

N° 493 - MARS 2024

l'actualité chimique

LE JOURNAL DE LA SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE FRANCE



**SURVEILLANCES
DE L'EAU**

UNE FEMME
LEADER

À PROPOS
DE LA YOHIMBINE

Édité par la Société Chimique de France
250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris
Tél. : 01 40 46 71 60 – scf@societechimiquedefrance.fr
www.societechimiquedefrance.fr
Directeur de la publication : Stanislas Pommeret
Partenariats : CNRS, Fondation de la Maison de la Chimie

RÉDACTION

SCF, 28 rue Saint-Dominique, 75007 Paris
Tél. : 01 40 46 71 67 – redaction@lactualitechimique.org
www.lactualitechimique.org

Rédactrice en chef : Patricia Pineau
Rédacteur en chef adjoint : Malik Agina

COMITÉ DE RÉDACTION

J. Barrault, X. Bataille, C. Bresson, K. Cariou, P. Colombar, K. Fajerwerg, D. Fauque, J.-P. Foulon, J. Fournier, J.-F. Gérard, E. Gras, N. Griffete, C. Houée-Levin, J. Lalande, F. Launay, J. Livage, E. Marceau, V. Marvaud, R. Messal, P. Moisy, C. Monneret, X. Montagne, N. Moreau, J.-M. Paris, P. Pichat, A.-V. Ruzette, S. Tencé, H. This, H. Toulhoat, P. Walter, S. Younes

Publication analysée ou indexée par :
Chemical Abstracts, base de données PASCAL

ABONNEMENT

SCF, Martine Maman
250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris
Tél. : 01 40 46 71 60/66
abonnement@lactualitechimique.org

FABRICATION

MAQUETTE : Redouane Sahih, sahih.redouane@gmail.com
Mag Design, www.magdesign.fr, mag.design@me.com
IMPRESSION, ROUTAGE : N. Fortin & ses fils imprimeurs
94800 Villejuif, fortimprimerie@wanadoo.fr

PUBLICITÉ

FFE, 15 rue des Sablons, 75116 Paris
Tél. : 01 53 36 20 40 – www.ffe.fr
aurelie.vuillemin@ffe.fr

ISSN version papier 0151 9093
ISSN version électronique 2105 2409

© SCF 2024 – Tous droits de reproduction réservés

Dépôt légal : mars 2024

Toute représentation ou reproduction, intégrale ou partielle, fait sans le consentement de l'auteur, ou des ayants droits, ou ayant cause, est illicite (loi du 11 mars 1957, alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal. La loi du 11 mars 1957 n'autorise, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, que les copies et les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective d'une part, et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans le but d'exemple ou d'illustration.



Un numéro immersif

Ressources et gestion de l'eau

Tous les deux ans se tient le congrès NRBCe, dont les points forts sont relayés dans *L'Actualité Chimique*. Le thème central cette année est consacré aux ressources de l'eau et leur gestion. Menaces, pollution... Certains titres peuvent inquiéter, mais les auteurs sont là pour vous rassurer et vous sensibiliser aux risques. Les médias alertent, voire angoissent les populations, alors que nous voulons éduquer et prévenir.

Le rôle des femmes chimistes

Les occasions sont rares pour mettre en avant l'histoire, la chimie et les femmes chimistes. Solvay, une entreprise très connue, née en 1863 d'une rupture technologique mise au point par le chimiste Ernest Solvay, est aujourd'hui dirigée par Ilham Kadri, leader de la chimie mondiale, qui vient d'orchestrer la scission de Solvay, donnant naissance à Syensqo : une stratégie prometteuse résolument dirigée vers l'avenir. Nous sommes allés à sa rencontre.

Après la pluie ? Le beau temps !

La chimie ne sera jamais à court de belles innovations durables. La valorisation des déchets, tels que la liqueur noire dans l'industrie papetière, ouvre des perspectives respectueuses de l'environnement. Des acteurs en charge de la construction et l'entretien des routes commencent à proposer des alternatives au bitume pétrolier, en mettant au point de nouveaux agents de recouvrement biosourcés.

Un numéro historique ?

En effet, nos lecteurs retrouvent dans tous les numéros, et ce depuis longtemps, les sujets d'étymologie, mais attention : la yohimbine est le dernier clin d'œil avec la lettre Y, sauf découverte imprévisible. Bravo Pierre Avenas, c'est reparti pour un tour !

Bonne lecture !

Patricia Pineau
Rédactrice en chef

ÉDITORIAL	1
Un numéro immersif, par P. Pineau	1
CLIN D'ŒIL ÉTYMOLOGIQUE	4
À propos de la yohimbine par P. Avenas	4
À PROPOS DE	5
La scission de Solvay : entretien avec Ilham Kadri, par P. Pineau	5
SURVEILLANCES DE L'EAU	7
<i>Coordinatrices : Emmanuelle Billon-Denis et Marie-Thérèse Ménager</i>	
Focus sur les ressources et la gestion de l'eau, par E. Billon-Denis	7
Détection	
Eaux usées et agents de la menace NRBCe, par M. Boni, F. Magisson et J.-U. Mullot	9
Criblage non ciblé d'eaux naturelles par spectrométrie de masse ultra-haute résolution, par M. Bridoux, G. Gaiffe et C. Brun	12
L'opération « L'eau à la bouche » : un outil d'aide à la décision pour une meilleure gestion d'un réseau d'eau potable, par E. Fellmann	20
Gestion	
Les sapeurs-sauveteurs face aux enjeux climatiques, par A. Salvadori et F. Vanmol	22
Enjeux de la qualité sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine, par S. Lardy-Fontan, C. Rosin, B. Gassilloud, T. Chesnot et X. Dauchy	27
Le PGSSSE dans la démarche de sécurité de la production et distribution de l'eau, par F. Schwetterlé et F. Perru	30
Gestion des pollutions accidentelles en eau douce, par A. Guéna	34
Des outils pour gérer le risque de pollution chimique des milieux aquatiques par des eaux, par L. Gréaud	38
Modélisation de la pollution accidentelle des eaux intérieures, par L. Aprin	43
Éliminer les agents de la menace NRBCe, par S. Lefèvre, J.-U. Mullot et M. Boni	45
Le groupe CONSTOX, unité en charge des constatations judiciaires NRBCe, par CONSTOX	48

Retour d'expérience

- Les eaux usées protègent la Flotte, par **O. Gorgé, A. Depeille, C. Lemoigne, M. Boni** et le **GIS Obépine** 50
- Surveillance environnementale pour l'éradication des poliovirus, par **M. Bessaud, A. Tinard** et **M.-L. Joffret** 54
- Le devenir environnemental des émissions de radionucléides de la centrale nucléaire de Fukushima, par **O. Evrard, Y. Wakiyama, A. Nakao, S. Huon, S. Hayashi, H. Tsuji** et **O. Cerdan** 57

RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT 61

La liqueur noire, par **R. Backov, J. Olochwka** et **J.-L. Bobet** 61

Principes et substances actifs

Nouveaux principes actifs pharmaceutiques et actualités des substances actives phytopharmaceutiques, par **J. Fournier** et **J.-M. Paris** 63

EN BREF 65

LIVRES ET MÉDIAS 69

AGENDA 71

ACTUALITÉS DE LA SCF 73

UN POINT SUR 75

Fiche n° 113 : La route de l'après pétrole, par **C. Queffelec, J. Cantot** et **E. Chailleux**



Couverture :

© HUIISC1.

Conception graphique : Magali Serdel.

À propos de la yohimbine

Depuis sa création en octobre 2012, le clin d'œil étymologique suit l'ordre alphabétique, et il arrive ici pour la quatrième fois à la lettre « y ». La première fois, c'était à propos de l'yttrium (et donc de l'ytterbium), la deuxième fois à propos de l'ypérite, la troisième fois à propos de l'ylangène, et cette fois c'est à propos de la yohimbine, un nom peu connu, en tout cas aujourd'hui, mais présent dans les dictionnaires usuels, Petit Larousse et Petit Robert.

La définition de *yohimbine* dans le Petit Larousse est :

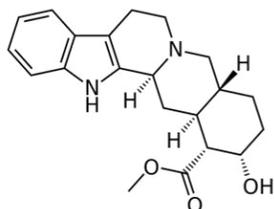
« PHARM. Alcaloïde extrait de l'écorce de *yohimbe*, vasodilatateur prescrit notamment dans le traitement de l'impuissance sexuelle. », et cette définition renvoie à celle de *yohimbe* :

« Arbre du Cameroun au bois violacé, dont l'écorce est employée en pharmacopée traditionnelle. »

Un arbre africain réputé pour ses bienfaits

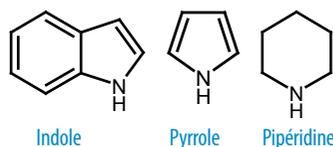
L'arbre nommé *yohimbe*, ou plutôt *yohimbe*, est originaire des forêts littorales d'Afrique Centrale, principalement du Cameroun. Son nom est d'origine bantoue, probablement du douala *yombwa*, désignant à la fois l'arbre et son écorce à usage médicinal, le douala étant l'une des langues bantoues (on en dénombre un peu plus de 500), celle parlée dans la région de Douala, capitale du Cameroun. Dans la médecine traditionnelle africaine, l'écorce du yohimbe est utilisée comme aphrodisiaque, et elle est aussi exportée en Europe pour l'industrie pharmaceutique. En effet, elle est riche en alcaloïdes dont le principal a été isolé et nommé en allemand *Yohimbin*, par le chimiste L. Spiegel en 1896, d'où *yohimbine* en français et en anglais.

Il y a des dizaines de substances naturelles qui ont été réputées aphrodisiaques, dont certaines sont aussi des drogues, mais la plupart n'ont qu'un effet limité et incertain (ou purement placebo, si l'on pense à la corne de rhinocéros). La yohimbine est pratiquement le seul aphrodisiaque d'origine végétale dont l'efficacité par voie orale soit scientifiquement reconnue.



Yohimbine

La yohimbine est un alcaloïde dit *indolique*, c'est-à-dire que sa molécule comporte un noyau indole, constitué d'un benzène accolé à un pyrrole. De plus, ce noyau indole est ici accolé à un cycle pipéridine. L'indole a été découvert parmi les dérivés de l'indigotine (voir À propos de l'indigo, *L'Act. Chim.* déc. 2019*), d'où son nom donné par A. Baeyer en 1866, en allemand *Indol*, de *ind(igo)* et *ol(eum)* « huile ».



Indole

Pyrrole

Pipéridine

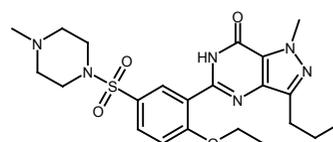
La pipéridine, dérivé de la pipérine, l'alcaloïde du poivre, en latin *piper*, a été identifiée et nommée par le chimiste français A. Cahours en 1853.

Une convergence transatlantique et chimique entre deux arbres

La yohimbine est présente dans d'autres plantes que le yohimbe, et notamment dans le quebracho blanc, un arbre d'Amérique du Sud (Brésil, Bolivie, nord de l'Argentine) surtout réputé pour la dureté de son bois : *quebracho* vient de l'espagnol *quebrar*, « casser », et *hacha*, « hache », un bois si dur qu'il casse la hache. Son écorce est riche en tannins et présente des propriétés aphrodisiaques. Un alcaloïde en a été extrait en 1880 par le chimiste O. Hesse qui l'a nommé en allemand *Quebrachin*, et il s'est avéré que cet alcaloïde était identique à la yohimbine découverte plus tard, mais dont le nom est resté le plus courant. Encore un exemple de convergence entre deux végétaux situés certes dans le même ordre des gentianales, mais dans des familles différentes : le yohimbe, arbre d'Afrique (*Pausinystalia johimbe*) de la famille des rubiacées, comprenant la garance (genre *Rubia*, de *ruber*, « rouge ») et le quebracho blanc, arbre d'Amérique (*Aspidosperma quebracho-blanco*) de la famille des apocynacées, comprenant les plantes du genre *Apocynum*, toxiques pour les chiens (du grec *apo*, « à l'écart » et *kunos*, « chien »).

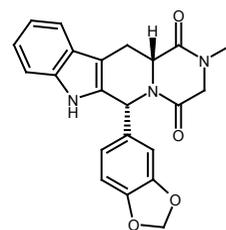
Les successeurs de la yohimbine

La yohimbine est inscrite à la *Pharmacopée européenne*, mais son utilisation est en déclin car, selon l'Académie de pharmacie, sa marge thérapeutique est étroite et sa balance bénéfices-risques mal évaluée.



Sildénafil

L'événement majeur vis-à-vis de la yohimbine a été la mise sur le marché, en mars 1998, d'une molécule de synthèse, le *sildénafil* (la célèbre pilule bleue de Pfizer, le Viagra®).



Tadalafil

Cette molécule était destinée au traitement de l'hypertension et de l'angine de poitrine, mais les essais cliniques sur ce point ont été décevants, alors qu'un effet secondaire s'est manifesté, non pas défavorable comme le plus souvent, mais au contraire favorable, et même réjouissant ! Un cas typique de sérendipité !

Épilogue

Plusieurs molécules de synthèse sont commercialisées désormais dans ce domaine, notamment le *tadalafil* (cf. publication GSK en 2003) qui est, comme la yohimbine, une molécule indolique dont le noyau indole est, comme dans la yohimbine, accolé à un cycle pipéridine.

* <https://new.societechimiquedefrance.fr/numero/n446-decembre-2019>

Pierre AVENAS,
ex directeur de la R & D dans l'industrie chimique.
pier.avenas@orange.fr

La scission de Solvay : entretien avec Ilham Kadri

Fin 2023, le groupe industriel belge Solvay a été scindé en deux entités distinctes, dont Syensqo. *L'Actualité Chimique* est allée pour nos lecteurs à la rencontre de sa dirigeante, Ilham Kadri, afin de mettre en lumière et décoder la stratégie d'une femme leader de la chimie mondiale.

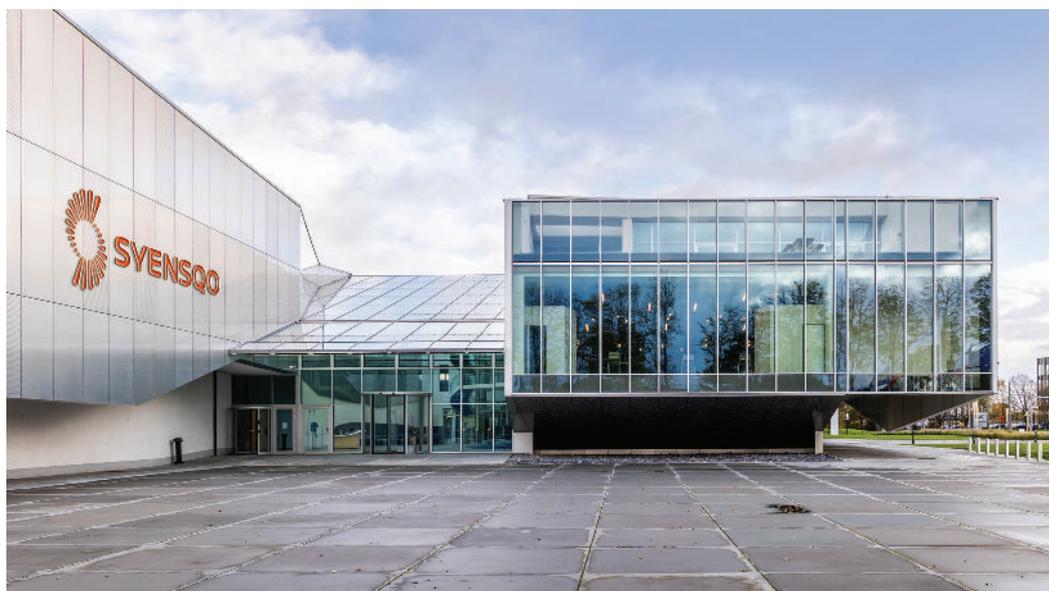
Ilham Kadri, vous venez de prendre la tête de Syensqo, issu de la scission du groupe Solvay. Vous êtes l'une des dirigeantes les plus influentes de l'industrie et vous êtes en tête du classement des dirigeants de l'industrie de la chimie les plus influents en Europe – vous y êtes d'ailleurs la seule femme... Que vous inspirent ces positions ?

Je suis fière d'être une influenceuse de l'industrie chimique européenne – non pas pour moi mais pour la chimie, l'industrie, la science et pour les femmes, la mixité, la diversité. Pour la chimie, parce que c'est un secteur qui mérite de rayonner davantage tant il est au cœur de nos vies et de notre futur, et pour les femmes qui sont encore trop peu présentes dans ce domaine et dans l'industrie en général. Les progrès réalisés ces dernières années sont immenses, mais il y a encore beaucoup de travail. Et cela commence très tôt, dès l'école primaire, pour donner aux petites filles le choix et le goût des sciences, pour qu'elles comprennent qu'aucune discipline n'est « réservée » aux hommes, qu'aucune porte ne leur est fermée. Assurer l'égalité dans l'accès à l'éducation est une nécessité – j'y suis particulièrement sensible au regard de mon parcours. C'est cela qui donnera aux entreprises le vivier de talents nécessaire pour leur permettre d'assurer une réelle mixité à tous les niveaux, y compris aux postes de direction. C'est d'autant plus important qu'une équipe mixte, diverse, inclusive, et je le constate tous les jours, est bien meilleure, plus performante, qu'une équipe constituée de profils uniformes.



Vous avez officialisé la scission de Solvay en deux entités en décembre dernier. Pourquoi ce choix et quelles sont les spécificités des deux entités ?

La scission de Solvay a été menée avec succès grâce au professionnalisme et à l'engagement de toutes les équipes de l'entreprise. Il s'agit d'une scission que nous avons voulue, pour des raisons stratégiques mais surtout avec la conviction



Siège social, Bruxelles. © Syensqo.



Clémence Abadie, technicienne R&D matériaux., Centre de Recherche & Innovation, Lyon.
© Syensqo/Olivier Panier des Touches.



Kusema, Jianxia Zheng and Zhen Yan, chercheurs, laboratoire Syensqo, Shanghai HQ (Chine).
© Syensqo/Mathias Guilin.

Quel sera le rôle de Syensqo dans la R&D ?

Syensqo est une entreprise scientifique. L'ambition de Syensqo est à la fois d'avoir un impact significatif dans son secteur d'activités, mais aussi d'être à l'origine d'avancées scientifiques majeures capables de faire progresser notre façon de vivre, de travailler, et de nous déplacer. La recherche et l'innovation y tiennent donc une place fondamentale – des efforts à hauteur de 5 % du chiffre d'affaires, avec 15 % des employés dans le secteur de la recherche. Syensqo est là pour répondre aux défis des clients, ceux d'aujourd'hui et de demain : l'hydrogène vert, les batteries de 3^e et 4^e générations, les semi-conducteurs... Nous sommes et serons au rendez-vous de leurs besoins et de leurs attentes.

La France représente d'ailleurs 40 % de la recherche de Syensqo dans le monde avec 500 chercheurs sur 2 000 collaborateurs. Nous pouvons compter sur deux Centres de recherche et d'innovation d'excellence : le Laboratoire du futur, à Pessac, et le Centre de recherche et d'innovation de Paris, à Aubervilliers. Parmi nos projets les plus impressionnants, le premier pilote destiné à la fabrication de batteries solides à l'échelle industrielle.

Quelles sont vos attentes pour la chimie ? Qu'est-ce qui doit motiver les chimistes du monde entier pour réussir, et comment valoriser la chimie à l'échelle mondiale ?

Je le dis à chaque fois que j'en ai l'occasion : la chimie est la mère de toutes les industries. Sans elle, rien n'est possible ou plutôt – car je suis une grande optimiste – avec elle, tout est possible. Les chimistes le savent mieux que personne, la chimie est partout, dans tout, et à ce titre – même si beaucoup de gens l'ignorent ou l'oublie – elle est à l'origine des plus grandes révolutions technologiques, mais aussi humaines. Aujourd'hui, c'est d'abord la chimie qui va permettre de réaliser les transitions nécessaires au futur de nos sociétés, comme celle de la mobilité avec l'électrification des véhicules. Et la chimie doit aussi opérer sa propre transition pour se décarboner, devenir plus verte, réinventer ses procédés pour les rendre toujours plus respectueux de l'environnement, aller vers plus de recyclabilité... La chimie est le maillon indispensable à la création d'une économie circulaire. Voilà autant de défis passionnants qui doivent convaincre les chimistes du monde entier de continuer à se dépasser et à repousser les limites, c'est là notre mission chez Syensqo.

que les deux entités seraient plus prospères de manière autonome. Nous avons d'ailleurs pris le temps pour mener à bien cette séparation en faisant les bons choix stratégiques à tous les étages, sans sacrifier ni nos valeurs ni nos projets. Cela n'enlève en rien l'immense complexité du processus, mais il a été porté par cette conviction. La création des deux entités – Syensqo et Solvay – a été largement plébiscitée par nos actionnaires lors de notre assemblée générale extraordinaire le 8 décembre dernier (99,53 % de votes positifs). Ils ont bien compris le sens de cette scission et son potentiel. Solvay a une longue histoire. Pourtant, au fil des ans, deux activités distinctes ont émergé de notre portefeuille d'activités : la chimie essentielle et la chimie de spécialités. Chaque métier a son caractère propre, avec sa logique, ses marchés, ses contraintes et ses objectifs. Leurs modèles opérationnels (c'est-à-dire les processus, l'organisation et la technologie) requièrent deux approches différentes.

Désormais, il y a donc d'un côté, la chimie de spécialités, dans Syensqo que je dirige, avec nos matériaux polymères de spécialité tels que le PVDF pour les batteries des véhicules électriques, les matériaux composites et les solutions utilisées dans la cosmétique et les produits d'entretien, les arômes, etc. La chimie essentielle garde quant à elle le nom de Solvay, avec les métiers historiques comme la production de carbonate de soude, de peroxyde d'hydrogène, d'adhésifs et de silice. La séparation des activités de chimie essentielle et de chimie de spécialités de Solvay crée deux leaders industriels solides, dotés de la flexibilité stratégique et financière nécessaire pour se concentrer sur leurs modèles d'entreprise, leurs marchés et les priorités de leurs parties prenantes.

Cette séparation est aussi l'aboutissement de cinq années de transformation profonde de la société pour la rendre plus rentable, plus durable et plus solide et nous avons récolté les fruits de cette stratégie avec deux ans d'avance sur le calendrier initial.

Focus sur les ressources et la gestion de l'eau

Dans le cadre de la conférence internationale « CBRNe Research & Innovation » prévue à Strasbourg du 19 au 21 mars 2024, le thème de l'eau est rapidement apparu comme une évidence pour que *L'Actualité Chimique* propose ce dossier spécial, étant donnés les enjeux sociétaux, sanitaires et économiques qui y sont liés. L'actualité récente s'est aussi bien illustrée par d'importantes sécheresses, entraînant des difficultés d'approvisionnement en eau potable, que par des inondations massives responsables de pollution des cours d'eau. L'eau est, en effet, un point central lorsque l'on s'intéresse à l'urgence climatique, l'action humaine, les épidémies – plus ou moins récentes – les accidents industriels ou encore les catastrophes naturelles. Il est important de noter que, dans le risque NRBCe (nucléaire, radiologique, biologique, chimique et explosif), il existe un continuum entre le risque naturel et intentionnel – à noter que la partie « explosifs » est minorée, se limitant uniquement à leur détection.

Le terrorisme NRBCe fait l'objet de programmes nationaux et internationaux portant sur la détection et l'identification des agents de la menace, la protection et la décontamination, la gestion du risque et des crises, ainsi que le développement de contremesures. Ces programmes de recherche sont développés au sein d'organismes étatiques tels que la Direction générale de l'armement (DGA), le Service de santé des armées (SSA), le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) ou l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS), en lien avec les universités et le CNRS, en association avec les primo-intervenants sur le terrain et en collaboration avec les industriels. La pluridisciplinarité des recherches et l'interactivité sont caractéristiques de ces programmes, aspects que l'on retrouve également dans le domaine de l'eau. Le présent dossier s'intéresse à la détection des agents de la menace et des pollutions associées, à la gestion des ressources et à l'intérêt des réseaux de surveillance de l'eau.

Le suivi de la qualité des eaux et la détection de la présence d'agents de la menace représente un enjeu majeur qui est abordé sous plusieurs angles. La détection des pollutions ou agents de la menace implique un échantillonnage pertinent et le développement d'outils analytiques performants. Concernant les techniques analytiques, la détection sans *a priori* apparaît comme essentielle et implique des outils performants avec une spécificité et une sensibilité de plus en plus pointues. Les articles de Boni *et al.* (voir p. 9) et de Brun *et al.* (p. 12) en sont une excellente illustration et permettent de comprendre l'importance de la surveillance et de la détection dans la lutte contre le terrorisme NRBCe.

L'implication de la population peut également s'avérer pertinente : l'opération « L'eau à la bouche » (p. 20) démontre l'utilité des interactions étroites entre les syndicats des eaux et les citoyens pour une amélioration continue de la qualité de l'eau potable.

Concernant la gestion de la ressource, il apparaît que la capacité d'approvisionnement en eau potable est un défi toujours d'actualité, même pour des sociétés hyper connectées. Le récit des sapeurs-sauveteurs de la sécurité civile lors de leur mission à Mayotte pour répondre à la crise de l'eau est éloquent (p. 22). Il permet de prendre conscience de la nécessité d'anticipation et de préparation aux événements futurs avec une dynamique d'amélioration constante. Il met également en lumière les capacités de réactivité et de réponse face à l'urgence et aux catastrophes.

L'article de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES, voir p. 27) permet de comprendre les enjeux liés à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine. Il met l'accent sur l'importance des réseaux de surveillance et aborde le concept d'eau sentinelle de la santé environnementale et des sociétés humaines. En complément, l'article du Syndicat des eaux et de l'assainissement Alsace-Moselle (SDEA, voir p. 30) soutient également une approche plus anticipative que curative. Ces deux articles insistent également sur le respect et la mise en place des directives françaises et européennes.

On peut distinguer, d'une part, l'introduction intentionnelle et malveillante d'agents et, d'autre part, les pollutions aquatiques accidentelles. Le Centre de documentation de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux (CEDRE) et l'INERIS sont deux organismes en charge de la gestion du risque de pollution accidentelle des eaux. Avec la mise en place de procédures, de plans d'urgence et des exercices de formation, l'impact des pollutions des eaux peut être réduit (p. 34). En complément de la préparation et formation à la gestion de crise liée à la pollution, de nouveaux outils sont désormais mobilisables.

L'article de l'INERIS expose les outils analytiques innovants leur permettant d'évaluer et surveiller les pollutions. Ils sont basés sur des méthodes de criblages non ciblés et des bio-essais *in vitro* validés en laboratoire (p. 38).

Parmi ces nouveaux outils, l'école des Mines d'Alès (p. 43) travaille au développement d'outils de modélisation afin d'anticiper et de minimiser au maximum les dommages éventuels sur les écosystèmes aquatiques et leurs environnements. De manière plus appliquée au NRBCe, l'article de Lefèvre *et al.* expose les capacités des filières de traitement de l'eau pour l'élimination des agents de la menace (p. 45).

Que les pollutions aquatiques soient accidentelles ou malveillantes, l'identification des responsabilités représente de toutes façons un enjeu important. Pour cela, la filière de la preuve doit pouvoir utiliser des dispositifs et des méthodologies robustes. L'article de l'Unité de la police nationale en charge des constations judiciaires NRBCe (CONSTOX, voir p. 48) les expose clairement.

Pour finir ce dossier, trois articles illustrant la pertinence de la mise en place de réseaux de surveillance des eaux usées exposent des cas concrets. Tout d'abord, un RETEX (retour d'expérience) sur la mise en place d'outils de suivi des eaux noires sur un navire militaire en réponse à la crise COVID-19 (voir p. 50). Également, il est démontré l'intérêt de la surveillance environnementale pour le programme d'éradication des poliovirus (voir p. 54). Cela permet de démontrer l'efficacité des outils de suivi des virus dans les eaux usées, que ce soit à grande échelle (au niveau des grandes villes) ou à plus petite échelle (sur un porte-avion). Enfin, est abordé le suivi environnemental des émissions de radionucléides issus de l'accident de la centrale de Fukushima (voir p. 57). Cette étude a mis en évidence l'influence de l'environnement sur l'évolution de la pollution et pointé la nécessité de disposer d'outils de cartographie dynamique au niveau spatio-temporel.

À travers la richesse de ce dossier portant sur les ressources et la gestion de l'eau, il apparaît évident que les enjeux demeurent importants et toujours d'actualité. Cela illustre aussi

l'étendue des capacités de la communauté NRBCe de contribuer à la détection, l'identification et la dépollution d'agents de la menace pouvant polluer les réseaux d'approvisionnement en eaux destinées à la consommation humaine ou les cours d'eau et les écosystèmes. Les savoir-faire pluridisciplinaires dans le domaine NRBCe sont également utiles pour la surveillance et la veille épidémiologique, ainsi que pour la préparation et les entraînements à la gestion de crise.

Emmanuelle BILLON-DENIS, chercheuse, cheffe de projet.

Institut de recherche biomédicale des armées,
Département des maladies infectieuses, Brétigny-sur-Orge.

*emmanuelle.billon-denis@def.gouv.fr

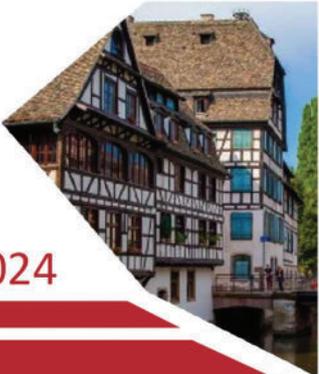


6th international conference

STRASBOURG

FRANCE

March 19th - 21st 2024






www.cbrneconference.fr

TOPICS

DETECTION - IDENTIFICATION

- Field sampling & analysis
- Detection technologies
- Laboratory identification
- Forensics
- Explosives

PROTECTION – DECONTAMINATION

- Human & environmental
- Infrastructure
- Smart textiles & surface
- Skin, wounds, hair & eyes

MEDICAL COUNTERMEASURES

- Epidemiology - Health surveillance
- Drug development
- Comprehensive approaches
- Diagnosis - Biomarkers

RISKS & CRISES MANAGEMENT

- Preparedness - Education & training
- Threat and risk assessment
- Crisis communication
- Transborder cooperation










Eaux usées et agents de la menace NRBCe

Résumé La menace terroriste, notamment NRBCe, persiste depuis des décennies et nécessite des programmes nationaux et internationaux pour la détection, l'identification des attaques et la protection des populations. L'épidémiologie des eaux usées, au-delà de la simple analyse des agents dans les eaux usées, est devenue un outil performant de suivi de la santé des populations, comme l'a démontré le réseau français Obépine en utilisant la quantification du génome viral pour suivre la pandémie COVID-19. Cette approche novatrice peut également s'étendre à d'autres agents pathogènes, y compris ceux liés aux risques intentionnels même si leur emploi est réglementé. La surveillance des agents chimiques, des substances explosives et radioactives dans les eaux usées offre des perspectives prometteuses pour renforcer la sécurité nationale, bien que des défis subsistent, tels que l'échantillonnage représentatif et la maîtrise des effets liés à la matrice.

Mots-clés **Épidémiologie des eaux usées, risque intentionnel, terrorisme, santé publique, biosurveillance, NRBCe.**

Abstract **Wastewater and CBRNe agents**

The terrorist threat, particularly CBRNe, has persisted for decades, necessitating national and international programs for the detection, identification of attacks, and the protection of populations. Wastewater-based epidemiology, beyond the simple analysis of agents in wastewater, has become an effective tool for monitoring the health of populations, as illustrated by the Obépine network in France, using the quantification of the viral genome to track the COVID-19 pandemic. This innovative approach can also be extended to other pathogens, including those linked to intentional risks, even if their use is regulated. Monitoring chemical agents, explosive substances, and radioactive materials in wastewater offer promising prospects for strengthening national security, although challenges remain, such as representative sampling and control of matrix-related effects.

Keywords **Wastewater-based epidemiology, CBRNe, terrorism, warfare, public health, biomonitoring.**

Depuis des décennies, la menace terroriste demeure constante et s'intègre sur le long terme dans nos sociétés. Le terrorisme NRBCe (pour nucléaire, radiologique, biologique, chimique et explosif) pose ainsi un problème majeur pour les États. En réaction, des programmes nationaux et internationaux de détection, d'identification, de protection, de décontamination des personnes et de l'environnement sont lancés. La recherche duale – à des fins civiles et de défense militaire – a pour ambition de développer des solutions technologiques innovantes pour renforcer la résilience de la nation face à cette menace NRBCe, notamment dans le domaine de la détection et de la quantification [1].

L'analyse des eaux usées a été utilisée depuis longtemps pour détecter ou doser les agents pathogènes, notamment en vue de maîtriser les agents du péril fécal. Le concept d'analyse des eaux usées a ainsi évolué vers le nouveau concept d'épidémiologie des eaux usées, utilisant ces dernières comme un miroir [2], plutôt que de les considérer seulement comme un réservoir d'agents pathogènes ou toxiques pour les hommes et les animaux. Concrètement, la surveillance épidémiologique des eaux usées peut être utilisée comme un indicateur de la santé de la population (par exemple, suivis de la consommation de médicaments, du génome du SARS-COV-2 pour anticiper sur les vagues épidémiques ou l'émergence de variants). En effet, le suivi des dangers biologiques a été rendu possible grâce au développement très rapide et à la performance toujours croissante des techniques de biologie moléculaire. Surmontant les défis



Manipulation d'un échantillon d'eaux usées au laboratoire. © Nicolas Busser, CNRS.

d'extraction et de quantification des virus dans les eaux usées, ces outils reposant sur l'amplification spécifique d'acides nucléiques de n'importe quel micro-organisme (qPCR en temps réel et PCR digitale) permettent un suivi rapide de l'émergence et de l'évolution des maladies infectieuses. Comme les PCR ciblées sur certaines mutations spécifiques, le séquençage génomique permet aussi de suivre les variants de divers agents infectieux [3].

Au-delà du risque lié à la COVID-19, l'intérêt de cette surveillance des eaux usées en vue de détecter ou quantifier chaque type d'agents de la menace mérite d'être exploré.

Surveillance des agents biologiques

La pandémie de COVID-19 a montré la pertinence d'une approche épidémiologique intégrée pour informer en temps réel les pouvoirs publics afin de proposer rapidement d'efficaces contre-mesures [4]. Pour cela, les indicateurs épidémiologiques traditionnels basés sur l'identification des cas cliniques et les tests de masse, se concentrant sur les individus, présentent des limites, notamment en raison de cas peu ou pas symptomatiques, de la réticence de la population à se faire tester régulièrement et de la difficulté en France d'organiser des campagnes de tests individuels basés sur une technique de sondage.

Le virus du SARS-CoV-2, bien qu'affectant principalement les voies respiratoires, est également présent dans le système digestif des personnes infectées. C'est la raison pour laquelle il est retrouvé dans les eaux usées collectées par les stations d'épuration. La quantification du génome viral dans les eaux usées est donc devenue une approche complémentaire, globale, non invasive et économiquement viable pour suivre la dynamique de circulation locale du SARS-CoV-2 dans une population [5].

En France, le réseau Obépine⁽¹⁾ – pour Observatoire épidémiologique dans les eaux usées, un consortium interdisciplinaire regroupant des équipes de l'Ifremer, de Sorbonne Université, de l'Université de Lorraine, du CNRS, d'Eau de Paris et de l'Institut de recherche biomédicale des armées – s'est constitué à partir de mars 2020. Obépine a mis en place un observatoire sentinelle des eaux usées, associant recherche multidisciplinaire et veille sanitaire, pour détecter précocement les fluctuations de l'excrétion virale afin de contribuer à maîtriser l'épidémie et ainsi limiter ses impacts sanitaires, économiques et sociaux. Depuis la publication des recommandations européennes en avril 2021, la surveillance du SARS-CoV-2 dans les eaux usées est officiellement assurée par le dispositif Sum'Eau (Santé publique France-Anses) depuis octobre 2023. L'Institut de recherche biomédicale des armées a adapté cet outil performant au suivi des infections virales sur le porte-avions Charles de Gaulle à la suite d'une première épidémie de COVID-19 à bord en 2020. Cet outil de surveillance a facilité la gestion du risque de contamination virale à bord lors des escales et des entrées de personnels (voir p. 50) [6].

L'épidémiologie des eaux usées offre ainsi une perspective novatrice pour éclairer la gestion de la pandémie au niveau territorial et national, mais aussi pour surveiller d'autres agents pathogènes et leurs variants, comme les marqueurs bactériens d'antibiorésistance ou les agents zoonotiques comme le mpox [7]. Pour ce qui concerne les agents du risque B intentionnel (par exemple pour la peste, le charbon, la brucellose et la tularémie), il ne semble pas y avoir de difficultés techniques majeures à étendre la surveillance à ce type de pathogènes car ils sont déjà étudiés comme contaminants environnementaux depuis 2005 [8]. Malgré tout, ces agents du risque B font partie, pour la plupart d'entre eux, de la liste des microorganismes et toxines (MOT) fixée par l'arrêté du 26 avril 2023 [9]. Cette réglementation a pour objectif la protection de la santé publique, en termes de sûreté biologique (pour prévenir un usage malveillant des MOT) et de sécurité biologique (dissémination involontaire). La mise en place d'une surveillance de ces agents dans les eaux usées ne pourra donc sans doute être mise en œuvre que par les laboratoires du réseau Biotox, sans évolution ou adaptation réglementaire. Un tel suivi nécessite, en outre, un traitement

des données brutes qui sont par nature bruitées (débit des stations, éléments de gestion des réseaux, paramètres chimiques, variabilité des données acquises entre les laboratoires) par des modèles mathématiques pour les rendre plus robustes [10, 11].

Surveillance des agents chimiques

L'analyse des eaux usées fait partie des techniques utilisées pour estimer les consommations médicamenteuses à différentes échelles (villes, pays). Des observatoires européens l'ont utilisée parmi d'autres méthodes pour y quantifier la présence d'antibiotiques et d'anxiolytiques.

Plus récemment, cette démarche a été appliquée, toujours à échelle européenne, pour l'estimation de la consommation de drogues illicites [12-14].

Cette approche novatrice présente des atouts majeurs, comme la capacité à donner une image agrégée des habitudes d'une communauté (et leurs déterminants) avec un nombre limité de prélèvements intégratifs et à très grande échelle. Elle est aussi utilisable dans une logique de conseil sanitaire et de prévention, fondements de l'action des professionnels de santé. En effet, elle permet de préserver l'anonymat des consommateurs/usagers puisque seul leur nombre moyen est évalué, pour peu que l'échantillonnage soit suffisamment intégratif (même si la notion de prélèvements « individuels » permettant trop facilement d'identifier le ou les consommateurs mériterait une approche consensuelle). Toutefois, cette approche possède des limites, en particulier la représentativité de l'échantillonnage ou encore l'incertitude associée à l'hypothèse d'une consommation/excrétion moyenne par consommateur. Cette donnée est complexe à fiabiliser. L'incertitude associée est probablement variable selon la taille de la population échantillonnée : faible à l'échelle de larges populations, mais entachée d'une erreur supérieure lorsque la taille de la population (et donc l'échelle des prélèvements) diminue. À petite échelle, il est sûrement délicat de distinguer l'excrétion d'un très gros consommateur de celle de quelques consommateurs plus modestes. À une échelle importante, l'hypothèse d'une mixité des profils est plus robuste.

Pour les agents C (chimiques), la détection concernerait en fait plutôt les substances elles-mêmes ou leurs sous-produits plutôt que les métabolites humains, ceux-ci n'étant pas toujours bien connus. Cela ressemblerait plus à une analyse environnementale [15] qu'à de l'épidémiologie des eaux usées qui, pour être pertinente, nécessiterait d'être automatisée pour alerter en temps réel et limiter les contaminations humaines.

Surveillance des substances explosives

Il existe quelques travaux exploratoires démontrant la faisabilité d'une détection de substances explosives dans les eaux usées, notamment les peroxydes, dont l'instabilité est souvent synonyme de confection « locale », rendant pertinent ce mode de détection [16]. Ces travaux relativement fondamentaux ne semblent pas avoir fait l'objet de mesures réelles en situation inconnue, mais ils constituent une intéressante preuve de concept suggérée par un laboratoire spécialisé de la police britannique. Comme pour d'autres substances, les difficultés à définir une stratégie d'échantillonnage pertinente (puisque, par définition, le mode de contamination n'est ni décrit ni reproductible) pourraient bénéficier de la mise en place de stratégies élaborées de prélèvements *in situ*, c'est-à-dire des

prélèvements semi-continus miniaturisés ou des prélèvements passifs sur support fonctionnalisé.

La mise en place de systèmes de collecte ou de réseaux de mesure à des fins épidémiologiques permet d'obtenir des échantillons réguliers autorisant l'emploi de tels outils.

Surveillance des substances radioactives

La surveillance aujourd'hui décrite concerne essentiellement le risque radiologique, l'explosion nucléaire étant par nature plus détectable que les contaminations radioactives qui en résultent [17].

L'intérêt du public pour la radioactivité et la présence de radionucléides dans l'environnement reste important en raison de leur toxicité, de leurs effets sur la santé et des impacts environnementaux associés. Des surveillances, y compris en ligne, des rejets des structures industrielles ou hospitalières sont donc déjà en place avec un corpus réglementaire bien établi [18].

Le risque radiologique industriel est ainsi revenu sur le devant de la scène en 2011. La côte Est du Japon a en effet été frappée par un tremblement de terre et un tsunami qui ont provoqué l'arrêt des pompes de refroidissement de trois réacteurs de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, suivi de leur entrée en fusion. Cela a entraîné le rejet incontrôlé d'importantes quantités de matières radioactives dans les terres environnantes et dans l'océan Pacifique. Une surveillance locale a été mise en place pour quantifier les rejets du site industriel dans l'environnement. Celle-ci n'a pas posé de problème technique majeur et a même pu être automatisée rapidement. Les systèmes de surveillance en ligne des eaux usées radioactives sont conçus pour discriminer la nature et quantifier l'activité des radionucléides détectés dans l'environnement. Toutefois, les radionucléides ne sont pas uniformément répartis dans les eaux usées ou les boues de station d'épuration.

Des radionucléides tels que le ^{40}K , le ^{210}Pb total, le ^{137}Cs , le ^{226}Ra , le ^{228}Ra , le ^{238}U et le ^{235}U auraient tendance à se partitionner sur les boues et les biosolides plutôt que d'être rejetés dans les effluents liquides. À l'inverse, l'iode 131 aurait plus de chances de rester dans l'effluent liquide que d'être retenue dans les boues [19-20].

La surveillance des eaux usées ne pose donc pas de problème technologique majeur et peut être utilisée pour détecter précocement des activités illicites.

Pertinence et polyvalence

La surveillance des eaux usées fait partie des nouveaux moyens de détection et de quantification des divers agents de la menace, notamment biologique, chimique, liée aux explosifs, aux substances radioactives. Intégrant des technologies de pointe, elle contribue déjà à la résilience nationale.

Dans le domaine biologique, des initiatives telles celles proposées par le réseau Obépine en France et de nombreuses équipes dans le monde ont démontré son potentiel pour anticiper et appuyer la gestion des épidémies à l'échelle nationale ou européenne.

Cependant, des défis persistent, notamment en matière d'échantillonnage représentatif, de facilité de mise en œuvre, de fiabilisation des données et d'utilisation éthique.

Les avancées prometteuses dans la détection de substances explosives ou radioactives dans les eaux usées soulignent la pertinence de cette approche pour la sécurité nationale.

Même si elle nécessite encore des travaux de recherche, elle peut venir compléter l'arsenal des outils dédiés à la prévention d'actes illicites. La surveillance des eaux usées, ayant déjà démontré sa pertinence épidémiologique et sécuritaire, émerge ainsi comme un outil polyvalent qui pourrait être puissant dans la gestion des menaces complexes d'aujourd'hui bien qu'elle n'ait pas été encore suffisamment testée.

(1) www.reseau-obepine.fr

[1] E. Billon-Denis, L. Hairault, M.-T. Ménager. Répondre aux menaces : explosifs, déminage et management de crises, *L'Act. Chim.*, **2022**, 472, p. 7-8.

[2] Bivins *et al.*, Wastewater-based epidemiology: global collaborative to maximize contributions in the fight against COVID-19, *Environ. Sci. Technol.*, **2020**, 54, 13, p. 7754-57.

[3] M.D. Parkins *et al.*, Wastewater-based surveillance as a tool for public health action: SARS-CoV-2 and beyond, *Clin. Microbiol. Rev.*, **2023**.

[4] A.C. Singer *et al.*, A world of wastewater-based epidemiology, *Nat. Water*, **2023**, 1, p. 408-415.

[5] S. Wurtzer *et al.*, Evaluation of lockdown effect on SARS-CoV-2 dynamics through viral genome quantification in waste water, Greater Paris, France, 5 March to 23 April 2020, *Eurosurveill.*, **2020**, 25(50).

[6] M. Boni *et al.*, L'Institut de recherche biomédicale des armées (IRBA) et l'épidémiologie des eaux usées : intérêt pour les forces armées, *Bul. Acad. Nat. Méd.*, **2022**, 206(8), p. 1011-21.

[7] S. Wurtzer *et al.*, First detection of monkeypox virus genome in sewersheds in France: the potential of wastewater-based epidemiology for monitoring emerging disease, *Environ. Sci. Technol. Lett.*, **2022**, 9(11), p. 991-996.

[8] L. Song, S. Ahn, D.R. Walt, Detecting biological warfare agents. *Emerg. Infect. Dis.*, **2005**, 11(10), p. 1629-32.

[9] Arrêté du 26 avril 2023 fixant la liste des micro-organismes et toxines prévue à l'article L. 5139-1 du Code de la Santé publique, NOR : SPRP2311658A, *JORF* n°123, 28/5/23.

www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2023/4/26/SPRP2311658A/jo/texte

[10] N. Cluzel *et al.*, Obépine consortium. A nationwide indicator to smooth and normalize heterogeneous SARS-CoV2 RNA data in wastewater, *Environ. Int.*, **2022**, 158.

[11] S. Wurtzer *et al.*, Obepine Sig, Laurent Moulin. From Alpha to Omicron BA.2: New digital RT-PCR approach and challenges for SARS-CoV-2 VOC monitoring and normalization of variant dynamics in wastewater, *Sc. Tot. Env.*, **2022**, 848, 157740.

[12] A. Sue-Ching Löve, V. Ásgrímsson, K. Ólafsdóttir, Illicit drug use in Reykjavik by wastewater-based epidemiology, *Sc. Tot. Env.*, **2022**, 803, 149795.

[13] R.Z. Hahn, C.A. do Nascimento, R. Linden, Evaluation of illicit drug consumption by wastewater analysis using polar organic chemical integrative sampler as a monitoring tool, *Front. Chem.*, **2021**, 9, 596875.

[14] A. Bannwarth *et al.*, The use of wastewater analysis in forensic intelligence: drug consumption comparison between Sydney and different European cities, *For. Sc. Res.*, **2019**, 4(2), p. 141-151.

[15] P. Haishan *et al.*, Analysis of VX nerve agent hydrolysis products in wastewater effluents by ion chromatography with amperometric and conductivity detection, *J. Chr. A*, **2005**, 1089(1,2), p. 65-71.

[16] H. Rapp-Wright *et al.*, Suspect screening and quantification of trace organic explosives in wastewater using solid phase extraction and liquid chromatography-high resolution accurate mass spectrometry, *J. Haz. Mat.*, **2017**, 329, p. 11-21.

[17] J.E. Martin, F.D. Fenner, Radioactivity in municipal sewage and sludge, *Pub. Health Rep.*, **1997**, 112(4), p. 308-316.

[18] Q. Guoxiu *et al.*, Design of an on-line monitoring system for radioactive wastewater, *J. Rad. Nucl. Chem.*, **2017**, 314, p. 215-220.

[19] J. Smith *et al.*, The risks of radioactive wastewater release, *Science*, **2023**, 382, p. 31-33.

[20] M.E. Ahmed *et al.*, The presence and distribution of radioactivity and radionuclides in Kuwait wastewater treatment plants, *Arab. J. Sci. Eng.*, **2019**, 44, p. 8779-86.

Mickaël BONI^{1,2*}, vétérinaire en chef, **Fanny MAGISSON**¹, vétérinaire en chef, **Olivier GORGÉ**¹, pharmacien en chef, **GIS Obépine**² et **Jean-Ulrich MULLOT**³, pharmacien en chef.

¹ Institut de recherche biomédicale des armées, Brétigny-sur-Orge.

² Groupement d'intérêt scientifique Obépine (S. Wurtzer, O. Rohr, C. Vallet, Y. Maday, N. Boudaud, S. Le Guyader, C. Gantzer, L. Moulin, V. Maréchal), Paris.

³ Direction centrale du service de santé des armées, Paris.

*vbboni@gmail.com

Criblage non ciblé d'eaux naturelles par spectrométrie de masse ultra-haute résolution

Résumé Le criblage non ciblé de mélanges complexes par spectrométrie de masse ultra-haute résolution (SMUHR) devient progressivement un outil essentiel dans divers domaines applicatifs de la chimie analytique, y compris celui de la surveillance environnementale et de la lutte contre le risque NRBCe. Cet article présente l'apport de la SMUHR au criblage moléculaire et élémentaire d'échantillons complexes que représentent les eaux naturelles. En effet, nous verrons que cette technique, couplée à diverses sources d'ionisation à pression atmosphérique (electrospray ESI, photoionisation APPI, décharge lumineuse LS-APGD) permet désormais de caractériser finement la composition moléculaire des composés organiques (à la fois d'origine biogénique et anthropogénique), ainsi que d'éléments métalliques et radioactifs à partir d'échantillons d'eaux naturelles. Les applications présentées dans cet article illustrent également le fait qu'au-delà du criblage moléculaire, la SMUHR permet dorénavant l'exploration, *via* l'utilisation d'outils de traitement et de visualisation de données novateurs, des processus biotiques et abiotiques responsables des transformations moléculaires dans les eaux naturelles.

Mots-clés Spectrométrie de masse ultrahaute résolution, criblage, toxiques chimiques, matière organique dissoute, diagramme de van Krevelen, défauts de masse de Kendrick.

Abstract Non-targeted screening of natural waters by ultra-high resolution mass spectrometry

Non-targeted screening of complex mixtures using ultra-high resolution mass spectrometry (UHRMS) is gradually becoming an essential tool in a variety of analytical chemistry applications, including environmental monitoring and CBRNe threats. This article presents the contribution of HRMS to the molecular and elemental screening of complex samples such as natural waters. We will see that this technique, coupled with various ionization sources at atmospheric pressure (ESI electrospray, APPI photoionization, LS-APGD glow discharge), can now be used to finely characterize the molecular composition of organic compounds (of both biogenic and anthropogenic origin), as well as metallic and radioactive elements in natural water samples. The applications presented in this article also illustrate the fact that, beyond molecular screening, HRMS now enables the exploration, *via* the use of innovative data processing and visualization tools, of the biotic and abiotic processes responsible for molecular transformations in natural waters.

