



HAL
open science

Les Radionucléides dans l'environnement. Enjeux sociétaux et défis scientifiques.

Mirella del Nero, Gilles F Montavon

► **To cite this version:**

Mirella del Nero, Gilles F Montavon. Les Radionucléides dans l'environnement. Enjeux sociétaux et défis scientifiques.. L'Actualité Chimique, 2021, 460-461, pp.11. hal-03452239

HAL Id: hal-03452239

<https://hal.science/hal-03452239v1>

Submitted on 10 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les radionucléides dans l'environnement :

Enjeux sociétaux et défis scientifiques

Mirella Del Nero^{a*} et Gilles Montavon^b

^a Chargée de Recherches, Thématique Radiochimie, Département de Recherches Subatomiques, Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien IPHC, UMR 7178, CNRS-IN2P3 /
Université de Strasbourg,
23 rue du Loess, 67037 Cedex 02 Strasbourg
mireille.delnero@iphc.cnrs.fr

^b Directeur de Recherches, Groupe Radiochimie, Laboratoire de Physique Subatomique et des Technologies Associées SUBATECH, UMR 6457, CNRS-IN2P3 / Université de Nantes /
IMT Atlantique,
4 rue Alfred Kastler, 44307 Cedex 03 Nantes
montavon@subatech.in2p3.fr

*Auteur correspondant

Résumé. Les recherches sur le comportement des radionucléides naturels et artificiels (RN) dans l'environnement visent à évaluer, prévoir ou réduire les transferts et les effets des RN dans les milieux naturels, -en lien avec leur spéciation-, et recourent des enjeux sociétaux, *e.g.*, la sûreté des futurs sites de stockage des déchets radioactifs ou la gestion de sites à radioactivité naturelle renforcée. Dans ces contextes, la communauté académique se positionne sur la recherche amont autour de grandes questions, *e.g.*, une base de données sur la chimie des RN en solution et aux interfaces, l'évaluation des effets des faibles doses, les procédés de remédiation ; et de questions transverses, *e.g.*, la modélisation ou une instrumentation de pointe. Des défis pour le futur sont de développer des études multi-échelles et interdisciplinaires, ce qui est illustré ici par des études du devenir des RN sur le site d'une ancienne mine d'uranium (Rophin, Puy de Dôme), et du rôle des matières organiques naturelles.

Abstract. Researches on the behaviour of natural and artificial radionuclides (RN) in the environment aim to assess, predict or reduce the transfers and the effects of RN –as related to their speciation- in natural systems, and intersect several societal issues, *e.g.*, safety of future storage sites of high-level radioactive wastes or management of technologically-enhanced naturally occurring radioactive sites. In these contexts, the academic community positions on fundamental research around major issues, *e.g.*, a database on RN chemistry in solution and interfaces, evaluation of low-dose effects, remediation processes; as well as cross-cutting issues, *e.g.*, modelling or state-of-the-art instrumentation. Challenges for the future are to develop multi-scale and interdisciplinary studies, which is illustrated here by studies on the fate of RN at the site of an old uranium mine (Rophin, Puy de Dôme) and the role of natural organic matter.

Mots clés : Radionucléides, environnement, spéciation, effets, interdisciplinarité

Les radioéléments / radionucléides (RN), naturels ou artificiels, sont présents dans tous les compartiments de notre planète : l'air, l'eau, les roches, les sols et tous les organismes vivants, - microorganismes, végétaux, animaux-, y compris l'être humain. Les recherches s'intéressent à l'étude de leur comportement dans les milieux naturels et à comprendre leurs cycles biogéochimiques, c.-à-d., leur rétention et labilité dans les sols et sédiments, leurs transferts vers –et leur transport dans- les eaux naturelles, leur biodisponibilité pour les organismes, etc, en lien avec leur spéciation chimique. A ces recherches sont associés à l'heure actuelle des enjeux sociétaux majeurs, à savoir : (i) prévoir le devenir des RN, (ii) contribuer aux analyses de sûreté de stockage de déchets radioactifs, (iii) évaluer l'effet des faibles doses/concentrations de RN sur les biotopes et les écosystèmes, et (iv) proposer des solutions de (bio) remédiation de sites pollués.

Certaines problématiques liées à ces enjeux sont familières aux scientifiques et au grand public : par exemple, l'efficacité à long terme des barrières ouvragées et naturelles envisagées pour le stockage de déchets radioactifs à vie longue et de haute activité dans des formations argileuses profondes (*e.g.*, projet CIGEO) ou la migration / la dissémination de RN dans des situations post-accidentelles (*e.g.*, comme à Tchernobyl ou Fukushima). D'autres problématiques moins connues sont aussi au cœur des recherches, par exemple, celle de l'écodynamique de cocktails de RN naturels à faibles doses/concentrations dans les territoires à radioactivité naturelle renforcée (contexte TE-NORM : Technologically Enhanced Naturally Occuring Radioactive Materials) issue d'activités humaines : anciennes exploitations minières d'Uranium, industries hors nucléaire comme la géothermie, etc.

