

Livre blanc de la radiochimie en Suisse

La chimie des substances radioactives pour le bien de la société:
un domaine de recherche interdisciplinaire d'avenir



MENTIONS LEGALES

Éditrice et interlocutrice

Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT) • Plateforme Chimie
Maison des Académies • Laupenstrasse 7 • Case postale • 3001 Berne • Suisse
+31 306 93 30 • chemistry@scnat.ch • chemistry.scnat.ch

Proposition de citation

Alberto R, Burger M, Gäggeler H, (2020)
Livre blanc de la radiochimie en Suisse. Swiss Academies Reports 15 (4).

Auteurs

Pr Roger Alberto, Université de Zurich • Dr Mario Burger, Laboratoire Spiez
Pr em. Heinz Gäggeler, Université de Berne / Institut Paul Scherrer

Avec des contributions de

Prof. Sergey Churakov, Université de Berne / Institut Paul Scherrer • Dr Robert Eichler, Institut Paul Scherrer •
Dr. Pascal Froidevaux, CHUV Lausanne • PD Dr Cristina Müller, Institut Paul Scherrer • Prof. Roger Schibli,
Institut Paul Scherrer / EPF de Zurich • Dr Dorothea Schumann, Institut Paul Scherrer • Dr Marietta Straub,
CHUV Lausanne • Prof. Sönke Szidat, Université de Berne • Prof. Andreas Türlér, Université de Berne •
Dr Nicholas P. van der Meulen, Institut Paul Scherrer

Relecture

Adrian Heuss (advocacy) • Dr Leo Merz (SCNAT) • Dr Olivier Blacque (UZH) • Caroline Reymond (SCNAT)

Traduction

Dr Laurence Frauenlob

Commanditaire

Comité de la Plateforme Chimie
Pr Christophe Copéret, EPF de Zurich • Pr Christian Bochet, Université de Fribourg • Pr Thomas Bürgi, Université
de Genève • Pr Catherine Housecroft, Université de Bâle • Dr Klemens Koch, PH Berne • Pr Laura Nyström, EPF
de Zurich • Pr Shana Sturla, EPF de Zurich • Pr Oliver Wenger, Université de Bâle

Mise en page

Sandra Schwab, Berne

Photo de couverture

Roger Schibli

Ce rapport peut être obtenu gratuitement auprès de la Plateforme Chimie (dans la limite des stocks disponibles)
ou téléchargé depuis chem.scnat.ch/radiochimie.

1^{re} édition 2020

ISSN (print) : 2297-1564
ISSN (online) : 2297-1572

DOI: 10.5281/zenodo.4147538

Ce livre blanc s'adresse aux organes de politique scientifique comme le Secrétariat d'État à la formation, à la
recherche et à l'innovation (SEFRI), le Fonds national suisse (FNS), swissuniversities et le Conseil des EPF ainsi
qu'aux directions des instituts et départements de chimie et des facultés des sciences au sein des hautes écoles
suisses. Une vision plus détaillée sera offerte aux spécialistes dans le numéro 12/2020 de la revue scientifique
Chimia consacré à la « radiochimie et chimie nucléaire » (www.chimia.ch).



Livre blanc de la radiochimie en Suisse

**La chimie des substances radioactives pour le bien de la société:
un domaine de recherche interdisciplinaire d'avenir**

Table des matières

Avant-propos	3
Résumé	4
La formation en radiochimie en Suisse: situation actuelle et situation souhaitée	7
Situation actuelle: un avenir incertain pour la radiochimie en Suisse	8
Situation souhaitée: Excellence de la recherche et relève assurées	9
Options envisageables pour atteindre la situation souhaitée	10
La recherche en radiochimie en Suisse	13
Histoire de la radiochimie en Suisse	14
Recherches actuellement en cours en Suisse dans le domaine de la radiochimie	15
Recherche fondamentale en radiochimie sur les éléments les plus lourds du tableau périodique des éléments	16
Radioanalyse	18
La radioanalyse dans les institutions de la Confédération	18
La radioanalyse à l'Institut Paul Scherrer (PSI)	22
Analyses radiochimiques, radioécologie et surveillance à long terme de l'environnement à l'Institut de Radiophysique (IRA-GRE)	24
Radioanalyse par spectrométrie de masse par accélérateur	24
Radiopharmacie	26
Concepts à la base de la recherche en radiopharmacie	26
Production et applications des radionucléides en médecine nucléaire	28
Recherche fondamentale en chimie de coordination et en chimie organométallique avec les radionucléides	28
Recherche radiopharmaceutique	30
Autres exemples de recherche radiopharmaceutique issus du PSI	32
Analyses radiochimiques dans le domaine radiopharmaceutique et radiotoxicologique à l'Institut de radiophysique (IRA-GCR)	33
Absorption des substances radioactives: radiotoxicologie	33
Recherches sur la sûreté du stockage des déchets radioactifs	34
Dépôts en couches géologiques profondes	34
Radiochimie et dépôt en couches géologiques profondes	35
Centres de compétences en Suisse	35
Auteurs principaux	36
Autres auteures et auteurs	37
Abréviations	39

Avant-propos

Depuis leur découverte, les éléments radioactifs (radioéléments), qu'ils soient naturels ou de synthèse, n'ont cessé de susciter le débat sur « le nucléaire » dans notre société. En radiochimie, c'est-à-dire la partie de la chimie qui s'intéresse à l'analyse et à l'utilisation des éléments radioactifs, la Suisse a développé des compétences reconnues internationalement. Même si le Conseil fédéral et le Parlement ont décidé de sortir du nucléaire à long terme et de renoncer à son utilisation dans le cadre du virage énergétique, nous vivons bel et bien à l'ère du nucléaire. Du fait de leur radioactivité, les radioéléments, instables, présentent des propriétés néfastes pour l'homme et l'environnement. Mais ils offrent aussi une multitude d'opportunités pour développer l'imagerie et les traitements médicaux qui sont au service de notre santé. Il est donc indispensable que la Suisse dispose aujourd'hui comme demain d'une grande compétence dans le domaine de la radiochimie aussi bien dans l'enseignement que dans la recherche et qu'elle continue donc de la développer.

Le présent rapport offre une vue d'ensemble de l'expertise actuelle de la Suisse dans ce domaine. Il met en évidence les atouts de la Suisse, par exemple dans le domaine du développement de techniques d'analyse pour la détection et la surveillance des radioéléments dans l'environnement ou de la synthèse et de la séparation de nouveaux radioéléments dans le cadre de la recherche fondamentale, mais aussi dans des domaines très appliqués comme la médecine diagnostique et thérapeutique. Le rapport souligne par ailleurs les défis et difficultés à venir et insiste notamment sur le fait que nous aurons encore besoin, à l'avenir, d'une forte compétence en radiochimie pour relever les défis sociétaux de demain, que ce soit dans le domaine de l'énergie, de l'environnement ou de la santé.

Christophe Copéret

Président de la Plateforme Chimie/EPF de Zurich

Résumé

La radiochimie est un domaine particulier de la chimie qui s'intéresse aux aspects fondamentaux et aux applications des radionucléides ainsi que des molécules qui les contiennent. On appelle isotopes les atomes d'un même élément qui présentent le même nombre de protons mais un nombre différent de neutrons dans le noyau. Près d'un tiers des 118 éléments actuellement connus ne sont présents que sous la forme d'isotopes radioactifs et tous les éléments stables présents dans la nature en possèdent également. La mission de la radiochimie est de produire de tels isotopes, de comprendre leur comportement chimique et de les mettre en évidence, même aux concentrations les plus infimes, par voie analytique. La recherche de pointe menée actuellement dans le domaine de la radiochimie porte par exemple sur l'étude des éléments superlourds, pour lesquels les effets relativistes ébranlent de plus en plus les fondements du tableau périodique des éléments.

Mais la radiochimie est également à la base de nombreuses applications des isotopes radioactifs. Tout un domaine concerne l'énergie nucléaire et les questions très actuelles liées à la fermeture des centrales nucléaires suisses, comme par exemple le démantèlement des infrastructures et la gestion des déchets radioactifs. D'un autre côté, certains thèmes gagnent en importance comme la synthèse, la séparation, l'utilisation et l'élimination des nucléides radioactifs pour la radiopharmacie, la médecine nucléaire et l'industrie. Mais les isotopes radioactifs jouent également un rôle plus méconnu mais non moins décisif dans les sciences de l'environnement et en particulier dans la recherche sur le climat. Par ailleurs, le respect de l'ordonnance sur la radioprotection (ORaP) qui vise à protéger la population suisse exige une surveillance continue des radioisotopes dans l'environnement – ce qui, à son tour, exige des connaissances très pointues.

La manipulation des substances radioactives demande de respecter certaines exigences spécifiques en matière de sécurité afin que les doses d'exposition soient aussi faibles que possible. L'ordonnance sur la radioprotection prévoit en conséquence différents types de laboratoires qui permettent de travailler avec des échantillons présentant différents niveaux de radioactivité. De tels laboratoires ont été établis dans plusieurs universités suisses ainsi qu'à

l'Institut Paul Scherrer (PSI), qui fait partie du domaine des EPF. Le PSI dispose d'une large palette d'infrastructures de ce type et offre même, avec le laboratoire chaud, le seul équipement de Suisse qui permette d'étudier les échantillons hautement radioactifs, comme les combustibles irradiés, dans les « cellules chaudes » dotées de systèmes de manipulation. Le PSI est aussi le seul institut de Suisse à exploiter divers accélérateurs de particules qui permettent de synthétiser des nucléides radioactifs. De ce fait, le PSI est d'une importance capitale pour la radiochimie en Suisse. Divers autres instituts utilisent des accélérateurs plus petits, en général des cyclotrons, qui produisent des radionucléides pour la médecine nucléaire ou la radiopharmacie.

Plusieurs hautes écoles proposent aujourd'hui des formations en radiochimie. Le domaine de la radiopharmacie est ainsi bien desservi (EPFZ, Universités de Berne, de Bâle, de Zurich et de Lausanne). Les Universités de Zurich et de Berne proposent des formations spécialisées, en général de niveau master : la première principalement sur la chimie de base des radionucléides comme le technétium, la seconde sur les questions d'élimination, les aspects environnementaux, les propriétés des éléments exotiques et la radiopharmacie. Il se trouve toutefois que beaucoup de ces filières risquent de disparaître en raison du départ à la retraite de certains professeurs.

Ainsi s'accroît un problème qui se profilait déjà depuis quelques temps : la formation de spécialistes de radiochimie en nombre suffisant n'est pas garantie en Suisse et, à l'avenir, les besoins du pays en spécialistes ne pourront plus être couverts par son propre système éducatif. Qui plus est, beaucoup des activités de la Suisse en matière de radiochimie sont actuellement dirigées par des spécialistes en fin de carrière. La question se pose donc de savoir comment ces éminences grises pourront être remplacées à court et à moyen terme. Etant donné que la situation est similaire dans les pays voisins, il ne sera pas aisé de recruter de jeunes diplômées et diplômés à l'étranger. Par ailleurs, certaines structures comme le laboratoire Spiez qui fait partie du DDPS n'ont pas toute liberté de recruter des spécialistes non suisses. Le problème est aggravé par le manque d'une véritable perspective nationale. Les

différentes hautes écoles et institutions spécialisées sont mal coordonnées en matière de formation. Il est cependant possible d'atteindre un minimum critique avec suffisamment de chaires et de coopération.

Le manque de personnel compétent qui se profile, ses conséquences et sa gestion ont poussé à la rédaction de ce livre blanc. Le rapport se concentre d'une part sur les besoins futurs en spécialistes et d'autre part sur les lieux où leur formation pourrait éventuellement être assurée en envisageant plusieurs options. Il constitue donc également un outil d'évaluation pour tout ce qui concerne les chaires de radiochimie dans les universités suisses et dans les deux EPF.

Dans une première partie, le rapport présente quatre options qui correspondent aux possibilités de coopération du PSI avec quatre hautes écoles suisses. Ses auteurs et auteurs soulignent également qu'il serait souhaitable que les formations puissent se référer à un curriculum général unifié au niveau national voire international.

Dans une deuxième partie, le rapport propose une synthèse des projets de recherche actuellement en cours dans le domaine de la radiochimie fondamentale et appliquée pour montrer qu'en dehors de la recherche fondamentale, les applications pratiques sont éminemment multiples.



Photo: Noemí Carabán



La formation en radiochimie en Suisse: situation actuelle et situation souhaitée

Ce chapitre analyse la situation actuelle de la Suisse en matière de formation en radiochimie en considérant l'offre et la compétence actuelles des universités de Suisse alémanique et de Romandie, de l'EPFZ et de l'EPFL et en s'intéressant tout particulièrement au PSI.

Il propose par ailleurs une évaluation des besoins futurs en spécialistes dans ce domaine de recherche capital afin que la Suisse conserve à l'avenir sa position de leader aussi bien sur le plan de la recherche que des applications. Il présente enfin plusieurs variantes de ce que pourrait être, demain, le paysage éducatif de la Suisse dans le domaine de la radiochimie.

Situation actuelle: un avenir incertain pour la radiochimie en Suisse

L'Institut Paul Scherrer, carrefour incontournable de la radiochimie en Suisse

L'Institut Paul Scherrer (PSI), qui emploie aujourd'hui près de 2000 personnes, construit et exploite des équipements de recherche lourds pour les besoins de la communauté scientifique nationale et internationale. De ce point de vue, le PSI est donc un Userlab. Les grands équipements actuellement utilisés sont les suivants:

- Un accélérateur de protons de 600 MeV qui génère le faisceau le plus intense au monde
- La source de spallation SINQ qui produit des neutrons à partir du faisceau de l'accélérateur de protons
- La source de muons la plus performante au monde et une source de neutrons ultra-froids, toutes deux alimentées par l'accélérateur de protons
- Un accélérateur de protons de 240 MeV dédié aux usages radiothérapeutiques en médecine nucléaire
- La Source de Lumière Suisse SLS de troisième génération qui génère de la lumière synchrotron
- Le laser à rayons X à électrons libres SwissFEL
- Un cyclotron injecteur de 70 MeV (pour l'accélérateur de protons de 600 MeV) pour la production de radionucléides
- Un laboratoire chaud qui permet de travailler avec des échantillons hautement radioactifs (comme les barres de combustible irradié des centrales nucléaires)

Pour garantir le bon fonctionnement de ces infrastructures hors pair, des investissements et améliorations considérables sont indispensables. Le fait est que le cyclotron Philips a été arrêté et que les fonds investis dans la production d'isotopes au niveau de l'injecteur II sont négligeables. De même, la source de spallation SINQ est généralement mise hors service pendant plusieurs mois et il serait plus que souhaitable de la moderniser. La construction d'une nouvelle ligne de lumière est actuellement projetée dans ce but; elle sera peut-être intégrée à la feuille de route suisse pour les infrastructures de recherche.

La nouvelle direction du PSI s'efforce actuellement d'améliorer la situation.

Pour répondre aux exigences d'excellence scientifique inhérentes à son statut d'Userlab, le PSI mène lui-même ses propres recherches dans les domaines suivants:

- Matière et matériaux
- Homme et santé
- Énergie et environnement

Le PSI se charge par ailleurs de nombreuses prestations mandatées par la Confédération; il assure notamment les

fonctions de:

- Centre d'analyses radiochimiques pour les autorités publiques (surveillance de la radioactivité dans l'environnement, par exemple)
- Laboratoire de calibration pour les appareils de mesure de la radioactivité
- Centre de formation pour la manipulation des échantillons radioactifs (école de radioprotection)
- Centre de formation pour l'exploitation des centrales nucléaires (école d'opérateurs de réacteurs).

Il assure par ailleurs la formation d'une centaine d'apprentis et apprentis dans divers domaines professionnels. Plusieurs groupes du PSI disposent des autorisations et infrastructures nécessaires à la manipulation des substances radioactives et ce, dans tous les domaines d'activité (laboratoires de type A, B et C). Le laboratoire chaud, en particulier, mérite d'être cité: il s'agit du seul laboratoire de Suisse dans lequel les matériaux hautement radioactifs comme les crayons combustibles irradiés des centrales nucléaires peuvent être préparés et analysés grâce à l'existence de cellules chaudes équipées de systèmes de manipulation. Certaines activités relevant de la radiopharmacie et de la médecine nucléaire sont menées dans des laboratoires bénéficiant d'une certification GMP. En plus de ses grands équipements de recherche, ces infrastructures font du PSI une institution incontournable dans le domaine de la recherche fondamentale et appliquée en radiochimie. En tant qu'organe de recherche, le PSI n'est cependant pas habilité à délivrer des diplômes universitaires (bachelor, master, doctorat), ce qui ressort uniquement de la compétence des hautes écoles supérieures (bachelor, master), des universités et des deux EPF.

Formations proposées en Suisse alémanique

L'Université de Berne propose une formation très large en radiochimie. Elle comprend des cours blocs qui lui sont consacrés aussi bien au niveau bachelor qu'au niveau master. Dans la filière master des étudiants en chimie, la formation en radiochimie est fortement axée sur la radiopharmacie (en vue de l'utilisation d'un cyclotron médical à l'Hôpital universitaire de Berne pour la production de radionucléides pour la médecine nucléaire et la recherche en radiopharmacie). À l'Université de Berne, une chaire de professeur associé au niveau de maître de conférences ou de privat-docent utilise un spectromètre de masse par accélérateur (MICADAS) dans une perspective d'utilisation du radiocarbonate pour l'étude de l'environnement et la surveillance de la radioactivité environnementale.

L'Université de Zurich dispose d'une chaire spécialisée dans la chimie du technétium et d'une chaire de professeur associé axée sur les procédés d'imagerie, principalement la

TEP. Le cas du technétium démontre de façon magistrale comment la recherche fondamentale peut aboutir à des applications fructueuses (dans ce cas dans le domaine radiopharmaceutique). L'université propose, au niveau master, un cours de base à choix de deux semestres en radiochimie et en chimie nucléaire ainsi qu'une formation à l'utilisation des radionucléides dans les domaines scientifiques les plus divers. Les étudiantes et étudiants se familiarisent avec le travail expérimental avec les radioéléments à travers, notamment, un stage en radiochimie/radiopharmacie.

