

Les microalgues : des alliées précieuses pour la dépollution des effluents contaminés par les métaux et les radioéléments

Résumé

La contamination de l'environnement par les métaux constitue un enjeu de santé public majeur à travers le monde en raison de leur persistance dans les écosystèmes et de leur toxicité vis-à-vis des organismes vivants, même à de faibles concentrations. Les technologies de biorestauration offrent généralement un large champ d'applications, une faible consommation d'énergie et de produits chimiques, un coût et un impact environnemental réduits. Les microalgues, des organismes unicellulaires photosynthétiques, sont capables de biosorber et d'accumuler des quantités significatives de métaux présents dans les eaux usées et les sols contaminés. Leur utilisation apparaît comme une alternative prometteuse, écologique et économique pour la bioremédiation des métaux et des radioéléments. Cet article explore les mécanismes biologiques impliqués dans leur dépollution par les microalgues, répertorie les espèces les plus utilisées et leurs performances, présente les avancées récentes et discute des applications industrielles.

Mots-clés

Microalgue, métal, radionucléide, bioremédiation, effluent industriel.

Abstract

Microalgae: valuable allies in the clean-up of effluent contaminated by metals and radioelements

Environmental contamination by metals is a major public health issue worldwide because of their persistence in ecosystems and their toxicity to living organisms, even at low concentrations. Bioremediation technologies generally offer a wide range of applications, low energy and chemical consumption, and low cost and environmental impact. Microalgae, unicellular photosynthetic organisms, are capable of biosorbing and accumulating significant quantities of metals present in wastewater and contaminated soils. Their use appears to be a promising ecological and economic alternative for the bioremediation of metals and radioelements. This article explores the biological mechanisms involved in their depollution by microalgae, lists the species most commonly used and their performance, presents recent advances and discusses industrial applications.

Keywords

Microalgae, metal, radionuclide, bioremediation, industrial effluent.

Dans cet article, par commodité, on désignera par le terme « métaux » ou « métaux potentiellement toxiques » les éléments métalliques, quelques métalloïdes comme l'arsenic, et certains non-métaux comme le sélénium. On n'utilisera pas le terme courant « métaux lourds », dont il n'existe pas de définition précise et qui recouvre des éléments chimiques métalliques, métalloïdes et non-métalliques dont la caractéristique commune est d'être réputés toxiques.

Métaux, radioéléments et pollution : un défi écologique majeur

Origine des métaux et radioéléments dans l'environnement

La présence des contaminants métalliques dans l'environnement résulte d'apports naturels comme le volcanisme ou l'érosion de sites où ils sont naturellement présents, mais surtout d'apports anthropiques liés aux principales activités (*tableau 1*) que sont l'exploitation minière et les activités métallurgiques, les rejets des industries chimiques et manufacturières, et l'agriculture intensive avec les traitements et l'épandage massif d'engrais phosphatés, qui contiennent du cadmium, de l'uranium et, pour certains, de l'arsenic [1]. D'autres pollutions émergent avec les déchets d'équipements technologiques électriques et électroniques, les émissions liées aux transports ou encore l'usage de produits de consommation courants, comme les textiles et produits antibactériens qui incorporent de l'argent, etc. Quant aux polluants métalliques radioactifs, leur présence dans l'environnement résulte de l'exploitation minière de l'uranium et d'autres minerais,

comme les terres rares dont l'extraction s'accompagne de rejet de thorium. Elle provient aussi d'anciens sites d'entreposage de déchets radioactifs liés à l'activité nucléaire civile et militaire, ainsi que du processus de fabrication et de retraitement du combustible nucléaire. Une source majeure provient de la contamination des sols et des eaux en situation accidentelle. Lors des catastrophes de Fukushima et Tchernobyl, ce sont respectivement 15 et 85 pétabéquels (10^{15} Bq) de césium 137, et 140 et 8 TBq (10^{12} Bq) de strontium 90 qui ont été dispersés dans l'environnement.

Les métaux potentiellement toxiques, une menace persistante pour les écosystèmes et les populations

Sur le tableau périodique (*figure 1*) sont encadrés les métaux et radioéléments qui contaminent les sols et les eaux et présentent une toxicité vis-à-vis des écosystèmes et des êtres vivants. La toxicité dépend de la nature de l'élément métallique considéré, de sa spéciation, en particulier son degré d'oxydation et son état de complexation, de sa dose et de l'organisme exposé. Ce sont généralement les ions libres qui constituent les formes métalliques les plus toxiques [5]. Les métaux sont tolérés ou régulés par les systèmes biologiques en-deçà d'un certain seuil de biodisponibilité et deviennent toxiques au-delà. À faible dose, certains métaux sont essentiels aux organismes vivants, comme le manganèse (Mn^{2+}), le fer (Fe^{2+}), le cuivre (Cu^{2+}), le cobalt (Co^{2+}), le zinc (Zn^{2+}) ou encore le nickel (Ni^{2+}). Mais d'autres sont hautement toxiques, comme le mercure (notamment la forme Hg^{2+}), le cadmium (Cd^{2+}), le plomb (Pb^{2+}) et l'arsenic ($As(III)$, $As(V)$), ainsi que le chrome (Cr^{3+} , $Cr_2O_7^{2-}$), l'argent (Ag^+) ou l'étain (Sn^{2+}).

Tableau I - Principales utilisations industrielles des métaux les plus courants et pollutions associées. Adapté de [1].

Industrie	Métaux	Pollution générée
Mines métallifères	Cd, Cu, Ni, Cr, Co, Zn	Drainage minier acide, résidus miniers
Engrais	Cd, Cr, Mo, Pb, U, V, Zn	Ruissellement, contamination des eaux de surface et souterraines, bioaccumulation dans les plantes
Boues d'épuration, lisier	Zn, Cu, Ni, Pb, Cd, Cr, As	Contamination des eaux de surface et souterraines
Alliages et aciers spéciaux	Pb, Mo, Ni, Cu, Cd, As, Te, Zn	Fabrication, élimination et recyclage des métaux, résidus, terrils
Élimination des déchets	Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr, Hg	Lixiviats de décharges, contamination des eaux de surface et souterraines
Électronique	Pb, Cd, Hg, Pt, Au, Cr, As, Ni, terres rares	Déchets métalliques liquides et solides issus des processus de fabrication et de recyclage
Électrodeposition	Cr, Ni, Zn, Cu, Cd	Effluents liquides provenant des procédés
Piles et batteries	Pb, Sb, Zn, Cd, Ni, Hg	Fluides de batteries usagées, contamination des sols et des eaux souterraines
Peintures et pigments	Pb, Cr, As, Ti, Ba, Zn, Cd	Déchets aqueux de fabrication, détérioration de vieilles peintures, pollution des sols
Transports	Zn, Cu, Cd, Pb	Ruissellement, contamination des bassins autoroutiers

Le tableau périodique des éléments chimiques est présenté avec des légendes de toxicité et de classification. Les éléments sont classés en groupes : métaux alcalins, alcalino-terreux, lanthanides, actinides, métaux de transition, métaux pauvres, métalloïdes, non-métaux, halogènes, gaz nobles, primordial, désintégration d'autres éléments, et synthétique.