Keywords Ultrahigh resolution mass spectrometry, screening, chemical toxins, dissolved organic matter, van Krevelen diagram, Kendrick mass defects, uranium, plutonium.

Depuis plusieurs décennies, les risques et menaces NRBCe représentent une préoccupation majeure pour la santé publique et l'environnement. Ces risques représentent un enjeu capital pour nos autorités. En effet, un accident, un acte de sabotage ou de terrorisme pourrait entraîner le rejet de substances toxiques dans l'environnement (par exemple, toxiques organiques ou radiologiques), engendrant par exemple la contamination des réseaux d'eau potable (ex : eaux superficielles ou souterraines) avec des implications potentielles sur la santé de la population. Dans ce contexte, il apparaît ainsi nécessaire de disposer d'outils analytiques permettant le criblage non-ciblé d'échantillons d'eaux naturelles pour l'évaluation de leurs qualités sans *a priori*. Cette approche revêt un intérêt particulier pour examiner de manière approfondie un système dans son ensemble, et permet de visualiser ses changements suite à une modification (ex : une contamination, un traitement chimique...)

Parmi le panel d'instruments analytiques, la spectrométrie de masse est la seule technique analytique capable de fournir des informations détaillées sur la composition chimique élémentaire des molécules à l'état de traces dans un mélange. Depuis quelques années, le couplage de sources d'ionisation à pression atmosphérique (source electrospray ESI, à ionisation chimique APCI ou à photoionisation APPI) à des spectromètres de masse ultrahaute résolution, combiné à des méthodes de retraitement de données innovantes

(diagrammes de van Krevelen, défauts de masse de Kendrick, réseaux de neurones) ouvre de nouvelles voies dans le domaine de l'expertise chimique non-ciblée.

Cet article décrit le criblage moléculaire par spectrométrie de masse ultrahaute résolution. Il aborde les principes fondamentaux, l'instrumentation, ainsi que les outils couramment employés dans notre laboratoire pour l'exploitation et la visualisation des données. De plus, il explore l'application de cette méthodologie dans l'analyse d'échantillons complexes, tels que les eaux naturelles.

La matière organique dissoute des eaux naturelles : un mélange ultra complexe

La matière organique des eaux naturelles (qu'elles soient marines, continentales ou atmosphériques) est composée d'un continuum extrêmement varié d'espèces chimiques présentant diverses propriétés chimiques et masses moléculaires [1-3]. En plus des composés organiques d'origine biogénique (par exemple, des composés issus de la dégradation de matière organique naturelle), il convient d'ajouter les micropolluants (composés organiques synthétiques ou xénobiotiques résultant de l'activité humaine). Par ailleurs, au cours de leur cycle biogéochimique, ces composés subissent une atténuation naturelle d'origine biotique (métabolisme microbien hétérotrophe, etc.) et/ou abiotique (photochimie,

chimie rédox catalysée par les métaux), créant des sous-produits aux caractéristiques physicochimiques inconnues. Cette variabilité intrinsèque rend toute tentative de séparation très complexe. Pour répondre à ce défi, la spectrométrie de masse à ultrahaute résolution (SMUHR), en raison de sa sensibilité et de sa spécificité, est aujourd'hui un des outils privilégiés en chimie analytique pour la caractérisation de ces mélanges ultra complexes.

Criblage moléculaire non ciblé

Contrairement à l'analyse ciblée qui ne concerne que les ions spécifiques des molécules recherchées, le criblage non ciblé en SMUHR est effectué en mode scan total⁽¹⁾. Ces analyses non ciblées présentent un grand intérêt pour l'évaluation de la qualité des eaux naturelles sans *a priori*. Elles permettent notamment la caractérisation moléculaire de la matière organique naturelle dissoute et les micropolluants organiques et, ainsi, la découverte de nouveaux marqueurs de pollution. De plus, l'analyse non ciblée offre la possibilité de mener des études rétrospectives à partir des données acquises. Il est cependant important de prendre en compte plusieurs particularités associées aux analyses non ciblées, telles que la nature qualitative des résultats, une sensibilité généralement plus faible, le besoin d'une expertise avancée, des coûts élevés et une certaine subjectivité dans l'interprétation des données.

Avantage de l'ultrahaute résolution pour l'analyse de mélanges complexes

Pour illustrer l'efficacité de la SMUHR à analyser des mélanges complexes, examinons le spectre de masse (figure 1). Ce spectre comprend 36 espèces isobariques avec des valeurs de rapport masse sur charge (m/z) entre 180,0 et 180,2. Pour distinguer les formules brutes $C_7H_6N_3O_3$ (m/z : 180,0410), $C_9H_8O_4$ (m/z : 180,0422), $C_{10}H_4N_4$ (m/z : 180,0437) et $C_{12}H_6NO$ (m/z : 180,0449), il est essentiel d'avoir un instrument avec une résolution (R_s) d'au moins 1 000 000 à ces rapports m/z . Une résolution maximale de 100 000, comme dans le cas d'une trappe Orbitrap LTQ-XL, ne permet pas de distinguer ces espèces isobariques. Ainsi, la spectrométrie de masse à ultrahaute résolution est cruciale pour identifier avec précision les formules brutes en mesurant leur rapport masse/charge exact. Cette mesure permet de déterminer la formule brute en utilisant les masses atomiques exactes. En mesurant précisément la masse d'un ion (jusqu'à 4 ou 5 décimales après la virgule) et en connaissant avec précision les masses de chaque atome et de leurs isotopes, on peut ainsi déduire une combinaison unique d'atomes (formule brute) correspondant à la masse mesurée.

Pendant longtemps, la spectrométrie de masse par résonance cyclotronique ionique à transformée de Fourier (FT-ICR MS) de Brüker (figure 2A) était privilégiée pour ses performances exceptionnelles en résolution et précision de la masse. Récemment, Thermo a introduit l'Orbitrap Fusion Lumos 1M (figure 2B), une trappe orbitale offrant une analyse à ultrahaute résolution ($R_s = 1\,000\,000$ à $m/z : 200$).

Exploitation et visualisation des données SMUHR

Le criblage non ciblé d'échantillons de matières organiques dissoutes extraites d'eaux naturelles par SMUHR résulte généralement en un spectre de masse complexe contenant

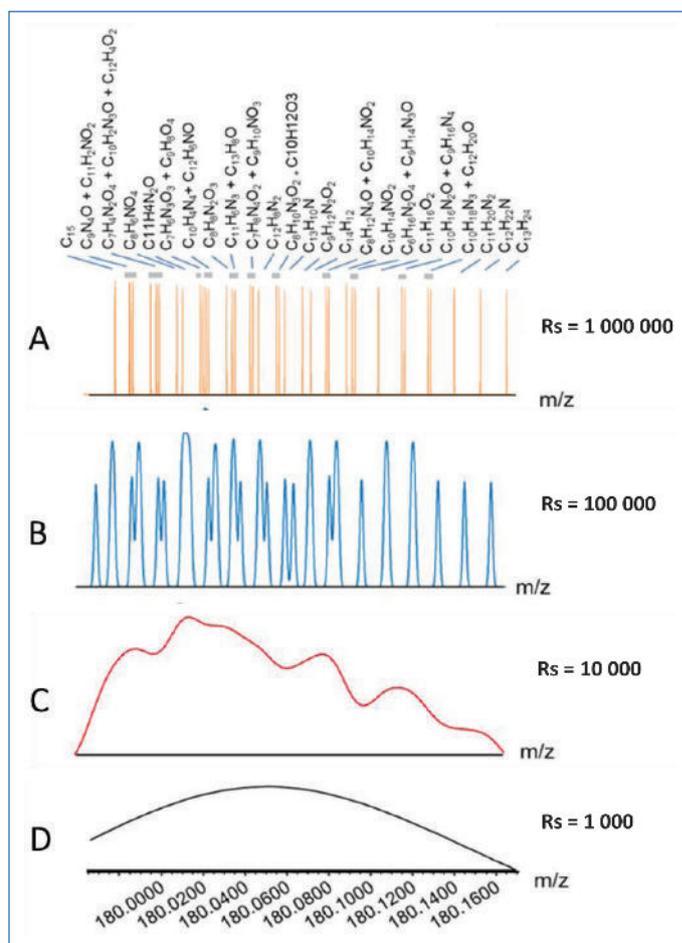


Figure 1 - Spectres de masse simulés entre les rapports m/z 180,0000 et 180,1600 avec la résolution correspondant à : A) un FT-ICR MS ou un Orbitrap Fusion Lumos 1M ; B) un Orbitrap LTQ-XL ; C) un analyseur TOF (pour *time of flight*, temps de vol) ; D) un analyseur simple quadripôle.

plusieurs milliers de pics à des valeurs de m/z comprises entre 100 et 900 (voir spectres, figure 2). Afin d'attribuer des formules élémentaires et d'interpréter les informations biogéochimiques contenues dans ces analyses, plusieurs outils de traitement des données et de visualisation ont été développés.

Attribution des formules brutes aux signaux mesurés

Plusieurs étapes ont été nécessaires afin d'extraire l'information moléculaire à partir des spectres de masse bruts présentés précédemment (figure 2). En effet, une étape de recalibration interne doit être assurée afin d'obtenir la plus haute précision en masse possible afin d'attribuer la bonne composition élémentaire aux signaux mesurés (voir encadré page suivante). Pour la recalibration et l'attribution de la composition élémentaire d'un grand nombre de signaux, il existe de nombreux algorithmes commerciaux ou développés par des laboratoires. Nous pouvons citer, par exemple, Composer de la société Sierra Analytics ou encore Formularity développé par le groupe de Tolic [4]. Ces logiciels permettent d'attribuer certains pics du spectre conformément aux critères définis par l'utilisateur. Ils effectuent des recherches spécifiques sur des séries d'ions, les répertorient en fonction de leur nature et du nombre d'hétéroatomes qu'ils contiennent, ainsi que du nombre d'insaturations ou d'équivalent double-liaison (DBE, *double bond equivalent*).

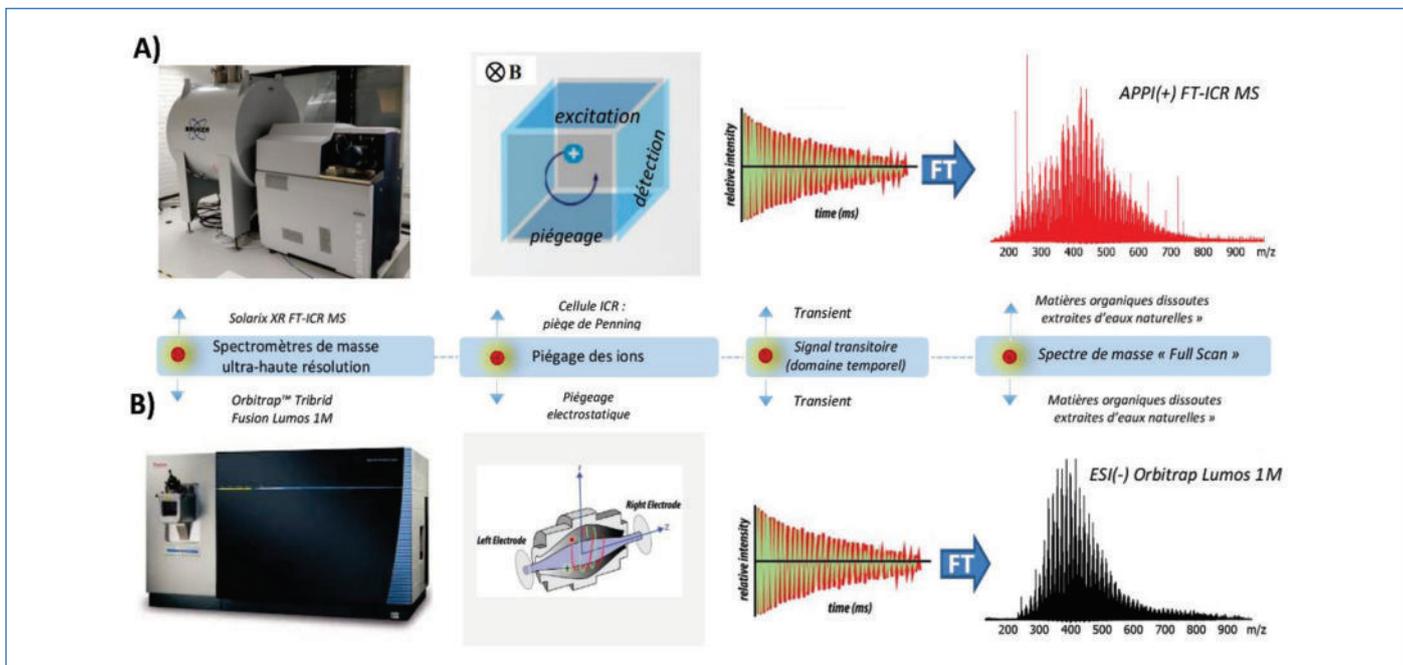
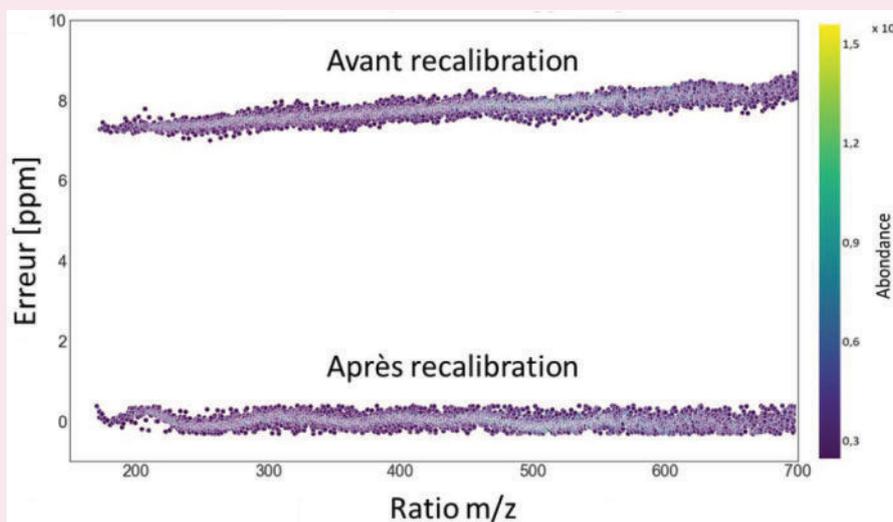


Figure 2 - Schéma comparatif montrant les différents types de piégeage et détection des ions sur deux plateformes de spectrométrie de masse ultra-haute résolution : A) FT-ICR. B) Orbitrap Lumos 1M.

Encadré

La recalibration en masse : une étape essentielle !

La recalibration est une étape cruciale préalable à l'interprétation des spectres de masse. En choisissant judicieusement sur toute la gamme de masse étudiée des composés dont la formule chimique (et donc le rapport m/z), est connue de façon non ambiguë, l'analyste recalcule des rapports m/z pour l'ensemble des signaux du spectre de masse et élimine ainsi l'erreur liée à la mesure. Le graphique ci-dessous illustre parfaitement ce principe : avant recalibration, l'erreur est en moyenne de 7,5 ppm ; après recalibration, l'erreur est centrée autour de 0.



La figure 3A illustre, par exemple, la recherche des formules élémentaires ($C_cH_hN_nO_o$) correspondantes aux m/z 267,10251, 267,12360, 267,13889, 267,16000 et 267,19638 en limitant la recherche à $C_{0-30}H_{0-60}O_{0-15}N_{0-2}$ et aux combinaisons respectant les « sept règles d'or » [5], en prenant en compte une précision de mesure < 1 ppm.

Le diagramme de van Krevelen

Le diagramme de van Krevelen constitue un moyen particulièrement informatif de représenter graphiquement l'ensemble des composés d'un échantillon spécifique. Ce graphique

a été présenté en 1950 comme outil pour analyser les données d'abondance élémentaire globale des échantillons de charbon, en se basant sur le rapport élémentaire de l'hydrogène au carbone (H/C) par rapport à celui de l'oxygène au carbone (O/C). Il était déjà évident en 1950 que la distribution des données sur ces graphiques permettait de distinguer les échantillons provenant de différentes sources. L'application de la SMUHR à l'analyse des mélanges organiques complexes a conduit à l'extension de l'idée de van Krevelen pour distinguer simultanément toutes les compositions élémentaires individuelles. Ils fournissent en effet un outil graphique relativement simple pour visualiser des différences de composition

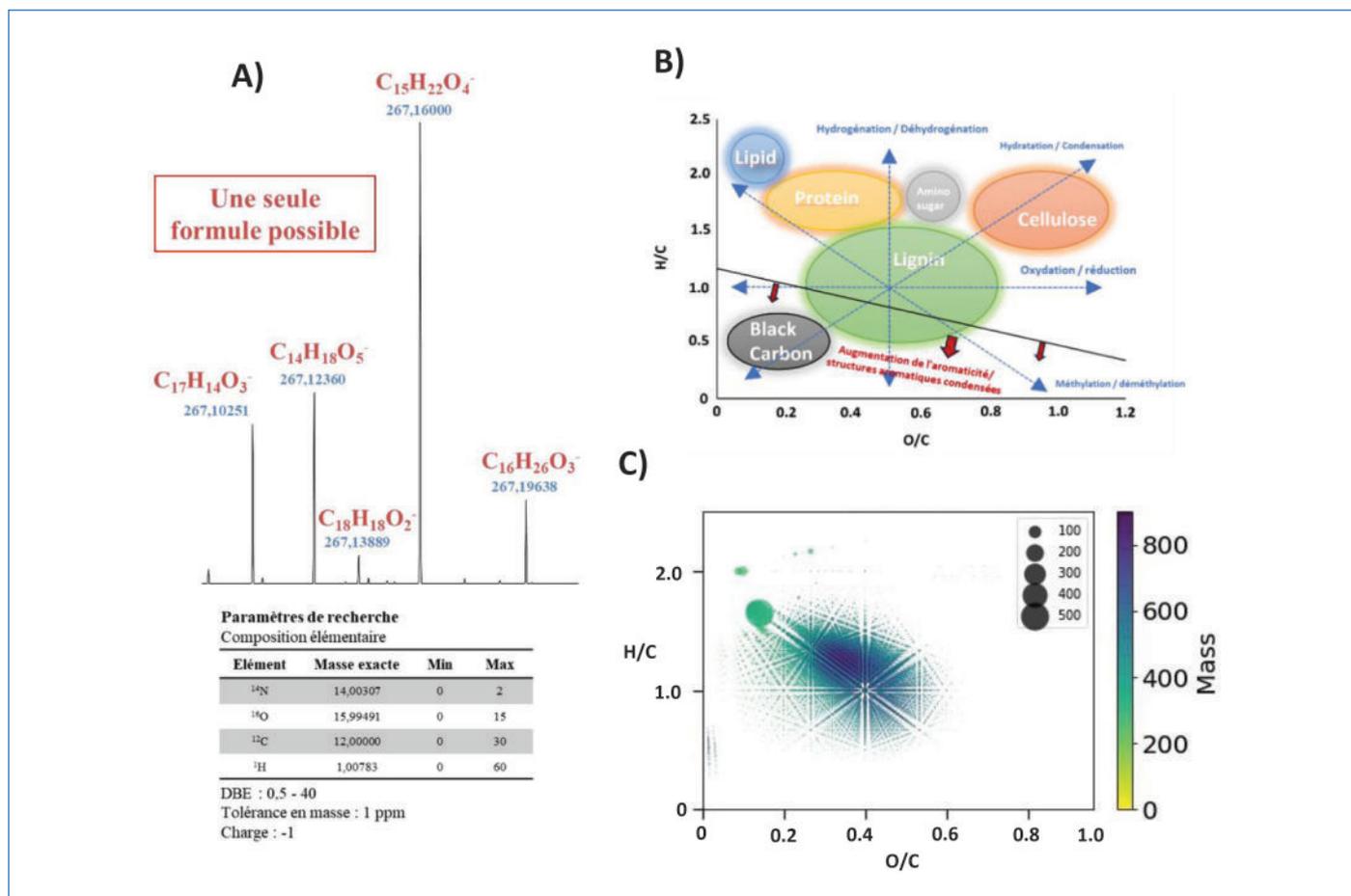


Figure 3 - A) Exemple d'attribution moléculaire de 5 oxanions ($[C_{17}H_{14}O_3]^-$, $[C_{14}H_{18}O_5]^-$, $[C_{18}H_{18}O_2]^-$, $[C_{15}H_{22}O_4]^-$ et $[C_{16}H_{26}O_3]^-$), limitant la recherche à $C_{0-30}H_{0-60}O_{0-15}N_{0-2}$ et en prenant en compte une précision de mesure < 1 ppm. B) Diagramme de van Krevelen représentant les rapports élémentaires H/C vs O/C et illustrant les régions associées à différentes familles de composés. C) Diagramme de van Krevelen de la matière organique naturelle extraite d'une eau de rivière analysée par ESI(-) SMUHR.

entre des échantillons de nature, d'origine géographique et de traitement différents. Ainsi, la représentation de ce diagramme, appliquée à des milliers de formules élémentaires, permet d'assigner les composés à différentes familles, telles que les lipides, les sucres, les protéines, la lignine, etc. (figure 3B). Le diagramme de van Krevelen (figure 3C) représente l'analyse d'un échantillon de matière organique dissoute extraite d'eau de rivière. L'échantillon a été analysé par un spectromètre de masse de type Orbitrap LUMOS 1M équipé d'une source ESI en mode négatif. Sur la figure, les classes Ox d'hétéroatomes (O_1 , O_2 , O_3 , O_4) sont clairement séparées horizontalement (le rapport O/C distingue les classes qui diffèrent par le nombre d'atomes O) et les différences H/C (dues aux différences de DBE) sont séparées verticalement. Des points alignés, correspondant à des périodicités dans la composition élémentaire tels que plus ou moins H_2 (hydrogénation/déhydrogénation), H_2O (hydratation/condensation), O (oxydation/réduction) et CH_2 (méthylation/déméthylation), peuvent également y être distingués.

Application de l'intelligence artificielle à l'exploitation de données SMUHR

Grâce à la précision remarquable des analyses SMUHR (moins de 1 ppm), les formules moléculaires des échantillons permettent de déduire des relations entre les composés détectés et de construire des réseaux biogéochimiques. Cette approche est complémentaire des diagrammes de van Krevelen, où certaines transformations sont visibles. Par cette approche,

toutes les réactions connues, qu'elles soient abiotiques ou biotiques [6,7] sont répertoriées dans des « réseaux de différences de masse » (MDiN, *mass difference network*). Les MDiN sont construits en utilisant les valeurs m/z des échantillons comme nœuds, et les liens entre ces nœuds sont définis par une liste d'écarts de masse communs, chaque écart représentant une réaction biogéochimique (figure 4).

Ainsi, à l'aide du pipeline « MetaboDirect » [7] (outil à code source ouvert destiné à explorer et analyser la chimiodiversité des données SMUHR), les écarts entre les valeurs m/z de tous les pics présents dans un spectre SMUHR sont comparés à une liste de masses prédéfinies, également connues sous le nom de « clés de transformation biochimique », avec une tolérance maximale de 1 ppm [3]. Ainsi, comme indiqué figure 4A, une différence de masse ($\Delta m/z$) de 14,01565 uma représente une transformation de type « méthylation », indiquant un changement absolu de CH_2 après la substitution d'un atome d'hydrogène par un groupe CH_3 , tandis qu'un $\Delta m/z$ de 15,99491 uma représente une hydroxylation, signifiant un changement absolu de O après la substitution d'un atome d'hydrogène par un groupe OH [5]. Par conséquent, les MDiN permettent une analyse approfondie des relations biogéochimiques dans les spectres SMUHR de la matière organique dissoute, fournissant des informations essentielles sur sa diversité chimique et les réactions microbiennes/abiotiques qui l'ont formée [3]. De ce fait, les nœuds du réseau moléculaire (figure 4B) sont colorés selon leur catégorisation en fonction des ratios H/C et O/C, incluant des composés comme les acides aminés, la lignine, les tanins, les glucides, les lipides, les hydrocarbures insaturés,

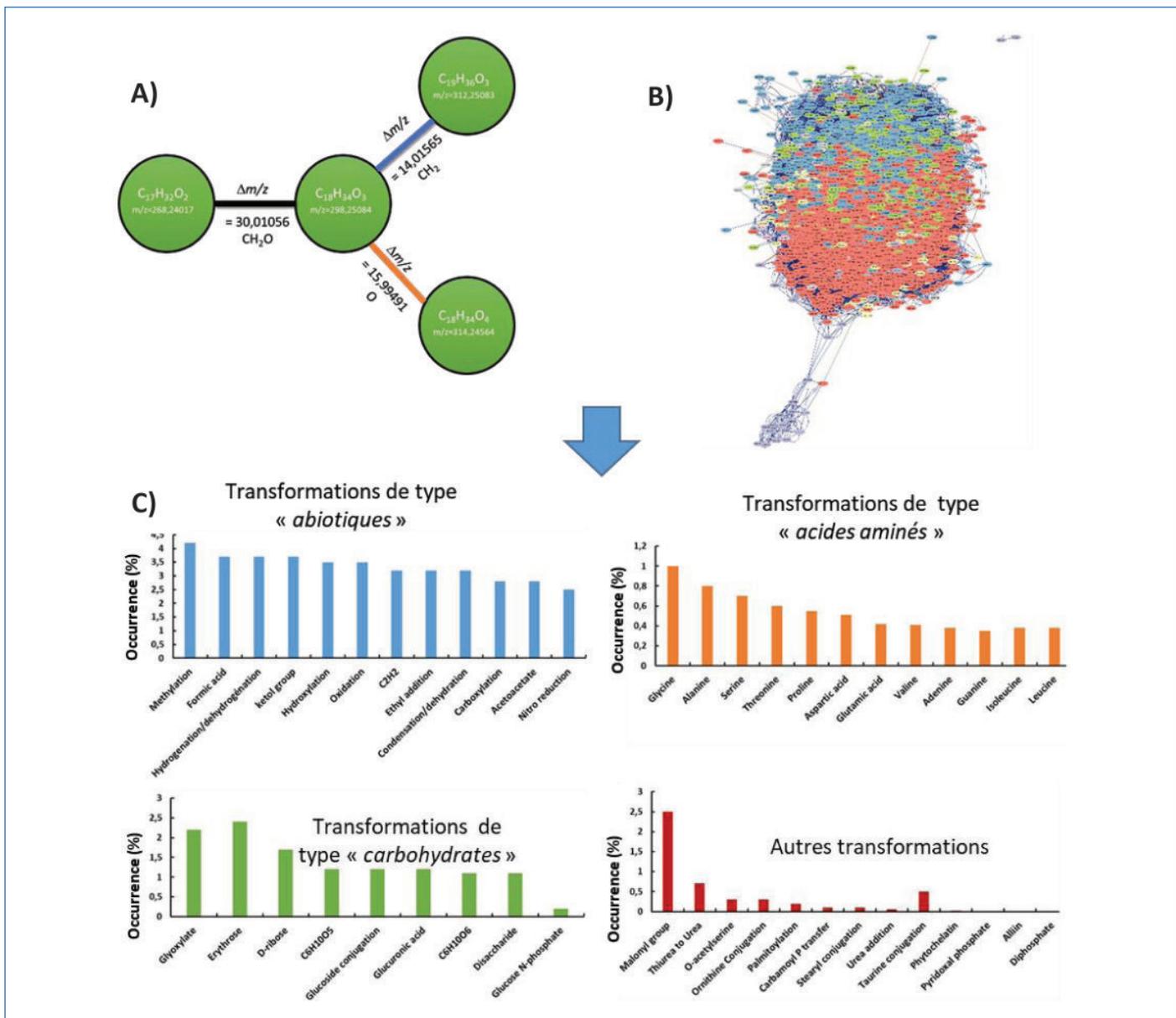


Figure 4 - A) Illustration d'un nœud de « réseau de différence de masse » comprenant trois transformations chimiques (CH_2O , O ou CH_2). B) Réseau moléculaire des transformations chimiques, le code couleur est lié aux rapports H/C et O/C. C) Proportion des transformations rangées par fréquence d'apparition pour les transformations de type « abiotiques » (bleu), « acides aminés » (orange), « carbohydrates » (vert) et autres (rouge) [3].

les hydrocarbures condensés, les protéines, etc. et les transformations biogéochimiques sont classées en fonction de leur occurrence (en %, voir figure 4C).

Les défauts de masse de Kendrick

Le retraitement de données issues du criblage non ciblé d'eaux naturelles permet de détecter des composés organiques synthétiques ou xénobiotiques liés à l'activité humaine, ainsi que des pollutions accidentelles ou diffuses provenant de rejets urbains et industriels. La figure 5A illustre le spectre UHR correspondant à l'analyse d'une eau souterraine (analyse par ESI - Orbitrap Fusion Lumos 1M d'un échantillon d'eau souterraine prélevé dans l'environnement proche d'un site de formation à l'utilisation d'extincteurs), mettant en évidence des anions déprotonés de composés anthropogéniques alkyl perfluorés au sein d'un mélange complexe de matières organiques naturelles. Une simple représentation graphique des défauts de masse (différence entre la masse exacte et la masse nominale) en fonction des masses

nominales de chaque composé donne une empreinte moléculaire de l'échantillon et permet de séparer la composante naturelle de la composante perfluorée (figure 5B). L'utilisation des défauts de masse de Kendrick (KMD) simplifie également le traitement des données issues de mélanges complexes analysés par SMUHR, offrant une visualisation améliorée des caractéristiques structurales des composés de l'échantillon. En effet, Kendrick et son équipe ont observé qu'en convertissant l'échelle de masse de l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC) (où $\text{C} = 12,000 \text{ Da}$) en une échelle où $\text{CH}_2 = 14,000 \text{ Da}$, il devenait possible d'identifier rapidement les ions organiques appartenant à une série homologue grâce à leur défaut de masse commun. Cette approche est particulièrement pertinente pour l'analyse de mélanges complexes, notamment en présence de motifs communs tels que CH_2 ou d'unités répétitives comme CF_2 dans le cas des composés alkyl perfluorés. Les défauts de masse de Kendrick normalisés par le motif CF_2 pour 22 familles de composés PFAS sont présentés figure 6, soulignant les séries homologues alkyl perfluorées ayant un défaut de masse de Kendrick commun.

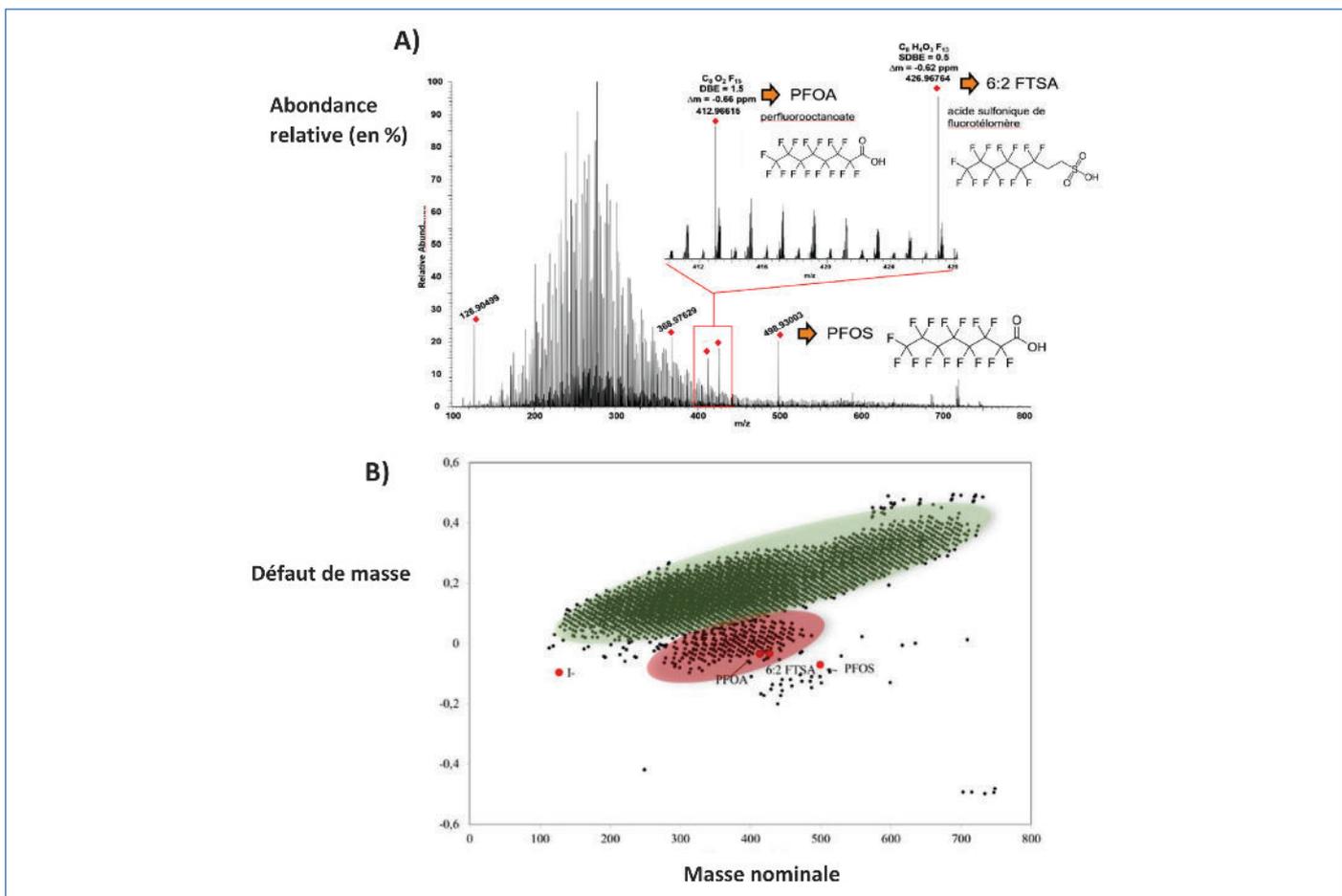


Figure 5 - A) Spectre de masse UHR d'un échantillon d'eau souterraine collecté dans l'environnement proche d'un site de formation à l'utilisation d'extincteurs. Le mélange contient des matières organiques naturelles et des composés alkyl perfluorés (par exemple, PFOA, 6:2 FTSA et PFOS). B) Défaut de masse des composés en fonction de leur masse nominale – la plupart des composés alkyl fluorés (ellipse rouge) ont un défaut de masse négatif contrairement à la matière organique naturelle (ellipse verte) qui présente un défaut de masse positif.

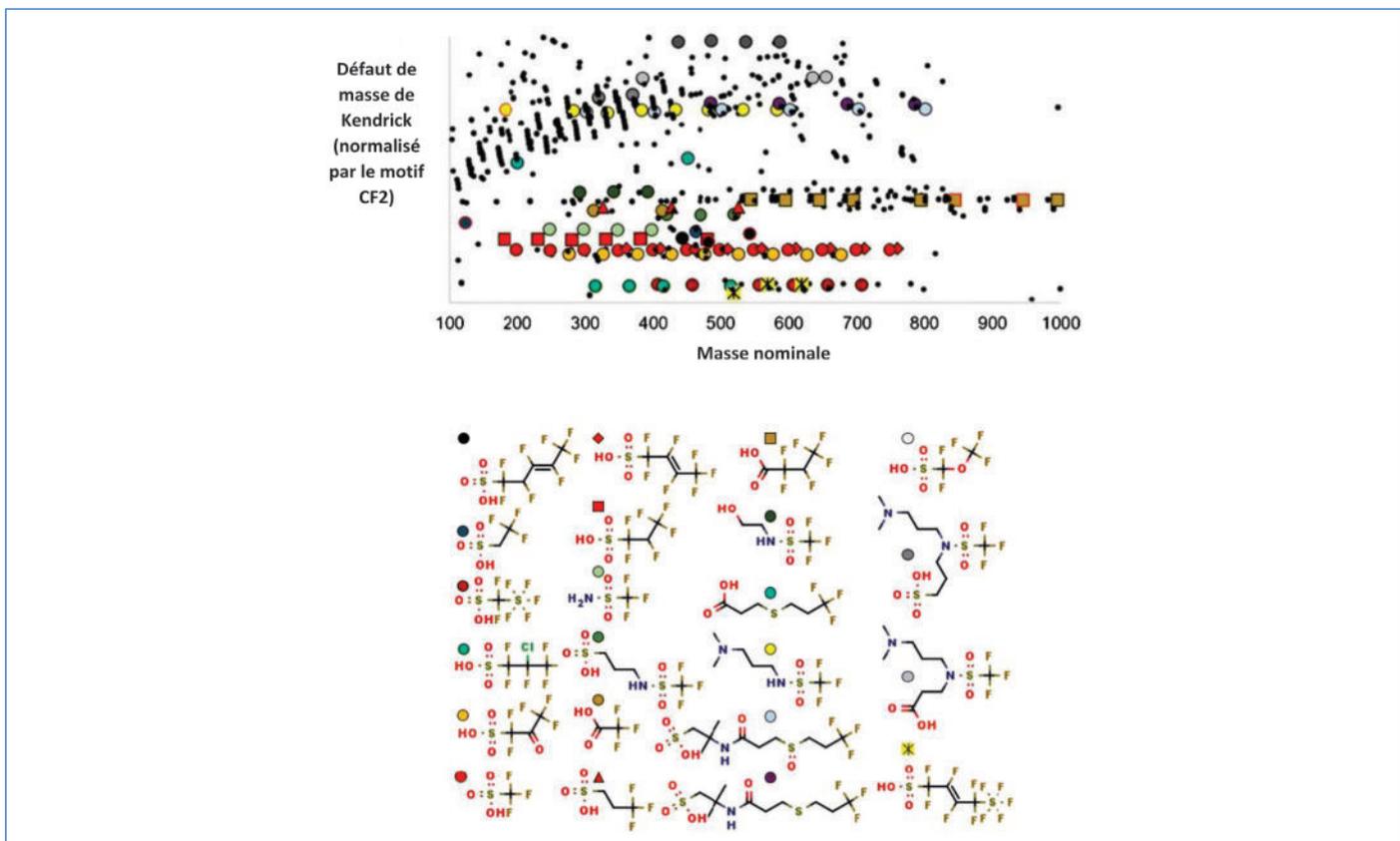


Figure 6 - Défauts de masse de Kendrick normalisés par le motif « CF_2 » en fonction de la masse nominal des composés. Les séries homologues de divers types de substances per et polyfluoroalkylées (PFAS) séparées par le motif « CF_2 » apparaissent sur les lignes horizontales. Adapté de [8] avec permission.

Application du criblage par SMUHR à la surveillance radiologique d'eaux naturelles

Le développement récent d'une source d'ionisation par décharge lumineuse à pression atmosphérique par échantillonnage de liquides (LS APGD, *liquid sampling atmospheric pressure glow discharge*) et son intégration à un spectromètre de masse Orbitrap par le groupe de Kenneth Marcus à

l'université de Clemson permet désormais de combiner les analyses à la fois moléculaires et élémentaires (CAM, *combined atomic and molecular*) sur une même plateforme analytique [9]. Ce couplage ouvre la voie au criblage d'éléments inorganiques (*figure 7A*) et d'éléments radioactifs (par exemple uranium, plutonium, voir *figure 7B*), voire même de déterminer le rapport isotopique (par exemple $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$) à partir de solutions aqueuses telles que des eaux naturelles.

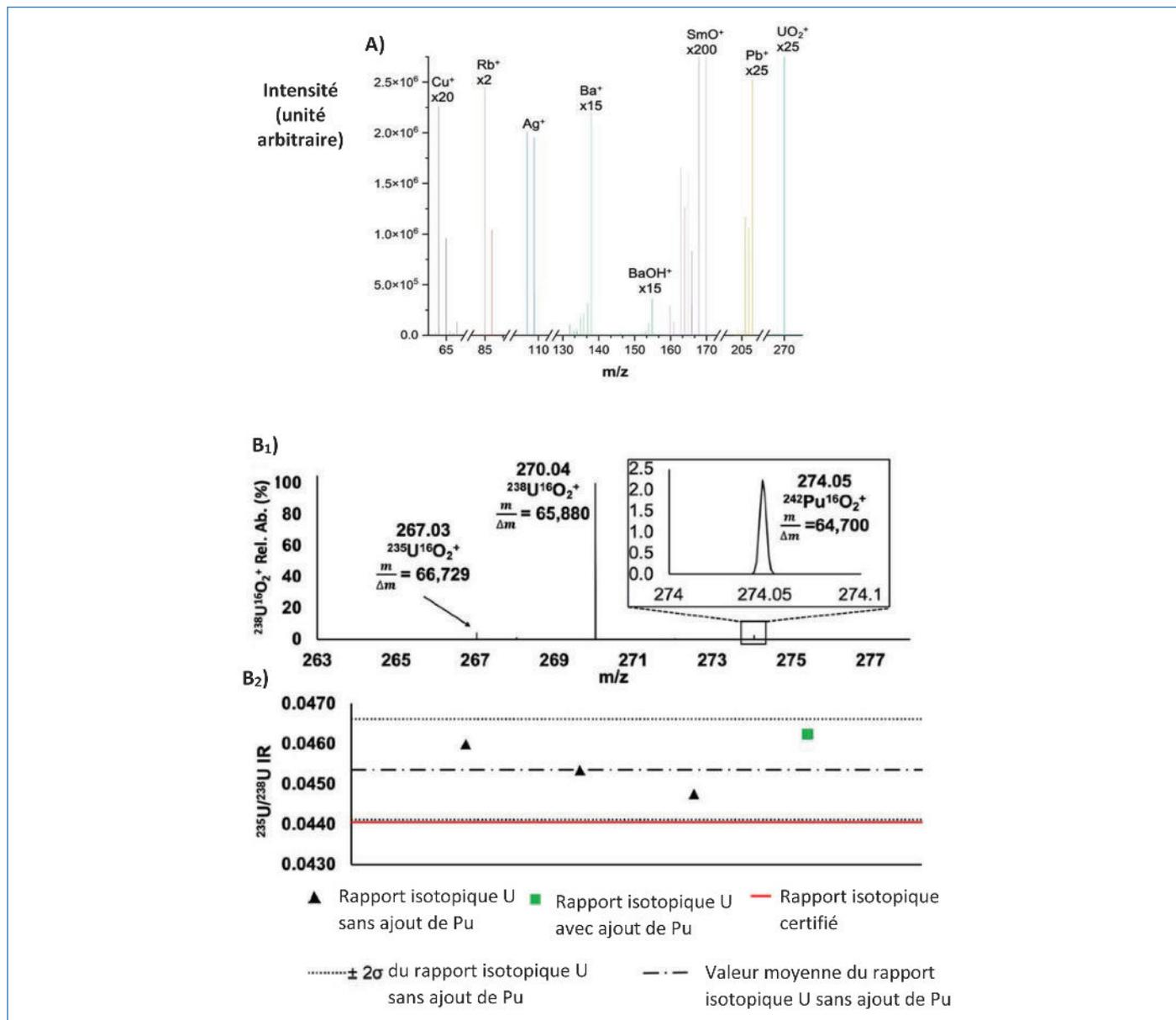


Figure 7 - A) Spectre de masse LS-APGD Orbitrap Q-exacte Focus d'un mélange d'éléments inorganiques à une concentration de 500 ng.mL^{-1} [9].

B1) Spectre de masse correspondant à l'analyse d'un mélange d'uranium (50 ng.mL^{-1}) et de plutonium (1 ng.mL^{-1}).

B2) Calcul du rapport isotopique de la solution d'uranium avec et sans plutonium à partir de l'analyse par LS-APGD Orbitrap [11]. Adapté de [10] et [11] avec permission.

Un réseau de laboratoires français spécialisés en spectrométrie de masse ultra-haute résolution

Du fait du coût relativement élevé d'achat d'un spectromètre de masse FT-ICR, un nombre limité de laboratoires en France et en Europe sont équipés de cette technique. Certains de ces laboratoires sont organisés en réseaux. Ainsi, les équipes françaises ayant une expérience dans le domaine de la FT-ICR et disposant d'appareillages de génération récente (champ magnétique de 7 à 12 Teslas) mettent à la disposition de la communauté française et internationale une part du temps d'expérience disponible ainsi que les compétences et savoir-faire nécessaires à la réalisation et à l'exploitation des expériences *via* une procédure d'appel d'offre permanente permettant ainsi aux chercheurs de soumettre leurs projets⁽²⁾.



Criblage et perspectives

Au-delà des principes fondamentaux de l'analyse par spectrométrie de masse ultrahaute résolution, ces méthodes analytiques révèlent non seulement tout leur intérêt pour le criblage non-ciblé d'échantillons d'eaux naturelles appliquées à la gestion d'un risque NRBCe, mais également l'exploration, via l'utilisation des applications de traitement et de visualisation de données novatrices, des processus biotiques et abiotiques responsables des transformations moléculaires dans les eaux naturelles.

(1) Mode scan total : ce mode permet d'explorer une large gamme de valeurs de rapports de masse sur charge m/z pour acquérir le maximum d'informations utiles à l'identification des molécules d'un échantillon.

(2) www.infranalytics.fr

[1] A. Bianco, M. Vaitilingom, N. Chaumerliac, L. Deguillaume, M.C. Bridoux, Molecular characterization of cloud water samples collected at the puy de Dôme (France) by Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry, *Environ. Sci. Technol.*, **2018**, 52(18), p. 10275-85.

[2] E. Maria, P. Crançon, G. Lespes, M.C. Bridoux, Spatial variation in the molecular composition of dissolved organic matter from the Podzol soils of a temperate pine forest, *ACS Earth Space Chem.*, **2019**, 3(8), p. 1685-96.

[3] M.C. Bridoux, G. Gaiffe, P. Pacholski, S. Cangemi, G. Vinci, R. Spaccini, S. Schramm, Concealed by darkness: Combination of NMR and HRMS reveal the molecular nature of dissolved organic matter in fractured-rock groundwater and connected surface waters, *Water Res.*, **2023**, 243, 120392.

[4] E. Tolic *et al.*, Formularity: software for automated formula assignment of natural and other organic matter from ultrahigh-resolution mass spectra, *Anal. Chem.*, **2017**, 89(23), p. 12659-65.

[5] T. Kind, O. Fiehn, Seven golden rules for heuristic filtering of molecular formulas obtained by accurate mass spectrometry, *BMC Bioinf.*, **2007**, 8, p. 105.

[6] R. Breitling, S. Ritchie, D. Goodenow, M.L. Stewart, M.P. Barrett, Ab initio prediction of metabolic network using Fourier transform mass spectrometry data, *Metabolomics*, **2006**, 2(3), p. 155-164.

[7] C. Ayala-Ortiz *et al.*, Metabodirect: an analytical pipeline for the processing of FT-ICR MS-based metabolomic data. *Microbiome*, **2023**, 11, p. 1-14.

[8] J.P. Koelmel *et al.*, Toward comprehensive per- and polyfluoroalkyl substances annotation using FluoroMatch software and intelligent high-resolution tandem mass spectrometry acquisition, *Anal. Chem.*, **2020**, 92(16), p. 11186-94.

[9] E.D. Hoegg *et al.*, Isotope ratio characteristics and sensitivity for uranium determinations using a liquid sampling-atmospheric pressure glow discharge ion source coupled to an Orbitrap mass analyzer, *J. Anal. At. Spectrom.*, **2016**, 31, p. 2355-62.

[10] K.R. Marcus, E.D. Hoegg, K.A. Hall, T.J. Williams, D.W. Koppenaal, Combined atomic and molecular (CAM) ionization with the liquid sampling-atmospheric pressure glow discharge microplasma, *Mass Spec. Rev.*, **2021**, 42, p. 652-673.

[11] J.V. Goodwin, B.T. Manard, B.W. Ticknor, P. Cable-Dunlap, R.K. Marcus, Initial characterization and optimization of the liquid sampling-atmospheric pressure glow discharge ionization source coupled to an Orbitrap mass spectrometer for the determination of plutonium, *Anal. Chem.*, **2023**, 95, p. 12131-38.

Charlotte BRUN, post-doctorante, **Gabriel GAIFFE**, ingénieur de recherche, et **Maxime BRIDOUX***, directeur de recherche.

CEA/DAM Île-de-France, Bruyères-le-Châtel.

* maxime.bridoux@cea.fr

9th EuChemS CHEMISTRY CONGRESS
Dublin, Ireland 7-11 July 2024

CHEMISTRY: ADDRESSING CURRENT AND FUTURE GLOBAL CHALLENGES

ECC-9 Congress Programme Themes

Advances in Synthetic Organic Chemistry	Education, History, Cultural Heritage, and Ethics in Chemistry
Catalysis	Nanochemistry/ Materials
Physical, Analytical and Computational Chemistry	Energy, Environment and Sustainability
Chemistry Meets Biology for Health	Supramolecular Chemistry

ECC-9 World-Leading Plenary Speakers

 Professor Dame Clare P. Grey	 Professor Odile Eisenstein	 Professor Véronique Gouverneur	 Professor Frances H. Arnold
 Professor Sir David W. C. MacMillan	 Professor Sir J. Fraser Stoddart	 Professor Omar M. Yaghi	 Professor Brigitte Van Tiggelen

EuChemS
European Chemical Society

www.euchems2024.org

surveillances de l'eau

Détection

L'opération « L'eau à la bouche » : un outil d'aide à la décision pour une meilleure gestion d'un réseau d'eau potable

Résumé Alors que la qualité de l'eau à notre robinet est continuellement contrôlée, les consommateurs prennent trop peu part à son évaluation. Or, c'est l'utilisateur qui est en première ligne si l'altération de la qualité de son eau est constatée. Son rôle de sentinelle est souvent sous-estimé alors qu'un lien étroit avec son service des eaux est nécessaire, voire obligatoire. Dans ce contexte, la conversion du citoyen en un « citoyen-acteur » est un processus à renforcer : l'opération « L'eau à la bouche » en est un bel exemple !

Mots-clés **Eaunologie, goût, odeur, capteur, chloration.**

Abstract **"L'eau à la bouche" operation: a tool for a better monitoring of water network**

While the quality of the water at our tap is continuously monitored, consumers take too little part in its evaluation. However, it is the user who is on the front line if a deterioration in the quality of their water is noted. Its role as a sentinel is often underestimated, even though a close link with its water service is necessary or even obligatory. In this context, the conversion of the citizen into a "citizen-actor" is a process that needs to be strengthened: "L'eau à la bouche" operation is one good example!