L'étude du comportement des RN dans l'environnement sous-tend des problématiques inhérentes aux milieux naturels : l'hétérogénéité des systèmes, les interfaces et la diversité des échelles à envisager. Cela implique une recherche poussée, allant de l'échelle moléculaire à l'échelle macroscopique (voire géographique), et de l'étude du « système modèle » en

laboratoire à celle de l'écosystème. L'échelle des concentrations des RN va de l'infra-trace au pondérable. L'échelle temporelle des mécanismes ou des processus impliqués va de celle associée aux réactions chimiques à celle des « cycles géologiques ».

Les laboratoires académiques impliqués apportent leur expertise, d'une part, pour mesurer / cartographier la radioactivité (métrologie) et quantifier les transferts dans les biotopes (radio-écologie), et d'autre part, pour identifier les formes chimiques des RN (analyses de spéciation) et décrire au niveau mécaniste le comportement des RN (avec acquisition des bases de données associées). Une activité transversale de modélisation à différentes échelles (modélisation moléculaire, dynamique moléculaire, simulation Monte Carlo, modélisation géochimique) complète ce rapide panorama de compétences.

Dans ce document, on reviendra sur certains verrous scientifiques que doivent lever notre communauté, ainsi que sur les outils structurants mis en place pour faire le lien entre études en laboratoire et de terrain, et pour favoriser l'interdisciplinarité. L'exemple du site atelier de Rophin (Puy de Dôme) dans le champ proche d'anciennes mines d'uranium est plus particulièrement développé.

Les grandes questions

Un objectif scientifique majeur dans le domaine de la chimie environnementale des radionucléides est de comprendre et prévoir les transferts et les effets des RN dans les milieux naturels, en lien avec leur spéciation chimique. Lorsqu'un RN est rejeté dans l'hydrosphère, du fait de la dissolution des roches ou de rejets anthropiques, ses transferts vers -et dans- les eaux et les chaînes trophiques, voire son écotoxicité, sont contrôlés par sa spéciation. Les modèles mécanistes et prédictifs doivent donc inclure les interactions des RN dans les -et aux interfaces des- composantes aqueuse, minérale, colloïdale, organique et (micro)biologique des écosystèmes, ce qui constitue autant de défis scientifiques et

techniques. Pour les relever, la communauté académique se positionne sur une recherche amont de pointe autour des grandes questions à aborder dans la décennie à venir.

L'élaboration d'une base de données et la modélisation. Les projets ont vocation à déterminer des données fondamentales sur les propriétés chimiques (thermodynamiques, cinétiques, structurales) de radioéléments / radionucléides (Pu, Pa, Ra, Po...) en solution aqueuse ou aux interfaces (entre minéral, solution, matières organiques, et microorganismes). Ce sujet constitue un défi à fort enjeu pour l'environnement pour lequel la communauté des (radio)chimistes dispose d'un savoir-faire basé sur des infrastructures adaptées. Le couplage des approches expérimentales et théoriques est fondamental. L'apport des outils de modélisation moléculaire peut s'avérer indispensable pour les radioéléments étudiés à l'échelle des traces (Pa, Po, Ra...). Il est important dans ce contexte de pouvoir tester ces bases de données en utilisant des données expérimentales / analytiques décrivant leur comportement sur sites naturels.

Le développement d'une instrumentation de pointe. L'ambition est d'aller plus loin dans la sensibilité des techniques (analyse, spéciation), de pouvoir travailler sur des matrices complexes « réalistes », d'aborder les problèmes de cartographie petite et moyenne échelle, et de développer des capteurs *in-situ* permettant de contribuer à comprendre le comportement des RN *in natura* dans des conditions non perturbées. Ce travail doit se faire en concertation avec les grands instruments (par ex., SOLEIL) et les industriels afin de valoriser et appliquer ces développements de manière effective.

L'évaluation des effets (faibles doses). L'objectif est d'évaluer l'effet des faibles doses sur le vivant avec la difficulté de prendre en compte plusieurs aspects, l'effet de la dose, mais aussi les effets biochimiques qui nécessitent des mesures / des caractérisations des phénomènes de bioaccumulation / bioamplification des RN le long de chaînes trophiques et aquatiques, en

lien avec la spéciation. Ce sujet est à fort potentiel interdisciplinaire, à l'interface chimie-biologie.

La remédiation. Un des enjeux est de se concentrer sur la problématique des contaminations diffuses pour lesquelles les procédés simples de remédiation ne sont pas applicables. Ces procédés peuvent s'avérer intéressants en France dans des cas concrets d'assainissement de sols en lien avec le démantèlement des centrales nucléaires. Ce point doit être mis en regard avec la question des faibles doses et la réglementation qui justifie d'une éventuelle remédiation.

