

les
dossiers
thématiques
2025

eaux

gestion et risques
associés



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Université
Gustave Eiffel

Sommaire

Introduction	08	01/ Gestion de l’eau	10
		1.1	Dimension historique 12
		1.2	La gestion des eaux pluviales urbaines 14
		1.2.1	Le principe de la gestion à la source 14
		1.2.2	Vers une généralisation des solutions fondées sur la nature (SFN) 17
		1.2.3	Documents d’urbanisme : un levier pour la gestion à la source des eaux pluviales et le déploiement des SFN 18
		1.2.4	Des solutions encore en évolution : l’exemple des eaux à l’échelle du bâtiment 19
		1.3	La gestion des ressources en eaux souterraines et de surface 20
		1.3.1	L’identification des sources de pollution 20
		1.3.2	La gestion quantitative des ressources en eau 21
		1.3.3	Services publics de l’eau : une gestion multi-échelles 23

Document publié par l’Université Gustave Eiffel
Mai 2025
Conception graphique : Epok Design

Crédits photos : Université Gustave Eiffel, Adobe Stock, Calligée,
Maximilien Lehujeur et quelques fois annotés à proximité des visuels

Le recensement des travaux de recherche en lien avec la thématique de l'eau, réalisé à partir des contributions des **chercheur-es** de l'Université Gustave Eiffel, a été mené jusqu'en juillet 2024. Des mises à jour pourront être effectuées dans de nouvelles versions.

Sommaire (suite)

02/ Caractérisation et anticipation des risques d’inondations		24	03/ Pollution des eaux : vers une meilleure quantification		38	04/ Solutions de gestion des risques hydrauliques		56	05/ Solutions pour lutter contre la pollution		74
2.1	Comment estimer les risques de submersions marines ?	28	3.1	Eaux et macrodéchets	40	4.1	Comportement des ouvrages en sites fluviaux ou côtiers	59	5.1	Méthodes innovantes pour la surveillance de l’eau	76
			3.2	Eaux et microplastiques	43						
2.2	Comment peut-on anticiper, prévenir les crues soudaines ?	30	3.3	Pollution des eaux par les particules de pneus	46	4.1.1	Érosion interne des digues	60	5.1.1	Techniques d’analyse de l’eau	76
						4.1.2	Affouillement des ouvrages fluviaux	64	5.1.2	Réseaux d’eau intelligents	77
2.2.1	Des méthodes d’analyse automatique de séquences vidéo de crues	31	3.4	Pollution par les polluants métalliques et par les nanoparticules	49	4.2	Caractérisation et suivi des ouvrages fluviaux et maritimes	65	5.2	Purification des eaux	78
2.2.2	Des méthodes de cartographie automatisée des zones inondables adaptées aux petits cours d’eau	32	3.5	Pollution par les polluants persistants fluorés (PFAS) ou polluants éternels	51	4.2.1	Caractérisation et suivi des digues traitées dans un contexte maritime	65	5.2.1	Dispositifs de filtration des eaux	78
									5.2.1.1	Noues filtrantes	78
2.2.3	Des chaînes de modèles dédiés à la prévision des crues soudaines des petits cours d’eau	34	3.6	Pollution par les résidus médicamenteux	53	4.2.2	Suivi des vibrations liées aux ouvrages de défense côtière	66	5.2.1.2	Amélioration des eaux pluviales via une noue filtrante	79
						4.2.3	Capteurs de résistivité	69	5.2.2	Techniques de purification de l’eau par l’énergie solaire	80
2.2.4	Des méthodes de prévision des pluies intenses à courte échéance . . .	36	3.7	Pollution par les micro-organismes biologiques	54	4.2.4	Mesures spectroscopiques <i>in-situ</i>	70	5.2.2.1	Distillation-désalinisation accélérée	80
						4.2.5	Suivi des réactions de gonflement interne	70	5.2.2.2	Photocatalyse	80
2.2.5	Le développement de prévisions basées sur les impacts	36				4.2.6	Modélisation du comportement des ouvrages en béton affectés par des pathologies	71	5.2.3	Traitement de l’eau par oxydation anodique	81
2.2.6	Évaluation de l’intérêt des prévisions pour les utilisateurs	36									
						4.3	Autres solutions : les aménagements possibles des villes et des territoires	72			
						4.3.1	Aménagement du littoral	71			
						4.3.2	Lutte contre artificialisation des sols	73			

Sommaire (suite)

06/ Solutions pour lutter contre le réchauffement climatique	83	Bibliographie	91
6.1 Rafraîchissement urbain	84		
6.1.1 Arrosage urbain	85		
6.1.2 Matériaux urbains	86		
6.1.2.1 Revêtements urbains	86		
6.1.2.2 Toitures	87		
6.2 Collecte d’eau dans l’air ambiant	88		
6.3 Retrait et gonflement des argiles (RGA) sous les fondations des maisons : analyse et traitement des désordres créés par la sécheresse	89		

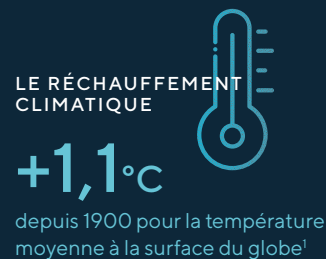
Introduction

L'EAU, UNE RESSOURCE PRÉCIEUSE ET VITALE

L'eau est une ressource vitale à protéger et à partager. Souvent qualifiée d'« or bleu », l'eau est également une ressource au centre de problématiques multiples et complexes.

Elle concerne aussi bien les milieux naturels que les infrastructures et les services, permettant ainsi la gestion, le stockage, le traitement et la distribution de l'eau.

En raison de sa dimension socio-culturelle, l'eau est aussi perçue, estimée et utilisée différemment selon les cultures et les modes de vie des sociétés.



Les modifications du cycle de l'eau impactent à la fois les populations humaines et les écosystème

Selon les projections de l'ONU, la population mondiale devrait augmenter de 2 milliards de personnes au cours des trente prochaines années, passant de 8 milliards, actuellement, à 9,7 milliards en 2050, entraînant un besoin croissant en eau.

Le changement climatique impacte aussi directement le cycle de l'eau avec des conséquences déjà sur de nombreux territoires : épisodes de sécheresse ou augmentation de l'intensité et de la fréquence des précipitations.

Par ailleurs, avec 54 % de la population mondiale vivant dans les zones urbaines et une proportion qui devrait passer à 66 % en 2050 (service des populations du

Ces enjeux majeurs auxquels les villes font face concernent la gestion des risques d'inondations, la préservation du confort thermique urbain, la limitation des rejets de polluants dans l'environnement et plus généralement la préservation de la ressource en eau et de la qualité des écosystèmes (sols, eaux souterraines et de surface).

Pour faire face à l'ensemble de ces menaces, l'Université Gustave Eiffel mène de nombreux travaux sur les différents risques d'origine naturelle et/ou anthropique, tels que les inondations et les risques hydrauliques, les épisodes de sécheresse, l'artificialisation des sols et la pollution des eaux. Son objectif est d'évaluer et d'anticiper ces risques liés à l'eau afin d'améliorer

Département des affaires économiques et sociales de l'ONU – édition 2014 du rapport sur les perspectives de l'urbanisation), l'artificialisation des surfaces naturelles progresse, rendant ainsi les villes et leurs habitants de plus en plus vulnérables aux extrêmes météorologiques et climatiques (IPCC, 2021).

Dans ce contexte de changements globaux majeurs (changement climatique, étalement ou densification urbaine, émergence de nouveaux polluants, changement de pratiques...), les villes doivent s'adapter et prévoir des aménagements durables pour mieux maîtriser leurs impacts et limiter leurs vulnérabilités vis-à-vis des modifications du cycle de l'eau.

leur gestion.

Forte de son expertise sur la thématique des villes et des territoires et de par son implantation nationale, l'établissement prend également en compte les spécificités territoriales, participant ainsi à une meilleure gestion de l'eau dans les villes et jouant ce faisant un rôle essentiel pour produire des connaissances et éclairer les décideurs.

- 1: 6^e rapport du GIEC 2021-2023.
- 2: Chiffres clés édition 2024. Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des territoires
- 3: Géorisques

1 Gestion de l'eau

.05	1.1	Dimension historique
.06	1.2	La gestion des eaux pluviales urbaines
.11	1.3	La gestion des ressources en eaux souterraines et de surface

1.1 Dimension historique

Les besoins en eau en France entraînent depuis longtemps des conséquences politiques majeures notamment en matière d’urbanisme et d’aménagement, tout en engendrant des conflits d’usages, voire des crises sociales et politiques en raison de l’urgence environnementale.

© Adobe Stock



Comme évoqué par Loïc Vadelorge¹ : « L’eau est, depuis longtemps, un objet d’histoire, au carrefour des approches techniques, politiques et socio-environnementales. Sujet au long cours par excellence..., l’eau forme une grille de lecture incontournable de l’histoire de l’évolution et de la gestion des villes. »

L’ouvrage intitulé *La soif de Jérusalem*² restitue toute l’épaisseur des enjeux de maîtrise de l’eau et de la gestion des réseaux de distribution aux XIX^e-XX^e siècles. Le concept d’hydro-histoire, développé dans ce livre, vise à dépasser l’histoire des équipements (aqueducs, puits, fontaines, canaux...) pour saisir l’articulation des enjeux mémoriels (archéologues), techniques (place et rôle des ingénieurs), politiques (rôle des édiles, des pouvoirs religieux ou coloniaux) et sociaux (accès, usages et partage de l’eau). Dans ce sillage, les travaux en cours de Pingault 2023³, sur l’hydro-histoire de la ville nouvelle de Sénart, visent à retracer les enjeux politiques et institutionnels de la gestion de l’eau du milieu du XX^e siècle (phase d’urbanisation) jusqu’aux débuts du XXI^e (nouveaux enjeux écologiques, mais aussi patrimonialisation des équipements et des usages).

Loïc Vadelorge précise : « L’utilité de ces approches historiques est plurielle. Élément clé de la transition écologique, la maîtrise de l’eau conduit aujourd’hui

les territoires (métropoles, communautés d’agglomération ou de communes) à se réapproprier la gestion de l’eau, traditionnellement prise en charge par des acteurs privés. Cette reprise en main nécessite de maîtriser les archives de la gestion de l’eau (syndicats d’assainissement, contrats de concessions) et de reconstituer la chronologie et la cartographie souterraine des réseaux d’adduction et d’évacuation des eaux usées. Elle suppose également de construire l’acceptabilité d’une hausse inéluctable du coût de l’eau courante auprès des populations. L’usage de l’histoire à la fois patrimonial (valorisation des traces d’équipements anciens) et sociétal (compréhension de la gestion historique des biens communs) semble ici évident. À cet égard, la thèse de Pingault W., financée dans le cadre d’un contrat CIFRE par la jeune Communauté d’agglomération de Grand Paris Sud, est emblématique des relations possibles entre recherche historique et construction de l’avenir des territoires. »

« Avec la directive cadre européenne sur l’eau de 2000, la restauration écologique des rivières est également au cœur des politiques publiques sur les cours d’eau depuis plus de vingt ans. De nombreux savoirs ont progressivement été mobilisés pour élaborer les projets de restauration écologique : hydromorphologie et écologie d’abord, puis sciences



© Adobe Stock

humaines et sociales (géographie et sociologie en particulier). L’histoire reste quant à elle relativement absente, mobilisée essentiellement par les opposants à ces politiques publiques. Conscients du caractère potentiellement stratégique de la maîtrise du récit historique “officiel” sur une rivière, certains gestionnaires opérationnels tentent d’intégrer eux aussi l’histoire dans leurs projets. » (Abherve D., 2024)⁴. Ces travaux s’intéressent donc à la manière dont l’histoire a pu être sollicitée dans les savoirs produits sur les rivières, à travers une analyse diachronique de la revue d’ingénieurs *La houille blanche*, couvrant tout le XX^e siècle, et peuvent permettre d’accompagner les acteurs dans une mobilisation stratégique de l’histoire.

1 : Loïc Vadelorge, professeur d’histoire contemporaine à l’Université Gustave Eiffel, interview mai 2024.

2 : Lemire V. : *La soif de Jérusalem : l’eau dans la ville sainte : enquêtes archéologiques, politiques hydrauliques, conquêtes territoriales (1840-1940)*, thèse 2006. <https://theses.fr/2006AIX10005>

3 : Pingault W. : *Hydrohistoire d’un nouveau territoire : Grand Paris Sud (de l’urbanisation à la patrimonialisation)*, thèse en cours 2023, <https://theses.fr/s372293>

4 : Abherve D. : *L’histoire, une ressource stratégique pour la restauration écologique des cours d’eau ?*, Le cas du Haut-Rhône, Doctoriales des Sciences Sociales de l’Eau, mai 2023, Rennes, France.

1.2

La gestion des eaux pluviales urbaines

1.2.1 Le principe de la gestion à la source

« L’imperméabilisation des surfaces liée à l’urbanisation croissante entraîne une diminution de l’infiltration des eaux pluviales, limitant la recharge des nappes et favorisant le ruissellement de surface. Cette urbanisation s’est accompagnée de la mise en place d’infrastructures de gestion des eaux (réseaux d’assainissement, stations de traitement des eaux usées, collecte des eaux pluviales) qui ont modifié les chemins d’écoulement de l’eau, augmenté la vitesse des écoulements, et favorisé par conséquent les inondations par ruissellement, ainsi qu’un rejet rapide des eaux de pluie et des flux de polluants associés vers les cours d’eau.

C’est pourquoi la compréhension des particularités du cycle de l’eau en ville devient d’une importance capitale et constitue un réel enjeu sociétal et environnemental⁵. » (Bernard E. 2021).

Longtemps pensée comme une gestion « tout tuyau », la gestion des eaux pluviales urbaines est en pleine évolution et se pense progressivement dans une logique de gestion à la source. On observe ainsi un changement majeur dans la gestion des eaux pluviales urbaines, qui passe de systèmes centralisés basés sur des canalisations à des solutions décentralisées fondées sur la nature, qui gèrent les eaux pluviales en se rapprochant du cycle naturel de l’eau. Selon Fabrice Rodriguez⁶ : « Les travaux menés par l’université dans le cadre du **projet Matriochkas** (2015-2019), Agence française de la biodiversité et Agence de l’eau Loire-Bretagne, se placent dans ce contexte d’évolution des pratiques de gestion des eaux pluviales, qui privilégient la gestion à la source, souvent réalisée grâce à des aménagements végéta-

lisés. La connaissance des performances épuratoires de ces aménagements a ainsi progressé grâce au **projet Matriochkas**, en lien avec deux autres projets partenaires du réseau URBIS⁷ (ROULEPUR en Île-de-France et MICROMEGAS à Lyon). Le résultat, c’est que l’on connaît mieux ces aménagements végétalisés et leurs performances. »

Le réseau URBIS a été créé en 2011, à l’instigation de trois observatoires français en hydrologie urbaine (OPUR, Observatoire des Polluants Urbains – Île-de-France, OTHU, Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine – Métropole de Lyon, et ONEVU, Observatoire

© Adobe Stock



Nantais des Environnements Urbains – Métropole de Nantes), pour renforcer la capacité de recherche et de valorisation des résultats acquis sur le cycle urbain de l’eau dans ses composantes eaux usées et eaux pluviales.

Fabrice Rodriguez précise : « Ces recherches sont par ailleurs en lien avec l’évolution des politiques publiques développées dans les villes, qui font une place grandissante à la nature. Cela nécessite souvent une approche intégrée, car contrairement à la gestion centralisée impliquant des ouvrages historiquement dédiés à la fonction d’assainissement des villes, la gestion décentralisée des eaux pluviales passe par des objets multifonctions sous diverses maîtrises d’ouvrage, et implique de combiner les différentes compétences d’une collectivité. »

Pour accompagner les collectivités dans cette évolution, un guide⁸ sur la gestion patrimoniale des solutions de gestion durable des eaux pluviales a été rédigé récemment au sein de l’Association scientifique et technique pour l’eau et l’environnement (Astee), et soutenu par le ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires et l’Office français de la biodiversité (OFB)⁹.

Selon la publication des chercheur-e-s Tunqui Neira JM., Gromaire MC., Chancibault K., Chebbo G., Novatech 2023¹⁰ : « La mise en œuvre des ouvrages de gestion à la source (OGS) nous confronte à un changement de paradigme majeur dans la gestion des eaux pluviales urbaines. C’est la diversité de ces OGS qui contribuera à l’adaptation au changement climatique et à l’urbanisation croissante. Les OGS

permettent en effet de se rapprocher d’un fonctionnement hydrologique et d’une qualité de l’eau observés en l’absence d’urbanisation. Dans le contexte actuel des changements globaux, les eaux pluviales constituent une ressource précieuse qui doit être considérée comme un vecteur d’adaptation et de résilience. Cela implique la préconisation d’OGS capables de retenir la pluie au plus près de la source, pour permettre son infiltration et/ou son évapotranspiration, ainsi que sa récupération pour réutilisation (Fletcher et al., 2013)¹¹. Or, il existe de nombreux OGS dont la conception est basée sur différents critères de gestion des eaux pluviales urbaines : hydrologiques, environnements, écologiques, urbanistiques (Wang et al., 2020)¹². Sur la base de ces critères, et afin d’optimiser leur utilisation, différentes typologies des OGS ont été développées (e.g. Chocat et al., 2022, Fletcher et al., 2013, Sage, 2016)¹³. Toutefois, et bien que ces typolo-

5 : Bernard E. : *Réponse hydro-climatique de Paris et sa petite couronne au climat futur – Impacts de scénarios d’aménagement*, thèse 2021. <https://theses.fr/2021TOU30250>

6 : Fabrice Rodriguez, chercheur au Laboratoire Eau et Environnement (GERS-EE) de l’Université Gustave Eiffel, interview mai 2024.

7 : Site web Arceau, Île-de-France, réseau URBIS : <https://arceau-idf.fr/urbis>

8 : *Guide Pesticides & Métabolites dans les Eaux Destinées à la Consommation Humaine : un Guide pour comprendre et agir*, Groupe de travail « Pesticides » de l’Association scientifique et technique pour l’eau et l’environnement (Astee), juillet 2024.

9 : Site web de l’Office français de la biodiversité (OFB) : <https://www.ofb.gouv.fr/>

10 : *Vers une typologie fonctionnelle des Ouvrages de Gestion à la Source des eaux pluviales pour la modélisation hydrologique et de la qualité de l’eau*, Novatech 2023 – Tunqui Neira JM., Gromaire MC., Chancibault K. and Chebbo G., Leesu, École des Ponts, Université Paris-Est Créteil, Université Gustave Eiffel, GERS-EE.

11 : Fletcher T., Andrieu H. & Hamel P., 2013: *Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art Advances in Water Resources*, 51, 261-279.

12 : Wang J., Liu J., Wang H., & Mei C. (2020) : *Approaches to Multi-Objective Optimization and Assessment of Green Infrastructure and Their Multi-Functional Effectiveness: A Review*. Water, 12(10), 10 : <https://doi.org/10.3390/w12102714>

13 : Chocat B., Cherqui F., Afrit B., Barjot G., Boumahdi M., Breil P., Brelot É., Célièrier JL., Chebbo G., de Gouvello B., & others. (2022) : *Contribution à une meilleure explicitation du vocabulaire dans le domaine des solutions dites « alternatives » de gestion des eaux pluviales urbaines*, Techniques Sciences Méthodes, 5, 103-119.

gies soient utiles, elles ne permettent pas de décrire de manière générique la diversité de ces solutions et de s’adapter à une modélisation à l’échelle urbaine.»

Ainsi, ces chercheur·e·s, notamment des laboratoires Eau Environnement et Systèmes Urbains (LEESU) et Eau et Environnement (LEE) de l’Université Gustave Eiffel, ont proposé une nouvelle typologie des ouvrages de gestion à la source basée sur deux critères : les fonctions principales hydrologiques assurées (l’abattement, la régulation et le transport du ruissellement) et le type de structure (à savoir les compartiments physiques dans la structure de l’OGS où le volume de ruissellement collecté par l’OGS est traité). La combinaison de ces deux critères de classification a permis de classer les OGS en seize groupes, précisant ainsi la diversité des OGS et conduisant à

une meilleure modélisation de ces solutions à l’échelle urbaine. Ils concluent en précisant que : « Cette typologie et la conceptualisation des différents processus hydrologiques et réactifs (biologiques et physico-chimiques, pour l’amélioration de la qualité de l’eau) peuvent s’intégrer parfaitement aux modèles de gestion des eaux pluviales existants (e.g. SWMM, Rossman, 2015)¹⁴ ou nouveaux (e.g. TEB, StavropoulosLaffaille et al., 2021)¹⁵. »

Des travaux ont également été menés pour déterminer les conséquences de l’hydrologie « sans tuyau » sur la circulation des eaux souterraines. On peut en effet s’interroger sur les effets potentiels d’une systématisation des pratiques d’infiltration des eaux pluviales sur le fonctionnement hydrologique de petits bassins versants urbanisés (Pophillat W., 2022)¹⁶. Grâce à la modélisation hydrologique, ce travail de recherche mené par Pophillat W. confirme l’intérêt des ouvrages d’infiltration pour la maîtrise du ruissellement, même en présence de sols peu perméables. Ces travaux ont également mis en évidence les risques en présence d’une nappe peu profonde et d’aquifères peu perméables d’altérer le fonctionnement des ouvrages d’infiltration ou de renforcer des interactions non souhaitées entre nappes et structures souterraines (drainage en base de fondation, infiltrations parasites dans les réseaux, etc.).

Du point de vue méthodologique, ce travail a également précisé les apports de la modélisation, mais également les limites pour des utilisations opérationnelles, du fait du nombre important de données d’entrée nécessaires, dont une grande partie reste inconnue (e.g. données du sous-sol) (Pophillat W., 2022).

1.2.2 Vers une généralisation des solutions fondées sur la nature (SFN)

Le recours à des solutions fondées sur la nature (SFN) pour la gestion des eaux pluviales contribue à rendre nos villes plus résilientes : la végétalisation des espaces crée des îlots de fraîcheur, l’infiltration des eaux permet de rétablir le cycle naturel des eaux, la réduction de l’imperméabilisation des sols évite les écoulements rapides en surface et réduit la mobilisation de polluants. Ces stratégies fondées sur la nature sont à disposition des aménageurs pour (re)végétaliser les villes. L’ombrage des arbres peut apporter à long terme un effet rafraîchissant, lui-même complété par l’évapotranspiration de la végétation. L’ajout de végétation, associé à l’augmentation de sol perméable, permet aussi de capter une plus grande quantité d’eau et de l’infiltrer dans le sol, ce qui limite la quantité d’eau envoyée vers les réseaux d’assainissement.

Afin d’évaluer les performances encore peu connues de ce type de solutions végétalisées à l’échelle de grands territoires urbains, le Laboratoire Eau et Environnement du département Géotechnique, Environnement, Risques naturels et Sciences de la terre (GERS-EE) de l’Université Gustave Eiffel, en collaboration avec le CNRM (Météo-France et CNRS), a développé un outil de recherche (TEB-Hydro, Stavropoulos-Laffaille et al., 2018, Stavropoulos-Laffaille et al., 2020)¹⁷ couplant de façon cohérente et homogène les bilans en eau et les bilans énergétiques et disposant de paramétrisations adaptées à la végétation en ville (Lemonsu et al., 2012, de Munck et al., 2013, Redon et al., 2017)¹⁸. Cet outil est ainsi adapté à l’évaluation hydro-microclimatique de différentes SFN.

Néanmoins, les interactions hydro-climatiques liées aux solutions végétalisées sont encore peu connues à l’échelle de grands territoires urbains. Dans cet objectif, des travaux de modélisation de l’hydro-climatologie urbaine à l’échelle du Grand Paris ont été réalisés par Bernard E. dans le cadre de sa thèse au sein du laboratoire Eau et Environnement. « Afin de mieux comprendre ces interactions en milieu urbain, la modélisation simultanée des transferts hydrologiques (TEB-Hydro) et de la végétation arborée

(TEB-Tree), processus récemment implémenté au sein du modèle de canopée urbaine TEB, a été mise en œuvre pour la première fois. Au niveau du Grand Paris, la configuration de modélisation a été définie et a permis l’identification de zones de vulnérabilité hydro-climatique. Un quartier du 13^e arrondissement de Paris a ainsi été identifié comme regroupant les quatre vulnérabilités étudiées (maximum de température ressentie, de déversement, de ruissellement, de stress hydrique). »¹⁹

Ces travaux ont été poursuivis par Betou F.²⁰, et TEB-Hydro a ensuite pu être appliqué à la métropole nantaise, permettant de simuler l’îlot de chaleur urbain, le stress thermique ressenti par les habitants au sein de ce territoire, les déversements du réseau d’assainissement, le ruissellement de surface et les débits en divers points du réseau et des rivières. Le modèle apparaît comme un outil intéressant, en temps présent, mais aussi en temps futur, pour le développement de scénarios futurs d’aménagement. Ces scénarios pourraient notamment s’appuyer sur la végétalisation, pour obtenir les avantages combinés du rafraîchissement des ambiances et de l’amélioration de la gestion des eaux pluviales, en limitant leur collecte par les réseaux. Connaître précisément les risques hydro-climatiques (stress thermique des habitants, stress hydrique des végétaux, pollution liée aux déversements) associés spécifiquement à chaque quartier apparaît comme essentiel pour les décideurs, pour réaménager plus efficacement ces zones dans le but de limiter les risques encourus par la population et par les milieux naturels.

- 14 : Rossman L. (2015): *Storm water management model user’s manual Version 5.1* (EPA-600/R-14/413b), Retrieved from Washington, DC. : <http://Nepis.Epa.Gov/Exe/ZyPDF.Cgi>
- 15 : Stavropoulos-Laffaille X., Chancibault K., Andrieu H., Lemonsu A., Calmet I., Keravec P., & Masson V. (2021) : *Coupling detailed urban energy and water budgets with TEB-Hydro model: Towards an assessment tool for nature-based solution performances*, *Urban Climate*, 39, 100925 : <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100925>
- 16 : Pophillat W. : *Conséquences d’une systématisation des pratiques d’infiltration à la parcelle des pluies courantes à l’échelle de petits bassins versants urbains et péri-urbains – Apports de la modélisation intégrée*, Hydrologie, Université Grenoble Alpes [2020–...], 2022, français : **NNT : 2022GRALU012 tel-03770218**

© Adobe Stock



- 17 : Stavropoulos-Laffaille X., Chancibault K., Brun JM., Lemonsu A., Masson V., Boone A. & Andrieu H., 2018 : *Improvements to the hydrological processes of the Town Energy Balance model (TEB-Veg, SURFEX v7.3) for urban modelling and impact assessment* *Geoscientific Model Development*, 11, 4175-4194.
- 18 : Lemonsu A., Masson V., Shashua-Bar L., Erell E. and Pearlmutter D., 2012 : *Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas*. *Geoscientific Model Development* 5, 1377-1393 : <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1377-2012>
- 19 : Bernard E. : *Réponse hydro-climatique de Paris et sa petite couronne au climat futur – Impacts de scénarios d’aménagement*, thèse 2021 : <https://theses.fr/2021TOU30250>
- 20 : Betou F. : *Stratégies d’adaptation au changement climatique pour améliorer la gestion des eaux pluviales et le confort thermique : évaluation de scénarios d’aménagements à l’échelle de la métropole nantaise*, thèse en cours, 2022.

1.2.3
Documents d’urbanisme : un levier pour la gestion à la source des eaux pluviales et le déploiement des SFN

«Élaborer des scénarios d’aménagement à l’échelle d’une agglomération est un exercice périlleux. La plupart des études sur les solutions fondées sur la nature utilisent des scénarios simplistes où soit un seul type de solution est diffusé à l’échelle du domaine étudié, soit plusieurs solutions sont combinées, selon des règles peu contraignantes. Les études qui utilisent des scénarios réalistes se placent généralement à l’échelle du quartier, en se basant sur des projets d’aménagement prévus : **projets N4C3, URBiNAT4**²¹. Les scénarios d’aménagement à plus grande échelle et à plus long terme (environ dix ans) nécessitent une méthodologie qui permet une diffusion des solutions d’adaptation de façon semi-automatisée, tout en prenant en compte un minimum de contraintes en lien avec le territoire pour assurer leur réalisme (de Gouvello et al., 2015)²². De plus, dans le cadre d’une démarche prospective, un ensemble de scénarios couvrant le champ des possibles est à privilégier. Les documents d’urbanisme présentent donc un intérêt, car ils sont suffisamment contraignants pour limiter les scénarios à la stratégie d’adaptation du territoire, tout en laissant une certaine liberté d’utiliser différentes solutions, pour répondre aux enjeux du territoire.» (Chavez S., thèse en cours)²³.