Keywords **Sentinel, taste, odor, sensor, chlorination.**

Le constat est unanime : les gens tiennent à leur eau du robinet et veulent qu'elle ne comporte ni goût ni odeur. Lors de l'analyse des causes d'insatisfaction, les désagréments d'ordre organoleptiques tiennent le premier rang, majoritairement ceux liés à la chloration, qui est le moyen de désinfection préventif ou curatif recommandé par les autorités sanitaires. Ainsi, afin de mieux comprendre ces phénomènes, le Syndicat des eaux et de l'assainissement Alsace-Moselle (SDEA) a lancé l'opération « L'eau à la bouche », mise en place une première fois en 2018 sur un secteur occasionnellement chloré, puis une seconde fois en 2019 sur un secteur qui l'est de façon continue. Sur le premier secteur, les « eaunologues » étaient agacés par le goût du chlore durant la période estivale, propice au développement du biofilm dans les réseaux d'eau potable. Sur le second secteur, il s'agissait de vérifier l'impact éventuel d'un traitement de reminéralisation d'une ressource couplé à un changement de nature de désinfectant (chlore liquide remplacé par chlore gazeux) et, en même temps, d'évaluer les éventuels désordres organoleptiques sur les 400 km linéaires d'un réseau de distribution ramifié.

En plus de la nature et du taux de désinfectant, il est reconnu que l'origine de ces désagréments sont souvent induits par la présence de différentes composantes identifiées sur l'ensemble de la chaîne de production d'eau potable : le type de ressources, la nature des conduites (métallique ou organique), les vitesses et temps de séjour de l'eau dans les canalisations, la température de l'eau, la structure des réseaux (maillé ou en antenne), la présence ou non d'équipements (vannes, poteaux incendie, ventouses...), etc. Ces deux études avaient donc aussi comme objectif de mettre en évidence ces composantes et les identifier.

Le recrutement, phase incontestablement la plus délicate de ce genre d'opération, a été conjointement mené avec le service communication. Les relais locaux (presse et élus) ont permis le recrutement de 86 personnes sur les deux secteurs, les « eaunologues ». C'est ainsi, que durant six mois de l'année (durant le mois de juillet jusqu'au mois de décembre, représentatifs d'une période à températures chaudes et d'une période à températures froides), ils se sont prêtés au jeu

consistant à restituer à une fréquence d'au moins trois fois par semaine la présence de goûts et/ou odeurs de chlore de leur eau du robinet et de les associer à leurs intensités respectives. Ainsi, le SDEA a dispensé une formation de deux heures afin de sensibiliser chaque participant aux goûts naturels de certaines eaux embouteillées : eaux sources et eaux minérales naturelles. Parmi ces eaux, celle issue des forages principaux qui alimentent les réseaux à l'étude. Aussi, afin d'apporter crédibilité et robustesse aux futures restitutions, des points-clés à respecter lors des épreuves de dégustation ont été rappelés : l'impartialité, l'hygiène et les lieux où seront préférentiellement réalisés les essais. Mais surtout, et afin d'apporter de l'intérêt à la démarche, la présentation du principe de fonctionnement du réseau desservant les communes dont sont originaires les goûteurs. Pour parfaire la qualité de l'opération, un kit du parfait goûteur d'eau a été remis à chaque participant comprenant, entre autres, un verre spécialement conçu pour les essais. Puis tous les participants ont été soumis à des tests en aveugle. Il s'agissait de leur soumettre des échantillons d'eau dont ils ne connaissaient ni l'origine (eau du forage alimentant le réseau), ni la nature (eau du forage chlorée à différents niveaux de concentration). Cette étape a permis de déceler les seuils de sensibilité de chacun, mais aussi de pouvoir déceler d'éventuels participants insensibles à l'odeur ou au goût de chlore.

Les restitutions ont été réalisées en ligne *via* une adresse mail dédiée. D'une façon simple et rapide, cet outil a permis d'obtenir au fil de l'eau l'ensemble des observations constatées. De cette manière, ce sont au total 2 594 observations (voir *tableau*) qui ont été transmises !

L'ensemble de ces données a ensuite été examiné à la loupe.

Trois constats ont pu être mis en lumière :

- Tout d'abord, les gens s'habituent à leur eau du robinet et ce qui les sensibilise le plus, ce sont les variations par rapport au goût auquel ils sont habitués. Les désagréments sont majoritairement liés à la perception olfactive et moins à la perception gustative. Le second constat est le phénomène d'accoutumance renforcé par des teneurs en chlore (environ 0,1 mg/L)

	Périodes d'études	Nombre de communes	Nombre d'eaunologues	Nombre de restitutions
Secteur épisodiquement chloré	Juillet à décembre 2018	6	13	533
Secteur constamment chloré	Juillet à décembre 2019	40	73	2 061
Total	6 mois/secteur	46	86	2 594

Tableau - Comparaison des deux secteurs ciblés par l'opération « L'eau à la bouche ».

très proches du seuil de détection olfactif (0,14 mg/L). Face à cette évidence, il a été nécessaire de contrôler la « dérive des capteurs » et éviter le susceptible effet de lassitude. La démarche a donc consisté à une modulation de la teneur en chlore sur le réseau afin de s'assurer que les réponses apportées corroborent le plus justement possible avec la variation du taux d'injection.

- Souvent, il s'agit d'épiphénomènes. Par conséquent, seul un suivi sur le long terme et en continu permet de les mettre en évidence. Face à ce constat, il paraît évident que cette démarche écocitoyenne tient toutes ses promesses. En effet, les observateurs – lorsqu'ils sont inclus dans la chaîne de mesures analytiques – peuvent être assimilés à des « capteurs en ligne », ce qui rend leurs observations qualitatives bien plus robustes que celles issues d'une seule mesure *a fortiori* à partir d'un échantillon discret prélevé de manière ponctuelle avec le risque de « passer à côté » de l'événement. Ceci est d'autant plus risqué car les molécules responsables de ces désagréments possèdent des durées de demi-vie intimement liées aux températures qui règnent dans les réseaux d'eau potable. Le caractère fugace du phénomène s'accroît avec la hausse des températures. À l'inverse, les basses températures de l'eau les « maintiennent en vie plus longtemps » ; c'est un constat supplémentaire qui a été révélé lors de cette étude dès la fin de l'été 2018, déjà particulièrement caniculaire.

- Enfin, occasionnellement, l'eaunologue apporte de la valeur ajoutée à la mesure. Ainsi, certaines perturbations sur le réseau (des travaux, par exemple) sont susceptibles d'engendrer des désagréments d'ordre organoleptique.

Par conséquent, la multiplication des observations, et donc indirectement des phénomènes qui surviennent sur toute la chaîne de production d'eau potable, permet une compréhension très fine du fonctionnement d'un réseau d'alimentation en eau potable. Ainsi, l'établissement d'une cartographie des goûts et odeurs est un support visuel et devient un outil confortable d'aide à la décision. Chaque sous-secteur est ainsi examiné plus en détails : il possèdera sa propre cartographie liée aux taux de désagréments.

Actions entreprises suite à l'utilisation de cet outil

Les sources et les lieux de ces phénomènes étant identifiés, ces études ont permis de dégager des actions curatives et préventives :

- sensibilisation des services techniques à l'utilisation de certains équipements du réseau ;
- suppression de certains de ces équipements ;
- mise en place d'un traitement supplémentaire de désinfection aux rayonnements UV sur une ressource ;
- diagnostic et mise en conformité de certains réseaux privés ;

- mise en place de deux analyseurs bactériologiques en ligne par cytométrie de flux ;
- actions localisées et ponctuelles sur les branchements et les antennes (purges, par exemple) selon les remontées.

Ces deux études, sur des secteurs dont les traitements de désinfection par chloration sont réalisés de façon continue pour l'un et discontinu pour l'autre, ont permis de dégager des constats d'ordre général.

- Les abonnés sont habitués au goût de leur eau.
- Ce qui importune les abonnés, ce sont d'avantage les variations de goûts ; une augmentation du taux de chlore, même faiblement, engendre le même constat.
- Toutes perturbations sur le réseau sont susceptibles d'engendrer des désagréments d'ordre organoleptiques.
- Les seuils olfactifs sont le plus souvent inférieurs aux seuils de détection instrumentale.

Et de façon plus précise, ces études ont mis en évidence et ont conforté que :

- La différence de nature du désinfectant (chlore liquide, puis chlore gazeux) affecte de manière peu significative les caractéristiques organoleptiques de l'eau.
- La hausse des températures de l'eau séjournant dans les canalisations contribue grandement aux désordres organoleptiques.
- L'utilisation inappropriée de certains équipements du réseau peut être source de dégradation bactériologique entraînant des désordres organoleptiques liés à la variation du taux de désinfectant.

En parallèle, le modèle mathématique de diffusion du chlore dans un réseau peut être un outil complémentaire d'anticipation de l'origine des désagréments.

Quantification des molécules génératrices de goût et odeur

En conclusion, les « consom'acteurs » ont grandement apprécié l'opération qui a permis d'établir une relation privilégiée dans le cadre de cette démarche expérimentale. Cela reste cependant une opération conséquente à mettre en œuvre et qui oblige de dynamiser en continu le panel de goûteurs afin d'éviter le phénomène de lassitude.

Enfin, il existe aussi une problématique liée à la nature même de certaines molécules génératrices de goût et odeur :

la possibilité de pouvoir les quantifier.

Emmanuel FELLMANN,
 Chef de projet, Service Transformations Métiers Innovations,
 SDEA Alsace-Moselle, Schiltigheim.

* emmanuel.fellmann@sdea.fr

surveillances de l'eau

Gestion

Les sapeurs-sauveteurs face aux enjeux climatiques

Résumé Les sapeurs-sauveteurs de la Sécurité civile ont les moyens de se projeter rapidement partout dans le monde pour déployer des modules de traitement de l'eau dans des zones impactées par des catastrophes. Ceux-ci permettent la potabilisation de l'eau *via* des process de préfiltration et décantation, d'ultrafiltration et d'osmose inverse. Ainsi, environ 15 000 personnes peuvent être chaque jour approvisionnées en eau potable. Ces techniques produisent une eau potable de très bonne qualité et contrôlée par les organismes de référence. Conscients des défis futurs liés au changement climatique, les formations militaires de la Sécurité civile sont dans une dynamique de constante amélioration.

Mots-clés **Situation d'urgence, module de traitement de l'eau, potabilisation, ultrafiltration, osmose inverse.**

Abstract **Civil security rescuers facing climate issues**

Civil security rescuers have the means to quickly project themselves anywhere in the world to deploy water treatment modules in areas impacted by disasters. These allow the purification of water via prefiltration and decantation processes, ultrafiltration and reverse osmosis. Thus, around 15000 people can be supplied with drinking water every day. These techniques produce drinking water of very good quality and controlled by reference organizations. Aware of the future challenges linked to climate change, military civil security training is in a dynamic of constant improvement.

Keywords **Emergency situation, water treatment module, potable water treatment, ultrafiltration, reverse osmosis.**



Engagement au Tchad. © UIISC7, 2022.

Les Formations militaires de la Sécurité civile (ForMiSC) sont des unités militaires mises pour emploi du ministère de l'Intérieur et des Outre-Mer (MIOM) et qui ont pour mission d'intervenir ou d'assister les populations en cas de crise sur le territoire national et à l'international. Dans ce cadre, les Unités d'instruction et d'intervention de la Sécurité civile (UIISC) de Brignoles et de Nogent-le-Rotrou sont capables de projeter des détachements de traitement de l'eau partout dans le monde sur très court préavis.

Le module traitement de l'eau

Chaque unité possède ses propres modules et est capable de projeter vingt tonnes de matériel et quarante sapeurs-sauveteurs en un temps record pour réaliser des opérations de pompage, de production, d'analyse et de distribution (*via* des rampes, des sachets individuels ou des camions-citernes) d'eau potable aux populations dans le besoin. Composés d'équipes spécialisées dans la production d'eau destinée à la consommation humaine (EDCH), ces détachements polyvalents sont complétés de médecins, cuisiniers, logisticiens, etc. Ils permettent une autonomie totale pour travailler immédiatement sur les zones impactées par une catastrophe.

Un détachement (voir *figure 1*) est capable de produire jusqu'à 225 000 litres d'eau par jour à l'aide de quatre machines d'ultrafiltration (UF) pour le traitement de l'eau douce, et 40 000 litres d'eau par jour à l'aide de cinq machines pour les modules d'osmose inverse pour l'eau salée.

L'Organisation mondiale de la santé (OMS) *via* le manuel Sphère [1] préconise 15 litres d'eau par personne et par jour comme minimum vital pour assurer les besoins fondamentaux

d'hygiène et d'hydratation. Cela permet de fournir en eau jusqu'à 15 000 personnes en situation d'urgence.

Ce module est certifié par le Mécanisme de protection civile de l'Union européenne (MPCU) et répond ainsi à des standards d'efficacité et d'autonomie reconnus dans le monde [2].

Il est aussi possible, dans un autre cas de figure, d'intégrer un dispositif de traitement de l'eau léger (armé par deux sapeurs-sauveteurs) afin d'assurer l'autonomie en eau à usage sanitaire au sein du camp d'un détachement projeté à l'étranger.

Les étapes de la potabilisation de l'eau

Lors de son engagement, le détachement doit être capable rapidement de définir, en lien avec les autorités locales, un lieu pour implanter son camp et sa station de potabilisation. Cela se déroule en plusieurs étapes :

- reconnaissance de site et analyse de l'eau brute ;
- choix du site d'implantation ;
- pompage et pré-traitement ;
- traitement de l'eau par UF ou osmose inverse ;



Figure 1 - BOO (base of operation) française d'un détachement traitement de l'eau à Madagascar. © UIISC1, 2022.

- désinfection ;
- reminéralisation (dans le cadre de l'osmose inverse) ;
- stockage et analyse de routine ;
- distribution.

Zoom sur les techniques de filtration utilisées

• Pré-filtration et décantation

L'eau passe par un circuit de préfiltration (*via* filtre à sable et filtre à charbon actif), puis de décantation pour éliminer les macromolécules et les hydrocarbures qui pourraient encrasser les membranes de filtration.

• Ultrafiltration

L'ultrafiltration (*figure 2*) est un procédé permettant la filtration de l'eau au travers d'une membrane semi-perméable (*figure 3*). Cette technique permet une filtration de l'ordre de 0,01 μm et de stopper des éléments tels que les parasites, bactéries, grosses molécules organiques, *etc.* L'eau, sur laquelle s'exerce une pression *via* la pompe, va passer au travers de la membrane qui retient les éléments par un mécanisme de tamisage.



Figure 2 - Module UF ForMiSC déployé en Indonésie. © UIISC1, 2018.

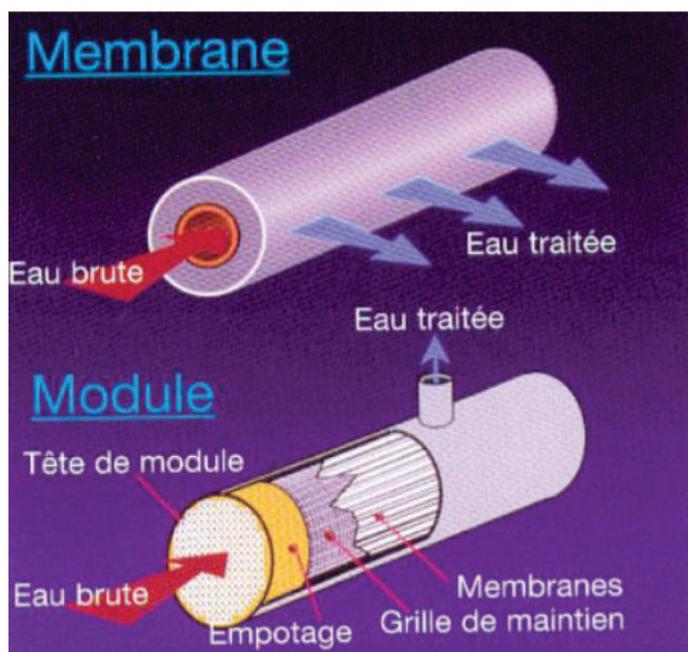


Figure 3 - Principe de l'ultrafiltration. © Cours de formation d'adaptation, École du génie.



Figure 4 - Opérateur travaillant sur une machine d'osmose inverse à Mayotte. © UIISC1/UIISC7, 2023.

• Osmose inverse

Depuis 2017, suite à l'ouragan ayant frappé l'île de Saint-Martin, les sapeurs-sauveteurs ont expérimenté, puis se sont dotés de modules plus compacts permettant la déminéralisation par osmose inverse pour travailler sur des zones présentant un défaut d'eau douce (*figure 4*). L'osmose est un processus naturel lors duquel une solution de concentration faible en ions migre vers une solution à concentration plus élevée afin de tendre vers un équilibre des deux solutions.

L'écoulement d'eau se fera de la solution la moins concentrée vers la plus concentrée.

L'osmose inverse est un procédé permettant d'éliminer particules et impuretés, en particulier les sels. Cette technique de filtration utilise un processus de pression à flux transversal (*figure 5*). Cette pression appliquée à la solution plus concentrée par une pompe force l'eau à s'écouler au travers d'une membrane semi-perméable ne laissant passer que les molécules d'eau. Grâce à ce procédé, il est ainsi possible de pomper une eau de mer et produire une eau déminéralisée de très bonne qualité. Dans le cadre d'une utilisation de cette eau pour la consommation humaine, il est possible de procéder à une reminéralisation. Ce processus nécessite l'injection d'une solution chargée en minéraux préparée en amont par les opérateurs. Malgré son efficacité, le rendement de ce procédé est moins important que ceux précédemment cités pour un coût d'énergie et de maintenance plus important.

Analyse de l'eau brute

Dans un premier temps, la projection d'un élément de reconnaissance est souvent nécessaire afin de déterminer le futur lieu d'implantation du site de captage et de production d'eau. Des reconnaissances globales du site en amont et en aval sont effectuées afin de vérifier que la ressource n'est pas polluée ou soumise à des perturbations extérieures (pollution ponctuelle, rejet particulier, influence anthropique, *etc.*) et que les conditions de sécurité sont optimales pour permettre au détachement d'évoluer sur de longues durées. La géographie et l'aspect logistique sont aussi abordés afin d'installer le camp et d'anticiper l'organisation de la distribution de l'eau.

Plusieurs paramètres sont pris en compte afin d'établir la localisation idéale (physico-chimique, microbiologique, *etc.*) afin de capter au préalable une ressource de la meilleure

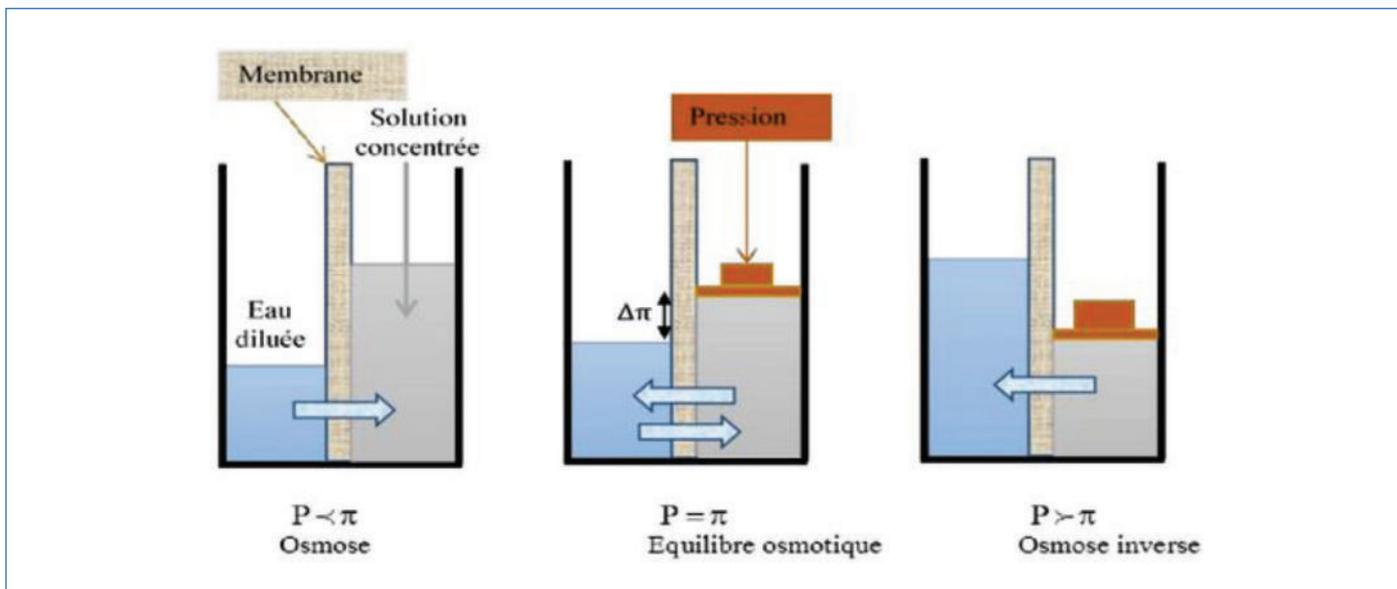


Figure 5 - Principe de l'osmose inverse [3].



Figure 6 - Laboratoire de campagne pour analyse et suivi de l'eau. © UIISC7, 2022.

qualité possible. Cela conditionne le traitement, l'organisation et la quantité de consommable nécessaire pour permettre au module de travailler sur la durée en toute autonomie (figure 6). Toutefois, l'aspect sécuritaire reste prioritaire sur ces paramètres.

Validation pour la distribution et contrôle

Une fois l'eau traitée et stockée, il est nécessaire de faire contrôler la qualité de l'eau par les autorités compétentes avant qu'elle soit distribuée au public. Sur le territoire national, cela passe par un contrôle des agences régionales de santé (ARS) et par une autorisation de distribuer délivrée par le préfet. À l'étranger, c'est le rôle de l'organisme local de référence.

Généralement, le détachement est en mesure de fournir les premiers échantillons d'eau produite pour analyse 24 heures après le début de la production et de permettre, en fonction de l'organisme responsable, une distribution dans les 72 heures après son déploiement. Une fois l'autorisation de distribuer effective, des contrôles journaliers sont effectués à tous les niveaux de la chaîne de production, tels que la concentration de chlore dans les bâches de stockage d'eau, la qualité

microbiologique, les paramètres physico-chimiques, etc. La qualité de l'eau brute peut aussi varier au cours du temps et nécessite un contrôle régulier.

Le détachement se base généralement sur les normes de qualité de l'eau française, du pays hôte ou, à défaut, sur les préconisations de l'OMS [4].

La distribution

La distribution de l'eau est organisée autour de plusieurs composantes. Elle peut se faire *via* des rampes de distribution directement sur le site de production où la population peut venir s'approvisionner (figure 7). Cependant, dans le cadre des interventions des ForMiSC en situation d'urgence, il est aussi nécessaire de pouvoir se rendre directement sur des zones éloignées pour aider et approvisionner les personnes les plus en difficulté.



Figure 7 - Distribution via rampe, Indonésie. © UIISC1, 2018.

Pour ce faire, on utilise généralement des citernes ou des camions chargeurs avec une bâche de stockage. Les modules ForMiSC disposent aussi d'une capacité d'ensachement d'environ mille sachets d'un litre par heure. Ces sachets sont identifiés et présentent diverses informations en plusieurs langues pour rassurer les consommateurs (figures 8 et 9).



Figure 8 - Sachet d'eau distribué aux populations.



Figure 9 - Distribution de sachets d'eau, Pakistan. © UIISC1, 2022.

L'eau, enjeu de demain : perspective et défis

Pour l'année 2021, plus de deux milliards de personnes vivent dans des zones géographiques en situation de stress hydrique [5]. Les phénomènes inhérents au changement climatique (tempêtes, sécheresse, inondations, etc.) viennent intensifier ces problématiques sur des populations déjà fragilisées. La France est aussi impactée, en particulier dans les territoires d'Outre-Mer, mais le réchauffement climatique impactera aussi à moyen terme le territoire national. L'accès à l'eau potable et la qualité de l'eau sont amenés à diminuer. Pour les ForMiSC, les défis futurs seront de permettre une pérennisation et un développement des modules de traitement de l'eau avec une modernisation des matériels et l'augmentation des effectifs avec la création d'une section spécialisée traitement de l'eau. Cet objectif permettra de

diminuer l'empreinte logistique avec des machines plus petites ayant de meilleurs rendements.

La cause environnementale est aussi un sujet de préoccupation. Un sachet d'eau biodégradable est actuellement à l'étude afin de ne pas créer une nouvelle source de pollution lors des interventions.

Pour faire face à ces problématiques, de nombreuses organisations non gouvernementales agissent pour permettre l'accès à l'eau dans les zones les plus en difficultés quand les ForMiSC interviennent en situation d'urgence liée à une demande d'aide au niveau internationale. De nombreuses solutions existent pour pallier au manque d'eau potable à court terme, mais l'intensification des phénomènes climatiques nécessite de se projeter sur des solutions pérennes afin de mieux préserver cette ressource essentielle à la vie.

Actualité des crises de l'eau

Missions majeures de traitement de l'eau des ForMiSC ces cinq dernières années :

2018 : Indonésie.

2020 : Alpes Maritimes (tempête Alex).

2021 : Haïti.

2022 : Pakistan, Madagascar, Guadeloupe, Tchad.

2023 : Mayotte.

Focus sur Mayotte

Le changement climatique et la ressource en eau potable disponible sont intimement liés. L'impact est significatif et se traduit par une imprévisibilité des phénomènes et une augmentation de leur occurrence. Ainsi, la probabilité d'engagement des modules de purification d'eau des FORMISC augmente, tout comme celle des autres modules.

Engagés une première fois à Mayotte sur la période d'avril à juin 2023, les sapeurs-sauveteurs y sont à nouveau projetés depuis octobre pour faire face à une crise de l'eau sans précédent.

Depuis le début d'année, l'île de Mayotte est confrontée à une sécheresse très importante. À cela s'ajoute une tension structurelle des réseaux d'eau accentuant cette problématique et raréfiant la ressource sur l'île. Les quantités d'eau de surface et souterraine s'amenuisent et les options de dessalement sont rares. Pour faire face à cette situation, les sapeurs-sauveteurs et leurs modules de traitement de l'eau ont été missionnés sur place avec l'installation successive de modules d'osmose inverse pour pomper et traiter la ressource en eau salée et des modules d'ultrafiltration installés dans les terres.

Au mois de novembre, plus d'une centaine de sapeurs-sauveteurs sont engagés successivement pour diverses missions : appui logistique et distribution de bouteilles d'eau, production d'eau au profit des zones prioritaires pour assurer une continuité des services, appui des services de l'État en métropole, envoi de matériel... C'est au total plus d'un million de litres qui ont été produits et distribués au profit de la population et près de 500 000 litres distribué en bouteilles. L'engagement se densifie et une distribution de 10 millions de litres par mois répartis sur 25 sites est prévue à compter de fin novembre 2024.

Les ForMiSC

Les Formations militaires de la Sécurité civile sont composées de 1 500 militaires répartis dans trois unités situées à Nogent-le-Rotrou (UIISC n°1), Corte (UIISC n°5), Brignoles (UIISC n°7). Elles interviennent aussi bien sur les risques naturels que technologiques, en France comme à l'étranger. Les sapeurs-sauveteurs qui les composent sont capables d'intervenir en cas de feu de forêt, tremblements de terre, catastrophes industrielles... Suite aux feux de forêt d'une ampleur inédite qui ont eu lieu en 2022, la création d'une quatrième unité a été décidée par le Président de la République. Elle sera inaugurée à Libourne en décembre 2024.

de la Commission 2004/277/CE, Euratom et 2007/606/CE, Euratom [notifiée sous le numéro C(2014) 7489]. Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE.

[3] T. Mare, P. Byrne, Les systèmes innovants de dessalement d'eau de mer, **2013**.

[4] Organisation mondiale de la Santé, *Directives de qualité pour l'eau de boisson : 4^e éd. intégrant le premier additif*, **2017**.

[5] www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water (consulté le 05/02/2024).

Anthony SALVADORI^{1*}, officier adjoint en compagnie d'intervention spécialisée, référent NRBCe et traitement de l'eau, et **Florent VANMOL**², officier traitant, référent traitement de l'eau.

¹ Direction générale de la Sécurité civile et de la gestion des crises, Groupement des moyens nationaux terrestres, UIISC n°1.

² Direction générale de la Sécurité civile et de la gestion des crises, Groupement des moyens nationaux terrestres, UIISC n°7.

*anthony.salvadori@interieur.gouv.fr

[1] *Le manuel Sphère : la charte humanitaire et les standards minimum de l'intervention humanitaire*, Projet Sphère, **2018**.

[2] 2014/762/UE: Décision d'exécution de la Commission du 16 octobre 2014 fixant les modalités de mise en œuvre de la décision n°1313/2013/UE du Parlement Européen et du Conseil relative au mécanisme de protection civile de l'Union et abrogeant les décisions



CHIMISTES sans frontières

Une chimie sûre, responsable, durable
Des actions au service des causes humanitaires

Instrumentation
Monitoring qualité des eaux

Diffusion du savoir
Apprentissage actif collèges/lycées

Développement
Travaux pratiques en Réalité Virtuelle

Expertise
Traitements des effluents d'une école

Coopération
Valorisation de ressources naturelles

Avec les soutiens

Société Chimique de France

Fondation de la Maison de la Chimie

Fédération Gay-Lussac
zoecoledchimie.com

contact@chimistessansfrontieres.fr

www.chimistessansfrontieres.fr

Rejoignez nous !

Chimistes sans frontières n'est pas affiliée à Médecins sans Frontières.

Enjeux de la qualité sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine

Résumé La garantie de la qualité et de la sécurité de l'eau destinée à la consommation humaine est un enjeu permanent au cœur des politiques publiques et des attentes sociétales. Elle repose sur le déploiement de dispositions opérationnelles et organisationnelles efficaces, de moyens techniques de surveillance graduels et implique un écosystème d'acteurs complexe. Cet article se propose de décrire ces grands principes et d'en dresser les principaux enjeux.

Mots-clés Sécurité de l'eau, qualité de l'eau, réseaux de surveillance, approche graduée.

Abstract Challenges for a safe quality of water intended for human consumption

Guaranteeing the quality and safety of water intended for human consumption is a permanent issue at the heart of public policies and societal expectations. It relies on the deployment of efficient operational and organizational disposals, gradual technical monitoring schemes and involves a complex ecosystem of stakeholders. This article aims to describe these fundamental principles and to identify the main issues.

Keywords Water security, water quality, monitoring network, tiered level approach.

Une eau destinée à la consommation humaine sûre et de bonne qualité : un enjeu permanent

La directive (UE) 2020/2184, relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine (EDCH), fixe dans son article en premier objectif de « protéger la santé des personnes des effets néfastes de la contamination des EDCH en garantissant la salubrité et la propreté de celles-ci » et renforce ses objectifs concourant à améliorer la sécurité sanitaire de l'eau [1].

La bonne gestion de la sécurité et de la qualité des eaux implique un écosystème complexe d'acteurs et de décideurs. Dans ce paysage, le Laboratoire d'hydrologie de Nancy de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (LHN-ANSES), qui est le laboratoire national de référence dans le domaine des eaux de consommation, eaux de loisirs et eaux minérales naturelles, apporte des repères scientifiques *via* la mise en place et le maintien d'un cadre organisationnel et méthodologique pertinent permettant de produire des données de qualité, en toute indépendance et impartialité, y compris dans des contextes de gestion de crises.

La surveillance régulière de la qualité sanitaire des eaux

Près de 33 500 captages, 16 300 stations de traitement et 25 300 unités de distribution d'eau potable font l'objet d'un suivi sanitaire qui s'organise selon deux piliers : le contrôle sanitaire et la surveillance. Les Agences régionales de santé (ARS) sont en charge de l'organisation du contrôle sanitaire impliquant en moyenne, chaque année, près de 320 000 prélèvements et 18,5 millions d'analyses pour l'ensemble des paramètres microbiologiques, radiologiques, physicochimiques réalisés par des laboratoires agréés. Les personnes responsables de la production et distribution de l'eau (PRPDE) sont, pour leur part, responsables de la surveillance en continu de la qualité des eaux qu'elles délivrent à leurs abonnés. Leur rôle sera renforcé par les Plans de gestion de la sécurité sanitaire des eaux (PGSSE) qui devront être mis en place

à l'horizon 2027. Leur objectif est de déployer les principes de gestion préventive des risques sanitaires susceptibles d'altérer la qualité des EDCH au travers de dispositions techniques, opérationnelles et organisationnelles visant à mieux identifier les dangers et vulnérabilités et améliorer les actions visant à maîtriser ces risques [2].

Quand l'eau n'est plus conforme : approche graduée de gestion de crise

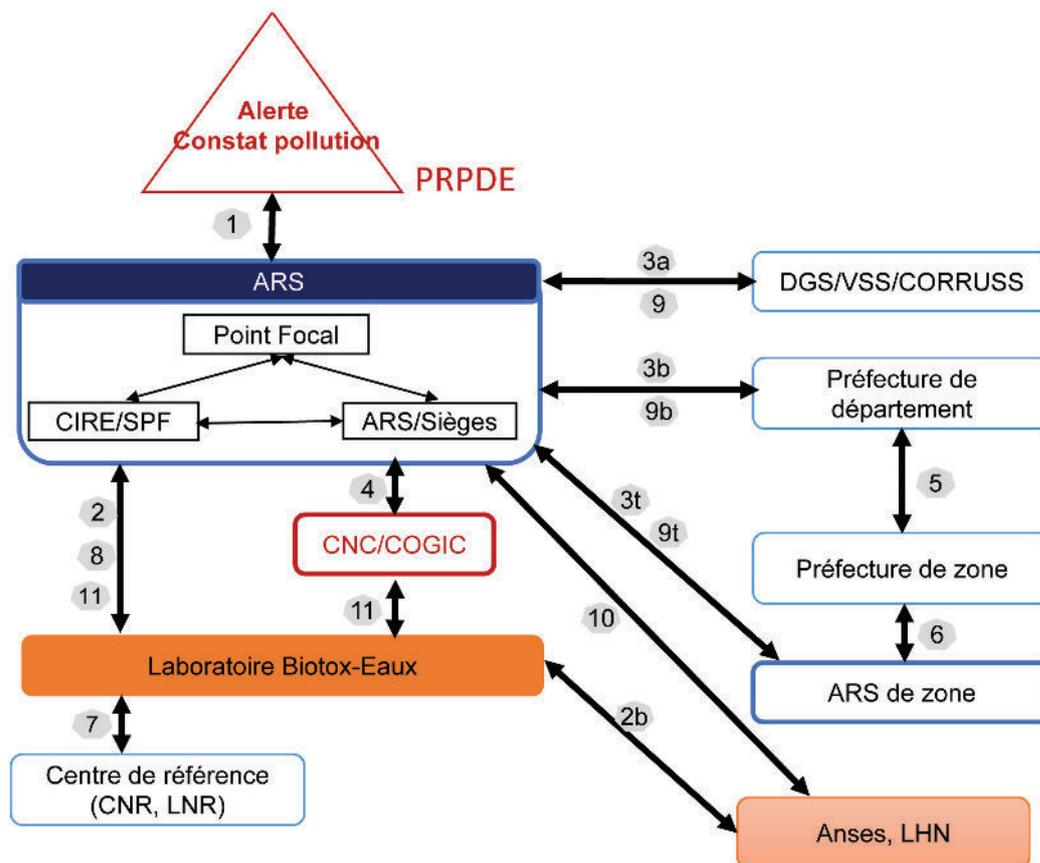
La qualité sanitaire de l'eau du robinet est évaluée par rapport à des limites et des références de qualité fixées par la réglementation pour plusieurs centaines de paramètres. La gestion des situations de non-respect de ces exigences est très encadrée par la réglementation. Les principes de gestion de crise sont par ailleurs repris dans les plans ORSEC eau potable, qui sont les plans de gestion des perturbations de l'approvisionnement en eau potable, et constituent également le volet relatif à la contamination de l'eau potable des plans nucléaires radiologiques, biologiques, chimiques (NRBC) déclinés localement [3].

Quelle que soit la situation, la PRPDE et l'ARS sont les acteurs centraux des dispositifs d'alerte et de gestion de crise.

Dès lors qu'une situation de non-conformité est observée, c'est-à-dire que la valeur mesurée dépasse la valeur faisant référence, des actions correctives et des mesures de gestion doivent être engagées selon l'appréciation conjointe des risques réalisée par l'ARS et la PRPDE. Dans ce contexte, les laboratoires du contrôle sanitaire agréés et les laboratoires de la PRPDE sont mobilisés rapidement pour réaliser les prélèvements et le suivi analytique jusqu'au retour à la normale attestant d'un retour à une situation conforme et, par conséquent, de la sortie de crise.

Dans des situations plus complexes, d'autres acteurs peuvent être mobilisés, notamment le réseau de laboratoires spécialisés Biotox-Eaux [4], faisant partie intégrante du réseau des laboratoires Biotox-Piratox [5].

La mission principale du réseau des laboratoires Biotox-Eaux, sous astreinte de prélèvements et d'analyses, est de fournir à l'ARS et au préfet une réponse rapide et précise sur un



ARS : Agence régionale de santé
 CIRE : Cellules inter-régionales d'épidémiologie
 CNC : Cellule nationale de conseil
 CNR : Centre national de référence
 COGIC : Centre opérationnel de gestion interministérielle des crises

CORRUSS : Centre opérationnel de réception et de régulation des urgences sanitaires et sociales
 LNR : Laboratoire national de référence
 LHN : Laboratoire d'hydrologie de Nancy
 SPF : Santé publique France

- 1 Toute pollution accidentelle ou intentionnelle revendiquée ou suspectée au niveau d'un ouvrage de production ou de distribution d'eau destinée à la consommation humaine ou d'eaux de loisirs, y compris investigations de toxi-infections alimentaires hydriques, doit faire l'objet d'un signalement au point focal de l'Agence régionale de santé. Cette dernière en étroite collaboration avec les services santé environnement, les délégations départementales, le siège et le cas échéant la Cellule inter-régionales d'épidémiologie coordonnera l'opération.
- 2 L'ARS mobilisera le laboratoire Biotox-eau de zone et vérifiera avec lui la pertinence de sa mobilisation, le niveau de protocole d'intervention à engager selon le niveau vigipirate applicable et après avoir recueilli l'avis de la cellule Nationale de Conseil (4). Le laboratoire de zone pourra en cas de besoin solliciter un appui d'un autre laboratoire du réseau Biotox-Eau, notamment le Laboratoire d'hydrologie de Nancy qui anime et coordonne le réseau. (2b). En parallèle, l'ARS de zone informera le Centre opérationnel de réception et de régulation des urgences sanitaires et sociales (CORRUSS) (3a), le Préfet de département (3b) et l'ARS de zone (3c). Dès lors que cette information est transmise au niveau national et/ou préfet de département, l'ARS doit systématiquement informer l'astreinte du service zonal de défense et de sécurité de l'ARS de zone. Les chaînes de communications (transmission/information) entre ARS, Préfecture et ARS de zone doivent être établies (5, 6). Dans le cas d'une détection d'un agent de la menace, une analyse de confirmation devra être engagée sans délai. Le Laboratoire Biotox-Eaux, avec l'appui de la CNC et du LHN, sollicitera une structure de référence spécialisée de l'agent pathogène concerné et procédera au transfert des échantillons en lien avec l'agence nationale de santé du médicament (ANSM) dans le respect de la réglementation MOT le cas échéant (7). Le laboratoire Biotox-Eaux devra informer l'ARS des résultats des analyses au fil de l'eau et dans le respect de la confidentialité des protocoles (8). L'ARS sera responsable de la transmission des résultats aux différentes parties prenantes (9, 9a, 9b, 9c, 10).

éventuel risque sanitaire en cas de pollution ou d'acte de malveillance concernant un réseau EDCH (ou des eaux de loisirs) (voir figure). Ce réseau peut également être sollicité dans le cadre d'investigations sur des toxi-infections alimentaires collectives (TIAC) liées à l'ingestion d'eau de distribution publique en appui de Santé publique France [6]. Il est constitué de huit laboratoires (dont certains disposent de laboratoires de sécurité biologique de niveau 3) en charge des dix zones de défense à même d'engager des

protocoles de levée de doute gradués et adaptés au niveau de menace (dont certains sont classifiés). La coordination et l'animation technique sont assurées par le LHN de l'ANSES.

En 2022, ce réseau a pris en charge plus d'une trentaine d'interventions, dont plus de la moitié en astreinte. Les situations de pollution ont été le principal motif d'intervention (53 %), devant les actes de malveillance (28 %) et les investigations de TIAC hydriques (19 %).

Et demain : l'eau comme sentinelle

Plus que jamais, l'eau devient sentinelle de la santé environnementale et des sociétés humaines. Requestionner les approches actuelles de surveillance, bien souvent trop isolées, monocritères et *en silo*, apparaît comme primordiale. Le positionnement des hydrosystèmes au cœur d'une stratégie « one health / une seule santé » au service de l'éco-épidémiologie émerge comme un consensus. Ainsi, la pertinence de leur intégration dans les dispositifs d'épidémiologie est désormais démontrée. Rappelons que, depuis 2021, la surveillance de la COVID dans les eaux usées a démontré son potentiel à détecter précocement la présence du génome du SARS-CoV-2 en population générale et à suivre les tendances de la circulation virale au sein d'une population. Cette surveillance désormais pérennisée dans le cadre du dispositif Sum'Eau permet de compléter les indicateurs produits par Santé Publique France [7], une preuve de concept qui offre de réelles perspectives pour la surveillance d'émergence ou réémergence de maladies infectieuses d'origines humaines ou animales.

Par ailleurs, la sécurité de l'eau pourrait être remise en question à l'avenir par les changements mondiaux (dérèglement climatique, actes de malveillance, vieillissement des infrastructures, etc.). La capacité à surveiller de manière précoce les impacts de ces changements sera essentielle à l'élaboration d'interventions efficaces permettant de réduire les impacts sur la santé.

En France, des dispositifs de surveillance existent, mais leur interopérabilité devra être questionnée, leur pérennité assurée et leurs moyens renforcés.

[1] Directive (UE) 2020/2184 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2020 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine (refonte), *O.J. L.*, **2020**, 435, p. 1-62.

[2] www.sante.gouv.fr/sante-et-environnement/eaux/eau (consulté le 05/02/24).

[3] Instruction interministérielle no DGS/VSS2/DGCS/DGSCGC/2017/138 du 19 juin 2017 relative à l'élaboration du dispositif de gestion des perturbations importantes de l'approvisionnement en eau potable (ORSEC Eau potable).

[4] Instruction interministérielle n°278/SGDSN/PSE/DTS du 4 mai 2018 relative à la structure et au fonctionnement du réseau national des laboratoires Biotox-Piratox.

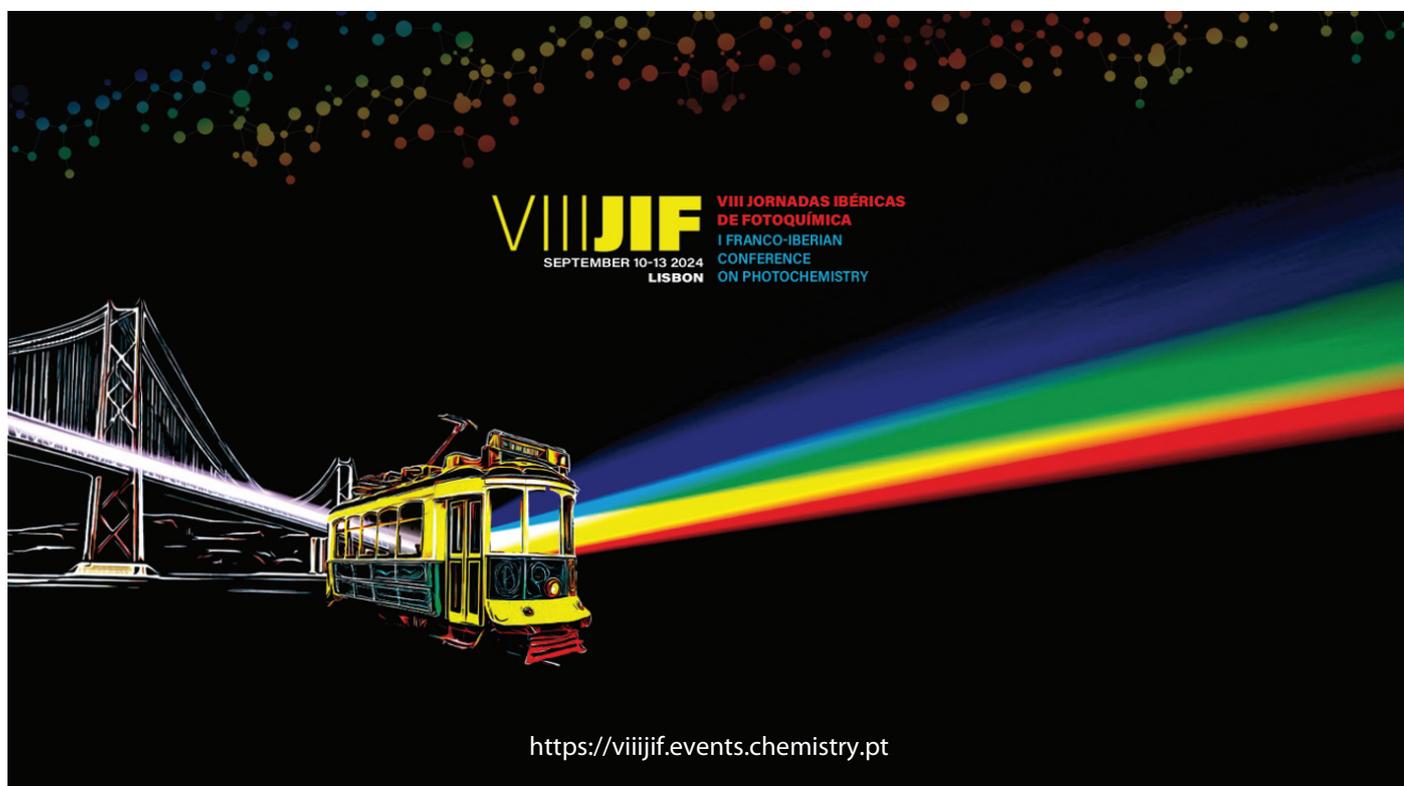
[5] Instruction n° DGS/EA4/DUS/2016/88 du 4 mars 2016 relative à l'organisation et au fonctionnement du réseau des laboratoires Biotox-Eaux.

[6] A. Guinard, J. Pouey, V. Schwæbel, Investigation d'une toxi-infection alimentaire collective en milieu scolaire en Haute-Garonne et dans le Tarn, *Institut de veille sanitaire*, **2009**.

[7] www.data.gouv.fr/fr/datasets/surveillance-du-sars-cov-2-dans-les-eaux-usees-sumeau (consulté le 05/02/24).

Sophie LARDY-FONTAN*, directrice, **Christophe ROSIN**, responsable unité Chimie des eaux, **Benoit GASSILLOU**, responsable unité Microbiologie des eaux, **Thierry CHESNOT**, responsable adjoint unité Microbiologie des eaux, et **Xavier DAUCHY**, responsable adjoint unité Chimie des Eaux, Laboratoire d'hydrologie de Nancy - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Nancy.

*sophie.lardy-fontan@anses.fr



surveillances de l'eau

Gestion

Le PGSSE dans la démarche de sécurité de la production et distribution de l'eau

Résumé Les collectivités territoriales et les exploitants accordent une importance primordiale à la sécurité sanitaire dans la gestion de l'eau. Les infrastructures, du captage à la distribution, peuvent être vulnérables à des accidents, des négligences ou des actes malveillants. Le Plan de gestion de la sécurité sanitaire des eaux propose une approche complète utilisant des démarches existantes dans les services des eaux, assurant une amélioration continue pour garantir quantitativement et qualitativement la sécurité sanitaire de l'approvisionnement en eau. L'élaboration des PGSSE représente un changement culturel, favorisant une approche anticipative plutôt que curative avec, pour objectif principal, la satisfaction des exigences de disponibilité, de qualité sanitaire et organoleptique de l'eau destinée à la consommation humaine.

Mots-clés **Analyse de risques, conformité sanitaire, qualité, amélioration continue, protection de la ressource.**

Abstract **PGSSE: a safety approach in the production and distribution of water**

Local authorities and operators give paramount importance to health safety in water management. Infrastructure, from capture to distribution, may be vulnerable to incidents such as accidents, negligence, or malicious acts. The Water safety management plan (PGSSE) proposes a comprehensive approach using existing methods in water services, ensuring continuous improvement to guarantee both quantitatively and qualitatively the sanitary safety of water supply. The development of PGSSE represents a cultural shift, favoring a proactive approach rather than a reactive one, with the primary goal of meeting the requirements of availability, health quality, and organoleptic quality of water intended for human consumption.

Keyword **Risk analysis, health compliance, quality, continuous improvement, resource protection.**

La sécurité sanitaire de l'eau est une des priorités des collectivités territoriales et des exploitants. Chaque ouvrage ou équipement, de la zone de captage à la station de traitement, de la distribution à l'utilisateur, peut être vulnérable à un événement dangereux tel qu'un accident, une négligence ou un acte de malveillance.

Le Plan de gestion de la sécurité sanitaire des eaux (PGSSE) constitue une approche globale de la sécurité sanitaire de l'eau qui utilise des démarches déjà existantes dans les services d'exploitation et de distribution. Il constitue une démarche d'amélioration continue garantissant la sécurité sanitaire de l'approvisionnement en eau, quantitativement et qualitativement.

L'élaboration des PGSSE représente une démarche d'amélioration continue permettant de garantir, de façon durable et pérenne, la sécurité sanitaire de l'eau destinée à la consommation humaine (EDCH). Cette démarche recouvre toutes les étapes d'approvisionnement en eau potable. Elle apporte un véritable changement culturel dans le domaine de l'eau, à travers la mise en œuvre d'une approche anticipative plutôt que curative, bien que ce dernier aspect puisse être accepté et anticipé. Son principal objectif est la satisfaction des trois exigences fondamentales retrouvées dans ce domaine, que sont la disponibilité, la qualité sanitaire et la qualité organoleptique de l'eau distribuée aux consommateurs.

Promu sur une base volontaire, puis obligatoire

Le PGSSE a été mis au point en 2004 par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) à travers le Water Safety Plan [1]. Au fil des années, les PGSSE ont été introduits graduellement dans la réglementation française et européenne. Dans un premier temps, le troisième Plan national Santé-Environnement (PNSE 3) publié en 2014 et établi de 2015 à 2019, préconisait de « promouvoir la mise en place au niveau local de plans

spécifiques à la sécurisation de l'alimentation » en EDCH [2]. Ensuite, la directive 2015/1787 du 6 octobre 2015 [3] modifie les annexes II et III de la directive 98/83/CE relative à la qualité des EDCH, sans toutefois les rendre obligatoire. En application, la Direction générale de la Santé (DGS) a apporté des éléments de référence et des outils pour promouvoir la mise en œuvre des PGSSE, à destination des Agences régionales de santé (ARS) pour opérer en tant que relais au sein de leur région [4].