La mise en place d'outils structurants, un enjeu pour les années à venir

Un enjeu pour les années à venir est de structurer les recherches menées par les différents acteurs impliqués dans la problématique du devenir des RN dans l'environnement, et de développer des voies innovantes utilisant des approches pluri- et interdisciplinaires, notamment à l'interface entre chimie, radioécologie et biologie. La Zone Atelier Territoires Uranifères (ZATU, <https://zatu.org/>) est un outil du CNRS créé et piloté par le monde académique visant à faire converger les recherches pluridisciplinaires et multi-échelles sur l'étude d'écosystèmes –ou de socio-écosystèmes- dits « nucléarisés ». Il s'agit de fédérer les recherches menées en laboratoire et sur sites naturels et/ou anthropisés pour établir, notamment, les relations entre la spéciation chimique, les transferts / l'écodynamique, et les effets des faibles doses et faibles concentrations de cocktails de RN (impacts écotoxicologiques, biocénoses terrestres et aquatiques). Pour le monde académique, le rôle de la ZATU est aussi d'être une plate-forme où il est possible de créer un lien étroit avec les acteurs du nucléaire (IRSN, ASN, EDF, ANDRA, CEA) et hors nucléaire (BRGM) en vue du paramétrage et de l'amélioration de la robustesse des codes utilisés pour l'évaluation des risques, la gestion des déchets radioactifs, ou encore, la remédiation de sites contaminés.

Un programme de recherche a été initié par un consortium de radiochimistes et biologistes français du CNRS, du CEA et de l'IRSN pour étudier un écosystème situé dans un petit bassin versant (BV) situé en territoire uranifère et qui présente une radioactivité renforcée liée à l'héritage d'une ancienne mine d'uranium (site de Rophin, Puy de Dôme). L'environnement étudié se situe dans le champ proche d'une ancienne exploitation minière d'uranium (contexte « TENORM ») et d'une zone actuelle de stockage « ICPE » (Installation Classée pour la Protection de l'Environnement) comportant des résidus miniers (Fig. 1).

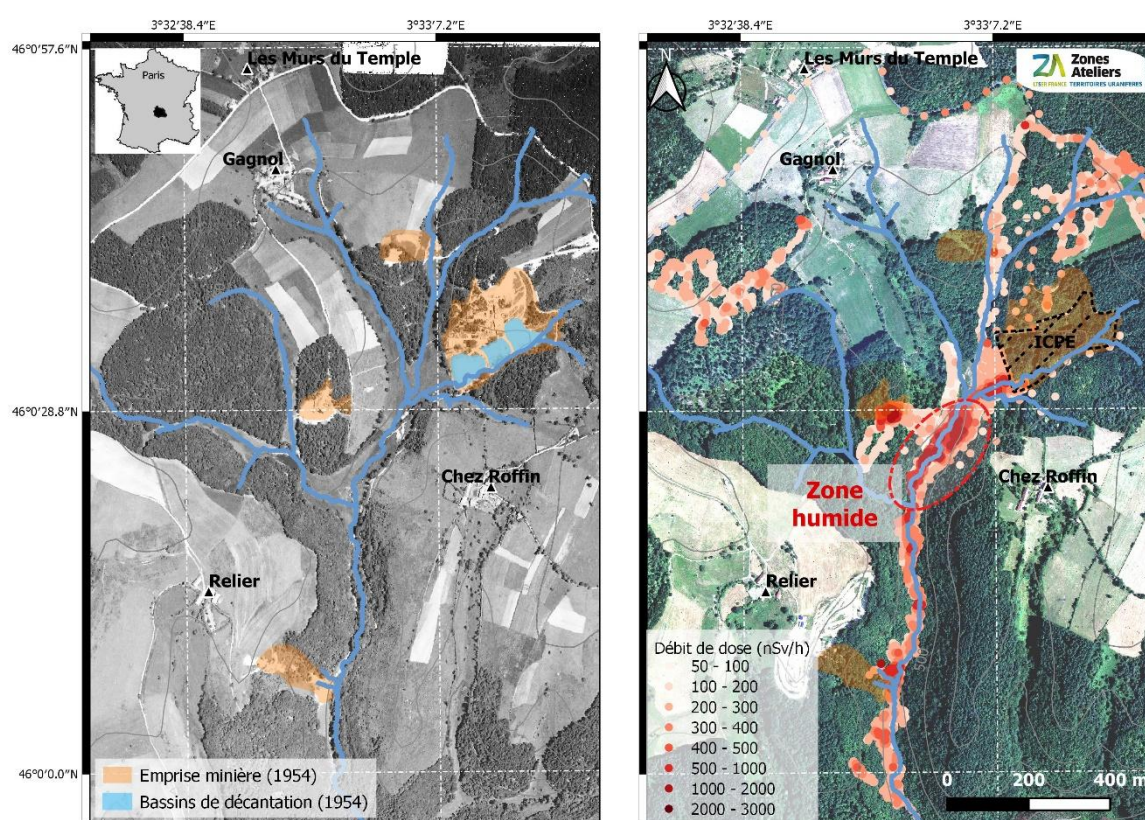


Fig. 1 : Photographies aériennes du bassin versant de Rophin en 1954 (à gauche) et 2015 (à droite). Les zones des anciennes activités minières, et des mesures radiologiques, sont reportées.