Les éléments sont colorés en fonction de leur toxicité : rouge pour les éléments hautement toxiques (comme le mercure, le cadmium, le plomb, l'arsenic), orange pour les éléments modérément toxiques, et vert pour les éléments peu toxiques ou essentiels (comme le manganèse, le fer, le cuivre, le cobalt, le zinc, le nickel).

Figure 1 - Contaminants métalliques de l'environnement toxiques et écotoxiques. La toxicité dépend de nombreux facteurs, tels que la nature de l'élément métallique, sa spéciation, sa dose, l'organisme exposé. Certains métaux sont essentiels aux organismes vivants à faible dose, comme le manganèse, le fer, le cuivre, le cobalt, le zinc ou, dans une moindre mesure, le nickel. D'autres sont hautement toxiques même à faible dose, comme le mercure, le cadmium, le plomb ou l'arsenic.

Les éléments métalliques radioactifs qui contaminent l'environnement sont essentiellement l'uranium (^{235}U , ^{238}U), le thorium (^{232}Th), le césium (^{137}Cs) et le strontium (^{90}Sr). À leur toxicité chimique s'ajoute leur toxicité radiologique, en particulier pour le césium et le strontium dont la période de demi-vie est de l'ordre de 30 ans. Ces métaux non-essentiels n'ont pas de fonction biologique connue mais peuvent tout de même être captés et/ou transformés par les organismes vivants en empruntant les voies métaboliques des éléments essentiels. Ils interagissent avec des macromolécules comme les protéines, l'ADN, les lipides membranaires ou d'autres

molécules dont ils perturbent le comportement, et créent un stress oxydant soit directement pour les éléments ayant des propriétés d'oxydoréduction, soit en perturbant les défenses antioxydantes des cellules. Contrairement aux polluants organiques, les polluants métalliques ne sont pas biodégradables. Ils contaminent durablement les écosystèmes et la chaîne trophique, où leur accumulation entraîne des conséquences graves sur la santé des écosystèmes et des populations, provoquant des dommages biologiques irréversibles, tels que perturbations du système nerveux, maladies rénales, hépatiques, respiratoires ou encore cancers.

Tableau II - Principaux avantages et inconvénients des technologies physico-chimiques conventionnelles pour l'élimination des métaux des effluents liquides. Adapté de [1].

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Précipitation chimique	Simple, pas de sélectivité des métaux	Séparation difficile et peu efficace à fortes concentrations, production d'une grande quantité de boues contenant des métaux, coûts d'entretien et d'élimination des boues élevés
Coagulation/ Floculation	Capacité d'inactivation bactérienne, bonnes caractéristiques de décantation et de déshydratation des boues	Consommation de solvants, nécessité d'éliminer les boues
Flottation	Sélectivité des métaux, faibles temps de rétention, élimination des petites particules	Coût d'investissement, d'entretien et d'exploitation élevés
Adsorption	Applicable à une grande variété de polluants, capacité élevée, cinétique rapide, sélectivité possible	Performance dépendante de l'adsorbant, nécessité d'une dérivation chimique pour améliorer la capacité de sorption
Échange d'ions	Efficacité élevée, possibilité de récupérer les métaux, forte capacité de régénération	Sensibilité à la présence de particules, coûts d'investissement et d'entretien élevés
Filtration membranaire	Faible consommation de produits chimiques, faible production de déchets solides, faible encombrement	Coût d'investissement, de maintenance et d'exploitation élevés, encrassement de la membrane, débit limité
Osmose inverse	Production d'effluents purs (en vue d'une réutilisation)	Pression élevée requise, coûteux
Oxydation/Réduction chimique	Minéralisation	Besoin de produits chimiques
Traitement électrochimique	Sélectivité modérée pour les métaux, capacité à traiter des effluents > 2g/L, pas de besoins chimiques, tolérance aux solides en suspension	Coûteux pour traiter des concentrations élevées, libération possible de H ₂ (inflammable), nécessité de filtrer les floccs
Évaporation	Production d'effluents purs (en vue d'une réutilisation)	Coûteux en énergie, nécessité d'éliminer les boues

Des algues microscopiques pour des solutions écologiques

Traitements conventionnels des effluents contenant des métaux

Le traitement des effluents liquides, qu'ils soient domestiques, urbains ou industriels, comporte en général un prétraitement afin d'éliminer les éléments grossiers, les particules en suspension et les liquides non miscibles par des méthodes mécaniques, physiques ou encore chimiques. S'ensuit un traitement secondaire plus diversifié selon l'origine et la composition de l'effluent, mettant en œuvre des traitements physico-chimiques, mais également biologiques, pour réduire la concentration en polluants et, enfin, un traitement de finition qui garantit une qualité d'eau autorisant son rejet dans le milieu extérieur ou sa réutilisation. Parallèlement, une filière de traitement des boues, sous-produits de l'épuration des eaux, basée essentiellement sur des étapes d'épaississement, d'hygiénisation, de déshydratation avant mise en décharge, valorisation ou incinération, est mise en place. Le traitement des effluents et des eaux environnementales contaminées par des métaux et des radioéléments est actuellement principalement réalisée à l'aide de méthodes physico-chimiques conventionnelles (tableau II). Elles incluent notamment la précipitation chimique, l'adsorption, l'échange d'ions, la coagulation/floculation, la filtration membranaire, l'osmose inverse ou encore des traitements électrochimiques. Ces technologies, bien qu'efficaces, présentent certains inconvénients, notamment des coûts de fonctionnement et de maintenance élevés, une consommation énergétique importante, l'intolérance aux espèces organiques, leur coût et/ou une faible

efficacité pour l'élimination de contaminants très dilués et la génération d'importantes quantités de déchets secondaires qu'il faut gérer.

Les microalgues comme alternative biologique pour la dépollution des métaux

Les technologies d'assainissement basées sur des organismes biologiques tels que les bactéries, les champignons, les plantes et les algues offrent une alternative compétitive, efficace et respectueuse de l'environnement. Les bioprocédés sont développés depuis de nombreuses années pour l'industrie du traitement de l'eau et des sols et la valorisation des déchets. Ils peuvent être implantés *in-situ* ou *ex-situ* par rapport au site pollué et être de type intensif, comme les boues activées, ou extensif, comme le lagunage. De telles méthodes sont par exemple mises en œuvre afin de traiter des effluents miniers contaminés par des éléments métalliques. Les entreprises BioPlanta et WIZUTEC ont ainsi utilisé des roseaux et des carex pour traiter des eaux minières contaminées par de l'arsenic, de l'uranium et d'autres métaux sur le site de Schlemma-Alberoda en Allemagne. Dans le cadre du projet KCCL, en Ouganda, le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) a retraité et extrait par biolixiviation au moyen de bactéries le cobalt contenu dans des résidus miniers.

