculture qui demeure le premier secteur consommateur en eau prélevée dans le milieu naturel (56% des volumes d'eau prélevés en France, 5 milliards de m³/an) [1].

La réutilisation des eaux usées commence à s'imposer en France comme l'une des alternatives aux prélèvements dans le milieu naturel, avec une véritable volonté politique de passer de 1% de réutilisation des eaux usées actuellement à plus de 10% d'ici 2030, objectif fixé dans le plan « eau » 2023 du gouvernement [2]. Cette volonté politique s'est également traduite en termes législatifs avec la publication du décret n°2023-835 du 29 août 2023 relatif aux usages et aux conditions d'utilisation des eaux de pluie et des eaux usées traitées, et ses arrêtés du 14 décembre [4] et du 18 décembre 2023 [5], relatifs, respectivement, à l'usage

« arrosage des espaces verts » et à l'usage « irrigation de cultures ». Au niveau régional, le plan « Or Bleu » vise lui aussi à réutiliser 10% de ses eaux usées d'ici 2030. Ces objectifs de réutilisation des eaux usées en agriculture ne peuvent être atteints que par la démonstration pour les consommateurs (et les agriculteurs) que les techniques de traitement employées garantissent une sécurité sanitaire et environnementale optimale. Le traitement d'affinage appliquées aux eaux usées sortant des stations d'épuration est aujourd'hui bien étudié, et les techniques mises en œuvre de filtration (sur sable ou membranaire) pour éliminer une majorité des composés organiques et de désinfection par rayonnements ultraviolets semblent suffisamment efficaces pour atteindre les niveaux de qualité requis par la réglementation pour un usage en irrigation agricole [6-8].

Les problématiques scientifiques se posent plutôt désormais sur les modifications potentielles de la qualité de l'eau lors de l'étape située entre le traitement d'affinage et l'utilisation de cette eau d'irrigation, c'est-à-dire lors du stockage (Schéma 1), et sur l'impact de l'évolution de la qualité chimique de cette eau stockée en irrigation. En effet, lors du stockage des eaux usées traitées et affinées, la réglementation française impose de mettre en place une mesure « barrière » pour « *réduire au minimum le risque de transmission d'agents pathogènes des eaux usées traitées* » (c'est-à-dire pour limiter la reviviscence bactérienne).

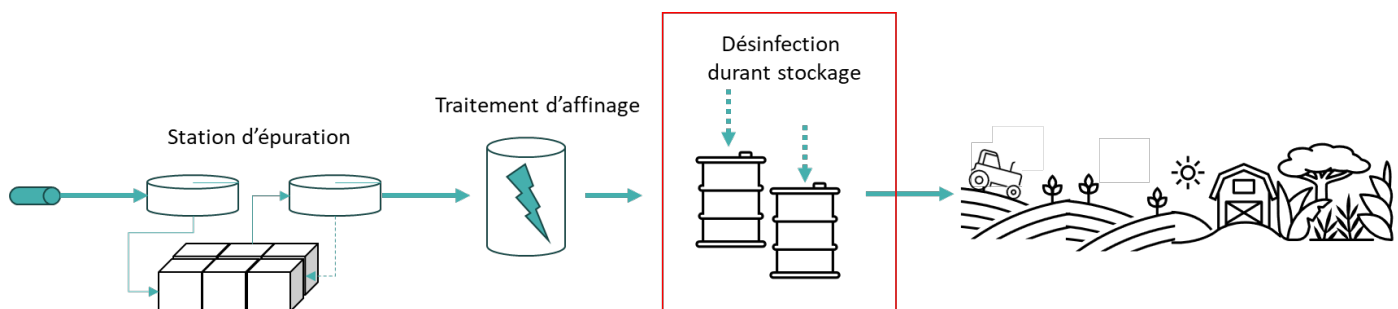


Schéma 1 : Filière de traitement des eaux usées utilisées pour l'irrigation de sols agricoles

Ceci implique l'utilisation d'un désinfectant chimique (le plus communément à base de chlore) qui, en plus de son effet souhaité d'élimination des microorganismes ou de moyen de lutter contre la reviviscence bactérienne, va réagir avec la matière organique encore présente dans l'eau usée traitée et affinée, et engendrer, involontairement des sous-produits de désinfection.