Le but du projet est d'identifier l'origine, la spéciation et les mécanismes des transferts de radioéléments (Uranium, U, Thorium, Th) et radionucléides naturels (Radium-226, ^{226}Ra , Polonium-210, ^{210}Po) dans ce petit BV drainé par un cours d'eau, en se focalisant sur un biotope très particulier situé à l'aval, à savoir, une zone humide (ZH) anthropisée.

En effet, la zone humide de Rophin comporte en sub-surface un horizon caractérisé par de fortes teneurs en RN (*e.g.*, [U] > 1000ppm). Cet horizon a été formé par la sédimentation de particules fines argileuses –probablement riches en RN- transportées en suspension dans les eaux suite à des épisodes de débordement des bassins de décantation associés aux anciennes activités minières (Fig. 1). Depuis la fermeture de la mine (il y a plus de 60 ans), la végétalisation progressive du site, et le développement de la ZH, ont induit des modifications de la spéciation et de la labilité des RN de cet horizon. Or, une zone humide est une zone d'échange au fonctionnement complexe qui est idéale pour étudier le devenir et les effets de « cocktails » de RN dans les continuum sols-eaux-(micro) biosphère. Les RN en sub-surface sont potentiellement remobilisés et/ou ré-accumulés par un « cycle aquatique » lié aux battements de la nappe, voire transférés aux sols végétalisés d'où ils sont susceptibles d'incorporer un cycle biochimique (Fig. 2). L'existence des deux systèmes connectés permet d'aborder des verrous majeurs de la spéciation et des transferts des RN en milieux naturels: (i) l'effet d'un front d'altération (lié à la nappe) où les conditions physico-chimiques, dont le redox, varient sur des échelles spatio-temporelles courtes, et (ii) l'effet de milieux complexes, *c.-à-d.*, les sols végétalisés, où minéraux, matières organiques, micro-biosphère et plantes sont associés intimement et établissent un ensemble d'actions et rétroactions avec les RN.

Le devenir des RN dans les ZH est une thématique émergente au niveau international. Un nombre d'articles croissants publiés ces dernières années met en lumière le rôle clé des matières organiques (MO) des ZH. Par exemple, Stetten et al. [1] ont identifié l'existence d'espèces mononucléaires de U(VI) et U(IV) associées à de la MO qui contrôlent la mobilisation et la rétention de l'U en aval d'un site minier d'uranium, ainsi que de phosphates d'U(IV) et d'U(VI); le degré d'oxydation étant tributaire des niveaux de la nappe. D'autres études ont suggéré que les MO de sols végétalisés ou des ZH jouent un rôle dans l'atténuation

de la migration de l'U des eaux de nappe, en favorisant des mécanismes multiples de piégeage de l'U sous sa forme oxydée, probablement par adsorption préférentielle à la surface des oxyhydroxydes de fer ou des argiles de molécules organiques constitutives des MO ayant une forte affinité chimique pour l'U (*e.g.*, [2]). En parallèle, plusieurs études ont souligné le rôle des rhizomes des plantes dans l'atténuation (par phyto-stabilisation) de la migration de l'U des eaux de nappe, ainsi que le contrôle exercé par les micro-organismes sur le comportement des RN. Dans ce dernier cas, une variété de processus directs (*e.g.*, réduction biotique de l'U) ou indirects (*e.g.*, dissolution de phases porteuses de RN ou voies de dégradation des MO) est mise en jeu (*e.g.*[3-5]). Or, si les micro-organismes influencent le comportement des RN, des études récentes de métagénomique et (méta)protéomique ont montré, qu'il y a, en retour, adaptation et survie de certaines populations bactériennes dans les sites contaminés par les RN (*e.g.*, [6-7]). Ce résumé illustre le fait que des mécanismes multiples contrôlent le devenir des RN dans les ZH où composantes biotiques et abiotiques agissent en synergie.