L'EPFZ attache une grande importance à la formation en radiopharmacie. Cette dernière fait ainsi partie intégrante des études de bachelor en pharmacie. L'EPFZ propose tous les deux ans, au niveau post-diplôme, un CAS en chimie radiopharmaceutique/radiopharmacie en partenariat avec les Universités de Ljubljana et de Leipzig (www.radiochem.pharma.ethz.ch/). Ce CAS est accrédité par l'Association européenne de médecine nucléaire (www.eanm.org) et les personnes qui le suivent avec succès sont reconnues en tant que Qualified Persons. En Suisse, ce certificat est indispensable à toute personne souhaitant produire des substances radiopharmaceutiques devant être utilisée sur l'humain.

Formations proposées en Suisse romande

Le groupe de chimie radiopharmaceutique (GCR) de l'Institut de radiophysique (IRA) du **Centre hospitalier universitaire vaudois (CHUV)**, à Lausanne, est engagé dans l'enseignement théorique et pratique dans le domaine des rayonnements ionisants et en particulier de la radioprotection, du contrôle qualité des produits radiopharmaceutiques et la manipulation de sources radioactives non-scellées. Le GCR participe à la formation des spécialistes en radioprotection, à la formation des diplômées et diplômés et à la formation initiale et continue du personnel médical et technique de laboratoire en médecine nucléaire.

Le groupe de radioécologie (GRE) de l'IRA propose un cours « Radioactivité dans la chaîne alimentaire » dans le cadre du master en environnement de la Faculté de géosciences de l'environnement de l'Université de Genève. Le GRE organise par ailleurs trois modules de cours à l'École doctorale de la Faculté de biologie et de médecine de l'Université de Lausanne (Méthodes radiométriques en sciences médico-légales; Radioactivité dans l'alimentation; Radioanalyses: du prélèvement à la mesure).

Offres de formation dans le domaine de la gestion des déchets nucléaires

Les possibilités de formation dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs sont assez limitées. Pour l'heure, seuls quelques cours isolés sont dispensés dans des cursus de master sur le thème du dépôt en couches géologiques profondes: dans le « Master of Science in Nuclear Engineering » (EPFZ-EPFL-PSI), un cours introductif est proposé sur le stockage final et le cycle du combustible. Les étudiants ont la possibilité de travailler sur des projets de master en relation avec le dépôt géologique profond. Ces dernières années, il s'est cependant avéré que les étudiants de ce programme avaient des connaissances limitées en radiochimie.

L'Institut de géologie de l'Université de Berne dispense un cours intitulé « Geological Disposal of Radioactive Waste » dans le cadre du module « Géochimie de l'environnement et des ressources terrestres » du master proposé conjointement par Berne et Fribourg. Des projets de master et des thèses y sont également proposés et effectués sur des sujets en relation avec le stockage final des déchets radioactifs.

Laboratoires

Pour assurer une formation en radiochimie, il est indispensable de disposer de laboratoires de physique et chimie nucléaires – homologués et garantissant les mesures de radioprotection exigées. Le tableau ci-dessous résume la situation actuelle. Il ne comprend pas les nombreux laboratoires des centres de recherche non-universitaires (comme le PSI et le laboratoire Spiez). Le PSI est le seul centre à disposer de laboratoires de type A.

Tableau: Laboratoires de chimie nucléaire des hautes écoles suisses

Haute école	Labos de type B	Labos de type C
UZH (chimie)	4*	2*
UZH (biochimie)	*	2*
EPFZ (D-CHAB)	3	3
UniBE	1	3
UniBE (hôpital universitaire)	3	9
CHUV&Unil	1	7
EPFL (Nuclear Engineering)	2	3

* Trois grands laboratoires de type B sont prévus dans le nouveau bâtiment UZ5 de l'Université de Zurich (inauguration prévue en 2021).

Situation voulue: Excellence de la recherche et relève assurées

Pour présenter un curriculum de formation pouvant faire référence en radiochimie, on peut citer le cas du Département de chimie et de biochimie de l'Université de Berne : tous les étudiants en chimie, en biochimie et en pharmacie y suivent un cours d'une semaine d'introduction à la radioactivité et à la radiochimie dans le cadre du cours de chimie générale du bachelor. Ce cours débouche, pour les étudiants choisissant ensuite l'option Chimie et Sciences moléculaires, sur un cours de base en radiochimie qui s'inscrit dans la partie Chimie physique du bachelor. Une partie du cours d'analyse instrumentale est par ailleurs consacrée aux techniques de radioanalyse. Les étudiants effectuent d'autre part un stage pratique en radioanalyse. Dans le cursus de master, plusieurs cours sont ensuite dispensés en anglais dans le domaine de la radiochimie : le cours Nuclear/Radiochemistry qui propose une introduction approfondie aux thèmes Nuclear Energy and Heavy Elements, Environmental Radionuclides and Nuclear Dating et le cours Introduction to Radiopharmaceutical Chemistry.

Formation

Il est urgent de mettre en place, à tout le moins, une chaire commune, au domaine de compétences étendu, entre le PSI et une haute école ou université suisse, en y associant éventuellement d'autres instituts nationaux. Une telle collaboration serait gagnant-gagnant : la haute école profiterait de l'accès à une institution qui dispose d'un grand choix d'accélérateurs de particules pour la production de radionucléides et de l'accès à des instruments d'analyse hautement spécialisés et donc extrêmement chers ; le PSI, de son côté, profiterait de jeunes chercheuses et chercheurs hautement motivés qui fréquenteraient l'institut dans le cadre de leur travail de master ou de doctorat. Etant donné que la formation en radiochimie est indispensable dans de nombreux domaines de la chimie, de la biochimie, de la biologie et de la physique, d'autres possibilités d'interactions se présenteraient selon la spécialisation des laboratoires (dans le cadre de projets de recherche, par exemple).

Une telle «Ecole de radiochimie» doit se placer sous l'étendard de la recherche de pointe puisqu'il va de soi que seule la recherche de haut niveau est à même de livrer les bases nécessaires à une formation de qualité d'un niveau technologique adapté aux besoins de notre époque.

Besoin en spécialistes

Le nombre total de spécialistes en radiochimie présentant une formation universitaire (master et/ou doctorat) et travaillant actuellement en Suisse est estimé à 50–100 personnes. Ce chiffre englobe tous les domaines abordés dans ce rapport. Les experts estiment qu'avec le démantèlement des centrales nucléaires suisses, les besoins en radiochimistes augmenteront considérablement, en particulier au sein du laboratoire Spiez, de l'OFSP (radioprotection) et du PSI. Par ailleurs, l'expérience a montré que, grâce à leurs compétences très étendues dans le domaine des technologies de la chimie et des techniques d'analyse, beaucoup de diplômés de radiochimie n'avaient aucune difficulté à trouver un emploi dans un autre domaine scientifique. La formation en radiochimie fournit une base scientifique très solide et ouvre de nombreuses portes. Le cas du CERN l'illustre parfaitement : bien souvent, les nombreuses thèses qui y sont effectuées dans le domaine de la physique des particules ne débouchent pas sur des carrières dans ce domaine. C'est la compétence à la fois pointue et étendue en sciences expérimentales qui est demandée sur le marché du travail. Il n'est donc pas étonnant que l'industrie s'intéresse fortement aux spécialistes de radiochimie.

Par ailleurs, l'opinion publique vis-à-vis de la radioactivité a fortement évolué ces dernières années : ses aspects positifs (dans le domaine médical, notamment) sont aujourd'hui de plus en plus connus, reconnus et appréciés.

Options envisageables pour atteindre la situation voulue

La situation à atteindre répond à deux grands enjeux. Il convient d'une part de faire en sorte que les besoins futurs en spécialistes de radiochimie soient couverts. D'autre part, il est vital de maintenir la position de la Suisse dans cet important domaine de recherche dans le contexte international. Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire de mobiliser des ressources suffisantes en matière d'enseignement et de recherche. D'après notre analyse, la création d'une à deux chaires serait nécessaire, dans l'idéal en collaboration avec le PSI.

Option A: Chaire commune à l'EPFZ et au PSI

Le Département de chimie et de biosciences appliquées (CHAB) de l'EPFZ dispose déjà d'une chaire de radiopharmacie (Pr R. Schibli) entretenue en commun avec le PSI. Une chaire tandem associant radiochimie (aspects fondamentaux) et radiopharmacie (radiochimie appliquée) générerait des synergies intéressantes. Les laboratoires du

CHAB de l'EPFZ ne sont cependant pas équipés pour la recherche en radiochimie (mais en radiopharmacie). Le modèle proposé se base donc sur une coopération étroite avec le PSI, relativement proche. Les étudiantes et étudiants pourraient ainsi effectuer les essais nécessaires à Villingen dans le cadre de leur bachelor ou de leur master.

Option B: Chaire commune à l'Université de Zurich et au PSI

Les infrastructures de laboratoire de l'Université de Zurich (UZH) sont parfaitement adaptées à la recherche en radiochimie. L'UZH a d'autre part décidé de prévoir des capacités pour l'expérimentation en radiochimie dans le nouveau bâtiment de chimie qui sera inauguré en 2021. L'EPFZ et l'Université de Zurich sont les établissements d'enseignement supérieur les plus proches du PSI et assurent donc aux scientifiques les trajets les plus courts pour leurs essais.

Option C: Chaire commune à l'Université de Berne et au PSI

L'Université de Berne dispose d'infrastructures conséquentes avec des laboratoires de radiochimie de type B et C. Par ailleurs une source de ^{252}Cf permet de réaliser des essais de radiochimie avec des produits de fission à vie courte (demi-vie jusqu'à quelques secondes) en utilisant un système de transport à jet gazeux. Le spectromètre de masse par accélérateur MICADAS permet par ailleurs l'analyse de quantités infimes de carbone radioactif pour la recherche environnementale. De même, l'hôpital universitaire de Berne dispose de plusieurs laboratoires de type B et d'un cyclotron permettant de produire divers radionucléides ayant des applications potentielles en radiopharmacie.

Il convient par ailleurs de citer l'Institut fédéral de métrologie (METAS), situé à Wabern, qui dispose d'une infrastructure de production de rayons γ de très haute énergie. Ces rayons permettent d'étudier les processus photo-nucléaires et de les utiliser pour la production de radionucléides. De ce point de vue, l'Université de Berne dispose de la meilleure infrastructure universitaire de Suisse pour la recherche en radiochimie.

Option D: Chaire commune à l'EPFL et au PSI

L'EPFL est un site particulièrement bien adapté à une chaire de radiochimie, ne serait-ce qu'en raison de son département de recherche sur les technologies nucléaires, très performant et extrêmement bien connecté en Suisse,

qui est dirigé par le professeur A. Pautz en collaboration avec le département de la recherche en Energie et sécurité nucléaire du PSI. Le master en ingénierie nucléaire « Nuclear Engineering Master » (EPFZ-PSI-EPFL) pourrait être complété d'un nouvel aspect intéressant en établissant des liens académiques avec le domaine de radiochimie de l'EPFL. Qui plus est, le site de Lausanne offre une bonne infrastructure avec des laboratoires de type B qui ne sont pas utilisés actuellement. Le seul argument en défaveur de cette option est l'éloignement géographique entre l'EPFL et le PSI.

Un programme de master national (éventuellement intégré dans un cadre international)

Il serait également intéressant de mettre en place un programme de master national, voire international. Le PSI et plusieurs universités suisses assureraient différents blocs d'enseignement, selon le modèle du programme européen CINCH (qui associe Prague, Helsinki et Oslo). Le programme serait coordonné au niveau national mais fonctionnerait de manière délocalisée. L'éventualité d'une participation au programme CINCH pourrait également être examinée afin de satisfaire la demande de la Suisse en spécialistes.

Option Haute école spécialisée

A notre connaissance, la radiochimie n'est pas enseignée au niveau des hautes écoles spécialisée – contrairement à ce qui se fait en Allemagne. Etant donné la multitude (qui sera exposée dans ce rapport) de thèmes très appliqués relevant de la radiochimie (démantèlement des centrales nucléaires, gestion des déchets, etc.), il serait souhaitable d'évaluer la pertinence d'une chaire dans une haute école spécialisée.

12 Livre blanc de la radiochimie en Suisse

Photo: Roger Schibli

La recherche en radiochimie en Suisse

Dans la recherche en radiochimie, les processus chimiques sont adaptés de manière à pouvoir être couplés avec des mesures radiométriques. En raison de la radioactivité des substances manipulées, des mesures de sécurité particulières doivent être observées (de radioprotection, notamment).

Les études ne peuvent souvent être réalisées qu'avec un petit nombre d'atomes ou de molécules, en particulier lorsque les radionucléides présentent une demi-vie courte. Mais si les conditions l'imposent, des quantités macroscopiques peuvent également être utilisées en recourant au marquage radioactif. Les radioisotopes utilisés pour cela ont en général un comportement chimique quasiment identique à celui des isotopes stables. Le bilan des processus chimiques peut alors être facilement établi par radioanalyse. L'avantage de cette approche réside également dans l'existence d'une horloge systémique, due à la décroissance radioactive et à la demi-vie, qui permet de déterminer directement les vitesses des réactions chimiques, ce qui est assez difficile avec les méthodes classiques de chimie.

La recherche moderne en radiochimie ou en radiopharmacie s'effectue généralement avec des accélérateurs de particules ou des réacteurs expérimentaux équipés d'appareils automatiques commandés par ordinateur pour, notamment, limiter l'exposition des personnes impliquées aux rayonnements. C'est par exemple le cas de la TEP (tomographie par émission de positons) pratiquée dans les hôpitaux, qui utilise des radionucléides à vie courte (comme le ^{11}C qui présente une demi-vie de 20 minutes).

La recherche fondamentale en radiochimie est généralement interdisciplinaire (chimie, physique, biologie). Ainsi, beaucoup d'études en physique nucléaire ont été menées avec des procédés radiochimiques étant donné que les processus étudiés s'accompagnent souvent de transmutations.

Histoire de la radiochimie en Suisse

La radioactivité a été découverte par Henry Becquerel en 1896. Il reçut le prix Nobel de physique en 1903 avec Pierre et Marie Curie pour ses recherches sur ce nouveau phénomène. D'un point de vue historique, le terme de radiochimie a été introduit par Marie Curie pour désigner la chimie des éléments de la série de l'uranium et du thorium, c'est-à-dire des éléments entre l'uranium et le plomb. Elle en avait elle-même isolé le polonium et le radium, ce qui lui a valu le prix Nobel de chimie en 1911. On appelle ainsi radiochimie la chimie des éléments radioactifs. Mais ce terme englobe également la chimie des radioisotopes d'éléments stables par ailleurs.

L'exemple le plus célèbre en est certainement l'étude de la synthèse de transuraniens par bombardement d'uranium avec des neutrons, postulée par Enrico Fermi dans les années 1930. Cette démonstration lui valut le prix Nobel de physique en 1938. A la fin de cette même année, les radiochimistes Otto Hahn et Fritz Strassmann démontrèrent cependant par voie chimique que les nouveaux éléments formés n'étaient pas des transuraniens, comme l'avait pensé Fermi, mais des produits de fission du noyau ! Lise Meitner en avait fourni l'interprétation de physique nucléaire mais c'est bien à des analyses radiochimiques que l'on doit donc la découverte du processus physique de la fission nucléaire. Cette démarche a valu à Otto Hahn le prix Nobel de chimie en 1944.

En Suisse, la recherche en radiochimie, et d'ailleurs également en physique nucléaire, a été fortement stimulée par la première conférence des Nations Unies sur les usages pacifiques de l'énergie atomique (la célèbre conférence « Atoms for Peace ») qui s'est tenue à Genève en 1955. A cette occasion, les Etats-Unis ont apporté un réacteur qu'ils ont remonté sur le lieu de la conférence dans une piscine afin de démontrer que la technologie nucléaire pouvait être utilisée pour le bien de l'humanité et pas uniquement pour la fabrication de bombes atomiques ! Ce réacteur de recherche a ensuite été offert à la Confédération et installé à l'Institut fédéral de recherches en matière de réacteurs (EIR, Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung) où il a servi pendant des années, sous le nom de réacteur SAPHIR, à la recherche en technologie nucléaire, en physique nucléaire, en radiochimie et en diffusion neutronique (recherche sur les solides et les matériaux). Il a été en activité de 1957 à 1994.

Histoire de l'EIR (puis du PSI) et de la radiochimie sur son site : en 1955, Paul Scherrer et Walter Boveri fondent la société Réacteur SA dans le but de construire et d'utiliser un réacteur nucléaire suisse. Ce réacteur d'essai, appelé DIORIT, a fonctionné à partir de 1960 avec de l'uranium naturel et de l'eau lourde et a été en service jusqu'en 1977. En 1956, l'institut engage un responsable pour son nouveau département de chimie en la personne du PD Dr Peter Bärtschi, spécialiste des isotopes de l'Université de Bâle, ainsi qu'un responsable pour la construction et la gestion d'un laboratoire chaud en la personne du Dr Peter Graf, radiochimiste à l'Université de Berne. Après le départ à la retraite du Dr Peter Bärtschi en 1984, le Dr Heinz W. Gäggeler prend la tête du département de chimie. Après la création, le 1.1.1988, de l'Institut Paul Scherrer par la

fusion de l'EIR (devenant le PSI Est) et du SIN (institut de recherche fondamentale en physique nucléaire et en physique des particules fondé en 1968 et devenant le PSI Ouest), le département change de nom et devient le Laboratoire de radiochimie puis, quelques années plus tard, le Laboratoire de radiochimie et de chimie de l'environnement. Après le départ à la retraite du Pr Heinz W. Gäggeler en 2009, le laboratoire est dirigé par le Pr Andreas Türlér jusqu'en 2017 et par le Dr Robert Eichler depuis. Parallèlement, le domaine « recherche environnementale » est séparé de la radiochimie et un Laboratoire de chimie de l'environnement est créé en 2016 et confié à la direction de la Pr Margit Schwickowski.

En regard de son histoire et de ses activités, le Conseil des EPF (alors Conseil des écoles) signifie dès 1992 que le PSI a un rôle majeur à jouer dans le domaine de la formation et en tant que centre de compétences national en radiochimie et qu'il devra donc soutenir une chaire de professeur ordinaire dans ce domaine dans une haute école suisse. Une telle coopération a ainsi existé avec l'Université de Berne jusqu'en 2017. Depuis lors, la chaire bernoise de radiochimie n'est plus soutenue par le PSI.