Ainsi, suite à une analyse semi-automatique des divers documents constitutifs du Plan local d’urbanisme intercommunal (PLUi) de la métropole nantaise, le potentiel d’implantation de 23 solutions vertes (arbres d’alignement, noues paysagères, jardin de pluie...) ou grises (tranchée d’infiltration, chaussée perméable...) a été caractérisé et cartographié, en fonction des règles d’urbanisme du territoire et des enjeux en lien avec la profondeur de la nappe ou le risque de ruissellement. En croisant avec les résultats des simulations produites par Betou F. (2021), cela va aider à élaborer différents scénarios d’aménagement, marquant une nouvelle étape pour aider les collectivités dans l’élaboration de leur stratégie d’adaptation. Néanmoins, Katia Chancibault²⁴ précise que bien que «les collectivités connaissent désormais les grandes règles à privilégier (infiltration, désimper-

méabilisation, densification, mais jusqu’à un certain point, stockage local de l’eau...), il n’en reste pas moins que l’adaptation aux changements globaux (changement climatique et urbanisation) fait face à des systèmes complexes, en particulier en lien avec des facteurs très locaux. Des solutions qui montrent de bons résultats ailleurs peuvent être moins

Multiplier le type de solutions semble être la meilleure réponse : solutions vertes, mais on ne pourra pas s’affranchir des solutions grises ni de l’adaptation de nos usages et pratiques, que ce soit au niveau des citoyens ou des agents de la collectivité.

bonnes localement. Seule une étude approfondie du territoire reste nécessaire, avant d’élaborer des stratégies d’adaptation, afin de bien identifier les contraintes locales (en lien avec les sols ou avec l’amont, par exemple). Multiplier le type de solutions semble être la meilleure réponse : solutions vertes, mais on ne pourra pas s’affranchir des solutions grises ni de l’adaptation de nos usages et pratiques, que ce soit au niveau des citoyens ou des agents de la collectivité.»

21: Projet N4C, H2020, 2016–2020 et projet URBiNAT, H2020, 2018–2024.
22: Versini PA., Ramier D., Berthier E., de Gouvello B. : *Assessment of the hydrological impacts of green roof: From building scale to basin scale*. Journal of Hydrology, 2015, 524, pp. 562–575 : [10.1016/j.jhydrol.2015.03.020](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.020) hal-01151761
23: Chavez S. : *Le Plan Local d’Urbanisme entre déterminisme et incertitude. Dans un contexte d’adaptation au changement climatique, quel levier pour la gestion alternative des eaux pluviales ? Application au PLU métropolitain de Nantes Métropole*, thèse en cours, Urbanisme, aménagement et transports : <https://theses.fr/s347549>
24: Katia Chancibault, chargée de recherche, Laboratoire Eau et Environnement (GERS-EE), Université Gustave Eiffel, interview mai 2024.

1.2.4
Des solutions encore en évolution : l’exemple des eaux à l’échelle du bâtiment

Au regard de cette adaptation des pratiques, d’autres solutions sont étudiées, notamment pour permettre de minimiser la consommation d’eau des ménages. Le Lab’URBA, en collaboration avec le Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains (LEESU)²⁵, s’est intéressé à la phytoépuration des eaux à l’échelle du bâtiment. L’innovation consiste à récupérer les eaux de pluie et les eaux grises générées par les habitants, à les traiter et à les réinjecter dans un réseau parallèle au réseau d’eau potable à des fins d’alimentation des toilettes et des machines à laver, de lavage des surfaces et d’arrosage des plantes. Ces eaux grises sont, grâce à un procédé de phytoépuration²⁶ réalisé en toiture d’immeuble, traitées et rendues propres à des usages intérieurs. Le procédé développé permet ainsi d’atteindre une qualité de l’eau – non potable – appropriée aux usages intérieurs visés.

Dans l’effort de se rapprocher du cycle naturel de l’eau, un autre enjeu tout aussi majeur, au-delà de la gestion des eaux en milieu urbain, est celui de leur préservation en milieu souterrain et en surface.

25 : Laboratoire commun École des Ponts ParisTech et l’Université Paris-Est Créteil (UPEC).
26 : Moilleron R., Deroubaix JF., Gobert J., Bressy A. : *Enjeux sociétaux et scientifiques de la phytoépuration des eaux grises en toiture pour une réutilisation dans le bâtiment*, LEESU et Lab’URBA, 24e rencontres internationales de l’urbanisme, APERAU, Université de Lausanne, UNIL, juin 2023, Lausanne, Switzerland.

© Adobe Stock



1.3.

La gestion des ressources en eaux souterraines et de surface

« Ce projet A3P est destiné à accompagner l’adaptation des systèmes agricoles irrigués au changement climatique grâce à un service numérique innovant d’aide à la décision. »

ÉRIC GAUME, GERS

1.3.1

L’identification des sources de pollution

Issu de l’appel à projets I-SITE-FUTURE Chercheur·e-s-Citoyen·ne·s, lancé en 2022, le projet QUEPEP (Qualité et Usages de l’Eau de Pluie et Eau de Puits, en partenariat avec des chercheur·e·s, des jardiniers et une association de protection de l’environnement) s’est intéressé à la qualité et aux usages des eaux de puits et de pluie dans une commune de Loire-Atlantique, afin de proposer un diagnostic affiné, destiné à prendre la pleine mesure de cette problématique. Mathieu

Goriaux²⁷ révèle les résultats de cette étude : « Les contaminants ciblés étaient des métaux, des nitrates et des produits phytosanitaires. Les concentrations de métaux et d’ions étaient presque toujours inférieures aux valeurs de normes de qualité pour les eaux souterraines. Pour les produits phytosanitaires, 56 molécules différentes ont été quantifiées, chaque échantillon comprenant entre un et quinze molécules organiques quantifiées. Les recherches ont par ailleurs mis en évidence une forte variabilité des molécules détectées dans les eaux des collecteurs de pluie entre l’automne et le printemps, contrairement aux eaux de puits pour lesquelles les molécules quantifiées étaient souvent similaires. Pour l’association, ces mesures de la qualité de l’eau permettent d’apporter des mesures réelles sur la présence de contaminants, et viennent enrichir les actions pédagogiques. Par exemple, la présence de plomb dans un des collecteurs de pluie est venue illustrer l’importance d’une déconnexion en cas de travaux et d’une purge annuelle. Ce travail a également montré la présence de molécules qui n’étaient à ce jour pas mesurées par le producteur d’eau local, qui a pu les inclure dans ses listes de suivi. »

27 : Mathieu Goriaux, ingénieur de recherche, Laboratoire Eau et Environnement (GERS-EE), Université Gustave Eiffel, interview mai 2024.

1.3.2

La gestion quantitative des ressources en eau

D’autres travaux de recherche ont mobilisé cette fois-ci l’intelligence artificielle pour la gestion des ressources en eau. Le projet **Anticipation, Planification et Pilotage des Prélèvements agricoles** (A3P), en partenariat entre MEOSS²⁸, INRAE et l’Université Gustave Eiffel, vise à développer un service numérique d’aide à la décision pour optimiser la planification et le pilotage de l’irrigation.

Lauréat de l’appel à projets « Réussir les transitions agricole et alimentaire » du programme « France 2030 », ce projet s’adresse aux organismes en charge de la gestion collective de l’irrigation (OUGC²⁹, SAR³⁰, ASA³¹). Ce service couple des modèles agronomiques et hydrologiques par IA et s’appuie sur l’imagerie satellite. D’après Éric Gaume, directeur du département GERS de l’Université Gustave Eiffel³² : « Les premiers résultats de recherche ont permis d’améliorer significativement, par rapport à l’état de l’art scientifique, les prévisions des débits des cours d’eau à courte échéance (quelques jours), grâce à la proposition de méthodes innovantes d’assimilation des données couplées à l’apprentissage profond. »

Il précise également que « ce projet A3P est destiné à accompagner l’adaptation des systèmes agricoles irrigués au changement climatique grâce à un

service numérique innovant d’aide à la décision. Il permettra une adaptation dynamique des stratégies collectives d’irrigation aux besoins réels des cultures et à la disponibilité des ressources en eau. A3P repose sur une double modélisation agronomique et hydrologique, sur l’intelligence artificielle et l’imagerie satellite, afin d’anticiper l’évolution des ressources hydriques disponibles et des besoins d’irrigation des cultures sur un territoire défini. Le développement de l’utilisation et des applications de l’intelligence artificielle est devenu, en quelques années, un champ de R&D très actif et très compétitif, notamment pour la gestion de l’eau. L’ambition de l’université est bien de proposer des recherches différenciantes sur cette thématique. »

28 : Maps Earth Observation Satellite services.

29 : Organismes uniques de gestion collective.

30 : Sociétés d’arrosage régionales.

31 : Associations syndicales autorisées.

32 : Éric Gaume, directeur du département Géotechnique environnement risques naturels et sciences de la Terre (GERS) de l’Université Gustave Eiffel, interview mai 2024.

© Adobe Stock



1.3.3
Services publics de l’eau :
une gestion multi-échelles

« Ouvrir et fermer le robinet d’eau est devenu un geste ordinaire, mais derrière lui se cachent des pratiques individuelles spécifiques. En 2002, des entretiens réalisés avec des Parisiens ont montré que les pratiques liées à l’usage de l’eau sont multiples et singulières. Elles se construisent à partir des représentations individuelles de l’élément eau, des perceptions de sa qualité, des expériences individuelles et collectives, ainsi que du contexte. » (Euzen A., 2010)³³.

Les crises [...] génèrent des incertitudes scientifiques, techniques, organisationnelles et politiques importantes.

.....

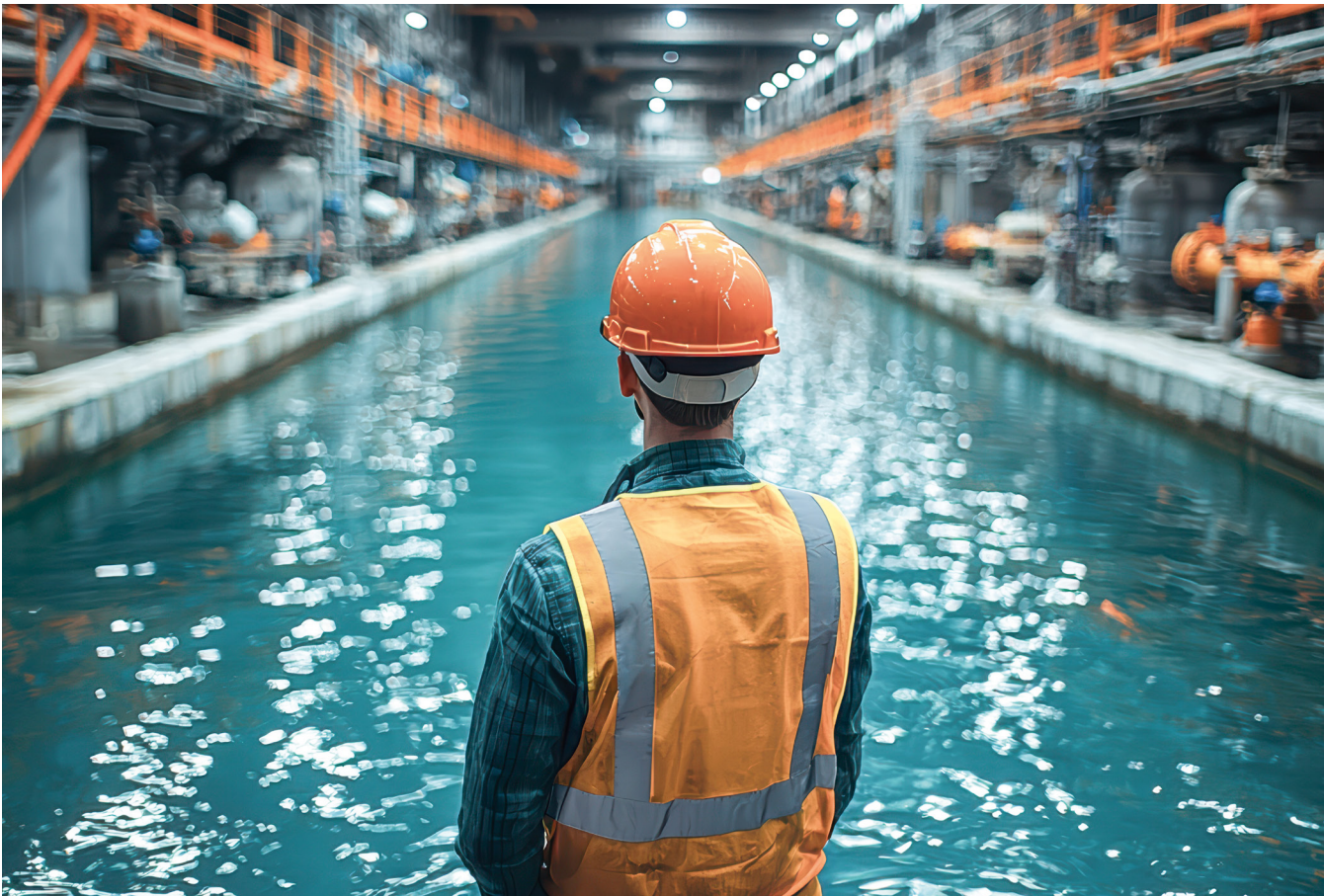
Ce sont les communes (ou les structures intercommunales) qui sont en charge de la gestion des services de l’eau et de l’assainissement. Elles représentent la structure juridique de base pour gérer ces services. Suivant l’ampleur et la complexité des missions à effectuer, elles peuvent décider d’en assumer directement la gestion en régie directe, ou de la déléguer à des entreprises privées. Dans tous les cas, l’eau demeure un bien public.

Il existe aujourd’hui en France **25 651 services publics de l’eau et de l’assainissement**³⁴, gérés par les communes ou les structures intercommunales, qui ont pour missions d’acheminer l’eau potable jusque dans les foyers, de collecter les eaux usées et les eaux pluviales, de traiter ces eaux collectées avant de les restituer à leur environnement naturel, et enfin de gérer les relations avec les consommateurs : informations, gestion des demandes, facturation...

« En l’espace de trente ans, la gestion de l’eau potable s’est singulièrement recomposée. Tandis que les services d’eau furent bâtis sur une approche locale visant à assurer la desserte universelle à domicile, les acteurs institutionnels s’investissent

aujourd’hui sur un programme de sécurisation à l’échelle départementale. Celui-ci se traduit par une injonction à la rationalisation des hydro-territoires et des ressources, l’objectif étant d’aboutir à une organisation permettant d’articuler les enjeux de proximité et de prise en compte de la complexité du problème d’eau potable. On assiste ainsi, depuis une vingtaine d’années, à une remontée de l’échelle d’intervention, et à une dualisation de la gestion de l’eau : une distribution locale de l’eau potable ; une production effectuée désormais à une échelle supra. Néanmoins, ces reconfigurations s’effectuent dans le cadre de la gouvernance départementale, au gré des coordonnées du problème territorial de l’eau, et des jeux d’acteurs. On assiste donc à des recompositions contingentes de la gestion de l’eau, se traduisant par des trajectoires singulières aboutissant à l’émergence d’arrangements territoriaux différenciés. Tandis que dans certains départements, les acteurs institutionnels optent pour une réorganisation fondée sur un modèle fédéral, dans d’autres, c’est davantage le clivage ou le maintien d’une gestion atomisée qui l’emportent. » (Caillaud K. et al., 2016)³⁵

« De par leur dimension historique et leurs caractéristiques sociotechniques (dont une fonction relationnelle établie entre ressources, territoires, services et populations), les infrastructures d’eau potable apparaissent aussi comme des révélateurs des interdépendances auxquelles sont confrontés les services publics. Ces interdépendances – entendues comme des relations mutuelles entre les éléments constitutifs du système d’eau potable produisant des effets de réciprocité – se nichent au sein et à la croisée de différentes dimensions liées au fonctionnement des services publics et impliquant la question infrastructurelle : l’environnement, l’appareillage technique, l’organisation politico-administrative, l’aménagement territorial, la demande et les usages de l’eau, etc. Elles mettent en scène une confrontation des registres de représentation et d’action sur le système d’eau, et les interactions qui en découlent. Ces relations d’interdépendance se traduisent par des boucles de rétroaction ayant



© Adobe Stock

pour conséquence d’agir sur le positionnement des acteurs, et pour résultat de recomposer les enjeux, les rapports de force et les actions. L’enfermement des acteurs dans une approche segmentée des problèmes empêche ainsi d’appréhender le secteur dans sa globalité et d’anticiper l’imbrication des différents éléments problématiques. » (Caillaud K., 2022)³⁶

Les crises (d’origines naturelle, climatique, chimique, pathogène, économique, cyber, sociétale...), prévues ou imprévues, exceptionnelles ou chroniques, à cinétique lente ou rapide, génèrent des incertitudes scientifiques, techniques, organisationnelles et politiques importantes. Ces incertitudes posent des questions cruciales en termes de préparation, de veille et de détection, de besoins en outils de modélisation, d’anticipation des effets en cascade, d’intervention des secours, d’aide à la décision et de gestion post-crise.

33 : Euzen. A : L’eau à la maison - Approche anthropologique des usages de l’eau du robinet dans l’espace domestique à Paris, ouvrage 2010.

34 : Nombre de services d’eau (potable et assainissement) : 13^e rapport de 2021 produit par l’OFB : <https://www.ofb.gouv.fr/actualites/publication-du-13eme-rapport-national-de-lobservatoire-des-services-publics-deau-et>

35 : Caillaud K., Barbier R., Roussary A., Renaud E., Canneva G., Salles D., Ghiotti S., Large A., Werey C., 2016 : Les nouveaux arrangements territoriaux de la gestion de l’eau potable, LATTS - Laboratoire Techniques, Territoires et Sociétés, UMR GESTE - Gestion Territoriale de l’Eau et de l’Environnement.

36 : Caillaud K. : Vers une gouvernance territoriale de l’environnement ? Analyse comparée des politiques départementales de gestion de l’eau destinée à la consommation humaine et des déchets municipaux, thèse 2013 : <https://theses.hal.science/tel-00990135v1>, et Les boucles de rétroaction au sein des interdépendances. Le cas des infrastructures d’eau potable, Flux - Cahiers scientifiques internationaux Réseaux et territoires, 2022, 2 (128), pp. 15-31 : [10.3917/flux1.128.0015 hal-03692239](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03692239)

2

Caractérisation et anticipation des risques ● d'inondations

.17

2.1 Comment estimer les risques de submersions marines ?

.18

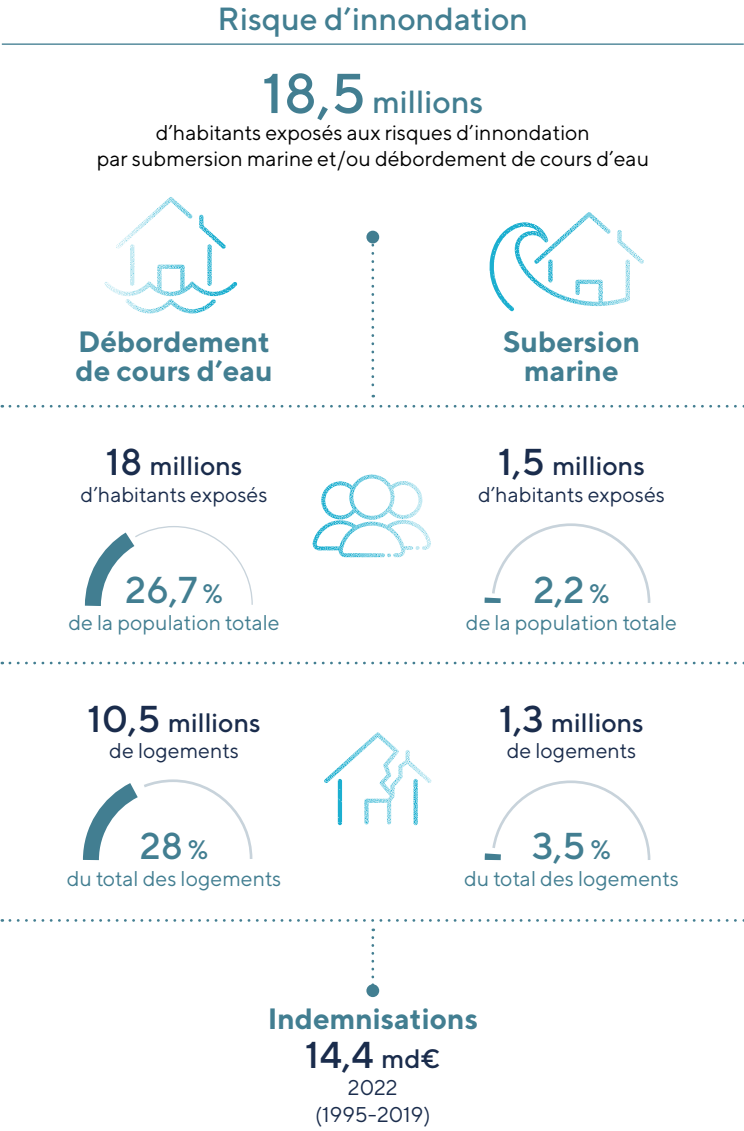
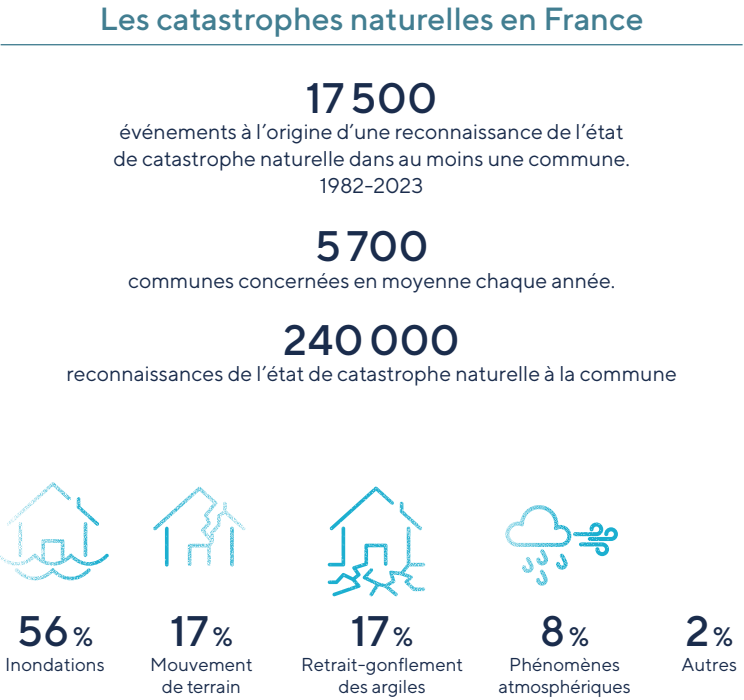
2.2 Comment peut-on anticiper, prévenir les crues soudaines ?

Initié en 2018 et achevé en juin 2023, le projet UrbaRiskLab (URL), porté par une centaine de chercheur·e·s majoritairement de l’Université Gustave Eiffel, abordait de façon pluridisciplinaire la thématique risque / crise en milieu urbain.

Dans le cadre de ce projet, les risques naturels, tels que les inondations et les submersions marines, ont fait l’objet de plusieurs projets de recherche menés par les chercheur·e·s de l’université.

Les **inondations et les submersions marines** sont les risques naturels qui sont les plus coûteux (avec le retrait-gonflement des argiles). Phénomène saisonnier, qui trouve souvent sa source dans des précipitations importantes, l’inondation peut aussi venir de la mer ou des eaux souterraines. Ce risque naturel peut être fortement accentué par les activités humaines et les aménagements³⁷.

- Les inondations peuvent être d’origines diverses :
- Le **débordement de cours d’eau** lors d’une crue provoque des inondations qui apparaissent en quelques jours, voire en quelques heures, et peuvent durer de moins d’une journée à plusieurs semaines. Les zones touchées se situent dans la vallée de la rivière ou du fleuve, que l’on appelle le lit majeur.
 - Les **crues soudaines et inondations par ruissellement** se produisent dans les territoires touchés par des pluies intenses et/ou des secteurs où l’infiltration de l’eau dans le sol est réduite du fait de l’artificialisation des sols : imperméabilisation et battance agricole, notamment. Ce phénomène est fréquent en région méditerranéenne, mais concerne potentiellement l’ensemble du territoire.
 - Les **remontées de nappes** se produisent plutôt en hiver ou au printemps, lorsque le niveau des eaux souterraines est au plus haut, et peuvent également provoquer des inondations.
 - Les **submersions marines** sont une forme d’inondation qui affecte le littoral lorsque le niveau de la mer et/ou l’importance des vagues provoquent l’entrée d’eau de mer à l’intérieur des terres. Elles ont généralement lieu lors de tempêtes combinées aux grandes marées.



37 : Eau France : Les impact des inondations et des submersions marines : <https://www.eaufrance.fr/les-impacts-des-inondations-et-des-submersions-marines>, <https://www.mer.gouv.fr/adaptation-des-territoires-aux-evolutions-du-littoral>

38 : Data Lab : Chiffres clés des risques naturels édition 2023, ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-risques-naturels-2023/>

Ces différents types d’inondations ne sont pas indépendants les uns des autres. Plusieurs inondations peuvent survenir simultanément dans une même zone, et aggraver leurs impacts. Par exemple, lors d’un même épisode pluvieux, certaines villes sont parfois touchées à la fois par des inondations par ruissellement et par débordement de cours d’eau. De plus, les crues de plusieurs petits cours d’eau en amont d’un même bassin versant peuvent provoquer une crue de la rivière principale plus en aval, quelques heures ou quelques jours plus tard.

En France, selon le dernier recueil de chiffres clés sur les risques naturels (édition 2023/janvier 2024), produit par le Service des données et études statistiques (SDES), en collaboration avec l’observatoire national des risques naturels sous la tutelle du ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires, **18,5 millions** d’habitants sont exposés aux risques d’inondation par débordement de cours d’eau et/ou par submersion marine. Alors, comment prévenir et limiter au mieux ces risques ? C’est tout l’enjeu des travaux menés par les chercheur·e·s de l’université : estimer et prévoir pour pouvoir agir, et ainsi limiter les risques.



2.1

Comment estimer les risques de submersions marines ?

Le littoral français en chiffres

Données du Secrétariat d’état chargé de la Mer et de la Biodiversité, février 2024³⁹



+60 à 110cm

d’ici 2100 si on suit la tendance actuelle (GIEC)



20 000km

de littoral français, dont 22% des zones côtières soumises à un phénomène d’érosion. Aucune région côtière française n’est épargnée par le phénomène du recul du trait de côté



650km

de littoral en recul, dont 270km à une vitesse moyenne de 50cm par an



17%

des côtes artificialisées en France métropolitaine et 12% dans les régions et territoires d’outre-mer



2,5fois

plus élevée que la moyenne nationale, avec une tendance d’évolution prévue à la hausse

Les littoraux sont sujets à de multiples évolutions : changement climatique, croissance démographique, gestion inappropriée des sols, utilisations non durables des ressources naturelles, écosystèmes en déclin, etc. Les inondations côtières provoquées par les submersions marines ou par un drainage insuffisant des eaux continentales vers la mer constituent en général le principal aléa. Les multiples évolutions et la recrudescence de cet aléa sur quelques décennies posent la question de l’adaptation des systèmes d’endiguement. Le Lab’URBA a constaté qu’il existe un déphasage entre résilience socio-écologique et résilience technique. En effet, « les spécialistes des systèmes d’endiguement appliquent le concept de résilience au système de protection avec pour principal objectif le maintien à court et moyen terme de ses performances, tandis que les spécialistes de l’aménagement appliquent le concept de résilience au territoire avec pour objectif son développement durable, mais sans une juste appréciation des performances du système de protection et des risques associés à son utilisation. » Face à ce constat, des travaux de recherche ont été entrepris pour établir un cadre méthodologique de nature à renforcer la résilience des systèmes de protection. (Igigabel M., thèse 2022)⁴⁰

L’aléa naturel submersion marine constitue notamment un enjeu de sûreté stratégique pour l’Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN)⁴¹ dans sa protection des centrales nucléaires. Pour répondre à cet enjeu, le laboratoire GERS-EE a mené des travaux méthodologiques statistiques sur l’intégration des informations régionales et historiques pour l’estimation des niveaux marins extrêmes dans le cadre d’une thèse de doctorat co-encadrée avec l’IRSN et l’Institut national de la

recherche scientifique au Canada (Saint Cricq L., thèse 2022)⁴². La méthode d’estimation proposée est particulièrement innovante dans la mesure où elle permet de combiner des informations différentes (surcotes⁴³ de pleine mer pour la période récente et aussi pour des records de niveau de mer historiques), afin de les traiter simultanément dans des analyses statistiques. Cette méthode facilite la prise en compte des niveaux de mer records, retrouvés dans les archives et des données enregistrées par les marégraphes. En intégrant toutes les sources d’informations disponibles, elle permet une estimation la plus précise possible du risque. Elle corrige également les biais importants de certaines approches proposées antérieurement.⁴⁴

39 : Ministère chargé de la Mer et de la Pêche, *Adaptation des territoires aux évolutions du littoral* : <https://www.mer.gouv.fr/adaptation-des-territoires-aux-evolutions-du-littoral>

40 : Igigabel M. : *Adaptation des systèmes de protection contre les inondations côtières : apports conceptuels et recherche de développements méthodologiques dans les contextes du changement climatique et de l’aménagement des territoires*, thèse de doctorat en Génie Urbain, Lab’URBA, 2022 : <https://theses.fr/2022UEFL2045>

41 : L’Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire : *Mieux estimer le risque d’inondation côtière pour les sites nucléaires* : <https://www.irsn.fr/actualites/mieux-estimer-risque-dinondation-cotiere-pour-sites-nucleaires>

42 : Saint Cricq L. : *Mieux évaluer les niveaux marins extrêmes par une analyse régionale et historique des marées et des surcotes de pleine mer*, thèse 2022, Université Gustave Eiffel, en co-tutelle avec l’Institut national de la recherche scientifique (Québec, Province) : <https://theses.fr/2022UEFL2080>

43 : Différence entre la hauteur de pleine mer observée et la hauteur de pleine mer prédite.