Les travaux de recherche menés jusqu'à maintenant au laboratoire ont permis d'identifier une partie des composés générés lors de la chloration de ces eaux usées traitées, de suivre l'évolution de ces composés dans l'eau et leur migration dans des salades, légumes choisis lors de ces premières études, car pouvant être en contact direct avec les eaux usées traitées. Parmi les nombreux résultats obtenus au cours de ces travaux, des composés chlorés ont été retrouvés dans les sols alors qu'ils n'étaient pas présents dans l'eau d'irrigation, suggérant une transformation dans les sols. Cette découverte est importante car elle démontre que, pour mener évaluation exhaustive des risques sanitaires et environnementaux liées à l'utilisation d'eau usées traitées pour l'irrigation en agriculture, il faut non seulement s'intéresser aux composés chimiques présents dans l'eau d'irrigation mais également suivre et identifier les composés chimiques formés dans les sols et les végétaux/légumes à partir de ceux qui étaient présents dans l'eau.

Objectifs :

Les objectifs de cette thèse sont de répondre aux questionnements suivants : i) quels sont les mécanismes de transformation des sous-produits de chloration dans les sols (composition et paramètres physico-chimiques des sols vs phénomène de biodégradation ou de transformation par des phénomènes d'oxydo-réduction) ; ii) les sous-produits formés ont-ils une capacité d'assimilation par le système racinaire augmentée ?; iii) ces sous-produits sont-ils stables au sein du végétal ou sont-ils également transformés au sein du végétal/légume ? iv)) quels sont les impacts de ces eaux usées sur la diversité et l'activité microbienne des sols ? et v) ces sous-produits présentent-ils une toxicité pour le consommateur ?

Méthodologie :

Le projet associera des études fondamentales en laboratoire (étude des mécanismes de formation et de transformation des sous-produits dans l'eau, dans les sols et dans des légumes), en faisant varier différents facteurs (types de sols, types d'eaux - eaux usées synthétiques dopées en sous-produit de chloration et eaux usées traitées réelles-, taux d'humidité des sols, température de l'eau et des sols) et des études au champ, en

milieu réel (collaboration avec le lycée agricole de Valabre qui met à disposition une parcelle pour cette étude). Lors des essais en laboratoire, des eaux usées traitées seront dopées avec des sous-produits de chloration marqués, ce qui permettra de suivre plus précisément le devenir de ces molécules au sein des compartiments, eau-sol-légume (dont racine, tige, feuille). Les légumes retenus pour cette étude seront des jeunes radis car ils représentent un scénario « pire cas » : ils poussent dans les sols et sont donc en contact direct avec les eaux usées traitées et désinfectées et au contact du sol irrigué. Ils présentent également l'avantage de pousser assez rapidement et d'avoir un système racinaire suffisamment développé pour pouvoir être analysé par la suite. Les expérimentations (en laboratoire et au champ) seront monitorées en termes de suivi d'humidité des sols, de température, de conductivité et de potentiel d'oxydo-réduction.

Ces travaux nécessiteront la mise au point de développements analytiques importants pour l'extraction/préconcentration/purification des composés ciblés et pour l'identification des sous-produits formés dans les différentes matrices (eaux, sols, racines, tiges, feuilles, légumes). Les méthodes analytiques reposeront principalement sur l'utilisation de la chromatographie en phase liquide et gazeuse couplée à la détection par spectrométrie de masse et par capture d'électrons (LC-MS, GC-MS-ECD), et sur la chromatographie isotopique (GC-C-IrMS) pour suivre le devenir de molécules marquées.