Après la conférence « Atoms for Peace » de 1955 déjà évoquée, plusieurs hautes écoles ont commencé à intégrer la radiochimie dans leur offre éducative (de même que la physique nucléaire, d'ailleurs). Toutefois, seules l'EPFL et l'Université de Berne sont parvenues à se doter de chaires de professeurs ordinaires en radiochimie (occupées par les professeurs P. Lerch et H.R. von Gunten, respectivement). Il convient cependant de signaler que la chaire de professeur ordinaire en chimie inorganique de l'Université de Zurich s'est spécialisée dans le domaine des composés au technétium, qui relève en fait de la radiochimie. D'autres hautes écoles comme l'EPFZ, les Universités de Bâle, de Lausanne et de Genève offrent des postes dans le domaine de la radiochimie au niveau privat-docent ou professeur titulaire. Etant donné qu'après le départ à la retraite du Pr P. Lerch en 1992, l'EPFL n'a pas maintenu sa chaire de professeur ordinaire en radiochimie, l'Université de Berne est devenue la seule à encore disposer d'une chaire classique dans ce domaine. Il était donc logique qu'après la décision du Conseil des EPF de 1992 déjà évoquée, le PSI s'associe à l'Université de Berne dans une unité commune de radiochimie. Cette coopération impliquait des activités de recherche sur les deux sites ainsi que le libre accès aux infrastructures du PSI pour les chercheurs mais aussi pour les étudiants et doctorants. Ce modèle a donné entière satisfaction aux deux partenaires pendant de nombreuses années. L'Université de Berne avait accès aux infrastructures du PSI, avec ses grands équipements, ses laboratoires et ses instruments d'analyse souvent uniques, tandis que le PSI profitait des apports de jeunes étudiantes et étudiants à ses propres recherches. Cette unité de radiochimie avait d'autre part la particularité d'être également tournée vers la recherche environnementale, souvent basée sur l'utilisation de radionucléides dans l'environnement. Une nouvelle configuration, très intéressante, s'est alors offerte au PSI : une chaire en radiopharmacie, déjà dirigée en commun avec l'EPFZ, s'est vue dotée de nouvelles compétences en radiopharmacie nucléaire, c'est-à-dire dans le domaine de la radiopharmacie qui s'intéresse à la production de radionucléides.

Recherches actuellement en cours en Suisse dans le domaine de la radiochimie

Ce chapitre présente les activités de recherche en cours en Suisse dans le domaine de la radiochimie, de la radioanalyse et de la radiopharmacie. Les descriptions ont été écrites par les scientifiques qui en sont responsables à l'EPFZ, aux Universités de Zurich, de Berne et de Lausanne, à l'Institut Paul Scherrer et au laboratoire Spiez. Leur contenu relève donc de la responsabilité des auteurs et auteures. Pour obtenir une vision plus détaillée des thèmes de recherche en radiochimie, nous vous invitons à consulter le numéro 12/2020 de la revue scientifique *Chimia* (www.chimia.ch).

Recherche fondamentale en radiochimie sur les éléments les plus lourds du tableau périodique des éléments

L'étude des propriétés chimiques des éléments superlourds figurant au bas du tableau périodique est un domaine de recherche aussi spectaculaire que fascinant car les effets relativistes y influent de plus en plus sur les règles de base du système de classification. On ignore par ailleurs de combien d'éléments le tableau périodique est réellement composé. La recherche dans ce domaine est fondamentalement interdisciplinaire et exige des technologies de pointe en chimie doublées des systèmes les plus modernes d'acquisition de données. En général, les résultats de cette recherche entrent directement dans les manuels de chimie. Et la Suisse est un leader mondial dans ce domaine.

*Robert Eichler, Laboratoire de radiochimie,
Institut Paul Scherrer*

Le domaine de recherche fondamentale multidisciplinaire qui s'intéresse aux propriétés chimiques des transactinides, les éléments souvent qualifiés de superlourds figurant en bas du tableau périodique que nous connaissons actuellement (voir Figure), est un axe majeur historique de la recherche en radiochimie. Les radiochimistes suisses étaient leaders dans l'étude pionnière de cinq éléments superlourds (le seaborgium, le bohrium, l'hassium, le copernicium et le flérovium).

L'étude chimique des éléments superlourds touche aux fondements de la classification des éléments et permet d'en évaluer les limites. Elle contribue à la compréhension générale de la matière qui nous entoure. Ses résultats entrent de ce fait directement dans les manuels de chimie. Jusqu'à présent, les éléments superlourds n'ont pas encore été mis en évidence dans la nature. Ils doivent donc être produits artificiellement par fusion nucléaire avec des accélérateurs de recherche. La difficulté de l'étude de leurs propriétés chimiques réside d'une part dans le fait que le taux de production est très faible – quelques atomes par minute voire par mois – et d'autre part dans leur demi-vie particulièrement courte – de quelques millisecondes à quelques minutes, rarement plusieurs heures. Pour pouvoir programmer et réaliser des essais avec les transactinides, il est nécessaire de bien connaître les phénomènes de physique nucléaire qui président à leur production. Des accélérateurs permettant de les générer existent à Doubna (Russie), à Darmstadt (Allemagne), au RIKEN (Japon) et à Berkeley (USA). Jusqu'en 1994, le PSI en possédait également un.

Les essais avec les éléments superlourds sont majoritairement effectués dans le cadre de collaborations internationales. L'un des plus grands challenges est alors d'étudier les propriétés chimiques en ne disposant que de quelques atomes. Pour ce faire, les éléments exotiques sont soumis

à plusieurs étapes d'équilibrage chimique, ce qui permet de remplacer les concentrations par les probabilités que l'atome soit observé dans tel ou tel état chimique. Les systèmes de chromatographie ayant une phase mobile gazeuse ou liquide conviennent à ce type d'essais.

En perfectionnant ces méthodes, il a été possible, au cours des 25 dernières années, de confirmer et d'améliorer les mesures antérieures des propriétés chimiques du rutherfordium (Rf) et du dubnium (Db) et de caractériser pour la première fois le seaborgium (Sg), le bohrium (Bh), l'hassium (Hs), le copernicium (Cn), le nihonium (Nh) et le flérovium (Fl). Grâce à une collaboration étroite avec la recherche en chimie théorique, les résultats obtenus ont pu être intégrés à des calculs relativistes modernes et ont posé des jalons pour mieux comprendre l'influence du numéro atomique élevé de ces atomes sur les propriétés chimiques des éléments au travers de ce que l'on appelle les effets relativistes. Ces travaux ont notamment débouché sur des publications dans des revues scientifiques de renom comme *Science* et *Nature*. Pour préparer ces essais, un important travail préliminaire a été effectué avec les grands équipements de recherche du PSI comme la source SINQ de rayonnement neutronique et le cyclotron injecteur II (à protons, de 70 MeV) en produisant des nucléides modèles à partir des éléments plus légers homologues des éléments superlourds.

Il convient ici d'indiquer que nous avons observé une très grande volatilité de la part des éléments les plus lourds jamais étudiés (Cn, Nh, Fl) ainsi qu'une grande stabilité thermochimique des complexes de carbonyle volatils des métaux de transition des groupes 6-9 auxquels appartiennent les éléments superlourds Sg, Bh, Hs et Mt. Les systèmes innovants de chromatographie gazeuse permettent une augmentation très significative de la vitesse d'étude, la portant à quelques secondes, ce qui autorise enfin une identification sans équivoque des atomes isolés par la mise en évidence de leur mode caractéristique de désintégration.

L'énumération des différents aspects de ce domaine de recherche suffit à elle seule à montrer son potentiel d'innovation, particulièrement intéressant pour la formation des radiochimistes. L'étendue du domaine abordé dans la formation permet aux diplômées et diplômés de travailler dans les domaines les plus divers tels que la production industrielle d'isotopes, leur traitement chimique et leur utilisation (à des fins thérapeutiques, par exemple), la sûreté nucléaire et la radioprotection et le démantèlement des centrales nucléaires ainsi que de concevoir et mettre en œuvre le stockage en couches géologiques profondes des déchets radioactifs. D'un autre côté, il reste encore beaucoup à faire au niveau de la recherche puisque beaucoup d'éléments superlourds n'ont pas encore été étudiés sur le plan chimique.

Tableau périodique des éléments

H																			He
Li	Be													B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg													Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
Cs	Ba	Ln*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
Fr	Ra	An°																	
			Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og		
*Lanthanides	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
°Actnides	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

Fig. 1: Le tableau périodique des éléments avec les symboles conformes à la nomenclature de l'UICPA. Les huit éléments superlourds indiqués en couleur (Rf à Hs et Cn à Fl) et les représentants de leurs groupes ont déjà été étudiés chimiquement.

Radioanalyse

Le domaine de la radioanalyse comprend tout ce qui concerne la quantification des espèces radioactives et se base sur des méthodes de radiométrie (spectrométrie α , β , γ) ou de spectrométrie de masse. L'objectif est de moins en moins la quantification du seul isotope radioactif mais également la détermination de la forme chimique dans laquelle ce radionucléide est présent à l'aide, par exemple, de la lumière synchrotron (SLS du PSI).

Le champ de la radioanalyse sera couvert de manière synthétique par quatre contributions. Elles décrivent i) les activités dans les institutions publiques de la Confédération, ii) les importantes missions de radioanalyse de l'Institut Paul Scherrer, iii) les missions, relevant principalement de la radioécologie, de l'IRA de Lausanne et iv) l'utilisation de l'ultrasensible spectrométrie de masse par accélérateur à l'Université de Berne pour la détection des radionucléides à vie longue.

La radioanalyse dans les institutions de la Confédération

Mario Burger, Laboratoire Spiez

Au niveau fédéral, plusieurs institutions de la Confédération travaillent dans le domaine de la radioanalyse. Cette approche est utilisée dans la recherche, dans la surveillance environnementale, dans le contrôle des centrales nucléaires, dans leur démantèlement, dans le stockage des déchets radioactifs, dans la gestion des accidents radiologiques, dans le domaine de la sûreté intérieure et dans la coopération avec des institutions et organisations partenaires internationales.

Côté fédéral, la recherche en radioanalyse est principalement menée par des équipes spécifiques et laboratoires de l'École polytechnique fédérale de Zurich (EPFZ), de l'Institut Paul Scherrer (PSI) et de l'Institut fédéral des sciences et technologies de l'eau (Eawag). En dehors du domaine des EPF, le laboratoire Spiez de l'Office fédéral pour la protection de la population est également très impliqué dans la recherche appliquée. Les activités et thèmes de recherche de toutes ces structures sont publiés dans leurs rapports annuels respectifs.

Dans son article 191, l'ordonnance sur la radioprotection (ORaP) confère la responsabilité de la surveillance des rayonnements ionisants et de la radioactivité dans l'environnement à l'Office fédéral de la santé publique (OFSP).

Le programme de surveillance se compose de plusieurs parties. Son objectif est tout d'abord de détecter rapidement toute augmentation non naturelle de la radioactivité pouvant avoir des effets graves sur la santé de la population (accident radiologique). Il vise ensuite à connaître les valeurs de référence et les fluctuations de la radioactivité environnementale en Suisse afin de déterminer les doses de rayonnement pour la population. Cette surveillance générale comporte encore aujourd'hui des mesures relatives aux contaminations dues aux essais nucléaires effectués en surface aux USA et en Union soviétique dans les années 1950 et 1960 et à la catastrophe de Tchernobyl.

La surveillance doit également permettre de constater les effets réels sur l'environnement et la population des radiations à proximité des centrales nucléaires, des centres de recherche et des entreprises qui utilisent des substances radioactives. Cette surveillance spécifique des installations disposant d'une autorisation strictement limitée de libération de substances radioactives dans l'environnement s'effectue en collaboration avec les autorités de contrôle, à savoir l'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN) pour les centrales nucléaires et la Suva pour les industries. Elle commence par la surveillance des émissions de ces entreprises (libération effective de substances radioactives) et se poursuit par le contrôle des immissions dans l'environnement (concentrations effectivement mesurées). Pour que tous ces objectifs puissent être atteints, l'OFSP élabore chaque année un programme d'échantillonnage et de mesures en collaboration avec l'IFSN, la Suva et les cantons. Il coordonne ce programme de surveillance auquel participent également les laboratoires de la Confédération et divers instituts des structures d'enseignement supérieur.

Pour la surveillance des centrales nucléaires, l'IFSN dispose d'un petit laboratoire qui utilise des techniques majoritairement non destructives. Les autres contrôles sont effectués dans le cadre du programme de surveillance environnementale.

Plusieurs structures interviennent dans le cadre du démantèlement des centrales nucléaires, comme celui de la centrale de Mühleberg qui doit démarrer prochainement : l'IFSN, avec ses méthodes non destructives, et le PSI et le laboratoire Spiez (LS), avec un arsenal complet de méthodes de radioanalyse (radiochimie et méthodes non destructives). Dans sa station de contrôle STS 0028, accréditée selon la norme ISO/EN 17025, le LS dispose des techniques de radioanalyse nécessaires et veille sans cesse à les perfectionner. Il les fait également valoir en tant que centre de compétences de l'AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique) où il est fortement engagé dans le réseau de laboratoires ALMERA. En collaboration avec deux autres centres de compétences, il développe des méthodes qui peuvent être utilisées dans le réseau et dans les structures des États membres qui y participent et promettent une bonne qualité des résultats. Dans le cadre du démantèlement des centrales nucléaires, le PSI se charge plutôt des analyses de routine en collaboration avec l'IFSN.

En ce qui concerne le stockage des déchets radioactifs, le dépôt en couches géologiques profondes relève de la NAGRA et le centre de stockage intermédiaire ZWILAG du PSI. Le PSI et le LS peuvent tous deux être intégrés au programme de surveillance du stockage en couches profondes à venir puisqu'ils disposent d'un arsenal radioanalytique très complet.

Pour la gestion des événements radiologiques, les laboratoires fédéraux et leurs moyens opérationnels sont coordonnés dans l'organisation de prélèvement et de mesure (OPM) de la Confédération en cas d'augmentation de la radioactivité. Ils sont ainsi mobilisés en situation d'urgence par la Centrale nationale d'alarme (CENAL). En plus de mesures sur place, l'OPM se charge de prélever différents types d'échantillons dans l'environnement. Ils sont alors soumis à des analyses radiologiques complètes et ciblées en fonction de la nature de l'événement. Le laboratoire Spiez dispose des capacités d'analyse les plus importantes étant donné qu'en cas d'événement radiologique ou d'affluence massive d'échantillons, il peut recevoir l'aide du laboratoire de défense NBC 1 de l'armée et de ses spécialistes A. Cette formation se caractérise par une forte disponibilité : elle est opérationnelle au laboratoire dès le deuxième jour après l'alerte. Près de 60 spécialistes A sont formés à l'utilisation de la plupart des moyens de mesure fixes (au laboratoire) et mobiles (sur le terrain). Dans le civil, la plupart des spécialistes de milice travaillent dans la recherche scientifique, dans les hautes écoles, dans les laboratoires cantonaux ou dans l'industrie chimique. Ils suivent chaque année deux cours de révision pour entretenir leur maîtrise des techniques de mesure. Le LS est le seul laboratoire fédéral à pouvoir également assurer l'analyse complète des denrées alimentaires. Les autres

radioanalyses à mener en cas d'événement sont assurées, côté fédéral, par le PSI et, dans une moindre mesure, par l'OFSP et l'Eawag. Il convient, dans ce contexte, d'évoquer l'armée qui, en complément du laboratoire de défense NBC 1 déjà présenté, dispose d'une compagnie d'engagement de défense NBC et du bataillon de défense NBC 10 pouvant engager, de façon subsidiaire ou dans le cadre de conflits armés, des instruments et laboratoires mobiles qui peuvent effectuer des prélèvements selon les normes de l'OTAN et les normes nationales et les soumettre directement sur place à une radioanalyse limitée.

Dans le domaine de la sécurité intérieure, l'enjeu est d'empêcher la contrebande de matières radioactives à travers la Suisse de même que la possession ou la manipulation illégale de telles matières par des personnes ou organisations terroristes présumées et de retrouver les matières radioactives volées ou égarées dans les usines d'incinération d'ordures ménagères, les aciéries, les centres de tri, etc. L'OFSP et le laboratoire Spiez programment ensemble les contrôles ponctuels annuels de radioactivité planifiables au niveau des postes de douane, des aéroports, des routes, etc., et les mettent en œuvre au moyen de portiques et de détecteurs mobiles dans le cadre de campagnes de mesure de 50 jours. En cas de détection de matières radioactives volées ou égarées, la première instance est l'OFSP ou la Suva en tant qu'autorités d'autorisation et de surveillance. Cette première instance informe la CENAL et la centrale d'engagement de l'Office fédéral de la police (fedpol) qui, à leur tour, informent le Ministère public de la Confédération. Sur la base de l'évaluation de l'autorité de surveillance, il est alors décidé si l'enquête doit être menée par le Ministère public et la police criminelle fédérale avec l'assistance technique de l'équipe de criminalistique nucléaire suisse. Cette équipe, qui est intégrée au laboratoire Spiez (groupe d'intervention nucléaire du DDPS) en association avec l'Institut de science forensique de Zurich (FOR), collecte sur place les informations scientifiques importantes pour l'enquête et transfère les matières radioactives au LS pour étude conventionnelle et forensique par le LS et le FOR.

Le laboratoire Spiez est le laboratoire désigné pour la criminalistique nucléaire en Suisse. Il dispose de moyens d'analyse très élaborés pour remplir cette tâche. Il faut rappeler qu'au niveau national, la criminalistique nucléaire ne se limite pas au traitement de matières nucléaires mais s'intéresse à toutes les matières radioactives ayant une importance d'ordre forensique. À travers l'implantation de l'équipe de criminalistique nucléaire au laboratoire Spiez, la Suisse répond depuis quelques années aux obligations auxquelles elle s'est engagée en matière de politique étrangère dans le cadre des Sommets sur la sécurité nucléaire et d'autres accords. Dans le domaine de la forensique nucléaire, le LS est engagé dans divers groupes de

travail de l'AIEA et de l'Initiative mondiale de lutte contre le terrorisme nucléaire (GICNT) ainsi que dans le Groupe de travail technique international sur la criminalistique nucléaire (ITWG). Il collabore par ailleurs avec le Centre commun de recherche (CCR/JRC) de l'UE à Karlsruhe et avec le Livermore National Laboratory et le Los Alamos National Laboratory, tous deux aux USA. Les méthodes radioanalytiques du LS permettent une analyse complète des matières nucléaires et livrent de précieux indices : les impuretés spécifiques détectées dans les matériaux révèlent ainsi leur origine, les rapports isotopiques racontent leur cheminement...