44 : Maquette pédagogique submersions rapides et protections associées : <https://clap.univ-eiffel.fr/videos/le-demonstrateur-submersions-rapides-et-protections-associees/>

2.2

Comment peut-on anticiper, prévenir les crues soudaines ?

La France compte 120 000 kilomètres de cours d’eau de plus d’un mètre de large, dont seulement 23 000 kilomètres sont actuellement couverts par le dispositif de surveillance et de prévision Vigicrues.

Les crues-éclair des petits cours d’eau, hors du réseau Vigicrues, sont pourtant responsables chaque année de décès et d’importants dégâts matériels. En France, ce type d’événements concerne principalement les petits cours d’eau de l’arc méditerranéen, mais peut être observé (de façon moins fréquente) partout sur le territoire.

Compte tenu du grand nombre de petits cours d’eau pouvant causer des inondations, il est essentiel de pouvoir en prévoir les crues pour en atténuer les impacts, qui représentent des coûts importants.

Olivier Payrastré⁴⁵ souligne en effet que *« le risque d’inondation lié aux petits cours d’eau ne doit surtout pas être négligé : il pèse déjà très lourd aujourd’hui et pourrait bien s’accroître à l’avenir avec la hausse des phénomènes de pluies intenses. Une meilleure anticipation de ces crues constitue une mesure d’adaptation essentielle, qui permettra de gérer efficacement les crises liées aux crues soudaines. Il faut faire l’effort de développer très largement, puis d’utiliser ces prévisions. Une bonne utilisation des prévisions passera par la prise en compte des incertitudes, et par l’intégration de ces incertitudes dans les processus de décision. »*

L’Université Gustave Eiffel dispose d’une expertise reconnue dans le champ de l’anticipation et la caractérisation des risques liés aux crues rapides, qui lui permet notamment d’accompagner la direction générale de la Prévention des Risques du MTECT dans la mise en œuvre de ses projets en lien avec ce risque.

Pour parvenir à une meilleure anticipation de ces crues, plusieurs techniques sont déployées et font partie des mesures d’adaptation actuellement jugées les plus prioritaires aux niveaux national et international.

⁴⁵ : Olivier Payrastré, chercheur et directeur adjoint du laboratoire Eau Environnement du Département GERS (GERS-EE) de l’Université Gustave Eiffel, interview mars 2024.

« Exploiter des vidéos amateurs pour mesurer les débits des crues exceptionnelles, liées aux tempêtes tropicales à Madagascar. »

ÉRIC GAUME , GERS

2.2.1

Des méthodes d’analyse automatique de séquences vidéo de crues

Le développement de prévisions passe en premier lieu par l’amélioration des capacités d’observation, sur des cours d’eau peu instrumentés.

Le **projet MADATLAS** (2022-2028) dépend du programme « Partenariats Académiques Afrique – France », financé par l’Agence Française de Développement, impliquant l’Université de Fianarantsoa à Madagascar, et l’Université Gustave Eiffel. Éric Gaume⁴⁶ présente ce projet : *« Il vise à exploiter des vidéos amateurs pour mesurer les débits des crues exceptionnelles, liées aux tempêtes tropicales à Madagascar. Son objectif est de structurer une filière de formation professionnalisante, dispensée de la licence au doctorat, centrée sur la cartographie numérique, la géomatique et l’aménagement durable. Dans le cadre de ce projet, une thèse de doctorat est consacrée à l’évaluation de méthodes d’analyse automatique de séquences vidéo de crues, afin d’estimer les vitesses d’écoulement de l’eau et les débits des cours d’eau en crue. Cette thèse vise à préparer le terrain à une généralisation de l’exploitation de vidéos prises par des témoins oculaires, de plus en plus nombreuses du fait de la généralisation de l’usage des smartphones, pour documenter les crues exceptionnelles pour lesquelles les mesures directes sont souvent très peu*

nombreuses, voire inexistantes en Afrique. L’enjeu est de limiter le recours coûteux à des mesures topographiques fines de terrains, aujourd’hui nécessaires pour pouvoir traiter les séquences vidéo, afin de corriger les effets de distorsion et de perspective liés à la prise de vue et de donner une échelle aux vidéos. Il s’agit notamment d’estimer la perte d’informations, les incertitudes et les biais introduits, si les repères topographiques levés in situ sont remplacés par des repères extraits de bases de données géographiques : Google Maps, modèles numériques de terrain, LiDAR... »

⁴⁶ : Éric Gaume, directeur du département Géotechnique Environnement Risques Naturels et Sciences de la Terre (GERS) de l’Université Gustave Eiffel, interview mai 2024.

2.2.2
Des méthodes de cartographie automatisée des zones inondables adaptées aux petits cours d’eau

Une étape essentielle dans la gestion des risques d’inondation consiste à produire des cartes d’aléas représentant l’étendue des zones inondables. À l’heure actuelle, ces cartographies sont très peu développées pour les petits cours d’eau, en raison des coûts importants de leur mise en œuvre. L’utilisation de méthodes de cartographie automatisée des zones inondables peut donc être d’une grande aide pour l’identification en amont des zones exposées et des impacts potentiels de ce type de crues.

L’existence de ces cartes est en effet un point clé de l’appropriation du risque. En 2021, le Laboratoire Techniques Territoires et Sociétés de l’université (LATTS) a mené une analyse sociotechnique des outils cartographiques au sein de deux métropoles françaises : Nantes et Le Havre. Ces travaux ont étudié le contexte de production et les usages de ces cartes.

Ces dernières sont au cœur de la gestion des risques collectifs, qu’ils soient dits « naturels » ou anthropiques. Objectiver et visualiser un aléa, sensibiliser un public concerné, réglementer l’urbanisme, ou encore planifier et coordonner la gestion de crise constituent de réels enjeux pour les territoires. Différents acteurs interviennent dans la prévention et la gestion des risques à l’échelon régional, départemental, intercommunal et communal. Des outils cartographiques sont produits par ces différents acteurs dans un objectif bien déterminé. Chaque carte a ses usages, ses objectifs qui rendent leurs circulations difficiles et contraignent leurs usages.

Ce que démontre cette étude, c’est que la circulation de ces cartes entre les différents acteurs n’est pas aisée. Il est primordial qu’elle soit accompagnée d’une explication systématique des contextes et objectifs de production. « Des échanges plus fréquents entre les différents producteurs de données cartographiques permettraient d’aboutir à un réel climat de confiance permettant la discussion de ces cartes et de leurs usages actuels et potentiels. » (Rey-Thibault C., 2021)⁴⁷

La circulation de ces cartes entre les différents acteurs n’est pas aisée. Il est primordial qu’elle soit accompagnée d’une explication systématique des contextes et objectifs de production.

Dans la zone méditerranéenne, le **projet PICS** (Prévision Immédiate intégrée des impacts des Crues Soudaines), **coordonné entre 2018 et 2022** par le GERS-EE, a permis d’automatiser et de tester trois approches de cartographie des zones inondées, adaptées aux petits cours d’eau, et d’un degré de complexité croissant : une méthode simple, dite de « remplissage de MNT (modèles numériques de terrain) » (HAND/MS), et deux modèles hydrodynamiques 1D et 2D (caRtino 1Dimension, et Floodos 2Dimensions).

Outre leur degré important d’automatisation, ces deux modèles hydrodynamiques 1D et 2D sont très performants en temps de calcul et permettent de cartographier rapidement les zones inondables sur des milliers de kilomètres de cours d’eau, à une résolution très fine (5 m).

Ces deux modèles hydrodynamiques 1D et 2D ont permis d’identifier certaines limites de l’approche HAND/MS, dont le niveau de simplification peut être à l’origine d’erreurs importantes.

La plus-value de l’approche hydrodynamique 2D (Floodos) a également été mise en évidence, notamment dans les situations de plaines inondables très larges.

Les principales sources d’erreur subsistantes, comme la qualité des informations topographiques et/ou la connaissance des débits, ont été identifiées, et leur poids relatif a pu être évalué.

Ces évaluations ont finalement confirmé la possibilité de cartographier les inondations de façon automatisée sur les petits cours d’eau, avec des niveaux d’erreurs acceptables et des vitesses de

calcul adaptées à la couverture de grands domaines géographiques.

Un premier catalogue de scénarios d’inondations couvrant plus de 20 000 km de cours d’eau sur l’arc méditerranéen a pu être produit à partir des méthodes testées.

« On peut retenir que grâce aux MNT LiDAR, il est désormais possible de fournir des cartographies de zones inondables d’une précision raisonnable, au moins pour les événements extrêmes, à partir d’informations d’entrée très limitées et qui sont disponibles sur l’ensemble des cours d’eau. Par ailleurs, le fait de pouvoir largement automatiser les méthodes de calcul ouvre la voie à la production de cartographies sur des linéaires de cours d’eau très importants à des coûts raisonnables. » (Hocini N., 2022)⁴⁸

47 : Rey-Thibault C. : *Les cartographies des risques entre prévention, préparation et gestion de crise. Cartes et géomatiques* (revue du CFC), 2021 : hal-03573356

48 : Hocini N. : *Évaluation de méthodes automatisées de cartographie des zones inondables adaptées à la prévision des crues soudaines*, Hydrologie, Nantes Université, 2022, français : [NNT : 2022NANU4015](mailto:NNT:2022NANU4015) tel-04158913

Payraastre O. : *chercheur et directeur adjoint du laboratoire Eau Environnement du Département GERS (GERS-EE) de l’Université Gustave Eiffel*, interview mars 2024

2.2.3
Des chaînes de modèles dédiés
à la prévision des crues soudaines
des petits cours d’eau

En complément des recherches sur la cartographie des zones inondées, les **projets PICS** et **MUFFINS** (2022 – en cours) menés par le GERS-EE ont développé aussi des chaînes de prévisions des crues soudaines capables de mieux anticiper ces crues, mais aussi les inondations et les impacts associés.

Ces **nouvelles chaînes de modélisation numérique** (enchaînement de plusieurs modèles), mises en place, ont mobilisé les dernières avancées de la recherche dans des domaines variés tels que :

- la prévision des précipitations intenses à courte échéance (0-6 h, ou prévision immédiate) et la représentation des incertitudes de cette prévision ;
- la prévision des débits de crue sur des petits cours d’eau non instrumentés (ou non jaugés) à partir de modèles hydrologiques pluie-débit ;

- la modélisation hydraulique « automatisée » pour fournir des scénarios d’inondation suffisamment précis pour un grand nombre de petits cours d’eau ;
- et enfin, l’évaluation des impacts dans les zones inondées à partir de la connaissance a priori de l’exposition des biens et des infrastructures.

La combinaison de ces méthodes permet d’identifier et de localiser quelques heures à l’avance les cours d’eau (et donc les communes) qui risquent d’être les plus impactés par un épisode de pluies intenses en cours de formation.

En résumé, le **projet PICS** a permis d’établir et d’appliquer le couplage des différents modèles numériques impliqués dans ces chaînes de prévision,

La combinaison de ces méthodes permet
d’identifier et de localiser quelques heures
à l’avance les cours d’eau [...] qui risquent
d’être les plus impactés.

.....

d’évaluer la qualité des informations obtenues et de décrire leurs incertitudes, et de commencer à évaluer l’utilité des informations obtenues pour les utilisateurs. Ces résultats ont été partagés et analysés avec un groupe d’utilisateurs associant une vingtaine de professionnels impliqués dans la gestion du risque inondation (services de prévision des crues, collectivités territoriales, services de secours, assureurs, gestionnaires d’infrastructures...).

Ces résultats sont désormais réutilisés et réutilisables par les professionnels pour répondre à plusieurs problématiques : amélioration des services grand public d’avertissement sur les phénomènes de crues soudaines, comme le service Vigicrues Flash du MTECT ; développement de systèmes de prévision spécifiques pour répondre aux problématiques particulières de certaines collectivités territoriales et/ou gestionnaires d’infrastructures ; amélioration de la capacité des sociétés d’assurance et de réassurance à évaluer efficacement la sinistralité et à agir rapidement suite à chaque événement.

L’université apporte également plusieurs autres contributions dans le cadre du **projet MUFFINS**. Ce dernier permet, par exemple, de tester une chaîne de prévision intégrant les progrès réalisés dans le **projet PICS**, à une échelle spatiale et temporelle dépassant largement ce qui avait été produit jusqu’ici : dix ans de données en continu, et une couverture de l’Arc méditerranéen complet, soit plus de 20 000 km de cours d’eau couverts.

Cette évaluation nécessite de mobiliser des jeux de données originaux (demandes de reconnaissance catastrophes naturelles des communes, sinistralité d’assurance, interventions de secours des SDIS⁴⁹, coupures des réseaux routiers par inondation) pour savoir si la chaîne de prévision est capable de représenter de façon fiable et robuste les impacts des crues. (Godet J., 2022)⁵⁰

Une deuxième contribution associée au **projet MUFFINS** va s’intéresser à la prévision des phénomènes d’inondation localisés liés au ruissellement direct de la pluie dans les zones urbaines (phénomène de très petite échelle). Ce second objectif nécessite de modifier en profondeur les chaînes de prévision développées dans le **projet PICS**, car l’inondation par ruissellement est un phénomène plus complexe (influencé par de nombreux paramètres) et plus difficile à prévoir que le débordement de cours d’eau. (Kowlesser A., thèse en cours)⁵¹

Enfin, des travaux pour tester des chaînes de prévision, dites « multi-échelles » (avec une application sur le bassin de l’Huveaune), destinées à représenter à la fois les débordements de petits cours d’eau et ceux des cours d’eau principaux, et à limiter les incertitudes dans les secteurs à plus forts enjeux, sont prévus.

Ce travail comportera un dialogue avec des utilisateurs des prévisions pour évaluer l’utilité des nouvelles approches développées.

© Adobe Stock



49 : Service Départemental d’Incendie et de Secours.
50 : Godet J. : *Évaluation de l’apport des prévisions d’ensemble PIAF dans la chaîne Vigicrues Flash*. Sciences de l’ingénieur [physics], 2022 : [dumas-04037819](https://theses.fr/s394933?domaine=theses)
51 : Kowlesser A. : doctorant au GERS-EE, thèse en cours : <https://theses.fr/s394933?domaine=theses>

2.2.4 Des méthodes de prévision des pluies intenses à courte échéance

L’anticipation des pluies constitue le premier maillon des chaînes de prévision développées dans les **projets PICS** et **MUFFINS**. Grâce à une étroite collaboration avec le CNRM de Météo-France⁵², plusieurs nouveaux produits de prévisions de pluie à courte échéance (0-6 h) ont pu être utilisés et évalués.

Ces prévisions concernent les six heures à venir, et sont réactualisées très fréquemment (au minimum toutes les heures). Les produits testés sont expérimentaux et ont été fournis par le CNRM. Il s’agit de produits ensemblistes, c’est-à-dire qu’ils ne fournissent pas un scénario unique, mais plusieurs scénarios possibles, de façon à représenter les incertitudes (prévision probabiliste).

Ces prévisions sont a priori très intéressantes pour anticiper les crues soudaines sur les petits cours d’eau, et le travail conduit a permis de le confirmer. Une méthode d’évaluation a, dans un premier temps, été développée et appliquée pour illustrer comment ces prévisions de pluie améliorent l’anticipation du franchissement de seuils de débits pour chaque événement observé. (Charpentier-Noyer M., 2022)⁵³ et (Godet J., thèse en cours)⁵⁴

2.2.5 Le développement de prévisions basées sur les impacts

Les recherches au sein du GERS-EE ont ensuite permis de développer et de tester une méthode d’évaluation directe des impacts des crues soudaines à partir des sorties d’un modèle pluie-débit sur un grand territoire. Un travail préalable d’analyse du territoire permet d’une part d’évaluer les emprises submergées dans une large gamme de débits par une approche hydraulique automatisée (cf. travaux de Hocini N., 2022), puis de construire des relations univoques débit-enjeux pour chaque tronçon de cours d’eau.

Ces relations permettent ensuite de produire, à partir des prévisions de débits émises sur chaque tronçon de cours d’eau, des cartes d’enjeux, pouvant être actualisées régulièrement en cours d’événement. L’application de cette approche sur plusieurs crues soudaines marquantes des vingt dernières années a permis de confirmer que la hiérarchie des impacts occasionnés à l’échelle d’un grand territoire est correctement représentée, malgré les hypothèses et simplifications importantes introduites dans la modélisation. (Le Bihan G., 2016)⁵⁵

2.2.6 Évaluation de l’intérêt des prévisions pour les utilisateurs

Une fois que les chaînes de prévision ont été conçues et appliquées, un travail d’évaluation est essentiel pour vérifier la plus-value des prévisions auprès des utilisateurs.

Dans un premier temps, un jeu de rôle simulant la gestion de crise inondation pour tester de nouveaux produits de prévision probabilistes a été développé. Ce jeu sérieux a été conçu par les partenaires du **projet PICS** pour interagir directement avec des professionnels. Il a été conçu pour intégrer une situation liée à un phénomène de crue-éclair (situation inspirée d’un événement réel), et pour

mettre à disposition des joueurs les prévisions de débits, d’inondation et d’impacts générées dans le cadre du projet.

Ce jeu permet de faciliter les interactions et la participation, ainsi que l’appropriation des enjeux de la gestion de crise et des outils de prévision probabilistes. Il met en évidence la complexité de la prise de décision collective dans un contexte d’incertitude et d’urgence.

Il a eu un double intérêt : permettre de conforter les chercheur.e.s sur le caractère exploitable des prévisions issues de leurs chaînes de modélisation (information complexe, mais néanmoins compréhensible), et initier des utilisateurs potentiels à l’utilisation de prévisions à caractère probabiliste, qui nécessitent d’accepter de prendre des décisions en situation d’incertitude.

Puis, dans un second temps, une modélisation, dite « multi-agents », a été mise en œuvre pour évaluer si un service de secours aurait intérêt à utiliser les prévisions pour prendre des décisions d’intervention de ses équipes sur le terrain. La réponse à cette question n’est pas évidente, car les prévisions peuvent permettre, d’un côté, d’intervenir plus tôt et donc de façon plus efficace, mais comme ces prévisions sont incertaines, elles peuvent aussi conduire à de mauvaises décisions (envoi d’équipes au mauvais endroit). Par ailleurs, les équipes de secours sont quelques dizaines sur un département, pour un nombre de points d’intervention potentiels (tronçons de cours d’eau) qui dépasse le millier. Une approche prudente peut donc consister à attendre que la crue soit développée pour savoir où intervenir, quitte à perdre un peu de temps. Le cadre de modélisation mis en place (modélisation multi-agents) permet de représenter les déplacements de chaque équipe de secours sur le terrain, et donc de comparer ce qui se produit si les équipes sont envoyées en intervention dès qu’une prévision détecte un débordement à venir quelque part sur le territoire.

La conclusion sur l’étude de cas menée (crues de l’Aude en 2018) est qu’il y a un gain systématique avec l’utilisation des prévisions à courte échéance, mais que ce gain diminue lorsque les moyens de secours sont très limités par rapport à l’ampleur de l’événement à couvrir (situation de crise).

Olivier Payraastre complète : « *Progresser dans l’anticipation des phénomènes de crues soudaines (ou crues-éclair) sur les petits cours d’eau est en effet capital. Les crues soudaines représentent une part très significative des dégâts causés par les inondations en France, et s’avèrent également très meurtrières. Elles sont très difficiles à prévoir en raison de la formation et de l’évolution très rapide des phénomènes de pluies intenses qui les génèrent. L’effet de surprise empêche souvent de prendre des mesures de protection et de secours efficaces.* »⁵⁶

Les milieux aquatiques font l’objet de multiples pressions liées aux activités humaines, agricoles, industrielles et domestiques. En 2022, 43,6 % (contre 41,4 % en 2010) des masses d’eau superficielle françaises affichaient un bon ou très bon état écologique. 67,9 % des masses d’eau superficielle et souterraine présentaient un bon état chimique (contre 51,2 % et 58,9 % en 2010). Même si la situation s’améliore, la pollution des eaux de surface et souterraine induit d’importants coûts de prévention, de protection et de restauration pour assurer la pérennité des usages et en premier lieu, la production d’eau destinée à la consommation humaine.⁵⁷ La troisième partie de ce document vise à présenter les recherches sur les différents types de pollution.

52 : Centre National de Recherches Météorologiques, unité mixte de recherche de Météo-France et du CNRS.

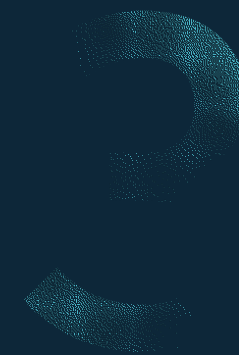
53 : Charpentier-Noyer M. : *Évaluation de prévisions hydrométéorologiques d’ensemble des crues soudaines à partir de données sur les impacts*, Sciences de la Terre, Nantes Université, 2022, français : **NNT : 2022NANU4093 tel-04341104**

54 : Godet J. : thèse en cours (2022), Université Gustave Eiffel : *Évaluation d’une chaîne de prévision immédiate des impacts des crues soudaines à l’échelle de l’Arc méditerranéen français*.

55 : Le Bihan G. : *Modèles hydrologiques régionaux pour la prévision distribuée des crues rapides : vers une estimation des impacts et des dommages potentiels*, Milieux fluides et réactifs, École centrale de Nantes, 2016, français : **NNT : 2016ECDN0011 tel-02193701v2**

56 : Olivier Payraastre, chercheur et directeur adjoint du laboratoire Eau Environnement du Département GERS (GERS-EE) de l’Université Gustave Eiffel, interview mars 2024.

57 : Ministères Aménagement du territoire Transition écologique : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/la-pollution-des-eaux-superficielles-et-souterraines-en-france-synthese-des-connaissances-en-2023?rubrique=&dossier=1028186>



Pollution des eaux : vers une meilleure quantification

.24

3.1 Eaux et macrodéchets

.26

3.2 Eaux et microplastiques

.28

3.3 Pollution des eaux
par les particules de pneus

.30

3.4 Pollution par les polluants métalliques
et par les nanoparticules

.32

3.5 Pollution par les polluants persistants
fluorés (PFAS) ou polluants éternels

.33

3.6 Pollution par les résidus médicamenteux

.33

3.7 Pollution par les micro-organismes
biologiques

Les eaux sont polluées par une large gamme de macropolluants et micropolluants.

L’Université Gustave Eiffel a la particularité de s’intéresser à la pollution des eaux. Cette dernière résulte à la fois des déchets, dont les déchets plastiques, et des micropolluants métalliques et organiques, émis par les activités anthropiques, notamment les activités de transport.

3.1

Eaux et macrodéchets

Peu de données existent sur les densités et la typologie des macrodéchets présents dans les centres urbains, ainsi que sur leur transfert *via* les eaux pluviales. Une diminution de leurs flux vers les milieux récepteurs passe pourtant par une meilleure connaissance de ces intrants.

C’est tout l’enjeu de l’étude menée à Nantes par nos chercheur·e·s dans le cadre du **projet STRITTER** (2022-2023), qui s’est achevé en janvier 2024, et dont les résultats très complets ont été publiés ou sont en cours de publication.

« Les objectifs de cette étude étaient de quantifier les densités de déchets abandonnés (> 1 cm) sur deux bassins versants de l’agglomération nantaise (surface totale 1,05 km²) et d’estimer leur taux de fuite lié au ruissellement des eaux pluviales. En un an, des comptages visuels ont permis de compter **230 565 déchets** sur les surfaces urbaines de ces deux bassins. En parallèle, des ramassages ont permis de collecter et caractériser **12 330 déchets** (**≈ 51 kg**) sur certaines sections de voirie et **13 645 déchets** (**≈ 28 kg**) à l’exutoire des eaux pluviales. Les résultats démontrent qu’environ **14 tonnes de déchets sont abandonnées** par an sur les sites

étudiés, soulignant les stocks importants constitués dans les centres urbains. Les zones de passage et consommation importantes (grands axes routiers, arrêts de tram/bus, fast-foods...) constituent souvent des hotspots, tout comme les zones végétalisées. La variabilité temporelle des densités suggère des apports constants, une influence certaine du travail des services de nettoyage et un rôle relatif des conditions climatiques.

En raison de nombreux freins dans le parcours des eaux pluviales, le taux de fuite des déchets vers le milieu récepteur reste néanmoins faible. Il est toutefois deux fois plus élevé pour les déchets plastiques. Les plastiques sont les déchets les plus facilement transférés et à grande échelle, les flux à gérer restent conséquents. » (Ledieu L., Tramoy R., Mabilais D., Ricordel S., Mosini ML. et al., 2023)⁵⁸

Les résultats du **projet STRITTER** déployé sur une petite zone de la métropole nantaise ont ainsi alimenté un nouveau projet intitulé **VIPARE**, qui souhaite déployer ce type de suivi à l’échelle d’une agglomération. Johnny Gasperi⁵⁹ nous explique : « Le **projet VIPARE** (2023-2026) associe la Ville de Metz en partenariat avec les chercheur·e·s du GERS-EE et



© Adobe Stock

l’entreprise Naia Science⁶⁰. Son objectif est d’aider les collectivités à mesurer et quantifier l’impact de leurs actions de nettoyage (et autres investissements en termes de propreté), afin d’identifier des pistes d’amélioration de la salubrité publique. Techniquement, le projet repose sur une application mobile permettant aux opérateurs de terrain de détecter, catégoriser, traquer et compter les déchets tels que les emballages, les salissures et les mégots; un système de récupération de ces données géolocalisées et une cartographie permettant de mieux comprendre l’évolution spatio-temporelle de la densité et la typologie des déchets.

Le projet n’en est qu’à sa phase initiale, où l’application mobile est développée (...) pour répondre aux besoins à la fois des collectivités (surtout la Ville de Metz, mais en ayant d’autres villes en perspective) et de la communauté scientifique. La façon de répondre à ces besoins est de créer a minima un modèle d’IA fiable pour quantifier, mais aussi caractériser rapidement les déchets au sol sur de grandes surfaces urbaines, à travers une application ergonomique et frugale. Le besoin est aussi de pouvoir consulter et exploiter les résultats stockés dans une base de données structurée. Selon le

temps nécessaire pour répondre à ces besoins, d’autres perspectives d’acquisition/exploitation pourront alors être envisagées. »

Les chercheur·e·s du GERS-EE se concentrent également sur la pollution plastique dans les fleuves français et notamment sur les **berges de Seine**.

Le **projet LitterBANK** (2023-2024), financé par le GIP Seine Aval, porte à la fois sur l’accumulation de macrodéchets sur les berges de ce fleuve, et sur la production potentielle de microplastiques au sein de ces zones. Il en résulte que l’accumulation de déchets sur les berges est multifactorielle et peut varier fortement à de petites échelles spatiales.

De nombreuses zones d’accumulation sont ainsi recensées en estuaire de Seine et sur ses berges.