Les microalgues sont des organismes photosynthétiques, c'est-à-dire qu'elles sont capables de synthétiser de la matière organique à partir de l'énergie lumineuse, de l'eau et du dioxyde de carbone. Elles se développent ou survivent dans une grande diversité de milieux, y compris les eaux polluées par des métaux toxiques. Leur croissance rapide, supérieure

à celle des plantes, leur adaptabilité aux conditions environnementales, leur faible coût de production, leur capacité à fixer une large gamme de métaux et à résister à leur toxicité chimique, leur affinité et leur spécificité pour ces contaminants, en font des organismes adaptés à des applications de bioremédiation, ou phycoremédiation, dans des contextes industriels variés. Leur grand rapport surface/volume, qui permet un contact important avec le milieu à épurer, leur paroi cellulaire, qui porte de nombreux groupes fonctionnels capables de lier et d'immobiliser les contaminants, et divers mécanismes qui permettent d'incorporer des métaux, de les séquestrer au niveau subcellulaire, de les détoxifier en modifiant leur spéciation, les rendent très efficaces pour biodépolluer les métaux et radioéléments [1-3]. Selon les applications, les microalgues peuvent être mises en œuvre sous forme de biomasse vivante ou morte – dite désactivée –, libres ou fixées sur un support, cultivées *in situ* dans les milieux à épurer ou utilisées *ex situ*, seules ou en consortium d'espèces. En plus d'éliminer les polluants, elles produisent une biomasse riche en lipides, le stress métallique pouvant augmenter leur contenu lipidique [4] et en protéines, qui est valorisable en biocarburants ou engrais biosourcés. Enfin, elles peuvent être utilisées pour récupérer des métaux précieux.

Les secrets biochimiques des microalgues pour capturer les métaux

Les plantes et les microorganismes sont capables d'adsorber, absorber, utiliser ou transformer les métaux essentiels et non-essentiels, ainsi que de les accumuler à des concentrations beaucoup plus importantes que nécessaire à leur métabolisme [6]. Afin de maintenir une concentration intracellulaire optimale des métaux essentiels et de minimiser les effets toxiques des éléments non essentiels, les organismes vivants ont recours à différents mécanismes homéostasiques de transport, de distribution dans la cellule et de détoxification. Certaines souches, tolérantes aux métaux ou hyperaccumulatrices, sont même capables de se développer dans des environnements particulièrement riches en métaux et d'en accumuler de grandes quantités. Des souches de *Chlorella* et *Scenedesmus*, isolées de lacs riches en métaux, accumulent par exemple davantage de cuivre que des souches des mêmes genres cultivées en laboratoire [7]. Les mécanismes de captage des métaux par les microalgues sont schématisés (figure 2). Ils se distinguent par la localisation finale du polluant, le métal pouvant rester à l'extérieur de la cellule, se fixer à la surface cellulaire ou bien être incorporé et éventuellement stocké

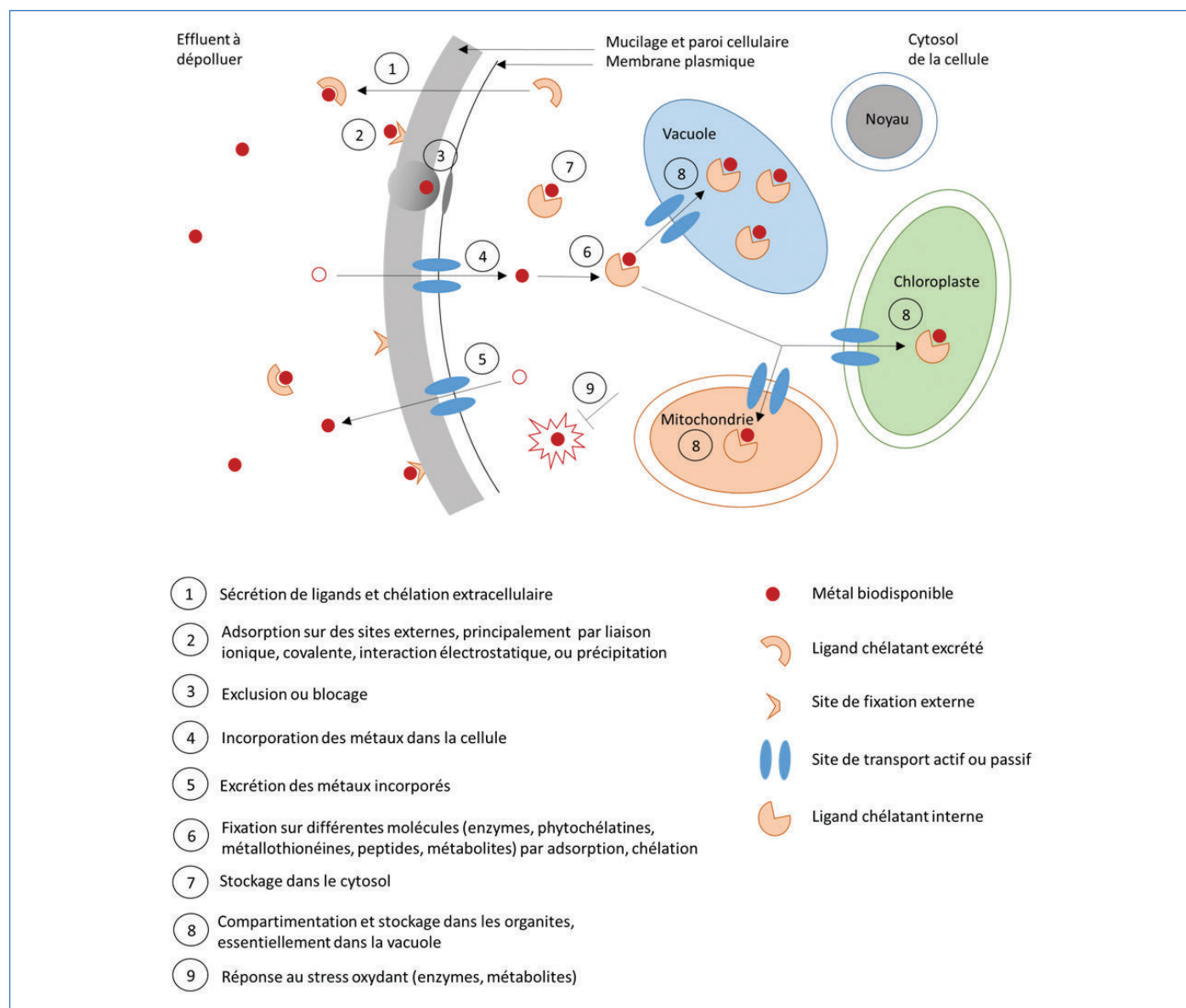


Figure 2 - Mécanismes de captage et d'accumulation des métaux par les microalgues.

dans un compartiment subcellulaire, par la nécessité ou non d'un métabolisme cellulaire actif, et par la modification ou non de la spéciation du métal par des réactions chimiques et biochimiques. On différencie les mécanismes d'adsorption passive d'une part, et les mécanismes d'incorporation, transformation et stockage d'autre part.

