

Innover pour dépolluer

Qu'il s'agisse de remédier aux pollutions qui s'accumulent depuis des décennies ou de limiter les conséquences des contaminations accidentelles, la dépollution s'impose, poussée par la réglementation. Des friches industrielles aux océans, en passant par l'air, les innovations foisonnent.

L approche des JO de Paris 2024 donne un coup de projecteur sur la pollution. En premier lieu, celle de la Seine, avec l'annulation en août de l'épreuve de nage test du triathlon pour cause de

contamination bactérienne. Selon le dernier bilan du Service public de l'assainissement francilien (Siaap) datant de 2022, de nombreuses masses d'eau de l'agglomération parisienne sont «déclassées» (non conformes) en raison de pollutions chimiques au cuivre, au zinc, à l'arsenic, au benzo(a)pyrène... Autre préoccupation : la qualité de l'air, qui fait fleurir bon nombre de gadgets, tels les aspirateurs à particules fines dans le village des athlètes...

La capitale n'est bien sûr pas une exception. Ailleurs en France, sols, eaux et airs sont contaminés par des produits issus de l'industrie, du transport, de l'agriculture et des activités domestiques. **La pollution fait partie des cinq causes majeures du déclin de la biodiversité**, selon le groupe international d'experts sur la biodiversité. Et elle est responsable d'environ 9 millions de morts dans le monde chaque année, soit un décès sur six, d'après une étude publiée en 2022 dans «The Lancet Planetary Health». Les décès imputables à la mauvaise qualité de l'air ambiant et à la pollution chimique ont augmenté de 7% depuis 2015 et de 66% depuis 2000, soulignent les chercheurs.

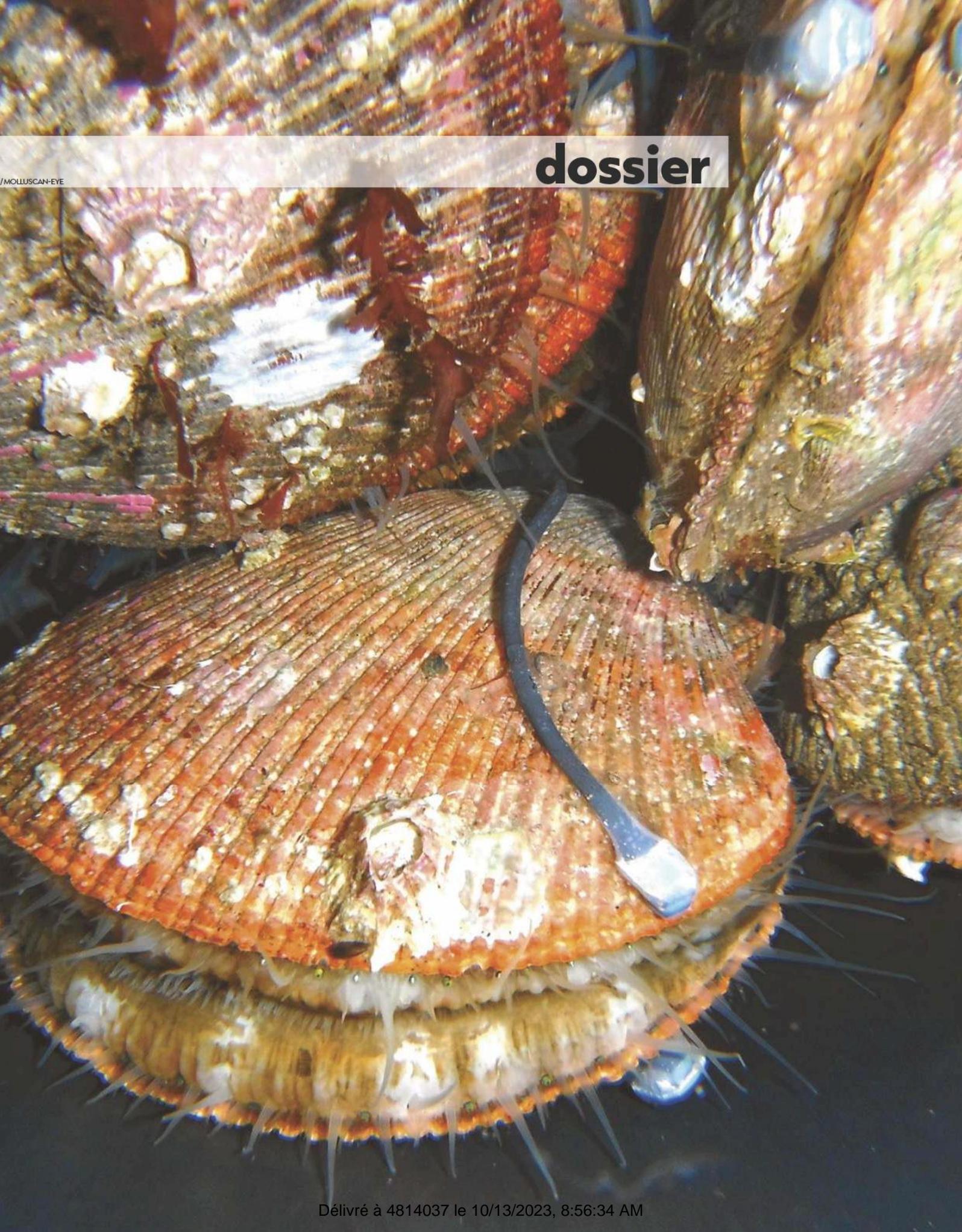
Si la réduction à la source de la pollution reste bien sûr une priorité, la question se pose de parvenir à traiter les contaminations anciennes, accidentelles ou encore non suffisamment réduites. Cette dépollution est aujourd'hui surtout mise en œuvre pour les pollutions ponctuelles, dont la provenance géographique est connue et dont l'étendue spatiale est souvent limitée. Exemple phare : les sites et sols pollués par plus de cent ans d'activités industrielles. On en compte plus de 10000 en France. Hydrocarbures, métaux, solvants... Une fois largués, les polluants se diffusent dans les sols, les eaux souterraines, et peuvent être dispersés par l'air.

La dépollution de ces sites monte en puissance, sous l'effet de la réglementation, notamment la loi promulguée le 20 juillet 2023 qui fixe l'objectif de «zéro artificialisation nette» à atteindre à l'horizon 2050. Soutenue depuis 2021 par le «fonds friches» (doté de 750 millions d'euros), la

La deeptech Molluscan a développé une solution pour surveiller la qualité du milieu aquatique en utilisant des bivalves connectés.

/MOLLUSCAN-EYE

dossier



réhabilitation des friches industrielles s'accélère et le chiffre d'affaires du secteur a augmenté de 7,4% en 2021, comptabilise l'Union des professionnels de la dépollution de sites. De nouveaux outils de diagnostic et traitements in situ sont développés [lire page 32], les déchets sont valorisés [lire page 40], et les polluants émergents focalisent les efforts [lire ci-contre]. Pourtant, dépolluer les sols n'a pas toujours été une évidence réglementaire: **ils ne sont régis par aucune directive-cadre, contrairement à l'eau**. Seule la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués existe, depuis 2007. «Nous avons raté l'opportunité d'une loi sur les sols dans les années 1970 puis 2000. Le nouveau projet de loi est une réelle occasion à saisir», témoigne Antonio Bispo, le directeur de l'unité de recherche Info&Sols à l'Inrae. Début juillet, Bruxelles a en effet présenté une proposition de directive sur la surveillance et la résilience des sols. La dépollution paraît cependant bien plus hasardeuse en ce qui concerne les pollutions diffuses. Pour les eaux continentales qui, elles, font déjà l'objet d'une surveillance chimique et écologique grâce à la directive-cadre européenne sur l'eau, «les enjeux ne portent pas sur la dépollution

mais sur la réduction à la source des contaminations», estime Azziz Assoumani, ingénieur à l'Ineris. L'amélioration de l'assainissement des eaux usées et l'interdiction de certains pesticides ont ainsi permis de restaurer leur qualité: la part des masses d'eau superficielles en bon état chimique est passée de 43,1 à 62,9% entre 2009 et 2015, selon l'Office français de la biodiversité. «Les efforts de R&D se concentrent sur l'amélioration des techniques d'échantillonnage pour abaisser la limite de détection ou encore le développement de bio-essais pour évaluer l'activité des perturbateurs endocriniens», ajoute Azziz Assoumani.