A côté du volet chimie analytique (analyses ciblées et non ciblées) et chimie réactionnelle (identification des mécanismes de transformation, et étude des processus de translocation) qui prendra la part prépondérante dans ce projet, une collaborations avec l'IMBE (équipe POPulations, Paysages, Communautés & cOnservation, Anne-Marie Farnet qui sera co-encadrante de cette thèse) permettra également d'étudier les modifications des communautés microbiennes du sol induites par l'irrigation avec ces eaux usées traitées et désinfectées, et de tester leurs effets sur les activités microbiennes du sol (protéases et uréases, deux marqueurs de la transformation de la matière organique issue des effluents, respiration basale et diversité fonctionnelle microbienne via le profil physiologique au niveau catabolique) et sur la biomasse microbienne.

Une autre collaboration, réalisée dans le cadre du consortium ACCEPT-REUSE (voir ci-après), sera menée avec le Centre de recherche Translationnelle en Médecine moléculaire Université de Bourgogne/INSERM pour l'étude de la toxicité humaine des radis.

Détail du Programme finançant la recherche* :

Le programme ACCEPT-REUSE a été accepté pour financement par l'ANR en juillet 2025, avec un démarrage scientifique au 1^{er} janvier 2026 (fin programmée au 04/01/2030). Le porteur est Jean-Luc Boudenne et ce programme rassemble sept laboratoires partenaires (dont le LPED et l'IMBE) avec des compétences en toxicité environnementale, en sociologie, en chimie et écologie.

La part financière uniquement pour le LCE est de 253 k€ mais est majoritairement consacrée à des frais d'achat d'équipement, de prestations, et de consommables. Le montant total à partager entre les 7 partenaires n'a pas permis de demander le financement d'une thèse.

Directeur(s) de thèse proposé(s)*

(limiter au plus à deux personnes principales, dont au moins une titulaire de l'HDR)

Directeur HDR proposé*

Nom - Prénom : Boudenne Jean-Luc

Corps : PR

Laboratoire (i.e. formation contractualisée de rattachement, éventuellement équipe au sein de cette formation) : Laboratoire de Chimie de l'Environnement

Adresse mail : jean-luc.boudenne@univ-amu.fr

Choix de cinq publications récentes (souligner éventuellement les étudiants dirigés co-signataires) :

1. E. Quivet, P. Höhener, B. Temime-Roussel, J. Dron, G. Revenko, M. Verlande, K. Lebaron, C. Demelas, L. Vassalo, J.-L. Boudenne. **Underestimation of anthropogenic bromoform released into the environment?** *Environmental Science and Technology*, 56, 1522-1533, 2022 (IF = 11.357).

<https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05073>

2. M. Grote, J.-L. Boudenne, J.-P. Croué, B.I. Escher, U. von Gunten, J. Hahn, T. Höfer, H. Jenner, J. Jiang, T. Karanfil, M. Khalanski, D. Kim, J. Linders, T. Manasfi, H. Polman, B. Quack, S. Tegtmeier, B. Werschkun, G. Ziegler. **Inputs of disinfection by-products to the marine environment from various industrial activities: Comparison to natural production.** *Water Research*, 217, 118383, 2022 (IF = 13.400)
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118383>
3. J. Dron, C. Demelas, J. Mas, A. Durand, A. Pantalacci, A. Austruy, M. Périot, G. Revenko, D. Gori, K. Lebaron, S. Coupé, P. Höhener, J.-L. Boudenne. **Assessment of the contamination by 2,4,6-tribromophenol of marine waters and organisms exposed to chlorination discharges.** *Environmental Pollution*, 309, 119742, 2022 (IF = 9.988)
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119742>
4. M. Maréchal, O. Correc, C. Demelas, A. Couzinet, N. Cimetièrre, L. Vassalo, F. Gérardin, J.-L. Boudenne. **Characterization and chlorine reactivity of particulate matter released by bathers in indoor swimming pools.** *Chemosphere*, 313, 137589, 2023 (IF = 8.943)
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137589>
5. F. Vélia, M.-F. Thomas, C. Demelas, L. Vassalo, M.-V. Louyer, X. Dauchy, C. Rosin, J.-L. Boudenne*. **Optimized methods for adsorbable organic halides (AOX) and halogen-specific speciation for tracking disinfection by-products from source to tap.** *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2026
<https://doi.org/10.1007/s00216-026-06435-z>

