V. LES ASPECTS NORMATIFS

La préexistence et les ajouts, autorisés ou accidentels, de substances radioactives dans l'environnement justifient les demandes d'expertises sur l'état radiologique de l'environnement (radioécologie) et les évaluations d'impact sur les populations humaines (radioprotection). Ces questions émanent tant des instances officielles internationales, nationales ou régionales que des exploitants d'installations nucléaires, mais également des médias et des associations publiques locales. De plus, la prise de conscience de l'enjeu que représente la protection de l'environnement dans le contexte du développement durable aboutit à une demande de référentiels qui permettent aux acteurs socio-économiques d'évaluer leurs activités vis-à-vis de l'environnement. Dans ce contexte, même si actuellement les niveaux de radioactivité attendus dans l'environnement sont faibles, des résultats de mesurage sont requis pour établir l'impact des pratiques ou des accidents nucléaires. Les résultats de ces mesurages sont utilisés pour établir des états radiologiques ponctuels, des chronologies sur le long terme ou pour expliciter et quantifier les mécanismes de transfert des radionucléides entre les différents constituants de l'environnement. Ils seront éventuellement confrontés aux résultats des calculs, obtenus par des simulations mathématiques, afin de valider les évaluations théoriques d'impact et de risques. La crédibilité des expertises dans le domaine "nucléaire et environnement" repose donc, en partie, sur la qualité et la fiabilité des stratégies de prélèvement d'échantillons dans l'environnement, de leur préparation au laboratoire et des mesurages des radionucléides qu'ils contiennent. Comme l'indique plus généralement un rapport de l'Académie des sciences, *« les questions de mesure occupent une place centrale dans le domaine de l'environnement »*. Plus encore, peut-être, qu'ailleurs cela se vérifie dans le nucléaire.

Qu'il s'agisse de répondre aux demandes des instances officielles, des exploitants ou à celles de l'opinion, le besoin de référentiels admis par tous sur l'état radiologique de l'environnement se fait instamment sentir. Le développement de la normalisation dans ce domaine s'avère donc une nécessité.

Les travaux normatifs dans le domaine de la mesure des radionucléides dans l'environnement

Aujourd'hui, la tendance est à l'internationalisation du contrôle et de la surveillance des activités industrielles à travers l'adoption de traités ou de conventions internationales qui reposent sur l'évaluation de l'impact des contaminations transfrontières, chroniques ou accidentelles. Pour le nucléaire et son rapport à l'environnement, cet élargissement des partenaires nationaux à ceux d'autres États impose que les résultats des mesurages(1) d'**activités**, présentés par un pays pour caractériser des effluents rejetés dans l'environnement ou des échantillons environnementaux, soient fiables et reproductibles pour être acceptés par l'ensemble des États potentiellement concernés par une contamination régionale.

Les méthodologies et les installations de mesurage doivent donc être adaptées aux développements et modifications des pratiques liées à l'évolution des applications nucléaires qui conduisent à la baisse progressive des rejets de radionucléides dans l'environnement. Aujourd'hui, les niveaux d'activité des **radionucléides** artificiels au sein des composantes aquatiques et terrestres de la plus grande partie du territoire français relèvent du domaine de mesure des traces(2), voire des ultra-traces. Dans tous les cas, les méthodologies retenues doivent être conformes aux exigences des normes **ISO** (*International organization for standardization*) pour les laboratoires d'essais, afin de garantir la fiabilité des résultats de mesurage nécessaires à la crédibilité des études scientifiques, des expertises ou des contrôles réglementaires.

(1) Employé dans le texte, *mesurage* est le terme normalisé par l'ISO pour couvrir l'ensemble des opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur (extrait du vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie ISO). En l'occurrence, le mesurage conduit à déterminer l'activité d'un **radionucléide** exprimée en **becquerels** (Bq).

(2) Traces : de nombreux analystes utilisent ce terme pour décrire des déterminations réalisées à des niveaux inférieurs à une partie par million (ppm) ; d'autres l'utilisent pour des analyses où l'**analyte** est à des niveaux de concentrations qui posent des difficultés techniques pour l'obtention de résultats validés.

Cet article présente brièvement les travaux de normalisation et les règles de raccordement nécessaires en métrologie des radionucléides présents dans les matrices environnementales. Il fait également le bilan des documents normatifs en vigueur.