Quand les métaux s'accrochent aux algues : adsorption extracellulaire passive

Les microalgues fixent d'abord les métaux présents dans le milieu par adsorption extracellulaire sur le mucilage et la paroi externe des cellules. Le mucilage est une substance visqueuse enrobant les cellules, principalement composé de polysaccharides, sécrétée par de nombreuses microalgues et cyanobactéries et capable de fixer des quantités importantes d'ions métalliques. La paroi cellulaire des microalgues présente ensuite des groupements fonctionnels, notamment carboxyles, amines, hydroxyles, sulfonates ou encore phosphates qui, du fait de leur charge négative, peuvent lier des métaux sous forme cationique. Les ions métalliques se fixent à la surface des microalgues principalement par liaisons électrostatiques, interactions ioniques ou liaisons covalentes. Les algues tolérant des concentrations métalliques extracellulaires importantes peuvent aussi bénéficier de mécanismes d'exclusion des métaux au niveau de la paroi cellulaire ou de la membrane plasmique [8]. Enfin, la cellule peut sécréter des ligands possédant des groupements fonctionnels, tels que des phosphates, carbonates ou sulfures, qui vont interagir avec les métaux en solution et les précipiter dans le milieu extérieur ou à la surface des cellules. Cette étape d'adsorption extracellulaire, nommée « biosorption » (littéralement adsorption sur un biosorbant) est rapide et ne nécessite pas de conditions métaboliques actives. Elle est observée avec des microalgues vivantes ou mortes. Elle est limitée par le nombre de sites fonctionnels disponibles et dépend fortement des conditions physico-chimiques du milieu, telles que le pH, la concentration initiale des métaux, la concentration de la biomasse et la présence de substances compétitives.

Incorporation et stockage dans les cellules : bioaccumulation intracellulaire

Une fois adsorbés, les métaux peuvent pénétrer dans les cellules par diffusion ou être incorporés par transport passif ou actif. Les mécanismes de transport membranaire sont variés et font intervenir des canaux ioniques qui assurent le passage des ions selon le gradient électrochimique, des transporteurs qui transportent une variété de cations et de métaux monovalents ou divalents de l'extérieur de la cellule vers le cytoplasme, d'autres encore qui favorisent l'efflux des cations métalliques divalents du cytoplasme vers l'extérieur de la cellule ou vers des compartiments intracellulaires, etc. [6]. Les formes chimiques neutres diffusent à travers les membranes. Les métaux non essentiels pénètrent dans la cellule en empruntant les systèmes de transport des ions essentiels. Par exemple, le césium Cs^+ utilise ceux du potassium K^+ , le strontium Sr^{2+} ceux du calcium Ca^{2+} .

Dans le cytosol, les métaux sont pris en charge par adsorption ou chélation. Les métaux non essentiels ou en excès par rapport aux besoins métaboliques cellulaires interagissent avec des métabolites ou des protéines spécifiques, qui les neutralisent. Ils sont stockés dans différents compartiments cellulaires où leur spéciation est modifiée par des processus d'oxydoréduction et de chélation afin de les rendre moins

toxiques ou de faciliter leur transport. De nombreux ligands sont impliqués dans la chélation des métaux, notamment le glutathion, les phytochélatines et les métallothionéines, des composés peptidiques riches en cystéine qui chélatent les métaux *via* des liaisons soufrées. Les phytochélatines en particulier sont impliquées dans la détoxification de nombreux ions métalliques qui induisent leur synthèse chez les microalgues (Cd^{2+} , Ag^+ , Pb^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , etc.) [8]. Les métaux peuvent aussi être chélatés par des acides aminés libres, comme la proline qui contribue à la tolérance au cuivre chez la micro-algue verte *Trebouxia erici* [9] ou encore par des acides organiques di- et tricarboxyliques, comme les acides oxalique, fumarique, malique et citrique. Ces complexes métalliques sont stockés dans le cytosol ou dans différents compartiments cellulaires, essentiellement dans la vacuole.

Selon les métaux et les espèces, d'autres compartiments peuvent être impliqués, tels que les chloroplastes, les mitochondries, le noyau, et des corps constitués de polyphosphates, qui ont la capacité de complexer en particulier les cations métalliques (Cd^{2+} , Pb^{2+} , Hg^{2+} , Co^{2+} , etc.) [8]. Les métaux en excès induisent un stress oxydant avec production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS). Afin de limiter les dommages, les cellules mettent en place une réponse antioxydante qui repose sur l'action conjointe d'enzymes catalysant la réduction des ROS, telles que les superoxyde dismutases, la catalase et les peroxydases, et de molécules antioxydantes telles que l'acide ascorbique et le glutathion. Le processus d'incorporation, de fixation, de biotransformation et de stockage, également nommé dans la littérature « bioaccumulation », fait intervenir des conditions métaboliques actives. Plus lent que l'adsorption, il est observé chez les microalgues vivantes.

Un éventail de microalgues et de stratégies pour optimiser l'efficacité de dépollution

La diversité des microalgues au service de la dépollution

Le choix des microalgues pour des biotechnologies de remédiation est large grâce à la diversité exceptionnelle qu'offrent ces organismes, tant au niveau des espèces que de leurs performances. Elles sont sélectionnées en fonction de leur capacité à traiter la pollution ciblée et à résister à la toxicité du polluant et de l'environnement. L'utilisation d'organismes vivants implique leur viabilité dans des environnements parfois très toxiques et très chargés en métaux. Des espèces isolées d'effluents ou de sites contaminés à long terme par des métaux sont intéressantes car déjà acclimatées aux conditions locales [10]. Les principales espèces de microalgues utilisées pour l'élimination des métaux, avec leurs capacités de fixation, en fonction du mode de mise en œuvre, sont présentées dans le *tableau III*. Des microalgues vertes appartenant aux genres *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Desmodesmus* et des cyanobactéries comme *Spirulina* ont montré une grande capacité à accumuler des métaux lourds variés, tant par biosorption que par accumulation intracellulaire [2,3]. La microalgue *Chlorella vulgaris*, efficace pour éliminer un large panel de métaux, notamment le cadmium, le plomb, le cuivre et le zinc, se distingue par sa robustesse. D'autres espèces comme *Chlorella salina* et *Chlorella sorokiniana* éliminent efficacement le cobalt, le zinc, le manganèse et le chrome [11,12]. Le genre *Scenedesmus*, notamment *Scenedesmus obliquus*, et le genre *Desmodesmus*, appartenant à la même famille et adapté aux environnements acides, sont efficaces pour épurer le cadmium, le plomb, le chrome et le zinc, en particulier dans les effluents industriels et miniers.

Tableau III - Efficacité de captage des métaux, sous forme ionique, par différentes microalgues, selon leur mise en œuvre (libres ou immobilisées) et leur état physiologique (vivantes ou mortes).