C'est ainsi que le régulateur a promu largement la démarche, dont l'implantation a été laissée à l'initiative des collectivités. Ces premières collectivités volontaires ont pu, en bonne intelligence avec le régulateur, adapter leur programme de contrôle en fonction des résultats obtenus dans leur PGSSE en accord avec la réglementation incitative adoptée.

Devant le succès de ces premières initiatives, restées pour le moment limitées, le PGSSE a été rendu obligatoire en 2020 par la nouvelle directive européenne 2020/2184 relative à la qualité des EDCH [5] pour les collectivités desservant plus de 500 habitants, au travers de ses articles 7 à 10. La directive officialise, en outre, l'adaptation du contrôle réglementaire en fonction des résultats obtenus, là aussi en accord avec le régulateur. La transposition de cette directive en droit français a été réalisée par l'ordonnance 2022-1611 du 22/12/2022, ses décrets et arrêtés d'application [6]. Il est important de préciser que la réglementation française a rendu la démarche obligatoire quelle que soit la taille des unités de distribution.

En conséquence, les délais imposés pour la réalisation du PGSSE sont les suivants :

- l'obligation de disposer de PGSSE sur la partie « Ressource » à partir de 2027 ;
 - l'obligation de disposer de PGSSE complets, comprenant l'analyse de l'ensemble du service d'eau potable, dès 2029.
- La révision des PGSSE, une fois ces derniers réalisés, devra se faire autant que de besoin et, au plus tard, tous les six ans.

Méthodologie

La démarche PGSSE suit le principe de l'amélioration continue et identifie les événements dangereux pouvant survenir comme, par exemple :

- un événement climatique avec des pluies plus abondantes ou, à l'inverse, une sécheresse importante ;
- un acte de malveillance, physique ou cyber, qui pourrait avoir de graves conséquences autant sur l'ouvrage concerné que pour la population desservie ;
- des défaillances sur les ouvrages de production ou de stockage ;
- une rupture de la canalisation principale d'alimentation pouvant provoquer une interruption du service de distribution ;
- une dégradation de la qualité de l'eau, que ce soit par des ressources de qualité variable ou des éléments de réseau (conduites PVC anciennes, etc.).

Le PGSSE a pour but d'identifier les dangers du captage de la ressource à la distribution chez l'utilisateur en les prévoyant et en agissant en amont afin de maîtriser les risques à la source.

L'élaboration d'un PGSSE se déroule en dix étapes :

- 1) Réunir une équipe pluridisciplinaire d'élus, de techniciens d'exploitants et d'experts métiers.
- 2) Décrire le service d'eau potable étudié.
- 3) Identifier les dangers et les risques liés à la distribution de l'eau du captage à la distribution en évaluant la gravité des risques.
- 4) Identifier des mesures de maîtrise des risques.
- 5) Planifier les actions qui permettent de réduire les risques et réunir les moyens nécessaires à leurs mitigations.
- 6) Suivre l'efficacité des actions mises en œuvre.
- 7) Évaluer l'efficacité du PGSSE.
- 8) Mettre en place de procédure de gestion.
- 9) Mettre en place des programmes d'appui.
- 10) Réviser le PGSSE à chaque incident.

L'ensemble du cycle est à réaliser tous les six ans, soit sous forme de nouvelle étude, soit par simple mise à jour des éléments préexistants. La démarche décrite à la 3^e étape revêt

le principe d'une étude de risques. Concrètement, il s'agit d'identifier et d'évaluer les probabilités d'apparition et la gravité des dangers induits par les risques (étape 4). À la suite de ces évaluations, un plan d'action est réalisé (étape 5). Il est adapté à chaque situation et les actions retenues peuvent nécessiter une adaptation de la surveillance de la qualité de l'eau, la réalisation de travaux sur les ouvrages ou les réseaux, l'amélioration du respect du périmètre de protection, le contrôle des alarmes anti-intrusion, l'ajout d'une interconnexion ou encore une amélioration de l'organisation de l'opérateur. Souvent préventives, les actions issues du plan d'action peuvent être simples et rapides à réaliser. Pour une meilleure conduite de projet, ces actions simples à gains rapides sont priorisées.

Du fait de l'inclusion dans un programme de projets et d'investissements, le PGSSE est le plus souvent utilement réalisé conjointement ou dans la foulée d'un schéma directeur, permettant ainsi une vue d'ensemble des améliorations possibles. Par exemple, si l'on détecte un risque important de rupture sur conduite principale, les actions peuvent être à la fois préventives et curatives pour maîtriser ce risque, comme par exemple :

- le bouclage local des réseaux ;
- la mise en place d'une interconnexion ;
- le remplacement des conduites en fin de vie grâce à une bonne connaissance patrimoniale ;
- le déploiement plus rapide des équipes en cas de casse de canalisation ;
- une surveillance accrue du tronçon en cause lors d'une casse de canalisation.

Enjeux à de multiples niveaux de service

Le PGSSE est une démarche d'amélioration continue permettant de garantir en permanence la sécurité sanitaire de l'approvisionnement en eau, que ce soit en termes de qualité ou de quantité. Cette démarche permet de passer d'une approche curative à une approche préventive en appliquant



Mise en place d'analyse du risque de la ressource au « fil de l'eau ». © SDEA.

une stratégie globale de gestion des risques, du captage au robinet du consommateur. L'ensemble du système de production et de distribution d'eau est alors examiné (voir figure). Il peut être divisé en quatre grandes étapes, à savoir :

- les ressources, avec la prise en compte du point de captage, mais également de son aire d'alimentation et des périmètres de protection ;
- le traitement, avec l'étude des procédés de traitement et de l'état général de la station ;
- le stockage et les stations de relais ou de surpression si le service en dispose ;
- la distribution, comprenant l'étude des canalisations, des organes du réseau, des systèmes de régulation et des équipements de mesures.

Les analyses effectuées sur la qualité de l'eau distribuée et les autres moyens de surveillance mis en place sont également identifiés pour chacune de ces étapes. Plusieurs enjeux sont visés lors de l'élaboration d'un PGSSE, que ce soit au niveau sanitaire, sociétal ou économique. Les principaux enjeux sont regroupés dans le tableau suivant.

Enjeux sanitaires	<ul style="list-style-type: none"> • Garantir en permanence la sécurité sanitaire de l'approvisionnement en eau à court, moyen et long termes. • Passer d'une approche réactive à une approche préventive en considérant la gestion des risques comme un outil de gestion et de bonne prévention. • Avoir une meilleure connaissance, engendrant une meilleure surveillance, des sources de pollution.
Enjeux sociétaux	<ul style="list-style-type: none"> • Valoriser le service et améliorer le degré de confiance de la population dans l'eau de distribution. • Donner du sens aux actions réalisées sur le service, renforcer l'application des agents. • Harmoniser les méthodes de travail et favoriser les échanges entre agents. • Assurer une complémentarité avec les diagnostics territoriaux d'accès à l'eau pour tous. • Renforcer la démarche qualité en intégrant le PGSSE dans le système de management de la qualité.
Enjeux économiques	<ul style="list-style-type: none"> • Avoir une meilleure maîtrise opérationnelle en programmant, prévenant et corrigeant sans attendre les difficultés (restrictions d'usage, etc.). • Hiérarchiser les priorités d'actions et ordonner les choix d'investissement sur des critères objectifs. • Améliorer davantage la connaissance patrimoniale des installations d'alimentation en eau potable, permettant d'accentuer la nécessité de leur renouvellement ou de leur évolution.

La démarche du PGSSE s'inscrit dans une volonté d'amélioration continue. Le PGSSE complète les différentes études qui peuvent déjà exister sur le service d'eau en question, tels que le schéma directeur d'alimentation en eau potable ou les études patrimoniales des ouvrages et du réseau. D'un autre côté, elle peut aider à la réalisation de ces études en faisant un premier état des lieux complet des défaillances du service d'eau potable.

Déploiement du PGSSE

Le Syndicat des eaux et de l'assainissement Alsace-Moselle (SDEA) possède une longue expérience des démarches certificatives en amélioration continue (qualité, sécurité, environnement) et des évaluations de RSE et d'excellence durable (ISO 26000, évaluation EFQM 5-star, etc.). Ces démarches d'amélioration continue de la performance sont basées sur une approche globale de management de l'entreprise, comprenant un volet de maîtrise des risques en plus de la démarche désormais répandue d'amélioration continue. Pour structurer son management des risques, le SDEA met en œuvre les recommandations de la norme ISO 31000, permettant l'intégration des risques à l'EFQM.

Par ailleurs, le système qualité du SDEA dispose d'un processus de gestion des risques rattaché à la Direction des métiers et expertises technique. C'est un processus qui sert d'outil de maîtrise et d'aide au développement et à la stratégie du SDEA. La gestion des risques est donc une notion bien intégrée dans l'organisation de la structure.

Ainsi, les notions d'analyse des risques et d'amélioration continue sont des notions largement partagées par les équipes SDEA. Des documents touchant à l'exploitation des installations (instructions de travail, fiches de suivi...) sont rédigés quotidiennement. De plus, le SDEA dispose déjà d'une expérience dans la réalisation d'analyses de risques selon la méthode AMDEC pour l'activité de traitement des eaux usées. C'est également un acteur fortement engagé dans la prévention contre les pollutions diffuses et la reconquête de la qualité des eaux, par exemple grâce à la création de postes spécifiques que sont les « Missions eaux ».

C'est donc naturellement que le SDEA a répondu à l'appel à projet de l'ARS Grand Est pour l'expérimentation du PGSSE en juin 2019. L'objectif principal de cette action était de lancer les premiers PGSSE dans le Grand Est en anticipant les évolutions réglementaires. Le SDEA a été retenu pour participer à cette action, avec 13 autres collectivités pionnières réparties sur le territoire du Grand Est, et a signé en novembre 2019 la Charte d'engagement PGSSE.

Cette expérimentation, planifiée sur trois ans, s'est achevée en fin d'année 2021. Elle a permis, dans un premier temps, de sensibiliser les parties prenantes et les collectivités à la démarche PGSSE grâce à l'organisation de réunions d'information, d'événements, de communication (plaquettes, articles) et de formations à destination d'autres personnes responsables de la production et distribution d'eau potable, en partenariat avec le Centre national de la Fonction publique territoriale (CNFPT). En second temps, elle a mis à disposition des outils pour faciliter la mise en œuvre des PGSSE, tels que des fiches Retex (pour retour d'expérience), grâce à la réalisation de l'état de l'art en France et en Europe, ainsi que des aides au financement accordées par l'Agence de l'eau.

Après un important travail d'appropriation du guide de l'Association scientifique et technique pour l'eau et l'environnement (ASTEE) [7], réalisé en parallèle par cette association, une analyse des risques liés aux 569 dangers et événements dangereux recensés sur le périmètre d'étude a amené à l'identification de 28 pistes d'amélioration. Ces dernières ont été regroupées dans un Plan d'action réaliste, synthétique et facilement intégrable dans le programme pluriannuel des investissements, conjointement aux éléments prévus au schéma directeur et dans le système qualité (organismes de formation).

Une démarche de l'OMS

D'abord issue d'une démarche volontariste impulsée par l'OMS, puis déployée de manière incitative au niveau européen comme au niveau national, la démarche des plans de gestion de la sécurité sanitaire des eaux (PGSSE) se sont imposés comme un outil de maîtrise des risques local utilisable en collaboration avec les autorités de régulation.

La mise en œuvre de cette démarche est désormais obligatoire aux horizons 2027 pour la partie production, et 2029 pour une mise en œuvre intégrale, par son inclusion dans la réglementation européenne puis française dans les derniers mois. L'approche PGSSE, structurée autour de la démarche projet et de l'amélioration continue, suit des étapes de réalisation bien précises, que chaque maître d'ouvrage en eau potable se doit de mettre en place et d'adapter localement.

Cette démarche holistique vise les risques afférents à la production, au stockage et à la distribution des eaux, et repose sur une évaluation des risques le plus souvent réalisée par la méthode AMDEC, choisie par le SDEA tout comme l'ASTEE dans son guide d'application. La démarche se marie particulièrement bien avec un schéma directeur d'investissement qui a les mêmes objectifs.

En conséquence de l'évaluation des risques, des actions sont menées dans un objectif de gains rapides, mais n'exclut pas la mise en place d'éléments plus structurants (investissements dans les réseaux, les ouvrages ou de meilleures pratiques). Bien réalisée, la démarche PGSSE permet de dégager de nombreux avantages techniques, économiques et sociétaux.

C'est dans cet esprit que le SDEA a lancé, dès 2019, une expérimentation de la démarche, utilisant partiellement le guide de l'ASTEE et en adaptant les enjeux au contexte bien particulier Alsacien-Mosellan, dont les conclusions ont été mises à la disposition de l'ARS Grand Est et de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, partenaires de la démarche, à titre de diffusion des connaissances ; cette même diffusion des connaissances est également réalisée par l'ENGEEES en partenariat, pour les jeunes ingénieurs, avec le SDEA.

Un premier PGSSE a ainsi vu le jour et a conduit à la création d'un modèle « PGSSE-SDEA ». Ce modèle est optimisé de façon à permettre une réalisation rapide et facile des premières phases du PGSSE, allant du diagnostic jusqu'à l'élaboration d'un plan d'action. Ce premier PGSSE a également engagé la réflexion du déploiement de la démarche au sein du SDEA, notamment au niveau des ressources humaines, organisationnelles et financières nécessaires pour y assurer la pérennité de cette démarche innovante. Cette appropriation anticipée a également permis, dans le contexte du partenariat existant entre le SDEA et l'École nationale du Génie de l'eau et de l'environnement à Strasbourg, la mise en place d'une unité d'enseignement destinée aux jeunes ingénieurs. Parallèlement, l'École a monté, de son côté, une formation continue, plus adaptée aux publics déjà en poste.

[5] Directive (UE) 2020/2184 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2020 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32020L2184> (consulté le 15/02/24)

[6] Ordonnance n° 2022-1611 du 22 décembre 2022 relative à l'accès et à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine (NOR : SPRP2223436R) ; décret n° 2022-1720 du 29 décembre 2022 relatif à la sécurité sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine (NOR : SPRP2203315D) ; arrêté du 30 décembre 2022 relatif à l'évaluation des risques liés aux installations intérieures de distribution d'eau destinée à la consommation humaine (NOR : SPRP2224255A) ; arrêté du 3 janvier 2023 relatif au plan de gestion de la sécurité sanitaire de l'eau réalisé de la zone de captage jusqu'en amont des installations privées de distribution (NOR : SPRP2221023A).

[7] Association scientifique et technique pour l'eau et l'environnement, *Initier, mettre en place, faire vivre un PGSSE*, 2021.

www.astee.org/publications/initier-mettre-en-place-faire-vivre-un-pgsse (consulté le 15/02/24)

[1] www.who.int/publications/i/item/9789240067691 (consulté le 15/02/24).

[2] Ministère de la Santé et de la Prévention, Plan national Santé Environnement 3 2015-2019, 2014, 55, p. 57.

[3] Directive (UE) 2015/1787 du 6 octobre 2015 de la Commission Européenne, p. 6.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L1787&from=SK> (consulté le 15/02/24)

[4] Ministère de la Santé et de la Prévention, Note d'information n° DGS/EA4/2018/9 du 9 janvier 2018 relative aux plans de gestion de la sécurité sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine (NOR : SSAP1800826N).

François SCHWETTERLÉ*, responsable de la maîtrise des risques, et **Franck PERRU**, responsable benchmark & veille technique réglementaire, SDEA Alsace-Moselle, Schiltigheim.

*francois.schwetterle@sdea.fr



Toute l'actualité de la
Société Chimique de France

et bien plus...

societechimiquedefrance.fr

Gestion des pollutions accidentelles en eau douce

Résumé En 2021, le ministère chargé de l'Environnement a recensé 1 571 incidents au sein d'installations classées pour la protection de l'environnement [1]. Environ 30 % de ces cas ont généré une pollution des eaux souterraines ou superficielles. L'examen de ces événements conduit à un premier constat : l'extrême diversité des scénarios de déversement, notamment des polluants susceptibles d'être déversés, et la grande variabilité des impacts. Il s'agit en outre d'événements dont l'évolution peut être très rapide, notamment dès lors que la pollution est entraînée par le courant. Dans ce contexte, la réponse antipollution doit être rapide pour confiner et récupérer la pollution ou protéger les sites et usages vulnérables. Cette réponse doit également être adaptée au comportement du polluant dans l'eau et aux conditions du milieu, notamment la hauteur d'eau et la vitesse du courant. Il est donc nécessaire de disposer de plans d'urgence et d'équipes d'intervention réactives, formées, entraînées et disposant d'équipements de lutte fiables et adaptables. Pour les accompagner dans leurs démarches de préparation à la lutte ou dans la conduite d'une intervention d'urgence, les acteurs publics et privés peuvent 24 h/24 faire appel au Cedre.

Mots-clés Pollution, accident, hydrocarbure, produit chimique, plan d'urgence, formation.

Abstract Management of accidental freshwater pollution

In 2021, the French Ministry of the Environment recorded 1571 incidents at facilities classified for environmental protection. Around 30% of these incidents resulted in groundwater or surface water pollution. The first observation to be made when examining these events is the extreme diversity of spill scenarios, particularly in terms of the pollutants likely to be spilled, and the wide range of impacts. These are also events that can develop very rapidly, particularly when the pollution is carried along by the current. In this context, the pollution response must be rapid in order to contain and recover the pollution or protect vulnerable sites and uses. This response must also be adapted to the behaviour of the pollutant in the water and to the conditions of the environment, particularly the height of the water and the speed of the current. It is therefore necessary to have emergency plans and response teams that are reactive, trained and equipped with reliable and adaptable response equipment. Public and private stakeholders can call on Cedre 24/24 to support them in their response preparation and emergency response operations.

Keywords Pollution, accident, oil, chemical, emergency plan, training.

Depuis sa création en 1979, le Centre de documentation de recherche et d'expérimentation sur les pollutions accidentelles des eaux (Cedre) étudie les pollutions accidentelles des eaux marines ou douces, leurs conséquences et les techniques et matériels pour y faire face. Ces connaissances lui permettent de rédiger des plans de lutte, former les équipes d'intervention et publier des ouvrages de référence dans le domaine. Toutes ces connaissances et savoir-faire sont développés pour lui permettre d'assurer 24 h/24 une assistance opérationnelle au profit des centres de gestion de crise et des équipes mobilisées dans la gestion d'un sinistre susceptible d'entraîner ou ayant entraîné une pollution des eaux.

Pour ce qui concerne plus spécifiquement les eaux douces, il apparaît que les scénarios de pollution sont d'une très grande diversité, et nécessitent une bonne préparation de la part des différentes parties prenantes à ce type d'événement. Ceci est d'autant plus nécessaire qu'aux intérêts évidents de ces écosystèmes pour la biodiversité, l'irrigation et la production d'eau potable, notamment, s'ajoutent aujourd'hui des questions de raréfaction de la ressource, renforçant la nécessité de protéger celle-ci vis-à-vis de toute forme de pollution, qu'elle soit chronique ou accidentelle.

Les pollutions accidentelles et leurs conséquences

La multiplicité des scénarios

Il n'existe pas en France d'inventaire centralisé et exhaustif des pollutions accidentelles des eaux douces. Différentes entités impliquées dans ces événements renseignent parfois des

maines courantes ou des bases de données concernant leur secteur géographique. Le Bureau d'analyse des risques et pollutions industrielles (BARPI) au sein du Ministère chargé de l'Environnement renseigne quant à lui la base de données ARIA (pour Analyse, recherche et information sur les accidents) au sein de laquelle sont recensés les événements qui ont porté, ou auraient pu porter, atteinte à la santé ou la sécurité publiques, ou à l'environnement. Enfin, le Cedre dispose également d'une base de données sur les pollutions accidentelles des eaux survenues en France et à l'étranger dont il a eu connaissance [2]. Quoique ces informations soient incomplètes et hétérogènes, une évidence s'impose quand on les consulte : la diversité des circonstances des déversements, des polluants concernés, des écosystèmes et usages impactés, des conséquences sanitaires, économiques mais aussi sociétales, médiatiques et politiques. Toutes les activités et branches sectorielles sont représentées dans les pollutions recensées (agriculture, artisanat, industrie, transport, commerce, déchets et assainissement, etc.) et même des particuliers peuvent être à l'origine d'événements significatifs, notamment par rejet de polluants dans les eaux pluviales. Ce constat explique que les produits déversés soient également d'une très grande diversité : eaux usées, matières organiques, hydrocarbures, huiles végétales, produits chimiques...

La diversité des impacts

Les conséquences directes de ces pollutions sur les milieux sont multiples : contamination des eaux de surface ou souterraines, mortalité de la faune aquatique et perturbation de

la chaîne alimentaire, contamination des berges et des sédiments, souillure des infrastructures et des ouvrages d'art, etc. Les impacts sur les usages de la ressource en eau et des écosystèmes aquatiques peuvent s'avérer majeurs : interruption de l'alimentation en eau potable, de l'irrigation, de l'abreuvement des animaux, de la pêche, de la baignade, de la navigation, etc. Parfois même, les populations riveraines peuvent être exposées à des risques sanitaires, notamment lors de déversements de produits chimiques très volatiles. De plus, les mesures de lutte contre la pollution et de restauration des usages peuvent elles-mêmes engendrer des effets néfastes sur l'environnement si les techniques, matériels ou produits utilisés sont inappropriés. Les conséquences économiques de certains déversements peuvent elles aussi s'avérer problématiques car, outre les coûts de la lutte contre la pollution, du nettoyage et du traitement des déchets, sont également à prendre en charge les coûts du suivi de la contamination (analyses de laboratoires), des mesures de sauvegarde (approvisionnement en eau potable, etc.), de réparation des dommages, d'indemnisation des usagers impactés, etc. Dans ce contexte, la prise en charge financière par le pollueur (ou son assureur), quand il est identifié, de toutes les mesures adoptées, peut s'avérer cruciale pour la résolution de la crise. Enfin, aujourd'hui, on ne peut plus ignorer les conséquences des pollutions des eaux dans l'opinion publique et les répercussions sociétales, médiatiques et politiques qui peuvent suivre, aussi bien, d'ailleurs, pour le pollueur mis en cause que pour les autorités impliquées dans la gestion de l'événement.



Confinement d'hydrocarbure par barrage flottant, barrage de paille et barrage absorbant. © Cedre.

Planification et préparation à la lutte

Les plans d'urgence

La lutte contre la pollution des eaux douces est un enjeu majeur en France. Les moyens déployés pour toujours mieux surveiller les eaux de surface l'attestent, tout comme les nombreuses politiques conduites depuis des décennies en faveur de leur qualité chimique : programmes nationaux de surveillance, schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux, plans d'action gouvernementaux contre les pesticides, PCB, nitrates, micropolluants, résidus de médicaments, etc. [3]. Outre ces dispositifs centrés sur la qualité chimique des eaux, sont également mis en œuvre de nombreux dispositifs en faveur de la préservation des écosystèmes aquatiques et de leur biodiversité. Mais l'efficacité des mesures qui accompagnent ces plans peut être rapidement remise en cause par une pollution accidentelle des eaux, ce qui rend nécessaire la mise en place d'une planification minutieuse permettant une intervention rapide et efficace pour faire face à un tel événement.

Cet effort de planification débute par l'intégration d'un volet pollution des eaux dans les plans d'opération internes et autres plans d'urgence réalisés au niveau des installations susceptibles de provoquer une pollution des eaux, quelles qu'en soient les causes (défaillance matérielle, intempérie, erreur humaine, acte de malveillance...). Au niveau du département, ce sont les dispositions ORSEC spécialisées « Pollution accidentelle des eaux intérieures » qui doivent définir le dispositif d'alerte et de lutte, les mesures à prendre et les moyens de secours à mettre en œuvre pour lutter contre la pollution et assurer la sauvegarde des populations, des biens et de l'environnement, ainsi que l'organisation du commandement



Confinement d'une pollution chimique par barrage absorbant à jupe. © Cedre.

et les missions des différents services impliqués dans le dispositif. D'autres « plans » intègrent parfois des éléments de gestion d'une pollution accidentelle des eaux comme l'ORSEC « Transport matières dangereuses (TMD) » ou encore l'ORSEC « Eau potable » destiné à prévoir les dispositions utiles pour maintenir ou rétablir la distribution d'eau potable à la population, aux milieux agricoles et industriels à la suite d'une pollution accidentelle, d'incidents de réseaux d'eau, ou de tout autre événement entraînant une dégradation de la qualité, une diminution du volume d'eau fournie, voire une interruption.

La formation gestion de crises : pollution des ressources en eau

• Objectifs

- Identifier les bonnes pratiques et les axes d'amélioration dans la conduite opérationnelle d'une gestion de crise ;
- Comprendre le fonctionnement des différents acteurs de la gestion de crise (services de l'Etat, collectivités, opérateurs publics et privés, ...);
- Mieux gérer la communication de crise, y compris vis-à-vis des réseaux sociaux et des médias du direct ;
- Organiser et gérer efficacement une cellule de crise.

• Public

Opérateurs privés ou publics exploitant des systèmes d'alimentation en eau potable ou d'assainissement ; responsables QHSE ; responsables sûreté et gestion de crise, ingénieurs conseils ; collectivités ; personnels de l'administration (ARS, DREAL, DDT...) ou de collectivités ; agences de l'eau ; ingénieurs militaires infrastructures ; vétérinaires des armées ; sapeurs-pompiers ; gendarmes.

• Programme

- Introduction aux pollutions accidentelles en eaux intérieures
- Retours d'expérience
- Le rôle du Préfet et des services de la préfecture
- Le rôle de l'ARS
- Le rôle du SDIS
- Le comportement des produits déversés et les stratégies d'intervention
- Les matériels de lutte
- La communication médiatique
- Les bonnes pratiques en gestion de crise
- L'aménagement et le fonctionnement d'une cellule de crise
- Exercice final de mise en situation en simulateur de crise

• Intervenants

Cedre ; IMT Mines d'Alès ; (ES)² ; SDIS ; préfecture ; ARS ; exploitants de réseau d'eau ; journalistes, etc.

La formation et les exercices

Pour être performants dans l'organisation et la collaboration des nombreuses structures impliquées dans la réponse, ces plans doivent s'accompagner de formations et d'entraînements à leur mise en œuvre. En effet, une action efficace et coordonnée du pollueur et des intervenants privés qu'il mobilise, des EPCI (établissements publics de coopération intercommunale), des services et agences de l'État, des laboratoires et des experts, nécessite non seulement une définition précise des missions de chacun et des procédures à appliquer, mais aussi des synergies entre services et une communication fluide qui sont facilitées par une bonne connaissance mutuelle, elle-même largement renforcée par la participation à des formations et exercices communs (voir la présentation de la formation Cedre ci-dessus) [4].

L'intervention en cas de pollution

La nécessité d'agir vite

Un polluant qui s'infiltré dans les sols et atteint une nappe phréatique peut contaminer celle-ci durant de longues années, puis réapparaître tout près, comme très loin, en générant de nouveaux impacts. Un polluant déversé dans un cours d'eau peut se déplacer très rapidement au fil de celui-ci, et représenter une menace majeure y compris sur plusieurs kilomètres en aval, parce qu'il y a là des usages très sensibles de l'eau. La lutte contre une pollution accidentelle des eaux douces est donc une lutte d'urgence qui nécessite de choisir rapidement la stratégie et les moyens à mettre en œuvre afin de lutter rapidement contre le front de la pollution, notamment pour tenter de le confiner, ou de protéger les sites et usages sensibles de l'aval avant son passage. Dans la phase d'évaluation de la situation, le recours à des outils d'aide à la décision, notamment à des modèles de prédiction du comportement des polluants et de leur dispersion dans le milieu peut être utile (voir l'article sur le sujet, p. 43).

La lutte sur l'eau

La stratégie la plus bénéfique pour l'environnement est le confinement de la pollution, sa récupération, puis son traitement dans une installation adaptée. Elle est particulièrement adaptée en cas de pollution par produit flottant, notamment par hydrocarbure, qui permet l'utilisation de barrages flottants pour confiner et épaissir la nappe de polluant avant de la récupérer sur l'eau de façon sélective à l'aide d'un récupérateur associé à une pompe pour ensuite la refouler dans un bac étanche. La récupération peut également se faire à l'aide d'un camion de pompage, à condition qu'une tête d'aspiration sélective soit installée à l'extrémité du tuyau d'aspiration. Les absorbants flottants hydrophobes et oléophiles, disponibles sous différentes formes (barrages, rouleaux, feuilles) permettent également une récupération sélective lorsque le volume de polluant déversé est limité ou en finition du pompage, afin de ne pas pomper trop d'eau.

La stratégie de confinement et récupération peut également s'appliquer sur des polluants coulants déposés au fond du cours d'eau (polluants solides, fiouls lourds, bitumes, produits chimiques plus denses que l'eau, etc.). Dans ce cas, le confinement est réalisé à l'aide de dispositifs posés ou fixés sur le fond (bottes de paille, sacs de sable, planches) et la récupération se fait manuellement à l'aide d'outils, ou par pompage à l'aide d'une canne d'aspiration plongée au fond, ou mécaniquement à l'aide d'un engin de travaux publics, voire d'une drague.

Dans un ruisseau ou un fossé dans lequel la hauteur d'eau est insuffisante pour mettre en œuvre des moyens de lutte manufacturés flottants ou lorsque le courant est trop important (au-delà de 0,35 m/s, un barrage placé perpendiculairement au courant est inefficace), le confinement et la récupération de la pollution peuvent se faire à l'aide de dispositifs directement façonnés sur le terrain (barrages filtrants, bottes de paille, merlon avec système de surverse ou sous-verse, etc.). La récupération de la pollution devient par contre illusoire dès lors qu'elle est répartie dans toute la colonne d'eau sous forme

particulière ou dissoute. Dans cette situation, il convient plutôt de focaliser les efforts sur la sauvegarde des usages situés en aval et sur le suivi de la pollution afin d'identifier le moment et le point du cours d'eau à partir desquels la pollution a été suffisamment diluée par l'apport d'eau des affluents successifs, ou suffisamment dégradée par l'environnement (biodégradation notamment) pour permettre un usage normal de l'eau. Les mesures de sauvegarde peuvent se traduire par la mise en œuvre de systèmes de protection des sites sensibles, de déviation de la pollution ou d'interruption de certains usages. Il peut s'agir également de lutter contre les effets de la pollution à travers, par exemple, la mise en œuvre d'oxygénateurs pour limiter la chute de la concentration d'oxygène dans l'eau liée à une intense activité de biodégradation bactérienne de matières organiques déversées dans l'eau (eaux usées, effluents d'élevages, produits de l'agro-alimentaire, etc.).

En cas de pollution dissoute dans un volume d'eau confiné (plan d'eau fermé), et si les enjeux le nécessitent, il peut être envisagé de procéder au traitement de la pollution à l'aide d'unités mobiles dont les performances en termes de qualité du traitement et de débit, ainsi que les contraintes opérationnelles de mises en œuvre, sont à évaluer au préalable.

Une dernière stratégie est régulièrement mise en œuvre sur l'eau pour lutter contre une pollution par hydrocarbures : la dispersion chimique. Elle consiste à pulvériser à la surface de la nappe un dispersant chimique dont l'effet combiné à celui de l'agitation du plan est de fractionner la pollution de surface en microgouttelettes d'hydrocarbures dispersées dans la colonne d'eau. Cette stratégie, dont les intérêts majeurs du point de vue des intervenants, comparativement à une stratégie de récupération du polluant, sont la rapidité de mise en œuvre, la limitation des moyens matériels nécessaires et l'absence de déchets à traiter, nécessite toutefois pour être efficace et bénéfique, ou pour le moins sans effet négatif pour l'environnement, des conditions de mise en œuvre rarement réunies dans les eaux intérieures françaises. La recommandation est donc de ne pas disperser un hydrocarbure en eaux intérieures mais de privilégier sa récupération.

La lutte sur les berges

À l'issue des opérations de lutte sur ou dans l'eau, il peut être nécessaire de conduire des opérations de nettoyage des berges, des ouvrages ou des sédiments contaminés. Compte tenu du fait qu'il ne s'agit plus d'une phase d'urgence, qu'elle peut nécessiter la mise en œuvre d'une très grande diversité de techniques et de moyens dont les coûts sont eux aussi extrêmement variables, cette phase de nettoyage doit être définie avec l'appui d'experts. Il s'agit ici, non pas de nettoyer la moindre trace de pollution, mais de nettoyer suffisamment pour permettre un fonctionnement normal de l'écosystème et un retour à ses divers usages. L'objectif est également d'éviter que « le remède soit pire que le mal », c'est-à-dire que les techniques et les moyens mis en œuvre ne génèrent pas plus d'impact que la pollution elle-même. Cela nécessite d'accepter parfois la persistance d'une pollution résiduelle que l'environnement finira par dégrader lui-même, plutôt que d'organiser des opérations de nettoyage excessif dégradant l'environnement (fauche excessive de végétation, curage excessif de sédiments, décapage excessif de substrats, etc.). À ce titre, il convient également d'être très prudent dans l'utilisation en milieu naturel des divers produits de traitement

disponibles sur le marché. L'expérience du Cedre montre qu'ils sont souvent sans efficacité notable pour le nettoyage, pour le mieux, voire dangereux pour l'environnement, pour le pire.

Le traitement des déchets

La lutte contre une pollution accidentelle des eaux nécessite également la prise en compte du transport et du traitement des déchets. Bien qu'elle apparaisse en fin de chronologie de l'événement, il convient de l'anticiper car il s'agit d'une phase cruciale permettant d'assurer que le polluant ne constitue plus une menace pour l'Homme et l'environnement. Dans le même temps, il s'agit aussi généralement de la phase la plus coûteuse de l'intervention dont la prise en charge peut s'avérer problématique pour une collectivité en l'absence de pollueur identifié. Il est donc primordial que les différentes parties prenantes s'accordent sur les modalités de prise en charge des déchets et veillent tout au long des opérations à limiter le volume de ces derniers en mettant en œuvre des techniques sélectives de lutte sur l'eau et sur les berges.

Préparation à la lutte et l'intervention

La pollution accidentelle des eaux intérieures, particulièrement des rivières, est un événement dont la cinétique est rapide, en lien avec le déplacement de la pollution au fil du cours d'eau, l'augmentation du nombre des sites et usagers impactés au fil de cette dérive et donc la multiplication des parties prenantes impliquées dans l'affaire. La gestion d'un tel événement nécessite donc une bonne préparation en amont (plan d'urgence, personnel formé et entraîné, et équipements adaptés et disponibles) afin que la réponse soit conduite sans délai sur le terrain et en synergie entre tous les différents intervenants. Il est tout particulièrement nécessaire de former les différents acteurs sur des scénarios de gestion de crise afin de les mettre en situation pour faciliter les interactions, la communication entre les services, mais également l'utilisation des procédures et des moyens de lutte lors d'un accident. Le Cedre a justement été créé pour apporter son assistance dans la préparation à la lutte et l'intervention en cas de pollution. Il met à disposition de nombreuses ressources documentaires sur son site internet, rédige des plans d'urgence et forme les intervenants. Surtout, il est disponible 24h /24 pour apporter son expertise en situation d'urgence et se déplace, si besoin, sur site pour évaluer la situation et recommander les options de lutte adaptées.

[1] www.aria.developpement-durable.gouv.fr/le-barpi

[2] www.cedre.fr/Ressources/Publications/Lettres-techniques/Lettres-techniques-eaux-interieures

[3] www.ecologie.gouv.fr/lutte-contre-pollutions-leau

[4] www.cedre.fr/content/download/10539/file/93-Pollution_ressources_eau_2023_VF.pdf
Sites consultés le 20/02/24.

Arnaud GUÉNA, adjoint au directeur, responsable production, Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux (Cedre), Brest.

*arnaud.guena@cedre.fr

Des outils pour gérer le risque de pollution chimique des milieux aquatiques par les eaux usées

Résumé L'amélioration de la caractérisation de la contamination chimique de l'environnement et de son impact sur les milieux aquatiques conduit à une nécessaire identification des différentes sources de pollution pour cibler les mesures de gestion les plus efficaces. Les rejets aqueux des industries peuvent constituer localement une voie d'apport majoritaire de substances chimiques vers l'environnement, que ce soit dans un contexte accidentel ou de fonctionnement normal. L'évolution des performances des outils analytiques et bioanalytiques, ainsi que l'accompagnement de leur mise en œuvre, permet de fiabiliser le diagnostic et, ainsi, améliorer la pertinence des approches d'évaluation et de gestion des risques. L'approche classiquement utilisée pour évaluer l'acceptabilité d'un rejet par le milieu s'appuie sur une comparaison des concentrations en polluants individuels à des valeurs guides environnementales qui, lorsqu'elles existent, sont documentées et disponibles en ligne. Mais cette évaluation ne porte que sur une liste limitée de composés. L'utilisation d'outils de surveillance basés sur les effets écotoxicologiques des substances permet de considérer la toxicité d'un effluent dans son ensemble, en s'affranchissant du nombre de substances en présence et du potentiel effet de mélange. Les méthodes biologiques ou de bioanalyse intègrent aujourd'hui les stratégies de surveillance, dont certaines sont réglementaires. Couplées à des méthodes d'échantillonnage intégratif ou analytiques de large screening (analyse non ciblée) dont le développement est en plein essor, ces méthodes de bioanalyse peuvent constituer une aide au diagnostic et à la gestion des pollutions de plusieurs façons : dispositif d'« alerte » pour identifier de manière précoce des dérives dans la qualité d'un rejet ou des épisodes de pollution dans le milieu, suivi global de l'efficacité d'un traitement ou d'une mesure de réduction sur site, aide au contrôle d'enquête pour identifier un polluant à l'origine d'un effet écotoxique observé.

Mots clés Analyse non ciblée, bioessais, Aquaref, MTD, VGE, NQE, ERE (évaluation du risque environnemental).

Abstract **Risk management tools to prevent chemical pollution of aquatic ecosystems from waste water discharges**
As a consequence of improved monitoring and identification of chemicals in the environment and their impacts on water, it is necessary to identify the various sources of pollution in order to apply the most effective mitigation measures. Wastewater from industry can locally be the main source of chemicals in the environment, either from accidental discharges or daily operation. With the development of advanced analytical tools and support for their implementation in monitoring strategies, the type and number of available data has increased together with their quality, thus improving the relevance of risk assessment and risk management methodologies. The classical methodology used to assess the compatibility of a discharge with water quality objectives is based on a comparison of individual pollutants concentrations with environmental standards which are documented and available online. However, this approach will only cover a limited list of chemicals. The use of monitoring tools based on ecotoxicological effects of substances enables considering the toxicity of the whole effluent, no matter the number of substances in the effluent and the potential mixture effect. Biological methods are now included in monitoring strategies where appropriate and can be encouraged by regulation. Together with integrative sampling methods or broad screening analytical methods (non-targeted analysis), which are currently being developed, they can help to assess and manage chemical pollution in different ways: as an "early warning" system to identify any variation in the discharge quality or peak pollution in the environment, monitoring of the effectiveness of a treatment or a mitigation measure, investigative control to identify the pollutant involved in an observed ecotoxic effect.

Keywords Non target screening, bioassays, Aquaref, EBM (effect-based method), BAT, EQS, ERA (environmental risk assessment).

Un levier pour améliorer la caractérisation et la gestion des effluents industriels

Avec aujourd'hui plus de mille composés chimiques suivis de manière régulière [1] ou mis en évidence lors de campagnes prospectives dans les différents milieux aquatiques (cours d'eau, plan d'eau, eau littorales et eaux souterraines) en France [2], la connaissance des différentes sources d'émissions de ces composés est un prérequis pour cibler les mesures de gestion les plus efficaces. Les rejets aqueux des industries peuvent constituer localement une voie d'apport majoritaire [3] de certaines substances chimiques (BTEX, dioxines, composés bromés, phosphates de tributyle, tétrachlorure de carbone,

etc.) vers l'environnement, que ce soit dans un contexte accidentel ou de fonctionnement normal.

La Directive européenne cadre sur l'eau n° 2000/60/CE (ou DCE) transposée en droit national [4] est un exemple de réglementation européenne qui, par l'intégration d'un processus de révision régulier des polluants d'intérêt pour qualifier l'état des eaux, pousse au développement et à l'amélioration des outils de caractérisation de la pollution chimique et de son impact sur les écosystèmes aquatiques. Ce processus a notamment contribué à la mise en évidence de pollutions des eaux par les œstrogènes, les détergents, les per- et polyfluoroalkylés (PFAS). Un des principes de gestion de la DCE est que tout rejet doit être compatible avec les objectifs de bon état des

eaux, c'est-à-dire qu'il ne doit pas conduire au dépassement dans le milieu d'une concentration sans effet pour l'écosystème ou à l'accumulation de substances dites persistantes dans les sédiments et le biote (exigence de suivi en tendance des concentrations dans ces matrices).

Ainsi, la réglementation relative aux rejets des industries, en particulier la Directive européenne n° 2010/75/UE sur les émissions industrielles (nommée IED) et la réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) en France [5] a pour ambition de contribuer à l'atteinte des objectifs de la DCE. Suite à des campagnes d'ampleur de recherche de substances dangereuses dans les rejets (actions de recherche et de réduction des rejets de substances dangereuses dans l'eau, RSDE) [6], de nouvelles substances ont été introduites dans la surveillance régulière obligatoire, accompagnées de valeurs limites d'émission. Le récent plan d'action ministériel sur les PFAS [7] a par ailleurs conduit à la publication d'un arrêté, par le Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, pour mettre en œuvre une surveillance accrue de ces composés dans les rejets aqueux des ICPE (arrêté du 23 juin 2023). Au niveau européen, les documents réglementaires BREF [8], qui décrivent les meilleures techniques disponibles (MTD) pour un secteur d'activité donné, intègrent de plus en plus d'exigences en matière de caractérisation et de surveillance des rejets (suivi des substances de la DCE, des substances dites « émergentes » comme les PFAS, des microplastiques, etc.) et de gestion des effluents (obligation de réaliser un inventaire des flux aqueux du site).

Un accompagnement pour garantir la qualité des données de surveillance des pollutions chimiques



La surveillance actuelle des eaux constitue un défi technique (substances chimiques toujours plus nombreuses, besoin d'optimisation des méthodes pour atteindre des limites de quantifi-

cation toujours plus basses) et nécessite d'être encadrée pour que les résultats soient fiables et exploitables. Le laboratoire de référence pour la surveillance des milieux aquatiques Aquaref [9], dont l'Ineris assure la direction, est un consortium de cinq établissements publics d'expertise et de recherche (BRGM, INRAE, Ifremer, Ineris, LNE) qui a pour mission⁽¹⁾ d'une part de proposer des outils, méthodes et recommandations pour améliorer la qualité des données et, d'autre part, d'assurer la veille, la validation et le transfert d'outils dits « innovants » et la proposition de nouvelles stratégies de surveillance. Les compétences de l'Ineris sur l'industrie sont plus particulièrement mobilisées dans ce cadre en lien avec ses travaux sur la directive IED.

En matière de caractérisation des rejets, plusieurs productions sont disponibles sur le site internet d'Aquaref pour améliorer les procédures d'échantillonnage et d'analyses, car cette matrice complexe requiert des précautions particulières. Des guides de recommandations techniques abordent notamment les risques de contamination lors de l'échantillonnage (matériel à utiliser, précaution à prendre par les opérateurs...), l'homogénéisation des échantillons, la réalisation de blancs de prélèvement et d'analyse, etc.

Aquaref publie aussi des fiches méthodes permettant d'optimiser certaines étapes de l'analyse pour diminuer les incertitudes sur le résultat. L'organisation de comparaisons

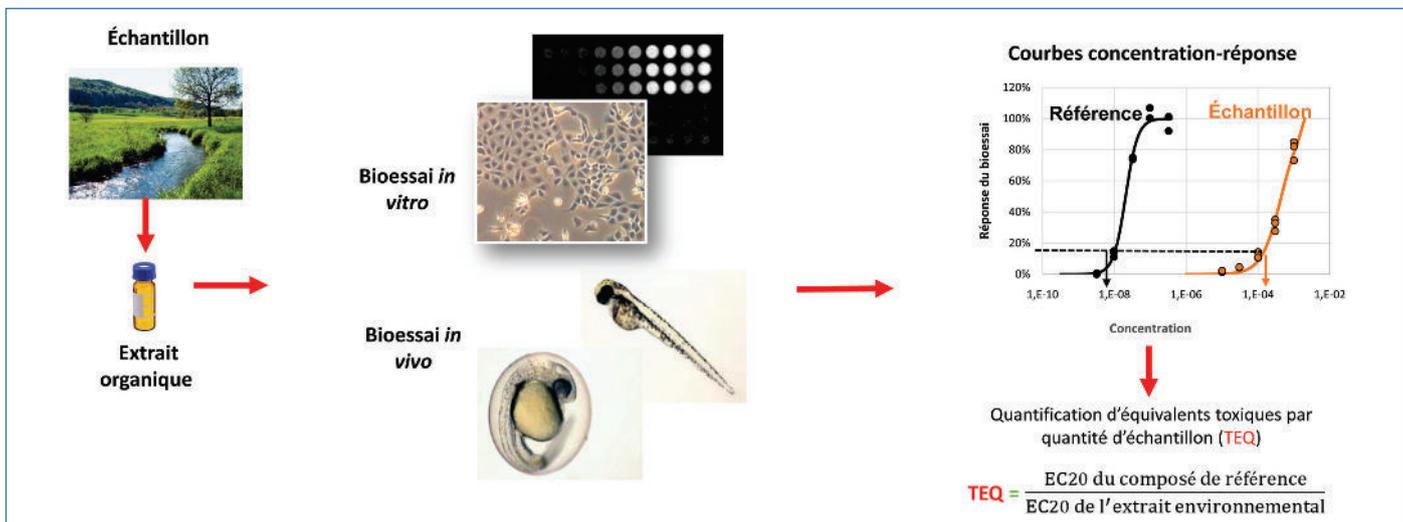
inter-laboratoires (CIL) sur des « nouvelles » substances permet par ailleurs d'améliorer les pratiques: le dernier exercice organisé par Aquaref concerne les PFAS, avec la participation d'une quinzaine de laboratoires pour l'analyse d'une trentaine de composés de cette famille.

Mise en œuvre de stratégies de surveillance intégrant de « nouveaux » outils

L'amélioration de la surveillance telle que décrite représente un effort, notamment financier, non négligeable pour les laboratoires mais aussi pour les industriels, sans que cela soit complètement satisfaisant en termes de caractérisation d'un risque chimique pour le milieu. La contribution à l'élaboration de stratégies de surveillance des rejets optimisées et intégrées constitue un des axes de recherche de l'Ineris. Ces travaux portent sur des outils d'échantillonnages innovants, des méthodes permettant un large screening des composés présents dans les échantillons (analyses non ciblées) et des outils mettant en œuvre des mécanismes biologiques pour caractériser les effets néfastes potentiels d'un effluent sur des organismes vivants.

L'utilisation d'outils d'échantillonnage intégratif passifs (EIP) a été portée dans le cadre des travaux d'Aquaref depuis plus de dix ans avec la publication de plusieurs documents dont, en 2022, un guide de recommandations pour leur utilisation en contexte réglementaire pour la surveillance des milieux aquatiques [10]. Le principe de ces outils repose sur l'accumulation des substances en présence sur une période d'exposition plus ou moins longue. L'intérêt de leur utilisation réside d'une part dans l'amélioration de la sensibilité de la mesure avec une mise en œuvre facilitée et, d'autre part, contrairement à un échantillonnage ponctuel, dans la possible mise en évidence de variations inhabituelles dans les concentrations mesurées sur une période donnée (i.e. épisode de pollution accidentelle). Pour les eaux résiduaires, l'utilisation peut être plus complexe en raison de la matrice et de la configuration du site. Une étude de démonstration de l'applicabilité de deux outils⁽²⁾ et les avantages en comparaison à la méthode de prélèvement réglementaires des effluents sur 24 heures ont conduit à des résultats prometteurs en réseau d'assainissement urbain dans le cadre du projet LUMIEAU-STRA mené avec l'appui financier de l'Agence française pour la biodiversité et des Agences de l'eau sur la métropole strasbourgeoise [11]. L'Ineris a poursuivi le déploiement de ces outils sur un site industriel chimique, en amont et en aval d'une station de traitement des eaux usées avec l'objectif à terme de proposer des recommandations pour la réalisation de diagnostic de sources de pollution.

Le développement d'appareils de spectrométrie de masse haute résolution (HRMS) permettant d'acquérir des données sur un large spectre de polluants organiques présents dans un échantillon d'eau, sans *a priori*, est en plein essor. À l'Ineris, des analyses non ciblées (non target screening, NTS) ont été réalisées sur plus d'une centaine d'échantillons provenant d'eaux de surface et d'eaux de rejets industriels depuis 2018, dont un exercice mené sur des eaux de refroidissement d'un site industriel [12] afin d'identifier des substances émergentes et d'évaluer le potentiel de ce nouvel équipement par rapport aux techniques classiques. Le programme de travail Aquaref prévoit des développements et l'encadrement de l'analyse non ciblée dans l'eau. À l'échelle d'un site industriel complexe en termes d'activités et de substances mises en œuvre ou



généérées, cet outil pourra facilement trouver des opportunités d'utilisation : identification de sous-produits ou produits de décomposition, vérification de l'efficacité réelle des procédés de dépollution mis en œuvre sur site (comparaison des empreintes chimiques entre l'amont et l'aval du process) ou évaluation des dysfonctionnements du process qui affecteraient la qualité du rejet (suivi régulier des échantillons en sortie et comparaison de ces suivis pour alerter en cas de différences importantes avec tentative d'identification des substances mise en évidence).

Enfin, en complément de l'analyse chimique de substances individuelles, l'apport des méthodes basées sur les effets biologiques (ou bioessais, voir *figure* ci-dessus) en divers contextes de surveillance des eaux, a été mis en avant par l'Ineris [13]. La caractérisation de la toxicité globale d'un échantillon d'eau présente l'avantage d'intégrer les effets potentiels de l'ensemble des polluants biodisponibles, ceux non recherchés ou non détectés par l'analyse chimique et leurs produits de transformation, en prenant en compte leurs éventuels effets synergiques, additifs ou antagonistes. Des bioessais dits de « toxicité aiguë » en laboratoire permettent d'observer des effets se manifestant rapidement sur les organismes considérés (e.g. de l'inhibition de la mobilité jusqu'à la mort des organismes), tandis que des bioessais dits de « toxicité chronique » vont mettre en évidence des effets retardés, ou apparaissant après une durée d'exposition prolongée à de plus faibles concentrations de polluants. Les effets physiologiques les plus couramment mesurés concernent la croissance, la reproduction, mais également la survie à long terme des organismes exposés. La mise en place d'une surveillance des rejets du secteur de la chimie et du traitement des textiles par une batterie de cinq tests d'écotoxicité générale est aujourd'hui une MTD⁽³⁾.