58 : Ledieu L., Tramoy R., Mabilais D., Ricordel S., Mosini ML., et al. : *Macrodéchets abandonnés sur les surfaces urbaines : densités, variabilité et transfert par le ruissellement*. GDRPO2023 : Quatrième rencontre du GDR Polymères et Océans 2023, CNRS, juin 2023, Rennes, France : [hal-04106546](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04106546)

59 : Johnny Gasperi, docteur en Sciences et Techniques de l’Environnement, chercheur au Laboratoire Eau Environnement du Département GERS (GERS-EE) de l’Université Gustave Eiffel, interview mars 2024.

60 : <https://www.naia-science.com/>

Les résultats démontrent que la typologie de la berge, ainsi que le couvert végétal, semblent jouer un rôle important dans l’accumulation de macrodéchets.

Les chercheur·e·s de l’Université Gustave Eiffel ont émis l’hypothèse selon laquelle les macroplastiques (plastiques de taille supérieure à 5 mm), piégés au sein des zones d’accumulation, vont se fragmenter en microplastiques (plastiques de moins de 5 mm) sous l’action notamment des UV.

L’imprégnation des berges de Seine est évaluée par une analyse des concentrations en microplastiques, de leur composition et de leur taille dans des échantillons de vase, de sol et de sable.

Des échantillons ont ainsi été prélevés, soit au niveau de l’accumulation des macroplastiques, soit en dehors, pour confirmer/infirmar les interprétations. À noter aussi que les zones choisies ont des dynamiques d’accumulation et de remobilisation différentes (sites « dynamiques » / « puits »), et des différences dans les concentrations observées en fonction de cette caractéristique pourraient aussi être attendues.

Au regard des premiers résultats de ces recherches, cette hypothèse tend effectivement à se confirmer avec des concentrations en microplastiques plus élevées au niveau des zones d’accumulation de macrodéchets.

En parallèle et depuis 2021, le GERS-EE poursuit des recherches pour quantifier la pollution plastique cette fois-ci en **estuaire de la Loire**. Nos chercheur·e·s s’intéressent plus particulièrement au continuum Terre-Mer : de la pollution des villes jusqu’aux estuaires et océans. « *En ville, on regarde surtout les eaux pluviales. Pour la Loire, colonne d’eau et sédiments sont considérés.* » (Gasperi J., 2024)⁶¹

Après trois ans de recherche, les résultats d’un **projet** intitulé **Plasti-nium** laissent apparaître que, comme dans de nombreux fleuves, le transfert des macrodéchets n’est pas linéaire en estuaire de Loire. Sous l’action des marées, les macro-déchets sont facilement échoués sur les berges et bien que certains puissent être remobilisés, la géomorphologie de l’estuaire avec de nombreuses zones submersibles



© Adobe Stock

et des rives souvent végétalisées tend à limiter cette remobilisation.

Ces observations sont d’autant plus marquantes pour les déchets flottants, et différentes zones d’accumulation ont été mises à jour à travers ce travail.

Ces expertises multiples dans le champ des pollutions sont mises au service des territoires, et visent à éclairer très concrètement l’action publique. À travers son **projet Plasti-nium**, le GERS-EE vise à offrir un accompagnement scientifique auprès de ces deux territoires, et à bien articuler l’acquisition des connaissances et leurs transferts vers les politiques publiques.

C’est dans cet objectif qu’une cartographie des zones d’accumulation en estuaire de Loire a été fournie à de très nombreux acteurs institutionnels ou associatifs du territoire (Agence de l’eau Loire-Bretagne, DREAL, CEREMA, Nantes Métropole, Département de Loire-Atlantique, GIP Loire, association Estuarium, Surfrider foundation...).

61 : Johnny Gasperi, docteur en Sciences et Techniques de l’Environnement, chercheur au Laboratoire Eau Environnement du Département GERS (GERS-EE) de l’Université Gustave Eiffel, interview mars 2024.

3.2

Eaux et microplastiques

À travers le **projet Sediplast** qui s’achève en janvier 2025, les chercheur·e·s du GERS-EE ont voulu comprendre les relations entre les environnements de dépôts sédimentaires (composition minéralogique, texture, temps de résidence des sédiments) et la teneur, la taille et la nature des microplastiques retrouvés dans les sédiments de la Seine, la Loire et le Rhône.

« *La granulométrie des sédiments et la quantité de matière organique contenue dans ces sédiments semblent être des facteurs de contrôle de la pollution microplastiques. Les sédiments de Seine et du Rhône semblent plus contaminés que ceux de la Loire. C’est aussi le cas pour beaucoup d’autres micropolluants.* » (Gasperi J., 2024)⁶²

«La granulométrie des sédiments et la quantité de matière organique contenue dans ces sédiments semblent être des facteurs de contrôle de la pollution microplastiques.»

.....

JOHNNY GASPERI , GERS-EE

Une « cartographie dans le temps » des différentes trajectoires des pollutions plastiques à l’échelle des bassins versants anthropisés vient d’être publiée. Les chercheur·e·s s’attendaient à une augmentation constante de la contamination des microplastiques dans les sédiments de rivière au regard de la consommation de matières plastiques de plus

en plus importante depuis 1950. Or, contre toute attente, les résultats divergent de cette hypothèse, et suggèrent que les politiques publiques européennes en matière d’eaux usées et la mise en place de la réglementation sur les eaux résiduaires urbaines et sur les rejets industriels ont exercé une influence positive sur la qualité de l’eau, et certainement aussi sur les microplastiques.

Dans le cadre de ce projet, l’étude de carottes sédimentaires constitue une recherche novatrice et différenciante. L’analyse de ces archives sédimentaires a permis de comprendre comment nos environnements sont impactés, avec quelle dynamique et comment nos politiques publiques influent sur ces dynamiques.

L’ensemble des résultats a été rassemblé sous forme de base de données et cette dernière sera ouverte et transmise à un maximum de gestionnaires. Cet outil permettra de mettre en perspective des résultats que les gestionnaires pourraient obtenir sur cette pollution au regard du type de sédiment considéré.

Des recherches sont également menées sur **la pollution par les microplastiques (MP) dans les eaux destinées à la consommation humaine**.

Des travaux ont été menés conjointement par le LEESU et le GERS-EE en partenariat avec Veolia Eau (Paris) et le Syndicat des Eaux Île-de-France afin d’évaluer la présence de ces microplastiques dans les réseaux d’eau potable en région parisienne.

Une étude a évalué la contamination par les MP de l’eau de rivière, ainsi que de l’eau potable dans trois usines de production de la région parisienne. (Thibert S., Barbier JS., Dris R., Tassin B., Gasperi J., et al., 2023)⁶³

62 : Johnny Gasperi, docteur en Sciences et Techniques de l’Environnement, chercheur au Laboratoire Eau Environnement du Département GERS (GERS-EE) de l’Université Gustave Eiffel, interview mars 2024.

Les diverses analyses confirment la présence de microplastiques dans tous les échantillons de dépôts du réseau, la plupart des particules détectées étant inférieures à 500 µm.

sont surdimensionnées et comportent des sections à faible pente. Pendant les périodes de pluie, une augmentation du débit peut remettre en suspension les sédiments à l’intérieur du réseau d’égouts. Les contaminants piégés dans les sédiments des égouts sont alors libérés dans les eaux usées. Gasperi et al. (2010)⁶⁴ ont indiqué que l’érosion des dépôts à l’intérieur des réseaux d’assainissement constitue la principale source de matières en suspension totales et de pollution organique par temps de pluie. En particulier, en cas d’événements intenses, le volume total d’eau dans les réseaux peut dépasser la capacité des stations d’épuration et être déversé directement dans l’environnement.

Ces rejets, appelés rejets urbains de temps de pluie (RUTP), peuvent ajouter une quantité considérable de contaminants dans les masses d’eau qui se retrouvent dans l’environnement sans traitement. Comme le montre la littérature, les MP sont abondamment présents dans les eaux usées, ce qui reflète la large utilisation du plastique et des produits contenant du plastique dans la vie quotidienne de l’homme moderne. On s’attend à ce qu’ils se comportent de la même manière que les autres contaminants présents dans les eaux usées : ils sont piégés dans les sédiments des égouts et rejetés ultérieurement dans les eaux usées. L’accumulation des MP dans les sédiments des égouts et sa contribution à la quantité de plastiques qui pénètrent dans l’environnement avec les RUTP sont toutefois inconnues.

Une étude menée par le GERS-EE et le LEESU, en partenariat avec le Syndicat Interdépartemental pour l’Assainissement de l’Agglomération Parisienne (SIAAP), a permis de donner une idée de la teneur en MP des sédiments piégés au sein du réseau d’assai-

nissement et des déversoirs d’orage, afin d’accroître les connaissances sur la présence et le devenir des MP dans le continuum réseaux d’assainissement – station d’épuration des eaux usées (STEP) et sur leur cheminement dans les eaux urbaines avant qu’ils ne pénètrent dans l’environnement.

Au total, douze échantillons ont été prélevés dans différentes chambres à sable situées à l’intérieur des réseaux d’égouts unitaires parisiens, entre mars et août 2021. Vingt-cinq échantillons provenant de deux grands déversoirs d’orage de la région parisienne (Clichy et La Briche) de la région parisienne ont été prélevés lors d’événements intenses entre avril et octobre 2022.

Les diverses analyses confirment la présence de MP dans tous les échantillons de dépôts du réseau, la plupart des particules détectées étant inférieures à 500 µm. Le polyester (PE), le polypropylène (PP), le polystyrène (PS) et l’acétate de cellulose sont les polymères les plus courants dans ce type d’échantillon.

63 : Thibert S., Barbier JS., Dris R., Tassin B., Gasperi J., et al. : *Microplastiques dans les eaux destinées à la consommation humaine – Premiers résultats de mesures sur les installations du Syndicat des Eaux d’Île de France*, 102e Congrès ASTEE, ASTEE, juin 2023, Nice, France: [hal-04096682](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04096682)

64 : Gasperi J., Gromaire MC., Kafi M., Moilleron R., Chebbo G.: *Contributions of wastewater, runoff and sewer deposit erosion to wet weather pollutant loads in combined sewer systems*, *Water Research*, Volume 44, Issue 20, 2010, pages 5875–5886, ISSN 0043-1354: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.07.008>



© Adobe Stock

En plus de la filière de traitement conventionnelle, l’une des usines utilise des procédés de microfiltration et de nanofiltration, permettant des analyses d’efficacité comparée à des process de traitement.

Le réseau de distribution d’eau potable a également été étudié avec des échantillons prélevés en trois points. La contamination par les MP de 25 à 5 000 µm a été caractérisée par cartographie infrarouge à transformée de Fourier.

Le polyéthylène, le polypropylène et le polytéraphthalate d’éthylène étaient les principaux polymères trouvés en entrée comme en sortie. Aucun MP n’a été détecté dans quatre des six échantillons de la filière de nanofiltration. Les concentrations dans le réseau de distribution étaient globalement plus élevées qu’à la sortie de l’usine de potabilisation. Les résultats suggèrent que les procédés membranaires de microfiltration et de nanofiltration sont plus efficaces que les procédés de traitement typiques, et qu’une recontamination par MP au sein même du réseau de distribution est probable.

Cette probable recontamination par MP dans les réseaux de distribution pourrait provenir des matériaux en contact et/ou d’une contamination par voie aérienne, lorsque l’eau s’écoule en surface libre. Les systèmes de gestion des eaux usées jouent un rôle important dans l’assainissement et la prévention des maladies humaines, ainsi que dans les pratiques environnementales.

Dans le cas des réseaux d’assainissement unitaires, le mélange d’eaux usées et d’eaux de ruissellement urbaines est transporté vers les stations d’épuration pour y être épuré. Pendant le transport, les contaminants particuliers présents dans les eaux usées peuvent se déposer à l’intérieur du réseau d’égouts, ce qui entraîne la formation de dépôts ou de sédiments dans les égouts. La sédimentation se produit en raison du débit modéré des eaux usées pendant les périodes de faible activité (principalement la nuit) et les périodes de temps sec.

Ce phénomène est prononcé dans le cas des réseaux d’assainissement unitaires parisiens, où les conduites

3.3

Pollution des eaux par les particules de pneus

Un grand nombre de polluants sont émis à proximité des infrastructures routières, et proviennent non seulement des émissions à l'échappement des véhicules, mais aussi d'autres sources, telles que l'usure des pneus et des freins, les technologies de climatisation du véhicule, l'usure des voies routières et l'entretien de leurs abords (usage de produits phytosanitaires...).

À ces polluants, dits « primaires », car émis directement par des sources de pollution, s'ajoutent des polluants, dits « secondaires », tels que des particules, issues des réactions chimiques entre polluants, qui se produisent dans l'atmosphère. Les effets sur la santé dépendent entre autres de la taille des particules : plus les particules sont fines, plus elles pénètrent profondément dans les voies respiratoires.

« Les particules issues de l'usure des pneumatiques ont été identifiées comme une source majeure de microplastiques dans l'environnement et sont continuellement produites par la circulation des véhicules. Leur libération continue sur les routes, suivie de leur propagation par ruissellement et/ou par re-suspension, suggère une imprégnation durable des environnements à proximité des routes, tels que les sols qui deviennent alors un réservoir de particules d'usure de pneus, surtout en zones urbaines. Les particules d'usure de pneus, dont les plus fines qui ont généralement des tailles inférieures à PM2,5, sont également émises vers le compartiment atmosphérique, et leur présence

dans un environnement urbain pose des préoccupations sanitaires importantes au regard de leurs capacités à pénétrer les systèmes respiratoires, et de leurs temps de résidence dans l'atmosphère. » (Gasperi J., mars 2024)⁶⁵

Face à ce problème de santé publique, les chercheur·es du GERS-EE et du Laboratoire Environnement, Aménagement, Sécurité et Éco-conception du département Aménagement, Mobilité, Environnement (AME-EASE) concentrent leurs recherches sur ces particules, d'une part dans les eaux urbaines et les écosystèmes aquatiques (**Projet Plasti-nium**), et d'autre part en milieu urbain (**Projet RubberCity** 2024-2026).

Les premiers résultats sur les particules de pneus montrent une contamination très élevée dans les eaux pluviales, et dans les environnements proches des routes (par exemple dans les sols en bordure de route).

Le **projet RubberCity** s'inscrit dans une démarche de recherche fondamentale visant à apporter de nouvelles connaissances scientifiques. Les travaux prévus ont pour objectif de mieux comprendre le comportement des particules d'usure des pneus dans un contexte exclusivement urbain. Ce projet se distingue par un aspect innovant et significatif : le couplage entre les sources d'émission et les dépôts, en réalisant une caractérisation des émissions réelles de particules d'usure de pneus à l'aide d'un véhicule instrumenté, et une quantification de ces particules

40 000 décès

seraient attribuables à une exposition des personnes âgées de 30 ans et plus aux particules fines (PM2,5)

La pollution de l'air ambiant demeure ainsi un facteur de risque pour la santé en France bien que l'EQIS 2016-2019 suggère une tendance à la baisse de la mortalité en lien avec la pollution de l'air ambiant :

7 %

de la mortalité totale de la population française attribuable à une exposition aux PM2,5 versus 9 % sur la période 2007-2008.

Données de l'étude d'impact sanitaire réalisée par Santé Publique France en 2021.

EQIS : Évaluation quantitative des impacts sur la santé de la pollution atmosphérique⁶⁶.

à proximité des routes urbaines et dans les sols urbains plus ou moins proches d'axes routiers. Cette approche intégrée des émissions en zones urbaines et des milieux récepteurs est unique et différenciante dans la mesure où la plupart des études scientifiques sur les particules de pneus dans l'environnement se concentrent, soit sur les sources d'émission, soit sur les zones de dépôts, mais ne considèrent jamais les deux simultanément.

Cette recherche apportera des éléments scientifiques cruciaux permettant d'établir un lien quantifiable pour comprendre le continuum entre les émissions et les dépôts en milieu urbain.

La première phase du projet vise à estimer les émissions réelles de particules d'usure de pneus dans différents contextes urbains, pour différents scénarios de circulation, et à déterminer les facteurs d'émissions dynamiques influençant l'usure à l'aide d'un véhicule instrumenté, et ce pour différents types de véhicules (thermiques vs. électriques). La plateforme technique développée par AME-EASE (campus de Nantes) est utilisée pour collecter les particules de pneus générées par un véhicule instrumenté qui circulera dans la Ville de Nantes. Via ce véhicule, il est possible, de façon simultanée, d'enregistrer à la fois les paramètres dynamiques intrinsèques du véhicule (distance parcourue, vitesse, accélération, freinage, virage, contraintes sur les roues...), et d'échantillonner les particules ainsi générées lors de l'abrasion du pneu. Les résultats obtenus fourniront des données précises sur les émissions de particules de

pneus, en particulier celles contribuant aux apports vers l'atmosphère, et leur corrélation avec certains facteurs d'émissions spécifiques. Ceci contribuera également à l'amélioration des modèles de prédiction des émissions hors échappement.

La seconde phase du projet vise à évaluer, pour la première fois, le niveau d'imprégnation et le devenir des particules de pneus en analysant simultanément la fraction atmosphérique émise par les véhicules (émissions directes et/ou re-suspension des

65 : Johnny Gasperi, docteur en Sciences et Techniques de l'Environnement, chercheur au Laboratoire Eau Environnement du Département GERS (GERS-EE) de l'Université Gustave Eiffel, interview mars 2024.

66 : ANSES, article web (jan 2013) : Les infrastructures routières : sélection des polluants à prendre en compte dans les évaluations des risques sanitaires réalisées dans le cadre des études d'impact. La librairie ADEME : Émissions de particules et de Nox par les véhicules routiers.

3.4

Pollution par les polluants métalliques et par les nanoparticules

Les eaux pluviales peuvent véhiculer des quantités élevées de polluants organiques (hydrocarbures, pesticides) et inorganiques (métaux lourds). Ces polluants sont en grande partie associés à la fraction particulaire transportée par l'écoulement, mais sont également présents sous forme dissoute ou colloïdale.

Les colloïdes se caractérisent, du fait de leur petite taille comprise (entre 1 nm et 1 et 10 µm) et de leur réactivité de surface, par une mobilité souvent égale, voire supérieure à celle des solutés, et par leur capacité importante d'adsorption de polluants.

Dans la gestion des eaux pluviales, les ouvrages de rétention et/ou d'infiltration assurent la régulation des flux d'eau et la dépollution des eaux de ruissellement par décantation et infiltration. Pourtant, la performance épuratoire de ces ouvrages est souvent remise en cause en raison de deux phénomènes :

- une forte variabilité des concentrations en contaminants métalliques en sortie d'ouvrage ;
- et une rétention faible de la fraction dissoute ou colloïdale (de taille inférieure à 0,45 µm) de ces éléments

En collaboration avec l'Université de Toronto et le CNRS⁶⁸, un programme a été conduit sur les interactions des nanoparticules (NPs) avec la matière organique dissoute (MOD)⁶⁹. Ce travail a été réalisé en utilisant la résonance magnétique nucléaire (RMN en phase liquide). « L'utilisation de cette technique pour étudier les interactions NPs et MOD démontre

une forte expertise de l'université au niveau national et international. » (Courtier-Murias D., mai 2024)⁷⁰

La fraction nanoparticulaire contenue dans des eaux ayant ruisselé sur des chaussées fortement circulées a été caractérisée en se focalisant sur les nanoparticules contenant du titane, du fer, du cuivre ou du zinc. La présence de titane et de fer sous forme nanoparticulaire à des densités particulières relativement élevées (de l'ordre de 100 millions de particules par litre d'eau) a été identifiée. Les chercheur·e·s s'attendaient effectivement bien à retrouver du titane sous forme nanoparticulaire dans les eaux ruisselées, compte tenu de la présence de nanoparticules de dioxyde de titane dans les panneaux de signalisation et les peintures routières, qui confèrent à ces éléments leurs propriétés réfléchissantes.

« La spéciation physique des éléments trace⁷¹ (distribution en taille) dans les eaux de ruissellement a été étudiée par le GERS-EE afin d'évaluer leur présence sous forme colloïdale (particules comprises entre 1 µm et 1 nm) au niveau d'un site routier à fort

68 : <https://international.cnrs.fr/actualite/ouverture-des-phd-joint-programmes/>

69 : Dia M., Peyneau PE., Courtier-Murias D., Béchet B. : *Occurrence et caractérisation de nanoparticules dans les eaux de ruissellement urbaines – Application aux eaux du Pont de Cheviré*, Novatech 2023, juillet 2023, Lyon, France : [hal-04217925](#)

70 : Denis Courtier-Murias, chercheur au Laboratoire Eau Environnement du Département GERS (GERS-EE) de l'Université Gustave Eiffel, interview mai 2024.



© Adobe Stock

poussières de routes les plus fines), les poussières de routes et les sols à proximité des axes routiers et des parcs urbains dans la Ville de Nantes. Ceci permettra de rendre compte des niveaux d'imprégnation dans ces trois compartiments.

La méthodologie d'évaluation des émissions pour le **projet RubberCity** dans la première phase a déjà été appliquée avec succès pour cinq circuits spécifiques, dont un se déroulant dans la Ville de Nantes et en zone périurbaine. Les travaux publiés mettent en lumière une répartition des quantités de particules d'usure de pneus différente selon la classe de taille et le trajet considéré.

Sur les cinq circuits, le trajet périurbain est le plus émetteur, suivi du trajet autoroutier, urbain et enfin rural. (De Oliveira T., Muresan B., Ricordel S., Lumière L., Truong XT., Poirier L., Gasperi J.)⁶⁷

Par ailleurs, la distribution en taille des particules émises vers le compartiment atmosphérique est majoritairement inférieure à 0,39 µm.

Au sein de l'université (GERS-EE, AME-EASE), et sur cette même thématique, certaines équipes s'intéressent aux émissions hors échappement en partenariat avec l'Université de Nantes.

Afin de poursuivre les recherches sur l'analyse, la quantification et les impacts de la pollution des particules de pneus dans les eaux pluviales, le GERS-EE collabore avec le Laboratoire d'analyse Qualyse dans le cadre du **projet Plastyre** (2023-2026).

Ce projet poursuit trois objectifs :

- détecter/identifier les résidus micrométriques de caoutchoucs pneumatiques libérés dans l'environnement *via* un développement méthodologique en laboratoire ;
- estimer les quantités de microparticules pneumatiques produites par la circulation automobile vers les eaux pluviales sur plusieurs sites d'intérêts ;
- comprendre les potentiels effets écotoxicologiques sur des modèles biologiques (larve d'huître, poisson, amibe, bactérie).

67 : De Oliveira T., Muresan B., Ricordel S., Lumière L., Truong XT., Poirier L., Gasperi J. : *Realistic assessment of tire and road wear particle emissions and their influencing factors on different types of roads*, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 465, 2024, 133301, ISSN 0304-3894 : <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133301>

trafic (100 000 véhicules/jour). Un schéma de fractionnement complet a été appliqué à une série d’événements pluvieux, en considérant 8 µm et 5 kDa comme des seuils pertinents entre forme particulaire, forme colloïdale et forme colloïdale – forme dissoute. La distribution intra-événement a également été prise en compte pour évaluer l’effet “first-flush” 72, ainsi que la variation de la spéciation physique. Le nickel, le chrome et le plomb sont présents principalement sous forme particulaire et colloïdale. Il est donc pertinent de considérer une distribution en taille fine pour ces éléments.

Il ressort de ces travaux que pour l’arsenic, le cuivre et le zinc, la filtration conventionnelle à 0,45 µm semble être suffisante pour évaluer la fraction mobile.

Par ailleurs, les résultats indiquent que la variabilité de l’intensité des pluies lors d’événements longs induit des changements de distribution entre forme particulaire et forme colloïdale des éléments trace dans les eaux de ruissellement.

Le traitement du ruissellement doit être alors considéré dans son ensemble compte tenu de la variabilité de la distribution des éléments trace. Ceci suggère que le dimensionnement des ouvrages de gestion des eaux de ruissellement basé sur la fraction décantable devrait être revu pour limiter les risques chimiques et écologiques pour les masses d’eau réceptrices. » (Dang et al., 2023)⁷³

L’objectif est donc de mieux connaître la fraction ultrafine de la contamination apportée par les eaux pluviales. Cette fraction est en effet la plus susceptible de migrer vers les eaux souterraines lors de l’infiltration des eaux au sein des ouvrages de traitement des eaux pluviales, ou d’être transférée vers le milieu récepteur par saturation des ouvrages. À l’échelle nationale, l’Université Gustave Eiffel, et notamment GERS-EE, dispose aussi d’une expertise reconnue sur les techniques d’analyse des **nanoparticules métalliques par spectrométrie de masse**. Pierre-Emmanuel Peyneau complète en précisant : « En effet, les équipes françaises qui s’intéressent à cette technique et à ses applications en chimie environnementale sont à l’heure actuelle peu nombreuses : ce sont essentiellement l’Institut de Physique du Globe de Paris et l’Université de Pau et des Pays de l’Adour qui mènent des recherches dans ce sens. » (Peyneau PE., 2024)⁷⁴

La caractérisation des nanoparticules métalliques via leur analyse individuelle par spectrométrie de masse (*sp-ICP-MS pour single particle inductively coupled plasma-mass spectrometry*) a fait l’objet de développements originaux (modélisation du signal temporel, caractérisation du biais de comptage et des propriétés statistiques des pics individuels associés à chaque nanoparticule). (Peyneau PE., Guillon M., 2021; Peyneau PE., 2021; Peyneau PE., 2022)⁷⁵

Cette technique permet de mesurer la densité particulaire des nanoparticules dans un échantillon d’eau et la distribution de masse de l’élément métallique d’intérêt, particule par particule.

Comme toute méthode, elle souffre de certaines limitations, dont ce qu’on a coutume d’appeler le biais de comptage, c’est-à-dire l’existence d’un écart entre le nombre de pics détectés et le nombre de nanoparticules qui ont pénétré dans le spectromètre (et qui devraient donc, idéalement, être toutes détectées !). La méthode développée permet notamment de quantifier très précisément ce biais de comptage affectant les mesures *sp-ICP-MS* et de le corriger.

71 : Les éléments trace sont des éléments chimiques que l’on trouve naturellement, le plus souvent en faibles concentrations (traces) dans l’environnement, dans nos aliments et dans tous les organismes vivants.

72 : Le terme first flush effect fait référence aux changements rapides de la qualité de l’eau (concentration ou charge de polluants) qui surviennent après les pluies de début de saison.

73 : Dang DPT., Jean-Soro L., Béchet B. : *Variabilité temporelle de la spéciation physique des éléments trace dans les eaux de ruissellement au cours des événements pluvieux*, Novatech 2023, Graie, juillet 2023, Lyon, France : [hal-04186321](#)

74 : Pierre-Emmanuel Peyneau, Directeur du Laboratoire Eau et Environnement du Département GERS (GERS-EE), Université Gustave Eiffel, interview mai 2024.

75 : Peyneau P-E., Guillon M.: *Number of spikes in single particle ICP-MS time scans: from the very dilute to the highly concentrated range*. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2021, 36 (11), pp. 2460–2466 : [10.1039/D1JA00156F](#) [hal-03346976](#)
Peyneau P-E., : *Poisson process modelling of spike occurrence in single particle inductively coupled plasma mass spectrometry time scans for very dilute nanoparticle dispersions*. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2021, 178, 18 p. : [10.1016/j.sab.2021.106126](#) [hal-03163236](#)
Peyneau P-E. : *Statistical properties of spikes in single particle ICP-MS time scans*. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2022, 12, 8 p. : [10.1039/D2JA00312K](#) [hal-03877147](#)

3.5

Pollution par les polluants persistants fluorés (PFAS) ou polluants éternels

En raison des risques sanitaires et environnementaux avérés, la pollution par les PFAS est un sujet complexe qui a fait l’objet d’un nouveau plan interministériel en avril 2024.

.....

La famille des per- et polyfluoroalkylées (PFAS) regroupe environ 10 000 molécules chimiques synthétiques présentant des chaînes carbonées plus ou moins longues, ainsi que des atomes de fluor. En raison de leurs propriétés antiadhésives, de résistance aux fortes chaleurs et d’imperméabilité, ces molécules sont utilisées dans de nombreux domaines comme l’automobile, le textile, les emballages alimentaires, les poêles antiadhésives, les cosmétiques ou encore l’électronique.