Mesurage des radionucléides dans l'environnement

Les expertises qui portent sur des radionucléides d'origine naturelle concernent généralement des remobilisations d'**éléments** qui conduisent à des ajouts de faibles quantités d'activité par rapport à leurs niveaux naturels. En ce qui concerne l'activité des radionucléides artificiels, les expertises montrent que celle-ci est généralement très inférieure à celle des autres constituants naturels **radioactifs** de la matrice. De plus, des contaminations provenant de réactifs, des équipements ou de l'environnement du laboratoire peuvent conduire à des résultats surestimés. En outre, les pertes de l'**analyte** à mesurer, lors des opérations de préparations radiochimiques ou autres, sont plus critiques aux faibles concentrations ou lors de la recherche de faibles écarts d'activité et peuvent conduire à être dans l'incapacité de détecter l'analyte ou sa variation d'activité. Enfin, l'interférence des constituants de la matrice avec le système de détection peut conduire à des concentrations sous- ou surestimées qui nécessitent de rajouter des étapes de purification ou d'utiliser des détecteurs plus sélectifs.

Pour répondre à ces contraintes, le métrologiste doit donc abaisser les limites de détection et augmenter la précision et la justesse des mesurages. Dans ce contexte, garantir la fiabilité des résultats obtenus est considéré comme la question majeure de l'analyse des radionucléides dans les matrices environnementales. La seule réponse possible est la mise en place d'un système rigoureux d'assurance de la qualité, qui respecte les bonnes pratiques de laboratoire (OCDE, 1992) et les exigences énoncées dans les principes de l'assurance de la qualité. Ces exigences ont été codifiées dans les documents de la série de l'ISO 9001 pour la certification, et de la norme ISO 17025 pour l'accréditation.

CEA/Valduc

CEA/Valduc

Ci-dessus, relevé d'un filtre correspondant à un prélèvement d'air (hebdomadaire), avant son envoi au laboratoire d'analyses nucléaires. Ci-contre, mesure des paramètres physico-chimiques d'eaux sur des échantillons prélevés dans l'environnement d'un centre CEA.

Organisation de la normalisation dans le domaine nucléaire

Le Bureau de normalisation des équipements nucléaires (BNEN) et l'Association française de normalisation (Afnor) sont les organisations qui s'occupent au niveau français de la normalisation en métrologie. Au niveau international, le Comité européen de normalisation (CEN) et l'ISO s'efforcent de mettre en place une pratique métrologique rigoureuse pour le mesurage, entre autres, de l'activité des radionucléides, afin d'assurer la comparabilité des résultats obtenus dans les différents États membres.

En France, le BNEN, agréé le 26 juin 1990 par décision du ministère de l'Industrie et de l'Aménagement du territoire, est en charge de la gestion des commissions françaises et des groupes de travail associés (figure p. 98), dans les domaines de la protection contre les **rayonnements ionisants** (commission M60-1), de la technologie du cycle du **combustible** nucléaire (M60-2) et du mesurage de la radioactivité dans l'environnement (M60-3). Cette dernière commission a été créée en 1992 à la suite de litiges sur des résultats de mesurages obtenus par différents laboratoires, à la demande du ministère de l'Industrie. Celui-ci a donc chargé l'Afnor de lui proposer des travaux normatifs sur les mesurages de la radioactivité dans l'environnement. L'approche normative semblait pouvoir répondre à une facette des contentieux entre différents organismes publics et privés, susceptibles d'émettre des résultats d'activité significativement différents sur des échantillons apparemment identiques. Au sein du CEA, la Cetama[3] est chargée des actions d'amélioration de la qualité des résultats des mesurages réalisés dans ses laboratoires. Ainsi, quatorze groupes de travail, dont le GT 31 *Analyse des radionucléides dans l'environnement*, organisent des circuits d'intercomparaison, valident et rédigent des protocoles de mesures. Certaines de ces méthodes sont proposées aux GT du BNEN pour être évaluées par l'ensemble de la communauté métrologique et éventuellement soumises comme projets de normes à l'Afnor.

Pour répondre aux objectifs de cette dernière, la commission M60-3 a été structurée en quatre groupes de travail en fonction des principales matrices environnementales : air, eau, sols et bio-indicateurs. Cette structure répond également aux sections du programme 135 du Comité français d'accréditation (Cofrac). Un cinquième groupe de travail aliments lui a été associé pour répondre aux exigences du programme 99-4 du Cofrac.

Cette commission est chargée de la normalisation des méthodes de mesurage de la radioactivité dans l'environnement, à l'exception du domaine médical, de la **radioprotection** des travailleurs, et de la contamination. Elle a une composition plurielle, puisque ses membres sont soit directement responsables de la surveillance de l'environnement à proximité d'installations d'EDF, de Cogema et du CEA, soit en charge du contrôle (DGSNR), de l'expertise (**IRSN**) ou soit membres d'une association de protection de l'environnement (comme la Criirad). Pour ceux en charge de la surveillance, la traduction d'une méthode de mesure appliquée dans les laboratoires en un texte normatif est bien la reconnaissance, par l'ensemble des partenaires de ce domaine, de la qualité des travaux menés dans ces unités.