De fréquents dépassements des seuils

Pour l'air, les innovations en matière de dépollution foisonnent, mais la preuve de leur efficacité reste à faire [lire page 41]. «C'est un peu le Far West comparé à l'eau et aux sites pollués, où l'activité est plus structurée. De nombreux acteurs académiques regrettent que l'avancée des connaissances ne soit pas valorisée par les pouvoirs publics», déplore Frédéric Thevenet, professeur à l'IMT Nord Europe. Si les émissions de l'ensemble des polluants atmosphériques réglementés ont baissé –sauf pour l'ozone–, la France enregistre encore des dépassements récurrents des seuils réglementaires, d'après le Bilan de la qualité de l'air extérieur publié par le SDES en 2021. «L'UE prépare une

Les mousses d'extinction utilisées par les pompiers pour certains incendies contiennent des PFAS.



PFAS, insecticides, médicaments... Le problème des polluants émergents

Des pollutions à traiter en France

L'air des villes reste à améliorer

Nombre d'agglomérations dépassant les seuils réglementaires de la qualité de l'air en 2021, par type de polluant



4 des 12 polluants atmosphériques surveillés ont dépassé les seuils maximaux de concentration dans l'air.

SOURCES: SDES, CGDD, 2021

Des sols largement contaminés

Polluants identifiés dans les sols et nappes d'eau souterraines des sites pollués, en %



10 045

sites et sols pollués ont été recensés, mi-2022, en France. Ils sont liés à son passé industriel.

SOURCES: SDES, OFB, 2020



largement utilisées, sont très persistantes dans l'environnement. Une proposition d'interdiction a été déposée à l'Agence européenne des produits chimiques, et une directive européenne applicable dès 2026 réglera leur concentration dans les eaux de consommation. Difficiles à dégrader en raison de leur liaison carbone-fluor très stable, les PFAS mobilisent la R&D [lire page 36]. Le groupe américain Ramboll a développé un système de traitement des eaux fondé sur la défluoration par réduction photo-activée. Le procédé, qui a démontré sa capacité à dégrader entièrement les PFAS en laboratoire, est désormais testé sur un pilote mobile de terrain. La start-up française CASC4DE propose une méthode de diagnostic rapide reposant sur l'empreinte spécifique des PFAS en spectroscopie de résonance magnétique nucléaire (RMN). Combiné à des méthodes d'apprentissage automatique, l'outil descend à un seuil de 9 ppb.

Les polluants émergents constituent une large variété de molécules : stéroïdes, médicaments, résidus de détergents, insecticides... Leur particularité ? Ils ne font pas l'objet d'une réglementation, mais présentent des effets sur la santé et l'environnement. « Grâce à la directive-cadre sur l'eau, une centaine de substances pertinentes sont suivies pour éventuellement les intégrer à la liste des substances réglementées », explique Azziz Assoumani, ingénieur à l'Ineris. Parmi

elles, 19 contaminants sont répandus et dépassent des seuils provisoires dans les rivières françaises entre 2016 et 2018, selon l'Ineris : **résidus de détergents (95 % des 1600 sites de prélèvement), insecticides (40 %), herbicides (25 %) et médicaments (20 %)**. « Plusieurs raisons amènent les autorités à s'intéresser à de nouveaux polluants : la découverte de la toxicité de substances, l'amélioration des capacités analytiques – particulièrement pour les substances actives à de faibles concentrations – ou des alertes de la société. » C'est le cas des milliers (de 4 000 à 6 000, selon les sources) de composés per- et polyfluoroalkylés connus sous le nom de PFAS. Ces substances,

nouvelle directive qui abaissera [ces] seuils. Il faut surtout œuvrer à limiter les sources», estime Hélène Devillers, la directrice de l'Observatoire régional de l'air en Hauts-de-France. Les mers et océans sont également concernés. Entre 2004 et 2020, la quantité annuelle de produits qui y ont été déversés accidentellement ne montre pas de tendance claire, mais une forte variabilité, d'après le Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux (Cedre). « **Les efforts de R&D doivent se concentrer sur la pollution chimique. Peu de moyens de lutte existent** », constate Stéphane Le Floch, le responsable du service recherche du Cedre. Une fois entrée en vigueur (elle a pourtant été adoptée dès 1996 !), la Convention internationale SNPD assurera la responsabilité et l'indemnisation des dommages liés au transport par mer de substances nocives et potentiellement dangereuses. Caméra multispectrale, outils d'aide à la décision : de nouvelles technologies sont déjà à l'étude pour y répondre [lire page 42]. Autre problématique : les plastiques. De 9 à 14 millions de tonnes de déchets plastiques sont déversées chaque année dans les océans, charriés majoritairement par les rivières, selon le Programme pour l'environnement des Nations unies. Leur récupération représente un immense défi. Ce sont les granulés plastiques industriels (GPI) qui mobilisent les acteurs de la dépollution. « Des projets évaluent leur devenir en mer ainsi que les moyens de lutte. À ce jour, ils ne sont pas satisfaisants », pointe le Cedre. Entre 16 000 et 167 000 tonnes de GPI ont été larguées dans l'environnement en 2018 en Europe en raison de pertes opérationnelles. ■

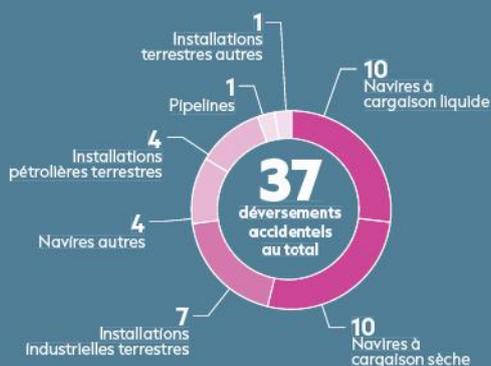
Anais Marechal

Les mers face aux déversements

Nombre de déversements accidentels dans les eaux marines et littorales de 1999 à 2022



Nombre de déversements accidentels supérieurs à 10 m³, par source



9 à 14 millions de tonnes de plastiques sont rejetées chaque année dans les océans à l'échelle mondiale.

SOURCES : CEDRE 2022, PNUE 2021

références consultées
 • « Couplage de mesures de terrain et de la géostatistique », fiche InfoTerre, BRGM, nov. 2021.
 • « Projet Phytocarb: Couplage phytoscreening - appareils de mesure terrain et développement de méthodes pour la détection des HAP et HC lourds », Innovasol, 2022.

DÉTECTION

Miniaturisés et mobiles, les capteurs quittent la paillasse

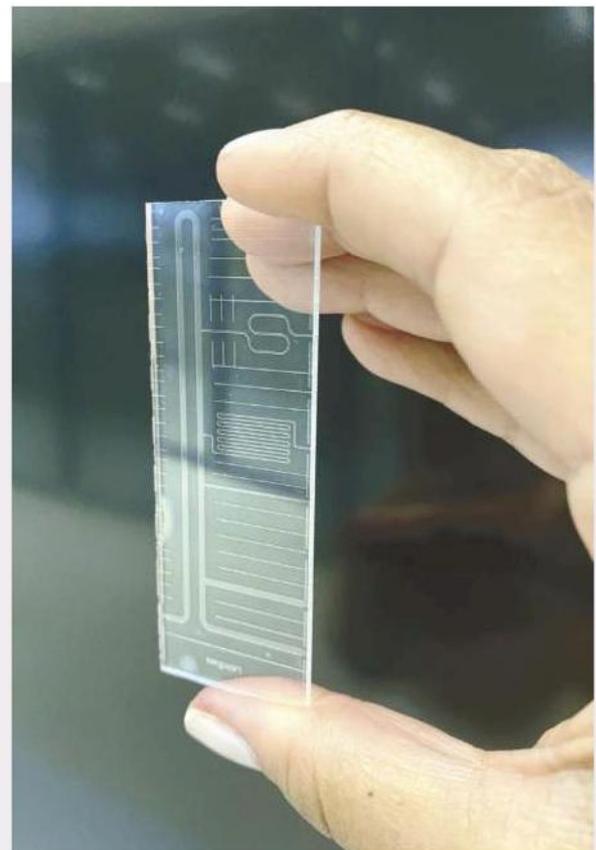
La réussite de la dépollution d'un site repose sur un diagnostic précis. L'arrivée sur le terrain d'outils classiques de laboratoire réduit les coûts et les délais. S'ils fournissent des données parfois moins précises et non quantitatives, celles-ci sont valorisées par des analyses statistiques.