Ces PFAS, qui nous rendent de nombreux services dans l’industrie ou dans la vie quotidienne, sont utilisés depuis plus d’un demi-siècle. Mais ces substances chimiques partagent une caractéristique : celle d’être très persistantes dans l’environnement, d’où le terme de polluants éternels, bioaccumulables et toxiques. En effet, les PFAS peuvent voyager sur de longues distances puisqu’ils sont solubles dans l’eau, mobiles dans les sols et qu’ils possèdent une longue durée de vie. L’ingestion d’aliments ou d’eau

de boisson contaminés représente la voie principale de contamination humaine. Une fois accumulés dans les organismes, qu’ils soient aquatiques ou terrestres, les PFAS impactent les systèmes hormonaux et immunitaires et peuvent traverser les barrières naturelles de protection interne. Les PFAS ont la capacité de se « bioaccumuler » dans les organismes. Cette bioaccumulation diffère selon la longueur de sa chaîne carbonée⁷⁶. Les PFAS qui possèdent une chaîne carbonée courte auront une demi-vie plus réduite par rapport à ceux à chaînes longues, témoignant d’une élimination plus rapide⁷⁷.

En raison des risques sanitaires et environnementaux avérés, la pollution par les PFAS est un sujet complexe qui a fait l’objet d’un nouveau plan interministériel en avril 2024⁷⁸.

Seul un nombre réduit de PFAS fait l’objet d’une réglementation ou de recommandations par les institutions internationales, européennes ou françaises, en considérant les molécules individuellement ou par groupe de quelques molécules.



© Adobe Stock

Le sol joue tout particulièrement un rôle prépondérant dans le devenir des PFAS en retardant leur arrivée dans les aquifères du fait de la rétention des substances par les phases minérales et/ou organiques du sol. Mais les PFAS sont ce faisant aussi détectés dans la faune des sols.

L'écotoxicité des PFAS a été peu étudiée. Il en est de même du devenir et de la biodisponibilité des mélanges de PFAS dans les sols qu'il n'est pas possible de prédire, faute de modèle suffisamment générique. Les méthodes courantes de quantification permettent de doser seulement une faible fraction des PFAS existants. Elles ont permis de documenter la présence de ces molécules dans de nombreux compartiments de la biosphère, mais à ce jour, les connaissances sur les effets toxiques et écotoxiques des PFAS restent limitées.

Le **projet IPANEMA** vise à développer des outils permettant de mieux prévoir le devenir des PFAS dans les sols, leur toxicité et leur impact potentiel sur les fonctions assurées par les vers de terre. Afin de mieux évaluer le devenir des PFAS dans les sols, des tests ont été effectués en laboratoire sur des colonnes de sols reconstitués. Des injections de solutions dopées en PFAS ont été réalisées dans ces colonnes de sols et suivies par résonance magnétique du fluor (IRM du ^{19}F).

Les données obtenues ont confirmé avec succès la performance de la méthodologie de l'IRM du ^{19}F .

Des expériences de simulation de pluie ont permis d'observer l'hydrodynamique de l'eau percolant verticalement à travers des sols contaminés aux PFAS et non perturbés (c'est-à-dire de « carottes » prélevées et étudiées en laboratoire par des expériences en colonne). La comparaison des colonnes de sols contaminés ou non, exposés au même événement pluvieux, révèle l'influence de l'hétérogénéité du sol sur la lixiviation (processus au cours duquel l'eau de ruissellement passe au travers des pores du sol (percolation) en entraînant par dissolution certains sels, ions ou substances solubles des PFAS).

Il s'avère qu'une matrice de sol à pores fins génère un écoulement lent de l'eau interstitielle tandis qu'une matrice de sols constituée de macropores entraînera un écoulement rapide.

Les recherches ont ainsi démontré que le transport des PFAS est facilité par les colloïdes du sol (particules en suspension incluant principalement les argiles et les matières organiques) et que cela contribuait de manière significative au transport global des PFAS à longue chaîne carbonée, en comparaison à des PFAS de courte chaîne carbonée.

La pollution des eaux ne s'arrête malheureusement pas aux PFAS. Une étude⁷⁹, *Pharmaceutical pollution of the world's rivers*, du 14 février 2022, a démontré que plus de 250 rivières dans le monde sont polluées et contaminées par des résidus médicamenteux.

⁷⁹ : Wilkinson JL. et al. : *Pharmaceutical pollution of the world's rivers*, PNAS February 22, 2022 119 (8) e2113947119 : <https://doi.org/10.1073/pnas.2113947119>

3.6 Pollution par les résidus médicamenteux

À la suite du constat de la présence en quantité importante de médicaments dans les déchets, et du stockage des déchets hospitaliers dans les décharges, des campagnes d'analyses sur les résidus médicamenteux et autres substances émergentes ont été mises en œuvre dans le cadre du projet POLLUSOLS (2015-2020).

Une méthode de screening récente du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) a été utilisée pour rechercher 49 substances pharmaceutiques et autres substances émergentes. 23 substances ont été quantifiées au moins une fois dans les lixiviats du massif de déchets (19 molécules) et aux abords de la décharge, les lixiviats étant les « jus produits » sous l'action conjuguée de l'eau de pluie et de la fermentation des déchets enfouis.

La présence spécifique de bisphénol A est attribuée aux nombreux plastiques présents dans les déchets (sacs poubelles, divers objets du quotidien, matériaux...). (Ledieu et al., 2023)

Le bisphénol A est en effet un plastifiant utilisé dans la fabrication de nombreux produits industriels ou domestiques. Il est classé comme perturbateur endocrinien.

© Adobe Stock



3.7

Pollution par les micro-organismes biologiques

Parmi les contaminants micro-particulaires de l’eau, les micro-organismes biologiques, tels que des protozoaires qui peuvent être à l’origine de maladies comme le paludisme, la giardiase ou la toxoplasmose, ont la particularité d’être reconnaissables par des images au microscope.

Sous l’impulsion du **projet ISITE Nano-4-Water** et d’une thèse en collaboration entre ESYCOM, LIGM et NTU-Singapour, une étude sur les protozoaires a été effectuée en exploitant des images acquises à très haut débit *via* un cytomètre de flux. L’identification et la classification de deux types de protozoaires (Crypto et Giardia) mélangés à des micro-plastiques de différentes dimensions ont pu être effectuées grâce au développement de modèles basés sur l’apprentissage profond. Les résultats ont montré une sensibilité supérieure à 99 %. (Luo S., et alii, 2021)⁸⁰

Forte de son expertise sur la pollution de l’eau par les micro-biologiques, l’Université Gustave Eiffel a accompagné l’émergence d’une *start-up* : FLUIDION. Cette *start-up* a développé un système de surveillance et d’alerte et de surveillance des micro-contaminants biologiques et chimiques de

l’eau. Ce système original repose sur des micro-technologies maîtrisées au sein des salles blanches de l’Université Gustave Eiffel-ESIEE Paris, et prélève et analyse l’eau de la Seine de manière automatisée ou à la demande, et communique les données sur une plateforme web. Dans le cadre de la préparation des épreuves de natation aux Jeux olympiques 2024 à Paris, la mairie de Paris a chargé FLUIDION d’installer le long de la Seine plusieurs systèmes de surveillance de la pollution en bactéries, qui ont permis de mettre en œuvre une surveillance continue depuis plusieurs années.

80 : Luo S., Nguyen KT., Nguyen BTT., Feng S., Shi Y., Elsayed A., Zhang Y., Zhou X., Wen B., Chierchia G., Talbot H., Bourouina T., Jiang X., Liu AQ.: *Deep learning-enabled imaging flow cytometry for high-speed Cryptosporidium and Giardia detection*, Cytometry A., 2021 Nov ; 99(11):**1123-1133** : doi:10.1002/cyto.a.24321, PMID: 33550703.



4

Solutions de gestion des risques ● hydrauliques

.35

4.1 Comportement des ouvrages
en sites fluviaux ou côtiers

.39

4.2 Caractérisation et suivi
des ouvrages fluviaux et maritimes

.44

4.3 Autres solutions : les aménagements
possibles des villes et des territoires

Les ouvrages en sites fluviaux ou côtiers (digues, berges, ponts et ouvrages d’art) sont des éléments essentiels d’aménagement. Ils sont exposés à des processus de détérioration liés aux sollicitations saisonnières, cycliques ou exceptionnelles dont, notamment les phénomènes hydrauliques causant érosion et affouillements.

La défaillance de ces ouvrages a des conséquences potentielles sur la sécurité des personnes, des biens et peut également générer des risques pour l’environnement, ou une perte de bénéfices pour la société, ainsi que des coupures de réseaux (eau, gaz, électricité, Internet...) comme cela a pu être le cas lors des crues exceptionnelles du 2 octobre 2020 dans le département des Alpes-Maritimes (tempête Alex). C’est donc une préoccupation majeure des acteurs de l’aménagement et de la prévention des risques.

Les **phénomènes d’érosion et d’affouillements** se produisent tout particulièrement au pied des piles de ponts, berges et structures (affouillements), au niveau des digues et des ouvrages de protection (érosion interne, surverse) notamment lors des phénomènes climatiques extrêmes (crues majeures pour les cours d’eau, tempête pour les ouvrages à la mer). Des processus d’érosion peuvent également être générés par la navigation *via* le batillage⁸¹.

Les phénomènes d’érosion et d’affouillement sur les ouvrages et les structures en rivière, sur la côte ou en mer, sont particulièrement complexes à appréhender, à comprendre et à caractériser, car ils sont à l’interface entre eau(x), sol(s) et structure(s), et recouvrent une grande variété de domaines scientifiques. Ces travaux sont nécessairement pluridisciplinaires et multi-échelles. Ils ont été menés dans le cadre de

nombreuses collaborations entre chercheur·e·s de l’université Gustave Eiffel, avec leurs partenaires académiques (CEREMA, INRAE...), mais également avec des acteurs publics (SNCF réseau, Vinci Autoroutes, DREAL, Société du Canal Seine-Nord Europe (SCSNE)), et enfin au niveau international avec une collaboration notable avec le Japon : Université de Tokyo et Railway Technical Research Institute (RTRI).

© Adobe Stock



81 : Batillage : remous provoqué, soit par la marche d’un bateau, soit par le vent et qui cause la dégradation des berges.

4.1 Comportement des ouvrages en sites fluviaux ou côtiers

Pour assurer différents usages, l’homme a, au cours de l’histoire, aménagé les cours d’eau en mettant en place des ponts, des digues, des barrages, des moulins et des écluses.

Les ouvrages hydrauliques ou les ouvrages en terre comme les digues et les remblais, peuvent subir des agressions liées à l’eau qui, en période normale, sont prises en compte dans le dimensionnement et ne posent pas (ou ne devraient pas poser) de problèmes. Il en est tout autrement lorsque ces ouvrages sont soumis à des sollicitations majeures telles que les crues ou les inondations. Ces ouvrages peuvent être le siège d’écoulements interstitiels ou superficiels qui sont susceptibles de provoquer le détachement, puis

le transport de certaines particules constitutives de l’ouvrage ou de ses fondations par érosion interne ou surverse. Cette problématique est la principale cause des instabilités, voire des ruptures d’ouvrages hydrauliques en terre.

« Les digues en terre sont courantes en France avec près de 8 000 kilomètres d’ouvrages de ce type pour protéger les populations d’inondations répétitives, mais ce n’est pas une protection absolue », précisent Myriam Duc et Alain Le Kouby, GERS-SRO⁸².

Alors, comment évaluer efficacement la performance de ces ouvrages en sites fluviaux ou côtiers ? Quelles stratégies d’adaptation ou de transformation doit-on mettre en place pour prendre en compte la spécificité des sites et de leurs évolutions dans le temps ? Comment garantir que l’ensemble de ces ouvrages soit adapté au territoire et qu’il protège efficacement ses habitant·es et/ou les infrastructures ? Tous ces enjeux impliquent d’importants besoins en termes de méthodologie de conception, construction, diagnostic, suivi et confortement des ouvrages qui concernent les maîtres d’ouvrage, maîtres d’œuvre, bureaux d’études..., et qui mobilisent largement les chercheur·e·s de l’université.

Les ouvrages hydrauliques et ceux en rivière souffrent de risques de rupture en lien avec deux phénomènes majeurs : **l’érosion interne** et **l’érosion externe** induite, soit par l’affouillement à la base, soit par surverse sur la partie supérieure de l’ouvrage.

© Adobe Stock



« Les digues en terre sont courantes en France [...] pour protéger les populations d’inondations répétitives, mais ce n’est pas une protection absolue. »

MYRIAM DUC ET ALAIN LE KOUBY, GERS-SRO

4.1.1
Érosion interne des digues

Les ouvrages hydrauliques peuvent être endommagés par l’érosion interne, et notamment l’érosion du trou et l’érosion par suffusion.

Le laboratoire Sols, Roches et Ouvrages Géotechniques du département GERS (GERS-SRO) de l’université concentre ses recherches sur l’étude, la caractérisation, l’instrumentation et le suivi de la tenue des ouvrages fluviaux, berges, digues et piles de ponts. On remarque, d’après Dalia Ayssami, doctorante au laboratoire GERS-SRO de l’université «*qu’aujourd’hui dans tous les ouvrages géotechniques, le dimensionnement se fait par rapport aux états ultimes de service, et que l’évolution des matériaux dans le temps (par exemple, en fonction de cycles hydrauliques de séchage et de mouillage) n’est pas ou peu prise en compte.*»⁸³

Face à ce constat, une étude a été menée par Dalia Ayssami sur le comportement et la résistance des ouvrages endommagés par l’érosion interne, en particulier l’érosion du trou, en utilisant une méthode hybride expérimentale-numérique⁸⁴.

Différents paramètres mécaniques et hydrauliques propres au sol ont été définis grâce à des essais en laboratoire en appliquant jusqu’à douze cycles de séchage/humidification. Ces paramètres ont ensuite été implémentés dans un modèle numérique à l’échelle de l’éprouvette, puis à l’échelle de l’ouvrage.

À l’échelle de l’ouvrage, un modèle numérique a été créé, dont la géométrie s’inspire de celle d’une vraie digue. Des modélisations, utilisant les données expérimentales, sont en cours de réalisation afin de varier les conditions appliquées, telles que le niveau de la nappe phréatique et/ou de la crue et en appliquant des conditions saisonnières (évapotranspiration et précipitation). Les modèles numériques créés et en cours de création peuvent être exploités en appliquant la géométrie et les conditions appropriées, sous réserve d’utiliser les données propres aux sols composant l’ouvrage.

La seule contrainte à ce jour pour que ces travaux puissent être exploités par les gestionnaires d’ouvrages, et ainsi leur permettre de mieux anticiper les phénomènes d’érosion et planifier dans le temps les opérations de maintenance, serait donc d’établir en amont, en laboratoire, de nombreux paramètres, tels que la perméabilité, la porosité, la capacité de rétention d’eau, la désagrégation du sol en contact avec l’eau et les coefficients de la résistance mécanique.

82 : Myriam Duc, chercheure HDR en physico-chimie et sciences des matériaux, et Alain Le Kouby, chercheur HDR en Mécanique des sols, Laboratoire GERS-SRO, Université Gustave Eiffel, interview mai 2024.

83 : Dalia Ayssami, doctorante Laboratoire GERS-SRO, Université Gustave Eiffel, interview mai 2024.

84 : Ayssami D. : *Analyse des phénomènes d’érosion interne sur digues fluviales, par méthode hybride expérimentale-numérique*, thèse en cours (2022-2025).



© Adobe Stock

Pour pallier cette difficulté, les chercheur·e·s du GERS-SRO tentent d’établir un facteur de sécurité pour l’érosion interne qui serait applicable dans n’importe quelle condition. Les ouvrages hydrauliques peuvent être également altérés par un autre type d’érosion interne, celle par suffusion.

En partenariat avec ESTP Paris et l’INP-HB⁸⁵, d’autres travaux sur **l’érosion interne** des ouvrages hydrauliques **par suffusion** ont été menés par l’université au sein du laboratoire Navier (Gboga OJBN., 2024)⁸⁶. Le processus de suffusion correspond à la migration interne des fines particules au sein du squelette du sol, sous l’action d’un flux hydraulique. Ce phénomène est l’un des principaux modes d’érosion interne des sols et il est influencé par des paramètres intrinsèques du sol tels que la teneur en particules fines et la densité de la structure granulaire soumise à différentes sollicitations hydrauliques. Un écoulement hydraulique peut en effet induire une migration de particules dans une matrice de sol, ce qui provoque une modification des propriétés mécaniques et hydrauliques. La perméabilité de l’ouvrage en terre peut ainsi être localement considérablement modifiée.

La compréhension et la maîtrise de l’érosion interne nécessitent donc une connaissance approfondie des interactions eau/sol. Un sol peut être homogène ou, au contraire, présenter des hétérogénéités, telles que des zones fissurées ou fortement compactées.

Plusieurs études ont déjà été réalisées en considérant des sols homogènes, mais cependant très peu de travaux ont été consacrés aux sols présentant des hétérogénéités et sur lesquels peuvent reposer des ouvrages hydrauliques. Une approche expérimentale a été développée à partir de trois configurations d’hétérogénéités représentatives de cas rencontrés sur sites réels : des travaux de maintenance et d’entretien, des défauts de compactage et des défauts de mise en œuvre des ouvrages ont permis d’offrir de nombreuses perspectives tant sur l’approche expérimentale que sur l’approche numérique.

Afin de lutter contre l’érosion interne des digues en terre, le GERS-SRO s’est intéressé au renforcement des digues en terre déjà existantes, en utilisant la technique du *Deep Soil Mixing (DSM)* : il s’agit de créer un écran étanche (60 cm de large et de hauteur jusqu’à 10 m) au centre de la digue. Cette technique et en particulier la technique de « tranchée de sol mixé » vise à renforcer les sols et consiste à mélanger sur place le sol avec du ciment (en poudre ou sous forme de coulis) sans passer par l’excavation du sol et sa remise en place. Elle permet de former des colonnes ou des tranchées de sol renforcées pour servir de soutien aux constructions réalisées au-dessus ou de former des écrans étanches pour améliorer l’étanchéité des digues en terre (ouvrage linéaire), et de lutter ainsi contre l’érosion interne des ouvrages.

85 : Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, Yamoussoukro, Côte d’Ivoire.

86 : Gboga, OJBN. : *Impacts d’hétérogénéités granulaires sur l’érosion interne par suffusion de sols constitutifs d’ouvrages hydrauliques*. Géotechnique. Université Gustave Eiffel, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (Yamoussoukro, Côte d’Ivoire), 2023, français : **NNT : 2023UEFL2071 tel-O4482240**

87 : Amrioui J. : *Vulnérabilité des digues au changement climatique : approche multi-échelle pour l’étude du comportement à long terme des mélanges sol-ciment et effet des inclusions de sol non traité lors du processus de malaxage*, Ingénierie de l’environnement, Université Gustave Eiffel, 2023, français : **NNT : 2023UEFL2065 tel-O4550111**

88 : Comité français des barrages et réservoirs (CFBR), *Recueil partie I – Cadre Général et Partie II – Fiches (mai 2021) : Recueil de méthodes et de techniques de confortement et réparation des digues de protection en remblai*.

On trouve ainsi des digues en terre renforcées à l’aide de cette technique du DSM sur les digues de Loire et sur celles du Rhône, mais aussi sur des digues côtières (au contact d’eau plus salée).

Néanmoins, cette technique du DSM a des limites.

Le GERS-SRO s’est intéressé au renforcement des digues en terre déjà existantes, en utilisant la technique du *Deep Soil Mixing (DSM)*.

.....

Lorsque le mélange de sol et de ciment en place sur la digue est réalisé, ce mélange peut être imparfait notamment lorsque le sol est riche en argile. Dans ce cas, le sol se disperse difficilement avec le ciment, et des inclusions (imperfections) de sol « non mixé » peuvent alors apparaître dans la matrice sol/ciment. Ces imperfections ont un impact sur les performances mécaniques du mur de Deep Soil Mixing, mais aussi sur les propriétés hydrauliques du panneau, et peuvent affecter l’étanchéification de la digue renforcée. Il est donc nécessaire de les quantifier et de les qualifier dans le panneau de Deep Soil Mixing.

C’est tout l’enjeu des méthodes novatrices en 2D

et en 3D basées sur l’analyse d’images qui ont été développées (Amrioui J., 2023)⁸⁷, afin d’évaluer avec précision les propriétés hydromécaniques des matériaux DSM, tout en prenant en compte leurs spécificités, comme la présence d’imperfections. Ces recherches ont ainsi permis d’explorer la dégradation des propriétés des matériaux DSM face aux sollicitations environnementales. Des tests de durabilité du matériau DSM ont démontré que ce matériau se dégrade sous la percolation de l’eau en formant une « peau dégradée » à la surface de la colonne ou de l’écran. Reste à faire le lien entre l’évolution temporelle de la dégradation observée en laboratoire, et l’évolution escomptée sur site en utilisant les informations de pluviométrie locale et hydraulique du terrain.

Sur cette thématique des digues et de leur renforcement, GERS-SRO a également participé à l’élaboration du guide du CFBR (Comité Français des Barrages et Réservoirs), *Recueil de méthodes et de techniques de confortement et réparation des digues de protection en remblai* (2021)⁸⁸, en prenant notamment en charge la rédaction d’une fiche technique relative à cette technique de renforcement présentée en amont.

4.1.2
Affouillement des ouvrages fluviaux

Au phénomène d’érosion interne (mais également externe) des digues, vient s’ajouter celui de l’**érosion induite par l’affouillement**. Il s’agit de l’arrachement et du transport des sédiments du lit d’un cours d’eau sous l’action érosive d’un écoulement hydraulique. Ce phénomène est accentué par la présence d’obstacles à l’écoulement, tels que les piles et culées de ponts, les digues, ou également les éoliennes en mer, dans un contexte maritime.

L’hétérogénéité des sols, leurs caractéristiques physiques, leurs différents états de compacité et les différents états hydriques ont des impacts sur les ouvrages en site aquatique.

Pour les piles de ponts en rivière, l’affouillement peut ainsi engendrer une perte de la capacité portante de ces structures, un changement des conditions d’appui des ouvrages, et il constitue l’une des principales causes d’effondrement de ces ouvrages d’art.

Des travaux ont été menés dans le cadre ou en rapport avec le **projet ANR SSHEAR (Soils, Structures and Hydraulics: Expertise and Applied Research)** (2015-2019). Ce projet, qui a impliqué de nombreux partenaires (CEREMA, LHSV⁸⁹, Cofiroute, SNCF Réseau, IRT Railenium...), a mobilisé plusieurs chercheur-e-s des départements GERS, MAST et COSYS de l’université.



© Adobe Stock

Ce projet s’est concentré sur l’amélioration des connaissances sur les mécanismes d’affouillement et le développement d’outils novateurs d’observation et de modélisation aux échelles, tant de maquettes expérimentales que d’ouvrages de taille réelle, en vue de proposer des méthodes de diagnostic, d’alerte et de gestion. Deux ouvrages d’art ont été instrumentés : un ouvrage en béton précontraint sur la Loire, et un ouvrage ferroviaire en maçonnerie à proximité de Limoges. (Larrate F. et al., 2020⁹⁰ et Belmokhtar M. et al. , 2022⁹¹).

Dans la continuité de ces travaux, des efforts d’étude et de recherche ont été poursuivis. Ainsi, un processus rapide et précis d’identification des infrastructures ferroviaires vulnérables à l’affouillement a été mis en place en tirant parti d’une nouvelle approche axée sur les données. Ce dispositif permet d’améliorer le processus actuel d’inspection et de maintenance. Une application web conviviale, garantissant l’accessibilité des résultats de recherche, a également été développée et est utilisée à titre de démonstrateur par la SNCF. (Wang T., 2023)⁹²

89 : LHSV : Laboratoire d’Hydraulique Saint-Venant.

90 : Larrarte F., Chevalier C., Battist L., Chollet H. : *Hydraulics and bridges : A French case study of monitoring of a bridge affected by scour. Flow Measurement and Instrumentation*, 2020, 74, 101783, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101783>

91 : Belmokhtar M. : *Modélisation, analyse et apprentissage statistique du comportement dynamique de structures pour le suivi des conditions aux limites : application au phénomène d’affouillement*, Génie civil, Université Gustave Eiffel, 2022, français : **NNT : 2022UEFL2036 tel-O4048711**

92 : Wang T. : *Scour management in French rail infrastructure using machine learning*, Géotechnique, Université Gustave Eiffel, 2023, English : **NNT : 2023UEFL2044 tel-O4415579**

4.2

Caractérisation et suivi des ouvrages fluviaux et maritimes

Dans cette prévention des risques liés à l’eau, les chercheur.es de l’université œuvrent vers une meilleure caractérisation et un suivi plus complet des ouvrages en sites fluviaux et maritimes. Ceci nécessite des recherches sur les techniques de surveillance et le développement d’outils associés à la surveillance de ces ouvrages, que ce soit des digues ou des ouvrages d’art.

4.2.1

Caractérisation et suivi des digues traitées dans un contexte maritime

Dans le contexte de l’élévation du niveau des océans (60 cm à horizon 2100), conséquence du changement climatique planétaire, la superficie des zones submersibles va s’accroître, nécessitant le renforcement des digues existantes et la construction de nouvelles digues de protection contre les submersions marines. Dans cet objectif, le traitement à la chaux apparaît comme une solution économique et écologique, car il permet le réemploi des sols limoneux et argileux en place, sans avoir recours à l’extraction et au transport de matériaux de carrière de plus haute qualité.

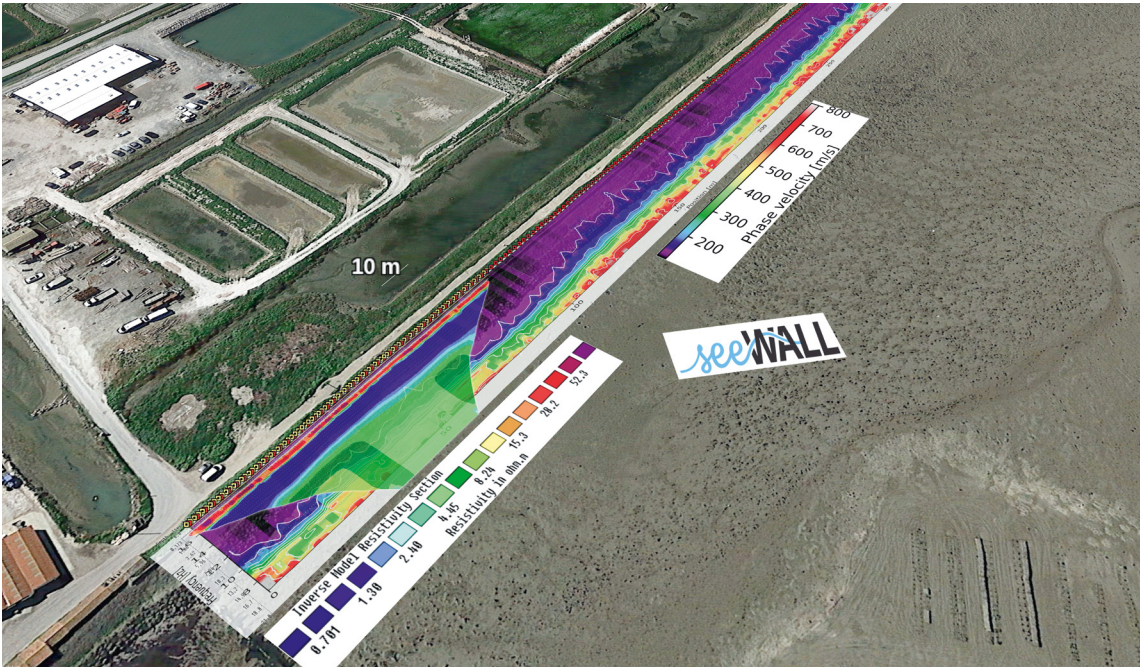
Des études antérieures ont montré que le traitement à la chaux augmente les performances mécaniques

du sol, ainsi que sa résistance à l’érosion. En revanche, l’impact du milieu environnant sur la durabilité de ce type de matériau n’avait été que très peu étudié.

C’est dans ce contexte que l’Université Gustave Eiffel (les laboratoires GERS-SRO et GERS-GeoEND) a été partenaire du **projet Digue 2020**, dont l’un des objectifs a été de concevoir et de construire une plateforme de recherche innovante pour la protection du littoral camarguais. En amont de la construction de cette plateforme *in situ*, des travaux ont été menés en laboratoire pour évaluer la durabilité d’un sol préalablement choisi et traité à la chaux lorsqu’il est soumis à un environnement marin (De Baecque M., 2019)⁹³. Les travaux ont démontré la transformation d’un matériau de faible résistance en un matériau de grande résistance par l’addition de chaux.