Les instituts fédéraux actifs dans le domaine radioanalytique présentés ici entretiennent des partenariats avec de nombreuses structures nationales et internationales. En termes de politique étrangère, l'OFSP, l'OFEN, l'IFSN et le LS apportent un soutien technique et scientifique au Département fédéral des affaires étrangères (DFAE) pour toutes les questions de santé, de sécurité nucléaire et de

désarmement. Dans ce contexte, l'Institut de physique de l'Université de Berne est mandaté par la Confédération pour effectuer des mesures de gaz rares dans le cadre du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (TICE ou CTBT), dans lequel le LS est également impliqué.

Les laboratoires fédéraux non rattachés à des structures d'enseignement supérieur qui travaillent dans le domaine radioanalytique ont depuis longtemps conscience du problème de relève qui touche la radiochimie et la chimie nucléaire. En plus de l'augmentation prévisible des capacités, les laboratoires vont devoir renouveler leur personnel suite au départ imminent de toute une génération de chercheurs arrivant en bout de carrière. On estime ainsi grossièrement que le secteur de la radiochimie devra très bientôt recruter 4 nouvelles personnes par an et ce, pendant plus de dix ans. Or, à l'inverse de ce qui se fait dans le contexte universitaire, il sera quasiment exclu de recourir à des spécialistes non suisses dans les domaines d'action de la Confédération décrits ici.

Laboratoires impliqués dans le programme de surveillance

BFS	Bundesamt für Strahlenschutz	Freiburg im Breisgau/D
CENAL	Centrale nationale d'alarme, Office fédéral de la protection de la population du DDPS	Zurich
CERN	CERN, unité Santé et sécurité au travail et protection de l'environnement (HSE)	Genève
EAWAG	Département Ressources aquatiques & eau potable	Dübendorf
EPFZ	Institut de géophysique EPFZ	Zurich
HUG	Division de médecine nucléaire, Hôpital Cantonal	Genève
IFAF	Département F.-A. Forel, université de Genève	Versoix
IFSN	Inspection fédérale de la sécurité nucléaire	Brugg/AG
IRA	Institut de Radiophysique, CHUV	Lausanne
LS	Laboratoire SPIEZ, Office fédéral de la protection de la population du DDPS	Spiez/BE
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Baden-Württemberg	Karlsruhe/D
OFEV	Division Hydrogéologie, Office fédéral de l'environnement	Berne
OFSP FANM	Installations de recherche et médecine nucléaire, Office fédéral de la santé publique	Berne
OFSP SRR	Risques radiologiques, Office fédéral de la santé publique	Berne
OFSP URA	Radioactivité de l'environnement, Office fédéral de la santé publique	Berne
PSI	Département Radioprotection et sécurité, Institut Paul Scherrer	Villigen
Suva	Domaine Physique, Division Protection de la santé au travail	Lucerne
Uni-BE	Institut de physique, Département de physique climatique et environnementale, Université de Berne	Berne
	Département de chimie, Université de Berne	Bern

Récapitulation des activités et stratégies de surveillance

Milieu	Réseaux et stations de mesure	Méthodes
Débit de dose ambiant (rayonnement gamma externe)	Surveillance automatique du débit de doses ambiant: au niveau national par le réseau NADAM, à proximité des centrales nucléaires par le réseau MADUK TLD à proximité immédiate des centrales et des centres de recherche nucléaires (PSI et CERN)	NADAM: 71 stations, géré par la centrale nationale d'alarme (CENAL) (réseau d'alerte national); MADUK: 12 et 17 stations, respectivement, géré par l'IFSN TLD (composants γ) et dose de neutrons (PSI, CERN)
Mesures in situ	Environnement des centrales nucléaires Territoire national selon un programme spécial	Mesure in situ directe du spectre γ Détermination de la teneur du sol en radionucléides et de sa contribution à la dose ambiante
Air	6 échantillonneurs de grand volume (500-1000 m ³ /h env.) 1 échantillonneur d'aérosols Digital au Jungfraujoch URAnet: réseau d'alerte aérosols doté de 15 stations de mesure en ligne avec télétransmission des données; Dosages de ⁸⁵ Kr dans les échantillons d'air du Jungfraujoch	Echantillonneurs d'aérosols et de grand volume: capture continue sur des filtres à aérosols et spectrométrie γ au labo: limite de détection pour le ¹³⁷ Cs: 1 µBq/m ³ et 1,1 µBq/m ³ . 4 stations de surveillance de l'iode (FHT-1700); URAnet: 15 stations de surveillance spécifique des nucléides (FHT-59N1)
Précipitations	Stations de collecte des eaux de pluie dans toute la Suisse, γ -compris à proximité des centrales nucléaires, des centres de recherche et des industries	10 collecteurs d'eau de pluie à entonnoir d'1 m ² , spectrométrie γ hebdomadaire des résidus; limite de détection pour le ¹³⁷ Cs: 10 mBq/l (échantillon mensuel) Collecte d'eau de pluie sur 14 stations pour le dosage du tritium; sur une station: dosage du tritium dans l'humidité de l'air
Milieu aquatique	Prélèvement continu d'échantillons composites d'une semaine dans le Rhin, le Rhône, le Ticino et le Doubs ainsi qu'en amont et en aval des centrales nucléaires (Aar) Au niveau des centrales, prélèvements également dans l'eau souterraine, les sédiments, les poissons et les plantes aquatiques, URAnet: 5 stations de mesure automatique dans l'Aar et le Rhin	Spectrométrie γ et α Dosage de tritium URAnet: spectrométrie gamma avec détecteurs à scintillation NaI
Sol / terre	30 stations dans les Alpes et le Jura, sur le Plateau et le versant sud des Alpes, γ -compris au voisinage des centrales nucléaires, du PSI et du CERN	Couche de terre de 0-5 cm pour dosage du ⁹⁰ Sr et spectrométrie γ , voire spectrométrie α
Végétation (herbe, plantes)	Mêmes stations que le sol Feuillage des arbres au voisinage des centrales nucléaires, de l'incinérateur industriel de Bâle (RSMVA) et dans des stations de référence	Herbe: 2 fois par an, dosage du ⁹⁰ Sr et spectrométrie γ Feuillage des arbres: dosage de ¹⁴ C (une fois par an)
Lait	Même régions que pour le sol et la végétation Centrales laitières et grands distributeurs	Spectrométrie γ et dosage du ⁹⁰ Sr dans des échantillons isolés et composites, dosages occasionnels de tritium
Autres denrées alimentaires	Echantillons composites de céréales de différentes régions et du voisinage des centrales nucléaires Autres échantillons selon les besoins: légumes du voisinage des centrales, eaux minérales, champignons sauvages, produits d'importation, etc.	Spectrométrie γ Dosage du ⁹⁰ Sr
Corps humain	Ecoles genevoises Personnel du PSI Dentistes, cliniques dentaires scolaires et instituts de pathologie de différentes régions	Mesures dans tous le corps à Genève (HUG) et au PSI Dosage du ⁹⁰ Sr dans les vertèbres et les dents de lait
Émissions des centrales nucléaires, des industries, etc.	Centrales nucléaires, centres de recherche, etc. Stations d'épuration des agglomérations Eaux d'infiltration des décharges	Filtres à air, air d'échappement, etc. Effluents des hôpitaux, des décharges, des incinérateurs d'ordures, des stations d'épuration Dosages des rayonnements γ et α et du ⁹⁰ Sr

La radioanalyse à l'Institut Paul Scherrer (PSI)

*Dorothea Schumann, Laboratoire de radiochimie,
Institut Paul Scherrer*

Le PSI dispose de différentes installations nucléaires (accélérateurs, source de neutrons SINQ, SLS, Swiss-FEL, laboratoire chaud, protonthérapie, centre de radiopharmacie, centre fédéral de stockage intermédiaire, etc.) et d'une multitude de laboratoires dans lesquels des substances radioactives sont manipulées sous forme scellée ou non-scellée. Conformément à la législation et aux prescriptions en vigueur, il est indispensable, pour pouvoir mener des recherches avec des matières radioactives de quelque sorte que ce soit, d'assurer une surveillance radioanalytique du personnel, des installations et de l'environnement et de caractériser les substances, composantes et éléments de construction radioactifs à éliminer. Le PSI dispose d'un laboratoire accrédité pour les missions de routine. En même temps, beaucoup des méthodes et appareils utilisés pour le travail radioanalytique de routine interviennent également dans des travaux de recherche en physique nucléaire ou en radiochimie comme la détermination des sections de capture dans les réactions nucléaires, le développement de radiopharmaceutiques ou l'étude des éléments superlourds. Inversement, les résultats obtenus dans ces domaines de recherche permettent d'améliorer les méthodes d'analyse qui pourront plus tard intervenir dans les travaux de routine.

Instruments et méthodes de mesure

Les équipes du PSI travaillant dans le domaine de la radioanalyse et de la radiochimie disposent des appareils classiques de mesure des rayonnements ionisants (détecteurs de rayons α et γ , compteurs à scintillation liquide (LSC) pour les rayons β) ainsi que des laboratoires contrôlés et équipés nécessaires (de type A, B et C).

La spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) est utilisée pour analyser les solutions de combustibles nucléaires irradiés dans le laboratoire chaud. Les méthodes sont cependant sans cesse améliorées et perfectionnées, en particulier dans une optique de réduction du volume des échantillons et des quantités de déchets produites.

La spectrométrie de masse par accélérateur est mise à contribution pour le dosage des radionucléides à vie longue qui sont présents à très faible concentration et émettent un rayonnement très difficile à mesurer, comme le ^{14}C , le ^{36}Cl , le ^{10}Be , le ^{26}Al , etc. (en collaboration avec le Laboratoire de physique des faisceaux d'ions – LIP, Labor für Ionenstrahlphysik – de l'EPFZ).

Prestations d'analyse

Dans le cadre de ses analyses de routine, le PSI effectue plus de 5000 mesures pour la surveillance des émissions, des immissions et des incorporations et pour les relevés en vue de la libération, la caractérisation et la déclaration des matériaux et des locaux. Il réalise ces prestations à 80 % pour ses propres besoins et à 20 % pour le compte de partenaires extérieurs (centrales nucléaires, industries, NAGRA, OFSP, IFSN). Le PSI apporte alors tout son soutien aux projets de démantèlement des centrales nucléaires suisses.

A côté de la spectrométrie γ non destructrice, beaucoup d'échantillons doivent subir un processus de séparation radiochimique préalable afin que le radionucléide à mesurer soit sous une forme quantifiable. Des procédés séparatifs de routine ont été mis au point et standardisés à cet effet. Dans un souci d'assurance qualité, les équipes de radioanalyse du PSI participent régulièrement à des essais interlaboratoires.

Recherche et développement

Analyse des déchets des accélérateurs

Le PSI exploite l'un des accélérateurs de protons les plus puissants au monde. De ce fait, les éléments de construction qu'il est prévu de démonter dans le voisinage de l'installation sont hautement radioactifs. L'inventaire des radionucléides de tels déchets se distingue fondamentalement de celui des combustibles irradiés des centrales nucléaires dans la mesure où il porte principalement sur des nucléides à vie longue. Afin de répondre aux exigences des autorités, de nouvelles méthodes de séparation et de quantification ont été développées, souvent dans le cadre de travaux scientifiques. En dehors des aspects réglementaires, ces travaux contribuent fortement à l'amélioration des modèles de calcul théorique des taux de production des réactions nucléaires dans les accélérateurs (réactions dites de spallation). Les résultats de ces analyses en «benchmark» jouent un rôle considérable pour le perfectionnement des méthodes d'analyse de routine et fournissent des paramètres très importants pour la conception de nouvelles installations nucléaires.

Travaux de recherche en radioanalyse

Des recherches sont actuellement menées en collaboration avec l'IFSN pour développer des méthodes de dissolution plus efficaces pour les échantillons de béton et élaborer de nouveaux systèmes de séparation ainsi que pour mettre au point des méthodes de détermination directe des mélanges binaires de particules α et β . Dans le domaine de la radiogéochimie, des études sont menées sur les propriétés de couches de tourbe de l'ouest du Pla-

teau suisse enrichies en uranium. Un projet Sinergia est d'autre part en cours pour déterminer la demi-vie du ^{32}Si afin d'identifier de nouveaux radionucléides pour la datation des échantillons environnementaux. Enfin, des études sont menées en collaboration avec la NAGRA au laboratoire souterrain du Grimsel sur la diffusion de longue durée en se basant sur l'analyse de diverses eaux de forage.

Perspectives

Suite à l'entrée en vigueur, en 2018, de la nouvelle ordonnance sur la radioprotection et à l'abandon de l'énergie nucléaire par la Suisse, les travaux de radioanalyse vont gagner en importance. L'abaissement des valeurs limites pour beaucoup de radionucléides entraînera une

forte augmentation des besoins et efforts d'analyse qui, non seulement, se ressentira dans le contexte du démantèlement des centrales nucléaires, mais posera aussi de nouveaux défis aux instituts de recherche. Des efforts plus importants seront demandés pour le développement de nouvelles méthodes d'analyse permettant également de quantifier les radionucléides difficilement mesurables. Ces travaux de développement doivent être planifiés, coordonnés, financés et menés dans le cadre d'une large collaboration entre tous les laboratoires impliqués au PSI et leurs nombreux partenaires (IFSN, NAGRA, centrales nucléaires, OFSP, ZWILAG, IRA, Fachverband Strahlenschutz e.V., EPFZ, laboratoire Spiez), sachant que seule une interaction étroite entre la recherche, le développement et les services nous permettra de remplir les missions hautement exigeantes qui nous attendent.

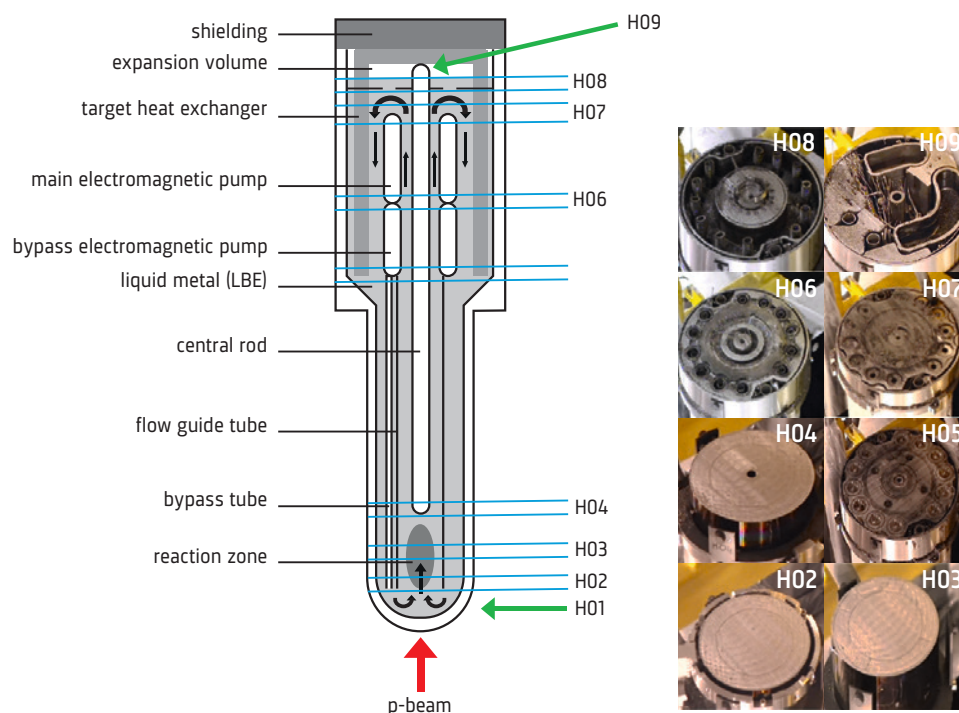


Fig. 2: Le projet MEGAPIE, qui testait une cible en métal liquide pour le faisceau de protons de forte intensité de 600 MeV, est un exemple typique de projet du PSI dans lequel la radioanalyse a joué un rôle décisif.
(Graphique: Bernadette Hammer)

Analyses radiochimiques, radioécologie et surveillance à long terme de l'environnement à l'Institut de Radiophysique (IRA-GRE)

Pascal Froidevaux, groupe GRE, Institut de Radiophysique Appliquée IRA, CHUV Lausanne

Le groupe de radioécologie (GRE) de l'Institut de radiophysique (IRA) du CHUV travaille dans le domaine de la radioécologie et de la surveillance environnementale. Il participe activement aux mesures spéciales (Pu, Am, U, Th, ^{90}Sr , ^{226}Ra , ^{210}Po , ^{55}Fe , ^{63}Ni , etc.) du plan de surveillance de la radioactivité supervisé par l'OFSP.