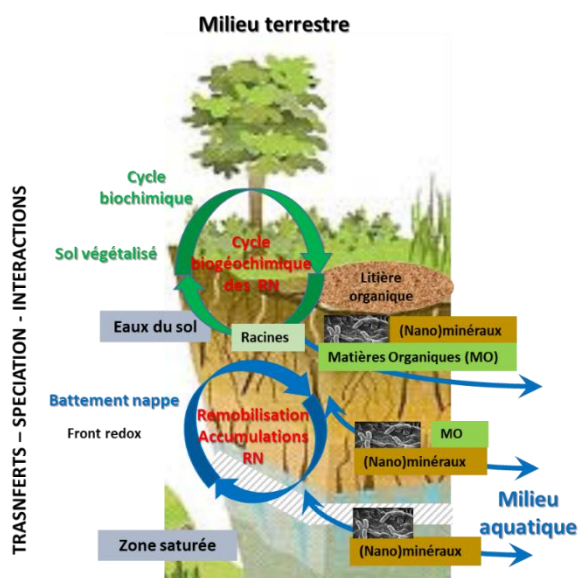


Fig. 2 : Schématisation des transferts possibles de RN dans la zone humide de Rophin (la zone hachurée représente l'horizon argileux de sub-surface riche en RN)

L'ambition des recherches menées par le consortium de la ZATU sur le site de Rophin est d'utiliser des expertises et des techniques de pointe en spéciation chimique, en radioécologie

et en (micro)biologie pour réaliser une étude intégrée et multi-échelles de cet écosystème, ce qui constitue une approche unique pour élucider le verrou des effets (synergiques) des interfaces minéral-solution, des matières organiques complexes et des populations de micro-organismes sur la spéciation des RN. Il s'agira aussi d'établir les liens entre la spéciation et les transferts vers le vivant, c.-à-d., la labilité des RN et leur biodisponibilité voire leur bioaccumulation. Cet aspect est important pour anticiper l'incorporation des RN aux chaînes trophiques et leurs effets.

Un exemple concret : l'étude du rôle des matières organiques complexes

L'adsorption des AO. Les acides organiques naturels complexes (AO) tels que les acides fulviques (AF) ou les acides humiques (AH) des sols et eaux, qui sont issus de la dégradation des plantes et organismes vivants, rajoutent un degré de complexité considérable à la spéciation des RN en solution aqueuse et aux interfaces minéral-solution des milieux naturels. Ces AO qui possèdent de nombreuses fonctionnalités, oxygénées notamment, ont de fortes affinités pour les métaux et s'adsorbent sur les surfaces minérales (*e.g.*[8]) dont ils modifient les propriétés. L'adsorption de nombreux éléments traces métalliques à l'interface minéral-solution est influencée par les substances humiques. De nombreuses études expérimentales, dont certaines ont utilisé des techniques spectroscopiques avancées, ont montré que l'adsorption des AO favorise la rétention des métaux à pH acide sur les minéraux du fait de la formation de complexes de surface ternaires (*e.g.*, [9-11]).

Le fractionnement chimique des AO lors de leur adsorption. L'avènement des spectromètres de masse à ultrahaute résolution à source d'ionisation par électro nébulisation (ESI-MS) a permis de montrer que les AO sont des assemblages supramoléculaires formés de milliers de molécules organiques liées entre elles par des interactions faibles et présentant une grande variété dans leurs caractéristiques chimiques (composition, aromaticité, acidité, groupes

fonctionnels...), et par conséquent, dans leur réactivité chimique [12]. Cette technique analytique performante est l'une des seules permettant d'identifier (détermination de la formule chimique brute –et éventuellement structure- de la molécule) de manière fine et univoque les milliers de molécules organiques qui coexistent dans un échantillon naturel, grâce à sa ultra-haute résolution, sa grande précision en masse, sa sensibilité, sa capacité à respecter les abondances isotopiques et à fournir des spectres MS_n. Par ailleurs, des études spectroscopiques ont très tôt suggéré que ces assemblages fractionnent au cours de leur rétention aux interfaces minéral-solution, certaines familles de composés étant préférentiellement retenues à la surface des minéraux (e.g., [13]). Reiller et al. [14], dans un travail pionnier, ont suggéré que ce fractionnement s'opère à l'échelle moléculaire. Il est susceptible de contrôler la composition et la réactivité chimique des matières organiques des sols et eaux, et donc le devenir des RN dans les systèmes forestiers et les zones humides. Décrire ce fractionnement des MO et son effet sur la spéciation des RN représente un défi scientifique et technique.

Des études expérimentales utilisant la spectrométrie de masse ESI-MS ont été menées pour décrire à l'échelle moléculaire le fractionnement des AO lors de leur rétention aux interfaces minéral-solution de systèmes modèles, et cerner les effets des paramètres moléculaires des AO, des propriétés de surface des minéraux, et des conditions physico-chimiques ([15-16]). Le fractionnement à l'échelle moléculaire d'AF et AH extraits d'eaux de rivière, de tourbières ou de sols forestiers, lors de leur sorption sur oxydes d'aluminium (alumine, Al₂O₃) ou oxydes de fer (hématite, Fe₂O₃), a été étudié. Les spectres de masse des solutions natives de AF/AH, enregistrés en mode d'ionisation négatif, montrent l'existence de milliers de molécules organiques constitutives dont 70% à 80% peuvent être identifiées par leur formule chimique brute déterminée à partir de leur masse exacte (Fig. 3a). La comparaison des spectres ESI(-)MS des solutions natives de AF et de surnageants collectés à la fin

d'expériences de sorption des AF sur l'alumine et l'hématite a montré que les molécules organiques constitutives des AO sont adsorbées à des degrés très divers (fractionnement chimique).