Métal	Microalgue	Capacité d'accumulation (mg/g _{MS})	Mise en œuvre	Référence
Ag(I)	<i>Coccomyxa actinabiotis</i>	200	Libres, vivantes / mortes	[13]
Al(III)	<i>Scenedesmus subspicatus</i>	7	Vivantes, libres	[14]
As(V)	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	4,6	Vivantes, libres	[15]
	<i>Chlorella vulgaris</i>	3,9	Vivantes, libres	[15]
	<i>Scenedesmus almeriensis</i>	5	Vivantes, libres	[15]
Cd(II)	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	2,3 - 6	Libres	[2]
		29-80	Immobilisées	[2]
		43	Mortes	[2]
	<i>Chlorella sorokiniana</i>	192	Immobilisées	[2]
		33	Mortes	[2]
	<i>Chlorella homosphaera</i>	8,4	Libres	[2]
	<i>Chlorella vulgaris</i>	2,6 - 58	Vivantes	[1]
		8 - 87	Mortes	[2]
	<i>Desmodesmus pleiomorphus</i>	61-85	Vivantes	[1]
		59	Mortes	[2]
	<i>Scenedesmus obliquus</i>	11	Vivantes	[1]
		24 - 108	Mortes	[2]
	<i>Spirulina platensis</i>	45	Vivantes	[2]
		37-71	Immobilisées	[2]
		98	Mortes	[2]
Co(II)	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	1	Vivantes	[2]
	<i>Coccomyxa actinabiotis</i>	15	Vivantes	[16]
	<i>Chlorella salina</i>	0,5 nmol/10 ⁶ cell	Libres	[11]
		1,6 nmol/10 ⁶ cell	Immobilisées	[11]
Cr(III)	<i>Chlorella miniata</i>	14 - 41	Mortes	[2]
	<i>Chlorella sorokiniana</i>	59	Libres	[12]
		69	Immobilisées	[12]
Cr(VI)	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	18 - 26	Mortes	[2]
	<i>Chlorella vulgaris</i>	23	Mortes	[2]
	<i>Scenedesmus obliquus</i>	16	Mortes	[2]
	<i>Spirulina sp.</i>	333	Vivantes	[2]
		143	Mortes	[2]
Cu(II)	<i>Chlorella vulgaris</i>	3,6	Vivantes	[2]
		4-48	Mortes	[2]
		78	Libres	[2]
		63	Immobilisées	[2]
	<i>Scenedesmus obliquus</i>	1,8	Vivantes	[2]
		20	Mortes	[2]
	<i>Scenedesmus subspicatus</i>	13	Mortes	[2]
	<i>Spirulina platensis</i>	10	Mortes	[2]
Fe(III)	<i>Chlorella vulgaris</i>	25	Mortes	[2]
Hg(II)	<i>Chlorella vulgaris</i>	16	Mortes	[2]
	<i>Scenedesmus subspicatus</i>	9	Mortes	[2]
Mn(II)	<i>Chlorella salina</i>	0,2 nmol/10 ⁶ cell	Libres	[11]
		3 nmol/10 ⁶ cell	Immobilisées	[11]

Ni(II)	<i>Chlorella miniata</i>	1,4	Vivantes	[2]
		20	Mortes	[2]
	<i>Chlorella vulgaris</i>	15	Vivantes	[1]
		28	Immobilisées	[1]
		12 - 42	Mortes	[2]
	<i>Scenedesmus obliquus</i>	19	Mortes	[2]
	<i>Spirulina platensis</i>	21	Mortes	[2]
	<i>Spirulina sp.</i>	1378	Vivantes	[2]
Pb (II)		515	Mortes	[2]
	<i>Chlorella vulgaris</i>	17 - 131	Mortes	[2]
	<i>Scenedesmus subspicatus</i>	39	Mortes	[2]
Zn (II)	<i>Chlorella salina</i>	1,3 nmol/10 ⁶ cell	Libres	[11]
		3 nmol/10 ⁶ cell	Immobilisées	[11]
	<i>Chlorella vulgaris</i>	6 - 43	Mortes	[2]
	<i>Cyclotella cryptica</i>	243	Vivantes, libres	[14]
	<i>Scenedesmus obliquus</i>	7 - 82	Mortes	[2]
	<i>Scenedesmus subspicatus</i>	72	Vivantes, libres	[14]
	<i>Desmodesmus pleiomorphus</i>	360	Vivantes	[1]

La microalgue *Coccomyxa actinabiotis*, isolée d'un environnement contaminé en argent, accumule des quantités très importantes de ce métal. La cyanobactérie *Spirulina platensis*, utilisée pour l'élimination du nickel et du chrome, résiste à de fortes concentrations de métaux et se prête bien à une culture à grande échelle.

Facteurs influençant l'efficacité de la dépollution

Les capacités de dépollution et la spécificité vis-à-vis des métaux sont très variables d'une espèce de microalgue à l'autre, du fait de leur morphologie, de leur taille, de leur métabolisme ou encore de la nature de leurs groupements fonctionnels surfaciques et de leurs charges. Les capacités diffèrent aussi selon l'état physiologique des microalgues, la densité de cellules en contact avec l'effluent, les conditions de mise en œuvre, la nature et la concentration initiale en ions métalliques, la présence d'éléments chimiques compétiteurs, le temps de contact ou encore le recyclage de la biomasse. Parmi les facteurs physico-chimiques, la salinité et le pH du milieu influent sur l'interaction entre l'ion métallique et l'algue en agissant sur la spéciation du métal et la protonation des groupes fonctionnels des parois des cellules.

Stratégies pour booster les performances des microalgues

Pour maximiser l'efficacité de dépollution, plusieurs stratégies sont mises en place, parmi lesquelles la sélection de la biomasse, vivante ou désactivée en fonction du contexte, l'optimisation des conditions de culture, l'immobilisation des microalgues sur des supports solides, l'emploi de consortiums et la manipulation génétique. Les cellules vivantes offrent une flexibilité métabolique accrue, mais elles peuvent être sensibles à la toxicité des polluants, contrairement à la biomasse désactivée. La biomasse désactivée est souvent aussi, voire plus, efficace que la biomasse vivante (*tableau III*), ce qui s'explique par l'augmentation du nombre de sites de fixation disponibles, les sites internes de la cellule étant

directement accessibles. Néanmoins, les mécanismes actifs, qui libèrent les sites de fixation externes en internalisant les métaux adsorbés, sont absents, ce qui peut limiter la capacité de dépollution. Lors de l'emploi de biomasse vivante, les conditions de culture influencent fortement la capacité des algues à absorber les métaux. Les mécanismes d'internalisation, de modification de spéciation et de séquestration intracellulaire sont plus efficaces dans des conditions spécifiques de pH, de lumière, de température et de disponibilité en nutriments.