Il mène des projets de recherche sur la migration et la biodisponibilité des radioéléments dans l'environnement naturel et travaille au développement de méthodes d'analyses radiochimiques. Trois de ses projets ont bénéficié ou bénéficieront du soutien du FNS. Leurs résultats ont notamment montré que le plutonium était lié de manière appréciable à la fraction colloïdale des solutions de sol dans différents types de sols alpins, ce qui influe sur sa vitesse de migration dans le sous-sol et dans les eaux souterraines. Dans une étude consécutive, nous avons déterminé la part bio-disponible du plutonium dans deux rivières de l'arc jurassien en utilisant les gradients de diffusion en couches minces (DGT); nous avons ainsi montré que la technique DGT permettait de mesurer la fraction libre du Pu et de déterminer l'intensité des interactions entre le Pu et la matière organique dissoute. Les résultats ont montré que le Pu formait avec la matière organique dissoute un complexe labile ($0,2 < \xi < 0,4$; $k_{\text{diss}} \approx 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) capable de se dissocier pendant le temps de diffusion dans le gel (DGT), faisant ainsi augmenter le flux de Pu bio-disponible. Nous avons également pu déterminer, par la technique DGT associée à la mesure du Pu par spectrométrie de masse par accélérateur (AMS), la présence de Pu(V) sous la forme de complexes carbonatés dans la fraction calcite d'échantillons de mousses prélevés près de la source dans une rivière présentant à faible concentration de matière organique dissoute. Ces résultats ont un caractère très nouveau dans la mesure où le Pu était jusqu'à présent considéré comme une espèce inerte présentant une mobilité et une biodisponibilité très restreintes. Dans cette étude, le laboratoire IRA-GRE a développé une forte collaboration avec le Laboratoire de physique des faisceaux d'ions (LIP) de l'EPFZ dans la détermination du Pu par AMS. Cette collaboration se poursuit dans un projet du FNS visant la détermination du Pu, de l'U et de l'Am dans le milieu marin aux abords du centre de retraitement des déchets radioactifs de Sellafield qui sera mené en partenariat avec le Centre national océanographique de l'Université de Southampton.

Pour atteindre ses objectifs en matière de radioécologie, le GRE travaille activement au développement de méthodes originales d'analyses radiochimiques. En collaboration avec l'EPFL, nous avons développé une résine spécifique pour l'extraction de l'yttrium (nécessaire à la mesure du ^{90}Sr) selon le principe des polymères à empreintes ioniques (IIP). Ce projet a été financé par la Commission pour la technologie et l'innovation en raison de son potentiel pour l'industrie. Grâce à cette résine, nous avons pu multiplier par deux le nombre d'analyses de ^{90}Sr effectuées annuellement pour l'OFSP sans augmenter notre personnel. Ce projet se poursuit par le développement de nouveaux ligands pour la synthèse de résines permettant l'analyse du ^{55}Fe et du ^{63}Ni dans le cadre du démantèlement programmé des centrales nucléaires suisses.

Plusieurs études ont été menées en relation avec la détermination de la radioactivité dans l'humain. Le plutonium a ainsi été recherché par spectrométrie de masse dans les os et les dents de lait pour déterminer la période biologique de cet élément dans le corps humain. Il est apparu que le plutonium ne passait pas la barrière placentaire durant la gestation. Le GRE a également mis en place une collaboration fructueuse avec le Centre universitaire romand de médecine légale (CURML) et l'EPFZ pour l'utilisation de la spectrométrie de masse par accélérateur et d'autres techniques radiométriques (^{14}C , ^{90}Sr , ^{210}Po) afin de déterminer le temps écoulé depuis la mort lorsque seuls des ossements humains sont retrouvés. Cette collaboration a culminé avec la découverte de niveaux anormaux de ^{210}Po dans des échantillons d'effets personnels de l'ancien président Yasser Arafat. Notre implication dans cette expertise a conduit Mme Souha Arafat et l'Autorité palestinienne à choisir le GRE-IRA comme laboratoire de référence lors de l'exhumation de la dépouille du Président Arafat.

Radioanalyse par spectrométrie de masse par accélérateur

Sönke Szidat, Laboratoire de radiochimie et de chimie de l'environnement, Département de chimie et de biochimie, Université de Berne

La spectrométrie de masse par accélérateur (SMA ou AMS en anglais) est une méthode de mesure des radionucléides à vie longue. Révolutionnaire lorsqu'elle a été inventée il y a 40 ans, elle n'a cessé d'être améliorée depuis. En principe, la radioanalyse basée sur la mesure des radiations (radiométrie), qui consiste à déterminer la radioactivité par spectrométrie α , β ou γ est très sensible. Pour les radionucléides dont la demi-vie est de plusieurs siècles, les méthodes radiométriques s'avèrent cependant de moins

en moins efficaces car le nombre de désintégrations détectables dans une période de mesure raisonnable est de plus en plus faible. La spectrométrie de masse ne mesure pas la radioactivité (c'est-à-dire le nombre d'atomes qui se désintègrent) mais le nombre d'atomes présents et son efficacité est donc indépendante de la demi-vie. Le principal objet d'analyse par AMS est, de loin, l'isotope radioactif du carbone, le ^{14}C ($t_{1/2} = 5730$ a), souvent utilisé pour des besoins de datation. Quasiment toutes les datations au carbone-14 sont aujourd'hui effectuées par AMS. Cette technique permet de doser le ^{14}C dans quelques mg voire quelques μg de carbone, ce qui permet, hors du domaine archéologique, de nombreuses applications dans la recherche en environnement et sur le climat. En plus du ^{14}C , de nombreux autres radioéléments à vie longue peuvent être mesurés par AMS comme par exemple le ^{10}Be ($t_{1/2} = 1,39 \cdot 10^6$ a), le ^{26}Al ($t_{1/2} = 7,16 \cdot 10^5$ a), le ^{36}Cl ($t_{1/2} = 3,01 \cdot 10^5$ a), le ^{41}Ca ($t_{1/2} = 1,03 \cdot 10^5$ a), l' ^{129}I ($t_{1/2} = 1,61 \cdot 10^7$ a), l' ^{236}U ($t_{1/2} = 2,34 \cdot 10^7$ a), le ^{239}Pu ($t_{1/2} = 2,41 \cdot 10^4$ a) et d'autres transuraniens. Ces isotopes trouvent des applications dans les domaines de la géologie, de la biomédecine, de l'astrophysique et de la radioécologie, notamment.

L'AMS est la plus sensible des méthodes de spectrométrie de masse. Elle a été expérimentée et co-développée dès ses débuts en Suisse. L'un des premiers équipements d'AMS a été installé au début des années 1980 au Laboratoire de physique des faisceaux d'ions (LIP) de l'EPF de Zurich sous la direction du Pr Willy Wölfli en collaboration avec l'équipe de physique du climat et de l'environnement de l'Université de Berne (Pr Hans Oeschger). Depuis cette époque, le LIP est l'un des groupes leaders dans le monde dans le développement technique de l'AMS. Les recherches visent notamment des équipements d'AMS de petite taille. Les développements techniques réalisés en collaboration avec des chimistes (spécialisés en radioanalyse) se concentrent aujourd'hui sur le couplage d'appareils en vue de la préparation des échantillons ou de la séparation des substances pour les mesures de ^{14}C connectées. Le but de cette recherche est d'améliorer la séparation des éléments, de réduire les contaminations dans l'analyse des ultra-traces, la miniaturisation des systèmes de préparation des échantillons et l'augmentation des débits de passage des échantillons pour les projets demandant de très nombreuses mesures. Ces travaux sont réalisés en Suisse sur les sites disposant d'équipements d'AMS, à savoir le LIP de l'EPF de Zurich et le Laboratoire d'analyse du radiocarbone par AMS (LARA) de l'Université de Berne. L'équipe zurichoise travaille aujourd'hui notamment à la mise au point d'un système d'ablation laser pour la mesure en continu du ^{14}C dans les stalagmites, d'une interface simplifiée pour les études pharmacocinétiques et d'un système connecté pour l'analyse du ^{14}C sur composé spécifique (compound-specific radiocarbon analysis, CSRA). L'équipe bernoise se concentre notamment sur le cou-

plage avec l'analyseur du commerce Sunset OC/CE pour l'identification des sources d'émission de poussières fines organiques et sur l'alimentation avec des échantillons de déchets radioactifs enrichis en ^{14}C .

Dans le domaine de la spectrométrie de masse par accélérateur, des compétences en radiochimie et en chimie analytique sont tout particulièrement demandées pour la préparation des échantillons, notamment pour l'extraction des radionucléides rares des matrices telles que la roche, le sol, l'eau, l'air, les tissus biologiques ou les matériaux techniques. Par ailleurs, un bagage conséquent en chimie est demandé pour la séparation des espèces chimiques comme certaines substances organiques ou les états d'oxydation d'éléments inorganiques ainsi que pour la préparation chimique de cibles convenables pour la mesure. Ces compétences exigent une formation de haut niveau en chimie analytique ou en géochimie et, dans certains cas, des études de radiochimie doublées d'une solide expérience de laboratoire.

En radiochimie, l'analyse des radionucléides à vie longue par AMS a des applications dans différents domaines de la radioécologie, qui étudie la distribution et les effets des radio-isotopes dans l'environnement. Les aspects radiologiques touchant à la Suisse sont étudiés sur mandat de la Section radioactivité environnementale (URA) de l'Office fédéral de la santé publique (OFSP) (voir contribution de M. Burger, p. 18). Les radionucléides à vie longue et les mesures d'AMS interviennent à différents niveaux dans l'étude des couches géologiques profondes pour le stockage final des déchets radioactifs en Suisse. La stabilité des formations géologiques – risques d'éboulements, de glissements de terrain, etc. – est ainsi étudiée par une approche de sédimentologie en mesurant le ^{10}Be , le ^{14}C , l' ^{26}Al et le ^{36}Cl . Ces travaux sont effectués en collaboration avec la NAGRA et l'IFSN, notamment à l'Institut de géologie de l'Université de Berne (voir contribution de S. Churakov, p. 34) et aux Instituts de géologie et de géochimie et pétrologie de l'EPFZ.

Radiopharmacie

L'utilisation des procédés radiochimiques dans les sciences de la vie, en particulier en radiopharmacie et en médecine nucléaire, a fortement gagné en importance au cours des dernières décennies. Ils jouent un rôle fondamental dans le diagnostic des cancers et un rôle croissant dans leur traitement. Leur principe réside dans le marquage radioactif des molécules biologiques qui s'accumulent dans les tumeurs. Suivant les caractéristiques de désintégration du radionucléide, les patients peuvent être diagnostiqués et ensuite traités individuellement. Ce concept correspond à une approche de traitement personnalisé, également appelée « théranostique ». La radiopharmacie s'appuie fondamentalement sur trois piliers : premièrement, la production de radionucléides avec des techniques nucléaires, deuxièmement, le développement et l'optimisation des molécules ayant une affinité particulière pour les tumeurs puis leur marquage avec ces radionucléides, et troisièmement, l'étude préclinique ou l'application clinique (translation) visant à déterminer ou vérifier les qualités du radiopharmaceutique synthétisé pour le but recherché.

Le coût élevé des infrastructures et le savoir-faire complexe et hautement spécialisé demandé en radiochimie et en radioprotection suffisent à comprendre pourquoi la recherche en radiopharmacie s'effectue en Suisse dans le cadre universitaire. En même temps, la demi-vie parfois très courte des radionucléides utilisés demande une certaine proximité des équipements et des structures de recherche avec les cliniques et les patients.

En Suisse, des activités de recherche translationnelle et de développement en radiopharmacie (c'est-à-dire de la paillasse du chercheur au lit du patient, autrement dit, de la production des radionucléides à vie généralement courte à l'application au niveau des patients) ont lieu à la Clinique de radiologie et de médecine nucléaire de l'Hôpital universitaire de Bâle (www.unispital-basel.ch), au Département de recherche biomédicale de l'Hôpital universitaire de Berne (www.dbmr.unibe.ch), au Centre hospitalier universitaire vaudois à Lausanne (CHUV) et au Centre des sciences radiopharmaceutiques (CRS), un projet commun de l'EPF de Zurich, de l'Institut Paul Scherrer et de la Clinique de médecine nucléaire de l'Hôpital universitaire de Zurich (www.psi.ch/zrw/). La Suisse compte actuellement sept chaires de radiopharmacie ou de chimie axées sur la radiopharmacie : une à l'Université de Bâle (Pr M. Fani), deux à l'EPF de Zurich (Pr R. Schibli et Pr S. Ametamey), une quatrième au CHUV de Lausanne récemment attribuée au Pr M. Schottelius, une à l'Université de Berne à l'interface entre radiochimie et radiopharmacie (Pr A. Türlér; www.dcb.unibe.ch/) et deux à l'Université de Zurich à l'interface entre chimie inorganique / bioinorganique et radiopharmacie (Pr R. Alberto et Pr J. Holland). Ces chaires sont généralement associées à d'autres responsabilités scientifiques (privat-docents, chefs de groupes, etc.).

Dans le privé, le rachat des sociétés AAA et Endocyte – toutes deux spécialisées dans la radiothérapie interne

vectoriée – par Novartis pour 3,9 et 2,1 milliards de francs en 2018 montre bien le développement exponentiel de ce secteur. Les principaux radionucléides thérapeutiques utilisés actuellement sont produits avec des réacteurs de recherche (le ^{177}Lu et l' ^{131}I , par exemple). De même, le radionucléide le plus utilisé en diagnostique, le $^{99\text{m}}\text{Tc}$, provient de tels réacteurs. La Suisse n'exploite plus de réacteur de recherche pour la production d'isotopes depuis 1994 et se trouve donc tributaire des importations.

Dans les pages qui suivent, le principe de la radiopharmacie sera exposé et ce domaine illustré par divers exemples issus des laboratoires de recherche. Les deux derniers chapitres décrivent les activités de l'IRA (Institut de Radiophysique Appliquée du Centre Hospitalier Universitaire Vaudois) dans le domaine de la radiopharmacie. Cet institut a pour tâche de couvrir les besoins de la Suisse romande en radiopharmacie.

Concepts à la base de la recherche en radiopharmacie

Imagerie nucléaire et radiothérapie interne. La compréhension des processus biochimiques qui se déroulent au niveau moléculaire dans les organismes vivants est un enjeu majeur à l'ère de la médecine personnalisée. Les méthodes d'imagerie, non-invasives, comme la tomographie par émission monophotonique (TEMP ou SPECT en anglais) et la tomographie par émission de positons (TEP ou PET) qui sont très couramment utilisées en médecine nucléaire ont une sensibilité suffisamment élevée pour livrer une représentation fonctionnelle des processus biologiques ou pathologiques. Elles viennent compléter les méthodes morphologiques comme le scanner (TDM ou CT) et l'IRM. L'imagerie nucléaire repose sur l'utilisation de sub-

stances spécifiques marquées par des isotopes radioactifs (les radiopharmaceutiques ou radiotraceurs) qui se lient de manière sélective aux structures moléculaires avec une grande affinité. Un radiopharmaceutique se compose généralement d'une structure biologiquement active et d'un radionucléide qui détermine sa sélectivité et sa spécificité. Les propriétés physiques de désintégration décident également de l'utilisation du radiopharmaceutique pour la TEP, la TEMP ou le traitement des tumeurs. Étant donné que les radiopharmaceutiques sont généralement utilisés en quantités inférieures à la micromole, ils ne sont pas susceptibles de produire des effets (secondaires) pharmacologiques directs. En plus de leur emploi pour le diagnostic, les utilisations thérapeutiques en oncologie font l'objet d'un grand intérêt. L'utilisation fructueuse de nouveaux ligands ou chélateurs spécifiques des sous-types de récepteurs de la somatostatine pour le diagnostic ciblant les récepteurs peptidiques (par marquage au ^{68}Ga , par exemple) et l'endoradiothérapie (marquage au ^{177}Lu) ou le développement de ligands adressant l'antigène membranaire prostatique spécifique (PSMA) montrent tout le potentiel des radiopharmaceutiques en « théranostique », cette nouvelle approche qui associe diagnostic et traitement des tumeurs, dû au « simple » remplacement d'éléments par des radionucléides.

Production de radionucléides. Pour fabriquer de bons radiopharmaceutiques, il faut disposer de radionucléides présentant des caractéristiques de désintégration et des propriétés chimiques adéquates. Leur production nécessite des infrastructures complexes (équipements nucléaires, laboratoires de radiochimie, dispositifs de radioprotection, etc.). Des cyclotrons ont ainsi été installés dans différents hôpitaux de Suisse (Zurich, Berne et Genève) pour la production de radionucléides à vie courte comme le ^{18}F . Sous la forme de ^{18}F -fluorodésoxyglucose (FDG), cet isotope émetteur de positons est le traceur de TEP le plus utilisé en médecine nucléaire diagnostique.

Stratégies de marquage des biomolécules avec des radionucléides. Les métaux de transition et les métaux du groupe principal tels que le technétium ($^{99\text{m}}\text{Tc}$), le cuivre ($^{64/67}\text{Cu}$), le zirconium (^{89}Zr), l'indium (^{111}In), le gallium (^{68}Ga) ou encore le lutétium (^{177}Lu) doivent être stabilisés par des ligands multidentés (dotés de plusieurs points de liaison) pour rester liés à leur molécule porteuse (ou biomolécule) lorsqu'ils interviennent *in vivo*. La conception de tels ligands est donc un enjeu important pour les chimistes et une tâche d'autant plus délicate que les propriétés biologiques de la molécule porteuse doivent être prises en compte. Le ligand doit par ailleurs pouvoir être marqué quantitativement avec l'isotope radioactif choisi et être compatible avec les propriétés de la biomolécule. Un tel ligand est dit bifonctionnel. Enfin, dernier aspect mais non des moindres, le ligand doit pouvoir être synthétisé.

Cet aspect peut être une véritable gageure pour les spécialistes de chimie organique et de synthèse chimique.

Développement et optimisation de biomolécules ayant une forte affinité. Le travail consiste tout d'abord à rechercher des structures biologiques qui présentent une forte affinité et une grande sélectivité pour la structure ciblée dans les cellules tumorales. Ces structures biologiques sont alors modifiées afin de leur intégrer un radionucléide sans altérer leurs propriétés pharmacocinétiques. Par exemple, l'unité qui relie le chélateur à la biomolécule peut être modifiée chimiquement afin de lui conférer une autre lipophilie ou hydrophilie. Les structures biologiques peuvent également être dotées d'unités supplémentaires (se liant à l'albumine, par exemple) afin d'allonger le temps de circulation du radiopharmaceutique dans le sang ou d'accélérer son excrétion rénale. Les propriétés pharmacocinétiques du radiopharmaceutique sont ensuite déterminées dans des essais détaillés *in vitro* et des essais précliniques *in vivo* comprenant notamment l'examen non invasif des animaux de laboratoire par imagerie nucléaire.