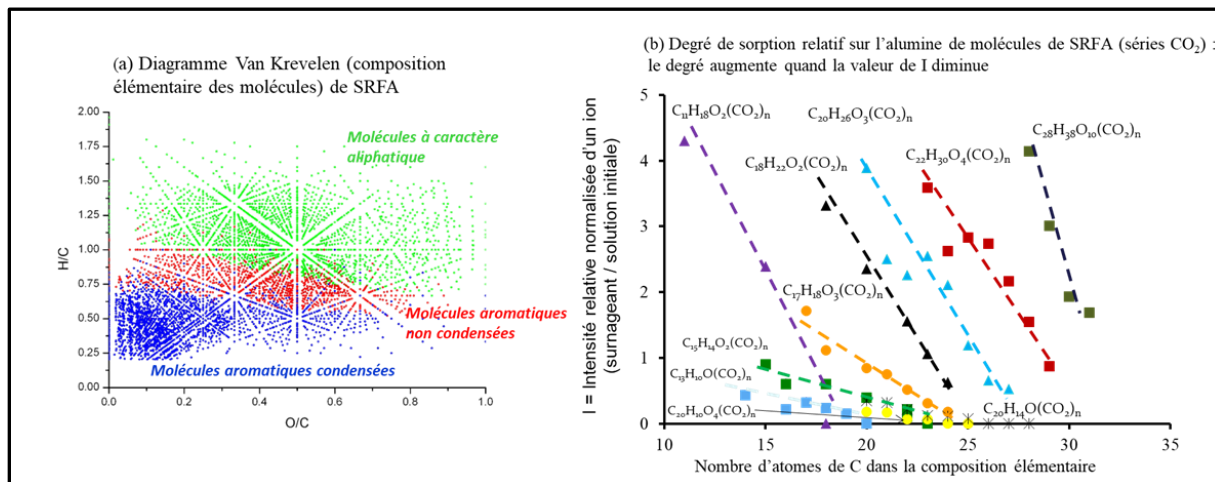


Fig. 3 : Données moléculaires de la sorption d'un acide fulvique (Suwannee River Fulvic Acid) sur l'alumine: (a) composition élémentaire (ratio atomique H/C vs O/C) des molécules de l'AF, et (b) degrés de sorption relatifs de molécules de séries $-CO_2$ (issues d'analyses ESI(-)MS d'une solution native de SRFA et du surnageant après contact avec l'alumine ; chaque point dans (a) est une molécule de l'AF). D'après Galindo and Del Nero [15].

Il y a une corrélation inverse entre le degré relatif de sorption d'une molécule dans une série CH_2 (série de molécules dont la formule chimique diffère uniquement par le nombre de CH_2) et son nombre de groupes CH_2 ; et une corrélation positive entre le degré relatif de sorption d'une molécule dans une série CO_2 et son nombre de groupes CO_2 (Fig. 3b). Ces corrélations remarquables démontrent que l'acidité d'une molécule est un paramètre clé qui gouverne le fractionnement à l'échelle moléculaire d'un AF lors de sa sorption sur un oxyde d'aluminium ou de fer. Les composés aromatiques condensés sont sorbés par liaison hydrophobes sur la première couche des molécules AF/AH sorbées à la surface. L'effet du type de surface minérale (argile vs oxyde) sur les mécanismes du fractionnement a été clarifié [17]. Le rôle primordial de ce fractionnement sur les affinités relatives d'éléments traces métalliques pour

les surfaces minérales, et sur leur spéciation et mobilité potentielle dans des systèmes forestiers, a été mis en évidence [17].

Le rôle des AO sur le devenir des RN de la ZH de Rophin. A partir des données obtenues par les études de systèmes modèles, on s'attend à ce que la sorption des AO dans des sols riches en oxy-hydroxydes métalliques conduise à l'enrichissement, à la surface de ces minéraux, des molécules aromatiques acides possédant des fonctionnalités oxygénées, -et ayant une forte affinité pour les métaux qui sont des acides forts de Lewis-, alors que la majorité des composés aliphatiques, exceptés les plus oxygénés et acides, reste en solution. Les études d'échantillons de sol prélevé sur le site de Rophin révèlent une particularité minéralogique propre aux horizons de sols situés à l'aval du BV qui sont riches en uranium, à savoir, la présence d'oxydes de fer et d'argiles ferriques (des smectites) –incluant des populations de tailles nanométriques- (Fig. 4a). La comparaison des données moléculaires des matières organiques extraites des sols et des eaux met en évidence la présence additionnelle et spécifique de molécules aliphatiques (et aromatiques non condensées) très oxygénées dans ces horizons riches en oxydes de fer (Fig. 4b). Ces résultats sont cohérents avec les résultats issus de l'étude en laboratoire des systèmes modèles, et suggère que les oxydes de fer et/ou les argiles ferriques, et les molécules organiques acides ayant de multiples groupes carboxyle, jouent en synergie dans la rétention préférentielle de U dans les horizons de la ZH. Les particules d'oxydes de fer, entourées d'une gangue organique, se retrouvent également en suspension dans les eaux de la ZH, ce qui souligne toute l'importance des phases colloïdales minéralo-organiques comme vecteurs potentiels des échanges sol-eau des RN.