EAU

Des puces microfluidiques pour mesurer les métaux

« Les technologies de laboratoires sur puce sont couramment utilisées dans le diagnostic médical. J'ai souhaité les amener dans le secteur de l'environnement pour offrir des analyses à un prix raisonnable », raconte Clément Nanteuil, le PDG de Klearia. L'entreprise développe Panda, un système microfluidique intégrant des capteurs électrochimiques miniaturisés pour l'échantillonnage de micropolluants dans l'eau. La mesure est réalisée par voltamétrie par stripping anodique, en moins de deux heures et demie. « Nous avons validé

notre système sur des mesures de taux d'arsenic dans des matrices réelles. Nous atteignons les mêmes sensibilités que les analyses en laboratoire par spectrométrie ICP-MS », précise le PDG. Le capteur - protégé par trois brevets - mesure l'arsenic et le plomb (à partir d'une concentration de 1 microgramme par litre), le mercure (0,5 µg/l) et le cuivre (2 µg/l). À ce jour, Panda séduit plutôt les industriels qui veulent mesurer la qualité de leurs effluents. Mais Clément Nanteuil l'assure : « Notre capteur présente un intérêt fort pour le secteur de la dépollution. Nous avons travaillé sur un projet de remédiation d'un site pollué au mercure. Panda a permis de suivre le bon déroulé de tout le traitement. » Le système atteint actuellement le niveau TRL6, et un pilote industriel sera construit début 2024. La suite ? Développer des systèmes microfluidiques pour les pesticides et les produits pharmaceutiques, reposant cette fois sur des méthodes de détection optique.



KLEARIA

SOL

Cartographier les flux de COV avec une chambre à flux mobile

Sur un site pollué, les flux de gaz émis à l'interface sol-atmosphère sont une source majeure de risque sanitaire. « Les émissions de composés organiques volatils (COV) sont l'une des problématiques les plus

importantes lors de la réhabilitation de sols contaminés », précise Jean-Louis Crabos, le directeur du programme Innovasol. Ce consortium a mis au point Mobiflux, une chambre à flux statique motorisée. L'objectif ? Mesurer in situ les flux de COV et de CO₂ sur une grande surface.

« Les chambres à flux manuelles disponibles sur le marché sont petites et très sensibles aux hétérogénéités, liées à la pollution elle-même ou au sol », explique Isabelle Delsarte, gestionnaire de projet de recherche à Innovasol. Pour dépasser ces limites, l'équipe a conçu une chambre à flux de grande surface (0,25 m²) intégrée sur un châssis motorisé. « L'essentiel du développement a porté sur l'étanchéité de la chambre à flux lors de la mesure, assurée par un joint en caoutchouc », raconte Isabelle Delsarte. En moyenne, il est possible de réaliser 15 mesures par jour. « Travailler avec une

chambre à flux de plus grande surface abaisse également les seuils de détection. » L'outil apporte une plus-value dans la phase initiale de diagnostic d'un site pollué. « Grâce à Mobiflux, il est possible de réaliser une cartographie rapide et de déterminer les zones nécessitant une investigation plus approfondie », détaille Jean-Louis Crabos. **Le système a été validé sur cinq sites contaminés.** À un stade TRL 8-9, il est utilisé par Innovasol lors de prestations.



INNOVASOL



INNOVASOL

“

L'un des défis est d'adapter ces capteurs à des conditions contraignantes et aux matrices complexes que sont les sols.”

JEAN-LOUIS CRABOS

Directeur du programme Innovasol

Chambre à flux, chromatographie mobile et portable en phase gazeuse, biocapteurs... La liste des outils de diagnostic in situ et sur site n'en finit pas. Au total, 23 technologies utilisables sur des sites et sols pollués ont été identifiées dans une étude réalisée par le réseau de recherche sur les déchets Record et le groupe d'ingénierie Setec. Parmi elles, neuf sont considérées comme innovantes. « Déplacer les outils de laboratoire sur le terrain est une demande très importante des acteurs des sites pollués pour réaliser des diagnostics rapides », confirme Pierre Faure-Cattelain, le président du groupement d'intérêt scientifique sur les friches industrielles.

Il n'est pas question de technologies de rupture : la R&D s'attache à améliorer des dispositifs existants, à accommoder des technologies au secteur de la dépollution ou encore à miniaturiser des équipements de paillasse pour les rendre portables. « L'un des défis est d'adapter ces capteurs à des conditions souvent contraignantes et aux matrices complexes que sont les sols », explique Jean-Louis Crabos, le directeur du programme Innovasol. Exit l'analyse en laboratoire ! Réduit à une valise de 14 kg, le GC-MS (chromatographe en phase gazeuse couplé à la spectrométrie de masse) Torion s'utilise sur site. En le couplant avec le chromatographe Micro GC 490, il est possible d'identifier

et suivre les gaz dans n'importe quelle matrice en réalisant jusqu'à plusieurs dizaines d'échantillons par jour d'après les résultats du projet Gesipol Monic.

Des échantillons ciblés plus vite

L'intérêt ? Améliorer la rapidité et la précision du diagnostic, et en maîtriser le coût. En général, plusieurs échantillons sont prélevés sur le terrain puis envoyés au laboratoire pour analyse, nécessitant plusieurs allers-retours. Grâce aux outils de terrain, il est possible de couvrir rapidement un plus grand nombre de points, afin de prélever ensuite quelques échantillons ciblés. « Cela permet aux bureaux d'études d'affiner beaucoup plus rapidement leur diagnostic », témoigne Pierre Faure-Cattelain. Cette étape est l'un des principaux