Cette plateforme de recherche a permis de tester sur une digue maritime la durabilité et la résistance à l’érosion d’un matériau constitué d’un sol traité à la chaux, comme alternative plus durable et plus résistante à l’érosion et à la submersion que les techniques classiques de « défense contre la mer ». Première mondiale pour un ouvrage maritime, Digue 2020 s’inscrit ainsi dans une double ambition :

⁹³ : De Baecque M. : *Caractérisation multi-physique de la durabilité d’un sol traité à la chaux pour une application aux digues maritimes*, Géotechnique, Université Paris-Est, 2019, français : **NNT : 2019PESC2078 tel-02899988**



©Maximilien Lehujeur

technologique, car il vise à trouver des solutions vertueuses et financièrement soutenables de consolidation des digues, et environnementales.

Certains gestionnaires de digues, et notamment le syndicat de gestion des digues du Rhône (SYMADREM), ont déjà prévu d’utiliser ce concept de digue en sol-chaux pour conforter certains de leurs ouvrages. D’autres technologies et modèles développés sur la plateforme Digue 2020 ont également vocation à être utilisés par les professionnels à moyen terme : la détection des fuites par méthodes acoustiques ou à l’aide de fibres optiques et les caractérisations non destructives des matériaux des digues par des méthodes géophysiques.

4.2.2

Suivi des vibrations liées aux ouvrages de défense côtière

Des recherches sont conduites au sein de l’université pour analyser notamment deux types de vibration : celles provenant du sol qui soutient les ouvrages de défense côtière, et celles émanant des ouvrages eux-mêmes.

L’un des axes de recherche du laboratoire de Géophysique et Évaluation Non Destructive du

département GERS (GERS-GeoEND) de l’Université Gustave Eiffel est dédié à l’imagerie interne et à la surveillance de la proche surface. La mise en œuvre de ces méthodes pour l’étude des digues de défense à la mer s’inscrit dans la thématique de la prévention contre la submersion marine.

Depuis 2020, dans le cadre du **projet régional SeeWall dans les Pays de la Loire**, les chercheur.es expérimentent plusieurs méthodes géophysiques de surveillance des ouvrages de défense à la mer basées sur l’acquisition de données multi-physiques, et notamment du bruit sismique ambiant : les vibrations permanentes du sol causées essentiellement par le ressac et l’activité humaine locale.

Conduit par le bureau d’études Calligée, en partenariat avec GERS-GeoEND et la société Sercel, ce projet a entrepris d’instrumenter plusieurs digues maritimes sur des durées allant de quelques heures à plusieurs années, en enregistrant en continu les ondes mécaniques constituant le bruit sismique ambiant, mais aussi la répartition de la résistivité électrique⁹⁴ dans le sous-sol (une propriété très sensible à l’état hydrique des matériaux et très souvent exploitée pour le suivi des digues) ou encore les paramètres environnementaux susceptibles d’affecter les ouvrages au cours du temps (paramètres météo et paramètres d’état hydrique et thermique du sol).

Les chercheur·e·s expérimentent plusieurs méthodes géophysiques de surveillance des ouvrages de défense à la mer.



Les vibrations sismiques ambiantes se propageant au sein des ouvrages étudiés représentent un outil d’auscultation dans la mesure où elles sont sensibles à de petites variations des propriétés mécaniques internes (rigidité des terrains, présence d’hétérogénéités, de fluides...). Une première série de tests menés aux **Moutiers-en-Retz** (département de la Loire-Atlantique), puis sur sept autres ouvrages de la région ont permis de prouver la faisabilité de ces approches. Depuis février 2022, les chercheur·e·s auscultent en continu un tronçon de 300 m de digue situé sur l’île de Noirmoutier⁹⁵.

© Calligée

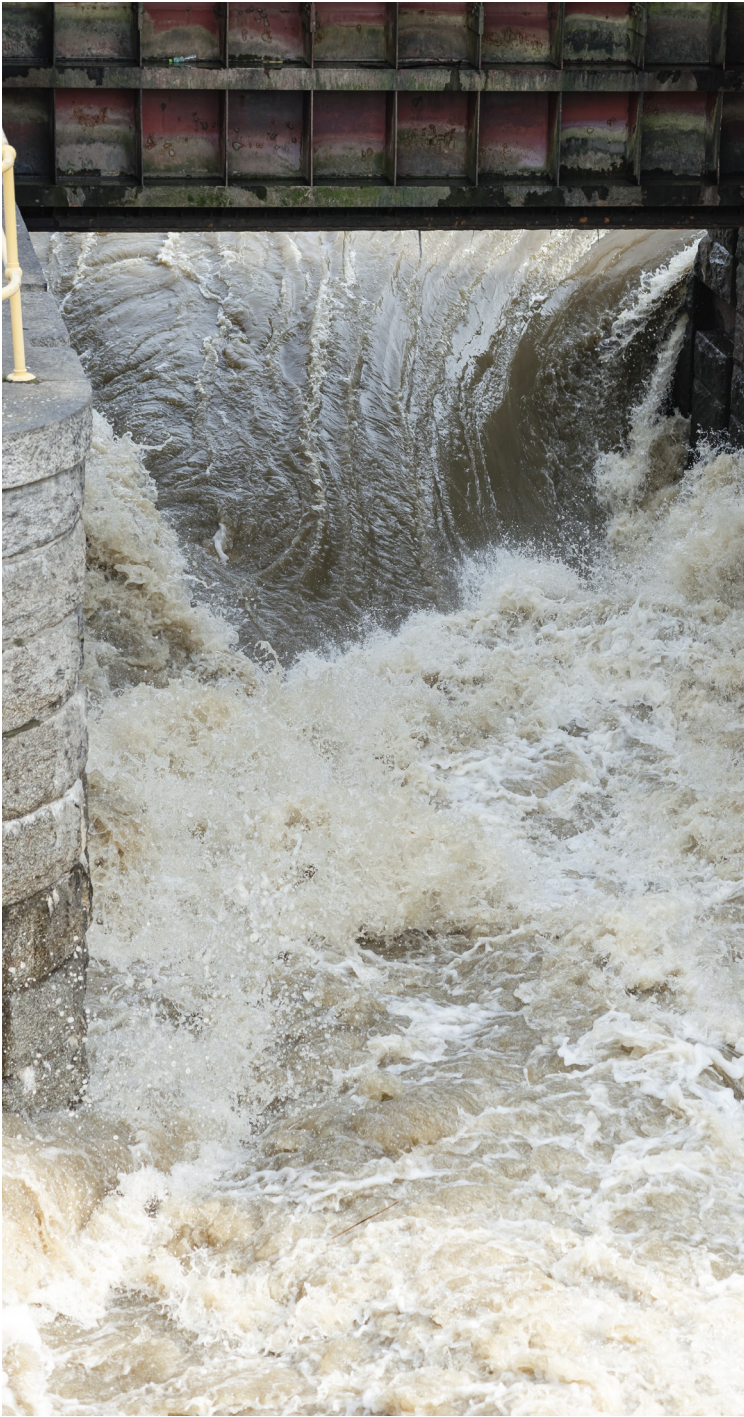


Maximilien Lehujeur du laboratoire GeoEND précise : *« Ce jeu de données unique donne un aperçu très précis du comportement d’un ouvrage de défense côtière en réponse à des sollicitations environnementales diverses sur plusieurs années, et permettra à terme de fournir un outil d’aide à la surveillance et au diagnostic. Les premières analyses ont fourni une cartographie des variations spatiales de deux grandeurs physiques (vitesse de propagation des ondes sismiques et résistivité électrique), donnant ainsi une certaine idée de la structure interne de l’ouvrage. Concernant l’exploitation du bruit sismique ambiant, défi au centre de ce projet innovant, ces données ont permis d’identifier de façon claire les sources de bruit sismique les plus favorables à l’étude de ce type d’ouvrage. Elles ont également permis de quantifier l’ampleur des variations des propriétés internes subies par la digue au fil des mois, et d’identifier les causes les plus probables associées à ces variations. »*

D’autres travaux menés en commun entre les laboratoires GERS-SRO (Sols, Roches et Ouvrages) et MAST-EMGCU de l’université ont mis en évidence en 2022, un lien entre les suivis vibratoires (fréquences) des structures et le phénomène d’affouillement. Après des modélisations en laboratoire et une instrumentation *in situ*, les résultats observés montrent l’intérêt du suivi vibratoire de l’affouillement.

94 : La résistivité électrique peut être mesurée par les méthodes électriques à courant continu. Elle est la propriété d’un matériau de résister au déplacement des charges électriques libres (électrons, ions) sous l’effet d’un champ électrique. Elle se mesure en ohms.

95 : Maximilien Lehujeur, ingénieur de recherche, GERS-GeoEND, Université Gustave Eiffel, interview juin 2024.



© Adobe Stock

96 : Mohamed Belmokhtar, ingénieur-chercheur en modélisation, expérimentation mécanique et thermique pour les infrastructures transports, MAST-LAMES, Université Gustave Eiffel, interview mai 2024.

97 : <https://emgcu.univ-gustave-eiffel.fr/recherches/surveillance-des-ouvrages/detection-de-defauts-par-analyse-de-reponse-vibratoire>

98 : Carpine R. : *Détection de défauts dans les structures de génie civil par analyse en ondelettes de réponse vibratoire*, Matériaux et structures en mécanique [physics.class-ph], Université Gustave Eiffel, 2022, français : **NNT : 2022UEFL2064 tel-04089271**

L’apport de la modélisation dynamique des piles de ponts a permis de définir un objet de type « poutre » d’un point de vue structural, avec diverses propriétés intrinsèques sensibles aux affouillements. En effet, la géométrie et les types de fondations d’une pile de pont laissent entrevoir divers comportements vibratoires. Il a été mis en évidence qu’au fur et à mesure que l’affouillement progresse, les fondations se dégradent, ce qui se traduit par un comportement vibratoire de plus en plus rigide, avec des amplitudes élevées, engendrant un comportement non linéaire.

L’analyse des données *in situ* sur plusieurs années a permis de constater des variations de fréquences spécifiques suite à des épisodes hydrauliques « extrêmes ». L’élévation du niveau d’eau du courant hydraulique autour de la pile crée un désordre laissant supposer un affouillement, car cela implique des courants plus importants et donc une possible érosion du sol autour de la pile, qui fait obstacle.

Ces travaux sont assez novateurs, complète Mohamed Belmokhtar, ingénieur-chercheur au laboratoire MAST-LAMES⁹⁶ *« car ils proposent une nouvelle méthode de suivi vibratoire des ouvrages soumis à l’affouillement, qui s’appuie sur diverses modélisations et des méthodes de traitement de données, permettant d’automatiser la détection d’un potentiel affouillement. Ces recherches présentent l’avantage d’une instrumentation utilisant peu de capteurs, mais en exploitant des données en grande quantité pour discriminer différents états structuraux, grâce à l’utilisation d’outils stochastiques et d’intelligence artificielle non supervisée (classification). »*

Le laboratoire MAST-EMCGU poursuit des recherches sur la détection, la localisation et le suivi, par méthode d’évaluation dynamique, de l’endommagement des structures du génie civil. En effet, l’une des techniques permettant d’obtenir un état de santé structurale d’une structure est sa réponse sous sollicitation dynamique. On va ainsi évaluer le suivi de son comportement vibratoire en condition de service : sous l’effet de la circulation, en réponse à une sollicitation externe, telle qu’un vent

fort. Les chercheur-e-s⁹⁷ précisent que « *la difficulté du diagnostic est de séparer les effets liés à un endommagement de ceux induits par les conditions extérieures, température, ensoleillement, hygrométrie..., et le type de chargement qui peut également modifier la réponse vibratoire. La composition des ouvrages de génie civil, avec des matériaux de nature diverse et particulièrement hétérogènes, ne facilite pas l’analyse des données.* »

Des travaux ont été menés afin de détecter des défauts sur les ouvrages du génie civil par analyse en ondelettes de réponse vibratoire (Carpine R., 2022)⁹⁸. L’étude du comportement vibratoire des structures en conditions opérationnelles, le *Structural Health Monitoring (SHM)*, constitue un moyen de contrôle de leur état de santé. À ces fins, la Transformée en Ondelettes Continue (TOC) se présente comme un outil adapté pour un suivi des ouvrages sur le long terme. Plusieurs améliorations des techniques actuelles d’analyse fondées sur cette transformée et au développement de nouvelles méthodes, appliquées au cas des ouvrages du génie civil et en particulier de ponts en béton, ont ainsi été développées par le laboratoire MAST-EMCGU.

Aujourd’hui, le suivi vibratoire des ouvrages n’est pas largement déployé sur le parc national, car il nécessite une instrumentation avec plusieurs capteurs et une modélisation préalable de l’ouvrage. Cette approche permet toutefois d’identifier de manière certaine les modes vibratoires, ce qui est essentiel pour détecter, localiser et quantifier d’éventuels dommages structurels. Certains ouvrages font l’objet d’une instrumentation vibratoire dans le cadre de la recherche et du développement, ainsi que les ouvrages hautement surveillés.

4.2.3 Capteurs de résistivité

Les capteurs de résistivité concernent les ouvrages d’art ou les grandes infrastructures en béton pour la mobilité et l’énergie, mais ils ne concernent pas les ouvrages hydrauliques.

Ces capteurs permettent de suivre la pénétration des agents pathogènes dans le béton, dont l’eau.

Dans le cadre d’un partenariat développé avec l’Andra⁹⁹ (Badr J., 2019)¹⁰⁰, les laboratoires MAST-LAMES (Laboratoire Auscultation, Modélisation, Expérimentation des Infrastructures de Transport) et GERS-GéoEND de l’université ont développé des **capteurs de résistivité** qui, placés dans des structures en béton, permettent de suivre les profils de teneur en eau de ces structures, afin de s’assurer de la conservation de leur durabilité à long terme.

En 2023, un déploiement dans différentes structures et différentes conditions d’exposition a été réalisé.

Pour un diagnostic détaillé et le recalcul de la durée de vie, afin de prolonger la période d’exploitation des structures de transport et nucléaires en béton, leurs gestionnaires ont besoin de mesures qualifiées et continues des indicateurs de performance du béton (résistance à la compression, module d’élasticité, porosité et teneur en eau). Pour ce suivi en continu, des systèmes de suivi par capteurs électromagnétiques, électriques et ultrasoniques ont été développés dans le cadre du **projet ScaNING** (2021-2025). Ces systèmes de suivi ont été validés et testés dans une structure métrique en béton armé soumise à des variations de température et à un séchage unidirectionnel contrôlé en continu.

4.2.4 Mesures spectroscopiques in situ

Au sein de l’Unité Mixte de Recherche entre l’Université Gustave Eiffel et le CEREMA, dédiée aux matériaux pour la construction durable (UMR MCD), d’autres techniques sont développées telles que des **mesures spectroscopiques in situ** pour évaluer l’attaque sulfatique externe (ASE) des ouvrages fluviaux et maritimes. Dans le cas d’une structure en béton immergée ou enterrée, l’ASE est considérée comme une menace significative pour la durabilité d’une structure contenant des matériaux cimentaires. Cette dégradation se manifeste par l’agrandissement des pores et des fissures, des modifications de la microstructure, ainsi que la perte de résistance mécanique du béton. L’objectif des travaux menés est de relier les informations microstructurales apportées par les techniques analytiques conventionnelles, et celles spectroscopiques à des propriétés macroscopiques. Elles contribueront

aussi à élaborer des modèles statistiques afin de prédire certaines propriétés macroscopiques à partir des variables sélectionnées. (El inaty F., Aydin B., Houdou M., Marchetti M., Quiertant M., Omikrine Metalssi O., 2024)¹⁰¹

4.2.5 Suivi des réactions de gonflement interne

Depuis une vingtaine d’années, les réactions de gonflement interne conduisant à une dégradation des performances mécaniques des bétons et provoquant des fissurations et des déformations excessives des structures sont étudiées au sein de deux laboratoires du département Matériaux et Structures (MAST) de l’université :

- le laboratoire Expérimentation et Modélisation pour le Génie Civil et Urbain du département Matériaux et Structures de l’université (EMGCU)
- et le laboratoire Comportement Physico-chimique et Durabilité des Matériaux (CPDM).

101 : El Inaty F., Aydin B., Houhou M., Marchetti M., Quiertant M., Omikrine Metalssi O. : *Appl. Sci.* 2024, 14(7), 2831 : <https://doi.org/10.3390/app14072831> : Long-Term Effects of External Sulfate Attack on Low-Carbon Cementitious Materials at Early Age.

© Adobe Stock



99 : Andra : Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs : <https://www.andra.fr/>

100 : Badr J. : *Conception et validation d’un capteur noyé de résistivité électrique en vue du suivi des profils de teneur en eau dans les bétons*, Matériaux composites et construction, Université Paul Sabatier – Toulouse III, 2019, français : **NNT : 2019TOU30153 tel-02735810**

Ces réactions de gonflement interne se développent sur des périodes longues, fréquemment durant plusieurs décennies ; elles constituent donc un problème majeur pour la gestion des ouvrages atteints (quelques barrages et installations industrielles, plusieurs centaines de ponts...). Elles sont fortement influencées par l’humidité environnante, ce qui peut engendrer des effets très nuisibles pour le fonctionnement des structures.

Ces travaux font l’objet de partenariats internationaux notamment avec le Canada et le Japon, ou sous l’égide de la RILEM (*International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*).

L’enjeu est de comprendre les mécanismes influençant l’occurrence et le développement de ces réactions (à l’aide d’essais accélérés permettant de disposer de résultats en quelques mois), afin de proposer aux maîtres d’ouvrage des outils de gestion, tant pour la prévention de ces réactions dans les ouvrages neufs que pour l’évaluation de l’état mécanique des ouvrages atteints, et la prédiction de leur évolution durant la totalité de la durée d’exploitation des structures.

4.2.6 Modélisation du comportement des ouvrages en béton affectés par des pathologies

Des travaux de modélisation, de simulation numérique et de modélisation en 3D des désordres engendrés sur les piles de ponts des ouvrages en site aquatique sont également en cours dans le laboratoire Expérimentation et Modélisation pour le Génie Civil et Urbain du département Matériaux et Structures de l’université (MAST-EMGCU).

D’un point de vue socio-économique, les résultats de cette approche permettraient de hiérarchiser et de planifier les actions de maintenance ou de

réhabilitation équilibrées entre l’aptitude au service de l’ouvrage et la dépense budgétaire.

L’ambition finale de cette recherche permettrait de mettre en place une modélisation 3D capable de répondre aux questions du gestionnaire d’ouvrages, quant à la planification des réparations et des maintenances à coût raisonné. (Abou Eid J., thèse en cours)¹⁰²

Le **projet exploratoire ORGIASMES** avait, quant à lui, pour objectif d’explorer de nouvelles voies de travail dans le domaine de la modélisation numérique des ouvrages en béton (barrages, infrastructures de transport...) affectés, cette fois-ci, par les réactions de gonflement interne (RGI), phénomènes dans lesquels interviennent de nombreux paramètres, dont la teneur en eau du béton.

Le projet s’est concentré sur les méthodes d’identification des paramètres nécessaires à l’application des modèles numériques, au recalcul et à l’évaluation des ouvrages réels.

Les principaux résultats de ces travaux ont été la quantification des dépendances du modèle vis-à-vis de nombreux facteurs thermiques, hydriques, chimiques et mécaniques ; la mise au point de méthodes d’identification des paramètres de gonflement robustes ; la confirmation de l’intérêt de prendre en compte des couplages forts entre les phénomènes hydriques, thermiques, chimiques et mécaniques.

¹⁰² : Abou Eid J., thèse en cours, Génie civil, MAST-EMCGU (2022) : *Modélisation, simulation numérique et mesures de la fissuration 3D dans le processus de corrosion de l’interface acier/béton* : <https://theses.fr/s356566>

4.3 Autres solutions : les aménagements possibles des villes et des territoires

Les digues, qui s’étendent en France métropolitaine sur environ 8 000 kilomètres, ont été considérées jusque-là comme un objet technique servant principalement à se protéger contre les inondations.

Des évolutions récentes d’ordre climatique, politique et social poussent les acteurs territoriaux à se pencher sur leur devenir et à redéfinir le rôle de ces murs. Les digues sont-elles la seule et véritable solution face au risque d’inondation ?

Force est de constater que le succès des digues possède aussi une face cachée : des surcoûts importants pour les collectivités, un problème d’entretien, et une efficacité remise en question par les expert·e·s.

Les chercheur·e·s de l’université participent à la mise en œuvre de nouvelles solutions de gestion des risques liés à l’eau en privilégiant des aménagements du territoire, et notamment du littoral, ou en développant la lutte contre l’artificialisation des sols ou les solutions fondées sur la nature.

4.3.1 Aménagement du littoral

En effet, face aux impacts du changement climatique, les littoraux font, aujourd’hui, l’objet de nombreuses préoccupations : élévation du niveau marin, érosion côtière, perturbation des écosystèmes, littoralisation intensive... Les récentes expérimentations sur les littoraux ont démontré la nécessité de repenser les modèles économiques, spatiaux et culturels des décennies précédentes. Les acteurs locaux et nationaux ont identifié des enjeux auxquels seules de nouvelles recherches, méthodes et expérimentations pourront apporter des réponses.

Ce sont les objectifs de la chaire « Le littoral comme territoire de projets », portée par l’École d’architecture de la ville & des territoires Paris-Est. Autour de cette thématique, particulièrement transversale et interdisciplinaire, cette chaire partenariale d’enseignement et de recherche fédère des chercheur·e·s

et des enseignant-e-s, des partenaires institutionnels publics et des acteurs économiques privés afin d’analyser les processus existants pour mieux les réinventer¹⁰³.

4.3.2
Lutte contre l’artificialisation des sols

Afin de limiter la consommation des sols dans l’aménagement des territoires et dans la perspective de la mise en œuvre de l’objectif national de Zéro Artificialisation Nette (ZAN), le **projet de recherche MUSE** (2018-2021), piloté par le CEREMA et financé par l’ADEME, a permis de développer, en lien avec trois métropoles partenaires (Nantes, Châteauroux et Aix-Marseille-Provence), une méthode de cartographie de la multifonctionnalité de leurs sols. GERS-EE a contribué, *via* l’Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville (IRSTV), également partenaire de ce projet.

Cette méthode permet d’intégrer la qualité des sols par la prise en compte de quatre fonctions du sol dans les PLUi. L’approche MUSE permet d’aborder l’objectif ZAN dans les documents d’urbanisme avec une vision qualitative des sols, qui aide non seulement à l’identification des sols remplissant le plus grand nombre de fonctions pour favoriser leur préservation, mais également à préserver les sols remplissant des fonctions indispensables pour répondre aux enjeux du territoire. Au-delà des trois collectivités partenaires, le projet complémentaire Soluc3ion a évalué si cette approche pouvait être généralisée à l’ensemble des collectivités territoriales de la France métropolitaine. L’objectif est d’évaluer et d’améliorer la portée opérationnelle de l’approche méthodologique proposée dans MUSE.

Un rapport rend compte de la méthode adoptée et des résultats recueillis auprès d’un panel varié de collectivités. Il ressort que l’approche MUSE permet de constituer un véritable porter à connaissance sur les sols et leur multifonctionnalité, qu’il serait utile de généraliser à l’ensemble du territoire français et d’intégrer dans les différents documents de planification (SRADDET¹⁰⁴, SCoT¹⁰⁵, PLUi¹⁰⁶). La méthode

reste cependant très technique et sa mise en œuvre nécessitera un accompagnement.

D’autres études sont menées à l’échelle des quartiers et de la ville pour désimperméabiliser les sols et par conséquent, mieux gérer les eaux de ruissellement. Ainsi, le **projet ANR PERMEPOLIS**, débuté en avril 2024, piloté par le BRGM, mobilise différents chercheurs de l’IRSTV, dont trois du de GERS-EE. Ce projet souhaite mettre en place une méthodologie d’élaboration des stratégies de désimperméabilisation dans les espaces urbanisés, à travers un partenariat de recherche co-construit entre les parties prenantes (en particulier la collectivité) et les chercheurs, dans un cadre pluridisciplinaire associant les volets technique, juridique et social.

Le projet de recherche MUSE [...] a permis de développer, en lien avec trois métropoles partenaires [...], une méthode de cartographie de la multifonctionnalité de leurs sols.

.....

À partir d’une connaissance détaillée de l’occupation du sol fournie par des outils de télédétection, le projet définira le potentiel de désimperméabilisation d’une agglomération urbaine en évaluant les bénéfices et les risques liés à la pollution des sols et de la nappe, l’état hydrique du sol et le confort thermique. Le territoire d’application est l’agglomération nantaise, et différents scénarios de désimperméabilisation seront étudiés.

103 : <https://paris-est.archi.fr/la-recherche/chaire>
104 : Schémas régionaux d’aménagement, de développement durable et d’égalité des territoires (SRADDET).
105 : Schéma de cohérence territoriale (SCoT).
106 : Plan local d’urbanisme intercommunal (PLUi).



5

Solutions pour lutter contre la pollution

.46

5.1 Méthodes innovantes
pour la surveillance de l'eau

.47

5.2 Purification des eaux

5.1

Méthodes innovantes pour la surveillance de l’eau

5.1.1 Techniques d’analyse de l’eau

Sous l’impulsion des **projets I-SITE Nano-4-Water** et **DynaPlast**, et de deux thèses de doctorat (Erfan M., 2022¹⁰⁷, et Elsayed A., 2022¹⁰⁸), une équipe du laboratoire ESYCOM a mis au point un instrument portable permettant l’analyse des microplastiques (polluants de l’eau ou de l’air). L’instrument combine des puces micro-fluidiques réalisées dans les salles blanches d’ESIEE Paris, la spectroscopie optique, le traitement d’image et l’intelligence artificielle. Une *start-up*, IZONICS¹⁰⁹, a été créée pour accompagner le développement de cette innovation et sa mise en marché. L’ambition est de rendre l’analyse des microplastiques accessibles à tous et partout, du fait de la rapidité, la portabilité, et le coût réduit de l’instrument développé.

La gestion des réseaux d’eau nécessite également une surveillance massive et peu coûteuse. Cependant, la majorité des capteurs d’eau multifonctionnels ont un coût élevé, ce qui empêche les

déploiements à grande échelle. Pour résoudre ce problème, le **Projet Européen PROTEUS** (*adaPtive micROfluidic- and nano-enabled smart systems for waTEr qUality Sensing*) a permis une réduction d’un facteur dix en termes de taille de capteurs et de coût unitaire de mesure par rapport à l’état de l’art. Plusieurs fonctions ont été intégrées, notamment des capteurs multi-paramètres physiques et chimiques, en recourant aux technologies de miniaturisation, notamment les microtechnologies au sein des salles blanches d’ESIEE Paris et les nanomatériaux fonctionnels développés au sein de l’équipe Nacre commune entre l’Université Gustave Eiffel et le LPICM, UMR CNRS École Polytechnique. Le **projet PROTEUS** (2015-2018), porté par le laboratoire Instrumentation Modélisation Simulation et Expérimentations (ISME-COSYS), associe le laboratoire ESYCOM. Il a fait l’objet de tests dans la boucle d’eau de l’équipement remarquable Sense-City, puis un déploiement dans la ville de Almada, au Portugal.

Le **projet Euro-Inde LOTUS** (2019-2023)¹¹⁰ conduit au sein du laboratoire Instrumentation, Modélisation, Simulation et Expérimentation (IMSE) du département Composants et Systèmes (COSYS) de l’université, a poursuivi ces travaux avec deux objectifs : d’une part, rapprocher la solution d’une application commerciale, d’autre part, évaluer sa pertinence dans le contexte indien sur de multiples cas d’usage de l’eau, typiques des pays du Sud global (transition



© Adobe Stock

de réseaux intermittents à des réseaux continus, distribution d’eau par citernes, puits, irrigation, eaux usées). À la suite de ce projet, la solution technologique, à base de capteurs électriques à nanotubes de carbone, est en cours de transfert technologique à une société indienne, Hydroscope Technology Pvt. Ltd. Par ailleurs, dans le cadre du **projet européen HS4U** (2022-2025)¹¹¹, la technologie a été adaptée pour la détection d’ARN ou d’ADN dans l’eau, notamment pour l’anticipation des épidémies à bord des bateaux de croisière.

De manière générale, ces projets montrent l’intérêt des capteurs à base de matériaux innovants, tels que des nanomatériaux ou des polymères, qui sont très sensibles à l’environnement pour fabriquer des capteurs de petite taille à des coûts abordables.