D'autres types d'effets peuvent être observés au niveau moléculaire ou biochimique lors d'exposition des organismes à des substances ayant des propriétés cumulatives, génotoxiques, cancérigènes, immunotoxiques ou endocriniennes. L'Ineris a notamment développé des outils dits bio-analytiques *in vitro* (modèles cellulaires ou acellulaires) et *in vivo* (organismes entiers) sur les effets des perturbateurs endocriniens (mesure quantitative d'une réponse biologique spécifique d'un mode d'action toxique) qui ont déjà été éprouvés dans différents projets européens [14] et français [15]. Ils ont par ailleurs été mis en œuvre dans un contexte

opérationnel de surveillance des rejets (action nationale de l'inspection des ICPE 2022 et 2023 qui prévoit une surveillance des rejets d'activités de perturbation endocrinienne dans les effluents de sites industriels).

Les outils basés sur les effets des substances peuvent s'avérer utiles pour le contrôle d'enquête pour identifier des pressions et des sources d'une pollution (e.g. identification de groupes de substances ayant le même mode d'action présentes dans les rejets), l'évaluation de l'état chimique et de l'impact des pollutions sur le milieu, l'évaluation de l'efficacité des mesures de gestion pour réduire la pollution. Couplés à des analyses chimiques non ciblées, ils peuvent permettre d'améliorer la corrélation entre présence de substances chimiques et effets observés (approche dite d'analyses dirigée par l'effet ou effect directed analysis, EDA) et ainsi remonter à la substance à l'origine d'un effet.

La diversité des solutions techniques disponibles nécessite toutefois de bien identifier l'objectif visé, les informations attendues et comment les interpréter avant de mettre en œuvre une de ces solutions. Un premier travail d'inventaire et d'évaluation des méthodes existantes a été réalisé par un groupe de travail national piloté par l'Office français de la biodiversité (OFB) et Aquaref [16]. Les résultats de cet inventaire permettent de proposer une batterie « type » de bioessais à utiliser selon le contexte d'utilisation visé : surveillance d'eaux résiduaires ou surveillance du milieu. Une phase de déploiement à grande échelle de ces batteries de bioessais va débuter en 2024 avec le concours de l'OFB [17]. Les résultats attendus permettront de définir des recommandations techniques harmonisées pour l'utilisation de ces outils.

La combinaison des différents outils pour évaluer le risque et prioriser l'action

Portail substances chimiques

La compilation des données disponibles sur les substances à l'origine d'une pollution est une étape préalable à la définition des actions de gestion à mettre en œuvre. Le portail sur les substances chimiques de l'Ineris [18] met à disposition en ligne une information détaillée sur les propriétés toxicologiques, écotoxicologiques, et physico-chimiques des substances, ainsi que les données technico-économiques (à savoir quels



processus industriels les utilisent et les rejettent) et la réglementation applicable. Le Portail substances chimiques (PSC) dispose d'une base de données pour près de 7000 substances ou groupes de substances. Des fiches compilent les données d'écotoxicité aiguë et chronique (concentrations d'effets pour 50 % de la population et concentrations sans effet observé) et, quand elles sont disponibles, les concentrations écotoxicologiques de référence de la substance telles que les concentrations prédites sans effet (ou predicted no effect concentrations, PNEC), et les valeurs sans effets définies au niveau européen pour 45 substances ou groupes de substances, ou au niveau national sur proposition de l'Ineris pour 31 substances. Elles sont transcrites en droit national en tant que norme de qualité environnementales (NQE). Pour d'autres substances jugées d'intérêt national ou local, l'Ineris peut être amené à faire des propositions qui sont alors appelées valeurs guides environnementales (VGE).

L'Ineris a par ailleurs construit un fonds de fiches technico-économiques (FTE), dont une partie en collaboration avec l'OFB, et qui couvre 160 substances ou familles de substances chimiques dangereuses pour les écosystèmes et la santé humaine, et plus de 780 numéros CAS. Ces fiches sont présentées sous un format détaillé (103 substances ou familles) ou un format court (57 substances). Les questions concernent les usages présents et futurs, les secteurs de l'économie concernés et, enfin, les mesures connues pour substituer, limiter ou supprimer les émissions polluantes, qu'elles s'inscrivent dans des circonstances aiguës/chroniques d'émissions, ou dans des situations accidentelles. Une refonte du PSC est en cours dont l'objectif est de proposer, dès 2024, une information « à la carte » sur une substance, grâce à un outil de recherche amélioré.

Évaluation des risques pour les écosystèmes

Dans le document d'orientation pour l'évaluation du risque chimique pour les écosystèmes [19], l'Ineris présente trois approches distinctes permettant de caractériser les effets

des activités industrielles sur les écosystèmes. L'approche substance (ou approche chimique) évalue le risque par l'étude de la toxicité des substances émises par un site industriel ou présentes dans un milieu pollué, par la comparaison de la concentration prévisible dans l'environnement à la concentration sans effet pour l'écosystème (PNEC, VGE, NQE). Il s'agit de la notion d'acceptabilité du milieu évoquée précédemment. L'approche écotoxicologique évalue le risque que représente à la fois le mélange de substances dans la matrice (sols, eaux superficielles, effluents) et les caractéristiques physiques de la matrice (texture du sol, acidité de l'eau, etc.) en utilisant une batterie de bioessais. Enfin, l'approche écologique évalue le risque par une mesure de l'abondance et de la diversité des espèces présentes sur le site étudié.

L'élaboration de ce document fait suite au besoin de disposer d'une approche harmonisée pour évaluer les incidences notables sur l'environnement des activités soumises à l'autorisation environnementale sur les écosystèmes. Si le document vise en premier lieu à accompagner le dépôt d'un dossier d'autorisation d'exploiter, la démarche à suivre peut s'appliquer en d'autres circonstances comme dans le cas d'un suivi régulier d'un rejet ou d'un suivi après une pollution accidentelle et la mise en œuvre de mesure de gestion.

Inventaire des flux, maîtrise des rejets industriels

La réalisation d'un inventaire des flux pour les émissions aqueuses et gazeuses est une meilleure technique disponible (MTD) issue initialement des conclusions sur les MTD du BREF au sujet du traitement des effluents aqueux de la chimie. Cette MTD est désormais régulièrement reprise dans les autres BREF en révision. Elle a pour objectifs de faciliter la réduction des émissions dans l'eau et dans l'air, et la diminution de la consommation d'eau. Une interprétation simplifiée de la MTD⁽³⁾ pourrait consister à produire un listing des paramètres surveillés à l'exutoire dans le cadre des prescriptions de l'autorisation, alors qu'il s'agit de faire réaliser par l'exploitant

Perchlorate d'ammonium

CAS : 7790-98-9
 Synonymes : ammonium perchlorate; Perchloric acid, ammonium salt; AMMONIUM PERCHLORATE (NH₄ClO₄); PKHA.

Créé le: 19/12/2012
 Mise à jour le: 10/08/2021

Informations générales | Propriétés physico-chimiques | Toxicologie | **Ecotoxicologie** | Technico-économie | Accidentel | Autres informations

Eau douce écotoxicologie

Paramètre	Valeur	Unité	Commentaire	Référence
CL/CE50 algue	> 500	mg/L	Pseudokirchneriella subcapitata - ErC50 - NH ₄ ClO ₄	INERIS (2012)
CL/CE50 invertébré	66	mg/L	Ceriodaphnia dubia - statique - NaClO ₄	INERIS (2012)
CL/CE50 invertébré	6680	mg/L	Corbicula fluminea - Continu - NaClO ₄	INERIS (2012)

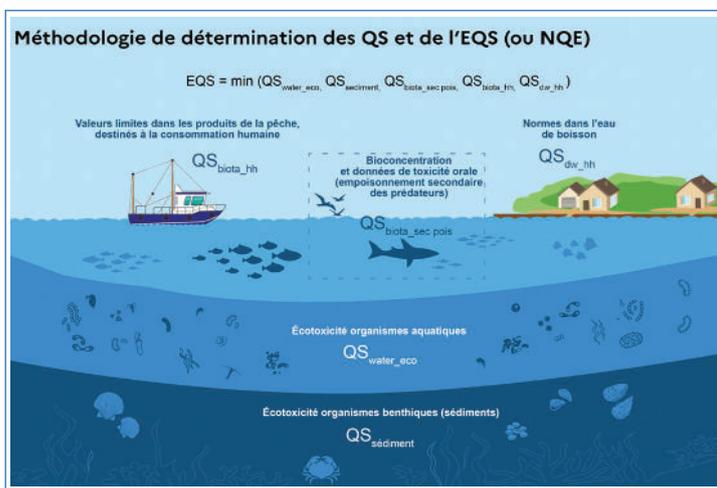
Sédiment écotoxicologie

Paramètre	Valeur	Unité	Commentaire	Référence
CL/CE50 invertébré	8100	mg/L	Chironomus tentans - continu - NaClO ₄	INERIS (2012)
CL/CE50 invertébré	3710	mg/L	Lumbriculus variegatus - continu - NaClO ₄	INERIS (2012)

Valeur Guide Environnementale (VGE)

Compartiment	Paramètre	Valeur	Unité	Commentaire	Référence	Fic
Eau douce	Valeur guide _{Eau}	0.3	µg/L		INERIS (2012)	

Exemple de fiche (perchlorate d'ammonium) à disposition sur le Portail substance chimique.



Détermination des normes de qualité environnementale.

une évaluation détaillée des flux de polluants aux différentes étapes du process. La finalité est de mieux identifier à quel endroit il faudrait agir pour réduire le plus efficacement la pollution et, notamment, prévenir tout risque de dilution des substances. L'inventaire doit également permettre de s'assurer de l'exhaustivité des polluants considérés et de la prise en compte des substances pouvant avoir des impacts à faible concentration. Les informations du PSC pourront s'avérer utiles dans ce cadre.

Devant la complexité de la démarche, l'Ineris a mené sur plusieurs années une réflexion qui a permis de produire, en 2022, un rapport de recommandations. Ces recommandations font actuellement l'objet d'une expérimentation sur un site volontaire pour évaluer leur faisabilité et leurs limites. À l'issue du retour d'expérience, les propositions pour la mise en œuvre de cette MTD feront l'objet d'une publication sur le site internet de l'Ineris.

Au regard de l'intérêt démontré précédemment des outils de screening non ciblé et de bioessais de toxicités générale ou spécifique d'un mode d'action d'une famille de substances (*i.g.* perturbateurs endocriniens), l'Ineris a préconisé leur mobilisation dans ce contexte. Par exemple, si l'impact écotoxicologique de l'effluent est mis en évidence dans le cadre d'une approche d'évaluation de risque pour les écosystèmes, les outils biologiques peuvent également être utilisés pour identifier l'origine de la toxicité au sein même du process afin de l'isoler, pour évaluer l'efficacité des modalités de contrôle de la toxicité et pour confirmer la diminution de la toxicité de l'effluent (méthode TIE/TRE pour toxicity identification/reduction evaluation). L'utilisation de bioessais spécifiques et le couplage avec des analyses chimiques peut permettre d'identifier les molécules à l'origine de l'effet toxique observé.

Vers des stratégies intégrées de surveillance au service de la gestion du risque

En matière de gestion du risque de pollution chimique des milieux aquatiques par les rejets industriels, l'amélioration de la caractérisation de l'effluent et de son suivi est indispensable. Le nombre de composés chimiques mis en œuvre dans les procédés industriels et rejetés *in fine* sous leur forme initiale, ou les sous-produits de dégradation ou de transformation, rend l'exercice très complexe. Les outils « classiques » de surveillance chimique ne sont plus suffisants et l'élaboration

de stratégies de surveillance (ou de suivi) optimisées et plus intégratrices de l'ensemble des composés présents et de leurs effets écotoxiques semble indispensable pour identifier les mesures de gestion les plus pertinentes. Leur mobilisation dans le cadre d'une démarche d'inventaire des flux aqueux du site peut s'avérer pertinente.

[1] Mission confiée par l'arrêté du 19/10/2018 modifié relatif au Schéma national des données sur l'eau (SNDE).

[2] La cellule Prebio, qui est un dispositif immergé sur lequel un biofilm se développe et accumule les substances présentes dans l'eau. Cet outil donne des résultats qualitatifs. Le continuous flow integrative sampler (CFIS), qui est un préleveur autonome : l'eau est envoyée vers une cellule en acier inoxydable contenant des sorbants vers un filtre où sont piégées les particules. Cet outil fonctionnant toujours à un débit constant facilite l'estimation de la concentration moyennée de substances dans le milieu sur la durée de déploiement.

[3] Les conclusions sur les MTD relatives aux systèmes communs de traitement/gestion des effluents aqueux et gazeux dans le secteur chimique (BREF CWW), parues en 2016, introduisent pour la première fois dans le cadre de la directive IED de mettre en place une surveillance des rejets aqueux faisant appel à cinq tests écotoxicologiques pré-ciblés pour la toxicité aigüe (bactéries luminescentes, daphnies et œufs de poissons zèbre) ou chronique (algues et lentilles d'eau). Cette MTD a été reprise plus récemment dans le BREF relatif au secteur textile.

[1] Service des données et études statistiques, La pollution chimique des cours d'eau et des plans d'eau en France de 2000 à 2020, **2023**, *SDES Datalab*.

[2] Ineris, *Campagne émergents nationaux 2018 – Résultats de la recherche de contaminants émergents dans les eaux*, **2020**.

[3] Ineris, *Comparaison des inventaires*, **2022**, p. 46-47.

[4] Arrêté du 25/01/10 modifié établissant le programme de surveillance de l'état des eaux en application de l'article R. 212-22 du Code de l'Environnement et arrêté du 25/01/10 modifié relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du Code de l'Environnement.

[5] Arrêté du 02/02/98 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation.

[6] www.ineris.fr/fr/action-rsde

[7] www.ecologie.gouv.fr/plan-daction-ministeriel-sur-pfas

[8] <https://aida.ineris.fr/guides/documents-bref/documents-bref-conclusions-mtd>

[9] www.aquaref.fr

[10] Opérations d'échantillonnage par échantillonneurs intégratifs passifs en cours d'eau et en eaux littorales dans le cadre des programmes de surveillance DCE, *Guide technique Aquaref*, **2021**.

[11] S. Ngo, B. Lepot, A. Assoumani, Apports des échantillonneurs intégratifs innovants pour la recherche de micropolluants en réseau d'assainissement, Livrable 1.4. du projet LUMIEAU-STRA, Ineris, **2019**.

[12] J. Beaumont, A. Assoumani, A. El Masri, F. Lestremou, Analyse non ciblée appliquée aux eaux de rejets ICPE : tours aéroréfrigérantes (TAR), *Rapport Aquaref*, **2022**.

[13] Ineris, *Place des méthodes bio-analytiques dans la directive-cadre européenne sur l'eau (DCE)*, **2020**.

[14] W. Brack *et al.*, Effect-based methods are key. The European Collaborative Project Solutions recommends integrating effect-based methods for diagnosis and monitoring of water quality, *Env. Sc. Eur.*, **2019**.

[15] S. Ait-Aïssa, F. Brion, Approches intégrant bioessais et analyses chimiques pour évaluer la qualité des milieux aquatiques. *Rapport Scientifique Ineris*, **2018**, p. 54-55.

[16] N. Manier, S. Ait-Aïssa, P. Pandard, Inventaire et évaluation des méthodes biologiques issues de l'écotoxicologie pour la surveillance des milieux aquatiques en vue de leur utilisation dans le cadre de la DCE, *Rapport Aquaref*, **2023**, p. 66.

[17] Lancement de l'appel à projets « Biosurveillance des milieux aquatiques et rejets aqueux » (ofb.gouv.fr).

[18] <https://substances.ineris.fr>

[19] N. Pucheux, Document d'orientation pour l'évaluation du risque chimique pour les écosystèmes, *Rapport d'appui Ineris*, **2022**.

Lauriane GRÉAUD, directrice du programme Aquaref, chargée de mission biodiversité, Ineris, Verneuil-en-Halatte.

*lauriane.greaud@ineris.fr

Modélisation de la pollution accidentelle des eaux intérieures

Les enjeux de la dispersion des produits chimiques dans les eaux intérieures

Les eaux intérieures sont des habitats fragiles qui jouent un rôle crucial dans nos écosystèmes locaux et notre approvisionnement en eau douce. Malheureusement, les accidents impliquant des produits chimiques peuvent entraîner des déversements toxiques dans ces eaux, mettant en danger l'équilibre délicat de ces habitats. Ces incidents peuvent résulter d'activités industrielles, de défaillances d'équipements, de transports de substances dangereuses ou même d'actes de vandalisme. En août 2019, une fuite d'engrais liquide azoté, issue d'une exploitation agricole de la commune normande de Tanques, se déverse dans une rivière de l'Orne et entraîne la mort de poissons sur plus de 2 km en aval de l'accident⁽¹⁾. En août 2020, dans le Finistère, un rejet de déchets chargés en ammoniacque issus d'un méthaniseur entraîne la pollution d'une rivière proche de la ville de Châteaulin. Cette pollution atteint le captage d'une usine de potabilisation de l'eau, entraînant la rupture de service pour plusieurs milliers de foyers pendant quelques jours⁽²⁾. Ces deux exemples illustrent la nécessité d'évaluer les conséquences pour la faune, la flore et, potentiellement, pour les humains lors de déversement accidentel entraînant des pollutions majeures des cours d'eau. C'est dans ce contexte de gestion des risques que s'inscrit la modélisation de la dispersion accidentelle des produits chimiques dans les eaux intérieures pour comprendre et prévenir ces incidents.

Les paramètres clés de la modélisation

La modélisation de la dispersion des produits chimiques dans les eaux intérieures est un outil crucial pour anticiper les conséquences d'un déversement accidentel. En simulant les scénarios de déversement, les modèles permettent d'estimer les zones potentiellement touchées, les concentrations en substances chimiques et les délais d'atteinte de ces zones. Ces informations sont essentielles pour évaluer les risques pour l'environnement et les populations riveraines. La modélisation de la dispersion accidentelle des produits chimiques dans les cours d'eau est un domaine crucial de la gestion des risques environnementaux. Cette discipline combine des connaissances en hydrodynamique, en chimie et en modélisation mathématique. Ces modèles utilisent des équations mathématiques basées sur les mécanismes de transport, de diffusion et de dilution et doivent prendre en compte des paramètres environnementaux pour refléter la réalité du milieu aquatique. Ces différents mécanismes sont des processus complexes en raison de la variété des paramètres impliqués. Ainsi, les caractéristiques du milieu aquatique et de l'environnement externe, le type de polluant ou la topographie jouent un rôle déterminant dans les processus de dispersion. Comprendre ces mécanismes de dispersion nécessite donc une approche systémique et pluridisciplinaire. Ainsi, les modèles doivent prendre en compte une multitude

de paramètres pour obtenir des prévisions précises. L'évaluation des propriétés physiques de l'eau (masse volumique, viscosité, salinité, température, turbidité), du débit et de la vitesse du courant et de la turbulence du milieu ont un impact significatif sur la dispersion des polluants, tout comme les conditions météorologiques telles que le vent et les précipitations, ou la forme et la géométrie du cours d'eau (rivières, fleuves, estuaires, lac, etc.). La nature intrinsèque du polluant chimique joue également un rôle déterminant dans les conséquences directes de ces pollutions. Certains polluants peuvent se dissoudre complètement dans l'eau, tandis que d'autres peuvent adsorber sur des particules en suspension ou être transportés par des organismes vivants. Ces comportements, associés aux phénomènes de dégradation biologique, photodégradation et d'autres processus chimiques, influencent dès lors les impacts environnementaux à plus ou moins long terme. Comprendre et modéliser précisément l'ensemble de ces phénomènes, c'est également disposer de données précises. Or, l'acquisition de ces données est souvent un défi en soi.

Enfin, la modélisation peut être réalisée à différentes échelles temporelles et spatiales. La résolution temporelle peut varier de l'échelle horaire à l'échelle annuelle, tandis que la résolution spatiale peut couvrir des échelles allant de la petite retenue d'eau au fleuve ayant des débits importants sur plusieurs centaines de kilomètres.

Types de modèles

En raison de cette complexité, les modèles de dispersion de polluants dans l'eau sont souvent développés avec des approches numériques avancées, telles que les modèles hydrauliques ou hydrodynamiques et les modèles de transport de polluants, qui simulent les processus physiques, chimiques et biologiques impliqués. Ces modèles peuvent nécessiter des ressources informatiques importantes et une expertise spécialisée pour être utilisés et interprétés correctement. Il existe différentes approches pour modéliser la dispersion des produits chimiques dans les eaux intérieures. Parmi celles-ci, on retrouve les modèles lagrangiens qui suivent le parcours individuel des particules chimiques, et les modèles eulériens qui décrivent la concentration des produits chimiques à des emplacements spécifiques dans l'eau. Le choix entre ces deux types de modèles dépend essentiellement des caractéristiques du déversement et des objectifs spécifiques de la modélisation. Couplées à des données spatiales issues des SIG (systèmes informatiques géographiques) ou des images satellites ou de drones, les données de simulations permettent de cartographier l'ampleur d'une pollution et fournir des informations pour anticiper les décisions des autorités publiques, entreprises et organisations environnementales.

Un exemple courant de modèle de dispersion est le modèle d'advection-diffusion. Ce modèle utilise l'équation de transport pour représenter la dispersion d'un polluant dans l'eau (voir encadré page suivante).

Équation générale de transport

L'équation générale de transport est la suivante :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(uC) = \nabla(D\nabla C)$$

où C est la concentration du polluant (en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), t est le temps (en secondes), u est la vitesse du fluide (en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) et D le coefficient de dispersion.

Ainsi, dans le cas d'un déversement de produits chimiques en un point d'un cours d'eau, le modèle d'advection diffusion permet de prédire la concentration du polluant à différents emplacements du cours d'eau au cours du temps.

La figure suivante illustre les résultats de l'équation d'advection diffusion obtenus dans le cas d'un déversement de 15 000 L d'acide acétique au centre d'un cours d'eau dont le débit est de $45 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Chaque courbe représente l'évolution de la concentration au centre du cours d'eau, toutes les heures pendant 5 heures et à différentes distances.

Comprendre et prévenir les risques

La modélisation de la dispersion accidentelle des produits chimiques dans les eaux intérieures est une composante vitale de la gestion des risques environnementaux. En combinant des données et des modèles précis, il est possible de minimiser les dommages potentiels pour les écosystèmes aquatiques et les communautés environnantes. En comprenant comment les substances chimiques se propagent et se diluent dans un cours d'eau, il devient alors possible de mettre en place des mesures préventives efficaces pour planifier les stratégies de réponse en cas de déversement. Cela peut guider le déploiement d'équipements de détection, ou aider à établir des zones de confinement et faciliter la mise en œuvre de mesures de nettoyage et de restauration.

Une planification minutieuse est essentielle pour une intervention rapide et efficace en cas de pollution accidentelle. Les autorités locales, les organismes de réglementation environnementale et les entreprises doivent donc collaborer pour élaborer des plans d'urgence détaillés. Cela inclut la désignation de responsables de la gestion de crise, l'identification des ressources nécessaires et la définition des procédures

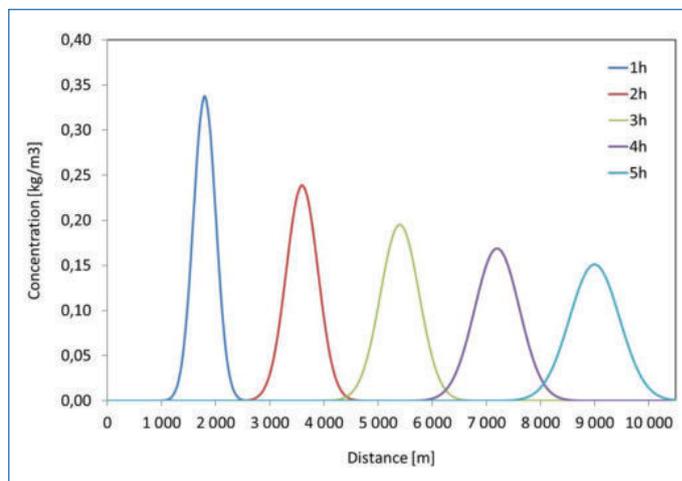


Figure - Évolution de la concentration dans un cours d'eau au cours du temps.

d'intervention. Des simulations régulières d'incidents sont donc des éléments cruciaux pour multiplier les scénarios d'accident et s'assurer que les équipes sont prêtes à réagir rapidement et efficacement.

Cependant, il est tout aussi crucial de prendre des mesures proactives pour prévenir les déversements accidentels en renforçant les réglementations et en encourageant les meilleures pratiques industrielles. La préservation de nos écosystèmes aquatiques dépend de l'engagement de tous les acteurs concernés.

(1) https://actu.fr/normandie/tanques_61479/pollution-de-l-ammoniac-deverse-dans-une-riviere-de-l-orme-des-poissons-meurent-un-livreur-et-un-agriculteur-condamnes_37546199.html (consulté le 16/02/24).

(2) www.ouest-france.fr/bretagne/chateaulin-29150/proces-du-methaniseur-de-chateaulin-retour-sur-la-pollution-qui-avait-prive-deau-le-finistere-eff4ffd6-5d3d-11ee-923e-4f7f2a6b2edd (consulté le 16/02/24).

Laurent APRIN,
Professeur,
Laboratoires des sciences des risques LSR, IMT Mines Alès, Alès.

*laurent.aprin@mines-ales.fr

45 **Sc** Culture **iencesChimie**
21

1794
ENS

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

Mis à disposition **CAPES et AGRÉGATION** aux épreuves orales

Site de ressources en Chimie pour les enseignants

Thèmes en lien avec les **PROGRAMMES D'ENSEIGNEMENT**
Contenu validé par des **CHERCHEURS**

Articles, Vidéos, Diaporamas
AGENDA, ACTUALITÉS
événements, conférences, parutions scientifiques...

<http://culturesciences.chimie.ens.fr>

Éliminer les agents de la menace NRBCe

Résumé

Les eaux destinées à la consommation humaine (EDCH), communément appelées « eau potable », constituent une cible potentielle pour l'introduction d'agents de la menace NRBCe, qu'il s'agisse d'actes malveillants délibérés ou de contaminations accidentelles secondaires à un événement proche des ressources, des installations de traitement ou de distribution. Face à cette menace, il importe de disposer d'outils dédiés de surveillance et de détection mais également, si l'introduction n'a pas pu être évitée dans la ressource, de connaissances relatives au comportement de ces agents dans les filières de traitement, ultime étape de potabilisation avant la mise en distribution. Ces connaissances permettront, considérant les concentrations d'agents dans l'eau brute, d'autoriser une éventuelle consommation de l'eau malgré une contamination en amont des filières. Elles permettent également un choix raisonné de filière de traitement en fonction des types de menaces. Une description rapide des pratiques et connaissances dans ce domaine est proposée dans cet article, avec un focus particulier sur les filières de traitement utilisées par les armées dans le cadre de la potabilisation de l'eau sur le terrain.

Mots-clés

Traitement de l'eau potable, agents NRBCe, performances, évaluation des risques.

Abstract

Water under threat: eliminate CBRNe agents

Water intended for human consumption (commonly referred as "drinking water") is a potential target for the introduction of CBRNe threat agents, whether through deliberate malicious acts or accidental contamination following an event close to the resources, treatment or distribution facilities. To face this threat, it is important to have dedicated monitoring and control tools but also (if introduction into the resource could not be avoided) knowledge of the behavior of these agents in treatment processes, the last stage in the potabilization process before distribution. This knowledge will make it possible, considering the concentrations of agents in raw water, to authorize consumption of water despite contamination upstream of the treatment process. It also enables the right choice of treatment process, depending on the type of threat. A brief description of practices and knowledge in this field is proposed in this article, with a particular focus on the treatment processes used by the armed forces to treat drinking water in the field.

Keywords

Drinking water treatment, CBRNe agents, performance, risk assessment.

Capacité des filières de traitement d'eau de terrain : référentiels

Tester l'efficacité de filières de traitement des EDCH pour les agents NRBCe nécessite, en phase de vérification des performances et d'acceptation des résultats, de disposer d'une liste de valeurs limites acceptables pour l'eau traitée et, donc, bue. Par définition, ces valeurs sont souvent absentes des réglementations civiles, à l'exception de certains agents industriels comme par exemple le cyanure, pour lequel la réglementation nationale fixe une limite de qualité à 50 µg/L. Il existe également des valeurs limites pour les paramètres radioactifs, mais basés sur une contamination « naturelle » des eaux [1].

Pour les agents de la menace, il convient d'utiliser des référentiels militaires, le plus connu d'entre eux étant l'AMedP-4.9 (couvert par le STANAG 2136) qui définit les standards minimaux de qualité de l'eau en opération, pour toute opération de l'OTAN, et notamment des standards en situation accidentelle de contamination par des agents NRBCe [2]. À titre d'exemple, les normes minimales en situation d'urgence pour la consommation d'eau à court terme (*tableau 1*) reprennent les valeurs limites pour certains agents de la menace chimique et radiologique, et pour une durée maximale de consommation de 7 jours.

Pour le cas particulier de la radioactivité, selon les radionucléides, ce standard précise que le principe ALARA (« as low as reasonably achievable ») devra être respecté, mais qu'une dose totale engagée jusqu'à 100 mSv pour des activités prioritaires, ou 250 mSv pour des activités vitales, pourrait

servir de guide. Il précise également les radionucléides type considérés pour le calcul.

La nécessaire utilisation de similis

La littérature militaire disposant de valeurs limites après traitement des EDCH, la qualification de certaines filières de traitement peut être requise, en particulier lors des tests de matériels destinés à être utilisés sur le terrain, en situation opérationnelle. En pratique, dans la littérature, on constate que la majorité des tests est réalisée en utilisant des similis, c'est-à-dire des substances biologiques ou chimiques dont la toxicité (ou la pathogénicité pour les agents biologiques) est modérée, qui sont manipulables par des industriels ou des laboratoires non spécialement autorisés, mais possédant des propriétés proches des agents de la menace, de telle sorte que les résultats obtenus avec ces similis peuvent raisonnablement être extrapolés aux agents réels [3,4].

Le choix des similis est habituellement basé sur une équivalence des paramètres influant l'efficacité de la filière de traitement : pour les agents biologiques et l'ultrafiltration, par exemple, un agent de même taille que l'agent de la menace sera utilisé, l'hypothèse étant que les agents biologiques sont retenus essentiellement par un processus de filtration, dépendant de la taille des micro-organismes.

Il existe également quelques laboratoires dans le monde à même d'effectuer les tests sur des agents réels : cette pratique a notamment été rapportée pour les agents chimiques,

Composé	Unité	Valeur limite pour une consommation de 5 L/j	Valeur limite pour une consommation de 15 L/j
Ypérite au soufre	mg/L	0,140	0,047
Lewisite (exprimé en arsenic)	mg/L	0,080	0,027
Agents neurotoxiques	mg/L	0,012	0,004
Toxines T2 (tricothécènes)	mg/L	0,026	0,008 7
Alpha total	Bq/L	28 500	9 500
Bêta total	Bq/L	255 000	85 000
Gamma	Bq/L	300 000	100 000

Tableau I - Valeurs limites pour certains agents de la menace NRBCE [2].

Substance	Type de matrice	Concentration dans l'eau brute (mg/L)	Concentration dans l'eau traitée (mg/L)	Réduction moyenne (%)
BZ	Eau salée	11,0	0,023	99,8
BZ	Eau douce	16,5	0,036	99,8
VX	Eau douce	16,4	1,25	92,4
VX	Eau salée	19,3	1,34	92,9
GB	Eau douce	15,8	0,24	98,5
GB	Eau salée	5,9	0,04	99,4
GA	Eau douce	5,8	1,69	71,0
GA	Eau salée	7,5	0,03	99,6
HD	Eau douce	3,4	0,0	100,0

Tableau II - Résumé de certains résultats d'épuration de toxiques de guerre par distillation/compression [6].

avec le VX ou le sarin, mais ces tests sont beaucoup moins nombreux et accessibles [5,6].

- Pour les agents biologiques, une bactérie ubiquitaire (*Escherichia coli*) et un bactériophage (MS-2) pour simuler les virus sont souvent proposés. Il s'agit également des conditions de test de performances d'épuration microbiologique requises par l'OMS pour la validation de matériels destinés à la production d'eau en situation d'urgence, l'OMS n'ayant pas de requis chimiques [7]. Le protocole OMS prévoit également l'ajout d'un protozoaire (oocystes de *Cryptosporidium parvum*), dont l'équivalent en agent de la menace militaire n'existe pas réellement.

Enfin, il n'est pas proposé de simili des toxines.

- Pour les agents radiologiques, les simili les plus fréquemment rencontrés, et les plus adaptés, sont les isotopes non radioactifs des radionucléides d'intérêt. On trouvera donc habituellement l'iode et le césium pour tester les performances de filières de traitement de l'eau à visée opérationnelle. Signalons que le radium, qui n'a pas d'isotope stable, peut également être utilisé.

- Pour les agents chimiques, le simili le plus classique de l'ypérite au soufre est le thiodiglycol, composé par ailleurs pertinent puisqu'étant le produit d'hydrolyse de l'ypérite, sa présence dans une ressource d'eau brute est possible (l'ypérite au soufre est peu soluble dans l'eau). Pour les neurotoxiques organophosphorés, notamment pour le VX et le soman, la littérature décrit l'utilisation respectivement de malathion et de diphenylchlorophosphate [3]. D'autres esters de l'acide phosphorique, solubles, modérément toxiques et commercialement accessibles peuvent être utilisés. Enfin, bien qu'il ne s'agisse pas *stricto sensu* d'un agent de la menace militaire, il peut être pertinent d'ajouter le cyanure aux protocoles de tests.

Principaux résultats par type de filière de traitement

La pré-chloration n'étant pas une technique habituelle de traitement sur le terrain, l'efficacité de concentrations importantes de chlore (notion de C.t: concentration et temps de contact) sur les agents de la menace ne sera pas décrite. Les lecteurs pourront trouver de nombreux résultats expérimentaux, principalement contre des agents microbiologiques et les toxines, dans la littérature scientifique [8,9]. À l'inverse, peu de résultats contre des agents chimiques sont accessibles en littérature ouverte.

L'efficacité sur les agents de la menace des systèmes de bouilleurs à basse pression a été peu documentée également, même si la nature du procédé laisse peu de doute sur les agents biologiques et les sels non volatils. Une publication nord-américaine de 1963 concernant une installation de distillation/compression [6] rapporte certains résultats (tableau II). On notera que la distillation/compression seule est insuffisante pour assurer la potabilisation de beaucoup de toxiques organophosphorés. Cette publication rapporte également les résultats d'efficacité d'un traitement de l'eau par charbon actif ou résine échangeuse d'ions, le charbon actif étant efficace contre les neurotoxiques organophosphorés.

Concernant l'ultrafiltration, l'OMS décrit de nombreux dispositifs à même d'atteindre le niveau le plus élevé d'épuration microbiologique, à savoir 4 log de réduction pour les bactéries, 5 log pour les virus et 4 log pour les protozoaires [10]. Les auteurs ont également testé récemment un matériel d'ultrafiltration confirmant les excellentes performances pour l'épuration microbiologique (et la turbidité).

Sans surprise cependant, en raison de la technologie utilisée, aucun abattement n'est attendu pour les ions et/ou les petites molécules chimiques [11].

Substance	% d'élimination
T-2	100
Microcystine	100
Ricine	100
Saxitoxine	100
GB	> 99
VX	> 99
BZ	> 99
Iode 131	> 95
Strontium 85	> 99
Césium 134	> 98

Tableau III - Résumé des performances d'élimination d'agents de la menace NRBCe par osmose inverse [5].

Concernant l'osmose inverse enfin, dont les performances d'efficacité sont globalement parmi les plus élevées, le document américain TBMed577 rapporte les résultats réunis dans le tableau (tableau III). En cohérence avec ces résultats, les auteurs de cet article ont mesuré un abattement de 98,6 % en passage simple sur membrane d'osmose inverse, et de 99,9 % en passage double (l'eau repasse une seconde fois dans les membranes), pour les similis de moutarde au soufre et d'organophosphorés au moyen d'une installation de production d'EDCH mobile projetable [12].

Des solutions opérationnelles

Les résultats présentés ici, bien que partiels, suggèrent que l'élimination des agents biologiques de la menace (hors toxines) dans les EDCH est un enjeu plus limité : la chloration et les procédés membranaires sont très majoritairement efficaces pour ce type d'agents, y compris l'ultrafiltration. Pour les agents chimiques (dont les toxines), l'ultrafiltration n'est pas efficace, le charbon actif peut présenter une efficacité relative, la compression/distillation également, mais les meilleures performances sont obtenues avec l'osmose inverse. Pour les radionucléides enfin, en raison de leur caractère souvent ionisé, parmi les filières présentées ci-avant, seule l'osmose inverse est efficace : l'échange d'ions s'est également avéré efficace à la suite d'accidents technologiques impliquant des radionucléides, mais il ne s'agit pas d'une filière classique de traitement des EDCH sur le terrain. Notons enfin que l'efficacité des procédés de pré-traitement seuls (filtration, coagulation) est peu décrite pour les agents de la menace.

[1] Arrêté du 30/12/22 modifiant l'arrêté du 11/01/07 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du Code de la Santé publique.

[2] Nato Standard AMedP-4.9 (STANAG 2136), *Requirements for water quality during operations*, 2022, ed. B(v1).

[3] J.A. Brame, V.F. Medina, I. Smith, L. Procell, Composition of CBRN decontamination effluent and development of surrogate mixtures for testing effluent treatment technologies, *Report ERDC/EL SR-16-2*, 2016.

[4] B. Singh *et al.*, Active carbon for removal of toxic chemicals from contaminated water, *Carbon*, 1996, 34(3), p. 327-330.

[5] Headquarters, Departments of the army, navy and air force, Sanitary control and surveillance of field water supplies, *Techn. Bul. Med.*, 2010, 577.

[6] Department of the army, US Army mobility command, Removal of chemical warfare agents from water by vapor compression distillation, *Research Report*, 1963, 1749.

[7] World health organization, WHO international scheme to evaluate household water treatment technologies. Harmonized testing protocol: technology non-specific, 2018, v2.1.

[8] W. Burrows, S. Renner, Biological warfare agents as threats to potable water, *Env. health persp.*, 1999, 107(12), p. 14-21.

[9] M. Boni, P. Orlandini, A. Karom, O. Koehle, G. Bornert, Contamination intentionnelle des eaux par des toxines, *Médecine et Armées*, 2010, 38(3), p. 221-228.

[10] www.who.int/tools/international-scheme-to-evaluate-household-water-treatment-technologies/products-evaluated (consulté le 8/02/24).

[11] P. Couvreur, P. Orlandini, L. Stybel, J.-U. Mullot, Performance test of the mobile filtration device ORISA, communication affichée à l'occasion du 3^e symposium « Mobile Water Supply on Operations », 2023.

[12] S. Lefèvre, Maîtrise des risques chimiques, nucléaires et radiologiques lors de production d'eaux destinées à la consommation humaine à bord des bâtiments de la marine nationale : essais de qualification du nouveau système de production mobile, *Mémoire M2 « Sciences et technologies, santé publique et sciences sociales, risques sanitaires RBCE*, 2022.

Stéphane LEFEVRE^{1*}, vétérinaire en chef,
Jean-Ulrich MULLOT², pharmacien en chef,
et **Mickaël BONI**³, vétérinaire en chef.

¹ Direction centrale du service de santé des armées, Paris.

² Direction centrale du service de santé des armées, Paris.

³ Institut de recherche biomédicale des armées, Brétigny-sur-Orge.

*stephane1.lefevre@intradef.gouv.fr



surveillances de l'eau

Gestion

Le groupe CONSTOX, unité en charge des constatations judiciaires NRBCe

La mission de la criminalistique NRBCe au titre de la Police nationale relève de l'unité CONSTOX du Service national de police scientifique (SNPS). Créée en 2011, il s'agit d'une unité d'intervention de niveau 3 de la Police nationale, échelon d'intervention NRBCe spécialisé. Elle est chargée d'effectuer des constatations judiciaires ou des perquisitions en milieu contaminé par des agents nucléaires, radiologiques, biologiques et chimiques. Le groupe est composé de personnels scientifiques du SNPS et des services territoriaux de police scientifique, d'officiers de police judiciaire de la Direction nationale de la police judiciaire (DNPJ) et de la Préfecture de police de Paris répartis sur l'ensemble du territoire national. Ces agents, rompus aux constatations sur des scènes d'attentats et de crimes majeurs, sont formés puis habilités par le SNPS dont le siège, installé à Écully (département du Rhône), abrite les équipements et l'équipe en charge du pilotage et du maintien en condition opérationnelle de l'unité. Elle est une composante du Détachement Central Interministériel d'Intervention Technique (DCI-IT), structure qui regroupe des experts et développe son expertise dans la prévention des actes de terrorisme de nature NRBCe et assure, en situation de crise, le traitement sur tout engin ou situation susceptible de présenter une menace.

Les équipements de protection individuelle

L'unité CONSTOX (pour Constatation en milieu toxique) dispose d'équipements de protection individuelle lui permettant de réaliser ses missions quel que soit le contaminant. Ses agents sont formés au port du masque à cartouche large spectre avec des tenues filtrantes (type 4) et tenues étanches aux liquides (type 3), ainsi qu'au port d'appareils respiratoires isolants pour les tenues étanches aux liquides et au gaz (scaphandres de type 1) ou les tenues de type 3.

Les missions

L'unité CONSTOX construit ses procédures en étroite collaboration avec les unités spécialisées partenaires et, notamment, celles des Services départementaux d'incendie et de secours (SDIS), sur lesquels elle s'appuie pour ses interventions. Elle se concentre ainsi sur son cœur de métier, à savoir la recherche, le prélèvement et l'analyse des traces et indices lors de constatations judiciaires sur des scènes accidentelles ou criminelles, des scènes d'attentat, des perquisitions dans des lieux où des produits toxiques peuvent être détenus ou fabriqués. Outre le rôle de conseil à l'échelon local, les référents territoriaux remplissent à l'événement le rôle de précurseurs en préparant l'intervention de l'unité, notamment auprès du Commandant des opérations de secours (COS) et du Commandant des opérations de police et de gendarmerie (COPG). Les référents territoriaux sont équipés à titre individuel d'une tenue filtrante (type 4) avec masque à cartouche filtrante large spectre. Ils peuvent donc effectuer une entrée sur zone,



Unité CONSTOX. © SNPS.

si cette tenue le permet et après validation du COS et du chef de dispositif CONSTOX, pour effectuer une première évaluation de la scène. Ils peuvent le cas échéant, en fonction du contaminant et toujours avec l'autorisation du chef de dispositif CONSTOX, se faire prêter une tenue adaptée par une force spécialisée.

La méthodologie d'intervention

Dès l'arrivée de l'échelon central sur zone, les différentes phases de l'intervention de l'unité CONSTOX peuvent débuter. Pour éviter tout transfert de contamination, les agents CONSTOX sont formés sur le principe de « mains propres/mains sales »⁽¹⁾. L'entrée en zone contaminée de l'unité n'interviendra que si la levée de doute pyrotechnique a été réalisée.

Les équipes successives entrant en zone seront en contact radio permanent avec le poste de commandement CONSTOX. • La **reconnaissance**, réalisée par un binôme, est la première phase de la méthodologie d'intervention. Elle ne doit durer que le temps nécessaire à l'évaluation globale de la situation. La fixation de la scène sera assurée par des vidéos et des prises de vue qui peuvent être faites par un drone, une caméra 360° qui permet de réaliser une visite virtuelle et des appareils photographiques et Go Pro en caisson étanche. À l'issue et au vu des informations récupérées auprès des différentes unités entrées en zone, il est décidé précisément de la stratégie d'intervention.

• En fonction de la configuration des lieux, si elle est jugée nécessaire, la **sectorisation** de la scène est effectuée par un ou plusieurs binômes. Chaque secteur sera identifié selon un numéro d'ordre identique à ceux utilisés dans le cadre des attentats conventionnels.

• Selon l'étendue de la zone à traiter et du nombre de secteurs, la **recherche et matérialisation** des traces et indices sont effectuées par un ou plusieurs binômes. Elle consiste à repérer et marquer de la manière la plus visible les différents éléments intéressant l'enquête qui devront faire l'objet, soit d'une recherche de traces sur place, soit d'un prélèvement.

Leur nombre devra tenir compte des difficultés d'analyse des prélèvements contaminés.

• La **phase de prélèvement et de conditionnement** est assurée par une équipe de quatre agents *a minima* par secteur avec, pour chacun, un rôle défini (OPJ, logisticien, relais/photographe, « mains sales »). Les prélèvements seront référencés et conditionnés en double enveloppe en zone d'exclusion (figure 1).



Figure 1 - Prise de vue d'un prélèvement par écouvillon. © CONSTOX.

• L'atelier sortie de matériels sensibles est positionné à proximité immédiate du sas inter-services⁽²⁾. Est considéré comme matériel sensible tout ce qui est important pour l'enquête (scellés, carte mémoire d'appareil photographique, etc.) ou rare et qui peut être réengagé sur un autre site contaminé. Une décontamination d'un matériel ou de la deuxième enveloppe du conditionnement d'un prélèvement est réalisée par une unité partenaire (SDIS...) en amont de cet atelier. Une équipe de trois agents CONSTOX *a minima* est nécessaire pour le bon fonctionnement de l'atelier. Les prélèvements en double enveloppe et les matériels sont placés sous emballage à l'aide d'une gaine plastique adaptée et d'une thermoscelleuse pour assurer l'étanchéité. Cet atelier, géré par l'unité CONSTOX, est mis à disposition des autres unités spécialisées qui en expriment le besoin.

Investigations particulières au Point de Regroupement des Effets Personnels (PREP)

Les effets personnels des victimes et des impliqués sont stockés dans des sacs au PREP, respectivement au Point de Regroupement des Victimes (PRV) et au Point de Regroupement des Impliqués (PRI). Ils disposent de la même identification que l'individu concerné, de manière à pouvoir les rapprocher lors de la poursuite des investigations judiciaires et/ou celles relevant de l'identification. L'unité CONSTOX intervient, selon les nécessités de l'enquête, par équipes successives de quatre agents, selon le schéma utilisé lors de la phase de prélèvement et de conditionnement.

Gestion des victimes décédées

Dans un premier temps, les personnes décédées en zone d'exclusion (décédés primaires) sont laissées à l'endroit de leur découverte afin de procéder à leur localisation et de préserver les traces et indices.

Dans un second temps, les corps sont regroupés au sein du Point de Regroupement des Décédés (PRD) en zone contrôlée pour poursuivre les investigations judiciaires et/ou celles relevant de l'identification.

Les victimes décédées après avoir été prises en charge par les secours (décédés secondaires) sont également regroupées au sein du PRD.

Identification des Victimes de Catastrophe (IVC)

En cas de persistance de la contamination des corps, les investigations *post-mortem* pour l'identification des victimes décédées sont menées sur site et les opérations sont supervisées par des agents CONSTOX formés à l'IVC.

L'équipe IVC est composée d'une équipe *ante-mortem* et d'une équipe *post-mortem*. L'équipe *ante-mortem* (positionnée hors du site de l'événement) procède aux entretiens avec les familles au Centre d'accueil des familles (CAF) et est chargée de récupérer des données du vivant de la victime (dossier médical, tatouages, etc.). L'équipe *post-mortem* est chargée des opérations de relevage des corps en zone d'exclusion et des chaînes d'examen de corps, corps référencés et placés sous X (sans mention nominative), conformément au protocole Interpol, positionnées en zone contrôlée, à proximité du PRD (figure 2).



Figure 2 - Chaîne d'examen de corps. © CONSTOX.

Une équipe de réconciliation est chargée de procéder aux rapprochements des données *ante-mortem* et *post-mortem* et de proposer des dossiers à la commission d'identification. La commission d'identification, présidée par un magistrat, est seule habilitée à prononcer de façon formelle les identifications.

Autonome dans ses missions de constatations judiciaires et d'identification de victimes de catastrophes réalisées en zone d'exclusion et contrôlée, l'unité CONSTOX s'appuie sur ses partenaires pour effectuer la détection, les prélèvements et l'analyse des produits toxiques dont elle n'a pas la charge. Elle s'inscrit pleinement dans la démarche inter-services et participe, en tant qu'unité nationale, aux exercices et entraînements interministériels zonaux des différentes zones de défense.

(1) Principe mains propres/mains sales : ce principe, où seul le « mains sales » est au contact direct du contaminant, permet d'éviter le transfert de contamination lors du conditionnement des prélèvements et des échanges de matériels.

(2) Sas inter-services : point unique pour les entrées et sorties de l'ensemble des intervenants d'une zone contaminée à une zone « propre ». L'objectif est d'éviter le transfert de contamination entre les différentes zones.

Groupe CONSTOX, Section des unités nationales opérationnelles, Bureau de la scène d'infraction et de l'assistance opérationnelle, sous-direction de la criminalistique, Service national de Police scientifique, Écully.

surveillances de l'eau

Retours d'expérience

Les eaux usées protègent la Flotte

Résumé À la suite de l'épidémie observée en 2020 sur le porte-avions Charles de Gaulle, la Marine nationale a décidé de mettre en place une surveillance du SARS-CoV-2 basée sur les eaux usées et développée avec le soutien du consortium de santé publique Obépine (Observatoire épidémiologique dans les eaux usées). Au printemps 2021, nous avons validé le laboratoire et démontré l'efficacité de la mise en œuvre d'un vaccin obligatoire contre l'introduction des variants alpha et bêta du SARS-CoV-2. La deuxième campagne a mis en évidence la capacité de l'outil de surveillance à localiser à bord du navire les marins asymptomatiques infectés, validant ainsi l'objectif de l'enquête épidémiologique. La troisième campagne, au printemps 2022 dans un contexte de circulation du variant Omicron, a été moins concluante, du fait de l'échappement du variant à la vaccination et, potentiellement, d'une moindre excrétion intestinale. Les évolutions futures de ce protocole d'enquête pourraient être une enquête en quasi-temps réel sur la santé des membres d'équipage vis-à-vis d'agents pathogènes excrétés dans les selles, avec une localisation des membres d'équipage malades.