Translation clinique : de la paillasse du chercheur au lit du patient. L'objectif de la recherche radiopharmaceutique est, en partant des besoins des praticiens, d'établir une chaîne de développement allant de l'installation pilote au laboratoire jusqu'à l'application auprès des patients et de la valider cliniquement. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire d'adopter une approche multidisciplinaire alliant physique nucléaire, radiochimie, chimie organique et inorganique, biochimie, pharmacologie, pharmacie, biologie, radiobiologie et médecine. La stratégie de recherche inclut d'identifier les structures cibles potentielles et pertinentes d'un point de vue clinique en collaboration étroite avec les praticiens et l'industrie pharmaceutique. Après des tests de toxicité ainsi que la validation de la radiosynthèse et des techniques d'analyse selon les bonnes pratiques de fabrication (GMP), les radiotraceurs prometteurs sont perfectionnés en vue d'essais en milieu hospitalier.

Production et applications des radionucléides en médecine nucléaire

Andreas Türlér, Laboratoire de radiochimie et de chimie de l'environnement, Département de chimie et de biochimie, Université de Berne

A côté des radionucléides standards couramment utilisés dans la pratique hospitalière, divers projets de recherche se concentrent sur le développement de nouveaux radionucléides pouvant intervenir dans un cadre diagnostique et thérapeutique.

Comme le montre l'exemple de Berne, un cyclotron à usage médical peut être modifié de manière à pouvoir produire de nouveaux radionucléides pour le diagnostic. Dans le cadre d'un projet interdisciplinaire du FNS (Fonds national suisse) achevé fin 2018, une station d'irradiation pour cible solide a ainsi été installée sur un cyclotron de 18 MeV, ce qui a permis de produire du $^{43,44}\text{Sc}$, du ^{68}Ga et du ^{64}Cu . La production de $^{43,44}\text{Sc}$, en particulier, s'est appuyée sur un processus précédemment mis au point avec le cyclotron de recherche de l'Institut Paul Scherrer. L'Université de Berne dispose de laboratoires radiopharmaceutiques certifiés GMP, condition indispensable à la production de radiopharmaceutiques destinés à des applications cliniques. L'équipe bernoise de radiopharmacie a ainsi déjà produit plus de 1000 doses de radiotraceurs diagnostiques comme le ^{68}Ga -PSMA-11, le ^{68}Ga -DOTATATE et le ^{68}Ga -DOTATOC pour différents hôpitaux, allant de Genève à Aarau. Jusqu'à présent, le ^{68}Ga , qui présente une demi-vie d'environ une heure, est obtenu avec des générateurs $^{68}\text{Ga}/^{68}\text{Ge}$. Ces derniers sont cependant très onéreux à l'achat (40-70 kCHF) et ne peuvent servir que pendant environ six mois car le ^{68}Ge présente une demi-vie de 271 jours. Des efforts importants sont donc engagés pour établir la production du ^{68}Ga au cyclotron de Berne afin que les traceurs au gallium-68 puissent être produits en grande quantité. Il est également prévu de produire des radioisotopes $^{43,44}\text{Sc}$ qui se combinent avantageusement au radionucléide thérapeutique ^{177}Lu pour des applications théranostiques. L'équipe bernoise de radiopharmacie produit également près de 100 doses de ^{177}Lu -DOTATOC et d'autres produits au ^{177}Lu sont en préparation. Ces produits peuvent, eux aussi, être livrés à des utilisateurs spécialisés ; jusqu'à présent, ils ont été employés à Berne, mais aussi à Saint-Gall, à Aarau et à Bellinzona.

Dans le cadre d'un projet Sinergia du FNS (PHOR), des recherches sont en cours à l'Université de Berne pour créer les bases d'une nouvelle méthode de production de radionucléides pour les applications théranostiques. L'idée est d'utiliser un accélérateur d'électrons à haute performance pour produire des rayons gamma de forte énergie et de grande intensité afin de provoquer des réactions photo-

nucléaires. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de combiner les savoirs en physique, en radiochimie et en radiopharmacie. C'est pourquoi un pôle de compétence a été créé dans ce domaine entre l'Université de Berne et l'Institut fédéral de métrologie (METAS).

Ce projet Sinergia se concentre sur la synthèse des paires de radionucléides théranostiques $^{43,44}\text{Sc} / ^{47}\text{Sc}$, $^{64}\text{Cu} / ^{67}\text{Cu}$ ainsi que sur la production de l'émetteur alpha ^{225}Ac avec lequel d'excellents résultats ont récemment été obtenus en thérapie anticancéreuse. Pour l'heure, la disponibilité de ce radioisotope pour les essais cliniques est très limitée voire inexistante. Ces études sont tributaires des infrastructures existantes, à savoir le microtron à 22 MeV et 20 microampères du METAS à Berne et le cyclotron de l'hôpital universitaire de Berne qui permet de produire les isotopes partenaires de diagnostic par TEP ($^{43,44}\text{Sc}$, ^{64}Cu) via des réactions induites par les protons.

Recherche fondamentale en chimie de coordination et en chimie organométallique avec les radionucléides

Roger Alberto, Institut de chimie, Université de Zurich

Le développement d'un ligand ou chélateur pour un radionucléide donné, son couplage à une molécule porteuse biologiquement active et son marquage avec le radionucléide en question s'appuient sur des concepts typiques de la chimie radiopharmaceutique et de tous les domaines de la chimie organométallique ou de la chimie de coordination. L'aspect supplémentaire de la radioactivité et les applications potentielles qui en découlent ajoutent à l'attrait et à l'importance de ce domaine. Si l'on considère, en plus de l'action purement chimique, les effets biologiques qui lui sont liés, on voit apparaître un domaine de recherche complexe, interdisciplinaire et hautement captivant. Il exige des compétences et savoir-faire en synthèse et en biologie en plus de la maîtrise des méthodes de radiochimie et de radioanalyse. Les possibilités d'application en font également un domaine économiquement intéressant pour les sociétés privées.

Pour acquérir des connaissances fondamentales sur la chimie des radionucléides, déterminer leurs propriétés physicochimiques et modéliser des complexes pour certaines applications, des études sont souvent menées sur les isotopes non-radioactifs de l'élément considéré. Leurs complexes ont souvent des propriétés chimiques et biologiques quasiment identiques à leurs homologues radioactifs. Il est cependant impossible d'exploiter ce parallèle pour les éléments qui ne présentent pas d'isotopes stables. C'est par exemple le cas du technétium (numéro atomique 43) et du prométhium (61) ainsi que des éléments

plus lourds que le bismuth. Etant donné que les isotopes du prométhium ont tous une demi-vie courte (^{147}Pm , $t_{1/2}=2.6\text{y}$), ils ne se prêtent pas à des études chimiques macroscopiques. Dans le cas du technétium, la situation est moins problématique : des isotopes à vie longue, donc du registre macroscopique (^{99}Tc , $t_{1/2} = 212\,000\text{ a}$) et des isotopes à vie courte, donc du registre microscopique ($^{99\text{m}}\text{Tc}$, $t_{1/2} = 6\text{ h}$) permettent une large palette d'études. On utilise donc le ^{99}Tc pour déterminer la structure ou la stabilité biologique des complexes intéressants d'un point de vue pharmaceutique si l'on souhaite caractériser un complexe au $^{99\text{m}}\text{Tc}$ pour une utilisation radiopharmaceutique.

Dans le cas du technétium, la recherche fondamentale est très proche des applications. Si une possibilité d'application est détectée pour un nouveau complexe qui n'était pas, en soi, conçu pour la pratique, un complexe analogue doit être fabriqué avec des quantités microscopiques de $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Pour les utilisations de routine, cette synthèse doit répondre à des critères bien définis : i) niveau de rendement reproductible de près de 100 %, ii) synthèse en solution aqueuse en l'espace d'une demi-heure à température ambiante ou au maximum à 100 °C et iii) synthèse à partir du pertechnétate [$^{99\text{m}}\text{TcO}_4$] $^-$, la forme la plus stable du technétium en milieu aqueux. Comme le montre la Fig. 3, des complexes inhabituels ou inattendus peuvent apparaître même si ces conditions sont respectées, ce qui peut conduire à une nouvelle application. « Les applications qui inspirent la recherche fondamentale » ne sont donc jamais loin de « la recherche fondamentale qui inspire les applications ».

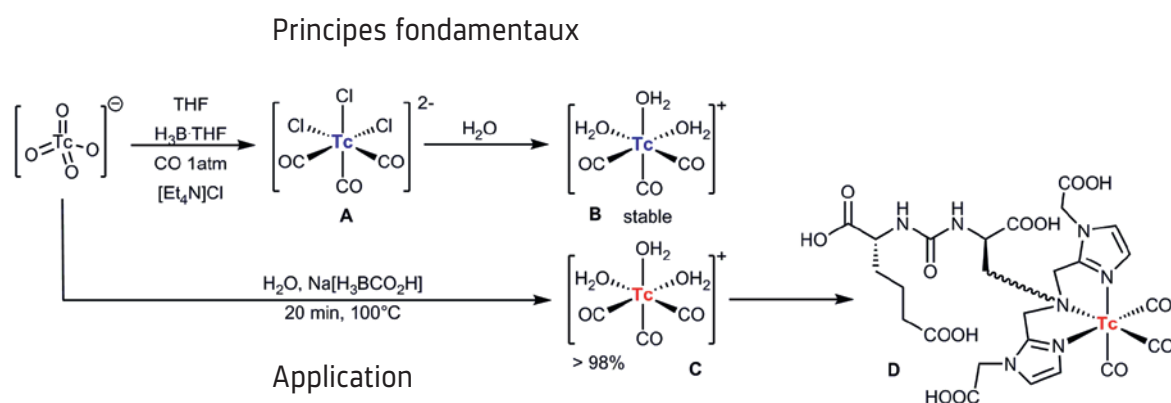


Fig. 3: Quand recherche fondamentale et application se rencontrent... Le complexe au CO **A** est synthétisé au laboratoire. Le complexe **B** se forme par substitution de tous les Cl par des H_2O et il se coordonne facilement à d'autres ligands → Application potentielle : fabrication de **C** avec du $^{99\text{m}}\text{Tc}$ en conditions douces et sans CO gazeux. Le marquage d'une molécule se liant au PSMA (antigène membranaire prostatique spécifique) a permis de créer le complexe **D**, un nouvel outil diagnostique pour la prostate.]

Alors que les applications du ^{99m}Tc étaient le moteur de la recherche fondamentale, peu de laboratoires dans le monde étudient encore aujourd'hui la chimie du technétium et ce, pour différentes raisons, dont la concurrence d'autres méthodes en imagerie de diagnostic. Pourtant, près de 80 % des procédés d'imagerie recourent à du ^{99m}Tc bon marché, mais entièrement importé.

La chimie du technétium est extrêmement variée, en premier lieu parce qu'il existe dans différents états d'oxydation, jusqu'à +VII. Si l'on combine ses propriétés chimiques fondamentales, non encore totalement explorées, avec les possibilités d'application, on voit apparaître de nombreuses potentialités de recherche. L'Université de Zurich (UZH) a reconnu l'intérêt de préserver la recherche en radiochimie et de développer la recherche fondamentale soucieuse d'applications. Dans son nouveau bâtiment de chimie, des laboratoires de radiochimie ultramodernes, utilisables pour des besoins de synthèse, sont mis en place. Les conditions sont ainsi réunies pour que la recherche fondamentale sur le ^{99}Tc soit poursuivie et même étendue à d'autres radioéléments d'intérêt médical.

«L'approche intégrée» correspond à une vision élargie du radiomarquage des vecteurs se liant aux récepteurs ou des complexes présentant une action pharmaceutique. Ce concept hérité de la chimie médicale inorganique et adapté à la chimie radiopharmaceutique est basé sur le marquage direct des molécules pharmaceutiques sans qu'elles aient à être conjuguées avec des ligands. Ce principe a par exemple été appliqué avec un certain succès dans le cas de la ferroquine, un antipaludéen contenant du fer dérivé de la chloroquine. Les essais cliniques sont actuellement en phase III. D'autres exemples ont montré que les inhibiteurs de protéines kinases utilisés dans les traitements anticancéreux gagnaient énormément en sélectivité et en affinité lorsque des complexes métalliques leur étaient intégrés. Ce concept de marquage, nouveau dans le domaine de la radiopharmacie, ouvre de multiples perspectives et s'avère particulièrement intéressant pour les jeunes scientifiques en raison de la complexité chimique du sujet.

Recherche radiopharmaceutique

Roger Schibli, Centre des sciences pharmaceutiques, Institut Paul Scherrer et Département de chimie et de biosciences appliquées de l'EPF de Zurich

En Suisse, la recherche radiopharmaceutique porte principalement sur le diagnostic et le traitement du cancer et sur les maladies neurologiques. Les structures cellulaires cibles telles que le récepteur à la somatostatine sst2, le récepteur à la bombésine, les récepteurs α et β aux folates, le récepteur de la cholécystokinine-2 CCK2 pour les

indications oncologiques et le système du glutamate et le système endocannabinoïde pour les affections du système nerveux central sont au cœur des recherches précliniques et translationnelles dans le domaine radiopharmaceutique. Les nombreuses publications à leur sujet attestent du succès de ces activités de recherche aux multiples applications cliniques potentielles menées entre l'Université de Berne, le PSI, l'EPFZ et les hôpitaux universitaires de Zurich, de Bâle et de Lausanne (CHUV).

Les radionucléides les plus variés, métalliques ou non métalliques, sont utilisés pour marquer les radiopharmaceutiques devant se lier aux récepteurs ciblés. C'est ainsi le cas du ^{18}F (diagnostic, TEP), du ^{68}Ga (diagnostic, TEP), du ^{111}In (diagnostic, TEMP), du ^{177}Lu (thérapie), du ^{64}Cu (diagnostic, TEP), du ^{44}Sc (diagnostic, TEP) et du ^{47}Sc (thérapie). La famille du terbium occupe une place à part dans les activités suisses de développement des radionucléides pharmaceutiques dont elle est en quelque sorte une spécialité: y figurent le ^{149}Tb (alpha-thérapie & TEP), le ^{152}Tb (diagnostic, TEP), le ^{155}Tb (diagnostic, TEMP) et le ^{161}Tb (thérapie). Les radionucléides du terbium ont été synthétisés dans le cadre d'une collaboration entre le Centre des sciences radiopharmaceutiques (CRS – PSI) et le Laboratoire de radiochimie (LRC – PSI) avec l'aide d'ISOLDE (CERN), de la SING (PSI) et des réacteurs de recherche de l'Institut Laue Langevin (France) et SAFARI (Afrique du Sud). Les exemples spécifiques présentés ci-après visent à illustrer le cheminement du marquage radioactif des molécules se liant aux récepteurs jusqu'à l'application clinique.

Les exemples spécifiques présentés ci-après visent à illustrer le cheminement du marquage radioactif des molécules se liant aux récepteurs jusqu'à l'application clinique.

Radiopharmaceutiques visant les récepteurs aux folates: Les récepteurs α et β aux folates (FR) sont surexprimés dans divers types de tumeurs alors qu'ils le sont peu dans les organes normaux. Un radiopharmaceutique marqué au ^{18}F se liant à ces récepteurs, le $^{[18}\text{F}]$ -AzaFol, a été développé par optimisations successives à partir de l'acide folique naturel jusqu'à obtenir un traceur pour la TEP. $^{[18}\text{F}]$ -AzaFol peut être produit avec un bon rendement radiochimique et présente un bon profil pharmacocinétique. Ce traceur a été récemment testé dans une étude pilote à l'USZ, à l'hôpital cantonal de Saint-Gall et au CHUV avec des patientes atteintes de cancer des ovaires métastasé et de cancer du poumon. Les premières données ont montré que les tumeurs FR-positives étaient bien identifiables. En parallèle, le CRS (Centre des sciences radiopharmaceutiques) teste les dérivés de folate radiomarqués pour le traitement des tumeurs dans des essais cliniques et les résultats sont prometteurs.

**Radiopharmaceutiques visant le récepteur de la cholécystokini-
ne-2 (CCK2):** À nouveau dans le domaine de l'oncologie, ces radiopharmaceutiques visent le cancer médullaire de la thyroïde, le troisième type de cancer thyroïdien par la fréquence. Cette forme particulièrement agressive de carcinome thyroïdien se caractérise par une forte fréquence de récepteurs CCK2. Un radioconjugué marqué au ^{177}Lu a été développé à l'Institut Paul Scherrer et optimisé sur le plan pharmacologique au vu des résultats d'une action COST soutenue par l'UE (european COoperation in Science & Technology). Ce radiopharmaceutique aux propriétés thérapeutiques est actuellement testé avec succès sur des malades atteints de cancer médullaire de la thyroïde en collaboration avec l'hôpital universitaire de Bâle.

Radiopharmaceutiques visant le récepteur cannabinoïde de type 2 (CB2R): Ce domaine d'utilisation des radiopharmaceutiques relève de la neurologie. En physiologie et pathophysiologie humaine, diverses maladies neurodégénératives et neuroinflammatoires se caractérisent par une augmentation de l'expression du CB2R. En l'absence de pathologie, ce récepteur présente des niveaux d'expression très faibles, voire non détectables, dans le cerveau. En cas de maladie, il peut cependant être régulé à la hausse dans la microglie activée (macrophages du cerveau).

Des études récentes ont montré qu'une régulation positive du CB2R était également observée lors de maladies neurodégénératives comme la maladie de Huntington ou la maladie d'Alzheimer et lors de maladies neuroinflammatoires comme la sclérose en plaques et la sclérose latérale amyotrophique (SLA). Ce profil d'expression fait du CB2R une cible intéressante pour l'imagerie médicale non invasive et, éventuellement, pour les approches thérapeutiques. L'EPFZ a développé un ligand spécifique au CB2R pour la TEP, le ^{18}F CB2-R1, avec le soutien du Centre de traitement des maladies musculaires de l'hôpital cantonal de Saint-Gall et de la société Roche (Bâle). Les premiers résultats ont montré que le nouveau ligand pour la TEP se fixait de manière spécifique aux tissus de moelle épinière humaine affectés par la SLA. Ce constat confirme l'hypothèse selon laquelle le CB2R est exprimé dans la moelle épinière chez les patients atteints de SLA. Les chercheurs travaillent actuellement à l'application clinique de ce nouveau radioligand.

Ces exemples choisis de recherche radiopharmaceutique translationnelle montrent toute la complexité et la multidisciplinarité de ce domaine de recherche et attestent de son potentiel en termes diagnostiques et thérapeutiques.