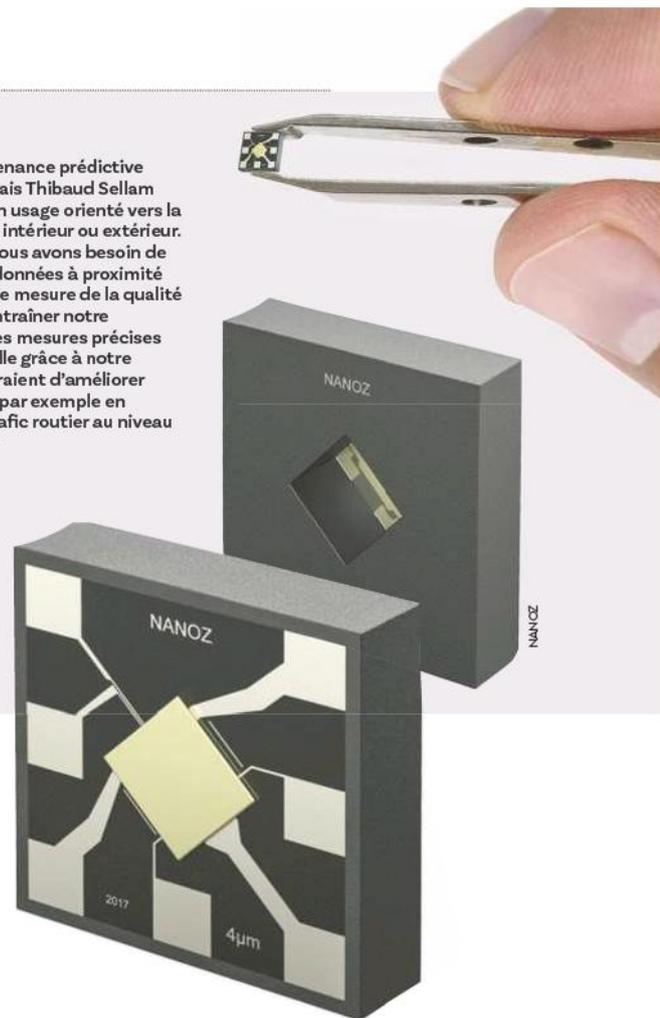
AIR

Cibler un gaz avec une nanopuce à oxyde métallique sélective

Pour évaluer la qualité de l'air, la start-up Nanoz a opté pour la miniaturisation. Le capteur est un semi-conducteur à oxyde métallique (MOX) : la mesure repose sur la variation de résistance par rapport à l'environnement. « La technologie MOX est mature, elle présente plusieurs avantages : la miniaturisation, la stabilité et un bas coût, énumère Thibaud Sellam, le directeur de Nanoz. Mais elle n'est pas sélective. C'est ce que nous proposons. » Pour cela, la puce Nanoz embarque deux chauffages et quatre capteurs sur une seule couche sensible. À cela s'ajoute un algorithme d'intelligence artificielle développé pour discriminer

l'ensemble des gaz du signal. Il permet de reconnaître le gaz ciblé dans un environnement donné. Ces développements font l'objet d'un brevet déposé par Aix-Marseille Université. Nanoz offre une mesure avec une précision de 15 % dans des seuils de détection de l'ordre du ppb (partie par milliard) ou du ppm (partie par million) selon le gaz ciblé, quels que soient la température, l'humidité ou les gaz en présence. « Selon le cas d'usage et le gaz ciblé, nous adaptons le chauffage et l'algorithme, explique le PDG. Nous pouvons mesurer n'importe quel gaz. » Commercialisée depuis fin 2022, la nanopuce trouve son application

dans la maintenance prédictive industrielle. Mais Thibaud Sellam n'exclut pas un usage orienté vers la qualité de l'air intérieur ou extérieur. « À ce stade, nous avons besoin de collecter des données à proximité des stations de mesure de la qualité de l'air pour entraîner notre algorithme. Des mesures précises à grande échelle grâce à notre puce permettraient d'améliorer la prévention, par exemple en adaptant le trafic routier au niveau de pollution. »



critères de réussite d'un projet de dépollution. « Un diagnostic précis permet de choisir et de dimensionner les techniques de dépollution », affirme Yves Duclos, expert en sites et sols pollués à l'Ademe. **L'amélioration du dimensionnement et du pilotage des traitements est l'un des deux axes prioritaires de recherche de l'édition 2023 de l'appel à projets Gesipol de l'Ademe.**

Lors d'un diagnostic, différentes informations sont collectées pour caractériser le milieu étudié et la pollution : nature et concentration des composés, répartition spatiale, stade, persistance, extension, origine... « La plus grande limite est le manque d'outils de terrain fournissant une mesure quantitative », analyse Pierre Faure-Catteloin. Isabelle Del-sarte, gestionnaire de projet de recherche à Innovasol, tempère : « Les données qualitatives sont aussi importantes pour suivre les variabilités temporelles des polluants. »

La société Envisol réalise des diagnostics intégrés à l'aide d'outils de géostatistique, une approche qui représente spatialement des phénomènes grâce à des méthodes mathématiques appliquées à des données géoréférencées.

Alors, pour fiabiliser les mesures et tirer parti de cette masse croissante d'informations, de nouveaux moyens d'analyse sont développés. La société Envisol réalise des diagnostics intégrés à l'aide d'outils de géostatistique, une approche qui représente spatialement des phénomènes grâce à des méthodes mathématiques appliquées à des données géoréférencées. « Ces solutions sont utiles pour pallier l'imprécision des capteurs de terrain », commente Pierre Faure-Catteloin. Autre atout : le couplage itératif de la géostatistique aux mesures de terrain rationalise et réduit l'investigation, d'après la fiche technique innovante du BRGM.

Imagerie hyperspectrale

Une autre tendance émerge grâce à l'analyse de données : l'utilisation de l'imagerie hyperspectrale, qui enregistre une image dans un grand nombre de bandes spectrales étroites et contiguës. La société Tellux développe un outil, l'Hyperlab, fournissant des concentrations d'hydrocarbures sur site et en temps réel à partir d'une carotte de sol. « Nous utilisons une caméra hyperspectrale disponible sur le marché, explique Maxime Lhoir, le directeur du développement commercial. Le travail a porté principalement sur l'algorithme de traitement du signal. » En laboratoire, un grand nombre de matrices de sols différentes contaminées aux hydrocarbures ont

SOL

Diagnostiquer les hydrocarbures totaux in situ

De nombreux sites industriels sont pollués par les hydrocarbures. Classiquement, des échantillons sont envoyés en laboratoire pour un résultat en cinq à dix jours. La société Ziltek commercialise un instrument de terrain, le RemScan. Il mesure en temps réel la concentration des hydrocarbures pétroliers totaux dans les sols, sans échantillonnage. « Même si son coût est élevé, il offre des résultats rapidement tout en conservant une précision intéressante (de l'ordre de 10 ppm) par rapport aux analyses en laboratoire », détaille Albert Sotto, le directeur de Tal Instruments qui commercialise le RemScan. L'erreur relative typique est de 10-15 % par rapport aux analyses de laboratoire. Le RemScan embarque un spectromètre infrarouge. Si la spectrométrie n'est pas une technologie nouvelle, son utilisation dans un instrument portable adapté à l'analyse des sols est innovante. « L'équipe a travaillé pendant quinze ans au développement des algorithmes de traitement pour parvenir à extraire et traiter le signal d'intérêt », raconte Albert Sotto. Déjà commercialisé, l'instrument est un vrai plus pour les bureaux d'études. « La société Envisol l'utilise, parmi une panoplie d'instruments, pour réaliser le diagnostic d'un site pollué. Grâce à sa grande maîtrise de la cartographie et à la rapidité du RemScan, elle peut rapidement proposer des actions de réhabilitation. »



ZILTEK

alimenté l'intelligence artificielle, désormais capable de déterminer la concentration en hydrocarbures. « Nous déterminons également la lithologie de l'échantillon : cela permet de valoriser directement les lots de terre pour limiter les déchets », pointe Maxime Lhoir. « Les travaux prospectifs sur le traitement des données, notamment en chimométrie, sont prometteurs : ils ouvrent à la voie à une information exhaustive du sous-sol à l'aide de méthodes peu invasives », conclut Pierre Faure-Cattelain. ■

Anaïs Marechal

Les arbres, vigies naturelles

Utiliser les arbres comme bio-indicateurs des pollutions actuelles : voilà l'idée du phytoscreening. En puisant les nutriments nécessaires dans le sol, les arbres sont susceptibles de capter les polluants présents dans les sols, les gaz du sol ou la nappe phréatique. Des échantillons de carottes de bois ou de copeaux prélevés sous l'écorce sont analysés en laboratoire pour identifier la source et l'extension géographique de la pollution. « La technique est assez mature pour les solvants chlorés et les métaux, mais reste à fiabiliser pour les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) notamment », témoigne Yves Duclos, expert en sites et sols pollués à l'Ademe. Les limites de détection sont de l'ordre du ppb (partie par milliard) à ppt (partie par billion), selon le polluant et le procédé employé. « Cette technique présente l'avantage d'être non destructive et économique », souligne Yves Duclos. **À ce jour, le phytoscreening est 4 à 8 fois moins cher que des méthodes conventionnelles, comme les sondages ou les forages, et 5 à 10 fois plus rapide**, d'après un guide publié en 2021 par IDfriches. Le projet Gesipol Phytocarb vise à améliorer ses performances en le couplant aux capteurs de terrain. L'analyse sur site d'échantillons à l'aide d'un spectromètre de fluorescence des rayons X (XRF) permet ainsi de détecter des métaux insoupçonnés, de réorienter le programme d'échantillonnage et de sélectionner les échantillons à soumettre à l'analyse en laboratoire. L'analyseur de terrain GC-MS Torion offre les mêmes avantages pour les composés organo-halogénés volatils (COHV).