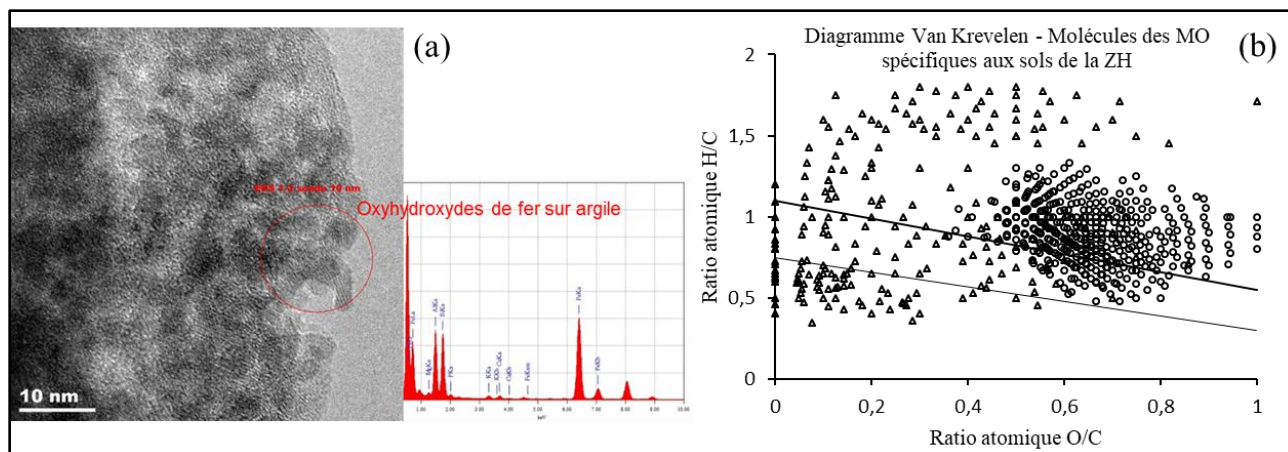


Fig. 4 : Spécificités des sols de la ZH à Rophin (par rapport aux sols du site hors ZH) : présence (a) d'oxy-hydroxydes de fer de taille nanométrique sur des argiles (analyses MET et EDS), et (b) de molécules de la MO de type aliphatiques, et aromatiques non condensés, très oxygénées ($O/C > 0,5$) et d'aromatiques condensés (analyses ESI(-)MS ; triangle: m/z 120-400, ronds 400-800).

Les perspectives

Ce tour d'horizon des enjeux, des questions, et des verrous associés à l'étude du comportement des radionucléides dans l'environnement, -et les projets décrits-, sont loin d'être exhaustifs et n'illustrent que partiellement la richesse des recherches menées. Il est clair que des investigations à l'échelle moléculaire, nécessitant des techniques de spéciation chimique ou de (micro)biologie de plus en plus sophistiquées, sont indispensables pour décrire les mécanismes chimiques et biochimiques mis en jeu dans les interactions des RN avec leur environnement. Mais un aspect enthousiasmant des recherches actuelles et futures est l'approche multi-échelle, indispensable pour appréhender la complexité des systèmes naturels et augmenter le réalisme des modèles prédictifs. Une autre perspective passionnante est l'interdisciplinarité des recherches développées en lien avec le devenir et les effets des RN dans les continuums des écosystèmes, avec notamment la nécessité de coupler les études entre compartiments abiotique (le biotope) et biotique (la biosphère). Ce couplage passe par l'étude de sujets communs comme le permet par exemple les sites de la ZATU qui visent à faciliter la

structuration des recherches en France autour de ces perspectives et défis pour le futur. Cette structuration est également visible à l'échelle européenne ; en témoignent des programmes comme « l'European Joint Project EURAD » qui oriente les recherches menées sur la problématique de la sûreté des sites de stockage des déchets radioactifs vers l'étude de systèmes de plus en plus « réels », ou la plate-forme Alliance du projet européen « CONCERT » qui structure les recherches inter-/ pluri-disciplinaires en Radioécologie.