L'immobilisation de cellules vivantes améliore généralement l'efficacité de la décontamination par rapport à l'emploi de cellules libres (*tableau III*). Sujettes à moins d'auto-ombrage, leur photosynthèse est plus active [11]. De plus, la matrice d'immobilisation participe à la sorption des métaux et à la protection des cellules contre leur toxicité. Cette technique prolonge la durée de vie des cellules, facilite leur récupération ou leur régénération après traitement et améliore la cinétique d'adsorption des métaux. Des billes d'alginate sont généralement employées, mais des supports plus originaux peuvent aussi être utilisés. Ainsi, l'association de cellules de *Chlorella sorokiniana* immobilisées sur une éponge, utilisée à 1 g/L, permet d'éliminer 90 % du chrome (Cr³⁺) initialement présent à 25 mg/L [12]. L'association de plusieurs espèces dans des consortiums algaux ou algues-bactéries augmente la polyvalence et la stabilité des systèmes de traitement. Ces associations permettent d'éliminer simultanément des métaux divers et de rendre la biomasse moins sensible à la présence de composés toxiques et d'autres microorganismes. Enfin, les approches pour augmenter l'efficacité, la spécificité et la tolérance aux métaux toxiques des microalgues *via* l'ingénierie génétique sont en plein développement. Les modifications génétiques visent à accroître l'affinité des métaux pour la surface des cellules, augmenter l'incorporation cellulaire en jouant sur les mécanismes de transport, de chélation, de résistance au stress oxydant, de séquestration, de biotransformation et de régulation de l'expression des gènes [17].

Tableau IV - Efficacité d'élimination des métaux dans des effluents miniers acides (exprimée en % de la concentration initiale) par des microalgues (*Desmodesmus asymetricus*) désactivées ou vivantes en suspension dans l'effluent à 2 g/L et 0,65 g/L, respectivement [19].

Mise en œuvre	Temps de contact	Al	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Se	Zn
Biomasse désactivée	15 min	99,6	83	83	85	79	60	99,9	47	69	25	99,6
Microalgues vivantes, libres	24 h	17	8	25	15	44	10	77	16	50		16
	30 j	100	2	43	78	93	97	100	100	95		100

La dépollution des métaux et des radioéléments par les microalgues à l'échelle industrielle

Traitement des métaux dans les effluents miniers, industriels et urbains

Le traitement des métaux par des microalgues dans des effluents très variés provenant d'industries minières, textiles, métallurgique, agroalimentaire, de l'agriculture ou encore de stations d'épurations est largement documenté [4,18,19]. Le *tableau IV* propose un exemple d'épuration d'effluents miniers par des microalgues *Desmodesmus* vivantes ou désactivées. La biomasse désactivée élimine plus de 99,5 % de l'aluminium, du fer et du zinc dissous, et 69 à 85 % de l'arsenic, du cadmium, du cobalt du chrome et du nickel. La biomasse vivante élimine la totalité de l'aluminium, du fer, du manganèse et du zinc, 93 à 97 % du cuivre, du chrome et du nickel et 78 % du cobalt [19]. L'essentiel des applications est mis en œuvre à l'échelle laboratoire. Bien que le traitement des métaux à grande échelle par des microalgues soit actuellement limité, les applications à l'échelle pilote et semi-industrielle se multiplient. Les biosorbants à base de microalgues capables de fixer les métaux sont commercialisés et utilisés depuis plusieurs décennies déjà [1,2]. En matière de procédés basés sur la biomasse vivante, au cours des dix dernières années, plusieurs entreprises, principalement aux États-Unis, au Royaume-Uni, en Espagne, en Australie et en Nouvelle-Zélande, ont développé des procédés de traitement industriels de polluants inorganiques et organiques dans des effluents municipaux, industriels et agricoles, basés sur des microalgues vivantes telles que *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Micractinium*, *Cryptomonas*, éventuellement associées à des bactéries [20, 21]. Certains systèmes traitent jusqu'à 180 m³/j. Les applications industrielles actuelles visent principalement à réduire le dioxyde de carbone, l'azote et le phosphore. Le traitement d'effluents riches en nutriments s'accompagne de production de biomasse algale qui est ensuite valorisée en biocarburants et en engrais. En utilisant des souches robustes, adaptées à la toxicité des métaux et capables de les accumuler, ces systèmes pourraient être utilisés pour l'épuration et la production de métaux à grande échelle.

Des entreprises australiennes ont testé un procédé basé sur la microalgue *Chlorella vulgaris* à l'échelle semi-industrielle de 250 litres pour séquestrer les gaz de combustion de biosolides issus d'une station d'épuration, les convertir en biomasse et réduire simultanément de façon significative la concentration des métaux cuivre, zinc et nickel dans les eaux usées [22]. En Espagne, les effluents d'une industrie sidérurgique ont été traités par la cyanobactérie *Arthrospira maxima* à l'échelle pilote de 100 litres. Cultivée dans les eaux usées, la microalgue a bio-assimilé les polluants métalliques présents, réduit la concentration de fer de 97,5 % et épuré les hydrocarbures [23]. Les microalgues présentent un grand intérêt pour la réhabilitation de sites miniers après leur exploitation, particulièrement

dans des régions à fort ensoleillement. Les systèmes de traitement pourraient intégrer la production de microalgues à partir d'effluents, la capture du CO₂, le traitement des eaux métallifères acides par biomasse désactivée ou vivante et la production d'amendements pour les sols [19].

Traitement des métaux radioactifs dans les effluents industriels

Tout au long du cycle du combustible nucléaire sont produits une variété de métaux radioactifs. Ces éléments sont éliminés des effluents par des procédés physico-chimiques robustes et efficaces, mais coûteux et qui génèrent d'importants volumes de déchets secondaires. La décontamination par des organismes vivants ou désactivés constitue une alternative aux procédés traditionnels, particulièrement intéressante pour le traitement de contaminants peu concentrés et de grands volumes. Diverses microalgues, appartenant aux genres *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Parachlorella*, *Coccomyxa* et *Closterium* notamment, ont montré leur efficacité pour capter les métaux radioactifs [16,24,25] par des mécanismes biochimiques identiques à ceux déployés pour les isotopes non radioactifs. Le *tableau V* présente les performances d'épuration d'effluents radioactifs par quelques microalgues. La microalgue verte *Coccomyxa actinabiotis*, isolée d'un bassin de stockage de combustibles nucléaires usés, élimine complètement ^{110m}Ag, ⁶⁵Zn et ¹³⁷Cs des effluents nucléaires en 24 heures et fixe entre 48 et 90 % de ⁶⁰Co, ⁵⁸Co, ⁵⁴Mn et ²³⁸U [16].