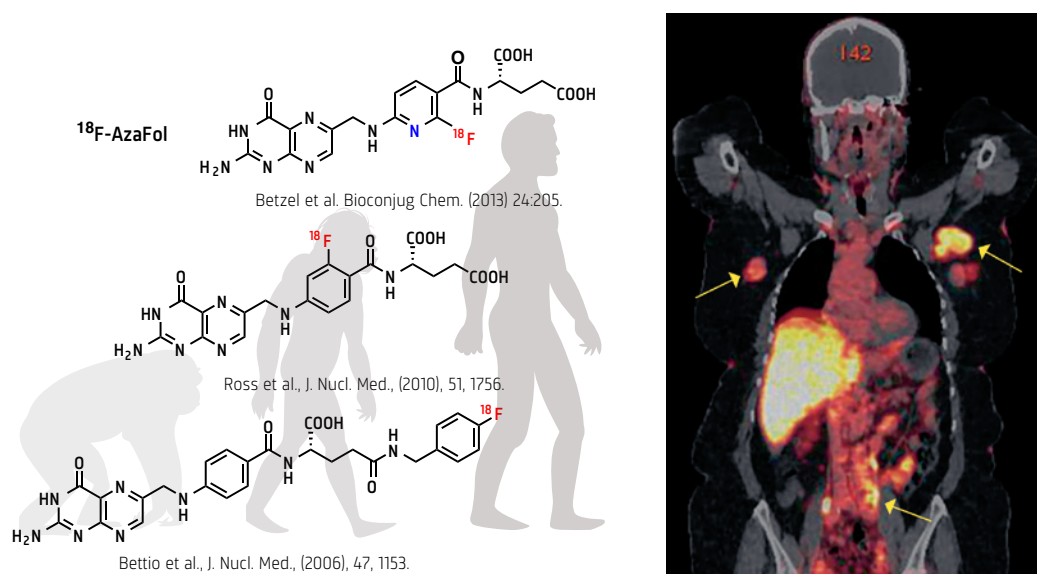


Fig. 4: (A gauche) Développement de nouveaux dérivés successifs de l'acide folique marqués au ^{18}F jusqu'à l'aboutissement au ^{18}F -AzaFol ; (à droite) Application clinique du ^{18}F -AzaFol sur une patiente atteinte d'un cancer des ovaires métastatisé (les flèches jaunes indiquent les métastases) (TEP/scanner effectué à l'USZ). (Image gauche: macrovector/freepik, Photo droite: Hôpital universitaire de Zurich)

Autres exemples de recherche radiopharmaceutique issus du PSI

*Nicholas P. van der Meulen et Cristina Müller,
Institut Paul Scherrer*

La production et l'évaluation préclinique de radiométaux exotiques (non standardisés) pour les usages médicaux est un sujet prioritaire particulier de recherche au PSI. L'objectif est d'étudier des radionucléides d'un même élément (radioisotopes) qui permettraient de mettre en œuvre des radiopharmaceutiques chimiquement analogues à un original donné pour l'imagerie médicale (diagnostic) et le traitement des maladies cancéreuses (thérapie), selon le principe de la théranostique. Deux éléments se sont avérés particulièrement intéressants dans cette optique et ont donc été étudiés au PSI: le scandium et de terbium.

Le scandium possède trois radioisotopes permettant une application théranostique: le ^{43}Sc ($T_{1/2} = 3,9$ h) et le ^{44}Sc ($T_{1/2} = 4,0$ h) peuvent être utilisés pour le diagnostic par TEP cependant que le ^{47}Sc ($T_{1/2} = 3,35$ j) se prête à une application thérapeutique dans la mesure où il émet aussi bien des particules β^- que des rayons γ qui autorisent une dosimétrie basée sur la TEMP. Du ^{44}Sc a été produit pour la première fois avec le cyclotron injecteur II de recherche du PSI avec des cibles enrichies en ^{44}Ca . La séparation du ^{44}Sc de la cible a été obtenue en développant des méthodes de chromatographie dont l'optimisation incessante au cours des ans a permis de produire un radionucléide de haute activité et de grande pureté. Le ^{44}Sc a été étudié dans de nombreux essais précliniques avec un conjugué de folate développé par nos soins et avec des molécules de ciblage utilisées dans le cadre clinique comme le DOTATOC et le PSMA-617. Même si la production de ^{43}Sc s'est avérée plus difficile, elle est intéressante car l'absence de rayonnement γ rend ce radionucléide plus avantageux que le ^{44}Sc . Il est envisageable de produire du ^{43}Sc pur avec un cyclotron médical en partant de deutérons par la réaction nucléaire $^{42}\text{Ca}(d,n)^{43}\text{Sc}$. Le ^{47}Sc a été produit à l'ILL de Grenoble (France) dans un réacteur à haut flux neutronique avec la réaction $^{46}\text{Ca}(n,\gamma)^{47}\text{Ca} \rightarrow ^{47}\text{Sc}$ qui a permis une séparation répétée du ^{47}Sc de la cible au Ca. Des essais pilotes avec des souris atteintes de tumeurs ont confirmé le potentiel thérapeutique du folate au ^{47}Sc et la possibilité de l'utiliser pour effectuer des mesures précliniques par imagerie TEMP.

Le terbium a ceci de particulier qu'il possède quatre radioisotopes intéressants pour la médecine: le ^{149}Tb , le ^{152}Tb , le ^{155}Tb et le ^{161}Tb . Le ^{155}Tb ($T_{1/2} = 5,32$ j) et le ^{152}Tb ($T_{1/2} = 17,5$ h) peuvent respectivement être utilisés pour l'imagerie TEMP et TEP. Ces deux radionucléides présentent un intérêt pour la dosimétrie avant une thérapie avec des radiolanthanides. Le ^{152}Tb et le ^{155}Tb ont été produits par

spallation induite par faisceau de protons suivie d'une séparation de masse avec l'équipement ISOLDE du CERN, à Genève, puis séparés chimiquement de la cible au PSI. Les qualités de ces deux radioisotopes métalliques pour la visualisation ont été étudiées dans des essais précliniques avec diverses molécules de ciblage des tumeurs comme l'acide folique et le DOTATOC. Le ^{152}Tb a été le premier isotope du terbium à être utilisé dans deux applications pilotes à la clinique de Bad Berka, en Allemagne. Les caractéristiques de désintégration du ^{161}Tb ($T_{1/2} = 6,89$ j) sont similaires à celles du ^{177}Lu , déjà utilisé en radiothérapie, mais ses émissions supplémentaires d'électrons de conversion et d'électrons Auger le rendent particulièrement intéressant pour les thérapies combinant particules β et électrons Auger. Le ^{161}Tb est produit avec une source de neutrons (comme la SING du PSI) ou un réacteur nucléaire en exploitant la réaction $^{160}\text{Gd}(n,\gamma)^{161}\text{Gd} \rightarrow ^{161}\text{Tb}$. Il est ensuite séparé chimiquement de la cible de Gd. Suite à la similitude des propriétés chimiques de ces deux lanthanides, cette séparation du Gd et du Tb est difficile. Toutefois, la méthode mise au point au PSI a fait ses preuves. Le ^{161}Tb a été utilisé dans des essais précliniques pour évaluer sa supériorité potentielle vis-à-vis du ^{177}Lu en combinaison avec des ligands du folate et les molécules de ciblage du PSMA. Les résultats ont montré que les conjugués marqués au ^{161}Tb présentaient la même répartition dans les tissus que leurs homologues marqués au ^{177}Lu . Mais ils ont également prouvé, *in vitro* et *in vivo*, que les radioconjugués au ^{161}Tb étaient plus efficaces que leurs équivalents au ^{177}Lu pour tuer les cellules tumorales quand ils étaient appliqués avec la même activité.

Il a été proposé d'utiliser le ^{149}Tb ($T_{1/2} = 4,1$ h) dans une thérapie ciblée aux émetteurs alpha assortie d'une visualisation par imagerie TEP. Le ^{149}Tb a été produit au CERN avec l'équipement ISOLDE puis purifié au PSI avec des méthodes de séparation chimique. Les derniers essais précliniques ont montré que la croissance des tumeurs de la prostate était significativement retardée chez les souris traitées au ^{149}Tb -PSMA-617. Par ailleurs, le ^{149}Tb émet un rayonnement β^+ détectable par TEP. Cette possibilité inédite de visualisation d'un émetteur alpha rend ce radioisotope métallique particulièrement intéressant pour les futures applications cliniques. Dans un tel contexte, nous prévoyons d'installer une installation de production au niveau de l'accélérateur de protons de 590 MeV du PSI pour réaliser des réactions de spallation couplées à un séparateur de masse.

Pour l'heure, les perspectives de production du ^{161}Tb et du ^{155}Tb sont bonnes. La qualité et les quantités produites devraient être très prochainement suffisantes pour les besoins biomédicaux.

Le ^{64}Cu est un autre exemple de radioisotope métallique développé au PSI. Un nouveau système de séparation chimique basé sur des échangeurs de cations a été mis au point parallèlement à la réalisation d'études précliniques avec des radioconjugués à base de NODAGA.

Analyses radiochimiques dans le domaine radiopharmaceutique et radiotoxicologie à l'Institut de radiophysique (IRA-GCR)

Marietta Straub, GCR, IRA, CHUV Lausanne

Dans le domaine médical, le Groupe de chimie radiopharmaceutique de l'Institut de radiophysique du CHUV (IRA-GCR) travaille d'une part dans le contrôle qualité des produits radiopharmaceutiques en Suisse et d'autre part dans le développement de techniques d'analyse pour la mesure de l'incorporation des radionucléides.

Le GCR est mandaté par l'Office fédéral de la santé publique pour des projets liés à la surveillance du marché suisse des radiopharmaceutiques et assure une expertise au niveau suisse pour l'enregistrement de nouveaux radiopharmaceutiques par Swissmedic et pour le contrôle qualité de ces produits. Dans le cadre de ces mandats, le groupe teste et développe notamment des méthodes analytiques pour le contrôle qualité des radiopharmaceutiques appliqués en médecine nucléaire. Il se charge notamment de caractériser les impuretés radionucléidiques et radiochimiques, de développer de nouvelles méthodes et de tester des techniques d'analyse pour différents radiopharmaceutiques. Il a ainsi régulièrement recours aux méthodes de purification des radionucléides par HPLC (chromatographie liquide haute performance) et CCM/TLC (chromatographie en couche mince), aux analyses de contrôle de qualité, aux analyses de taille des particules et aux procédés d'identification des impuretés chimiques. Le GCR dispose des équipements nécessaires à la réalisation de ses missions (HPLC, lecteur de CCM, activimètres, HPGe et NaI pour la spectrométrie gamma, compteur à scintillation liquide, etc.).

Absorption des substances radioactives : radiotoxicologie

Marietta Straub, Pascal Froidevaux, IRA, CHUV, Lausanne

Les laboratoires du GRE et du GCR de l'IRA effectuent des mesures radiotoxicologiques accréditées par les autorités de surveillance afin d'assurer un suivi des personnes travaillant avec les sources radioactives non scellées ou dans des milieux potentiellement contaminés. Les principales voies d'absorption des substances radioactives que sont l'inhalation, l'ingestion et la pénétration par les plaies sont étudiées et des techniques de contrôle de routine et d'urgence développées. Après avoir pénétré dans l'organisme, les substances radioactives sont transportées dans le sang et se répartissent dans les organes avant d'être excrétées par voie métabolique. Certaines substances peuvent s'accumuler dans certains organes et ne sont pas ou très peu éliminées. Leur durée de séjour dans l'organisme dépend de leurs propriétés physicochimiques et physiologiques et peut fortement varier d'une substance à l'autre. Certains nucléides exigent des analyses radiotoxicologiques et des mesures in vitro dans le sang, les urines ou les selles (principalement les purs émetteurs alpha et bêta). Selon les radionucléides, les mesures in vitro peuvent demander une séparation chimique. L'IRA est actuellement accréditée pour la mesure des radionucléides suivants : ^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{33}P , ^{35}S , ^{45}Ca , ^{123}I , ^{125}I , ^{131}I , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Am et ^{90}Sr .

Recherches sur la sûreté du stockage des déchets radioactifs

Pour assurer un dépôt sûr des déchets hautement radioactifs de la technologie nucléaire et des autres usages de substances radioactives (hôpitaux, par exemple), il convient de disposer d'une connaissance très solide des processus radiologiques / radiochimiques et géochimiques. En Suisse, cette mission de développement de l'expertise est assurée par l'Institut Paul Scherrer et l'Université de Berne, principalement sur mandat de la NAGRA.

Sergey Churakov, Laboratoire Sûreté des dépôts de déchets radioactifs, Institut Paul Scherrer et Institut de Géologie, Université de Berne

Les déchets radioactifs de la Suisse proviennent aux deux tiers de l'exploitation des centrales nucléaires et pour un tiers d'activités médicales, industrielles et de recherche. On peut supposer que ces proportions vont fortement changer suite au démantèlement des centrales nucléaires suisses. En Suisse, on distingue, selon les inventaires, les catégories de déchets radioactifs suivantes : haute activité (DHA), moyenne activité à vie longue (DMAL) et faible à moyenne activité à vie courte (DFMA). Les DHA comprennent les assemblages de combustibles usés et les résidus vitrifiés de retraitement. Suite à une forte puissance thermique due à la désintégration des produits de fission (chaleur dite résiduelle), les DHA sont également classés parmi les déchets producteurs de chaleur. Il faut jusqu'à un million d'années pour que la désintégration des radionucléides des DHA soit telle que leur radioactivité résiduelle correspond à celle du minerai d'uranium naturel. Dans le cas des DMAL et de DFMA, il faut attendre environ 100 000 ans pour leur radioactivité corresponde à celle des roches naturellement présentes en Suisse.

Dépôts en couches géologiques profondes

Suite à la période extrêmement longue de désintégration et au niveau très élevé de risque radiologique, la communauté internationale considère unanimement qu'en l'état actuel des connaissances scientifiques et techniques, le stockage en couches géologiques profondes est la seule solution envisageable pour la protection des êtres humains et de l'environnement.

En Suisse, trois sites se prêtant à un dépôt en couches géologiques profondes ont été identifiés et sont actuellement étudiés. Ils se situent tous dans des formations géologiques argileuses appartenant à la catégorie des argiles à Opalinus.

Le concept de sécurité qui préside au dépôt en couches géologiques profondes repose sur une succession de barrières techniques et naturelles. Ces barrières permettent d'une part de bloquer ou de ralentir la propagation des radionucléides et d'autre part de réduire les infiltrations d'eau pouvant venir de l'extérieur. Aucune des barrières techniques ne suffit à elle seule à empêcher les émanations de radionucléides mais la roche contribue fortement à leur rétention.

Suite à leur différence de toxicité et de puissance thermique, les DHA et les DFMA ne posent pas les mêmes exigences techniques. Les DHA vitrifiés et les éléments combustibles usés sont conditionnés dans des conteneurs en acier puis entreposés. L'espace resté libre dans le tunnel de stockage final est ensuite comblé avec de la bentonite, un matériau présentant d'excellentes propriétés d'étanchéification.

Les conteneurs en acier autour des DHA vitrifiés permettent, dans un premier temps, de protéger les radionucléides d'éventuelles entrées d'eau. Selon une estimation prudente, ils devraient être corrodés au bout d'environ 10 000, et deviendraient alors perméables. Contrairement aux DHA, les DFMA et les DMAL sont solidifiés dans une matrice en ciment.

Radiochimie et dépôt en couches géologiques profondes

Suite aux périodes d'entreposage extrêmement longues, à la complexité des déchets entreposés et à l'hétérogénéité de leurs matrices, un dépôt en couches géologiques profondes est un système particulièrement complexe. Pour pouvoir décrire les processus chimiques qui s'y déroulent dans le temps et l'espace, il est nécessaire de disposer de connaissances solides dans différentes disciplines telles que la géochimie, la radiochimie, la science des matériaux, les sciences de l'environnement, la mécanique des roches et l'hydrogéologie. En raison des interactions chimiques et des transitions de phases, les barrières techniques ne peuvent pas totalement empêcher la libération de radionucléides mais uniquement la ralentir. L'analyse de sûreté des dépôts géologiques profonds se base sur une compréhension détaillée des mécanismes de libération. Les principaux processus responsables de la propagation des radionucléides sont la diffusion, la sorption et la dissolution dans les minéraux. Ces processus conditionnent les concentrations maximales atteignables et les voies de libération des radionucléides dans un champ proche ou lointain.

La planification, la réalisation et l'achèvement d'un dépôt en couche géologiques profondes sont l'affaire de plusieurs générations. Un tel projet s'étend sur plus d'une centaine d'années et demande l'implication de plusieurs générations de scientifiques et d'ingénieurs. Les connaissances sur lesquelles se base notre conception actuelle du dépôt géologique profond datent du XX^e siècle. La Suisse aura encore besoin, à l'avenir, de spécialistes capables d'évaluer la sûreté du stockage en couches géologiques profondes à l'aune des connaissances scientifiques et techniques de leur temps.

Centres de compétences en Suisse

Le Laboratoire Sûreté des dépôts de déchets radioactifs (Labor für Endlagersicherheit, LES) de l'Institut Paul Scherrer est le centre de compétences de la Suisse en ce qui concerne la géochimie dans les dépôts géologiques profonds. Avec ses cellules chaudes, ses laboratoires de type A et C, sa source de lumière synchrotron (SLS), sa source de spallation (SINQ) et ses facilités d'accès à des ordinateurs surpuissants et à d'autres équipements haut de gamme, le PSI offre une excellente infrastructure. Le LES mène un vaste programme expérimental pour parfaire notre connaissance et notre compréhension de la rétention et du transport des radionucléides dans les matériaux poreux et des interactions géochimiques qui peuvent avoir lieu dans les dépôts géologiques profonds. Le LES développe par ailleurs des méthodes unifiées d'analyse des mécanismes de transport, de sorption et des réactions aux interfaces. Il étudie les possibilités d'extrapolation de ces processus aux systèmes naturels. Par ses données, ses modèles et son savoir, le LES contribue fortement à établir une base scientifique solide pour ces évaluations. Par ailleurs, le LES encadre des travaux de master et de doctorat, ce qui lui permet d'apporter une forte contribution à la formation de la relève scientifique et au transfert de savoir dans le domaine de la gestion des déchets nucléaires et de la géochimie environnementale.