Mots-clés **Épidémiologie par les eaux usées, qPCR, SARS-CoV-2, alerte précoce.**

Abstract **Waste water protects the Naval Fleet**

Following the outbreak observed in 2020 in its aircraft carrier, the French Navy has decided to implement a wastewater-based SARS-CoV-2 surveillance, developed with the support of the French public health Obépine consortium into the aircraft carrier. In the spring 2021, we validated the lab and demonstrated the efficiency of a mandatory vaccine implementation against SARS-CoV-2 alpha and beta variants introduction. The second campaign highlighted the capacity of the monitoring tool to localize in the ship infected asymptomatic sailors, validating the objective of the epidemiological survey. The third campaign, in Spring 2022 in a context of Omicron variant circulation, was less conclusive, due to the escape of the variant from vaccination, and potentially its evolution of infected tissues. Future outcomes of this survey protocol may be an almost real-time survey of crew members' health when pathogens are excreted in the feces, with some insights on sick crewmember localization.

Keywords **Waste water based epidemiology, qPCR, SARS-CoV-2, early warning.**

RetEx sur la surveillance épidémiologique COVID à bord du porte-Avions Charles de Gaulle

En avril 2020, une épidémie de COVID a flambé parmi l'équipage du porte-avions nucléaire (PAN) Charles de Gaulle, ce qui a nécessité un retour du navire à son port d'attache, Toulon, interrompant sa mission [1]. La Marine nationale a alors cherché un système pour éviter la répétition d'un tel épisode. Le réseau Obépine (voir page 34), dont l'Institut de recherche biomédicale des armées (IRBA) fait partie, avait dès mars 2020 mis en place un système de détection du virus SARS-CoV2 dans les eaux au niveau des stations de traitement des eaux usées (STEU) [2]. Les premières mesures avaient démontré que l'augmentation de la charge virale dans les eaux usées était corrélée à une augmentation de cas dans les populations desservies par les STEU surveillées, voire précédait l'apparition de signes cliniques [3].

Sollicité par la Marine Nationale, l'IRBA a proposé de reproduire ce système de surveillance, en l'adaptant aux spécificités d'un navire de guerre.

Le challenge à relever était important : plusieurs paramètres diffèrent entre les eaux usées analysées par le réseau Obépine et les « eaux noires » d'un navire de guerre. En premier lieu, il n'y a pas de mélange, sauf avaries ou pannes, entre eaux grises (douches, vaisselle, lavage) et celles issues des WC à bord (eaux noires). Par ailleurs, les WC fonctionnent avec une aspiration par dépression, et donc une chasse d'eau réduite au minimum (comparable aux WC des TGV). Les eaux noires sont donc bien plus concentrées. Le prélèvement est plus

complexe également, les caisses de collecte étant en dépression, et vidangées plus ou moins régulièrement, sur automatisme, dès atteinte du niveau haut.

Il a donc été développé en quelques semaines un protocole permettant la détection de virus dans les eaux noires. Ce protocole permettait la détection simultanée de deux gènes du virus : le gène E et le gène RdRp. En parallèle, il a été mis en place un protocole de prélèvement dans les caisses de collecte. Navire de guerre, le PAN est découpé en « tranches » et chaque tranche héberge une ou plusieurs caisses de collecte, selon la population présente dans la tranche considérée. Le PAN compte 25 caisses de collecte, dont 22 accessibles à la mer. Pour réaliser les mesures, il a été mis en place *ex nihilo* un laboratoire de biologie moléculaire dédié (figure 1), autonome par rapport au laboratoire de biologie médicale du bord, en mesure de réaliser la totalité du traitement et de l'analyse de l'échantillon. Afin d'optimiser l'utilisation de consommables et de réactifs, tout en assurant la meilleure surveillance épidémiologique, un plan d'échantillonnage a été validé, visant à équilibrer les différentes mesures pour qu'une mesure corresponde à un nombre comparable de WC alimentant les caisses prélevées. Ainsi, une dizaine de pools devait être analysés à partir de la vingtaine de caisses prélevées quotidiennement.

Dans un premier temps, le bord a fait réaliser des mesures sur toutes les caisses prélevées, avant de passer petit à petit au plan de prélèvement proposé, puis d'espacer les prélèvements, au vu de la charge de travail et de la consommation importante de réactifs. Le bord est ainsi progressivement

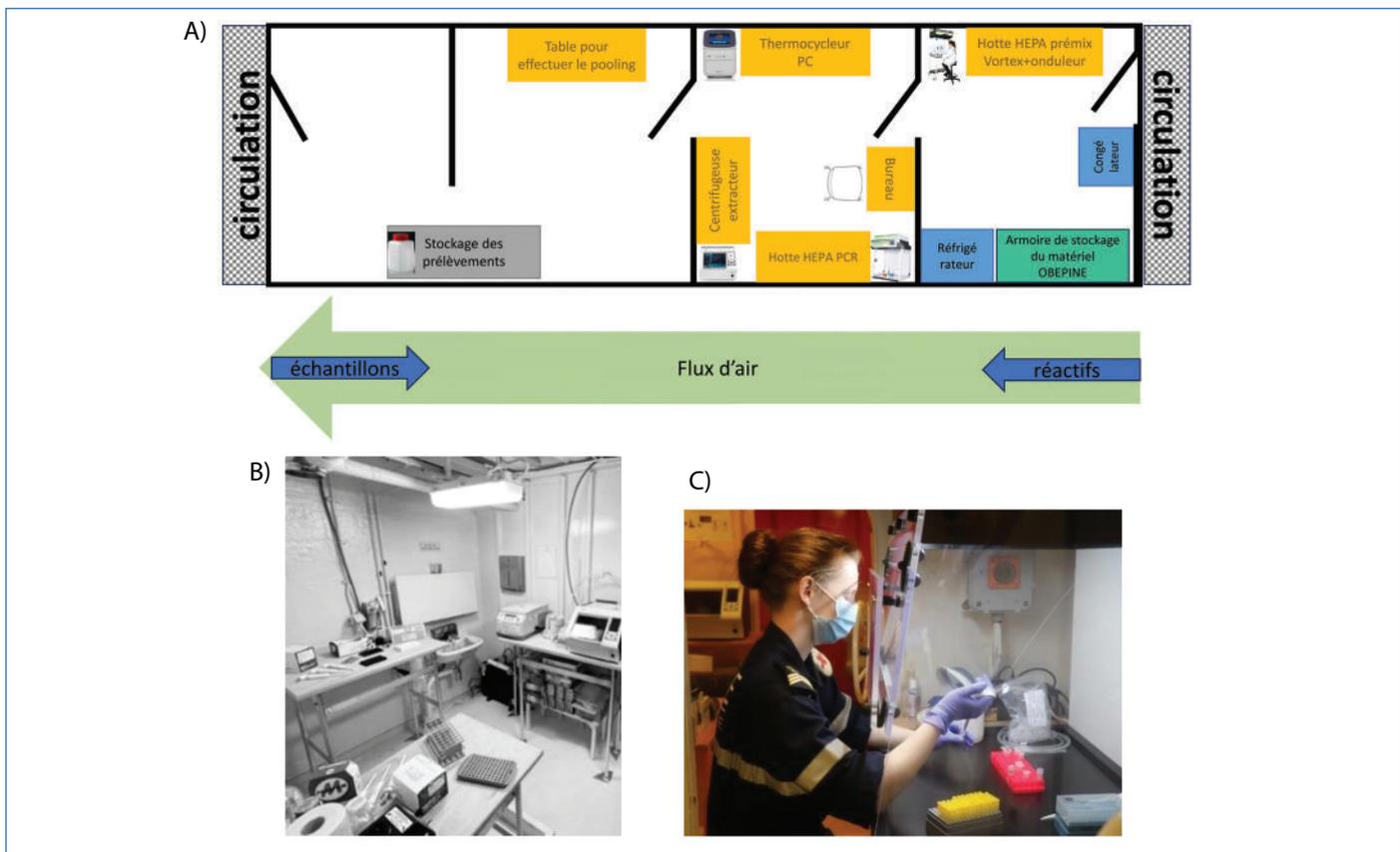


Figure 1 - A) Plan d'organisation du laboratoire Obépine. Le flux d'air va de la zone blanche (où se trouvent la hotte de préparation des mix PCR et le stockage des réactifs) vers la zone jaune (extraction et amplification) et la zone orange (aliquotage et pool des échantillons primaires). B) et C) À bord du porte-avions Charles de Gaulle. © Obépine.

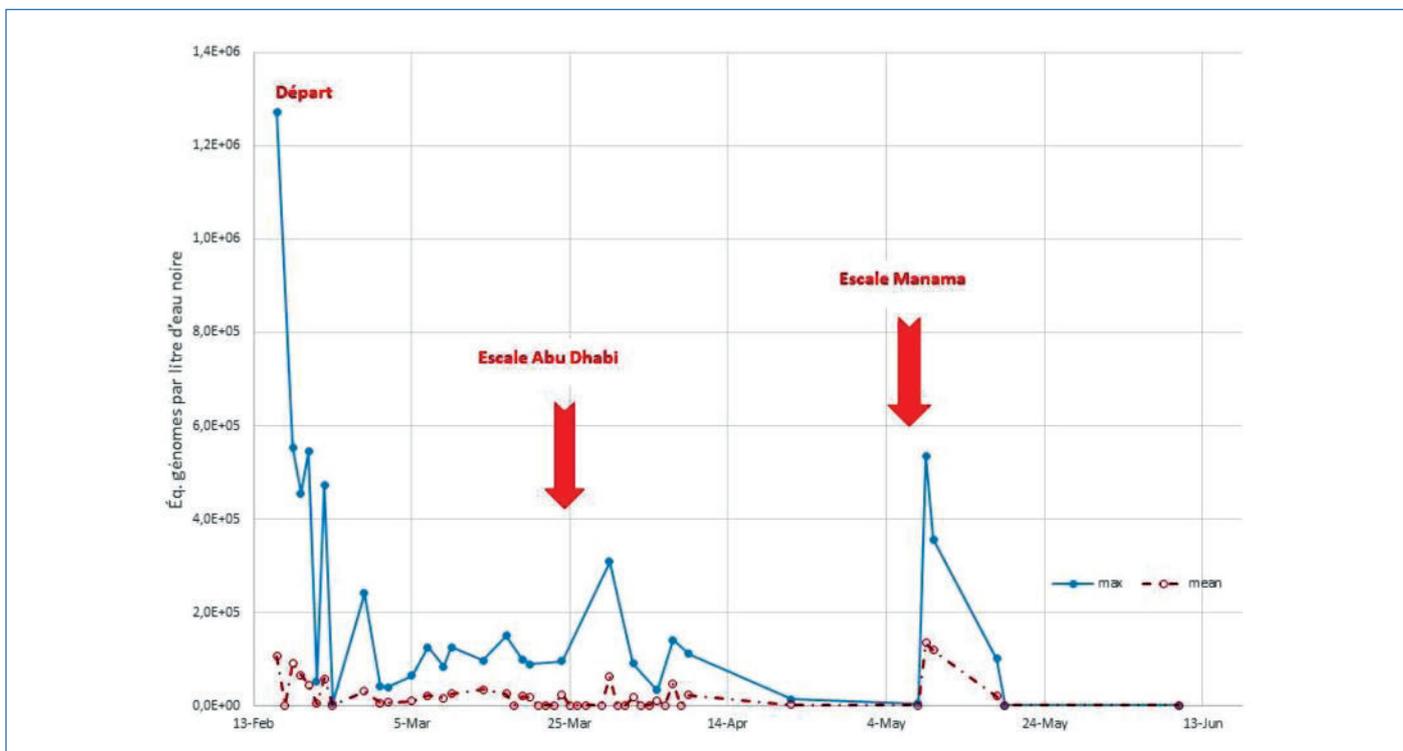


Figure 2 - Valeurs maximales et moyennes quotidiennes des concentrations d'équivalents génome RdRP dans les caisses d'eaux noires [7].

passé de l'analyse quotidienne des 20 caisses à une analyse de 10, puis 7 caisses.

Le rythme était de 5 caisses/jour en escale.

Le système de surveillance a été exploité au cours de trois missions, au premier et dernier trimestres 2021, puis au premier trimestre 2022.

Première mission : février à avril 2021

L'excrétion du virus dans les fèces, surveillée par la quantification quotidienne dans les eaux noires des séquences cibles des gènes E (enveloppe) et RdRP (ARN polymérase ARN-dépendante), a été utilisée comme indicateur de la présence du virus. Au cours de la mission (figure 2), des variations

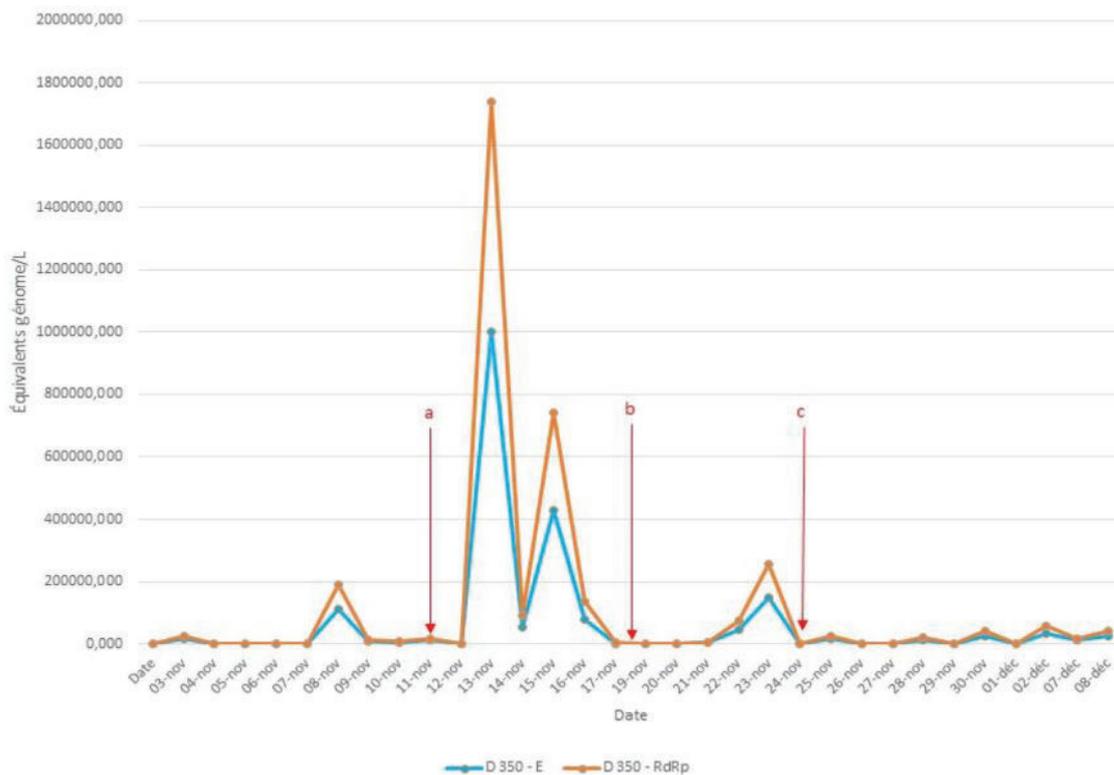


Figure 3 - Suivi de la concentration en équivalents génome/L des gènes RdRP et E. L'élévation de la concentration dans les eaux usées précède l'identification des cas cliniques, et ce d'autant plus que les cas sont nombreux. 11 novembre 2021 : 1 cas positif ; 18 novembre 2021 : 4 cas positifs ; 24 novembre 2021 : 1 cas positif [7].

de concentration du virus ont été observées, avec une décroissance pendant les quatre premières semaines [4], puis une stabilisation à un niveau comparable entre les différents pools, ce qui représenterait une sorte de bruit de fond entre 10 et 100 éq. génome/mL d'eaux noires, ce qui est relativement faible rapporté à l'excrétion par un patient (10^2 à 10^8 éq. génome/g de selles). Par contre, après chaque escale, les concentrations augmentaient puis diminuaient régulièrement. Cette remontée des concentrations de virus a été attribuée à l'arrivée de personnels récemment vaccinés et potentiellement excréteurs de virus. En quelques jours, les concentrations retrouvaient les valeurs de base d'avant escale. Chaque épisode de détection du virus dans les eaux usées était donc transitoire, ce qui suggère un contrôle efficace de la circulation du virus (vaccination obligatoire combinée à de nombreuses autres mesures barrières, telles que la limitation des contacts sociaux pendant les arrêts ou les escales et des interventions non pharmaceutiques renforcées : filtres de ventilation, bionettoyage des surfaces...).

Seconde mission : novembre et décembre 2021

Cette campagne a appareillé en pleine vague Delta. Considérant la capacité de ce variant à contaminer les sujets même vaccinés, l'observation d'une dynamique différente de la précédente mission était attendue. La vaccination n'a ainsi pas empêché, durant cette mission, la survenue de cas cliniques. Cette mission a permis de valider le versant prédictif du suivi de la charge virale dans les eaux noires, avec des pics observés un à deux jours avant et corrélés avec des sujets diagnostiqués positifs au SARS-CoV-2 (figure 3). La hauteur de pic était également corrélée au nombre de cas. Le challenge a consisté à localiser et identifier les marins contaminés car il est apparu

que l'usage des toilettes se réalisait plus dans l'espace de travail que dans l'espace de vie, ces espaces étant situés dans des zones différentes (tranches) du porte-avions.

Troisième mission : février à avril 2022

Cette mission s'est réalisée dans un contexte de variant Omicron, à forte transmissibilité et faible pouvoir pathogène. De plus, ce variant aurait une excrétion fécale réduite par rapport aux précédents variants [5]. Cela expliquerait une dynamique moins visible par analyse des eaux noires, comme indiqué en figure 4. De plus, ce variant étant susceptible de contaminer des sujets même vaccinés, la transmission était beaucoup plus difficile à maîtriser (plus de réinfection, moins d'effet protecteur du vaccin).

Un outil prometteur

La transposition à la Marine nationale de la recherche de virus par analyse des eaux usées de certaines villes de France réalisée par le réseau Obépine a été rendue possible grâce à la collaboration de l'IRBA, du Laboratoire d'analyses, de surveillance et d'expertise de la Marine (LASEM) de Toulon et de Eau de Paris. Cette transposition a permis au navire d'être totalement autonome en matière de surveillance environnementale avancée.

Les eaux usées constituent un échantillon biologique naturellement complexe susceptible de contenir des agents pathogènes excrétés dans les fèces, l'urine, le sang, les expectorations et les vomissures. Une analyse de ces eaux usées peut donc fournir des informations sur la présence et la fréquence des maladies dans une communauté [6]. Dans un contexte maritime militaire, cet outil innovant peut être réorienté vers

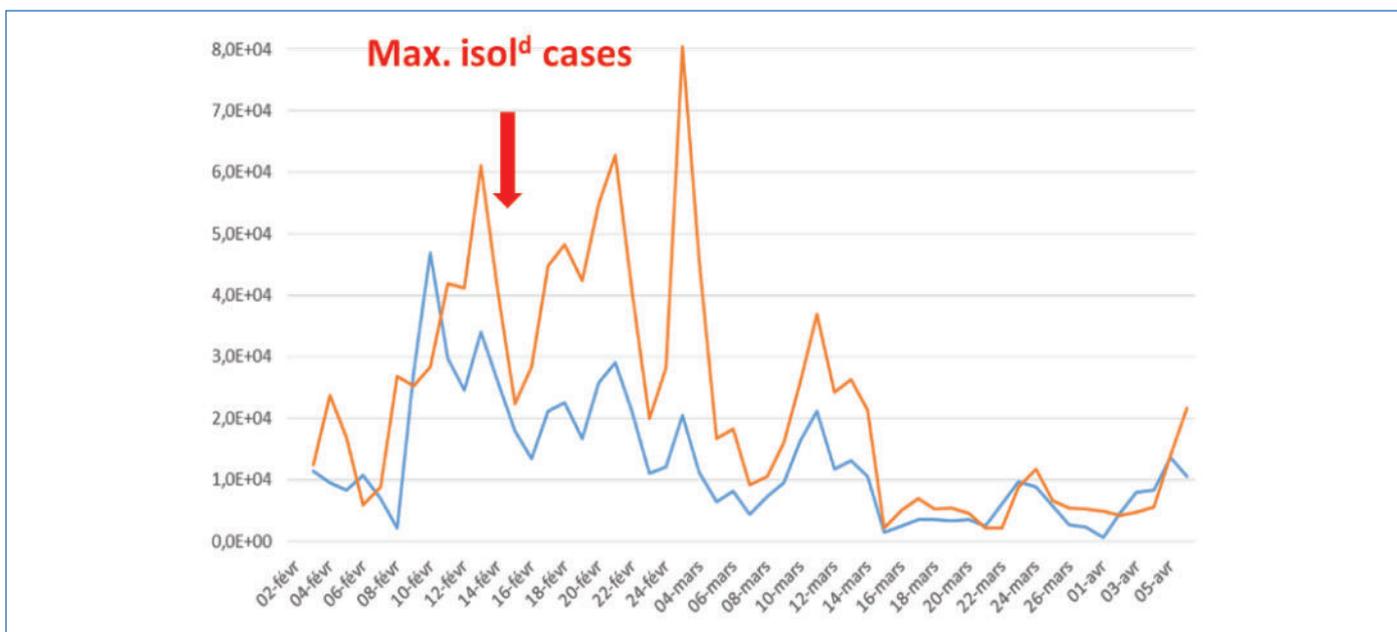


Figure 4 - Suivi de la concentration moyenne en équivalents génome/L des gènes RdRp et E. Les valeurs moyennes indiquant une circulation importante du virus bien identifiée dans les eaux usées et par les tests individuels [7].

Max. isol^d cases : date où le plus grand nombre de personnes a été en isolement. On ne voit plus la corrélation précédemment observée.

la recherche de tout autre agent pathogène dans les eaux noires voire, à terme, permettre d'assurer une surveillance sanitaire d'une emprise militaire, en mer ou à terre, en métropole ou sur une base outre-mer.

[6] M.K. Wolfe, Invited perspective: the promise of wastewater monitoring for infectious disease surveillance, *Env. Health Persp.*, **2022**, 130(5), p. 51302.

[7] M. Boni *et al.*, L'Institut de recherche biomédicale des armées (IRBA) et l'épidémiologie des eaux usées : intérêt pour les forces armées, *Bul. Ac. Nat. Méd.*, **2022**, 206(8), p. 1011-21.

[1] O. Bylicki, N. Paleiron, F. Janvier, An outbreak of Covid-19 on an aircraft carrier, *N. Engl. J. Med.*, **2021**, 384(10), p. 976.

[2] S. Wurtzer *et al.*, Evaluation of lockdown effect on SARS-CoV-2 dynamics through viral genome quantification in waste water, Greater Paris, France, 5 March to 23 April 2020, *Euro Surveill.*, **2020**, 25(50).

[3] G. Medema, L. Heijnen, G. Elsinga, R. Italiaander, A. Brouwer, Presence of SARS-Coronavirus-2 RNA in sewage and correlation with reported COVID-19 prevalence in the early stage of the epidemic in the Netherlands, *Env. Sc. & Tech. Lett.*, **2020**, 7(7), p. 511-516.

[4] Y. Zhang *et al.*, Prevalence and persistent shedding of fecal SARS-CoV-2 RNA in patients with COVID-19 infection: a systematic review and meta-analysis, *Clin. Transl. Gastroenterol.*, **2021**, 12(4), e00343.

[5] G. Marais *et al.*, Saliva swabs are the preferred sample for Omicron detection, *medRxiv*, **2021**.

Olivier GORGÉ^{1*}, pharmacien, chercheur, **Anne DEPEILLE**¹, technicienne, **Chloé LEMOIGNE**¹, technicienne, **Anne GASTELLIER**¹, technicienne, **Mickaël BONI**¹, vétérinaire en chef, et le **GIS Obépine**².

¹Institut de recherche biomédicale des armées, Brétigny-sur-Orge.

²Groupement d'intérêt scientifique Obépine (Sébastien Wurtzer, Olivier Rohr, Clémentine Vallet, Yvon Maday, Nicolas Boudaud, Soizic le Guyader, Vincent Maréchal, Laurent Moulin, Christophe Gantzer), Paris.

*olivier.gorge@intradef.gouv.fr

GECat 2024

Hendaye (Pays Basque)

14 au 17 mai 2024



Dates clés

- ✓ 22 décembre 2023 : Limite de soumission des résumés en ligne
- ✓ 09 février 2024 : Notification d'acceptation
- ✓ 03 mars 2024 : Tarif préférentiel d'inscription
- ✓ 14 avril 2024 : Limite d'inscription



Thème 1 : Catalyse et Génie Chimique
David EDOUARD (CP2M, Lyon)

Thème 2 : Activation de Petites Molécules
(H₂, N₂, CO_x, NO_x, CH₄)
Philippe SERP (LCC, Toulouse)

Thème 3 : Bioraffinerie et Economie Circulaire
Marion CARRIER (IMT, Mines Albi)

1^{ère} circulaire

<https://gecat2024.sciencesconf.org>

Surveillance environnementale pour l'éradication des poliovirus

Résumé La surveillance des poliovirus est l'un des piliers de l'Initiative mondiale d'éradication de la poliomyélite. Elle est indispensable pour établir l'aire de circulation des lignages de poliovirus et pour détecter toute introduction dans un territoire indemne afin de diriger les ripostes vaccinales. Puisque la plupart des personnes infectées excrètent des poliovirus durant plusieurs semaines sans symptômes sévères, la surveillance clinique n'est pas suffisante pour établir un système de surveillance sensible ; elle doit être complétée par une surveillance environnementale consistant à détecter la présence de poliovirus dans les eaux usées. La technique actuellement utilisée par le réseau mondial des laboratoires polio repose sur l'isolement des poliovirus en culture cellulaire après concentration des eaux usées. Cette méthode est très sensible, mais elle requiert une main d'œuvre relativement importante, ce qui conduit de nombreux États à ne pas la mettre en place. D'intenses recherches sont actuellement menées pour lui substituer des techniques basées sur le séquençage à haut-débit qui pourraient permettre d'en diminuer le coût.

Mots-clés Poliovirus, poliomyélite, éradication, surveillance environnementale, entérovirus.

Abstract Environmental surveillance of poliovirus circulation

The surveillance of poliovirus circulation is one of the pillars of the Global Polio Eradication Initiative. It is useful to establish the respective circulation area of distinct poliovirus lineages and to detect any importation in a poliovirus-free area. Since most people infected by a poliovirus shed infectious particles for weeks with no symptoms, the clinical surveillance is not sensitive and it must be supplemented by the environmental surveillance, which aims to detect polioviruses in wastewater. For this purpose, the current gold standard technique relies on the isolation of polioviruses in cell cultures after concentrating the wastewater samples. This technique is highly sensitive, but it requires a lot of manpower, which impairs its implementation in many countries. Intense research is currently ongoing to develop alternate molecular methods that would reduce the costs of the environmental surveillance of polioviruses by skipping the step of virus isolation in cell cultures.

Keywords Poliovirus, poliomyelitis, eradication, environmental surveillance, enterovirus.

Depuis 1988, l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) coordonne le programme d'éradication des poliovirus. Ces virus sont responsables de la poliomyélite, une maladie caractérisée par une perte de tonus musculaire irréversible qui peut toucher tous les muscles squelettiques (encadré 1). La poliomyélite est due à la destruction de neurones moteurs par des particules virales ayant atteint le système nerveux central. L'étendue des paralysies dépend du nombre de neurones détruits et de leur localisation. Les séquelles de la poliomyélite sont souvent lourdes et la maladie peut être mortelle lorsque les paralysies touchent les muscles ventilatoires.

Pourquoi surveiller les poliovirus ?

Le programme d'éradication repose sur deux piliers : la vaccination des enfants et la surveillance des poliovirus. La surveillance a plusieurs objectifs : dans les régions où la circulation des poliovirus est connue, elle permet d'évaluer l'efficacité des campagnes de vaccination ; dans les régions indemnes de poliovirus, elle permet de révéler l'introduction de poliovirus et de déclencher des ripostes vaccinales afin d'endiguer au plus vite le virus pour limiter son étendue géographique. La surveillance vise à confirmer ou infirmer la présence d'un poliovirus dans les échantillons analysés et d'en établir les liens épidémiologiques éventuels avec des poliovirus précédemment détectés par ailleurs. Cette analyse épidémiologique repose sur la comparaison de la séquence génétique des poliovirus nouvellement identifiés avec la base de données du réseau des laboratoires polio.

Encadré 1

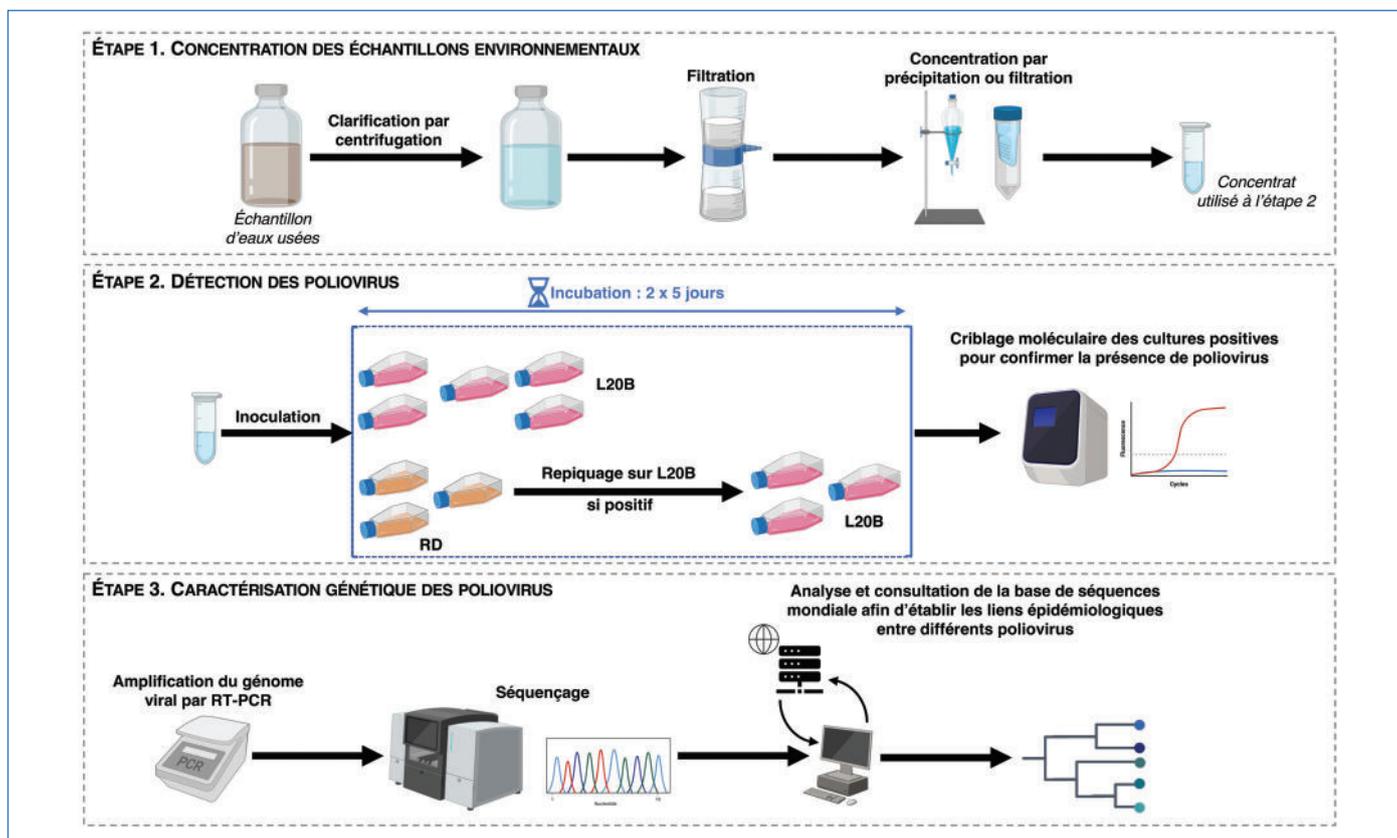
Poliomyélite & poliovirus

La poliomyélite est une maladie caractérisée par des paralysies irréversibles qui peuvent toucher tous les muscles squelettiques. La maladie est causée par les poliovirus, de petits virus à ARN non-enveloppés de la famille *Enterovirus*. Bien que toute personne non immunisée puisse avoir la poliomyélite, cette maladie s'observe essentiellement chez les enfants de moins de 5 ans. Cela est dû au caractère très contagieux du virus auquel il est rare de ne pas avoir été exposé dans la petite enfance.

Le site de réplication principal des poliovirus se situe dans les intestins. Dans la plupart des cas, l'infection par un poliovirus est asymptomatique ou paucisymptomatique. On estime que seule une personne infectée sur 200 à 1 000 développera des symptômes de poliomyélite. La maladie est due à la destruction de neurones moteurs par le virus. L'étendue des paralysies dépend du nombre de neurones détruits et de leur localisation. La poliomyélite peut être mortelle lorsque les paralysies touchent les muscles ventilatoires. Les particules virales produites par la personne infectée étant excrétées dans ses selles, la voie féco-orale constitue le mode de transmission principal des poliovirus. Même en l'absence de symptôme, l'excrétion de particules virales dure généralement plusieurs semaines.

Quel est l'intérêt de la surveillance environnementale ?

La surveillance des poliovirus est compliquée par la faible proportion de formes symptomatiques parmi les personnes infectées (moins de 1 %). En ne basant la surveillance que



Description du processus de détection et de caractérisation des poliovirus présents dans les échantillons environnementaux (créée avec Biorender).

sur la surveillance clinique, on manque ainsi plus de 99 % des infections. Puisque les personnes infectées (symptomatiques ou non) excrètent des poliovirus dans les selles durant plusieurs semaines, la circulation de poliovirus peut être révélée par l'analyse des eaux usées.

C'est pourquoi l'OMS encourage la mise en place d'une surveillance environnementale basée sur la recherche de poliovirus dans les eaux usées [1]. Celle-ci doit permettre de révéler la circulation de poliovirus dans une région donnée avant que les premiers cas de poliomyélite ne surviennent.

Quelles sont les techniques mises en œuvre ?

La surveillance environnementale ciblant les poliovirus se découpe en plusieurs étapes (voir figure). En premier lieu, les échantillons collectés doivent être concentrés par précipitation ou filtration. Les concentrats servent ensuite à inoculer des cellules permissives aux poliovirus. Il est recommandé d'inoculer deux lignées cellulaires en parallèle :

- les cellules RD (cellules humaines de rhabdomyosarcome) qui sont très sensibles aux poliovirus, mais sur lesquelles d'autres entérovirus peuvent également pousser ;
- les L20B, des cellules murines beaucoup plus spécifiques des poliovirus. Il s'agit de cellules transgéniques qui possèdent le gène du récepteur des poliovirus.

La présence de virus dans les cultures est révélée par une forte mortalité des cellules. Le repiquage des cultures de RD positives sur des cellules L20B permet d'isoler les poliovirus en éliminant la très grande majorité des autres entérovirus. L'identification de poliovirus dans les cultures positives se fait par une batterie de tests moléculaires [2]. Enfin, une partie du génome des poliovirus détectés doit être séquencée afin d'établir les liens épidémiologiques entre ceux-ci et des poliovirus isolés précédemment ou par ailleurs.

La surveillance environnementale est particulièrement utile pour détecter la circulation de poliovirus avant l'apparition des premiers cas cliniques (encadrés 2 et 3) mais elle ne se limite pas à détecter les poliovirus : elle vise aussi à établir la carte d'identité génétique de chaque isolat afin d'identifier les lignages détectés. Ces données génétiques sont précieuses à plusieurs titres. En effet, elles permettent d'établir une cartographie précise de l'aire de circulation d'un lignage particulier, d'identifier l'origine des souches en cas d'importation et d'évaluer l'efficacité des campagnes de vaccination sur la circulation des lignages de poliovirus détectés.

Vers une surveillance environnementale généralisée des poliovirus ?

Malgré son intérêt, peu de pays ont mis en place une surveillance environnementale de routine pour plusieurs raisons. En premier lieu, de nombreux pays (dont la France) estiment que la circulation de poliovirus sur leur territoire n'est pas un problème important car la couverture vaccinale de leur population est suffisante pour éviter les cas de poliomyélite. Cet optimisme est à modérer, car les taux moyens de couverture peuvent cacher de fortes disparités au sein de la population ; ainsi, le jeune homme atteint de poliomyélite à New York en 2022 (encadré 3) appartenait à une communauté religieuse orthodoxe qui refuse toute vaccination. L'analyse des données de vaccination anti polio a révélé que certains quartiers de New York affichaient des taux de vaccination supérieurs à 99 % tandis que moins de 60 % des personnes étaient vaccinées dans les quartiers voisins [3].

Le second frein au développement d'une surveillance environnementale de routine des poliovirus est son coût : le recours à l'étape d'isolement des poliovirus en cultures cellulaires nécessite une main d'œuvre importante et ne peut pas être

Encadré 2

Israël, 2013-2014

En avril 2013, la surveillance environnementale réalisée en Israël détectait une souche de poliovirus dans un échantillon d'eaux usées ; le séquençage génétique révélait sa proximité avec des souches circulant alors au Pakistan [10]. À partir de cette date, cette même souche était détectée de façon répétée dans de multiples stations de traitement du pays, signalant sa circulation active au sein de la population [11]. Les chaînes de transmission se sont établies malgré l'excellente couverture vaccinale dans le pays (supérieure à 95 %) car le vaccin polio injectable utilisé dans le pays protège très efficacement de la maladie mais il n'empêche pas l'infection. La circulation du virus n'a pu être interrompue qu'après revaccination des enfants avec le vaccin polio oral : en induisant une immunité au niveau de la muqueuse intestinale, ce dernier protège plus efficacement que le vaccin injectable contre l'infection (et pas seulement contre la maladie). Finalement, la souche importée aura circulé silencieusement durant 12 mois consécutifs dans le pays.

Encadré 3

Londres, New York et Israël, 2022

En février 2022, un poliovirus était détecté dans les eaux usées de Londres [12]. La détection répétée de la même souche dans plusieurs stations de Londres au cours des mois suivants alertait sur la mise en place de chaînes de transmission. En juin 2022, à New York, un jeune homme non vacciné présentait un tableau clinique évocateur de la poliomyélite [13]. Les investigations menées confirmaient son infection par un poliovirus. Une recherche rétrospective dans des eaux usées collectées à New York au cours des mois précédents révélait que la souche détectée chez le malade circulait depuis le mois de mai à New York [14]. De façon inattendue, les poliovirus trouvés à New York et à Londres étaient indubitablement liés génétiquement les uns aux autres. Ils étaient également liés à des poliovirus révélés à la même période par la surveillance environnementale en Israël [15]. Ainsi, la même souche de poliovirus a circulé durant plusieurs mois dans trois pays. Du fait de la bonne couverture vaccinale dans ces pays, cette circulation active n'a causé qu'un cas de poliomyélite.

automatisée. Le développement de techniques alternatives qui permettraient de détecter et de séquencer le génome de poliovirus directement à partir d'acides nucléiques extraits d'échantillons environnementaux est l'une des priorités du réseau polio de l'OMS [4]. Il se heurte à plusieurs difficultés techniques. D'abord, les poliovirus appartiennent à la grande famille des entérovirus, dont plus d'une centaine de types infectent l'Homme. La détection moléculaire spécifique des poliovirus doit donc cibler des régions génomiques dont la séquence diffère chez les poliovirus et chez les autres entérovirus. De telles régions existent, mais elles ne sont pas suffisamment conservées parmi les poliovirus pour ne pas avoir à recourir à des amorces dégénérées qui font chuter la sensibilité des tests de détection. Par ailleurs, les quantités d'ARN de poliovirus extraits des échantillons environnementaux sont généralement trop faibles pour permettre l'obtention de séquences de bonne qualité, d'autant plus qu'un même échantillon environnemental contient parfois plusieurs souches de poliovirus.

La surveillance environnementale est un outil indispensable pour le programme d'éradication. L'optimisation des protocoles d'extraction des acides nucléiques depuis les eaux usées combinée à l'amélioration des techniques de séquençage à haut débit pourrait permettre dans les prochaines années de faire chuter drastiquement la charge de travail et le coût associés à la surveillance environnementale. Dans ces conditions, de nombreux pays pourraient être enclins à mettre en place une surveillance de routine des poliovirus comme préconisée par l'OMS, d'autant plus que cette surveillance révèle en parallèle de nombreux autres entérovirus. Plusieurs études ont montré que la surveillance environnementale permettait de mettre en lumière des entérovirus non détectés par la surveillance clinique, car rarement associés à des symptômes sévères [5-7]. Le suivi de ce type de virus est pourtant d'intérêt car il existe plusieurs exemples d'entérovirus considérés comme bénins durant des décennies et soudainement devenus plus virulents [8,9]. L'intérêt de la surveillance environnementale des poliovirus dépasse donc le cadre du programme polio et constitue un outil précieux de santé publique.

- [1] World Health Organization, *Guidelines for environmental surveillance of poliovirus circulation*, 2003.
- [2] H. Sun *et al.*, Validation of a redesigned pan-poliovirus assay and real-time PCR platforms for the global poliovirus laboratory network, *PLoS One*, 2021, 16(8), e0255795.
- [3] B. Kasstan *et al.*, Poliovirus outbreak in New York State, August 2022: qualitative assessment of immediate public health responses and priorities for improving vaccine coverage, *Epidemiol. Infect.*, 2023, 151, e120.
- [4] A.G. Shaw *et al.*, Rapid and sensitive direct detection and identification of poliovirus from stool and environmental surveillance samples by use of nanopore sequencing, *J. Clin. Microbiol.*, 2020, 58(9), e00920-20.
- [5] M. Majumdar *et al.*, Environmental surveillance reveals complex enterovirus circulation patterns in human populations, *Open Forum Infect. Dis.*, 2018, 5(10), ofy250.
- [6] M. Bisseux *et al.*, Monitoring of enterovirus diversity in wastewater by ultra-deep sequencing: an effective complementary tool for clinical enterovirus surveillance, *Water Res.*, 2020, 169, 115246.
- [7] M. Bisseux *et al.*, Monitoring human enteric viruses in wastewater and relevance to infections encountered in the clinical setting: a one-year experiment in central France, 2014 to 2015, *Euro Surveill.*, 2018, 23(7,17), 00237.
- [8] T. Solomon *et al.*, Virology, epidemiology, pathogenesis, and control of enterovirus 71, *Lancet Infect. Dis.*, 2010, 10(11), p. 778-790.
- [9] C.C. Holm-Hansen, S.E. Midgley, T.K. Fischer, Global emergence of enterovirus D68: a systematic review, *Lancet Infect. Dis.*, 2016, 16(5), p. 64-75.
- [10] E. Anis *et al.*, Insidious reintroduction of wild poliovirus into Israel, *Euro Surveill.*, 2013, 18(38), 20586.
- [11] L.M. Shulman *et al.*, Genetic analysis and characterization of wild poliovirus type 1 during sustained transmission in a population with >95% vaccine coverage, Israel 2013, *Clin. Infect. Dis.*, 2015, 60(7), p. 1057-64.
- [12] D. Klapa *et al.*, Sustained detection of type 2 poliovirus in London sewage between February and July, 2022, by enhanced environmental surveillance, *Lancet*, 2022, 400(10362), p. 1531-38.
- [13] R. Link-Gelles *et al.*, 2022 U.S. poliovirus response team. public health response to a case of paralytic poliomyelitis in an unvaccinated person and detection of poliovirus in wastewater – New York, June-August 2022, *Morb. Mortal Wkly Rep.*, 2022, 71(33), p. 1065-68.
- [14] A.B. Ryerson *et al.*, 2022 U.S. poliovirus response team. wastewater testing and detection of poliovirus type 2 genetically linked to virus isolated from a paralytic polio case – New York, March 9-October 11, 2022, *Morb. Mortal Wkly Rep.*, 2022, 71(44), p. 1418-24.
- [15] N.S. Zuckerman *et al.*, Emergence of genetically linked vaccine-originated poliovirus type 2 in the absence of oral polio vaccine, Jerusalem, April to July 2022, *Euro Surveill.*, 2022, 27(37), 2200694.

Maël BESSAUD^{1,2*}, directeur³, Ambre TINARD^{1,2}, technicienne de recherche, et Marie-Line JOFFRET^{1,2}, directrice-adjointe³.

¹Institut Pasteur, Université de Paris Cité, CNRS, UMR 3569, Virus sensing and signaling Unit, Paris.

²Laboratoire associé au Centre national de référence entérovirus/paréchévirus, Paris.

³Centre collaborateur de l'OMS « Recherche sur l'épidémiologie et la macro-évolution des poliovirus et des entérovirus non-polio », Paris.

*mael.bessaud@pasteur.fr

Le devenir environnemental des émissions de radionucléides de la centrale nucléaire de Fukushima

Résumé D'importants dépôts de substances radioactifs se sont produits sur les territoires situés au Nord-Est du Japon à la suite de l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi en mars 2011. Ces dépôts dominés par le ^{137}Cs (demi-vie de 30 ans) sont drainés par plusieurs fleuves jusqu'à l'Océan Pacifique. En raison de l'impact combiné des typhons et des travaux de décontamination menés dans la zone, les niveaux de ^{137}Cs déposés par les crues le long de ces rivières ont baissé de 93 % entre 2011 et 2020. Les forêts, qui n'ont pas été décontaminées, constituent désormais le principal réservoir de ^{137}Cs dans les paysages de Fukushima.

Mots-clés Radionucléides, accident nucléaire, rivières, sédiments.

Abstract Environmental fate of radionuclide emissions from Fukushima Nuclear Power Plant

Significant deposits of radioactive substances occurred in the territories located in the northeast of Japan following the accident at the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant in March 2011. These deposits were dominated by ^{137}Cs (half-life: 30 years) and drained by several rivers to the Pacific Ocean. Due to the combined impact of typhoons and decontamination work carried out in the area, the levels of ^{137}Cs deposited by floods along these rivers fell by 93% between 2011 and 2020. Forests, which do not have not been decontaminated, now constitute the main reservoir of ^{137}Cs in the Fukushima area.

Keywords Radionuclides, nuclear accident, rivers, sediments.

Une décennie d'études de terrain dans les bassins versants côtiers de Fukushima (2011-2020)

Après le séisme du Tohoku et le tsunami qui a suivi, touchant le littoral du nord-est du Japon le 11 mars 2011, les systèmes de refroidissement de la centrale de Fukushima Dai-ichi ont été endommagés, ce qui a entraîné quelques jours plus tard des explosions d'hydrogène et des rejets de radionucléides dans l'environnement. On estime que 80 % des rejets atmosphériques radioactifs ont été transportés vers l'océan Pacifique, tandis que les 20 % restants ont conduit à des dépôts de radionucléides sur les sols japonais [1]. Des rejets liquides ont également eu lieu directement depuis le site de la centrale nucléaire vers l'océan Pacifique, mais ceux-ci ne seront pas abordés dans le présent article. Nous nous concentrons plutôt sur le devenir des radionucléides qui se sont déposés sur les sols, les principales substances d'intérêt étant les isotopes ^{134}Cs et ^{137}Cs (présentant des demi-vies de 2 et 30 ans, respectivement), bien que de nombreux autres radionucléides – dont la plupart ont une courte durée de vie (par exemple l'iode 131, avec une demi-vie de 8 jours) – aient été détectés peu de temps après l'accident et qu'ils aient décliné jusqu'à atteindre des valeurs négligeables dès les premiers mois qui ont suivi l'accident. Il convient de noter que d'autres radionucléides à durée de vie plus longue (avec des demi-vies supérieures à 1 000 ans) ont également été détectés dans l'environnement, notamment la plupart des isotopes du plutonium tels que ^{239}Pu et ^{240}Pu [2]. Le plutonium est supposé avoir été émis sous forme de microparticules [3] et des recherches supplémentaires sont en cours pour les isoler et les caractériser afin de mieux anticiper leur devenir dans l'environnement à l'avenir [4]. Comme ces isotopes à plus longue durée de vie ont été émis à des niveaux d'ultra-traces, le présent article se concentrera sur les rejets de radiocésium les plus abondants. Le principal panache de radiocésium (avec des niveaux initiaux de ^{137}Cs dépassant $100\,000\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$) qui s'est déposé sur la terre ferme a couvert une surface de

$3\,000\text{ km}^2$ [5]. Ce panache est drainé par plusieurs systèmes fluviaux côtiers vers l'océan Pacifique [6] et les transferts d'eau et de sédiments dans ces systèmes fluviaux sont très variables car ils sont principalement contrôlés par l'occurrence de fortes précipitations, générées notamment par les typhons qui ont fréquemment lieu dans la région entre juillet et octobre [5]. L'une des principales questions associées à ces transferts fluviaux est liée à leur impact sur les exportations de radiocésium vers l'océan Pacifique et leurs variations spatio-temporelles. Ces variations sont contrôlées à la fois par les variations pluviométriques et les actions humaines, notamment les opérations de décontamination qui ont débuté en 2013 et qui ont été achevées dans la plupart des zones cultivées et résidentielles situées dans le panache radioactif principal – à l'exception de la zone de retour difficile – en 2019 [7]. Dans cette dernière zone, ces travaux se sont achevés en 2023 [8].