Malgré les efforts de recherche importants, très peu d'applications industrielles ont vu le jour. Au Japon, le nettoyage post-Fukushima s'est concentré sur les traitements physico-chimiques, tels que l'adsorption sur des zéolithes. Des microalgues *Parachlorella sp. binos* ont été testées pour éliminer le césium et le strontium des effluents, mais à petite échelle (*tableau V*) [25]. En France, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) et l'Institut Laue-Langevin ont développé un pilote de procédé à base de microalgues capable de traiter, en photobioréacteur, plusieurs dizaines de litres d'effluents nucléaires (*figure 3*) [26]. Des microalgues ont également été mises en œuvre à l'échelle industrielle pour décontaminer *in situ* une piscine de stockage de composants radioactifs de 360 m³ [16]. Employées vivantes, en suspension dans l'eau, les microalgues *C. actinabiotis* ont épuré avec succès les radioéléments ^{110m}Ag, ⁶⁰Co et ⁵¹Cr et concentré une activité moyenne de 20 MBq/g_{masse sèche}. Après avoir été récoltées par filtration, leur volume a été réduit de 90 % par séchage, tout en retenant la totalité des radioéléments capturés. Les performances d'épuration de ce bioprocédé sont voisines de celle des résines échangeuses d'ions, la méthode couramment employée pour la dépollution de ce site, et le volume de déchets est drastiquement réduit. L'un des défis de l'industrie nucléaire est la réduction du volume des déchets radioactifs ultimes qui nécessitent une gestion sécurisée et durable. Les microalgues chargées en radioéléments

Tableau V - Efficacité de la décontamination de radionucléides dans des effluents nucléaires (en % de la concentration initiale) par des microalgues vivantes en suspension.

Microalgue	Radionucléides	Efficacité d'élimination (%)		Référence
<i>Chlorella vulgaris</i>	²⁴¹ Am	90 en 3 h		[24]
	²³⁹ Pu	70 en 3 h		
<i>Coccomyxa actinabiotis</i>	^{110m} Ag	100 en 1 h	100 en 24 h	[16]
	⁶⁰ Co	53 en 1 h	66-91 en 24 h	
	⁵¹ Cr	28 en 1 h	48-94 en 24 h	
	¹³⁷ Cs		100 en 24 h	
	⁵⁴ Mn	59 en 1 h	86-90 en 24 h	
	¹²⁴ Sb		30 en 24 h	
	²³⁸ U		95 en 24 h	
	⁶⁵ Zn	80 en 1 h	79-100 en 24 h	
<i>Parachlorella sp. Binos</i>	¹³⁷ Cs	50 en 8 h		[25]
	⁸⁵ Sr	76 en 8 h		



Figure 3 - Pilote de procédé de décontamination d'effluents radioactifs par microalgues. © ecliptique/Laurent Thion.

ont généré un volume de déchets au moins cent fois inférieur à celui des résines. Cet exemple grandeur nature montre que de nouvelles solutions de bio-décontamination sont réalisables pour l'industrie nucléaire et pour les opérations d'assainissement de l'environnement. Les biotechnologies pourraient être utilisées à l'intérieur des installations nucléaires, où elles suppléeraient aux méthodes physico-chimiques conventionnelles et réduiraient le volume des déchets radioactifs, au point de sortie des installations nucléaires pour réduire les émissions dans l'environnement, et pour la

décontamination d'eaux polluées accidentellement. La sélection des meilleurs microorganismes ou biosorbants à utiliser dépendra des radioéléments à capter et des conditions spécifiques d'environnement. En matière de mode opératoire, la décontamination en bassin sera plus simple à mettre en œuvre *in situ* et *ex situ* et demandera peu d'énergie, tandis que les procédés en photobioréacteurs seront mieux contrôlés et mieux optimisés.

Les microalgues, une solution d'avenir pour la dépollution des métaux et des radioéléments, avec des défis à relever

L'utilisation des microalgues pour la dépollution des métaux offre des avantages indéniables, alliant coûts réduits, respect de l'environnement, efficacité élevée, adaptabilité vis-à-vis des effluents. Les microalgues sont cultivables à partir de ressources peu onéreuses, comme les eaux usées ou les effluents industriels riches en nutriments. En réalisant la photosynthèse, elles utilisent l'énergie solaire et le dioxyde de carbone pour leur croissance et contribuent à la réduction des gaz à effet de serre. Grâce à leur diversité et à leur capacité d'adaptation à divers environnements, elles peuvent être cultivées dans des effluents industriels contaminés en métaux. Leurs propriétés intrinsèques les rendent aptes à éliminer une large gamme de métaux, radioactifs ou non, de manière efficace et sélective. Leur utilisation est particulièrement adaptée pour traiter des contaminants métalliques peu concentrés dans de grands volumes d'effluents, là où les procédés physico-chimiques peuvent être très consommateurs d'énergie et de réactifs. Elles produisent un faible volume de déchets, qui peut être réduit par séchage. Leur emploi pour la biodépollution d'effluents aqueux contaminés par des radioéléments est particulièrement prometteur. Le choix de l'espèce et le mode de mise en œuvre sont fonction des applications ciblées. La dépollution des métaux peut s'intégrer dans une démarche d'économie circulaire. Après utilisation, la matrice algale peut être régénérée, notamment s'il s'agit de biomasse désactivée, en conservant ses capacités de dépollution [12]. La biomasse ayant accumulé les métaux peut également être valorisée pour la production de biocarburants ou d'engrais biosourcés, ce qui minimise encore les

déchets et augmente la rentabilité des procédés. Enfin, les algues ayant concentré les métaux constituent une ressource à partir de laquelle les métaux rares ou précieux peuvent être récupérés.

Toutefois, des défis subsistent, en particulier au niveau de la récolte de la biomasse après traitement et de sa gestion en aval. La récolte et la séparation des microalgues des effluents traités représentent un défi technique et financier du fait de leur petite taille et de leur densité voisine de celle de l'eau. L'immobilisation des microalgues sur des supports solides facilite leur récupération après traitement et, souvent, améliore leur efficacité à capter les métaux. L'emploi de flocculants biologiques ou de microalgues autoflocculantes telles que *Scenedesmus* est également une piste explorée pour optimiser les techniques de récupération des biomasses [27]. Un point crucial à grande échelle est le contrôle des conditions environnementales de pH, température, lumière et disponibilité en nutriments. L'utilisation de photobioréacteurs plutôt que des systèmes ouverts permet de contrôler plus précisément les conditions de culture des microalgues et de maximiser l'efficacité du traitement. En outre, l'efficacité des microalgues peut être limitée dans des contextes industriels complexes, où les concentrations de métaux sont souvent très élevées. La sélection et l'ingénierie génétique de souches tolérantes aux métaux ou aux conditions extrêmes représentent des approches prometteuses. L'utilisation de consortium algaux ou d'associations algues-bactéries constitue également une stratégie intéressante, apportant plus de stabilité et de résilience à la biomasse face aux modifications de l'environnement (climat, nature et concentration des polluants toxiques). La synergie entre les microorganismes et la redondance possible des fonctions de dépollution renforcent l'efficacité globale du système de traitement. Enfin, la gestion de la biomasse ayant accumulé les métaux doit être réalisée de manière sécurisée afin d'éviter de nouvelles pollutions. Des solutions envisagées consistent à incinérer la biomasse, ou à intégrer la bioremédiation à la production de biocarburants [28], les technologies utilisables pour ces procédés avals permettant d'isoler les métaux tout en valorisant la biomasse. L'utilisation des microalgues se positionne comme une solution écologique, durable et polyvalente pour la dépollution des métaux et la restauration des environnements contaminés. Elle doit être associée à des méthodes physico-chimiques traditionnelles afin d'améliorer l'efficacité globale de l'élimination des métaux dans les contextes industriels. Dans une approche de bioéconomie circulaire, les perspectives intègrent le traitement des contaminants métalliques par microalgues et la production de ressources, la biomasse pouvant être recyclée ou exploitée pour des productions à valeur ajoutée telles que les biocarburants et comme source de métaux d'intérêt stratégique et économique.