SHUTTERSTOCK



PHOTOS: HERVÉ BOUTET

Le BRGM coordonne le projet Promiscs, qui vise à éliminer les PFAS, ces polluants « éternels », des sols et des eaux souterraines. Avec son pilote unique en France, il tente de mieux les caractériser et teste à l'échelle réelle des procédés de dépollution.

Dans la halle G2, des big bags se livrent à un véritable ballet. L'un est suspendu à plusieurs mètres de hauteur, d'autres sont acheminés par chariots élévateurs. À Orléans, les équipes du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) s'affairent: 86 m³ d'un mélange de sable de carrière, de matière organique (3%) et d'argile (2%) doivent être déchargés dans le pilote d'essai plurimétrique (PPM) de la plateforme Prime. «Cet automne, des mousses d'extinction d'incendie de feux d'hydrocarbures ou de solvants - d'ordinaire utilisées par les pompiers - y seront déversées», précise Stéfan Colombano, ingénieur chercheur en sites et sols pollués. **Ces mousses sont l'un des vecteurs de contamination de l'environnement aux composés per- et polyfluoroalkylés (PFAS).** Le projet européen H2020 Promiscs, coordonné par le BRGM, s'attaque à ces polluants très persistants encore mal connus, grâce à ce pilote unique en France. Lancé fin 2021, il vise à mieux caractériser le devenir des PFAS dans les sous-sols, ainsi qu'à développer des technologies de dépollution. Sept cas d'études ont été retenus, dont les essais sur le pilote PPM du BRGM. «Il y a une pression de plus en plus forte de la population sur les PFAS», remarque Jonathan Se-

Dans la cuve en cours de remplissage, toute une instrumentation est déployée : outils de mesure de permittivité, de succion et de forage.

Les dimensions du pilote (10,4 x 3,6 x 4 m, ou 120 m³) permettent de tester des procédés à l'échelle 1:1.

Le pilote grandeur nature du BRGM s'attaque aux PFAS

nechaud, le responsable du développement de l'activité sites et sols pollués chez Colas Environnement, l'un des partenaires du projet. Ces substances sont utilisées dans de nombreuses industries pour leurs propriétés antiadhésives, imperméabilisantes et leur résistance aux températures élevées. «Nous sommes intervenus sur un chantier de décontamination d'eaux de rabattement en Belgique. C'est un procédé que nous maîtrisons. Mais l'enjeu principal est de réduire les coûts de traitement de l'eau et de développer des solutions pour le sol.»

Durant vingt-quatre mois, la moitié du PPM est occupée par le projet. Le pilote, inauguré en 2020, est modulaire : grâce à l'ajout de cloisons, deux essais peuvent être menés en même temps. «C'est l'une de ses particularités, confie Clément Zornig, son coresponsable. Il est possible d'aller jusqu'à quatre modules séparés, de faire circuler de l'eau dans la double paroi ou encore de réaliser des mesures depuis la paroi latérale.» Pour Promiscues, un milieu simplifié est mis en place. «Dans ces conditions contrôlées, nous pourrions plus facilement caractériser le comportement des polluants à une échelle 1:1», poursuit Clément Zornig. «L'accès à cette échelle, tout en maîtrisant les para-

mètres, est une étape cruciale entre le laboratoire et les essais sur site», ajoute Arnault Perrault, le directeur de Colas Environnement.

Maîtrise des coûts

De la cuve à moitié remplie de sable émerge une forêt de 12 tubes noirs en polyéthylène haute densité. Ils serviront à réaliser des prélèvements d'eau dans ce sol reconstitué. De nombreux câbles suspendus plongent dans la cuve et fourniront des mesures de permittivité et de suction. «L'instrumentation vise à suivre en 3D la répartition du polluant, explique Stéfan Colombano. En injectant de l'eau jusqu'à 2 mètres de hauteur, nous allons également simuler l'effet du battement des nappes sur sa dispersion.»

Autre volet de Promiscues : la dépollution. «À ce jour, plusieurs procédés ont été testés au niveau mondial : l'adsorption, la dégradation et la stabilisation, résume l'ingénieur chercheur. Nous allons combiner plusieurs techniques.» Depuis

la plateforme, surplombant la cuve, il liste les procédés de dépollution retenus : réduction chimique par défluoruration, oxydation par persulfate et cavitation.

«Avec Microlife Solutions, une entreprise partenaire du projet, nous allons également tester un mélange d'enzymes afin de dégrader entièrement les PFAS résiduels après traitement chimique», complète Marc Crampon, le coresponsable de Prime. Toutes les combinaisons de techniques sont considérées. «Notre objectif est de mettre au point un procédé conciliant le niveau de dépollution souhaité, la consommation d'énergie et le coût», affirme Stéfan Colombano. Alors qu'aucune contrainte réglementaire n'existe à ce jour sur les niveaux de pollution des sols aux PFAS, la maîtrise des coûts est un enjeu de taille. «Nous allons œuvrer à trouver une solution applicable d'un point de vue technique et financier. Notre rôle est de réussir le transfert de la R&D sur le terrain», confie Arnault Perrault.

Ces procédés seront testés dans le PPM, mais il faut d'abord les affiner à petite échelle. Direction les blocs préfabriqués. Ils abritent des dispositifs expérimentaux aux échelles centimétrique et métrique. «Grâce à cette panoplie d'équipements, nous travaillons à des niveaux TRL 3 à 7», commente Clément Zornig. Un outil novateur dans le secteur de la dépollution va y être prochainement formulé pour attaquer les PFAS dans les sols et les nappes phréatiques : un liquide non newtonien (des liquides dont la viscosité change selon la contrainte). Cette technique innovante pallie un frein majeur à l'efficacité des procédés de dépollution in situ : l'hétérogénéité du sol. **Des mousses ou gels de liquide non newtoniens seront utilisés pour répartir les additifs dépolluants de façon homogène** dans les différentes couches du sol. Ces liquides offrent aussi la possibilité de pousser les polluants vers un puits de pompage.

Une expérience en cours dans le cadre du projet Mobil mousse illustre également l'expertise de l'équipe du BRGM. Elle vise à améliorer la récupération d'autres polluants. Sous une hotte aspirante, l'un de ces liquides – le xanthane – pousse le gazole préalablement injecté dans une colonne remplie de sable. «Pour ce projet, les rendements épuratoires sont passés d'environ 50 à 90 %, révèle Stéfan Colombano. Nous espérons aussi améliorer les rendements dans le projet Promiscues.» ■

Anaïs Marechal



Des essais de dépollution, notamment avec des liquides non newtoniens, sont menés dans des colonnes centimétriques et métriques, avant le pilote.

Dépolluer in situ plutôt qu'excaver

L'excavation reste le procédé le plus employé pour les sites pollués. Mais depuis la loi zéro artificialisation nette et grâce aux capteurs de terrain, des traitements in situ se développent : mousses de vectorisation, nanoparticules ou désorption ERH.