Thèses encadrées ou co-encadrées au cours des quatre dernières années*

Nom : MARTIN Maréchal

Intitulé : Caractérisation et réactivité de la pollution particulaire apportée par les baigneurs dans les piscines couvertes à usage collectif

Type d'allocation : Bourse CIFRE

Date de début de l'allocation de doctorat : 01/10/2019

Date de soutenance (si la thèse est soutenue) : 22/03/2023

Programme finançant la recherche : CSTB

Situation actuelle du docteur (si la thèse est soutenue) : Ingénieur traitement des eaux chez SPUMA

Pourcentage de participation du directeur à l'encadrement en cas de co-direction : 50%

Nom : MICHEL Pierre

Intitulé : Détection chimique des explosifs et de leurs précurseurs dans les réseaux d'eaux usées

Type d'allocation : Bourse AID

Date de début de l'allocation de doctorat : 01/11/2021

Date de soutenance (si la thèse est soutenue) : 18/11/2024

Programme finançant la recherche :

Situation actuelle du docteur (si la thèse est soutenue) : Responsable technico-commercial chez EGM

Pourcentage de participation du directeur à l'encadrement en cas de co-direction : 34%

Nom : VELIA Florence

Intitulé : Formation des sous-produits de désinfection émergents dans les eaux destinées à la consommation humaine et les eaux de piscines dans un contexte de changements climatiques.

Type d'allocation : Bourse ANSES

Date de début de l'allocation de doctorat : 01/10/2022

Date de soutenance (si la thèse est soutenue) : prévue en juillet 2026

Programme finançant la recherche : ANSES

Situation actuelle du docteur (si la thèse est soutenue) :

Pourcentage de participation du directeur à l'encadrement en cas de co-direction : 50%

Nom : DUMAS Mathieu

Intitulé : Impacts environnementaux et sanitaires de la réutilisation d'eaux usées traitées après post-traitement de désinfection sur cultures maraichères

Type d'allocation : Bourse Ministère

Date de début de l'allocation de doctorat : 01/10/2023

Date de soutenance (si la thèse est soutenue) : prévue en novembre 2026

Programme finançant la recherche : ANR

Situation actuelle du docteur (si la thèse est soutenue) :

Pourcentage de participation du directeur à l'encadrement en cas de co-direction : 50%

Nom : MALLAURAN Jade

Intitulé : Analyse des risques environnementaux liés aux systèmes de protection cathodique des éoliennes en mer

Type d'allocation : Bourse CIFRE

Date de début de l'allocation de doctorat : 01/11/2025

Date de soutenance (si la thèse est soutenue) :

Programme finançant la recherche : Projet PEARL (France Energies Marines)

Autre directeur proposé (éventuellement)*

Nom - Prénom : Coulomb Bruno

Corps : MCF

Adresse mail : bruno.coulomb@univ-amu.fr

Laboratoire (i.e. formation contractualisée de rattachement, éventuellement équipe au sein de cette formation) : Laboratoire de Chimie de l'Environnement

Choix de cinq publications récentes (souligner éventuellement les étudiants dirigés co-signataires) :

1. P. Michel, J.-L. Boudenne, B. Coulomb, F. Robert-Peillard. **Spectrofluorimetric determination of acetone in water samples with solid-phase extraction and a new benzaldehyde derivative.** *Talanta*, 282, 126984, 2025 (10.1016/j.talanta.2024.126984).