Le présent article examine donc les variations temporelles des concentrations de radiocésium (en se concentrant sur le ^{137}Cs , car il s'agit de l'isotope à la durée de vie la plus longue trouvé en abondance dans la région) analysées dans les sédiments transportés par les fleuves côtiers qui drainent le principal panache radioactif entre 2011 et 2020. Ensuite, les changements dans les sources fournissant ce matériel contaminé aux systèmes fluviaux seront quantifiés et discutés à la lumière des actions humaines mises en œuvre dans le bassin versant. L'accent sera ensuite mis sur l'impact de la décontamination. Enfin, les principaux défis pour l'avenir de la recherche environnementale dans la région touchée par Fukushima seront discutés. Comme les ^{134}Cs et ^{137}Cs sont des émetteurs gamma, lorsqu'ils sont déposés en abondance, ils peuvent générer un débit de dose de rayonnement externe significatif pour la population. Leur redistribution dans le paysage par les processus d'érosion, les inondations et la sédimentation qui s'ensuit peut conduire à une redistribution spatiale du ^{137}Cs modifiant la distribution initiale des retombées, ce qui peut impacter son devenir ultérieur et son transfert à travers divers

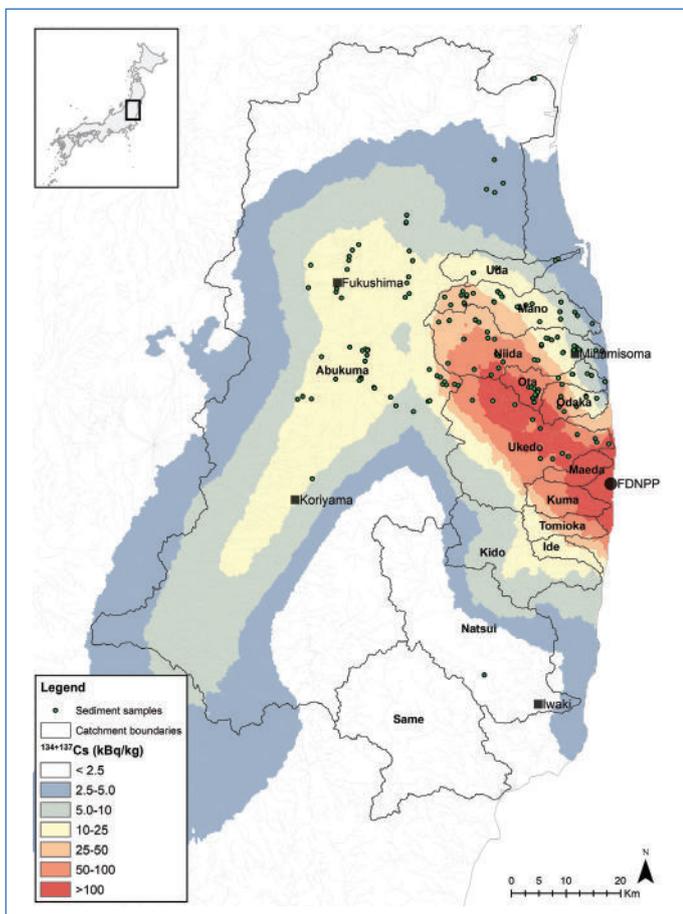


Figure 1 - Localisation des sites d'échantillonnage des sédiments dans les bassins versants des rivières drainant le principal panache de pollution radioactive dans la préfecture de Fukushima [17]. Le code couleur fait référence à la concentration initiale post-accidentelle de radiocésium dans le sol (en $\text{kBq}\cdot\text{kg}^{-1}$), des niveaux les plus bas (en bleu) aux niveaux les plus élevés (en rouge).

compartiments environnementaux (par exemple, le transfert du sol aux plantes).

Évolution de la contamination des sédiments fluviaux par les radionucléides

Les sédiments déposés lors de la dernière grande inondation survenue au cours des semaines ou des mois précédents ont été systématiquement prélevés aux mêmes sites dans le chenal des rivières, en se concentrant sur les systèmes fluviaux drainant le principal panache radioactif au nord de FDNPP (pour Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant), afin de quantifier les changements dans leur teneur en ^{137}Cs (figure 1). Pendant la période post-accidentelle immédiate (2011-2016), ces échantillons ont été collectés deux fois par an (après les crues de printemps, généralement en avril ou mai, et la saison des typhons, généralement à la fin du mois d'octobre ou début novembre). Ensuite, entre 2017 et 2020, ces dépôts n'ont plus été échantillonnés qu'une fois par an (après la saison des typhons).

Pendant toute la période de suivi (figure 2), les activités en ^{137}Cs mesurées dans les dépôts de sédiments fluviaux ont diminué de 93 %, passant d'une moyenne de $28\,516\ \text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ en novembre 2011 à une moyenne de $2\,115\ \text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ en novembre 2020. Cette valeur est beaucoup plus élevée que les activités pré-accidentelles (généralement inférieures à $30\ \text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$), car les sols du monde entier ont été contaminés par le ^{137}Cs , en raison des retombées associées aux essais

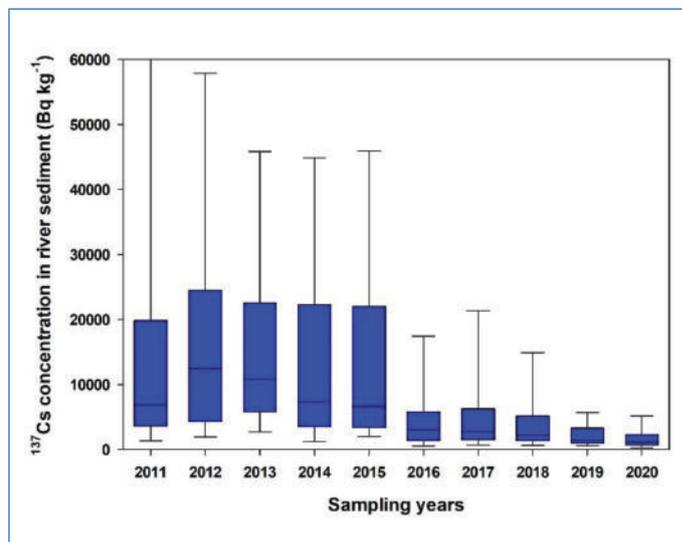


Figure 2 - Évolution des concentrations de ^{137}Cs (la médiane et les valeurs des percentiles 25/75 sont représentées par les bâtonnets, les barres d'erreur indiquent les valeurs minimales/maximales) mesurées dans les sédiments prélevés entre 2011 et 2020 dans les principales rivières drainant le panache de pollution radioactive de Fukushima [17].

atmosphériques des bombes nucléaires menés entre 1954 et 1980 [9]. Néanmoins, bien que ce bruit de fond radioactif pré-accidentel n'ait pas encore été atteint, les débits de dose externe de radioactivité associés à cette contamination radioactive persistante dans les sols et les sédiments avaient atteint des niveaux très faibles en 2020. Les débits de dose de rayonnement ambiant mesurés à proximité des dépôts de crue ont diminué, passant d'une moyenne de $3,3\ \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ en novembre 2011 à une moyenne de $0,5\ \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ en novembre 2018. Lors des campagnes suivantes, le radiomètre n'a plus détecté les radiations gamma émises par ces dépôts fluviaux par rapport au fond de rayonnement général et elles n'ont donc pas pu être mesurées lors des campagnes sur le terrain menées en 2019 et 2020.

Les niveaux de contamination radioactive analysés dans les sédiments sont très variables à travers l'espace, ce qui reflète l'hétérogénéité spatiale initiale du panache radioactif, les sédiments transitant par le réseau de petits fleuves côtiers (c'est-à-dire les fleuves Mano, Niida, Ota, Ukedo) étant caractérisés par des niveaux plus élevés en ^{137}Cs que ceux transportés par les fleuves continentaux (par exemple, le fleuve Abukuma). Ces niveaux contrastés de radioactivité s'expliquent dans une large mesure par l'hétérogénéité spatiale initiale du panache, les rivières côtières drainant des terrains plus contaminés présentant des niveaux de contamination plus élevés.

La plus forte diminution des activités en ^{137}Cs a été principalement observée après la survenue du typhon Etou en 2015, avec des valeurs passant de $20\,400\ \text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ à l'automne 2015 à $3\,400\ \text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ au printemps 2016. Bien que des typhons et des tempêtes tropicales aient affecté la région de Fukushima presque chaque année depuis 2011, le typhon Hagibis qui s'est produit en octobre 2019 a généré encore plus de précipitations (77-558 mm) que le typhon Etou en 2015 (41-458 mm). Cependant, Hagibis n'a pas généré une diminution aussi importante des activités ^{137}Cs dans les sédiments (de $4\,800\ \text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ à l'automne 2018 à $2\,200\ \text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ à l'automne 2019) que le typhon Etou. Cette différence s'explique principalement par le changement des sources de sédiments observé dans la région tout au long de la période [10].

Modifications des sources de sédiments

Les sédiments qui transitent par le réseau fluvial peuvent provenir de différentes sources dans le paysage, soit de la surface du sol (forêts, terres cultivées, jardins, etc.), soit de la subsurface (glissements de terrain, ravinements et berges, etc.). Il est donc essentiel d'identifier ces sources, ce qui peut être réalisé grâce au développement de techniques de traçage sédimentaire. Ces techniques reposent sur l'analyse de propriétés bio-physico-chimiques des sources potentielles et des sédiments cibles, la sélection du meilleur jeu de propriétés capables de discriminer ces sources, qui sont ensuite utilisées dans un modèle de mélange pour quantifier les contributions des sources potentielles aux sédiments [11].

La diminution forte et rapide des teneurs en ^{137}Cs en 2015 montrée sur la *figure 2* a été principalement contrôlée par des changements de sources fournissant ce matériau aux systèmes fluviaux au cours de la période post-accidentelle. Initialement après l'accident (c'est-à-dire entre 2012 et 2014), les principales sources fournissant des sédiments aux rivières Mano, Niida et Ota (voir leur emplacement sur la *figure 1*) ont été calculées comme étant les horizons profonds des sols ($45 \pm 26\%$), suivis par les terres cultivées ($38 \pm 19\%$) et les forêts ($17 \pm 10\%$) [12]. Des investigations similaires ont été menées sur les sédiments accumulés dans le réservoir du barrage de la rivière Mano à travers l'analyse de plusieurs carottes de sédiments, prélevées dans le lac entre novembre 2014 et avril 2015 [13]. Différentes contributions de sources de sédiments ont été obtenues, avec une dominance des sédiments provenant de terres cultivées ($48 \pm 7\%$) et des contributions plus faibles de matériel provenant de forêts ($27 \pm 6\%$) et des horizons profonds des sols ($25 \pm 4\%$).

Ces résultats montrent que, selon les matériaux analysés, les horizons profonds des sols (c'est-à-dire les matériaux provenant des glissements de terrain ou de l'effondrement des berges des rivières) et les terres cultivées sont les principales sources de sédiments, bien que ces sources couvrent des proportions mineures de la surface du paysage (généralement moins de 15 %) dans la région de Fukushima. En revanche, il a été démontré que les forêts, qui représentent la principale occupation des sols dans la région (plus de 75 % de la surface totale), ne contribuent qu'à hauteur de 17 à 27 % des sédiments au cours de cette phase post-accidentelle initiale. Cela explique probablement pourquoi les niveaux de ^{137}Cs ont fortement diminué dans les sédiments fluviaux malgré la présence d'importants réservoirs de contamination dans le paysage (typiquement, les forêts et les lacs des barrages accumulant les sédiments). Ces résultats sur l'origine des sédiments à travers le paysage ont des implications potentiellement importantes pour le transfert actuel et futur de la contamination radioactive par les rivières, étant donné que ces différents types d'occupations du sol ont été gérés de manière très différente après l'accident, généralement à des fins de décontamination.

Impact de la décontamination

Rapidement après l'accident, les autorités japonaises ont décidé de mener des travaux de décontamination pour permettre le retour de la population dans les municipalités situées au sein du principal panache de pollution radioactive. Différentes mesures ont été prises en fonction du niveau initial des retombées radioactives, l'ensemble le plus complet de

techniques d'assainissement ayant été mis en œuvre dans la zone dite de « décontamination spéciale », couvrant une surface de $1\,117\text{ km}^2$ et correspondant aux communes les plus contaminées qui ont été évacuées en 2011 [7]. Dans ces zones, la décontamination s'est concentrée dans les zones résidentielles et agricoles, où les routes, les toits et les gouttières ont été nettoyés et la couche de terre arable (5 cm supérieurs pour les sols contaminés par plus de $25\,000\text{ Bq.kg}^{-1}$ en ^{137}Cs) a été enlevée et remplacée par une couche de sol non contaminé, dont la source a été définie par les municipalités locales. Par exemple, dans le village d'Iitate, on a choisi d'extraire des sables granitiques ou des saprolites granitiques des carrières locales pour remplacer la couche de terre arable ainsi enlevée. Globalement, il a été démontré que ces vastes travaux d'assainissement ont permis de réduire les niveaux de ^{137}Cs d'environ 80 %. Néanmoins, dans l'ensemble de la région (comprenant à la fois les municipalités évacuées et non-évacuées après l'accident de 2011), ces opérations d'assainissement très coûteuses (représentant une dépense de 3 000 milliards de yens – soit environ 24 milliards d'euros – entre 2013 et 2019) ont entraîné la production d'une très grande quantité de déchets (une vingtaine de millions de m^3 de déchets de sol entre 2013 et 2019). Il a été décidé de stocker ces déchets dans des « installations de stockage provisoires » spécialement construites à cet effet à proximité de FDNPP, dans les villes d'Okuma et de Futaba, pour une période d'environ 30 ans.

Il est important de noter que les zones forestières n'ont pas été décontaminées, à l'exception de bandes de 20 mètres de large le long des routes et autour de la plupart des maisons et des bâtiments. De ce fait, les forêts constituent des sources potentielles pérennes de sédiments contaminés par les radionucléides pour les systèmes fluviaux de ces régions. Dix ans après l'accident, on a pu observer que le ^{137}Cs avait migré depuis la canopée et les parties aériennes des forêts de feuillus et de conifères, et que la majeure partie de ce radionucléide était désormais stockée dans la couche minérale supérieure des sols forestiers [15]. Par ailleurs, malgré les niveaux relativement faibles de radionucléides trouvés dans le bois des arbres, ils dépassent les niveaux autorisés dans les produits forestiers par la législation japonaise (c'est-à-dire un maximum de 40 Bq.kg^{-1} de ^{137}Cs dans le bois de chauffage), il ne sera donc probablement pas possible d'utiliser ce bois pendant plusieurs décennies dans la région [17]. La même situation s'applique à d'autres produits forestiers, y compris les champignons qui sont connus pour concentrer les radionucléides [8]. Une étude récente menée sur des produits alimentaires achetés en divers endroits du Japon a montré que les champignons étaient de loin les produits alimentaires les plus touchés en termes de contamination radioactive, plusieurs échantillons (en particulier ceux de « champignons séchés ») dépassant les limites réglementaires japonaises (100 Bq.kg^{-1} de ^{137}Cs). Il convient de noter que les règles fixant les limites réglementaires pour les radionucléides autorisés dans les aliments et les produits du bois ont évolué au fil du temps, ce qui peut générer une certaine confusion pour les populations locales.

En ce qui concerne la situation dans la zone dite « difficile au retour », qui couvre une superficie de 335 km^2 et comprend les municipalités situées dans la zone la plus contaminée à proximité immédiate de la centrale nucléaire de Fukushima, celle-ci a été partiellement décontaminée entre 2019 et 2023, en priorité au niveau de « bases de reconstruction et de

revitalisation spécifiques » [8], ce qui suscite des inquiétudes quant au devenir de la contamination radioactive résiduelle dans ces zones et à son transfert potentiel à travers les paysages et dans les cours d'eau. Cette situation soulève également des questions quant au type d'activités qui pourront redémarrer dans cette zone, étant donné que l'agriculture et l'exploitation forestière représentaient certains des principaux secteurs économiques de la région avant 2011. La contamination en ^{137}Cs des poissons d'eau douce prélevés dans les rivières drainant cette zone s'est également révélée être la plus élevée de la région, et généralement beaucoup plus élevée que dans les poissons capturés dans les eaux côtières au large de la préfecture de Fukushima [14].

Vers une meilleure gestion de la contamination radioactive

Les transferts de sédiments et de radiocésium associé dans les rivières drainant le principal panache radioactif de la préfecture de Fukushima vers l'océan Pacifique se sont révélés massifs pendant la phase post-accidentelle immédiate (2011-2014). Ensuite, à partir de 2015, l'occurrence conjointe, d'une part, de vastes travaux de décontamination consistant à enlever la couche de terre arable concentrant le ^{137}Cs et à la remplacer par de la terre non contaminée et, d'autre part, celle du typhon Eta entraînant d'importants processus d'érosion, y compris des glissements de terrain, a conduit à une très forte dilution des niveaux de contamination radioactive dans les sédiments transitant par les systèmes fluviaux de cette région. Globalement, entre 2011 et 2020, les niveaux de ^{137}Cs dans les sédiments fluviaux collectés à travers le principal panache radioactif ont diminué de 93 %.

Les travaux d'assainissement ayant exclusivement ciblé les zones résidentielles et les terres cultivées, la majeure partie de la contamination radioactive qui s'est déposée sur les forêts en 2011 subsiste dans ces zones, bien que la majorité du ^{137}Cs ait été transférée de la partie aérienne de la végétation vers les couches minérales supérieures des sols forestiers. Une partie de cette contamination peut à nouveau être transportée vers les parties aériennes des plantes par le biais de transferts racinaires et, plus important encore, les sols forestiers continueront à fournir un réservoir potentiellement pérenne de radionucléides aux réseaux fluviaux à long terme. La contamination des forêts empêchera probablement aussi l'utilisation des produits du bois et la production forestière au cours des prochaines décennies.

Bien que l'assainissement des zones résidentielles et cultivées ait permis de réduire les niveaux de ^{137}Cs d'environ 80 %, des questions subsistent quant au devenir des radionucléides résiduels trouvés dans ces sols et au transfert potentiel de ces substances vers les plantes qui peuvent être cultivées sur ces terres. Ce problème est encore plus prononcé dans la zone dite « difficile au retour » que les autorités japonaises ont décidé de rouvrir progressivement depuis le printemps 2023. Les recherches futures devront étudier le devenir des radionucléides résiduels provenant des milieux forestiers et celui des substances radioactives restant dans les sols cultivés, en réponse à la fois aux fortes précipitations et aux activités humaines mises en œuvre dans la région. Les connaissances acquises sur ces processus de transfert de radionucléides à travers les paysages contribueront également à l'élaboration de modèles susceptibles de fournir des outils d'aide à la décision utiles pour guider la mise en place de mesures de

gestion efficaces au cas où des événements conduisant à l'émission de substances potentiellement nocives dans l'environnement se reproduiraient à l'avenir.

La collecte et l'analyse des échantillons de sédiments ont été financées par les projets TOFU (ANR-11-JAPN-001) et AMORAD (ANR-11-RSNR-0002), sous la supervision de l'Agence nationale de la recherche (ANR), avec le soutien du CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), du CNRS (Centre national de la recherche scientifique) et de la JSPS (Japan Society for the Promotion of Science) à travers le financement de bourses de doctorat (H. Lepage, H. Jaegler, A. Diacre, T. Chaux-Clergue) et de projets de collaboration (PRC CNRS JSPS 2019-2020; CNRS International research project – IRP – MITATE Lab).

- [1] N. Kinoshita *et al.*, Assessment of individual radionuclide distributions from the Fukushima nuclear accident covering central-east Japan, *Proc. Nat. Ac. Sc. USA*, **2011**, *108*, p. 19526-29.
- [2] O. Evrard *et al.*, Novel insights into Fukushima nuclear accident from isotopic evidence of plutonium spread along coastal rivers, *Env. Sci. Tech.*, **2014**, *48*, p. 9334-40.
- [3] Y. Abe *et al.*, Detection of uranium and chemical state analysis of individual radioactive microparticles emitted from the Fukushima nuclear accident using multiple synchrotron radiation X-ray analyses, *Anal. Chem.*, **2014**, *86*, p. 8521-25.
- [4] H. Jaegler *et al.*, Method for detecting and characterising actinide-bearing micro-particles in soils and sediment of the Fukushima Prefecture, Japan, *J. Rad. Nucl. Chem.*, **2019**, *321*, p. 57-69.
- [5] J.-P. Lacey *et al.*, Rainfall erosivity in catchments contaminated with fallout from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, *Hydr. Earth Sys. Sc.*, **2016**, *20*, p. 2467-82.
- [6] O. Evrard *et al.*, Radiocesium transfer from hillslopes to the Pacific Ocean after the FNPP accident: a review, *J. Env. Rad.*, **2015**, *148*, p. 92-110.
- [7] O. Evrard, Lacey JP, Nakao A, Effectiveness of landscape decontamination following the Fukushima nuclear accident: a review, *Soil*, **2019**, *5*, p. 333-350.
- [8] O. Evrard, T. Chaux-Clergue, P.-A. Chaboche, Y. Wakiyama, Y. Thiry, Research and management challenges following soil and landscape decontamination at the onset of the reopening of the Difficult-to-Return Zone, Fukushima (Japan), *Soil*, **2023**, *9*, p. 479-497.
- [9] O. Evrard, P.-A. Chaboche, R. Ramon, A. Foucher, J.-P. Lacey, A global review of sediment source fingerprinting research incorporating fallout radiocesium (^{137}Cs), *Geomorph.*, **2020**, *362*, p. 107103.
- [10] O. Evrard *et al.*, Impact of the 2019 typhoons on sediment source contributions and radiocesium concentrations in rivers draining the Fukushima radioactive plume, Japan, *C.-R. Géoscience*, **2020**, *352*, p. 199-211.
- [11] A.L. Collins *et al.*, Sediment source fingerprinting: benchmarking recent outputs, remaining challenges and emerging themes. *J. Soils Sed.*, **2020**, *20*, 4160-93.
- [12] J.-P. Lacey, S. Huon, Y. Onda, V. Vauy, O. Evrard, Do forests represent a long-term source of contaminated particulate matter in the Fukushima Prefecture?, *J. Env. Man.*, **2016**, *183*, p. 742-753.
- [13] S. Huon, S. Hayashi, J.-P. Lacey, H. Tsuji, Y. Onda, O. Evrard, Source dynamics of radiocesium-contaminated particulate matter deposited in an agricultural water reservoir after the Fukushima nuclear accident, *Sc. Total Env.*, **2018**, *612*, p. 1079-90.
- [14] T. Wada *et al.*, Strong contrast of cesium radioactivity between marine and freshwater fish in Fukushima, *J. Env. Rad.*, **2019**, *204*, p. 132-142.
- [15] Y. Onda *et al.*, Radionuclides from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in terrestrial systems, *Nat. Rev. Earth Env.*, **2020**, *1*, p. 644-660.
- [16] S. Ohashi *et al.*, Temporal trends in ^{137}Cs concentrations in the bark, sapwood, heartwood, and whole wood of four tree species in Japanese forests from 2011 to 2016, *J. Env. Rad.*, **2017**, *178-179*, p. 335-342.
- [17] O. Evrard *et al.*, Radionuclide contamination in flood sediment deposits in the coastal rivers draining the main radioactive pollution plume of Fukushima Prefecture, Japan (2011–2020), *Earth Syst. Sc. Data*, **2021**, *13*, p. 2555-60.

Olivier EVRARD^{1*}, directeur de recherche, **Yoshifumi WAKIYAMA**², professeur, **Atsushi NAKAO**³, professeur assistant, **Sylvain HUON**⁴, maître de conférence, **Seiji HAYASHI**⁵, chercheur, **Hideki TSUJI**⁵, chercheur, et **Olivier CERDAN**⁶, ingénieur de recherche.

¹Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE/IPSL), UMR 8212 (CEA/CNRS/UVSQ), Université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette.

²Institut de Radioactivité Environnementale, Université de Fukushima (Japon).

³École Supérieure des Sciences de la Vie et de l'Environnement, Université Préfectorale de Kyoto (Japon).

⁴Sorbonne Université, Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris (IEES), Paris.

⁵National Institute for Environmental Studies, Miharu (Japon).

⁶Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Département risques et prévention, Orléans.

*olivier.evrard@lsce.ipsl.fr

La liqueur noire de l'industrie papetière : un exemple de valorisation prometteur

Résumé La liqueur noire est le principal déchet de l'industrie papetière avec une production annuelle de 1 300 millions de tonnes par an. Pour valoriser au mieux ce déchet, un petit consortium de chercheurs bordelais a démontré que cette liqueur noire peut servir comme réactif pour la synthèse de matériaux carbonés avec un grand potentiel d'application dans le domaine du stockage de l'énergie.

Mots-clés Liqueur noire, valorisation, stockage de l'énergie, matériaux carbonés.

Abstract **Black liquor from the paper industry: a promising case of recovery**

Black liquor, primary by-product of the paper industry, is produced at an annual rate of 1300 million tons. To valorize this black liquor, a consortium of researchers from Bordeaux has demonstrated its efficiency as a reagent in synthesizing carbon materials, showcasing significant potential for energy storage applications.

Keywords Black liquor, recovery, energy storage, carbon materials.

Comme évoqué dans le dossier spécial consacré à la chimie du bois (relire *L'Act. Chim.*, mai-juin 2023 [1]), la liqueur noire (solution alcaline composée essentiellement de lignine et d'hémicellulose) est le principal déchet de l'industrie papetière mettant en œuvre le procédé Kraft. Ainsi, 1 300 millions de tonnes de cette liqueur noire (figure 1) sont produites annuellement dans le monde. Pour le moment, l'industrie brûle ce déchet à environ 1 200 °C pour produire de la chaleur par combustion, et de l'électricité en pressurant la vapeur d'eau émise faisant tourner des turbines électrogénératrices.

Au-delà d'un bilan énergétique mitigé, le bilan carbone de ce procédé n'est plus approprié aux efforts environnementaux à mettre en œuvre actuellement pour minimiser le dérèglement climatique, notamment *via* les émissions de gaz à effet de serre.

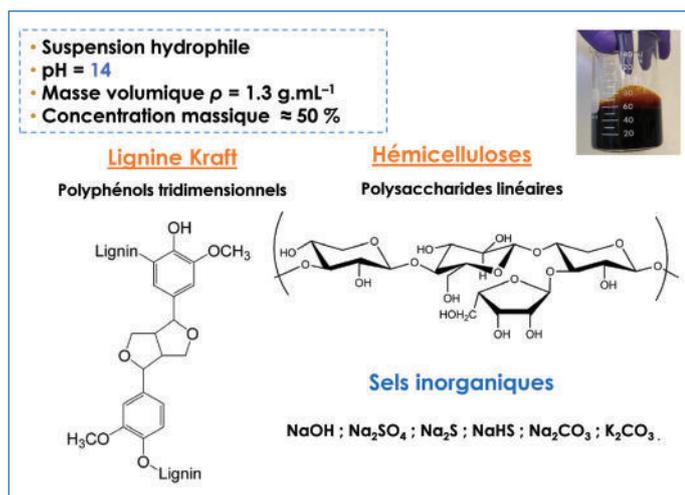


Figure 1 - Principales caractéristiques physiques et physico-chimiques de la liqueur noire issue du procédé Kraft.

Une alternative de valorisation de cette liqueur noire vient d'être mise au point par un petit consortium bordelais. Grâce à un procédé innovant, breveté [2] et publié récemment dans la revue *Langmuir* [3] de l'American Chemical Society, ce sous-produit de l'industrie papetière devient le précurseur de base

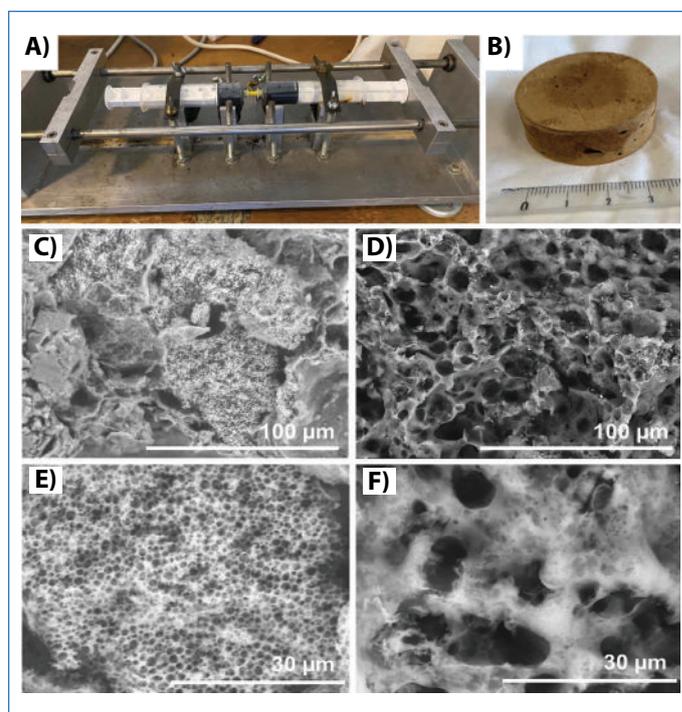


Figure 2 - A) Procédé d'émulsification employé par cisaillements en « va et vient ». B) Exemple de monolithe polymérisé. C - E) Images en microscopie électronique à balayage de la macroporosité du monolithe polymérisé. D - F) Images en microscopie à balayage de la macroporosité d'un monolithe partiellement graphitisé.

de matériaux carbonés autosupportés, à haute valeur ajoutée, dédiés au stockage et à la conversion de l'énergie. Dans une première étape, le principe fait appel à la mise en forme par émulsion-polymérisation de la liqueur noire et permet d'obtenir des matériaux autosupportés macrocellulaires (figure 2). Dans une seconde étape, un traitement thermique approprié en atmosphère inerte permet une graphitisation optimisée dont émergent les propriétés de transport de charges.

Ces matériaux carbonés ont premièrement été testés comme électrodes de supercondensateurs électrochimiques (figure 3). Un supercondensateur, également connu sous le nom de

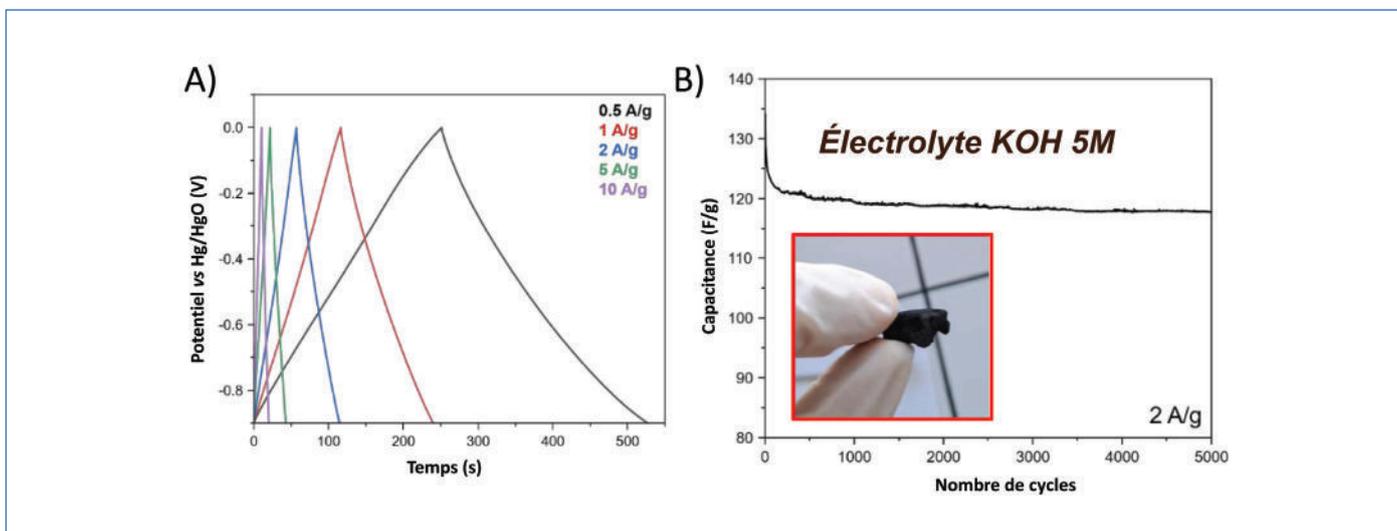


Figure 3 - A) Courbe de charges/décharges galvanostatiques à différentes densités de courant, l'évolution linéaire du potentiel en fonction du temps démontre un mécanisme de charge capacitif. B) Évolution de la capacité spécifique en fonction du nombre de cycles.

condensateur à double couche électrostatique (EDLC) est un type de condensateur qui stocke l'énergie électrique par accumulation de charges à la surface d'électrodes et ayant la capacité d'en stocker d'importantes quantités. Il est typiquement utilisé dans des applications nécessitant de fortes puissances et de nombreux cycles de charge/décharge tels que dans le système « start and stop » d'un véhicule ou lors de la récupération d'énergie au freinage. Les résultats des premiers tests effectués dans un électrolyte alcalin ont mis en évidence que ces électrodes issues de la liqueur noire délivraient des capacités légèrement inférieures à celles d'un matériau commercial, mais possédaient une excellente rétention de capacité sur plus de 5 000 cycles [1].

En outre, les compétences de ces matériaux envers le stockage de l'hydrogène ont été évaluées [2]. Ces matériaux peuvent ainsi adsorber plus de 1 % massique d'hydrogène, ce qui les situe au même niveau que les meilleurs matériaux d'adsorption actuellement étudiés à base de charbon. Toujours dans le même contexte, ces matériaux poreux obtenus à partir de liqueur noire peuvent servir de milieu réactionnel où siègent des nano/micro précipitations de composés intermétalliques. Ces derniers résultats, de premier ordre, permettent par exemple d'atteindre une activation à température ambiante. Globalement, cette innovation majeure concernant la valorisation de la liqueur noire, appelle à un changement de

paradigme d'un traitement rentable et vertueux de résidus de l'industrie papetière, en synergie avec une transition énergétique durable, responsable et efficace.

Ce travail émerge à travers le GPR Post-Petroleum Materials (PPM) de l'Université de Bordeaux. Sont également remerciés pour leur soutien le CNRS et, plus particulièrement, le Réseau pour le stockage électrochimique de l'énergie (RS2E), et les laboratoires impliqués au sein de ce consortium (ISM, LCPO, ICMCB et CRPP).

[1] new.societechimiquedefrance.fr/numero/n484-485-mai-2023-juin-2023

[2] R. Poupard, R. Ivernizzi, J. Olchowka, H. Deleuze, M.-A. Dourges, L. Demourgues, R. Backov, Process for the preparation of a porous monolithic carbonaceous material obtained by said process and its use as a supercapacitor electrode, European patent, EP23-306177, 2023.

[3] R. Poupard, R. Ivernizzi, L. Guerlou-Demourgues, J. Olchowka, M.-A. Dourges, J.-L. Bobet, H. Deleuze, R. Backov, Kraft black liquor as a carbonaceous source for the generation of porous monolithic materials and applications toward hydrogen adsorption and ultrastable supercapacitors, *Langmuir*, 2023, 39, p. 16385-94.

Rénal BACKOV¹, professeur, Jean-Louis BOBET¹, professeur, et Jacob OLCHOWKA^{2*}, chargé de recherche.

¹Université de Bordeaux, Bordeaux.

²CNRS/Université de Bordeaux, Bordeaux.

*jacob.olchowka@icmcb.cnrs.fr



Les Journées d'Électrochimie 2024

Saint-Malo, France, Palais du Grand Large

Du 1^{er} au 5 juillet 2024

<https://je2024.sciencesconf.org>



Nouveaux principes actifs pharmaceutiques

Bilan des approbations FDA en janvier 2024

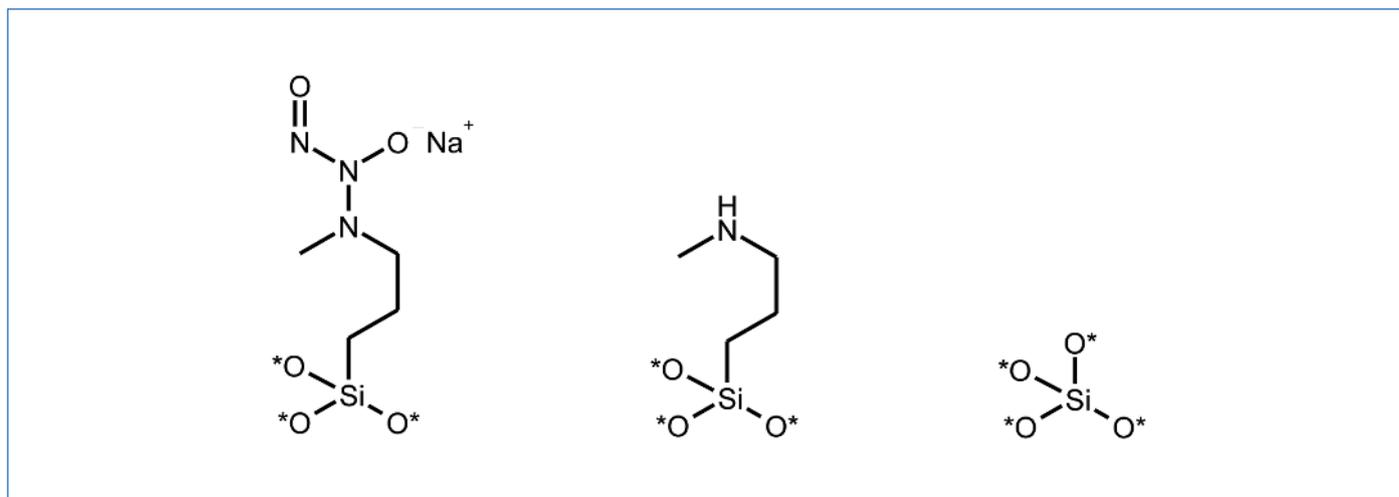
Au cours de cette période, une seule molécule de synthèse a été approuvée, aucune nouvelle molécule d'origine biologique n'a été approuvée.

Molécule de synthèse

Principe actif	Compagnie	Indication
Berdazimer sodium	LNHC Inc.	Molluscum contagiosum

Le molluscum contagiosum est une infection cutanée virale courante et contagieuse causée par le molluscipoxvirus. En 2010, on estime que 1,8 % de la population mondiale était infectée par ce virus. Elle se caractérise par de petites lésions surélevées appelées « mollusques » qui peuvent apparaître n'importe où sur le corps. Le **berdazimer sodium** est appliqué sous forme de gel sur les lésions des molluscums. Son mécanisme d'action n'est pas connu, il agit en libérant de l'oxyde nitrique (NO) qui a des fonctions régulatrices qui affectent l'immunomodulation, l'inflammation, la production de cytokines et l'apoptose, probablement par la S-nitrosylation des protéines. L'oxyde nitrique a également des fonctions cytotoxiques qui affectent la réplication virale.

Le berdazimer sodium est un copolymère composé de trois unités de répétition :



Structure du berdazimer sodium (CAS n° 1846565-00-1).

*O signifie que les atomes d'oxygène sont impliqués soit dans des liaisons Si–O–Si, soit dans des liaisons Si–OH.

Actualités des substances actives phytopharmaceutiques

Février 2024

L'actualité est très réduite.

Nouvelles autorisations

Elles sont accordées à un insecticide à base de *flonicamide* associé à l'huile essentielle d'orange, sous forme de concentré émulsionnable pour cultures légumières et ornementales, et à un molluscicide à base de *phosphate de fer (III)* sous forme d'apprêt prêt à l'emploi pour cultures porte-graines, tropicales, plantes à parfum, médicinales et condimentaires.

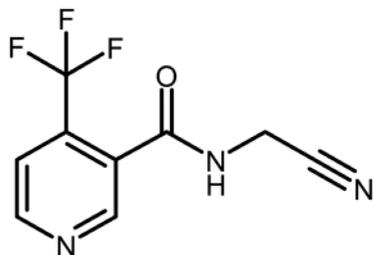
Modifications d'AMM (renouvellements, modifications d'usages)

Elles concernent un insecticide à base de *spirotétramate* pour extension d'usage majeur, et un adjuvant pour bouillie herbicide à base d'huile de paraffine après renouvellement décennal.

Nous présentons le flonicamide et le spirotétramate.

Le **flonicamide** a été découvert par Ishihara Sangyo Kaisha, Ltd (1994). C'est un produit utilisé contre certains insectes

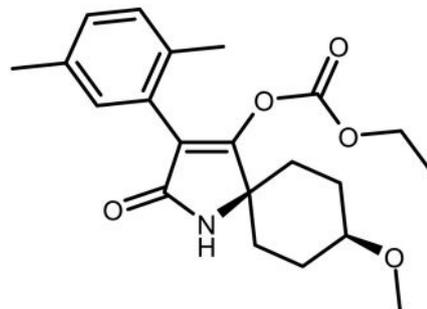
piqueurs-suceurs, actif par contact et ingestion, systémique pour la plante. Il a été soupçonné de cancérogénicité, sans confirmation chez le rat ni le chien. Il est très soluble dans l'eau (5,2 g/L) et peu volatil.



Le flonicamide (CAS n°158062-67-0).

Nom IUPAC : N-cyanométhyl-4-(trifluorométhyl)nicotinamide.

La **spirotétramate** est actif contre les insectes piqueurs-suceurs (cochenilles et pucerons) par ingestion et systémique pour la plante. Il perturbe la biosynthèse des acides gras comme inhibiteur de l'acétyl-coA carboxylase. C'est un produit Bayer.



La spirotétramate (CAS n°203313-25-1).

Nom IUPAC : cis-4-(éthoxycarboxyloxy)-8-méthoxy-3(2,5-xylyl)-1-azaspiro[4,5]dec-3-en-2-one.

Cette rubrique est coordonnée et alimentée par **Josette FOURNIER**, qui a présidé de 2007 à 2010 le comité d'orientation et de prospective scientifique de l'Observatoire des résidus de pesticides (ORP) (josette.fournier4@orange.fr), et **Jean-Marc PARIS**, ancien directeur de recherche pharmaceutique dans le groupe Rhône-Poulenc et ancien directeur scientifique de la chimie organique et biotechnologies de Rhodia (jeanmarc.paris@free.fr).

Mardi 26 Mars 2024



Les défis de la
Chimie

Les Défis de la Relocalisation de l'Industrie Chimique

<https://actions.maisondelachimie.com/colloque/ric>

Prix et distinctions

Le CNRS a décerné 25 médailles d'argent et 48 médailles de bronze en 2024. Découvrez les lauréats relevant des laboratoires de CNRS Chimie. Nous reviendrons dans un prochain numéro de *L'Actualité Chimique* vous présenter leurs parcours scientifiques respectifs.

Médailles d'argent

La Médaille d'argent distingue des chercheurs et des chercheuses pour l'originalité, la qualité et l'importance de leurs travaux, reconnus sur le plan national et international.



© N. Busser.

• **Nicolas Giuseppone**, enseignant-chercheur à l'Institut Charles Sadron (CNRS/Université de Strasbourg), pour ses travaux en chimie moléculaire et supramoléculaire, polymères, moteurs moléculaires, auto-assemblages, chimie combinatoire.



© Hureau.

• **Christelle Hureau-Sabater**, directrice de recherche au Laboratoire de Chimie de coordination (CNRS), pour ses travaux en chimie de coordination et catalyse homogène.



© Fond. Bettencourt-Schueller.

• **Raphaël Rodriguez**, directeur de recherche au Laboratoire Chimie et biologie de la cellule (CNRS/Institut Curie/INSERM), pour ses travaux en chémobiologie, cancer, thérapie, petites molécules.

Médailles de bronze

La médaille de bronze récompense les premiers travaux consacrant des chercheurs et des chercheuses spécialistes de leur domaine. Cette distinction représente un encouragement du CNRS à poursuivre des recherches bien engagées et déjà fécondes.



© Y. Alméjija.

• **Prince Nana Amaniampong**, chargé de recherche à l'Institut de Chimie des milieux et matériaux de Poitiers (CNRS/Université de Poitiers), pour ses travaux en sonochimie, transformation de la biomasse.



© J.-B. Boy.

• **Céline Barreteau**, chargée de recherche à l'Institut de chimie et des matériaux Paris Est (CNRS/Université Paris Est Créteil), pour ses travaux en thermodynamique, calculs *ab initio*, high-throughput.



© J. Niedermayer.

• **Guilhem Chaubet**, chargé de recherche au Laboratoire Chémobiologie synthétique thérapeutique (CNRS/Université de Strasbourg), pour ses travaux en chémobiologie, bioconjugaison, anticorps-médicament.



© Y. Yang.

• **Anis Tlili**, chargé de recherche à l'Institut de chimie et biologie moléculaires et supramoléculaires (CNRS/Université Claude-Bernard Lyon 1), pour ses travaux en photocatalyse, catalyse organométallique, activation de petites molécules, chimie du fluor.



Grand prix de la Fondation de la Maison de la Chimie

Appel à candidatures

Le Grand Prix de la Fondation de la Maison de la Chimie est un prix annuel de 35 000 € décerné à une ou plusieurs personnes physiques pour une œuvre originale en chimie ayant un impact bénéfique sur l'homme, la vie, la société ou la nature. Les candidatures doivent être déposées par une société savante ou un organisme scientifique national ou international avant le 30 avril 2024.

<https://actions.maisondelachimie.com/les-prix-de-la-fondation/grand-prix-de-la-fondation/>



• **Morgane Vacher**, chargée de recherche au Laboratoire Chimie et interdisciplinarité : synthèse, analyse, modélisation (CNRS/Nantes Université), pour ses travaux en chimie ultrarapide, chimie quantique.



© S. Michot.

• **Zorana Zeravcic**, chargée de recherche au Laboratoire Gulliver (CNRS/ESPCI), pour ses travaux en matériaux auto-réplicants, auto-assemblage, systèmes colloïdaux, matière molle, simulations.

Cristal collectif du CNRS 2023



Brice Molinelli et Rémy Puppo.
© CNRS/MNHN/MCAM/Arul Marie.

La salle des collections du laboratoire de chimie de l'unité MCAM (Molécules de communication et adaptation des micro-organismes, unité mixte de recherche CNRS/MNHN) fut la salle de cours de la toute première École de chimie en France. Créée à Paris, au Muséum national d'histoire naturelle, par Edmond Fremy en 1864, elle est finalement transférée rue Buffon en 1872. Elle a fêté ses 150 ans en 2022. Pour l'occasion, cette salle et son annexe ont été entièrement restaurées en 2021, entraînant en parallèle l'inventaire, la description et la conservation des collections présentes dans ces lieux historiques. Il aura fallu presque deux années pour mener à bien sa restauration : 400 objets scientifiques et plus de 7 400 flacons de produits chimiques ont ainsi été nettoyés et inventoriés avant d'entrer en collection.

Le Cristal collectif du CNRS a récompensé en 2023 les lauréats suivants pour leur implication dans la restauration et la valorisation de ce lieu historique :

Séverine Amand, co-responsable technique de la Chimiothèque/Extratothèque (MNHN-MCAM-INEE), **Christine Bastard**, responsable de l'atelier de restauration (Direction des bibliothèques et de la documentation, MNHN), **Didier Buisson**, chercheur (CNRS Chimie - MCAM-INEE), **Delphine Champeval**, responsable technique du service de mycologie (MCAM-INEE), **Charlotte Duval**, responsable de la collection de cyanobactéries du Muséum et de l'animalerie Médaka (MCAM-INEE), **Alice Lafôret**, adjointe à la cheffe du service Collecte, traitement et flux - Direction des bibliothèques et

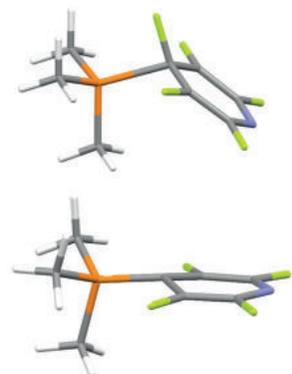
de la documentation (MNHN), **Arul Marie**, responsable de la plateforme de spectrométrie de masse bio-organique (MCAM-INEE), **Christine Maulay-Bailly**, co-responsable technique de la Chimiothèque/Extratothèque (MNHN, MCAM-INEE), **Aurélié Méric**, chargée de traitement archivistique - Direction des bibliothèques et de la documentation (MNHN), **Brice Molinelli**, secrétaire gestionnaire (MCAM-INEE), **Elisabeth Mouray**, ingénieure d'études en biologie moléculaire et cellulaire (MCAM-INEE), **Rémy Puppo**, ingénieur du plateau technique de spectrométrie de masse bio-organique (MCAM-INEE).



Christine Maulay-Bailly, Elisabeth Mouray, Christine Bastard, Delphine Champeval, Arul Marie, Charlotte Duval, Alice Lafôret, Aurélié Méric, Didier Buisson, Séverine Amand. © Agnès Iatoura.

Recherche et développement

De nouveaux catalyseurs pour des synthèses de composés organofluorés plus vertueuses



© A. Simonneau.

Accéder à de nouvelles molécules fluorées qui trouvent des applications en santé, en agriculture ou encore dans les batteries nécessite de scinder la liaison forte carbone-fluor. On utilise pour cela des espèces métalliques riches en électrons, peu aisées à manipuler, et à base d'éléments chimiques peu abondants, parfois toxiques. Des scientifiques montrent que de simples réactifs à base de phosphore sont capables de venir à bout de ces liaisons carbone-fluor, de manière similaire aux métaux. Ces travaux, publiés dans le *Journal of the American Chemical Society*, ouvrent la voie à des synthèses plus durables de composés organofluorés. Les molécules organofluorées entrent dans la composition de nombreux produits de notre quotidien en pharmacologie, agrochimie, ou dans le domaine des matériaux pour des batteries par exemple. Mais des effets nocifs et toxiques sur le métabolisme humain ont été observés pour plusieurs de ces produits dits « perfluorés » et dans certains cas, leur caractère cancérigène est fortement suspecté. Ce qui soulève le problème de pollution persistante de ces composés, après leur utilisation, due à la forte inertie de la liaison carbone-fluor particulièrement difficile à briser. Casser cette liaison carbone-fluor est donc indispensable pour accéder à de nouvelles molécules fluorées encore plus efficaces à partir de précurseurs incorporant un nombre variable d'atomes de fluor et atténuer la persistance des polluants « perfluorés » en substituant une ou plusieurs de leurs liaisons carbone-fluor par des liaisons carbone-azote ou carbone-hydrogène. Pour cela, on fait actuellement intervenir des espèces métalliques

riches en électrons, peu aisées à manipuler, et composées d'éléments peu abondants, parfois toxiques. Ces dernières années sont apparues de nouvelles méthodes d'activation de cette liaison carbone-fluor utilisant des éléments abondants et non toxiques. Parmi ces éléments, le phosphore a montré qu'il était capable de jouer ce rôle de façon « métal-mimétique », c'est-à-dire en mettant en jeu des processus similaires à ceux déclenchés par les métaux. Mais ces espèces phosphorées mises en jeu, difficiles à synthétiser, rendent utopiques leur utilisation à grande échelle. Des scientifiques du Laboratoire de chimie de coordination (LCC-CNRS) et de l'Université de York montrent que de simples phosphines, espèces à base de phosphore faciles à préparer et peu onéreuses, sont capables de rompre facilement les liaisons carbone-fluor dans de nombreux composés organiques perfluorés et de les remplacer par des liaisons carbone-hydrogène ou carbone-azote. Des résultats qui permettent d'envisager l'utilisation de ces composés pour des synthèses plus durables de composés organofluorés, mais aussi pour la défluoration de composés organiques-fluorés persistants.

• Source : CNRS Chimie, 15/01/2024.

Réf. : S. Bonfante, C. Lorber, J. Lynam, A. Simonneau, J.M. Slattery, *Metallo-mimetic C-F activation catalysis by simple phosphines*, *J. Am. Chem. Soc.*, 2023.

Frieder Jäckle, nouvel Ambassadeur des sciences chimiques en France



© CNRS.