Comment dépolluer au mieux un ancien site industriel ? Cette question est devenue particulièrement prégnante depuis la loi zéro artificialisation nette, qui pousse à la réhabilitation des sites et des sols pollués. Si l'excavation des terres polluées reste le procédé le plus employé, avec 29,2% des sites traités en France – terres et déchets étant ensuite majoritairement stockés dans des sites spécialisés ou incinérés –, la tendance est à l'in situ. C'est-à-dire stabiliser, dégrader ou extraire et éliminer les contaminants sans aucune excavation. « L'un des critères principaux de l'attribution des "fonds friches" [qui financent notamment la reconversion d'anciens sites industriels ou miniers pollués, ndlr] est l'exemplarité. Cela a contribué à faire évoluer le marché vers l'in situ », atteste Jonathan Senechaud, le responsable développement d'activité sites et sols pollués chez Colas Environnement. Les professionnels y trouvent des avantages : exit le transport et le stockage des terres polluées... **«Le faible coût de l'in situ est un argument de poids. Mais la question du bilan carbone pèse aussi de plus en plus.** Les techniques in situ sont assez compétitives à cet égard », témoigne Arnault Perrault, le directeur de Colas Environnement.

L'innovation joue un rôle clé. « Les traitements in situ gagnent en maturité grâce à l'amélioration des capacités de diagnostic qui localisent mieux la pollution », analyse Yves Duclos, expert en sites et sols pollués à l'Ademe. Mais un long chemin reste à faire pour assurer une fiabilité tout terrain. L'hétérogénéité et la grande variété du sous-sol, l'accessibilité aux zones contaminées et la rétrodiffusion

de contaminants dans des zones moins perméables représentent des difficultés de taille pour l'in situ. Les mousses sont une innovation majeure pour l'accès aux contaminants. « Cette technique, utilisée pour l'exploitation des hydrocarbures depuis des décennies, est en cours de transfert vers la dépollution », relate Yves Duclos.

Les mousses ont une viscosité élevée et sont rhéofluifiantes. À l'injection, elles saturent les zones de forte perméabilité. Elles favorisent ainsi l'écoulement de produits dépolluants dans les zones moins perméables, ou mobilisent les contaminants pour les pomper. Le défi ? Injecter une mousse aux propriétés optimales. Le consortium Innovasol a développé un mousseur terrain dédié à l'injection de mousse dans un puits de forage. L'innovation réside dans le contrôle précis de la texture par le ratio liquide-gaz grâce à un générateur. Dans le cadre du démonstrateur technologique du projet Silphes, les mousses ont été utilisées pour améliorer le traitement in situ des eaux souterraines polluées par des produits organochlorés, denses et non miscibles à l'eau. L'objectif : améliorer l'extraction des phases résiduelles après pompage. Les niveaux de récupération grimpent à 98 % dans les essais en colonnes, et un test sur site s'est révélé prometteur.

Bien dimensionner le traitement

Autres développements en cours : l'amélioration des traitements physiques et chimiques. « Pour les produits chimiques, la difficulté est de bien caractériser leur efficacité et leurs conséquences, précise Pierre Faure-Cattelain, le président du groupe-

Le phytomanagement pour restituer un sol fertile

Les traitements in situ offrent une approche plus vertueuse de la dépollution. Un pas supplémentaire est engagé avec le fait de restituer un sol dépollué mais aussi fertile. Depuis quelques années, les traitements biologiques des pollutions – les phytotechnologies – sont apparus

dans la palette à outils des professionnels. On parle désormais de phytomanagement. L'objectif est de gérer la pollution tout en maîtrisant les risques environnementaux et sanitaires sur le long terme. Pour la gestion des sols pollués, la phytostabilisation et la phytoextraction peuvent être mises en place. Elles ne permettent cependant pas de dépolluer à des niveaux aussi élevés que les techniques conventionnelles. « L'idée n'est pas de développer des traitements dépolluants qui préservent le vivant, mais plutôt de redonner des

E. BAUDON/IRD



Le Gisfi a installé une plateforme expérimentale à Homécourt (Meurthe-et-Moselle), sur le site d'une ancienne cokerie. Des lysimètres de 2 m² instrumentés à 2 m de profondeur servent à étudier la qualité de l'eau.



Sur cette parcelle sont testés les procédés d'oxydation et de venting.

GISFI

références consultées

- « Quelles solutions pour accélérer la requalification des friches? », Guide IDfriches Auvergne-Rhône-Alpes, 2021.
- « Utilisation des mousses pour le traitement des sites et sols pollués », Ademe, 2019.

ment d'intérêt scientifique sur les friches industrielles (Gisfi). Un traitement mal dimensionné peut transformer la pollution au lieu de la dégrader.» L'entreprise Valgo a développé un réactif réducteur spécifique - Valgoris - à base de poudre de fer micrométrique et d'une source de carbone. Sa libération progressive assure une dégradation complète et irréversible des polluants chlorés. Injecté cette fois sous sa forme nanométrique, le fer utilisé par le procédé Naneau de Serpol est en mesure de dégrader les polluants récalcitrants. Autre solution couramment utilisée pour la dépollution in situ : la désorption thermique, qui assure la dégradation des contaminants par augmentation de la température. «Ce procédé était en plein développement ces dernières années, mais la hausse des prix de l'énergie a marqué un coup de frein», constate Jonathan Senechaud. Sur un site industriel pollué en

solvants chlorés, Colas Environnement teste une technique de désorption différente, celle du chauffage par résistance électrique (electrical resistance heating, ou ERH). «Le procédé thermique au gaz nécessite d'atteindre une température de plusieurs centaines de degrés, décrit Jonathan Senechaud. Ici nous chauffons à 90 °C, cela change le comportement chimique et physique des polluants.» Cette innovation permet de dégrader les composés organo-halogénés volatils puis de les aspirer, et présente l'avantage de pouvoir atteindre des profondeurs importantes. La reconversion massive des friches industrielles promet de donner un coup de fouet au secteur. ■

Anais Marechal



Fondée sur les plantes, la phytostabilisation permet de réduire la mobilité des polluants.

fonctions écologiques au sol après le traitement», détaille Yves Duclos, expert en sites et sols pollués à l'Ademe. Pour ce deuxième aspect du phytomanagement, l'un des objectifs est de permettre au sol d'assurer à nouveau des services écosystémiques. À ce titre, l'entreprise

italienne DND Biotech a mis au point une installation mobile, RoboNova 2.0. Sur site, les terres excavées sont traitées par un processus de bioremédiation par micro-organismes qui favorise l'humification et rétablit un sol écologiquement actif. Autre voie possible : produire de la valeur ajoutée grâce à l'implantation de biomasse à vocation énergétique ou encore industrielle.

Les contaminants valorisés grâce à l'écocatalyse

Transformée en poudre, la plante est insérée dans un filtre pour retenir par biosorption les métaux polluant les eaux.



CYRIL FRESILLON / CHIMECO / CNRS IMAGES



Claude Grison a fondé BioInspir en 2020.

Le laboratoire ChimEco/BioInspir exploite des plantes pour dépolluer des sites. Les métaux qu'elles sont capables de stocker sont transformés en écocatalyseurs afin de fabriquer des molécules d'intérêt pour l'industrie.

Au rez-de-chaussée du laboratoire de Grabels, près de Montpellier, des poudres végétales chargées en métaux subissent un traitement thermique de quelques heures. En sortie: des écocatalyseurs métalliques, favorisant des synthèses organiques à partir de processus durables et écologiques. «Dans ce four, nous réalisons une étape clé de notre procédé», s'enthousiasme Claude Grison, la directrice du laboratoire commun CNRS ChimEco/BioInspir. Avec son équipe, elle a mis au point un protocole précis qui «permet au métal de s'associer aux parties organiques, lui conférant des propriétés uniques». **La chercheuse a développé le concept inédit d'écocatalyse, dont les procédés sont protégés par 36 brevets** et qui lui a valu le Prix de l'inventeur européen en 2022.

La matière première des écocatalyseurs vient de la dépollution. À quelques kilomètres du laboratoire,

un local de 700 m² est dédié au séchage et au broyage de plantes hyperaccumulatrices de métaux. « Ces poudres végétales sont insérées dans des filtres pour dépolluer les effluents: elles retiennent les métaux – comme le palladium et le cuivre – par biosorption, précise Claude Grison. Ce sont elles que nous transformons en écocatalyseurs. » Entre deux paillasses, le pilote mobile conçu par la société DeltaLab – embarquant deux colonnes de filtration – est au repos. Il est déployé dans différentes industries de la chimie pour traiter leurs effluents. « Nous avons également installé un pilote fixe à Saint-Laurent-le-Minier, dans le Gard, où nous traitons les eaux polluées des galeries minières », ajoute Claude Grison.