5.1.2 Réseaux d’eau intelligents

La gestion des réseaux d’eau serait largement facilitée par une surveillance massive et peu coûteuse, qui n’est aujourd’hui pas possible étant donné le coût et la taille des solutions commerciales, même dans les pays industrialisés. Par ailleurs, dans les pays du Sud global comme l’Inde, la transition de

réseaux d’eau intermittents vers des réseaux d’eau continus pose de fortes questions d’acceptabilité. En effet, les populations habituées aux réseaux intermittents considèrent cette eau comme non potable, et utilisent donc des sources d’eau alternatives, dont la gestion en quantité et qualité est beaucoup moins efficace (écologiquement et économiquement). La transition vers l’utilisation des réseaux d’eau continus, quand ceux-ci sont mis en place, n’est pas du tout automatique, car il faut construire la confiance de la population dans cette modalité d’accès à l’eau. Le déploiement de capteurs dans les nouveaux réseaux d’eau, si leur coût et leur fiabilité le permettent, favorisera une transition des usages en créant la confiance de la population dans la qualité de l’eau mise à disposition. Répondre à ces enjeux a été au cœur des objectifs des **projets Proteus**, puis **LOTUS**, *via* le développement de nouvelles solutions de mesure.

En parallèle d’un suivi constant de la qualité des eaux, les chercheur·e·s de l’université ont analysé les différents dispositifs de filtration des eaux pluviales, tels que les noues filtrantes ou encore les cellules de biorétention, et développé des techniques innovantes de purification et de traitement des eaux.

111 : <https://hs4u.eu/the-hs4u-project/>

107 : Elsayed A., Erfan M., Sabry YM., Dris R., Gasperi J., Barbier JS., Marty F., Bouanis F., Luo S., Nguyen BTT., Liu AQ., Tassin B., Bourouina T.: A microfluidic chip enables fast analysis of water microplastics by optical spectroscopy, *Scientific Reports* 11, 10533 : <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89960-4> (2021).

108 : Elsayed A. : *Micro-Opto-Fluidics for fast analysis of micro-plastics contaminants of water*, thèse 2022, Électronique, Optronique et Systèmes, ESYCOM, Université Gustave Eiffel-ESIEE Paris : <https://theses.fr/2022UEFL2008>

109 : <https://izonics.com/>

110 : <https://www.lotus-india.eu/>

5.2

Purification des eaux

« Pour les ouvrages ayant fait l’objet d’un suivi expérimental *in situ*, et du point de vue hydrologique, la noue végétalisée présente les abattements les plus importants. »

5.2.1 Dispositifs de filtration des eaux

5.2.1.1 Noues filtrantes

Un dispositif de **noue filtrante** est une structure conçue pour gérer et filtrer les eaux pluviales de surface. Il est généralement constitué d’une dépression peu profonde et de grande largeur dans le sol. La noue peut être enherbée, plantée d’arbres ou d’arbustes et est revêtue de matériaux poreux ou de couches filtrantes, qui permettent à l’eau de s’infiltrer lentement dans le sol tout en retenant les particules solides et les contaminants.

On retrouve généralement ces aménagements le long de la voirie. Ces dispositifs sont utilisés pour réduire les risques d’inondation en permettant l’infiltration des eaux de pluie dans le sol, en filtrant les polluants et en reconstituant les réserves d’eau souterraine. Ils contribuent ainsi à la gestion durable des eaux pluviales et à la préservation de la qualité de l’eau.

Des travaux sur la rétention des micropolluants (métaux, hydrocarbures, pesticides) par ces ouvrages de gestion alternative des eaux pluviales ont également été menés dans le cadre du **projet Matriochkas**.

L’objectif principal est ainsi l’évaluation des performances des noues, mais aussi d’autres dispositifs de gestion des eaux pluviales vis-à-vis des flux d’eau et des flux de micropolluants. Dans le cadre de ce projet et à l’échelle de l’agglomération de Nantes Métropole, un suivi expérimental de trois types d’ouvrages de gestion alternative des eaux pluviales

(bassin en eau, bassin sec et noue végétalisée) a été effectué, et un zoom particulier a été réalisé sur le fonctionnement de deux noues végétalisées. « Pour les ouvrages ayant fait l’objet d’un suivi expérimental *in situ*, et du point de vue hydrologique, la noue végétalisée présente les abattements les plus importants, tant en volume que pour le débit de pointe par événement pluvieux. En volume, sur une année, la noue présente un abattement médian de 87%, alors que les deux bassins ont des abattements médians de l’ordre de 30%. En ce qui concerne la qualité de l’eau, les concentrations des contaminants en entrée d’ouvrage sont souvent faibles; l’abattement en concentration est variable selon le type de micropolluant, il est globalement assez faible pour les métaux en raison d’une faible concentration en matières en suspension en entrée d’ouvrage. L’abattement en flux de polluants reste plus important sur la noue végétalisée, en raison du fort abattement du volume. » (Rodriguez F., mai 2024)¹¹². Le dispositif pilote mis en place a permis d’étudier en parallèle deux noues, l’une « standard », dont le substrat est le sol en place (en l’occurrence un loam limoneux), et l’autre de filtration constituée de sable et de gravier. Favoriser l’infiltration s’avère efficace dans le fonctionnement d’une noue, évidemment en réduisant fortement l’écoulement de surface, mais également en activant les processus épuratoires au sein du massif de sol, autant pour les micropolluants métalliques (Zn) qu’organiques (glyphosate, pyrène, phénanthrène). L’impact du cheminement hydraulique sur le rôle épuratoire a également été mis en évidence lorsque l’alimentation des noues était réalisée latéralement, sur les berges des noues,

par rapport à une alimentation le long du fil d’eau (en tête de noue). « Le fait d’apporter, par l’observation, des preuves objectives du bien-fondé des ouvrages d’infiltration de type noue est un véritable levier pour convaincre les différents acteurs opérationnels des collectivités d’agir en faveur d’une gestion plus à la source des eaux pluviales. Nos contacts récents avec le service gestion intégrée eaux pluviales de la Direction du Cycle de l’Eau montrent un réel élan pour une mise en œuvre plus systématique de ce type de solutions. » (Rodriguez F., mai 2024)¹¹³

5.2.1.2 Amélioration des eaux pluviales via une noue filtrante

Les microplastiques sont une série de polluants de plus en plus préoccupants dans les environnements aquatiques, atmosphériques et terrestres. En particulier, le ruissellement des eaux pluviales est une voie d’entrée importante des microplastiques dans l’environnement en aval. Lors de travaux précédents, il a été démontré que les microplastiques d’une taille supérieure à 106 µm peuvent être efficacement éliminés et retenus des eaux pluviales à l’aide d’une cellule de biorétention ou noue filtrante, un type d’infrastructure verte.

Toutefois, au fil du temps, les microplastiques, particules de plastique de 1 µm à 5 mm, se fragmentent en particules de plus en plus petites en raison des contraintes mécaniques et/ou biologiques, et de l’exposition à la lumière du soleil. Or, plus la taille des

microplastiques diminue, plus le risque de transfert par les pores du sol de biorétention vers les eaux de surface, les eaux souterraines ou les systèmes municipaux hydrauliquement connectés est élevé. Une cellule de biorétention, située à Vaughan, en Ontario, a été surveillée pendant deux ans en 2018 et 2019. Des échantillons d’eaux pluviales ont été prélevés à l’entrée et à la sortie de la cellule, la zone de drainage étant constituée d’un parking en pavés de caoutchouc recyclés. Les résultats précédents pour les microplastiques > 106 µm ont montré une diminution de 84 % de la concentration de 186 à 31 microparticules/L entre l’entrée et la sortie du dispositif de biorétention. De nouveaux résultats sur le devenir de la gamme de microplastiques de taille > 25 µm ont mis en évidence une diminution moyenne de 67 % de la concentration entre l’entrée et la sortie de la cellule de biorétention. Ces nouveaux résultats démontrent qu’une cellule de biorétention de conception classique élimine efficacement les microplastiques jusqu’à 25 µm. (Smyth K., Drake J., Van Seters T., Gasperi J., Dris R., 2022)¹¹⁴

En complément des recherches menées sur ces dispositifs de purification, d’autres méthodes de traitement de l’eau utilisant l’énergie solaire et l’oxydation anodique ont été développées par les chercheur·e·s de l’université.

112 : Fabrice Rodriguez, chercheur au Laboratoire Eau et Environnement du Département GERS (GERS-EE) de l’Université Gustave Eiffel, interview mai 2024

113 : Fabrice Rodriguez, chercheur au Laboratoire Eau et Environnement du Département GERS (GERS-EE) de l’Université Gustave Eiffel, interview mai 2024

114 : Smyth K., Drake J., van Seters T., Gasperi J., Dris R. et al. : *Bioretenion cells remove increasingly small microplastics from stormwater*. DesignLIFES, Design of Living Infrastructure for Ecosystem Services, août 2022, Toronto, Canada : [hal-03760718](#)



© Adobe Stock

5.2.2 Techniques de purification de l’eau par l’énergie solaire

5.2.2.1 Distillation-désalinisation accélérée

Sous l’impulsion du **projet I-SITE Nano-4-Water**, le potentiel des micro et nanotechnologies a été exploré au sein du laboratoire ESYCOM, afin de proposer et d’évaluer deux méthodes de purification de l’eau exploitant l’énergie solaire. La première méthode consiste à exploiter l’énergie solaire pour générer de la vapeur d’eau de façon accélérée par méthode dite interfaciale. À cet effet, des méta-mousses ont été proposées comme déclinaison originale des méta-matériaux, et ont été réalisées dans les salles blanches d’ESIEE Paris. L’application visée est la génération accélérée de vapeur par énergie solaire utile pour la purification de l’eau par distillation ou

désalinisation. Le méta-matériau optimal (Gao L., Nefzaoui E., Marty F., Wei X., Bastide S., Leprince-Wang Y., Bourouina T., 2021)¹¹⁵ a nécessité l’optimisation simultanée des propriétés radiatives, de la porosité et de la conductance thermique, afin de réduire les pertes d’énergie dans le milieu environnant. Des performances dépassant l’état de l’art ont été obtenues avec un rendement de 89 % pour la conversion de l’énergie solaire en chaleur latente de vaporisation de l’eau.

5.2.2.2 Distillation-désalinisation accélérée

En complément de la distillation, l’énergie solaire a été exploitée pour des réactions de photocatalyse ayant pour but de purifier davantage l’eau. Elle se veut complémentaire de la distillation, car elle permet de purifier les polluants résiduels volatils qui persistent après la mise en œuvre de la distillation. À cet effet, un nanomatériau robuste aux environnements extrêmes a été réalisé (Gao L., Nefzaoui E., Marty F., Wei X., Bastide Y., Leprince-Wang Y., Bourouina T. 2021)¹¹⁶, avec de hautes performances de dépollution photocatalytique. Par ailleurs, des

travaux portant sur l’intégration de nanofils d’oxyde de zinc dans des micro-réacteurs microfluidiques ont permis de révéler que la dépollution de l’eau au sein d’une puce microfluidique ne nécessite qu’une durée de cinq secondes pour une dépollution totale, comparativement aux trois heures nécessaires à échelle macroscopique. (Azzouz I., Habba Y., Capochichi-Gnambodoe M. et al., 2018)¹¹⁷

5.2.3 Traitement de l’eau par oxydation anodique

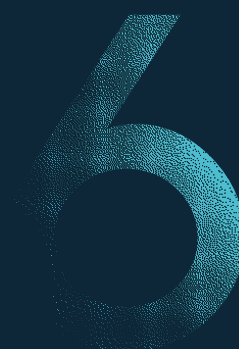
Des travaux ont été menés au sein du Laboratoire Géomatériaux et Environnement (LGE) de l’université sur l’application de nouvelles électrodes en oxyde de titane pour le traitement de l’eau par oxydation anodique. Plus spécifiquement, les recherches se sont concentrées sur l’influence de la structure poreuse de ces différentes électrodes en oxyde de titane sur l’efficacité du procédé d’oxydation anodique pour l’élimination des polluants organiques et l’évolution des chlorures (Jing M., 2022)¹¹⁸. Les résultats ont démontré que l’efficacité de toutes les électrodes poreuses a été améliorée. La diffusion est en effet accélérée à l’intérieur des pores de petite taille. Le transport de matière des polluants a pu alors être amélioré en augmentant la convection au travers de l’électrode. Une attention particulière doit être portée sur l’évaluation et l’optimisation de la durée de vie de ces matériaux, afin d’envisager un développement industriel.

Les villes de demain doivent s’adapter aux conséquences du changement climatique, et notamment à la hausse des températures et au manque d’eau. Face à ces enjeux, diverses solutions d’adaptation pour réduire la chaleur en ville ont été proposées et testées sur différents territoires.



© Adobe Stock

118 : Jing Ma. : *Influence of the porous structure of differen TiOx electrodes on the effectiveness of the anodic oxidation process for water treatment. Environmental Engineering*, Université Gustave Eiffel, 2022, English : **NNT: 2022UEFL2061 tel-04348093**



Solutions pour lutter contre le réchauffement climatique

.50

6.1 Rafraîchissement urbain

.54

6.2 Collecte d'eau dans l'air ambiant

.54

6.3 Retrait et gonflement des argiles (RGA)
sous les fondations des maisons :
analyse et traitement des désordres
créés par la sécheresse

6.1 Rafraîchissement urbain

Les modèles montrent que les canicules sont et seront de plus en plus intenses, longues et fréquentes. L’été, la chaleur est emmagasinée dans les matériaux, limitant le rafraîchissement nocturne. Pour réduire la chaleur en ville, de nombreuses solutions sont proposées (nouveaux revêtements, ombrages, végétalisation, etc.). Toutes les solutions ne sont pas équivalentes en termes d’impact, d’usage, de consommation ou de coût. Elles sont généralement analysées de manière indépendante.

Le **projet FRAICHEUR** (2020–2022) mesure l’efficacité de ces dispositifs de refroidissement dans une situation expérimentale. En particulier, les éléments mesurés concernant l’efficacité de la modification de l’albédo (en « heures chaudes » et en « heures fraîches ») et de l’ombrage donnent des résultats originaux. En résumé, on peut dire que les rues canyon, lorsqu’elles laissent entrer le rayonnement solaire, sont des rues particulièrement chaudes. Elles peuvent être rafraîchies par l’ombrage ou l’arrosage des rues. L’arrosage des rues est plus efficace que l’ombrage ou la modification de l’albédo pour réduire rapidement la température de l’air, mais l’effet n’est pas durable. Les rues canyon au revêtement léger (avec un albédo élevé) ne sont pas efficaces pour les piétons, car elles réchauffent les rues pendant les heures les plus chaudes. L’ombrage des rues canyon piétonnes est une solution efficace pour le confort thermique des rues ensoleillées, car il réduit le rayonnement.

Toutefois, l’ombrage, qui semble être une solution intéressante pour les heures les plus chaudes, a tendance à ralentir le refroidissement des rues en fin de journée, certainement par des blocages aérodynamiques. De plus, les rues canyon sont des espaces où la pollution a tendance à s’accumuler ; les structures d’ombrage ne devraient pas accentuer cette tendance.

Ainsi, l’ombrage pourrait être limité aux rues piétonnes et la conception de l’ombrage devrait être optimisée pour maximiser l’ombrage et minimiser l’obstruction aérodynamique. Pour cela, la modélisation est certainement la meilleure approche, car elle permet d’intégrer de nombreux facteurs, tels que la forme du canyon, son orientation et la direction du vent dominant. Des dispositifs d’ombrage dynamiques – ouverts pendant les heures les plus chaudes et fermés à la fin de la journée pour permettre une ventilation optimale – pourraient être une solution, mais ils doivent être robustes et non expansifs. (Ruas A., Clemence V., Barroca B., Ulanowski Y., 2024)

Ces recherches ont également permis d’étudier l’utilisation de l’équipement Sense-City de l’université pour comparer les dispositifs de refroidissement. Grâce à ce travail, la métrologie pour l’étude comparative des dispositifs a été améliorée et des méthodes pour minimiser l’impact des variations météorologiques journalières dans les analyses ont été proposées. Bien que de petite taille, la rue canyon Sense-City se comporte comme une rue canyon classique en termes d’échanges thermiques, ce qui permet de valider la pertinence de l’équipement Sense-City pour réaliser des expériences sur les vagues de chaleur et le refroidissement.

6.1.1 Arrosage urbain

L’arrosage urbain a été étudié sur cinq sites différents dans Paris intra-muros dans le cadre de trois thèses CIFRE avec la Ville de Paris (Hendel M., 2013–2016¹¹⁹, Parison S., 2017–2020 et Chanial M., 2020–2024) et du **projet européen LIFE Cool and Low-Noise Asphalt**¹²⁰. Ces travaux ont permis de démontrer

© Adobe Stock



que l’arrosage urbain est une technique efficace pour le rafraîchissement urbain. Du point de vue de la thermique urbaine, il permet de réduire la température de surface des revêtements arrosés jusqu’à 15 °C au soleil (5 °C à l’ombre) et de diviser au moins par deux le stockage de chaleur des revêtements arrosés.

Ces impacts thermiques sur les surfaces arrosées, comparables en efficacité aux revêtements réfléchissants, se traduisent par une réduction moyenne du phénomène d’îlot de chaleur urbain (ICU) de –0,25 °C, ainsi que des effets microclimatiques concrets pour les usagers et les piétons avec une baisse de la température de l’air jusqu’à 1 °C, de la température moyenne radiante jusqu’à 6 °C et du stress thermique jusqu’à 3,4 °C (UTCI)¹²¹.

Il est à noter que si l’arrosage urbain augmente légèrement l’humidité relative (de l’ordre de 5 %), il n’augmente pas la charge radiante du piéton, contrairement aux revêtements réfléchissants, dont l’impact en journée peut dépasser le bénéfice obtenu sur les températures d’air.

Les analyses thermiques ont permis d’optimiser l’efficacité de l’arrosage urbain en limitant sa consommation d’eau. À cette fin, l’eau arrosée doit être limitée à la quantité qui s’évapore et ne pas provoquer le

119 : Hendel M. : *Pavement-Watering in Cities for Urban Heat Island Mitigation and Climate Change Adaptation*, Engineering Sciences [physics], Université Paris Diderot Paris 7, 2015 : English : **tel-01258289**

120 : *Projet Cool & Low Noise Asphalt* : <https://www.life-asphalt.eu/>

121 : UTCI : indice universel du climat thermique.

ruissellement. Généraliser cette pratique à 10 % des espaces publics parisiens, par exemple les plus sensibles aux fortes chaleurs, représenterait alors une consommation d’eau de l’ordre de 6 000 m³/jour, soit environ 3 l/jour et par habitant.

L’une des principales limites au rafraîchissement par arrosage tient à la nécessité d’apporter fréquemment de l’eau aux revêtements traités, qui sinon sèchent rapidement, à savoir entre dix et trente minutes selon le type de revêtement. Cela tient en grande partie à la conception de l’espace public et de la voirie qui est imperméable.

L’une des principales limites au rafraîchissement par arrosage tient à la nécessité d’apporter fréquemment de l’eau aux revêtements traités.

.....

D’autres travaux dans le cadre de la thèse de Maxime Frere¹²², financée par une collaboration de recherche avec le groupe Eiffage, ont permis d’analyser l’efficacité d’un revêtement « éponge » qui est imbibé d’eau lors de cycles d’arrosage (toutes les heures) sur un démonstrateur instrumenté. Au démonstrateur, l’eau ruisselée est récupérée par une cuve de stockage pour être réutilisée au cycle d’arrosage suivant. Dans le cadre du démonstrateur, les zones les plus en hauteur sèchent au bout de 25-35 minutes, tandis que les zones les plus basses restent humides en continu entre cycles d’arrosage.

6.1.2
Matériaux urbains

Les travaux de terrain sur l’arrosage urbain ont très vite mis en avant les différences de comportement entre revêtements arrosés. À ce titre, une expérimentation en laboratoire a été mise en place pour

étudier le comportement thermique et climatique de structures de revêtements urbains. Une vingtaine de structures a été étudiée dans le cadre de trois thèses, dont deux CIFRE Ville de Paris (Parison S., Chaniel M. et Karam G., 2019-2023)¹²³ et le **projet FEDER UIA OASIS**¹²⁴. Ce dispositif a été complété par un démonstrateur instrumenté permettant de comparer seize échantillons de revêtements sous conditions réelles, étude menée dans le cadre d’un postdoc (Parison S. , 2021-2022) et d’une thèse CIFRE Ville de Paris (Abboud C., 2023-2026).

En complément, une expérimentation similaire a été développée pour étudier les structures de toiture dans le cadre de la thèse de Maxime Chaumont¹²⁵, financée par le **projet ANR Urban Materials for Cool Cities**¹²⁶.

6.1.2.1
Revêtements urbains

Les travaux sur les revêtements urbains révèlent que la lutte contre l’îlot de chaleur urbain et l’amélioration diurne du stress thermique peuvent être en opposition. C’est le cas, par exemple, de l’augmentation d’albédo¹²⁷ des revêtements, qui permet de réduire les températures de surface maximales (jusqu’à 12°C en passant d’un albédo de 0,08 à 0,41) et leur contribution à l’ICU, mais au prix d’une radiosité accrue en journée, susceptible de détériorer le stress thermique des piétons.

À l’inverse, les structures à faible albédo limitent leur radiosité en journée, mais libèrent la chaleur accumulée le soir et la nuit, et contribuent donc à l’ICU. Les structures les moins problématiques sont celles qui mobilisent l’eau, soit par des solutions grises (arrosage urbain, revêtement éponge...), soit par des solutions vertes (gazon, pavé engazonné...). Les structures perméables et naturelles ont la plus faible inertie thermique et sont très favorables pour l’ICU, sans poser de difficulté additionnelle pour le stress thermique en journée. À ce titre, il est à noter l’intérêt des actions de désimperméabilisation. Toutefois, elles ne sont généralement pas compatibles avec les contraintes mécaniques fortes auxquelles sont exposés les revêtements routiers et sont donc difficiles à généraliser.

L’étude de l’arrosage de différentes structures révèle que le débit optimal à arroser est d’autant plus élevé que la température du revêtement sec est haute. Dans l’ensemble, l’arrosage tend à faire converger le comportement thermique des revêtements vers un même niveau plancher, déterminé par les conditions météorologiques et d’ensoleillement.

6.1.2.2
Toitures

Les travaux menés sur le comportement thermique et climatique de toitures réfléchissantes ou absorbantes en structure béton tirent des conclusions similaires à ceux menés sur les revêtements. Elles présentent notamment des impacts similaires aux modifications d’albédo, sachant que la radiosité des toits a peu d’impacts négatifs en l’absence de fréquentation piétonne. Des bâtiments avoisinants plus hauts peuvent néanmoins souffrir de cette radiosité additionnelle, ce qui est également valable pour les revêtements réfléchissants. Toutefois, les toitures présentent deux spécificités importantes par rapport aux revêtements.

D’une part, le « sous-sol » d’une toiture est un local occupé ou habité. À ce titre, la chaleur transmise en profondeur d’une toiture a un impact immédiat sur les occupants, indépendamment de la dynamique de restitution de la chaleur ainsi absorbée (effet ICU). D’autre part, les toitures peuvent être isolées thermiquement, et la position de cet isolant (intérieur ou extérieur) a un impact significatif sur le comportement thermique et climatique de la toiture. Isolée de l’extérieur (ITE), la toiture présente une faible inertie thermique vers l’extérieur et une forte inertie vers le local sous-jacent. Isolée de l’intérieur (ITI), c’est le contraire.

Ainsi, les structures ITE tendent à chauffer fortement en surface en journée, mais elles stockent très peu de chaleur et n’en restituent quasiment pas la nuit, et ont donc une très faible contribution à l’ICU. À l’inverse, les structures ITI s’échauffent moins en journée grâce au stockage de chaleur dans la couche de béton, mais cette chaleur est restituée la nuit et contribue donc à l’ICU. Il est également à noter que, parmi ces deux structures, qui ont pourtant la même résistance thermique, ce sont les structures ITI qui transmettent le moins de chaleur au local sous-jacent, même si cette quantité de chaleur reste faible pour les structures ITE.

De manière similaire aux revêtements, le débit optimal d’arrosage des structures de toiture étudiées est d’autant plus important que leur température sèche est élevée. Les toitures aussi présentent un niveau plancher commun vers lequel convergent les structures lorsqu’elles sont arrosées.

122 : Frere M. : *Îlots de fraîcheur urbains : matériaux et choix d’aménagement*, thèse en cours, physique, Université Paris Cité.

123 : Parison S. : *Matériaux urbains et nouveaux usages de l’eau pour le rafraîchissement des villes : Stratégies d’arrosage de différents revêtements parisiens*, thèse de doctorat Physique, 2020, Université Paris Cité.Chaniel M. : *Utilisation de revêtements innovants dans le cadre d’une stratégie de rafraîchissement parisienne*, thèse en cours, physique, Université Paris Cité. Karam G. : *Approches physiques de création d’îlots de fraîcheur urbains : application à des cours d’écoles parisiennes*, Physique Atmosphérique et Océanique [physics.ao-ph], Université Paris Cité, 2023, français : **NNT : 2023UNIP7014 tel-04395918**

124 : Article web, Conseil d’architecture, d’urbanisme et de l’environnement de Paris (CAUE de Paris) : Le Feder Urban Innovative Actions, Cours d’écoles Oasis : **<https://www.caue75.fr/content/le-feder-urban-innovative-actions-cours-decoles-oasis>**

125 : Chaumont M. : Contribution de différentes typologies de toiture au climat urbain en période caniculaire, physique [physics], Université Paris Cité, 2023, français : **NNT : 2023UNIP7126 tel-04574041**

126 : Agence nationale de la recherche, Projet Urban Materials for Cool Cities – UMat4CC : **<https://anr.fr/Project-ANR-18-CE22-0015>**

127 : L’albédo, ou albedo (sans accent), est le pouvoir réfléchissant d’une surface, c’est-à-dire le rapport du flux d’énergie lumineuse réfléchie au flux d’énergie lumineuse incidente.

6.2

Collecte d’eau dans l’air ambiant

Face à la hausse des températures, rafraîchir les villes constitue certes un enjeu fondamental, mais comment agir lorsqu’aucune source d’eau potable ne peut être disponible ?

Des travaux ont démontré que lorsqu’aucune source d’eau potable n’est accessible, il reste la possibilité de collecter l’eau contenue dans l’air ambiant (Liu X., Beysens D., Bourouina T., 2024)¹²⁸, dont le taux d’humidité reste non négligeable, même en zones arides.

Le principe repose sur la condensation de l’eau sur une surface de collecte, sans apport d’énergie, par refroidissement radiatif. Sous l’impulsion du **projet I-SITE Nano-4-Water**, puis de la chaire Blaise Pascal (Fondation ENS et Région Île-de-France), une étude menée par le laboratoire ESYCOM a porté sur l’étude du potentiel du silicium noir (développé au sein des salles blanches d’ESIEE Paris), avec l’ambition de développer à terme un « panneau d’eau » à fonctionnalité duale : qui collecte l’eau de rosée durant la nuit et qui collecte l’énergie solaire durant la journée (Liu X., Trosseille J., Mongruel A., Marty F., Basset P., Laurent J., Royon L., Cui T., Beysens D., Bourouina T., 2021)¹²⁹. Ces travaux menés par le laboratoire ESYCOM associent deux autres laboratoires du CNRS : le PMMH (ESPCI, Sorbonne Universités) et le LIED (Université de Paris), ainsi que l’Organisation pour la récupération de l’eau de rosée (OPUR) dans le cadre du **projet ANR META-WATER** (2020-2024)¹³⁰.

Depuis 2023, la plateforme Sense-City accueille trois démonstrateurs de systèmes de collecte d’eau de rosée.

Depuis plusieurs années, force est de constater que la sécheresse entraîne aussi des impacts sur les sols et plus spécifiquement sur les sols argileux. Par voie de conséquence, les bâtiments ou les voiries édifiés sur de tels sols subissent des dommages au cours du temps. Des études sur les phénomènes de retrait et de gonflement des sols argileux permettent à l’université d’accompagner les professionnels de la construction dans la prévention et le traitement de ce risque.

128 : Liu X., Beysens D., Bourouina T. : *Water Harvesting from Air: Current Passive Approaches and Outlook*, ACS Materials Letters 4, 1003–1024 : <https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.1c00850> (2022)

129 : Liu X., Trosseille J., Mongruel A., Marty F., Basset P., Laurent J., Royon L., Cui T., Beysens D., Bourouina T. : *Tailoring silicon for dew water harvesting panels*, iScience, Cell Press, Volume 24, Issue 7, 102814, ISSN 2589-0042 : <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102814> (2021)

130 : Agence nationale de la recherche, *META-radiative surface for atmospheric WATER harvesting-META-WATER* : <https://anr.fr/Project-ANR-20-CE08-0023>

6.3

Retrait et gonflement des argiles (RGA) sous les fondations des maisons :

analyse et traitement des désordres créés par la sécheresse

Le laboratoire GERS-SRO mène à l’heure actuelle des recherches sur le retrait/gonflement des argiles et l’impact de ce phénomène sur les bâtiments, notamment sur les maisons individuelles.