CNRS Chimie a lancé le programme « Ambassadeurs », programme inédit, qui permet à ses directrices et directeurs d'unité d'inviter de prestigieux scientifiques basés à l'étranger pour une tournée de conférences au sein de laboratoires du CNRS. Le 21 février 2024, Frieder Jäckle,

professeur distingué de chimie à Rutgers (Université du New Jersey, É.U.) démarrera une série de conférences dans plusieurs laboratoires du CNRS en tant qu'Ambassadeur des sciences chimiques en France. Les recherches de Frieder Jäckle se focalisent sur l'élaboration de nouveaux matériaux organiques fonctionnels ou intelligents aux propriétés optiques, électroniques ou catalytiques originales. Pour ce faire, il exploite entre autre la chimie du bore, élément chimique dont il nous partage son intérêt :

« Situé à gauche du carbone dans le tableau périodique, le bore possède un électron de moins disponible pour les liaisons.



Le printemps de l'esprit critique

Face à la surabondance informationnelle qui caractérise notre époque, l'esprit critique – capacité à trier et qualifier l'information pour construire de manière fondée sa propre opinion

– est essentiel. Universcience présente la troisième édition, désormais nationale, du Printemps qui lui est consacré, sur le thème de l'intelligence artificielle. Initié à la Cité des sciences et de l'industrie et aux Étincelles du Palais de la découverte en 2022, le Printemps de l'esprit critique propose deux semaines d'événements, d'ateliers, de conférences et de formations pour sensibiliser à l'importance de l'esprit critique et pour permettre à chacun de le cultiver, du 21 mars au 3 avril 2024 et partout en France.

• <https://origine.universcience.fr/fr/esprit-critique/appel-a-manifestation-dinteret-ami>

Ce déficit génère des scénarios de liaison uniques et très intéressants du point de vue des applications. Un exemple notable est la capacité du bore à impliquer ses trois électrons de valence dans la délocalisation π avec des substituants organiques. Les électrons dans ces composés sont facilement excités par des stimuli externes, ce qui impacte beaucoup les propriétés optiques et électroniques. L'absorption et l'émission de lumière de longueur d'onde élevée, ainsi que le transport plus aisé des porteurs de charge, sont parmi les conséquences les plus intéressantes pour la conception de matériaux organiques fonctionnels. Le déficit en électrons des composés du bore permet également des échanges dynamiques de paires d'électrons avec des composés riches en électrons (interactions de type acide-base de Lewis). Ces interactions peuvent aussi être exploitées dans diverses applications comme les capteurs, les interrupteurs moléculaires ou les matériaux supramoléculaires. Les développements récents de stratégies de synthèse pour incorporer ou fixer du bore à des matériaux organiques (macro) moléculaires ont boosté le champ des applications possibles. Nous pouvons envisager des avancées majeures dans l'utilisation de systèmes π contenant du bore en électronique organique et en imagerie biologique. Le domaine des polymères contenant du bore a également connu une diversification remarquable, avec une myriade d'applications en cours d'exploration : les réactifs et catalyseurs recyclables supportés par des polymères, les capteurs de glucides, l'imagerie dans le domaine biomédical, les matériaux de type n pour les transistors, les cellules solaires entièrement polymères et les électrolytes solides pour les batteries. Un domaine particulièrement enthousiasmant est celui des matériaux supramoléculaires dynamiques, avec une explosion de projets de recherche ces dernières années. La formation de liaisons dynamiques covalentes et non covalentes avec le bore offre des opportunités pour développer des matériaux supramoléculaires qui se comportent comme des polymères mais qui sont plus facilement recyclés ou revalorisés en fin de vie, tout en présentant également des effets souhaitables d'autoréparation et de mémoire de forme. Les propriétés uniques de liaison du bore pourraient avoir ici un impact considérable. »

• Source : CNRS Chimie, 30/01/2024.

Grand prix Arkema-Académie des sciences pour l'innovation en chimie des matériaux durables

Appel à candidatures

Ce prix, d'un montant de 25 000 €, récompense des avancées scientifiques déterminantes dans l'élaboration, la caractérisation, la compréhension ou la mise en œuvre de matériaux durables, c'est-à-dire des matériaux dont le cycle de vie et l'utilisation conduisent à un bénéfice environnemental par rapport à l'existant. Ces bénéfices pourraient concerner, par exemple et de façon non exclusive, les bioressources, le recyclage, l'utilisation de matériaux efficaces et légers dans le domaine des énergies renouvelables, de la construction ou de la mobilité durable. En encourageant la recherche sur ces thématiques, le prix souligne la contribution essentielle de la chimie à une économie décarbonée.

Clôture des inscriptions : 9 avril 2024.

• www.academie-sciences.fr/fr/Appel-a-candidature/appel-a-candidature-grand-prix-arkema-academie-des-sciences-de-l-innovation-en-chimie-pour-des-materiaux-durables.html

Industrie

Les défis de la relocalisation de l'industrie chimique

Dans le domaine de la chimie, de nombreuses entreprises ont fait le choix dans le passé de laisser la délocalisation de la production se faire dans le cadre d'une politique de globalisation généralisée de l'économie. Quelques décennies plus tard, un mouvement inverse se dessine, compte tenu de la disparition partielle des avantages supposés et des inconvénients majeurs de rupture d'approvisionnement, notamment pour des matières premières stratégiques (par exemple les métaux rares) ou des produits concernant la santé (médicaments, vaccins...). La Fondation de la Maison de la Chimie organise le colloque « Les Défis de la relocalisation de l'industrie chimique » à la Maison de la Chimie le 26 mars. Les conférences d'introduction du colloque évoqueront les problèmes économiques que pose la relocalisation de l'industrie chimique en France, avec, en particulier, le cas de l'industrie du médicament. La première

Mercredi
7 Février 2024

Chimie
et
Sports

en
cette
année
Olympique
et Paralympique

Fondation de la Maison de la Chimie

Retrouvez l'intégralité du colloque en rediffusion :
https://www.youtube.com/playlist?list=PL_2_MQVjgfgbCJPIfNHktE7xP3SMD1wjp

partie présentera des exemples de relocalisation, en donnant la parole aux industriels ayant conduit de telles opérations. La deuxième partie abordera l'aspect formation. Les industries de demain risquent fortement d'être très différentes de celles implantées sur le territoire jusqu'à il y a quelques décennies. Les mutations sont rapides et la formation des jeunes se fait sur le long terme. Quel est l'état des lieux ? Quelles actions sont mises en place aujourd'hui ? Comment attirer les jeunes vers l'industrie ? Quels savoirs, quels savoir-faire, quelles compétences doivent figurer dans les programmes de formation pour une adaptation optimale des opérateurs, des professions intermédiaires et des cadres à l'industrie de demain ? Autant de questions qui seront abordées dans cette seconde partie.

• <https://actions.maisondelachimie.com/colloque/ric>

Un nouveau laboratoire commun entre Elogen, le CNRS et l'Université Paris-Saclay



© Elogen.

Alors que l'hydrogène est amené à jouer un rôle clé dans la transition énergétique et dans l'ambition industrielle française et européenne, la production d'hydrogène bas carbone représente un levier d'avenir. En vue d'accélérer la décarbonation de l'industrie et du déploiement de solutions de

mobilités durables, la stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné dans le cadre de France 2030 répond à des enjeux environnementaux, économiques, d'indépendance technologique et de moindre dépendance aux énergies d'importation. L'une des voies vers la production à échelle industrielle de ce vecteur énergétique, tout en garantissant une empreinte carbone minimale, consiste à le produire par électrolyse de l'eau sur membrane échangeuse de protons (PEM). Cette technologie qui fonctionne sur une plage de température allant de 5°C jusqu'à environ 100°C est au cœur de la création du laboratoire commun, en novembre 2023, pour une durée de cinq ans, entre la société Elogen, leader français de l'électrolyse de l'eau PEM, société qui fait partie du groupe GTT (Gaztransport et Technigaz), l'Université Paris-Saclay et le CNRS. Ce laboratoire commun a pour objectif d'améliorer l'efficacité énergétique des électrolyseurs PEM actuels, tout en cherchant des alternatives aux matériaux cœur-process (électrolyte polymère et électrocatalyseurs) utilisés afin de réduire les teneurs en matériaux critiques et d'accélérer la production d'hydrogène vert à grande échelle. Il est hébergé au sein de l'équipe de recherche et d'innovation en électrochimie pour l'énergie (ERIEE) de l'Institut de chimie moléculaire et des matériaux d'Orsay (ICMMO - CNRS/Université Paris-Saclay), l'un des plus grands laboratoires de recherche française en chimie, et est membre de la Fédération Hydrogène du CNRS. D'où son nom : Laboratoire Mixte Hydrogène ERIEE-Elogen (LMH2E).

• Source : CNRS Chimie, 18/01/2024.



OPTON LASER
INTERNATIONAL

SPECTROSCOPIE FTIR

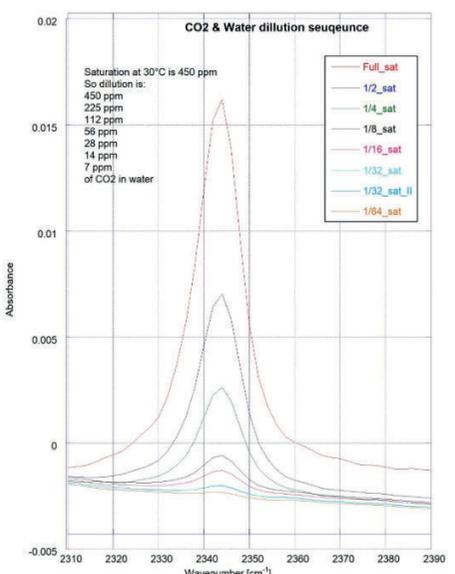
Une technique précieuse pour l'identification des composés chimiques et l'analyse structurale. #Chimie

Equipés d'une source de lumière, nos spectromètres FT-NIR et MIR, couplés à une sphère intégrante ou à une cellule en transmission, sont les instruments idéaux pour l'analyse des liaisons chimiques dans les molécules en mesurant l'absorption dans l'infrarouge (de 0,9 à 5 µm).









CO2 dans l'eau pour différentes concentrations. La dilution suit une séquence géométrique avec un facteur de 0,5

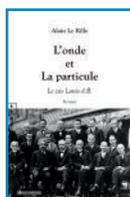


www.optonlaser.com / contact@optonlaser.com
01 69 41 04 05



Retrouvez-nous
stand E72

Livres



L'onde et la particule Le cas Louis d.B.

A. Le Rille
194 p., 18 €
Éditions Complicités, 2023

Cette rubrique de *L'Actualité Chimique* est consacrée aux livres de chimie : ouvrages thématiques et spécialisés, œuvres de vulgarisation, supports d'enseignement, etc. Une fois n'est pas coutume, c'est d'un roman dont nous allons parler. Avant de parler du livre d'Alain le Rille, un mot sur les liens entre chimie et roman.

L'art du roman se décline sous de nombreuses formes : romantique, populaire, historique... On peut faire remonter à 1809 le premier roman « chimique », quand Goethe (1741-1832) écrit *Les Affinités électives* en appliquant la théorie de l'affinité chimique de Torbern Bergmann (1735-1784) aux relations humaines. Bernard Joly a récemment animé un webinaire sur ce thème dans le cadre des activités du groupe d'Histoire de la Chimie⁽¹⁾ (GDC). Il y a ensuite d'autres exemples. En 1834, Balzac (1799-1850) publie *La Recherche de l'absolu*, où il décrit l'obsession d'un chimiste à la recherche d'une théorie unitaire. Bien sûr, Jules Verne (1828-1905), l'écrivain des sciences, a aussi inclus la chimie dans ses romans. *L'Île mystérieuse* en 1874, *L'Étoile du Sud* (moins connu) en 1882, mais aussi beaucoup d'autres ; nous vous proposons de relire notre article p. 30 de *L'Actualité Chimique* n° 304, janvier 2007⁽²⁾. Gustave Flaubert (1821-1880), dans son roman inachevé *Bouvard et Pécuchet*, rédige quelques dialogues jubilatoires sur la chimie au cours desquels les deux comparses dissertent, entre autres, des théories chimiques de leur époque. Au XX^e siècle, on citera bien sûr Primo Levi : *Le Système périodique, Si c'est un homme*. Plus récemment, *Le Parfum, histoire d'un meurtrier* de Patrick Süskind (1985) que tout le monde

connaît, notamment depuis son adaptation au cinéma en 2006. Carl Djerassi (1923-2015), chimiste connu pour ses travaux sur la pilule anticonceptionnelle, nous invite dans *Le Dilemme de Cantor* (1992) à découvrir les côtés obscurs de la recherche scientifique. Amateur de « Science in Fiction », il a également écrit beaucoup d'autres romans que je vous laisse découvrir. La liste est longue, mais je terminerai par Isaac Asimov (1920-1992) qui utilise en 1958 son expérience vécue après son passage dans des laboratoires de chimie lors de ses études pour contextualiser un roman policier, *The Death Dealers* traduit en français par *Une bouffée de mort*.

Quand on évoque les débuts de la mécanique quantique, dans l'entre-deux-guerres, les noms qui viennent à l'esprit sont Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Niels Bohr, voire Max Planck et Albert Einstein. Et les biographies ne manquent pas. Quid de Louis de Broglie ? Même si tout le monde a en tête l'audacieuse hypothèse consistant à associer un caractère ondulatoire à toute particule de matière ($\lambda = h/p$), pas d'histoire de chat, pas de relation d'incertitude, ni d'histoire de Dieu qui jouerait aux dés, ou pas ! Exceptés ceux de Georges Lochak (1930-2021), par ailleurs collaborateur de de Broglie, peu de livres sur l'homme. Alors, quoi de mieux que de se plonger dans la vie de ce physicien français, tellement atypique, au regard rêveur, à la coiffure improbable, à travers un roman ? Sans dévoiler quoi que ce soit de la trame romanesque, on va retrouver dans *L'Onde et la particule* d'Alain le Rille, professeur de physique et passionné d'histoire des sciences, les moments clés de sa vie.

Les paraboles sont nombreuses, certaines situations épiques, la physique prégnante, les grands scientifiques de l'époque présents, actifs, vivants et impliqués, les dialogues riches, l'inspection omniprésente, l'onirisme fleuri.

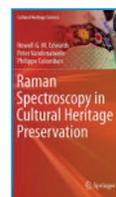
L.d.B. ↔ Ψ

Xavier BATAILLE,
président du GHC

⁽¹⁾ www.sfhc.fr/2022/11/14/les-webinaires-du-ghc-2

⁽²⁾ <https://new.societechimiquedefrance.fr/wp-content/uploads/2019/12/2007-304-janv-p.30-Bataille.pdf>

À signaler



Raman spectroscopy in cultural heritage preservation

H.G.M. Edwards, P. Vandenaabeele,
P. Colombari
531 p., 85 €
Springer, 2023

La miniaturisation des lasers et le perfectionnement des détecteurs CCD induisent de nombreuses innovations en spectroscopie avec des instruments de plus en plus performants, plus compacts, pour certains mobiles et à différentes catégories de prix, ouvrant l'usage de ces instruments à de nouvelles communautés, dont celles du patrimoine.

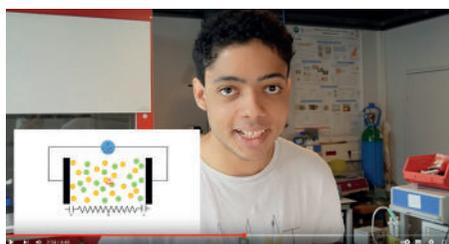
Écrit par trois des auteurs principaux du développement de l'analyse Raman appliquée aux problématiques du patrimoine culturel au sens large, l'ouvrage très illustré de près de 500 pages (22 chapitres) dresse un bilan et état de l'art des procédures et des applications. Après une introduction historique depuis la découverte de l'effet Raman en 1928 et les développements instrumentaux depuis les années 1970 (conception et commercialisation de la microsonde Raman), le « background » théorique est présenté de façon simple. Un chapitre explique la variété des informations pouvant être extraites d'un spectre ou d'une cartographie Raman, standard ou résonant (y compris SERS) et le suivant discute des dispositifs combinés (Raman/SEM et TEM, Raman/microsonde de Castaing, Raman/AFM/TERS).

Les chapitres suivants dans un ordre lié à une complexité croissante de l'utilisation de cette microspectroscopie concernent les pigments et colorants, les gemmes et bijoux, l'art rupestre, les peintures (murales, à l'huile, y compris contemporaines), les encres et imprimés, la corrosion et les patines, les verres et émaux, les biomatériaux, le patrimoine bâti et industriel, ainsi que les applications en criminalistique (forinsique). Une partie

est consacrée aux mesures utilisant des instruments mobiles avec des optiques micro, macro ou des télescopes. Chaque chapitre est accompagné de très nombreuses références et de tableaux récapitulatifs. Sept exemples sont traités en détails : authentification de peintures, de céramiques (comment différencier les provenances et les technologies, et leur transfert), analyse du Suaire de Turin. En conclusion, un chapitre discute des avantages et faiblesses de l'analyse Raman et des évolutions potentielles. Un important index complète le volume.

À regarder

Le courant passe : la série d'expériences en électrochimie !



Emmanuel Maisonhaute, professeur à Sorbonne Université et membre actif de la division Chimie physique de la SCF, a créé en mai 2020 la série « Le courant passe, faites de l'électrochimie à la maison ». Plusieurs enseignants et étudiants se sont joints à l'initiative pour mettre en

place des expériences d'électrochimie à faire à la maison en utilisant au maximum du matériel recyclé ou disponible en supermarché, magasin de bricolage, voire pharmacie.

Outre les visées pédagogiques et scientifiques cherchant à « revenir aux sources » pour mieux comprendre les concepts sous-jacents aux expériences d'électrochimie, la série permet aux étudiants de continuer à apprendre la science sous son aspect expérimental de façon ludique et légère.

Afin de marquer le retour de cette série, Alexandre Dubois, électrochimiste en herbe (mais pianiste confirmé !) s'est prêté au jeu lors d'un stage L3 au Laboratoire interfaces et systèmes électrochimiques à Sorbonne Université, sous la direction d'E. Maisonhaute, et a posé les prémisses de la musique électrochimique. Il vous propose (en attendant les suivantes) une vidéo explicative, disponible sur la chaîne YouTube de la SCF*.

*www.youtube.com/watch?v=MiuwJbrZ02c

Bulletin de l'Union des professeurs de physique et de chimie (« Le Bup »)

La rédaction de *L'Actualité Chimique* a sélectionné pour vous les articles suivants :



N° 1061 (février 2024)

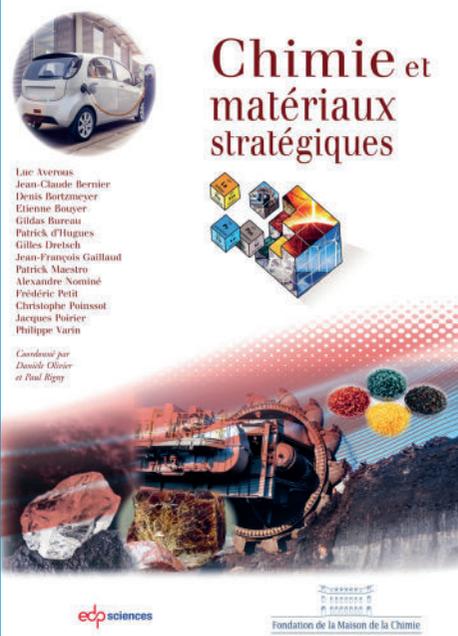
- Paul, Penning et les pièges à ions, par J.-Ch. Pain.
- Un projet expérimental et numérique, en enseignement scientifique de première générale, par B. Presson et F. Chenal.
- État de l'enseignement de la physique-chimie au collège, par C. Dussine.



N° 1062 (mars 2024)

- Le Bup et l'optique quantique, par G. Dupuis.
- Des intuitions d'Einstein à l'information quantique : les stupéfiantes propriétés de l'intrication, par A. Aspect et P. Grangier.
- Le mystère des soufflés au chocolat du pâtissier John, par L. Jacobowicz.
- Petit glossaire des abréviations et des termes utilisés en optique quantique (en anglais et en français), par G. Dupuis.
- Défendre l'offre publique dans le supérieur, par les associations de professeurs spécialistes.

• Sommaires complets, résumés des articles et modalités d'achat sur www.udppc.asso.fr



VIENT DE PARAÎTRE

Chimie et matériaux stratégiques

D. Olivier et P. Rigny (Coords)

252 p., 25 €

EDP Sciences, 2024

Les matériaux dits *stratégiques* sont ceux dont l'approvisionnement est, ou risque de devenir, sous tension, soit parce que les réserves mondiales s'épuisent rapidement, soit parce que la demande s'accroît fortement en lien (par exemple) avec les politiques mises en œuvre pour lutter contre le changement climatique.

Après avoir rappelé les enjeux dans une première partie, cet ouvrage traite des défis industriels dans divers domaines (TIC, automobiles, éoliennes, etc.), des problématiques liées à la transition énergétique, et finalement des solutions que peut apporter la chimie : chimie métallurgique, céramiques et réfractaires, matériaux polymères biosourcés...

Des spécialistes des diverses disciplines (minéralistes, polyméristes, biologistes, ingénieurs) analysent cet enjeu vital de notre époque. Ils mettent à la portée des étudiants et des chercheurs les points prioritaires de la recherche en chimie pour les « matériaux stratégiques ».

19-21 mars 2024

International conference

CBRNe

Research & Innovation

Strasbourg

Voir p. 7.

<https://cbrneconference.fr>

21 mars 2024

CEDRE

28^e journée d'information du Cedre

Le risque chimique en mer

Paris

<https://www.cedre.fr/menu-secondaire/news/le-risque-chimique-en-mer-2024>

26 mars 2024

Les défis de la relocalisation de l'industrie chimique

Paris

<https://actions.maisondelachimie.com/colloque/ric>

2-5 avril 2024

GFECI 2024

Réunion annuelle du Groupe français d'étude des composés d'insertion

Dourdan

Voir n° 492, p. 53.

<https://gfeci2024.sciencesconf.org>

4-5 avril 2024

GIFC 2024

11^e Journées FIC

Turin (Italie)

Voir p. 73.

www.gifc2024.unito.it

21-26 avril 2024

Summer school and workshop in calorimetry and thermal analysis 2024

Calorimetry and thermal methods in material science

Lyon

Voir p. 73.

https://calo.catalyse.cnrs.fr/index_en.php

26 avril 2024

FICS 2024

French industrial chemistry symposium

Paris

Voir n° 492, p. 53.

<https://fics2024.sciencesconf.org>

8-9 mai 2024

JPFSA 2024

Journées pratiques francophones des sciences analytiques

Casablanca (Maroc)

Voir n° 492, p. 53.

<https://jpfsa.com>

14-17 mai 2024

GeCat 2024

Hendaye

Voir n° 492, p. 54.

<https://gecat2024.sciencesconf.org>

15-16 mai 2024

COFRO

Coordination between France and Romania

Rennes

Voir n° 492, p. 54.

<https://cofro.sciencesconf.org>

15-17 mai 2024

Supr@Paris 2024

3rd French supramolecular chemistry congress

Paris

Voir n° 492, p. 54.

<https://supraparis2024.sciencesconf.org>

19-24 mai 2024

GECOM CONCOORD

Ax-les-Thermes

Voir n° 492, p. 54.

<https://gecom2024.sciencesconf.org>

21-23 mai 2024

Journées annuelles SP2P'24

Grenoble

<https://new.societechimiquedefrance.fr/divisions/photochimie-photophysique-et-photosciences/conferences>

26-30 mai 2024

ECS 2024

245th Electrochemical Society meeting

San Francisco (États-Unis)

<https://ecs.confex.com/ecs/245/cfp.cgi>



27-31 mai 2024

GFG 2024

29^e congrès du Groupe Français des Glycosciences

Obernai

Voir p. 74.

<https://gfg2024.sciencesconf.org>



3-7 juin 2024

N-Ligand'2024

8th EuChemS conference on nitrogen ligands

Cassis

www.cinam.univ-mrs.fr/site/NLigands2024/index.php?page=Accueil



4-5 juin 2024

Journées du GdR Synt Flux

Nancy

<https://gdrsynt-flux.cnrs.fr/prochaines-journees-du-gdr-synt-flux-en-2024-a-nancy>

4-6 juin 2024

VIP 2024

Vieillessement des polymères

Saint Valéry en Caux

<https://www.vieillessementdespolymeres.com>



10-12 juin 2024

Journées scientifiques SCF-BPL

Journées scientifiques SCF-Bretagne & Pays de la Loire

Logonna-Daoulas

Voir p. 74.

<https://scf-bpl2024.sciencesconf.org>



17-21 juin 2024

SCTE 2024

24th International conference on solid compounds of transition elements

Prague (Rép. Tchèque)

www.scte2024.org



1-5 juillet 2024

JE 2024

Journées d'Électrochimie

Saint-Malo

Voir p. 74.

<https://je2024.sciencesconf.org>

Prix et distinctions

Grand Prix SCF Sud PACA 2024



· Ling Peng

Directrice de recherche au CNRS, Ling Peng est responsable de l'équipe Biomolécules et Biomatériaux du Centre interdisciplinaire de nanoscience de Marseille (CINaM).

Depuis son entrée au CNRS en 1997, ses travaux de recherche sont réalisés à l'interface de la chimie et de la biologie, et sont principalement consacrés au développement de sondes chimiques pour comprendre les événements biologiques, la découverte de molécules bioactives et les applications biomédicales basées sur la nanotechnologie dendrimère.

Ainsi, avec son équipe, elle développe d'une part des petites molécules aux propriétés antivirales, anticancéreuses et antibactériennes comme candidats médicament, et d'autre part des sondes moléculaires pour étudier et comprendre les rôles et voies de signalisation des intermédiaires du cycle de Krebs dans la fixation de l'azote et le développement du cancer. Elle travaille activement au développement de dendrimères multifonctionnels comme nanomatériaux intelligents pour les applications biomédicales. Elle a récemment inauguré un nouveau concept de fabrication de dendrimères par auto-assemblage pour la création de dendrimères supramoléculaires pour la délivrance de médicaments et de gènes, et d'agents imagerie pour la détection et le traitement de cancer. Ce concept ouvre une nouvelle direction dans l'ingénierie moléculaire des matériaux fonctionnels. L'originalité et la qualité des travaux de Ling Peng lui ont valu l'attribution de nombreux financements nationaux et européens ; elle est co-auteur de plus de 160 publications internationales et de sept brevets. Son équipe de recherche a été labellisée par la Ligue contre le Cancer depuis 2016.

Prix SP2P Chimie physique 2024

Appel à candidatures

La subdivision Photochimie, Photophysique et Photosciences (SP2P) de la division Chimie physique (DCP) remettra cette année deux prix :

- Le prix de thèse, qui récompense le travail remarquable d'un membre de la SP2P ayant soutenu sa thèse au cours de l'année 2023.
- Le prix Jeune chercheur, qui récompense un jeune chimiste (doctorant, postdoctorant, jeune chercheur) ayant publié sa thèse depuis moins de 10 ans dans le domaine de la photochimie, de la photophysique et des photosciences.

Date limite de réception des dossiers : 31 mars 2024.

· <https://new.societechimiquedefrance.fr/divisions/photochimie-photophysique-et-photosciences/prix-de-these-prix-scientifique-jeune-chercheur>

Ling Peng est lauréate du prix du Dr & de Mme Henri Labbé de l'Académie des Sciences en 2017 et est membre distinguée de la SCF depuis 2019.

Manifestations

4-5 avril 2024

GIFC 2024

11^e Journées FRANCO-ITALIENNES DE LA CHIMIE
Turin (Italie)

Les sections régionales Ligurie et Piémont-Val d'Aoste de la Società Chimica Italiana, en collaboration avec la section régionale Sud PACA de la SCF, la onzième édition des Journées FRANCO-ITALIENNES de Chimie. Ces journées ont un caractère interdisciplinaire et permettent d'établir un contact durable entre les chercheurs de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur et ceux des régions de la Ligurie et du Piémont-Vallée d'Aoste, dans le but d'une interaction européenne renforcée aux niveaux scientifique et culturel.

Cet événement bisannuel rassemble environ 200 participants italiens et français. L'ensemble des domaines de la chimie sont abordés, notamment la chimie organique et bio-organique, la chimie physique et analytique, la chimie pharmaceutique, la chimie de l'environnement et des matériaux.

Ces journées sont articulées autour de 4 conférences plénières, 4 conférences invitées, 38 communications orales et plus d'une centaine de communications par affiches mettant en avant les jeunes chercheurs. Ce congrès d'envergure internationale est une véritable opportunité pour tous les chimistes de la région PACA, biensûr pour nos chercheuses et chercheurs confirmé(e)s, mais surtout pour nos doctorantes et doctorants, post-doctorantes et post-doctorants qui font vivre la chimie régionale dans nos laboratoires.

· www.gifc2024.unito.it

21-26 avril 2024

Summer school and workshop in calorimetry and thermal Analysis 2024

Calorimetry and thermal methods in material science
Lyon

Organisé par l'ACTEC et la SCF, cette université d'été s'adresse aux doctorants, post-doctorants, chercheurs, ingénieurs, techniciens, etc. impliqués dans le domaine de l'analyse thermique et de la calorimétrie, et qui souhaitent acquérir des compétences dans ces méthodes appliquées à la caractérisation des matériaux : catalyseurs, oxydes, métaux, supports, adsorbants,

polymères, composites, alimentaires, pharmaceutiques, solides mésoporeux, liquides ioniques, matériaux à changement de phase, matériaux de stockage de chaleur, matériaux de stockage d'hydrogène... Des exemples seront donnés dans des domaines variés : réactions catalytiques, cinétique, traitement de l'air et des eaux usées, énergies propres et renouvelables, raffinage des hydrocarbures, chimie verte, réactions à base de biomasse, production et stockage d'hydrogène, carbones et charbons, captage du CO₂, stockage intersaisonnier de chaleur, chimie alimentaire, polymères...

Des ateliers thématiques sur des études de cas seront proposés en fonction des intérêts des participants (captage du CO₂, stockage et production d'hydrogène, stockage de chaleur thermochimique, décomposition des polymères, caractérisation des sites actifs catalytiques, montage expérimental et étalonnage des instruments, interprétation des données expérimentales).

· https://calo.catalyse.cnrs.fr/index_en.php

27-31 mai 2024

GFG 2024

29^e congrès du Groupe Français des Glycosciences

Obernai

Pour les 29^e journées du GFG, le comité d'organisation s'est appuyé sur les ingrédients qui ont fait depuis près de cinquante ans le succès de ces rencontres : science, interdisciplinarité et convivialité. Ces journées s'articuleront autour de temps forts comme la remise des prix du GFG, les présentations de conférencier(e)s reconnu(e)s internationalement et des séances de posters toujours très animées. Une masterclass donnée par Jean-Pierre Sauvage, prix Nobel de chimie 2016, sur le thème de la recherche fondamentale et de l'élégance des molécules a ainsi été programmé pour débiter nos échanges. Les années paires étant traditionnellement en France le moment de la grande réunion des « glycoscientifiques », rendez-vous donc fin mai 2024 en Alsace dans la belle ville d'Obernai !

Conférenciers invités :

Jean-Pierre Sauvage (Université de Strasbourg), Lena Kjellén (Université d'Uppsala, Suède), Carmen Ortiz Mellet (Université de Séville, Espagne), Louis Charles Campeau (Small Molecule Process R&D, Merck), Patrice Lerouge (Université de Rouen), Yves Blériot (Université de Poitiers), Sylvia Collic-Jouault (IFREMER, Nantes), Angélique Ferry (CY Cergy Paris Université), Élisabeth Ficko-Blean (Station biologique de Roscoff, Sorbonne Université), Olivier Renaudet (Université de Grenoble), Sylvie Ricard-Blum (Université de Lyon 1), Matthieu Sollogoub (Sorbonne Université, Paris), Romain Vivès (Université de Grenoble-Alpes), Joanne Xie (ENS, Université de Paris-Saclay)

· <https://gfg2024.sciencesconf.org>

10-12 juin 2024

Journées SCF-BPL 2024

Journées scientifiques SCF-Bretagne & Pays de la Loire

Logonna-Daoulas

Les Journées scientifiques organisées par la SCF section Bretagne & Pays de la Loire se dérouleront au Centre de Moulin-Mer dans le Finistère.

Conférenciers invités :

- Marc Fourmigué (ISCR, Rennes) : « Chalcogen bonding in catalysis, crystal engineering and material science ».

- Elisabeth Lojou (BIP, Marseille) : « From H₂ oxidation to copper homeostasis: a bioelectrocatalysis contribution ».

- Jennifer Molloy (DCM, Grenoble) :

« Redox active complexes for the detection of oxidative stress ».

- Franc Meyer (Univ. Göttingen, Allemagne) :

« Exploiting the disulfide/dithiol switch for artificial photosynthesis and photoredox catalysis ».

- Franck Zal (Hemarina, Morlaix) : « Oxygène et hémoglobine, un couple indissociable depuis 3,9 milliards d'années.

De l'origine de la vie sur terre jusqu'à Hemo2life®, HEMHealing®, HEMDental-care®... ».

Alexandre Martinez (ISM2, Marseille).

· <https://scf-bpl2024.sciencesconf.org>

1-5 juillet 2024

JE 2024

Journées d'électrochimie

Saint-Malo

Le JE 2024 est un congrès scientifique bisannuel organisé sous l'égide de la subdivision Electrochimie. Cette manifestation réunit la communauté des électrochimistes francophones et, par-delà, les chercheurs en électrochimie des pays de la francophonie, pour faire le point sur les avancées majeures du domaine. L'électrochimie est un domaine scientifique qui couvre beaucoup de thématiques dont certaines sont des plus actuelles car liées à l'énergie, la santé ou l'environnement.

Les journées s'articuleront autour des thématiques suivantes :

- Thème 1 : Photo et spectro-électrochimie. Conférencier : Nicolas Le Poul (CEMCA, Brest).

- Thème 2 : Electrochimie moléculaire, électrosynthèse et électrocatalyse. Conférencière : Laurence Grimaud (ENS, Paris).

- Thème 3 : Electroanalyse, capteurs et laboratoires sur puce. Conférencières : Estelle Lebegue (Université de Nantes), Sophie Griveau (Chimie ParisTech PSL).

- Thème 4 : Énergie : batteries, supercondensateurs et piles à combustible. Conférencier : David Pech (LAAS, Toulouse).

- Thème 5 : Bioélectrochimie, biocapteurs et biopiles. Conférencier : Victor Diclescu (Université polytechnique de Bucarest, Roumanie).

- Thème 6 : Génie électrochimique : électrolytes, recyclage, procédés électrometallurgiques. Conférenciers :

Emmanuel Mousset (LRGP, Nancy), Marc Cretin (IEM, Montpellier).

- Thème 7 : Corrosion, revêtements et traitements des surfaces. Conférencière : Carole Pernel (CEA-LETI, Grenoble).

Et en conférences plénières :

- Christel Laberty-Robert (Université Sorbonne, Paris) : « Hybrid MATERIALS FOR ENERGY STORAGE ».

- Serge Lemay (Université de Twente, Pays-Bas) : « Noise as data: why 216 electrodes matter ».

- Neso Sojic (ENSCP, Bordeaux) : « Imagerie électrochimiluminescente d'entités individuelles : de la cellule à la molécule unique ».

· <https://je2024.sciencesconf.org>

La route de l'après-pétrole

La route et le bitume

La plupart des routes sont revêtues d'une ou plusieurs couches quasi-étanches constituées d'un matériau composite à matrice bitumineuse et à charges minérales : l'enrobé bitumineux, où le bitume joue le rôle de « liant » [1]. Cela peut surprendre, mais le bitume existe à l'état naturel sous forme d'asphaltes depuis la nuit des temps. À titre d'exemples, de grands gisements de bitume naturel sont situés sur l'île de Trinidad et en Alberta au Canada (figure 1A). L'exploitation des bitumes naturels étant complexe, ils sont peu valorisés à l'heure actuelle. Ainsi, de nos jours, le bitume est un produit majoritairement issu de l'industrie pétrolière. Il s'agit du résidu de la distillation fractionnée du pétrole. Sa consistance dépend de la température : il devient liquide à haute température ($\geq 80\text{ °C}$) et fragile à basse température ($\leq -10\text{ °C}$). Selon l'application visée, des fluxants (pétroliers ou biosourcés) sont ajoutés au bitume pour réduire sa viscosité. À l'inverse, pour rendre le bitume plus visqueux, il peut être oxydé dans des tours de soufflage afin d'introduire des fonctions polaires créant ainsi des interactions moléculaires supplémentaires. Les besoins actuels en bitume pour la France et pour l'Union européenne sont estimés respectivement à 2,4 et 11,3 millions de tonnes chaque année [2]. Potentiellement, le bitume pétrolier peut être recyclé à 100 % pour fabriquer ou entretenir les chaussées. Cependant, le contexte mondial de l'exploitation du pétrole commence à induire des modifications dans les stratégies de raffinage en privilégiant l'hydroconversion ou le vapocraquage des fractions lourdes bitumineuses en fractions plus légères à plus haute valeur ajoutée, que le bitume (distillats moyens, essence, gaz, ou précurseurs pour la pétrochimie...). Le syndicat routier professionnel Routes de France alerte déjà du risque de pénurie à court terme en bitume pour les entreprises françaises de travaux publics [3]. À ces difficultés d'approvisionnement s'ajoutent les risques sanitaires liés à l'utilisation professionnelle des produits bitumineux et de leurs additifs [4]. Il devient donc nécessaire de développer des solutions de substitution au bitume pétrolier !

Les liants routiers alternatifs

• Liants issus d'huiles végétales et de coproduits de la sylviculture

Les premiers liants végétaux ont été testés en France par les entreprises de travaux routiers dans les années 2000 (voir le *tableau*, page suivante). Ils sont composés principalement d'un mélange de coproduits d'huile végétale visqueuse (minérale ou végétale) et d'un matériau à haut poids moléculaire issu généralement de l'industrie du bois (huile de conifères, ou tall oil, résine naturelle ou chimiquement modifiée). Des polymères jouant le rôle d'agents de consistance sont ajoutés pour optimiser la rhéologie.

Il est à noter que seul le *Végécol* de Colas peut être qualifié de 100 % végétal, car aucun polymère d'origine pétrolière n'entre dans sa composition. Aussi, des fluxants biosourcés ont déjà été développés

à l'échelle industrielle et sont obtenus par des réactions de transestérifications d'huiles végétales. Le développement de ces liants est limité en raison :

- du prix plus élevé que celui d'un bitume pétrolier ;
- de la faible disponibilité des matières premières ;
- de l'utilisation de produits entrant en compétition avec la nutrition humaine, en particulier les huiles alimentaires.

Pour ces raisons, ces liants sont pour l'instant presque exclusivement mis en place sur des pistes cyclables, des allées piétonnes, des trottoirs ou encore des parkings (figure 1C).

• Liants basés sur d'autres matières premières

Plusieurs autres brevets ont été déposés ces vingt dernières années qui portent sur le développement d'alternatives au bitume pétrolier. À titre d'exemples, l'université de Picardie Jules Verne a élaboré un liant à partir de composés protéiques et de vinaigre (ou d'autres acides organiques issus du monde végétal) [10]. L'Institut national polytechnique de Toulouse a utilisé de la biomasse cellulosique (biomasse la plus abondante sur Terre) dans un liant routier [11]. Le principe est basé sur l'estérification des fonctions hydroxyles des unités glucose composant la cellulose par des acides gras, transformant ainsi les propriétés hydrophiles originelles de la cellulose en propriétés hydrophobes, recherchées pour un liant routier. La recherche en matériaux routiers alternatifs s'est également intéressée à la lignine (principalement issue du procédé Kraft) en tant qu'additif au bitume pétrolier [12-14], avec des expériences sur chantier qui ont déjà permis de valider ce principe.

Enfin, une équipe américaine s'est intéressée à la valorisation de lisier de porc, en le transformant en huile par un processus thermochimique : la liquéfaction hydrothermale (HTL) [15]. Le procédé HTL utilise de l'eau pressurisée de 5 à 15 MPa et chauffée à des températures de 250 à 350 °C. C'est l'un des processus les plus prometteurs pour la transformation de la biomasse humide solide en biohuiles.

Les bitumes alternatifs issus de la biomasse présentent des difficultés de développement à l'échelle industrielle compte tenu soit du manque de disponibilité des biomasses employées soit des propriétés d'usages insuffisantes. À l'heure actuelle, ils peuvent être toutefois utilisés en tant qu'additifs au bitume conventionnel.

• Liants obtenus à partir de microalgues

Les microalgues (phytoplancton) sont des microorganismes unicellulaires à croissance très rapide. Elles peuvent produire de la biomasse à forte teneur en protéines et lipides. Des procédés de culture mimant les conditions naturelles ont été développés [16]. Les microalgues cultivées sur des terres non arables pourraient constituer une biomasse disponible en grande quantité dans le futur proche. Un consortium constitué de laboratoires ligériens (projet Algoroute) a étudié la possibilité de transformer des résidus de microalgues pour produire un bio-liant ; ces résidus de microalgues sont initialement issus d'une première valorisation qui vise à extraire les protéines [17,18]. C'est le procédé de HTL employé premièrement

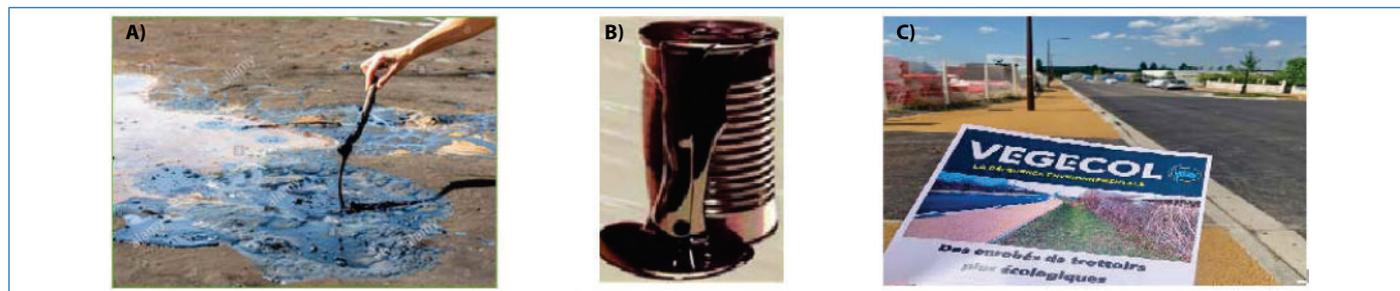


Figure 1 - A) Suintements d'asphalte naturel, île de Trinidad, Vénézuéla. B) Bitume pétrolier. C) Exemple de chantier Végécol : trottoirs de la rue Louis Armand (ZAC des Danjons) à Bourges.

Nom commercial	Entreprise	Composition	Référence
Non défini	-, 1991	Résine d'huile de tall, de bois - Térébenthine + huile minérale ou végétale - Huile de tall + additifs	[5]
Végécol	Colas, 2004	Colophanes naturelles ou modifiées + huile de lin, de ricin ou de bois, brute, raffinée ou modifiée + additifs	[6]
Biophalt	Eiffage, 2007	Colophanes naturelles ou modifiée, terpènes solides ou modifiés + poix d'huile de tall + la cire + sels minéraux à base de Co, Va, Ca, etc.	[7]
Floraphalte	Shell, 2010	Ester de colophane + huile de colza, de palme ou huile de tall	[8]
Séquoia	Eurovia, 2010	Colophanes naturelles ou modifiées, terpènes naturels ou modifiés + Polyester obtenu par polycondensation d'acides gras d'une huile de colza, tournesol, soja, palme ou huile de tall avec des polyacides + agents protecteurs des UV + additifs modifiant la rhéologie + des sels de Ti ou de Fe	[9]

sur des résidus issus de *Scenedesmus sp.* (une microalgue d'eau douce), et deuxièmement sur des résidus de *Spirulina sp.* (une cyanobactérie) [19] qui a permis d'obtenir des matériaux hydrophobes viscoélastiques de caractéristiques similaires à celles d'un bitume conventionnel. Le rendement de la phase hydrophobe après liquéfaction hydrothermale est d'environ 55 % en poids par rapport à la matière sèche de départ. Il a été également montré que des catalyseurs de type oxyde (de cérium en particulier) favorisaient des réactions de polycondensation entre les acides gras et les acides aminés (issues de la décomposition des protéines des microalgues) pour former des molécules à plus haut poids moléculaire.

La caractérisation de ces bioliants obtenus par HTL a permis d'identifier plus de 800 molécules de poids moléculaire allant de 165 à 450 Da. Parmi celles-ci, des molécules azotées riches en composés aromatiques semblent jouer un rôle similaire à celui des asphaltènes dans le bitume pétrolier. Ces composés « asphalténiques » avec une forte aromaticité et des chaînes d'alkyle pourraient contribuer aux propriétés rhéologiques uniques du bioliant obtenu par HTL [20]. Cependant, le principal problème à l'emploi de ce type de matériau réside dans un risque significatif de toxicité après lessivage par les eaux de pluie.

Vers d'autres biomasses disponibles actuellement à plus grande échelle

Dans le projet Bitume 2.0, il a été montré que des huiles alimentaires usagées (HAU) associées à des dérivés cellulotiques pouvaient être transformées en un liant alternatif au bitume pétrolier en ajustant leur viscosité. En 2014, il a été estimé que 36 000 tonnes d'HAU étaient potentiellement disponibles en France (source : Ademe, DGDDI) et que 100 000 à 700 000 tonnes d'HAU pouvaient être collectées en Europe chaque année. Actuellement, les HAU sont transformées en biocarburant sous forme d'esters méthyliques. Cependant, la quantité de biocarburant produite pourrait être limitée par des quotas. La directive EnR II fixait l'objectif d'incorporer 3,5 % de biocarburants avancés (avec une limite de 1,7 % pour le biodiesel issu des HAU) dans les carburants totaux d'ici 2030 [21]. Cela encourage donc à explorer de nouvelles méthodes de valorisation des HAU comme liant vert pour la route, où le carbone sera stocké pour de nombreuses années.

Conclusion et perspectives

Le développement de biobitumes et autres alternatives biosourcées (par exemple, les fluxants) aux produits pétroliers employés dans la route a fait l'objet de nombreux investissements ces vingt dernières années. En effet, ces produits pourraient offrir une alternative plus durable et respectueuse de l'environnement aux bitumes pétroliers.

En réduisant la dépendance aux ressources fossiles et en limitant les émissions de gaz à effet de serre, les biobitumes peuvent contribuer à atténuer les impacts environnementaux associés à la construction et à l'entretien des infrastructures routières.

Cependant, malgré leurs nombreux avantages, les biobitumes font encore face à des défis, tels que la disponibilité limitée des matières premières et les coûts de production parfois plus élevés. Pour favoriser leur adoption à grande échelle, des efforts supplémentaires sont nécessaires en termes de recherche et développement (où la chimie a toute sa place !), de sensibilisation et d'incitations politiques (exemple réglementation européenne sur les moteurs à combustion : initiative Euro 7) [22].

- [1] Un point sur n° 25, La structure chimique des bitumes pétroliers, *L'Act. Chim.*, **2014**, 385, p. 63. www.societechimiquedefrance.fr/numero/fiche-n-25-la-structure-chimique-des-bitumes-petroliers-p63-n385
- [2] www.eurobitume.eu/home (consulté le 11/02/24).
- [3] www.routesdefrance.com/penurie-de-bitume-5261 (consulté le 11/02/24).
- [4] www.anses.fr/fr/content/exposition-aux-bitumes (consulté le 11/02/24).
- [5] O. Pinomaa, Dyeable pavement material, US5021476 (A).
- [6] Entreprise Colas, Liant de nature végétale pour la réalisation de matériaux pour le bâtiment et/ou les travaux publics. EP1466878 (A1).
- [7] Eiffage, Composition comprenant une fraction organique pour la réalisation d'une couche et/ou d'un revêtement de voie ou de bâtiment. FR2915204 (A1).
- [8] Shell, Binder composition and asphalt mixture. WO2010128105 (A1).
- [9] Eurovia, Liant synthétique essentiellement à base de matières issues de ressources renouvelables, en particulier d'origine végétale, et ses applications en technique routière. FR2955586 (A1).
- [10] M. Quenedec-T'kint, B. Dupré, B. Laidoudi, L.-B. Mbounba-Mboundou, Procédé de fabrication d'un liant, notamment destiné à l'élaboration et/ou l'enrobage de granulats ou encore entrant dans la composition de matrices pour la fabrication de biocomposites. EP2473562 (A1).
- [11] C. Vaca-Garcia, Coating material for road construction. WO2010003838 (A1).
- [12] Y. Ren *et al.*, Improved aging properties of bio-bitumen coating sheets by using modified lignin, *J. Env. Manage.*, **2020**, 274, 111178.
- [13] C. Moretti *et al.*, Kraft lignin as a bio-based ingredient for dutch asphalts: an attributional LCA, *Sci. Total Environ.*, **2022**, 806, 150316.
- [14] Y. Zhang *et al.*, Effect of bio-oil on rheology and chemistry of organosolv lignin-modified bitumen, *J. Mater. Civ. Eng.*, **2022**, 34(4), 04022009.
- [15] E. Fini *et al.*, Chemical characterization of biobinder from swine manure: sustainable modifier for asphalt binder, *J. Mater. Civ. Eng.*, **2011**, 23(11), p. 1506-13.
- [16] <https://algosource.com> (consulté le 11/02/24).
- [17] M. Audo *et al.*, Subcritical hydrothermal liquefaction of microalgae residues as a green route to alternative road binders. *ACS Sustain. Chem. Eng.*, **2015**, 3(4), p. 583-590.
- [18] E. Chailleux *et al.*, Matériau viscoélastique obtenu par liquéfaction hydrothermale de microalgues. WO2015044891 (A1).
- [19] I. Borghol *et al.*, Biosourced analogs of elastomer-containing bitumen through hydrothermal liquefaction of spirulina sp microalgae residues, *Green Chem.*, **2018**, 20(10), p. 2337-44.
- [20] C. Geantet *et al.*, FT-ICR MS characterization of bio-binders for road pavement from HTL of microalgae residues, *J. Env. Chem. Eng.*, **2022**, 10(3), 107361.
- [21] F. Lashari, La stratégie européenne de développement des biocarburants : réorientation vers des biodiesels avancés issus de déchets et de résidus alimentaires ; opportunités et risques, *DUMAS*, **2020**, p. 45.
- [22] www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2023/09/25/euro-7-council-adopts-position-on-emissions-from-cars-vans-buses-and-trucks (consulté le 11/02/24).

Cette fiche a été réalisée par **Justine CANTOT**, chargée de recherche, Université Gustave Eiffel, **Emmanuel CHAILLEUX**, directeur de recherche, Université Gustave Eiffel, et **Clémence QUEFFELEC** (clemence.queffelec@univ-nantes.fr), maître de conférences, Nantes Université.

Les fiches « Un point sur » sont coordonnées par Jean-Pierre FOULON (jpfoulon@wanadoo.fr). Elles sont regroupées en téléchargement libre sur www.lactualitechimique.org.