Son équipe s'appuie aussi sur la phytoextraction pour fabriquer des écocatalyseurs. Des caisses en bois ornées de photos et de noms de végétaux locaux ou exotiques – tabouret des bois (*Noccaea caerulea*), Geissois pruinoso, coriandre... – témoignent de la diversité de plantes à disposition. Cultivées sur des sites pollués, elles extraient et accumulent dans leur biomasse des métaux d'intérêt: zinc, nickel, cuivre, manganèse. « La phytoextraction n'est pas rentable en métropole. En revanche, elle l'est en Nouvelle-Calédonie où les arbres sont de très grande taille, explique Claude Grison. Ce territoire produit près d'un quart des ressources mondiales de nickel, nous envisageons à terme de réhabiliter les sites pollués et de valoriser la biomasse en écocatalyseurs. »

60 molécules disponibles sur catalogue

La chercheuse nourrit de grandes ambitions pour son approche scientifique mêlant chimie et écologie. « Je souhaite repenser intégralement la chimie de synthèse pour réduire son empreinte environnementale. » Une panoplie de réacteurs est dédiée à la fabrication de molécules d'intérêt grâce aux écocatalyseurs. Un appareil de mécanosynthèse flambant neuf de 12 litres (« la plus grosse capacité au monde », indique la chercheuse) réalise des réactions sans solvant. Dans une salle où travaillent étudiants et permanents, un réacteur micro-ondes – d'une capacité de 12 réactions simultanées – offre des gains de temps et d'énergie aux procédés. Cosmétique, parfum, chimie fine: à ce jour, une soixantaine de molécules sont disponibles sur catalogue pour ces différents secteurs.

Les salles et paillasses défilent. Claude Grison énumère modestement les appareils dernier cri de fabrication et d'analyse. « Tous les équipements sont en double: les plus grandes capacités sont dédiées à la fabrication des molécules commercialisées, et les autres servent à nos activités de recherche. » Nouvelles variétés de plantes, nouveaux procédés de transformation... L'équipe s'active désormais pour aborder le secteur pharmaceutique, très consommateur de catalyseurs métalliques. ■

Anais Marechal

Dépolluer l'air, une efficacité à prouver

Ces dernières années, de nouveaux décrets ont durci la surveillance de la qualité de l'air pour les établissements recevant du public, et imposé des valeurs-guides pour certains composés organiques volatils (formaldéhyde et benzène). Les industriels s'adaptent. «Nous intégrons la technologie Activ'Air aux matériaux à base de plâtre installés sur les parois murales ou les plafonds», détaille Raphaël Brun, ingénieur de recherche à Saint-Gobain Research Paris. Grâce à l'incorporation d'un additif propriétaire, le formaldéhyde est converti en composé inerte par réaction chimique. Une étude en laboratoire démontre une efficacité d'élimination du formaldéhyde d'au moins 65 % pendant cinquante ans.

«Il y a un changement de paradigme depuis une dizaine d'années, constate Frédéric Thevenet, professeur à l'IMT Nord Europe.

Nous sommes passés de dispositifs actifs à une explosion de la R&D consacrée aux dispositifs passifs.» Si les

premiers reposent sur une circulation active de l'air à travers un module de traitement, les systèmes passifs – comme les plaques de plâtre – utilisent la circulation naturelle de l'air pour atténuer les pics de pollution. À la clé : une consommation

énergétique nulle et une utilisation simplifiée. «Les technologies de remédiation sont bien connues, la R&D vise surtout à optimiser la mise en œuvre des systèmes pour garantir leur efficacité.»

Mais la dépollution active n'a pas dit son dernier mot. **La deeptech Purenat a ainsi mis au point un filtre en textile non-tissé composé d'un fil contenant un agent photocatalytique.** Si la photocatalyse est utilisée depuis les années 1970, l'incorporation de l'agent actif dans la matrice du filtre permet, selon l'entreprise, «de pallier les défauts actuels de la photocatalyse».

D'autres n'hésitent pas à s'attaquer à la pollution extérieure. Aérophile propose Para-PM, un module dépolluant 3 600 m³ d'air par heure grâce à un filtre électrostatique à trois étages breveté et un procédé d'ionisation. La société garantit une élimination de 90 % des particules fines PM10 et PM2,5. «Prouver l'efficacité des dispositifs de remédiation en conditions réelles est l'un des principaux enjeux de la recherche aujourd'hui, indique Frédéric Thevenet. Face à la diversité des équipements proposés, nous devons être capables de recréer des atmosphères réalistes à l'échelle 1:1 et déployer des instruments pertinents d'évaluation.» ■

Anaïs Marechal

La R & D sur la dépollution de l'air intérieur fait de plus en plus la part belle aux dispositifs passifs. Mais, actives ou passives, les technologies sont encore peu évaluées en conditions réelles.

référence consultée

« Un plâtre anti-formaldéhyde

N. Pétigny et al., «Indoor air depolluting material: Combining sorption testing and modeling to predict product's service life in real conditions», *Building and Environment*, 202, 2021. doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107838



D.R.

LAURE GALSOMIÈS
Experte du traitement de l'air à l'Ademe

« Il n'existe aucune garantie d'acheter un système performant et sans danger »

En 2020 et 2022, l'Ademe a publié des rapports consacrés à l'épuration de l'air intérieur par photocatalyse. Quels en sont les enseignements ?

Nous avons mené et soutenu des travaux sur la photocatalyse face à l'essor des équipements sur le marché international. La dépollution est complète lorsque tous les composés ont été minéralisés en CO₂ et en eau. Notre essai comparatif conduit avec l'Institut national de la consommation montre

qu'il n'existe aucune garantie d'acheter un système performant et sans danger aujourd'hui.

La réglementation n'offre-t-elle pas cette garantie ?

Les normes garantissent une efficacité démontrée dans une enceinte de 1 m³. Or ces conditions ne sont pas représentatives de l'usage réel dans une pièce de vie. Lors de nos essais, la majorité des équipements n'étaient pas efficaces en conditions réelles.

Une évolution de la norme sur ces épurateurs par photocatalyse est prévue. Nous nous posons les mêmes questions pour l'air extérieur, et testons l'efficacité en conditions réelles particulières – une cour d'école enclavée – de dispositifs disponibles sur le marché.

Qu'en est-il de l'innocuité ?

Les technologies par photocatalyse emploient du dioxyde de titane : leur vieillissement peut être

à l'origine d'émissions de nano- et microparticules, reconnues comme cancérogènes possibles pour l'homme par inhalation. La dégradation incomplète de solvants organiques peut générer d'autres produits nocifs (cétones et aldéhydes). Dans la majorité des cas, la prévention, l'aération et la ventilation demeurent les meilleures solutions pour préserver un air sain en intérieur.

Propos recueillis par A. M.

Une flotte d'innovations en mer

Capteurs embarqués sur des récupérateurs, navires spécialisés, écrémeurs plus performants... Les moyens mis en œuvre pour nettoyer les mers continuent de progresser. « La dépollution des hydrocarbures est mature, souligne Stéphane Le Floch, le responsable du service recherche du Cedre, expert des pollutions en milieu aquatique. Les besoins se concentrent sur les nouveaux produits qui peuvent être déversés en mer lors d'accidents. » À commencer par

référence consultée

■ P.-Y. Foucher et al., « Quantification of gas evaporating from HNS spills at sea by multispectral infrared remote sensing system: Simagaz », InterSpill, 2022.

le GNL, le méthanol, l'ammoniac et les batteries servant à propulser les navires. Auxquels s'ajoutent les cargaisons. Ces dernières années, des accidents ont été recensés, impliquant des substances liquides nocives et potentiellement dangereuses : chlore, phosphorite, fertilisant potassique... « Nous manquons de données scientifiques sur le devenir des produits chimiques dans l'eau, ainsi que de moyens de lutte », constate Stéphane Le Floch. Autre problématique émergente : le plastique. En 2021, le porte-conteneurs « MV X-Press Pearl », après avoir pris feu, avait déversé 11 000 tonnes de granulés plastiques industriels dans les eaux sri lankaises.