2. J.-L. Boudenne, C. Demelas, L. Vassalo, B. Coulomb, J. Dron, M. Sergent, E. Quivet. **Optimization of a solid-phase extraction step by experimental design for application to SPE-GC-ECD analysis of four bromobenzoquinones and 2,4,6-tribromophenol in chlorinated seawater.** *Heliyon*, 10(23), e40583, 2024 (doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40583).

3. M.A. Vargas-Muñoz, J.-L. Boudenne, B. Coulomb, F. Robert-Peillard, E. Palacio. **Automated method for the solid phase extraction of tetracyclines in wastewater followed by fluorimetric determination.** *Talanta*, 270, 125554, 2024 (10.1016/j.talanta.2023.125544).

4. P. Michel, J.-L. Boudenne, F. Robert-Peillard, B. Coulomb. **Analysis of homemade peroxide-based explosives in water: A review.** *Trends in Analytical Chemistry Spectroscopy* 158 (2023) 116884 (10.1016/j.trac.2022.116884).

5. F. Robert-Peillard, E.M. El Mouchtari, D. Bonne, S. Humbel, J.L. Boudenne, B. Coulomb. **Determination of dissolved nickel in natural water using a rapid microplate fluorescence assay method.** *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 275 (2022) 121170 (10.1016/j.saa.2022.121170).

Thèses encadrées ou co-encadrées au cours des quatre dernières années*

Nom : MICHEL Pierre

Intitulé : Détection chimique des explosifs et de leurs précurseurs dans les réseaux d'eaux usées

Type d'allocation : Bourse AID

Date de début de l'allocation de doctorat : 01/11/2021

Date de soutenance (si la thèse est soutenue) : 18/11/2024

Programme finançant la recherche :

Situation actuelle du docteur (si la thèse est soutenue) : Responsable technico-commercial chez EGM

Pourcentage de participation du directeur à l'encadrement en cas de co-direction : 33%

Nom : DUMAS Mathieu

Intitulé : Impacts environnementaux et sanitaires de la réutilisation d'eaux usées traitées après post-traitement de désinfection sur cultures maraichères

Type d'allocation : Bourse Ministère

Date de début de l'allocation de doctorat : 01/10/2023

Date de soutenance (si la thèse est soutenue) : prévue en novembre 2026

Programme finançant la recherche : ANR

Situation actuelle du docteur (si la thèse est soutenue) :

Pourcentage de participation du directeur à l'encadrement en cas de co-direction : 50%

Références

[1] <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/>

[2] Plan d'action pour une gestion résiliente et concertée de l'eau – 53 mesures pour l'eau. Dossier de presse du 30 mars 2023, accessible en ligne sur :

https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/MAR2023_DP-

[PLAN%20EAU__BAT%20%281%29_en%20pdf%20rendu%20accessible.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/MAR2023_DP-PLAN%20EAU__BAT%20%281%29_en%20pdf%20rendu%20accessible.pdf)

[3] Décret n° 2023-835 du 29 août 2023 relatif aux usages et aux conditions d'utilisation des eaux de pluie et des eaux usées traitées. Accessible en ligne sur :

<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFARTI000048007386>

[4] Arrêté du 14 décembre 2023 relatif aux conditions de production et d'utilisation des eaux usées traitées pour l'arrosage d'espaces verts

[5] Arrêté du 18 décembre 2023 relatif aux conditions de production et d'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation de cultures.

[6] J. Yang *et al.* (2020) Membrane-based processes used in municipal wastewater treatment for water reuse: state-of-the-art and performance analysis. *Membranes* (10-131) 1-56

[7] J. Yang *et al.* (2021) Ultrafiltration as tertiary treatment for municipal wastewater reuse. *Sep. Pur. Technol.* 272:118921.

[8] A.W. Mohammad *et al.* (2015) Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects. *Desalination.* 356:226.