En effet, les sols argileux en période de pluie peuvent gonfler, et ils deviennent plus mous ou plastiques en présence d’eau (comme de la pâte à modeler). Quand l’eau quitte ces sols en période de sécheresse, ils sont soumis à un phénomène de retrait, leur volume diminue, ils durcissent et des fentes de dessiccation peuvent apparaître (comme au fond d’une mare asséchée). Ces phénomènes sont liés à la nature des particules argileuses et des minéraux qui les constituent, et à l’organisation de ces particules (comme leur densité et leur microstructure).

Les phénomènes de retrait et de gonflement des sols argileux sont observés depuis très longtemps dans les pays au climat sec, où ils sont à l’origine de nombreux désordres sur les bâtiments ou les voiries (apparition de longues fentes dans le sens de circulation des chaussées).

En France, où les pluies sont plus régulières et les variations saisonnières moins marquées compte tenu de son climat tempéré, ces phénomènes n’ont vraiment été mis en évidence que plus récemment, en particulier à l’occasion des sécheresses des années 1976, puis 1989 et 1990, et enfin 2003.

Les désordres observés sur les maisons individuelles représentent désormais pour les assurances un coût très important, notamment au travers du système CATNAT (catastrophe naturelle), et chaque année voit ce montant augmenter avec l’intensification des sécheresses. Les régions initialement affectées par le problème de RGA, soit la plaine des Flandres, le bassin parisien, une grande partie de l’ouest de la France, autour de Blois et Bordeaux, et surtout la région autour de Toulouse, ainsi que la région autour d’Aix-en-Provence et la plaine de Limagne, s’étendent désormais dans la région Centre et à l’est de la France, vers la vallée de la Saône entre la Bourgogne et la Franche-Comté, ainsi qu’une partie de la Lorraine. Ces régions se caractérisent par la présence d’argiles, dites gonflantes, dans leur sous-sol.

Après le **projet ARGIC1** piloté par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) (2006-2009), le **projet ANR ARGIC2** de 2010 à 2013 (Analyse du retrait-gonflement et de ses incidences sur les constructions) porté par le laboratoire GERS-SRO a permis d’avancer sur la connaissance du RGA avec pas moins de 19 partenaires.

Les projets ARGIC1 et ARGIC 2 ont non seulement montré l’impact des malfaçons dans les constructions, mais également que la végétation [...] joue un rôle majeur dans l’apparition des désordres, de même que les maisons fondées trop superficiellement..

Avec une expérimentation en vraie grandeur appelée MISS (maison individuelle soumise à des sollicitations de sécheresse), les essais ont permis de démontrer que le respect des DTU (Document Technique Unifié), pour une structure de maison « simple » (maison de 8 m par 10 m sur vide sanitaire) permet d’obtenir une très bonne résistance au tassement du sol sous l’effet du retrait en période de sécheresse. En effet, en enlevant tous les appuis des vérins positionnés sous la semelle de fondation de la moitié de la maison, quasi aucune dégradation n’a été observée hormis une fissuration enregistrée de l’ordre d’un millimètre à un angle de cette construction. Cette dernière, après auscultation, s’est avérée reliée à la présence d’une malfaçon (défaut au niveau du remplissage du chaînage vertical).

Les **projets ARGIC1** et **ARGIC 2** ont non seulement montré l’impact des malfaçons dans les constructions, mais également que la végétation (arbres isolés à proximité des maisons) joue un rôle majeur dans l’apparition des désordres, de même que les maisons fondées trop superficiellement. Selon le rapport de Arbizzi et Kreziak (2008), qui ont mené une enquête sur 900 dossiers CATNAT dans treize départements, 69 % des fondations des bâtis sinistrés ont une profondeur inférieure ou égale à 0,8 m, et 27 % sont comprises entre 0,8 et 1,2 m. De plus, pour la moitié des dossiers (54 %), on trouve de la végétation à 4 m ou moins du bâti sinistré, et à 10 m ou moins dans 96 % des cas. Les maisons individuelles avec un étage (ce qui augmente de charge sur les fondations) ou en présence de sous-sol total (approfondissement des fondations) présentent également moins de pathologies.

Ainsi, les premières conclusions apportées au problème de RGA sur les constructions ont montré que l’application des règles de l’art bien établies

permettait d’éviter la majorité des pathologies. Si ces conclusions ont grandement influencé les nouvelles constructions, il est plus difficile d’intervenir sur des constructions existantes qui présentent le plus souvent des malfaçons (tout comme dans les constructions neuves) qui sont cachées et variables en fonction des techniques de construction en vigueur lors de leur construction.

Pour aider à gérer le phénomène de RGA, une série de trois guides « Retrait et gonflement des argiles » (IFSTTAR, CEREMA) a été publiée en juillet 2017 pour accompagner les professionnels de la construction de maisons individuelles aux différents stades de leurs projets dans la prévention et le traitement de ce risque :

- **guide 1** : *Caractériser un site pour la construction*
- **guide 2** : *Protéger sa maison de la sécheresse : conseils aux constructeurs de maisons neuves*
- **guide 3** : *Analyse et traitement des désordres créés par la sécheresse*. Ce guide traite des techniques de réparation des maisons individuelles, suite à des désordres imputables au phénomène de retrait-gonflement, ainsi que des procédures de prise en charge de ces réparations par les assurances.

Bibliographie

Thèses, HDR

Jana Abou Eid, thèse en cours, Génie civil, MAST-EMCGU (2022) : *Modélisation, simulation numérique et mesures de la fissuration 3D dans le processus de corrosion de l’interface acier/béton* : **https://theses.fr/s356566**

Mazen Sayed Ahmed : *Micro–Opto–Fluidics : Addressing Nanomaterials Fundamentals and Water Quality. Micro and nanotechnologies/Microelectronics, Université Paris–Est, 2019, English : NNT : 2019PESC2051 tel-03510323*

Juba Amrioui : *Vulnérabilité des digues au changement climatique : approche multi-échelle pour l’étude du comportement à long terme des mélanges sol-ciment et effet des inclusions de sol non traité lors du processus de malaxage, Ingénierie de l’environnement, Université Gustave Eiffel, 2023, français : NNT : 2023UEFL2065 tel-04550111*

Dalia Ayssami, thèse en cours (2022) : *Analyse des phénomènes d’érosion interne sur digues fluviales, par méthode hybride expérimentale-numériques : https://theses.fr/s358820*

Joanna Badr : *Conception et validation d’un capteur noyé de résistivité électrique en vue du suivi des profils de teneur en eau dans les bétons, Matériaux composites et construction, Université Paul Sabatier – Toulouse III, 2019, français : NNT : 2019TOU30153 tel-02735810*

Mohamed Belmokhtar : *Modélisation, analyse et apprentissage statistique du comportement dynamique de structures pour le suivi des conditions aux limites : application au phénomène d’affouillement, Génie civil, Université Gustave Eiffel, 2022, français : NNT : 2022UEFL2036 tel-04048711*

Émilie Bernard : *Réponse hydro-climatique de Paris et sa petite couronne, Hydrologie, Université Paul Sabatier – Toulouse III, 2021, français : NNT : 2021TOU30250 tel-03699764*

Florian Betou, thèse en cours (2021) : *Stratégies d’adaptation au changement climatique pour améliorer la gestion des eaux pluviales et le confort thermique : évaluation de scénarios d’aménagements à l’échelle de la métropole nantaise, Nantes Université.*

Nissrine Boujia : *Vulnérabilité des ouvrages d’art au risque d’affouillement des fondations, Vibrations [physics.class-ph], Université Paris–Est, 2018, français : tel-01949884v1*

Kévin Caillaud : *Vers une gouvernance territoriale de l’environnement ? : analyse comparée des politiques départementales de gestion de l’eau destinée à la consommation humaine et des déchets municipaux, Sociologie, Université de Strasbourg, 2013, français : NNT : 2013STRAB005 tel-00990135v2*

Raphaël Carpine : *Détection de défauts dans les structures de génie civil par analyse en ondelettes de réponse vibratoire, Matériaux et structures en mécanique [physics.class-ph], Université Gustave Eiffel, 2022, français : NNT : 2022UEFL2064 tel-04089271*

Mailys Chania, thèse en cours : *Utilisation de revêtements innovants dans le cadre d’une stratégie de rafraîchissement parisienne, Physique, Université Paris Cité.*

Maryse Charpentier-Noyer : * valuation de prévisions hydrométéorologiques d’ensemble des crues soudaines à partir de données sur les impacts, Sciences de la Terre, Nantes Université, 2022, français : NNT : 2022NANU4093 tel-04341104*

Maxime Chaumont : *Contribution de différentes typologies de toiture au climat urbain en période caniculaire, Physique [physics], Université Paris Cité, 2023, français : NNT : 2023UNIP7126 tel-04574041*

Saray Chavez, thèse en cours, Compiègne : *Le Plan Local d’Urbanisme entre déterminisme et incertitude. Dans un contexte d’adaptation au changement climatique, quel levier pour la gestion alternative des eaux pluviales ? Application au PLU métropolitain de Nantes Métropole : https://theses.fr/s347549*

Christophe Chevalier : * rosion et affouillements : vulnérabilité des sols et des ouvrages – Une approche expérimentale multi-échelle des interactions eau(x)-sol(s)-structure(s), Génie civil, Paris–Est Sup, 2024 : tel-04416069*

Margot de Baecque : *Caractérisation multi-physique de la durabilité d’un sol traité à la chaux pour une application aux digues maritimes : Géotechnique, Université Paris–Est, 2019, français : NNT : 2019PESC2078 tel-02899988*

Malak Dia, thèse en cours (2021) : *Nanoparticules et matière organique en infiltration des eaux pluviales, Nantes Université : https://theses.fr/2024NANU4076*

Marine Dumon, thèse en cours (2022) : *Méthodes innovantes de calibration de capteurs pour la surveillance de la pollution de l’air et de l’eau, Université Gustave Eiffel : https://theses.fr/s356306*

François El Inaty, thèse en cours (2022) : * tude des interactions des ions sulfate et chlorure dans les matériaux cimentaires à faible teneur en carbone : une analyse multi-méthodes : https://theses.fr/s353879*

Ahmed Elsayed : *Micro–Opto–Fluidics for fast analysis of micro-plastics contaminants of water, thèse 2022, électronique, Optronique et Systèmes, ESYCOM, Université Gustave Eiffel-ESIEE Paris : https://theses.fr/2022UEFL2008*

Maxime Fr re, thèse en cours : * lots de fraîcheur urbains : matériaux et choix d’aménagement, Physique, Université Paris Cité : https://theses.fr/s239763*

Ouaga Jean Bruce Nataniel Gboga : *Impacts d’h t rog nit s granulaires sur l’érosion interne par suffusion de sols constitutifs d’ouvrages hydrauliques, Géotechnique, Université Gustave Eiffel, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (Yamoussoukro, Côte d’Ivoire), 2023, français : NNT : 2023UEFL2071 tel-04482240*

Juliette Godet, thèse en cours (2022) : * valuation d’une chaîne de prévision immédiate des impacts des crues soudaines à l’échelle de l’arc méditerranéen français, Université Gustave Eiffel : https://theses.fr/s394906*

Martin Hendel : *Pavement–Watering in Cities for Urban Heat Island Mitigation and Climate Change Adaptation, Engineering Sciences [physics], Université Paris Diderot Paris 7, 2015, English : NNT : tel-01258289*

Nabil Hocini : * valuation de méthodes automatisées de cartographie des zones inondables adaptées à la prévision des crues soudaines, Hydrologie, Nantes Université, 2022, français : NNT : 2022NANU4015 tel-04158913*

Ghid Karam : *Approches physiques de création d’îlots de fraicheur urbains : application à des cours d’ cole parisiennes, Physique Atmosphérique et Océanique [physics.ao-ph], Université Paris Cité, 2023, français : NNT : 2023UNIP7014 tel-04395918*

Guillaume Le Bihan : *Modèles hydrologiques régionaux pour la prévision distribuée des crues rapides : vers une estimation des impacts et des dommages potentiels, Milieux fluides et réactifs,  cole centrale de Nantes, 2016, français : NNT : 2016ECDN0011 tel-02193701v2*

Jing Ma : *Influence of the porous structure of different TiOx electrodes on the effectiveness of the anodic oxidation process for water treatment, Environmental Engineering, Université Gustave Eiffel, 2022, English : NNT : 2022UEFL2061 tel-04348093*

Sophie Parison : *Matériaux urbains et nouveaux usages de l’eau pour le rafraîchissement des villes : Stratégies d’arrosage de différents revêtements parisiens, thèse de doctorat Physique, 2020 Université Paris Cité.*

Wilfried Pingault, thèse en cours (2023), Hydrohistoire d’un nouveau territoire : Grand Paris Sud (de l’urbanisation à la patrimonialisation), Université Gustave Eiffel : https://theses.fr/s372293

William Pophillat : *Conséquences d’une systématisation des pratiques d’infiltration à la parcelle des pluies courantes à l’échelle de petits bassins versants urbains et péri-urbains – Apports de la modélisation intégrée, Hydrologie, Université Grenoble Alpes [2020–..], 2022, français : NNT : 2022GRALU012 tel-03770218*

Laurie Saint Crieg : *Estimation des niveaux marins extrêmes en utilisant de l’information régionale et historique : Hydrologie, Université Gustave Eiffel, Institut national de la recherche scientifique (Québec, province), 2022, français : NNT : 2022UEFL2080 tel-04405310*

Phan Ha Thanh, thèse en cours : *Développement d’un outil numérique d’aide à la décision pour évaluer sur la base d’observables une structure dégradée par réaction de gonflement interne, Génie civil, MAST-EMCGU (2022) : https://theses.fr/s358775*

Tianyu Wang : *Scour management in French rail infrastructure using machine learning, Géotechnique, Université Gustave Eiffel, 2023, English : NNT : 2023UEFL2044 tel-04415579*

Ouvrages

Kévin Caillaud, R. Barbier, Aurélie Roussary, Eddy Renaud, G. Canneva, et al. : *Les nouveaux arrangements territoriaux de la gestion de l’eau potable, Concilier la gestion de l’eau et des territoires, 2016 : halshs-01216224*

Kévin Caillaud, (2022) : *Les boucles de rétroaction au sein des interdépendances. Le cas des infrastructures d’eau potable, Flux. N  128. 15–31. 10.3917/flux1.128.0015.*

B. Chocat, F. Cherqui, B. Afrit, G. Barjot, M. Boumahdi, et al. : *Contribution à une meilleure explication du vocabulaire dans le domaine des solutions dites « alternatives » de gestion des eaux pluviales urbaines, TSM, Techniques Sciences Méthodes – Génie urbain, génie rural, 2022, 5, pp.103–119 : 10.36904/tsm/202205103 hal-03679049*

Comité français des barrages et réservoirs (CFBR) : *Recueil partie I–Cadre Général et Partie II–Fiches (mai 2021) : Recueil de méthodes et de techniques de confortement et réparation des digues de protection en remblai.*

Agathe Euzen : *L’eau à la maison – Approche anthropologique des usages de l’eau du robinet dans l’espace domestique à Paris,  ditions Universitaires Européennes, ouvrage 2010, pp.360, 2010, 9786131547744 : hal-00580901*

TD. Fletcher, H. Andrieu, P. Hamel : *Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art, Advances in Water Resources, Volume 51, 2013, Pages 261–279, ISSN 0309-1708, https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001*

J. Gasperi, MC. Gromaire, M. Kafi, R. Moilleron, G. Chebbo : *Contributions of wastewater, runoff and sewer deposit erosion to wet weather pollutant loads in combined sewer systems, Water Research, Volume 44, Issue 20, 2010, Pages 5875–5886, ISSN 0043-1354 : https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.07.008*

Vincent Lemire : *La soif de Jérusalem,  ditions de la Sorbonne, 2011 : https://doi.org/10.4000/books.psorbonne.779*

Pierre-Emmanuel Peyneau, Martin Guillon : *Number of spikes in single particle ICP–MS time scans: from the very dilute to the highly concentrated range, Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2021, 36 (11), pp.2460–2466 : 10.1039/D1JA00156F hal-03346976*

L. Rossman (2015), version 5.1 (EPA-600/R-14/413b), Retrieved from Washington, DC : *Storm water management model user’s manual.*

Xenia Stavropulos-Laffaille, Katia Chancibault, Hervé Andrieu, Aude Lemonsu, Isabelle Calmet, Pascal Keravec, Valéry Masson, Coupling detailed urban energy and water budgets with TEB-Hydro model: Towards an assessment tool for nature based solution performances, Urban Climate, Volume 39, 2021, 100925, ISSN 2212-0955, https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100925

Pierre-Antoine Versini, D. Ramier, E. Berthier, B. de Gouvello, Journal of Hydrology, (2015), 524, pp.562-575 : *Assessment of the hydrological impacts of green roof: From building scale to basin scale.*

Articles

Déborah Abhervé : *L'histoire, une ressource stratégique pour la restauration écologique des cours d'eau ? Le cas du Haut-Rhône*, Doctoriales des sciences sociales de l’eau, mai 2023, Rennes, France : **hal-04274847**

I. Azzouz, Y. Habba, M. Capochichi-Gnambodoe et al. : *Zinc oxide nano-enabled microfluidic reactor for water purification and its applicability to volatile organic compounds*, Microsyst Nanoeng 4, 17093 (2018) : **https://doi.org/10.1038/micronano.201793**

Nissrine Boujia, Franziska Schmidt, Christophe Chevalier, Dominique Siegert, Damien Pham van Bang : *Using rocking frequencies of bridge piers for scour monitoring :* Structural Engineering International, 2021, 31, 20 p. : **10.1080/10168664.2020.1768811 hal-02918475v2**

Tiago De Oliveira, Bogdan Muresan, Sophie Ricordel, Laurence Lumière, Xuan-Trinh Truong, Laurence Poirier, Johnny Gasperi : *Realistic assessment of tire and road wear particle emissions and their influencing factors on different types of roads*, Journal of Hazardous Materials, Volume 465, 2024,133301,ISSN 0304-3894 : **https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133301**

François El Inaty, Bugra Aydin, Maryam Houhou, Mario Marchetti, Marc Quiertant, Othman Omikrine Metalssi : *Long-Term Effects of External Sulfate Attack on Low-Carbon Cementitious Materials at Early Age*, Appl. Sci. 2024, 14(7), 2831 : **https://doi.org/10.3390/app14072831**

AA. Elsayed, M. Erfan, YM. Sabry, R. Dris, J. Gasperi, JS. Barbier, F. Marty, F. Bouanis, S. Luo, BTT. Nguyen, AQ. Liu, B. Tassin, T. Bourouina : *A microfluidic chip enables fast analysis of water microplastics by optical spectroscopy*, Scientific Reports 11, **10533 (2021)** : **https://doi.org/10.1038/s41598-021-89960-4**

Lan Gao, Elyes Nefzaoui, Frédéric Marty, Xueyong Wei, Stéphane Bastide, Yamin Leprince-Wang, Tarik Bourouina : *Two-dimensional metamaterials as meta-foams for optimized surface-enhanced solar steam generation*, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 243, 2022, 111793,ISSN 0927-0248 : **https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111793**

Lan Gao, Elyes Nefzaoui, Frédéric Marty, M. Erfan, Stéphane Bastide, Yamin Leprince-Wang, Tarik Bourouina : *TiO2-Coated ZnO Nanowire Arrays: A Photocatalyst with Enhanced Chemical Corrosion Resistance*, Catalysts 2021, 11 (11), 1289 : **https://doi.org/10.3390/catal11111289**

Marc Igigabel : *Adaptation des systèmes de protection contre les inondations côtières*, 2023 : **hal-04182161**

Lauriane Ledieu, Romain Tramoy, David Mabilais, Sophie Ricordel, Marie-Laure Mosini, Alexandra Mosset, Bernard Flahaut, Laetitia Pineau, Zoé Bridant, Éric Bouchet, Clémence Bruttin, F. Rodriguez, Bruno Tassin, Johnny Gasperi (2024) : *Litter in French urban areas – Part 2: transport dynamic and fluxes in stormwater*, Environmental Science and Pollution Research : **10.1007/s11356-024-33774-0**

Aude Lemonsu, Valéry Masson, Limor Shashua-Bar, Evyatar Erell, David Pearlmutter (2012) : *Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modeling urban green areas*, Geoscientific Model Development Discussions, 5, 1295-1340 : **10.5194/gmdd-5-1295-2012**

X. Liu, D. Beysens, T. Bourouina : *Water Harvesting from Air: Current Passive Approaches and Outlook*, ACS Materials Letters 4, 1003-1024, 2022 : **https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.1c00850**

X. Liu, J. Trosseille, A. Mongruel, F. Marty, P. Basset, J. Laurent, L. Royon, T. Cui, D. Beysens, T. Bourouina : *Tailoring silicon for dew water harvesting panels*, iScience, Cell Press, Volume 24, Issue 7, 102814, ISSN 2589-0042, 2021 : **https://doi.org/10.1016/j.j.isci.2021.102814**

S. Luo, KT. Nguyen, BTT. Nguyen, S. Feng, Y. Shi, A. Elsayed, Y. Zhang, X. Zhou, B. Wen, G. Chierchia, H.Talbot, T. Bourouina, X. Jiang, AQ. Liu : *Deep learning-enabled imaging flow cytometry for high-speed Cryptosporidium and Giardia detection*, Cytometry A., 2021 Nov, 99 (11) : **1123-1133. doi: 10.1002/cyto.a.24321. PMID: 33550703**

Pierre-Emmanuel Peyneau : *Poisson process modelling of spike occurrence in single particle inductively coupled plasma mass spectrometry time scans for very dilute nanoparticle dispersions*, Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2021, 178, 18 p. : **10.1016/j.sab.2021.106126 hal-03163236**

Pierre-Emmanuel Peyneau : *Statistical properties of spikes in single particle ICP-MS time scans*, Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2022, 12, 8 p. : **10.1039/D2JA00312K hal-03877147**

Cassandra Rey-Thibault : *Les cartographies des risques entre prévention, préparation et gestion de crise. Cartes et géomatiques* (revue du CFC), 2021 : **hal-03573356**

Anne Ruas, Valentin Clemence, Bruno Barroca, Yan Ulanowski : *Comparison of cooling grey solutions in the sense-city urban demonstrator for adapting cities to heat waves*, Urban Climate, Volume 55, 2024, 101874, ISSN 2212-0955 : **https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101874**

X. Stavropulos-Laffaille, K. Chancibault, JM. Brun, A. Lemonsu, V. Masson, A. Boone, H. A. & Andrieu (2018), Geoscientific Model Development, 11, 4175-4194 : *Improvements to the hydrological processes of the Town Energy Balance model (TEB-Veg, SURFEX v7.3) for urban modelling and impact assessment*.

Du Phuc Tho Dang, Liliane Jean-Soro, Béatrice Béchet : *Variabilité temporelle de la spéciation physique des éléments trace dans les eaux de ruissellement au cours des événements pluvieux*, Novatech 2023, Graie, juillet 2023, Lyon, France : **hal-04186321**

José Manuel Tunqui Neira, Marie-Christine Gromaire, Katia Chancibault, Ghassan Chebbo : *Vers une typologie fonctionnelle des Ouvrages de Gestion à la Source des eaux pluviales pour la modélisation hydrologique et de la qualité de l’eau / Towards a comprehensive functional typology of Stormwater Control Measures for hydrological and water quality modeling purposes*, Novatech 2023, juillet 2023, Lyon, France : **hal-04082981**

Jia Wang, Jiahong Liu, Hao Wang, Chao Mei : *Approaches to Multi-Objective Optimization and Assessment of Green Infrastructure and Their Multi-Functional Effectiveness: A Review*, 2020, Water : **12. 2714. 10.3390/w12102714**

Mémoire de stage

Juliette Godet : Évaluation de l’apport des prévisions d’ensemble PIAF dans la chaîne Vigicrues Flash, Sciences de l’ingénieur [physics], 2022 : **dumas-04037819**

Communications congrès

Jean-Sébastien Barbier, Rachid Dris, Caroline Lecarpentier, Vivien Raymond, Karine Delabre, et al. : *Présence de microplastiques dans les filières de traitement conventionnelles et de nanofiltration de trois usines de production d’eau potable*, troisième journée du GDR Polymères et Océans 2022, juin 2022, Brest, France : **hal-03709885**

Philippe Branchu, Fabienne Marseille, Béatrice Bechet, Catherine Keller, Cécile Le Guern, et al. : *Projet MUSE : Vers une prise en compte de la multifonctionnalité des sols dans les documents d’urbanisme*, 13, Journées d’Études des Sols, juillet 2018, Rouen, France : **hal-02791358**

Lauriane Ledieu, Romain Tramoy, David Mabilais, Sophie Ricordel, Marie-Laure Mosini, et al. : *Macrodéchets abandonnés sur les surfaces urbaines : densités, variabilité et transfert par le ruissellement*, GDRPO2023 : Quatrième rencontre du GDR Polymères et Océans 2023, CNRS, juin 2023, Rennes, France : **hal-04106546**

Régis Moilleron, José-Frédéric Deroubaix, Julie Gobert, Adèle Bressy : *Enjeux sociétaux et scientifiques de la phytoépuration des eaux grises en toiture pour une réutilisation dans le bâtiment*, 24e rencontres internationales de l’urbanisme, APERAU, Université de Lausanne, UNIL, juin 2023, Lausanne, Suisse : **hal-04190370**

Kelsey Smyth, Jennifer Drake, Tim van Seters, Johnny Gasperi, Rachid Dris, et al. : *Bioretention cells remove increasingly small microplastics from stormwater*. DesignLIFES, Design of Living Infrastructure for Ecosystem Services, Août 2022, Toronto, Canada : **hal-03760718**

Sylvie Thibert, Jean-Sébastien Barbier, Rachid Dris, Bruno Tassin, Johnny Gasperi, et al. : *Microplastiques dans les eaux destinées à la consommation humaine – Premiers résultats de mesures sur les installations du Syndicat des Eaux d’Île-de-France*, 102e Congres ASTEE, ASTEE, juin 2023, Nice, France : **hal-04096682**

Sources

Agence nationale de la recherche, article web : *Suivi sélectif de gaz d’échappement par Capteurs de gaz RaDioFréquences imprimés – CARDIF* : **https://anr.fr/Projet-ANR-19-CE04-0010**

Agence Nationale de la Recherche, projet VegDUD, Projet-ANR-09-VILL-0007 : *Rôle du végétal dans le développement urbain durable, une approche par les enjeux liés à la climatologie, l’hydrologie, la maîtrise de l’énergie et les ambiances – VegDUD*.

Article Reflex-science, publication juillet 2017, les collections de l’IFSTTAR, FTI4.3 : *Retrait et gonflement des argiles – guide 3 analyse et traitement des désordres créés par la sécheresse*.

Centre national de recherches météorologiques, Projet VURCA.

Conférence de Tianhong Cui, FUTURE Days 2019, Paris-Est Sup : *Nanocapteurs pour la ville durable – Ressources en eau :* **https://www.youtube.com/watch?v=mq6mbs-dCR4**

France Info, article de presse 5971232 (publication le 27 Juillet 2023) : *Paris 2024 : comment la qualité de l’eau de la Seine est-elle surveillée pour la baignade ?*

Mathieu Goriaux, Laboratoire Eau et Environnement (LEE) de l’Université Gustave Eiffel et Tiphaine Hinault, CPIE Logne et Grand-Lieu, reflexsciences, (février 2024) : *Une analyse locale et collective de l’eau et de ses usages*.

Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat GIEC, 6e rapport d’évaluation du GIEC, Groupe de travail 1 : *La base des sciences physiques*.

Légifrance, code de l’urbanisme, Article L141-3, Version en vigueur au (07 octobre 2024).

Official website of the European Union, CORDIS-EU Research results : *AdaPtive micROfluidic- and nano-enabled smart systems for waTEr qUality Sensing :* **https://cordis.europa.eu/project/id/644852/fr**

Région Sud – Provence Alpes Côte d’Azur, Les étoiles de l’Europe en Région Sud, Digue 2020 – Protéger le littoral Camarguais, article web : *Une plateforme de recherche innovante pour la protection du littoral camarguais*.

Site web OPUR, un observatoire d’hydrologie urbaine en Île-de-France : **https://www.leesu.fr/opur/**