Anaïs Marechal



IADYS



ONERA



J.-C. MASSABUJAU/MOLLUSCAN-EYE

MOLLUSCAN-EYE

Des mollusques pour capteurs, grâce à la valvométrie

La deeptech Molluscan propose un outil pour diagnostiquer la pollution de l'eau - salée ou douce - grâce au biomonitoring. Il repose sur l'analyse comportementale de mollusques bivalves. Dans un environnement pollué, ces animaux ferment leurs valves pour se protéger. Une position grande ouverte et immobile signifie quant à elle la mort de l'animal. L'entreprise utilise des espèces locales (huîtres, moules, corbicules ou dreissènes) comme vigies. **Molluscan-eye repose sur la valvométrie haute fréquence non invasive, développée en 2006 à l'université de Bordeaux.** Un micro-électroaimant est collé sur chacune des valves d'un groupe de 16 individus. La mesure de l'écartement renseigne plus de dix paramètres physiologiques et comportementaux pour réaliser

des bilans de santé. Une carte électronique immergée récupère les données et les communique via un câble ombilical à une autre carte en surface, gérant la connectivité avec le serveur. Les données sont traitées par intelligence artificielle pour identifier des comportements significatifs d'une pollution chimique. Les avantages du Molluscan-eye ? Une analyse en continu, un coût faible et une maintenance réduite. L'entreprise revendique une sensibilité 10 à 100 fois plus élevée que la chimie en eaux naturelles. En revanche, la solution ne fournit aucune information sur la nature ou la concentration du polluant. Elle s'adresse aux industriels et aux gestionnaires de zones naturelles ou portuaires, et plus de 90 valvomètres ont été installés à travers le monde. Un pilote a démontré son efficacité sur une plateforme pétrolière offshore de TotalEnergies.

JELLYFISHBOAT

Un robot compact et autonome pour les ports



ladys commercialise depuis 2018 le Jellyfishboat, un robot compact dédié à la dépollution. Son atout? L'accès à des zones inaccessibles pour les solutions concurrentes. « Il est le plus compact possible - 23 cm de hauteur une fois immergé - et autonome », indique Pauline Thévenot, la responsable du marketing et de la communication. **Le robot se déplace aléatoirement dans une zone prédéfinie et évite les obstacles grâce à son lidar embarqué.** La technologie est particulièrement adaptée à la

dépollution des ports, marinas et bassins industriels. Le choix des accessoires permet de cibler différentes pollutions : filets pour les macro-, micro- et millidéchetts ; barrage absorbant, chalut anti-pollution, spaghettis ou encore feuilles de polypropylène pour les hydrocarbures. Équipé du Mobile oil skimmer, commercialisé depuis cette année, le système est « le premier écrémeur mobile autonome sur le marché », selon Pauline Thévenot. En janvier, il a permis de dépolluer le port de Digoin, en Saône-et-Loire,

et un lac situé en aval, à la suite de l'incendie de plusieurs bateaux. Différents accessoires ont été successivement mis en œuvre pour traiter les macrodéchets, hydrocarbures et irisations. « Nous commençons à cibler la problématique des granulés plastiques industriels, très présente aux États-Unis en raison de la réglementation », précise Pauline Thévenot. Dans les ports ou les bassins industriels, le robot collecte ces déchets grâce à un filet. L'université du Littoral Côte-d'Opale a utilisé cet appareil dans le cadre de la mise au point d'une méthode standard d'évaluation de la micropollution plastique dans l'eau.

SIMAGAZ

Une caméra multispectrale qui détecte les pollutions de surface



Développé par l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (Onera) et les fabricants Noxant et Lynred, Simagaz est une caméra cryogénique multispectrale. « Sa plage d'action se situe entre 7 et 9 μm , ou 9 et 12 μm », précise Pierre-Yves Foucher, chercheur à l'Onera. Quatre images de la scène avec des propriétés spectrales différentes sont produites sur un seul plan focal, offrant des taux d'acquisition élevés (jusqu'à 75 Hz) et une grande sensibilité. « Cet instrument répond au besoin d'identification des nappes de produits chimiques restant en surface, relate Pierre-Yves Foucher. Avec Simagaz, nous observons le nuage toxique qui s'évapore. » Les gaz identifiables sont l'acétone,

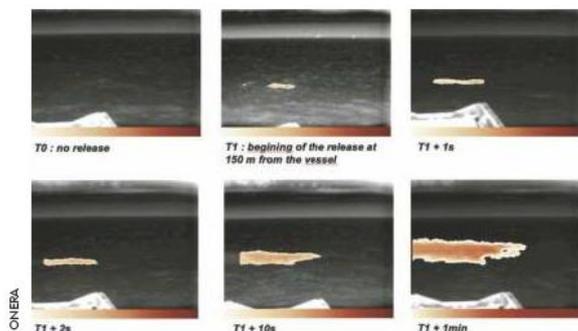
le méthane, le GNL, le dioxyde de soufre, l'ammoniaque, le benzène et le toluène. L'équipe a développé un outil compact (1 litre, 1,3 kg). « Les caméras hyperspectrales peuvent aussi détecter les gaz, mais elles sont volumineuses, chères, et la cadence d'acquisition est faible, pointe Pierre-Yves Foucher. Nous avons souhaité dépasser ces freins. » Le défi? **Miniaturiser et intégrer l'optique et le détecteur dans la machine à froid pour augmenter la sensibilité de l'instrument.** Simagaz a prouvé son efficacité lors d'une expérimentation en mer menée par le Ceppol en 2022. « Cette caméra pourrait aider les secours en étant intégrée aux bateaux d'intervention et en scannant la zone à 360° », ajoute Pierre-Yves Foucher. Trois prototypes sont proposés pour des campagnes de terrain. Un brevet porte sur l'instrument.

OSERIT 2

Modéliser le devenir des produits chimiques



Quels outils déployer? Où se trouve la pollution? Quels équipements de protection individuelle porter? Face à un incident, les autorités doivent répondre à toutes ces questions le plus rapidement possible. Dans le cadre du projet européen Manifests, l'Institut royal des sciences naturelles de Belgique (IRSNB) développe l'outil d'aide à la décision Oserit (oil spill evaluation and response integrated tool). **« L'objectif est de déterminer sous quelle forme et à quelle concentration se situe le produit pour identifier le niveau de risque »,** décrit Sébastien Legrand, le directeur du centre de prévisions marines de l'IRSNB. Oserit 1 est utilisé par les autorités maritimes depuis 2012 pour la pollution aux hydrocarbures. Oserit 2 ciblera les substances liquides nocives et potentiellement dangereuses. « Il y a une très large gamme de produits - bruts ou finis - qui présentent des comportements en mer très différents, poursuit Sébastien Legrand. La modélisation est bien plus complexe que pour les pollutions aux hydrocarbures. Il n'existe que quatre outils en Europe, et aucun ne se démarque. » Lors du déversement d'un produit, plusieurs réactions synchrones interviennent : dissolution, évaporation et volatilisation. « Nous nous servons de représentations mathématiques tenant compte des caractéristiques physico-chimiques des différents produits, indique Ludovic Lepers, ingénieur à l'IRSNB. La difficulté est que beaucoup de ces représentations ne sont pas adaptées au milieu marin. Nous manquons de données de laboratoire et de terrain. » Oserit 2 sera opérationnel d'ici à la fin de l'année et intégrera des simulations de risque en cas de déflagration et d'incendie.



ONERA