- [1] C.M. Monteiro, P.M.L. Castro, F.X. Malcata, Metal uptake by microalgae: Underlying mechanisms and practical applications, *Biotechnol. Prog.*, **2012**, 28, p. 299-311.
- [2] K. Suresh Kumar, H.U. Dahms, E.J. Won, J.S. Lee, K.H. Shin, Microalgae - A promising tool for heavy metal remediation, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **2015**, 113, p. 329-52.
- [3] A.K. Zeraatkar, H. Ahmadzadeh, A.F. Talebi, N.R. Moheimani, M.P. McHenry, Potential use of algae for heavy metal bioremediation, a critical review, *J. Environ. Manage.*, **2016**, 181, p. 817-831.
- [4] Y.K. Leong, J.-S. Chang, Bioremediation of heavy metals using microalgae: Recent advances and mechanisms, *Bioresour. Technol.*, **2020**, 303, p. 122845.
- [5] R.J. Reeder, M.A.A. Schoonen, A. Lanzirotti, Metal speciation and its role in bioaccessibility and bioavailability, *Rev. Mineral. Geochem.*, **2006**, 64, p. 59-113.

- [6] S. Clemens, Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis, *Planta*, **2001**, 212, p. 475-86.
- [7] P.M. Stokes, T.C. Hutchinson, K. Krauter, Heavy-metal tolerance in algae isolated from contaminated lakes near Sudbury, Ontario, *Can. J. Bot.*, **1973**, 51, p. 2155-68.
- [8] J.P. Gaur, L.C. Rai, Heavy metal tolerance in algae, in: *Algal Adaptation to Environmental Stresses* (Springer) **2001**, p. 363-388.
- [9] M. Bačkor, D. Fahselt, C.T. Wu, Free proline content is positively correlated with copper tolerance of the lichen photobiont *Trebouxia erici* (Chlorophyta), *Plant Sci.*, **2004**, 167, p. 151-157.
- [10] D. Rojas-Villalta *et al.*, Exploring extremotolerant and extremophilic microalgae: new frontiers in sustainable biotechnological applications, *Biology*, **2024**, 13, p. 712.
- [11] G.W. Garnham, G.A. Codd, G.M. Gadd, Accumulation of cobalt, zinc, and manganese by the estuarine green microalga *Chlorella salina* immobilized in alginate microbeads, *Environ. Sci. Technol.*, **1992**, 26, p. 1764-70.
- [12] N. Akhtar, M. Iqbal, S.I. Zafar, J. Iqbal, Biosorption characteristics of unicellular green alga *Chlorella sorokiniana* immobilized in loofa sponge for removal of Cr(III), *J. Environ. Sci.*, **2008**, 20, p. 231-239.
- [13] T. Leonardo *et al.*, Silver accumulation in the green microalga *Coccomyxa actinobiotis*: toxicity, *in situ* speciation and localization, *Environ. Sci. Technol.*, **2016**, 50, p. 359-367.
- [14] D. Schmitt, A. Müller, Z. Csögör, F.H. Frimmel, C. Posten, The adsorption kinetics of metal ions onto different microalgae and siliceous earth, *Water Res.*, **2001**, 35, p. 779-785.
- [15] R. Saavedra, R. Muñoz, Removal of arsenic by microalgae *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus almeriensis*, *J. Appl. Phycol.*, **2018**, 30, p. 2459-69.
- [16] C. Rivasseau *et al.*, An extremely radioresistant green eukaryote for radionuclide bio-decontamination in the nuclear industry, *Energy Environ. Sci.*, **2013**, 6, p. 1230-39.
- [17] P. Sattayawat *et al.*, Synthetic biology-based approaches for microalgal bio-removal of heavy metals from wastewater effluents, *Front. Environ. Sci.*, **2021**, 9, p. 778260.
- [18] R.K. Goswami, K. Agrawal, M.P. Shah, P. Verma, Bioremediation of heavy metals from wastewater: a current perspective on microalgae-based future, *Lett. Appl. Microbiol.*, **2022**, 75, p. 701-717.
- [19] A. Levett, E.J. Gagen, I. Levett, P.D. Erskine, Integrating microalgae production into mine closure plans, *J. Environ. Manage.*, **2023**, 337, p. 117736.
- [20] F. Wollmann *et al.*, Microalgae wastewater treatment: Biological and technological approaches, *Eng. Life Sci.*, **2019**, 19, p. 860-871.
- [21] S.B. Velásquez-Orta *et al.*, Pilot-scale microalgae cultivation and wastewater treatment using high-rate ponds: a meta-analysis, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **2024**, 31, p. 46994-47021.
- [22] J. Lindblom, M. Larsson, Algal flue gas sequestration and wastewater treatment: An industrial experiment, *KTH*, **2011**.
- [23] M. Blanco-Vieites *et al.*, Removal of heavy metals and hydrocarbons by microalgae from wastewater in the steel industry, *Algal Res.*, **2022**, 64, p. 102700.
- [24] D. Tatarova, D. Galanda, J. Kuruc, B. Gaálóvá, Phytoremediation of 137 Cs, 60 Co, and uranium using *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus subspicatus* algae, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **2021**, 328, p. 703-712.
- [25] H. Shimura *et al.*, Absorption of radionuclides from the Fukushima nuclear accident by a novel algal strain, *PLoS ONE*, **2012**, 7, p. e44612.
- [26] D. De Gouvion Saint Cyr *et al.*, Feasibility study of microfiltration for algae separation in an innovative nuclear effluents decontamination process, *Sep. Purif. Technol.*, **2014**, 125, p. 126-135.
- [27] E.G. de Moraes *et al.*, Microalgae harvesting for wastewater treatment and resources recovery: A review, *New Biotechnol.*, **2023**, 78, p. 84-94.
- [28] F. Piccini *et al.*, Heavy metal bioremediation and biocrude production by *Chlorella vulgaris* and *Arthrospira platensis*, *Bioresour. Technol.*, **2019**, 292, p. 121992.

Corinne RIVASSEAU*, directrice de recherche, expert senior, Institut des sciences du vivant Frédéric Joliot, Institut de biologie intégrative de la cellule, Laboratoire des mécanismes fondamentaux de la bioénergétique, UMR 9198, CEA/CNRS/ Université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette.

*corinne.rivasseau@cea.fr