Auteurs principaux



Roger Alberto a fait des études de chimie à l'EPF de Zurich avant d'effectuer une thèse de doctorat sur les complexes fluorés du technétium sous la direction du Pr G. Anderegg. Après un post-doc en tant que boursier de la fondation Humboldt auprès du Pr W.A. Herrmann (TU Munich) et du Pr A. Sattelberger (Los Alamos National Lab), il s'est consacré à la recherche en radiopharmacie au PSI auprès du Pr A. Schubiger. Il s'est vu octroyer une chaire à l'Université de Zurich en 1999 où il a dirigé l'Institut de chimie inorganique de 2006 à 2012 et l'Institut de chimie de 2013 à 2016. Depuis 2013, il est responsable du programme prioritaire universitaire «Light to Chemical Energy Conversion». Il a notamment reçu l'«Award in Bioorganometallic Chemistry», l'«Alexander von Humboldt Research Award» et l'«Heilbronner-Hückel Lectureship» de la GDCh. Il s'intéresse tout particulièrement à la chimie du technétium et des composés organométalliques biologiques et à la photosynthèse artificielle.



Mario Burger a tout d'abord suivi une formation de laborantin en chimie puis fait des études de génie chimique à la Haute école spécialisée à Berthoud et de chimie à l'Université de Fribourg avant d'effectuer une thèse en radiochimie et chimie de l'environnement à l'Université de Berne. Dans le cadre de sa thèse et de son post-doc en partenariat avec la NASA, il a analysé les éléments traces dans des météorites par activation neutronique pour déterminer leur âge cosmique et terrestre.

Entré au laboratoire Spiez (LS) à l'automne 1991 en tant que radiochimiste, il est progressivement devenu chef du groupe radioactivité/radiochimie qu'il a dirigé pendant plus de 10 ans. Il a été pour deux périodes inspecteur chef de l'UNSCOM en Iraq dans le domaine de la chimie. Il est engagé dans les efforts internationaux de désarmement nucléaire (CTBTO, NPT, etc.) et intervient depuis 15 ans en tant que conseiller scientifique dans la branche post-conflit et gestion des catastrophes du programme des Nations-Unies pour l'environnement (PNUE). Il dirige depuis 10 ans le domaine de chimie nucléaire du laboratoire Spiez qui, à travers le service d'essai STS 0028 accrédité selon la norme ISO/CEI 17025, œuvre pour fournir des analyses hors pair dans le domaine inorganique et radiochimique aussi bien au niveau national qu'international. Collaborateur central de l'AIEA, le LS est engagé dans plusieurs projets de coopération technique de l'Agence (îles Marshall, démantèlement des centrales nucléaires, etc.). Désigné comme laboratoire national d'analyses nucléo-légales, il est également intégré dans des projets de l'OFSP, sur les sites contaminés au radium, par exemple.



Heinz Gäggeler a fait des études de chimie à l'Université de Berne où il a effectué une thèse en fission nucléaire en 1973 sous la direction du Pr H.R. von Gunten. Un séjour de dix ans à l'étranger l'a ensuite conduit à l'Institut unifié de recherches nucléaires de Doubna, dans l'ancienne URSS, et au Centre de recherche sur les ions lourds (GSI) de Darmstadt, en RFA. Son principal sujet de recherche était la synthèse et l'étude des propriétés chimiques des éléments superlourds. En 1984, il est nommé à la tête du département de chimie de l'EIR à Würenlingen, qui deviendra le Laboratoire de radiochimie du tout nouveau PSI en 1988. Il passe ensuite son habilitation en «Nuclear Chemistry» au département de physique de l'EPFZ en 1989. Il est nommé professeur de radiochimie à l'Université de Berne en 1993 tout en conservant son poste au PSI. Son équipe a été la première à caractériser chimiquement les quatre éléments Sg, Bh, Hs et Cn. Il s'est par ailleurs engagé dans l'étude de la paléo-atmosphère à partir des informations conservées dans les glaciers.

Il a dirigé le Département de chimie et de biochimie de l'Université de Berne de 2000 à 2003 et le Département Particules et matière de 2003 à 2009 tout en assurant les fonctions de directeur adjoint de l'Institut Paul Scherrer de 2003 à 2007. Il a par ailleurs dirigé plusieurs organisations nationales et internationales.

En 2007, l'IURN de Doubna lui a attribué le grade de docteur honoraire pour ses travaux sur la chimie des éléments superlourds et il a reçu, en 2016, la médaille Vladimir Majer de la Société tchèque de chimie.

Autres auteures et auteurs



Sergey Churakov est professeur ordinaire de minéralogie à l'Institut de géosciences de l'Université de Berne et dirige le Laboratoire Sûreté des dépôts de déchets radioactifs (Labor für Endlagersicherheit) de l'Institut Paul Scherrer depuis 2014. Il a fait des études de géochimie et de mathématiques appliquées à l'Université Lomonossov de Moscou. Il a débuté sa carrière scientifique au Centre de recherche en géosciences (GFZ) de Potsdam et obtenu un doctorat en sciences expérimentales à l'Université technique de Berlin en 2001. Après sa thèse, il a travaillé dans différents projets de recherche au Centre suisse de calcul scientifique de Lugano et à l'EPF de Zurich avant de rejoindre le PSI en 2004. Ses recherches portent sur divers aspects multidisciplinaires de la géochimie environnementale et de la minéralogie et, en particulier sur l'étude, au niveau moléculaire, du transport et de la rétention des radionucléides dans les environnements naturels et les systèmes géotechniques.



Robert Eichler a fait des études de chimie à Dresde et Darmstadt. Il a effectué une thèse sur la caractérisation chimique inédite du Bohrium (élément 107) à l'Université de Berne (H.W. Gäggeler) qui lui a valu deux Prix d'excellence de la part de la GDCh et de l'Université de Berne. En 2001/02, il a effectué un post-doc à l'Université de Mayence et au Centre de recherche sur les ions lourds (GSI) de Darmstadt, RFA. Il a rejoint l'Institut Paul Scherrer en 2002 en tant que chef du groupe de recherche sur les éléments lourds. En 2004/05, il a effectué un séjour de recherche au Lawrence Berkeley National Laboratory grâce à une bourse du FNS tout en continuant à diriger son groupe au PSI. Il dirige le Laboratoire de radiochimie de l'Institut Paul Scherrer depuis 2017.



Pascal Froidevaux est chimiste et scientifique en chef à l'Institut de Radiophysique (IRA) du Centre hospitalier universitaire vaudois (CHUV) à Lausanne. Il a obtenu son doctorat de chimie sous la direction de J.-C. Bünzli à l'Université de Lausanne puis a effectué un post-doc à l'Université d'Australie-Occidentale de 1995 à 1997. Il travaille depuis 1998 à l'Institut de radiophysique en tant que chimiste analytique dans le domaine de la radioécologie. Ses thèmes principaux de recherche sont l'analyse des radionucléides, la mobilité et la biodisponibilité des radionucléides, les effets des radionucléides sur les humains et le développement de résines d'extraction en phase solide pour l'analyse des radionucléides.



Nicholas van der Meulen est originaire du Cap, en Afrique du Sud, où il fait ses études. Il a obtenu son doctorat à l'Université de Stellenbosch en 2008 sur la production de divers radionucléides, principalement à des fins médicales. Il a travaillé pendant 17 ans en tant que chercheur en chimie à l'iThemba-Laboratory for Accelerator Based Sciences avant de venir prendre la direction du groupe Développement des radionucléides à l'Institut Paul Scherrer en 2013. Ses activités se concentrent sur le développement des radionucléides exotiques ainsi que sur l'encadrement des étudiantes et étudiants dans ce domaine.



Cristina Müller a étudié la pharmacie de 1995 à 2000 à l'Université de Berne et à l'EPF de Zurich. Elle a ensuite effectué une thèse en sciences radiopharmaceutiques à l'Institut Paul Scherrer et obtenu, en 2005, un doctorat de l'EPFZ (PhD) qui lui a valu la médaille des EPF. C. Müller a ensuite effectué un post-doc au Centre médical Erasme de Rotterdam, aux Pays-Bas. Après son retour à l'Institut Paul Scherrer, elle a bénéficié d'une bourse Ambizione du Fonds national suisse. Son mémoire d'habilitation a reçu l'agrément de l'EPFZ en 2014, lui conférant le titre de privat-docent (PD). La même année, elle a été honorée du prix Ruzicka de l'EPFZ. C. Müller dirige actuellement un groupe de recherche reconnu de l'Institut Paul Scherrer. Ses activités de recherche portent principalement sur le développement de nouveaux radioligands pour le radiodiagnostic du cancer et d'autres maladies et sur l'étude des radionucléides non-conventionnels ou exotiques pour l'imagerie médicale et la radiothérapie interne. En 2018, elle a reçu le prix Marie Curie lors du congrès annuel de l'Association européenne de médecine nucléaire (EANM) à Düsseldorf.



Roger Schibli est professeur au département de Chimie et de biosciences appliquées de l'EPF de Zurich (EPFZ) et chef de laboratoire dans le domaine BIO à l'Institut Paul Scherrer (PSI) où il dirige le Centre des sciences radiopharmaceutiques (CRS). Le CRS est placé sous la tutelle de l'EPFZ, du PSI et de l'hôpital universitaire de Zurich. Le Pr Schibli a fait ses études chimie à l'Université de Bâle. Ses premières recherches étaient consacrées au développement de nouveaux complexes organométalliques du technétium et du rhénium. Après sa thèse, il a effectué un post-doc de deux ans à l'Université du Missouri-Columbia. En 2004, il a été nommé professeur assistant à l'Institut de sciences pharmaceutiques de l'EPFZ. Les activités de recherche du Pr Schibli se concentrent sur le développement de nouveaux radioconjugués pour le diagnostic et la radiothérapie interne dans le corps humain. Ceci implique la production de nouveaux radionucléides, l'identification de nouvelles molécules cibles de même que leur caractérisation et optimisation biologique et pharmacologique.



Dorothea Schumann a fait ses études de chimie à l'Université technique de Dresde et obtenu son doctorat en 1992 après un séjour de cinq ans à l'Institut unifié de recherches nucléaires de Douna (Russie) consacré l'étude de l'électromigration des radionucléides dans les solutions électrolytiques sans support électrolyte. Jusqu'en 1999, elle a été assistante scientifique dans le groupe Radiochimie de l'Institut für Analytik de l'Université technique de Dresde où elle étudiait les propriétés chimiques des éléments superlourds. En 2002, après un bref intermède en tant que cheffe de projet dans la société Wälischmiller, elle a intégré l'Institut Paul Scherrer où elle dirige depuis le groupe Isotopes and Target Chemistry. Ses activités de recherche se concentrent sur le développement de méthodes de séparation pour l'obtention de radionucléides exotiques à partir de matériaux irradiés ainsi que sur la détermination de la demi-vie des isotopes à vie longue.



Marietta Straub a effectué une thèse à l'EPFZ dans le cadre d'une collaboration avec l'Université de Princeton où elle a passé quatre ans en tant qu'hôte académique pour ses recherches de doctorat. Après sa thèse, elle a intégré le Groupe de radioécologie de l'IRA du CHUV en tant que collaboratrice scientifique. Deux ans plus tard, elle prenait la tête du Groupe de chimie radiopharmaceutique de ce même IRA. En 2015 et 2016, elle a été responsable de la production radiopharmaceutique à l'unité de médecine nucléaire du CHUV et suivi un cursus CAS de l'EPFZ en chimie radiopharmaceutique et radiopharmacie. Fin 2016, elle a quitté la production radiopharmaceutique pour concentrer les activités de son groupe sur le développement des mesures d'incorporation et sur les mandats de l'OFSP et de Swissmedic relatifs à l'assurance qualité des radiopharmaceutiques en Suisse. Depuis 2020, elle dirige le Groupe de chimie radioanalytique de l'IRA du CHUV de Lausanne (qui regroupe désormais la radioécologie et la chimie radiopharmaceutique).



Sönke Szidat a fait des études de chimie à l'Université Leibniz de Hanovre où il a ensuite effectué une thèse de doctorat avant de rejoindre le Laboratoire de radiochimie et de chimie de l'environnement de l'Université de Berne en 2000 pour un post-doc. Il a été promu chef de groupe indépendant et chargé d'enseignement en 2010 puis professeur associé en 2017. Sönke Szidat dirige le LARA, le Laboratoire d'analyse du radiocarbonate par AMS de l'Université de Berne, depuis 2012. Il a reçu l'Atmospheric Chemistry and Physics (ACP) Award de la SCNAT en 2008 et le prix Fritz Strassmann du groupe de chimie nucléaire de la Société allemande de chimie (GDCh) en 2009. Dans ses recherches, il utilise le ^{14}C pour déterminer l'origine de composants de l'atmosphère comme par exemple les aérosols carbonés, le CO_2 et le CH_4 , et développe des méthodes couplées d'analyse pour la mesure du ^{14}C .



Andreas Türler a fait des études de chimie à l'Université de Berne où il a obtenu son doctorat en 1989 dans le domaine des réactions de transfert des nucléons. Il a ensuite effectué un post-doc de trois ans sur la chimie des éléments superlourds dans l'équipe du Pr Darleane C. Hoffman au Lawrence Berkeley National Laboratory, USA, avant de revenir en Suisse intégrer l'Institut Paul Scherrer. La Société allemande de chimie (GDCh) lui a attribué le prix Fritz Strassmann en 1994. Il a passé son habilitation en 2000 à l'Université de Berne puis s'est vu octroyer la chaire de radiochimie et la direction de l'Institut de radiochimie de l'Université technique de Munich. En 2009, il s'est vu confier la chaire de radiochimie de l'Université de Berne et la direction du Laboratoire de radiochimie et de chimie de l'environnement de l'Institut Paul Scherrer, qu'il a assurée jusqu'en 2017. Le Pr Türler concentre aujourd'hui ses activités à l'Université de Berne sur le développement de nouveaux radionucléides pour les applications en médecine nucléaire.

Abréviations

AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
AMS	Spectrométrie de masse par accélérateur
CB2R	Récepteur cannabinoïde de type 2
CCK2	Cholécystokinine-2
CCM	Chromatographie sur couche mince/TLC
CENAL	Centrale nationale d'alarme
CHUV	Centre hospitalier universitaire vaudois
CINCH	Modular European Education and Training Concept In Nuclear and Radio Chemistry
CRS	Centre des sciences radiopharmaceutiques (de l'EPFZ, du PSI et de l'USZ)
CT	Computerized tomography
CURML	Centre universitaire romand de médecine légale
DDPS	Département fédéral de la défense, de la protection de la population et des sports
DFAE	Département fédéral des affaires étrangères
DFMA	Déchets de faible et moyenne activité à vie courte
DGT	Diffusive gradients in thin films/gradientes de diffusion en couches minces
DHA	Déchets de haute activité
DMAL	Déchets de moyenne activité à vie longue
DOTATOC	(1,4,7,10-Tetraazacyclododecan-1,4,7,10-tetraacetic acid D-Phe-cyclo[Cys-Tyr-D-Trp-Lys-Thr-Cys]-Thr(ol)
EIR	Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung/Institut fédéral de recherches en matière de réacteurs (ancêtre du PSI)
FNS	Fonds national suisse pour la recherche scientifique
FR	Récepteurs aux folates
GCR	Groupe de chimie radiopharmaceutique (de l'Institut de radiophysique du CHUV)
GMP	Good Manufacturing Practice/Bonnes pratiques de fabrication
GRE	Groupe de radioécologie (de l'Institut de radiophysique du CHUV)
HPLC	High-performance liquid chromatography/Chromatographie liquide de haute performance
IFSN	Inspection fédérale de la sécurité nucléaire
IRA	Institut de Radiophysique Appliquée (Université de Lausanne)
IRM	Imagerie de résonance magnétique
ISOLDE	Isotope Separator On Line DEvice au CERN
LES	Labor für Endlagersicherheit du PSI/Laboratoire Sûreté des dépôts de déchets radioactifs
LIP	Labor für Ionenstrahlphysik de l'EPFZ/Laboratoire de physique des faisceaux d'ions
LS	Laboratoire Spiez
METAS	Institut fédéral de métrologie
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle/Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs
NODAGA	1,4,7-triazacyclononane,1-glutaric acid-4,7-acetic acid
OFEN	Office fédéral de l'énergie
OFSP	Office fédéral de la santé publique
ORaP	Ordonnance sur la radioprotection
PSI	Institut Paul Scherrer
PSMA	Antigène membranaire prostatique spécifique
RIKEN	Rikagaku Kenkyūjo, Institut japonais de physique et de chimie
SEFRI	Secrétariat d'État à la formation à la recherche et à l'innovation
SINERGIA	Programme de financement du FNS
SINQ	Source (neutronique) de spallation du PSI
SLA	Sclérose latérale amyotrophique
SLS	Source de lumière synchrotron du PSI
Swiss-FEL	Swiss Free Electron Laser du PSI
TDM	Tomodensitométrie (scanner ou CT)
TEMP	Tomographie par émission monophotonique/SPECT en anglais
TEP	Tomographie par émission de positons/PET en anglais
UNSCOM	United Nations Special Commission
USB	Hôpital universitaire de Bâle
USZ	Hôpital universitaire de Zurich
UZH	Université de Zurich
ZWILAG	Centre de stockage intermédiaire des déchets radioactifs en Suisse

SCNAT – un savoir en réseau au service de la société

L'**Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT)** s'engage à l'échelle régionale, nationale et internationale pour l'avenir de la science et de la société. Elle renforce la prise de conscience à l'égard des sciences naturelles afin que celles-ci deviennent un pilier central de notre développement culturel et économique. Sa large implantation dans le milieu scientifique en fait un partenaire représentatif pour la politique. La SCNAT œuvre à la mise en réseau des sciences, met son expertise à disposition, encourage le dialogue entre la science et la société, identifie et évalue les progrès scientifiques de manière à construire et à renforcer les bases de travail de la prochaine génération de chercheuses et de chercheurs. Elle fait partie des Académies suisses des sciences.