Remerciements

Les auteurs remercient pour leur soutien la plate-forme de recherches de la Zone Atelier Territoires Uranifères (CNRS-INEE), les programmes structurants NEEDS (CNRS-IN2P3 / CEA / ANDRA / EDF / IRSN / Framatome / Orano / BRGM) et EC2CO (CNRS-INSU), le MasterProjet RNUE (CNRS-IN2P3) et les programmes européens EJP EURAD et CONCERT.

Références

- [1] Stetten L., Blanchart P., Mangeret A., Lefevre P., Le Pape P., et al., Redox Fluctuations and Organic Complexation Govern Uranium Redistribution from U(IV)-Phosphate Minerals in a Mining-Polluted Wetland Soil, Brittany, France, *Environ. Sci. Technol.*, **2018**, 52, p. 13099.
- [2] Kaplan D. I., Kukkadapu R., Seaman J.C. Arey B.W., Dohnalkova A.C., Buettner S., Li D., Varga T., Scheckel K.G., Jaffé P.R., Iron mineralogy and uranium-binding environment in the rhizosphere of a wetland soil, *Sci. Total Environ.*, **2016**, 569-570, p. 53.
- [3] Simonoff M., Sergeant C., Poulain S., Pravikoff M.S., Microorganisms and migration of radionuclides in environment, *Comptes Rendus Chimie*, **2007**, 10, p. 1092.

- [4] Merroun M.L., Selenska-Pobell S.S., Bacterial interactions with uranium: An environmental perspective, *J. Contaminant Hydrology*, **2008**, *102*, p. 285.
- [5] Dang D.H., Wang W., Pelletier P., Poulain A.J., Evans R.D., Uranium dispersion from U tailings and mechanisms leading to U accumulation in sediments: Insights from biogeochemical and isotopic approaches, *Sci. Total Environ.*, **2018**, *610-611*, p. 880.
- [6] Theodorakopoulos N., Février L., Barakat M., Ortet P., Christen R., Piette L., Levchuk S., Beaugelin-Seiller K., Sergeant C, Berthomieu C., Chapon V., Soil prokaryotic communities in Chernobyl waste disposal trench T22 are modulated by organic matter and radionuclide contamination, *FEMS Microbiol Ecol.*, **2017**, *93*, fix09.
- [7] Kolhe N., Zinjarde S., Acharya C., Responses exhibited by various microbial groups relevant to uranium exposure, *Biotechnology Adv.*, **2018**, *36*, p. 1828.
- [8] Filius J. D., Meeussen J. C., Lumsdon D. G., Hiemstra T., van Riemsdijk W.H., Modeling the binding of fulvic acid by goethite: the speciation of adsorbed FA molecules, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **2003**, *67*, p. 1463.
- [9] Montavon G., Rabung T., Geckeis H., Grambow B., Interaction of Eu (III)/Cm (III) with alumina-bound poly (acrylic acid): sorption, desorption, and spectroscopic studies, *Environ. Sci. Technol.*, **2004**, *38*, p. 4312.
- [10] Yang S., Sheng G., Montavon G., Guo Z., Tan X., Grambow B., Wang X., Investigation of Eu(III) immobilization on γ -Al₂O₃ surfaces by combining batch technique and EXAFS analyses: Role of contact time and humic acid, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **2013**, *121*, p. 84.
- [11] Maher K, Bargar J.R., Brown G.E.Jr., Environmental speciation of actinides, *Inorg. Chem.*, **2013**, *52*, p. 3510.
- [12] Piccolo A., The supramolecular structure of humic substances, *Soil Sci.*, **2001**, *166*, p. 810.

- [13] Claret F., Schäfer T., Brevet J., Reiller P.E., Fractionation of Suwannee river fulvic acid and aldrich humic acid on α -Al₂O₃: Spectroscopic evidence, *Environ. Sci. Technol.*, **2008**, *42*, p. 8809.
- [14] Reiller P., Amekraz B., Moulin C., Sorption of Aldrich humic acid onto hematite: Insights into fractionation phenomena by electrospray ionization with quadrupole time-of-flight mass spectrometry, *Environ. Sci. Technol.*, **2006**, *40*, p. 2235.
- [15] Galindo C., Del Nero M., Molecular level description of the sorptive fractionation of a fulvic acid on aluminum oxide using Electrospray Ionization Fourier Transform Mass Spectrometry, *Environ. Sci. Technol.*, **2014**, *48*, p. 7401.
- [16] Fleury G., Del Nero M., Barillon R., Effect of mineral surface properties (alumina, kaolinite) on the sorptive fractionation mechanisms of soil fulvic acids: Molecular-scale ESI-MS studies, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **2017a**, *196*, p. 1.
- [17] Fleury, G., Del Nero M., Barillon R., Molecular fractionation of a soil fulvic acid (FA) and competitive sorption of trace metals (Cu, Zn, Cd, Pb) in hematite–solution systems: effect of the FA-to-mineral ratio, *RSC Adv.*, **2017b**, *7*, p. 43090.