Depuis sa création, les travaux de cette commission ont conduit à la publication de plus de 40 normes

(3) La Cetama (Commission d'établissement des méthodes d'analyse) a pour mission de mener les actions visant à améliorer la qualité des résultats des mesures réalisées dans les laboratoires du CEA.

CEA/DAM/IdF

Le choix des échantillons sur le terrain doit être représentatif des situations étudiées et nécessite des connaissances complémentaires sur les paramètres pédologiques et hydrogéologiques, ici étudiés à partir des données de sondes hydriques et d'une station météo.

Afnor sur les méthodes de prélèvement des échantillons de l'environnement et de mesurage des radionucléides. Une dizaine de projets de normes supplémentaires sont en cours de rédaction.

Documents à caractère normatif

Les études radioécologiques et les évaluations d'impact sanitaire sont fondées sur des résultats de mesurages réalisés sur des échantillons environnementaux et d'aliments initialement prélevés suivant des méthodologies dites génériques qui font l'objet de publications internationales (**AIEA**, **OMS**). Lorsque les laboratoires d'essais ont fait état de besoins de textes normatifs spécifiques, nous verrons dans les paragraphes suivants comment les documents produits par la commission M60-3 ont été positionnés dans l'ensemble des normes Afnor et ISO déjà publiées, occasionnellement dans celles de l'ASTM américaine (*ASTM International,* précédemment *American Society for Testing and Materials*) et de la Commission électrotechnique internationale (CEI), plus particulièrement chargée de l'instrumentation et des équipements reposant sur des composants électroniques.

Qualité de l'eau

Les travaux normatifs rédigés par le groupe eau s'adressent aux laboratoires chargés de déterminer la radioactivité présente dans l'eau potable et les eaux brutes peu chargées en sels. L'effort normatif de l'Afnor, puis de l'ISO, dans le domaine de la qualité de l'eau, a été important dans le passé et s'est concrétisé par la publication d'un jeu quasi complet de documents applicables aux expertises et recherches radioécologiques. Des documents complémentaires à ceux de l'ISO ont été publiés par la commission M60-3 (tableau), en particulier pour la détermination des indices de la **radioactivité alpha** (NF M60-801) et **bêta** (NF M60-800) des eaux peu chargées en sels, pour l'actualisation de la norme de mesurage du tritium dans les eaux (NF M60-802-1) et de la norme du mesurage du carbone 14 (NF M60-802-2), puis de ces deux radionucléides simultanément (NF M60-802-3). En effet, la surveillance des niveaux de tritium dans les eaux de boisson fait l'objet d'une attention toute particulière au niveau européen (CCE, 1998), justifiée par les rejets actuels des installations nucléaires, qui sont des sources locales non négligeables de tritium dans l'environnement. La **radiotoxicité** du tritium est considérée comme faible, mais le contrôle de l'activité volumique du tritium dans l'environnement est réalisé pour pouvoir suivre sa circulation dans l'hydrosphère et la **biosphère** jusqu'aux eaux de boisson. Une norme a été publiée sur la mesure de l'activité du radium 226 dans les eaux (NF M60-803).

Après la révision de la directive 80/778/CCE relative à la qualité de l'eau potable, qui a abouti à la directive 98/83 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine, l'existence de normes Afnor sur ce sujet devient importante pour les discussions techniques qui se tiendront au niveau européen.

Qualité de l'air

L'effort normatif de l'Afnor et de l'ISO dans le domaine de la qualité de l'air a porté principalement sur les principes généraux de l'échantillonnage des radionucléides présents dans l'air, avec une production dominante de documents concernant ceux associés à la fraction particulaire. La CEI a édité des normes sur la mesure du tritium et sur l'instrumentation de mesure du **radon** et de ses descendants.

La commission M60-3 s'est donc engagée dans une révision de la norme sur la détermination volumique du tritium atmosphérique et l'élaboration de normes complémentaires sur le prélèvement des **aérosols** (M60-760), l'activité des dépôts au sol (M60-770) et le mesurage des **halogènes**. L'effort a notamment porté sur le mesurage du radon, gaz radioactif d'origine naturelle résultant de la **désintégration** de l'uranium et du radium en provenance du sol. Cet élément atteint des niveaux significatifs dans l'air des régions aux sous-sols granitiques et volcaniques et peut également être émis par les matériaux de construction.

Le radon et ses descendants solides sont **inhalés** et irradient les poumons. Aussi, afin de répondre à la circulaire conjointe DGS et DGUHC n° 99/46 du 27 janvier 1999, définissant les actions qui doivent être menées dans la gestion du risque radon dans les locaux, un effort particulier a été réalisé sur les différentes méthodes de mesurage du radon 222 et de ses descendants. Huit normes sur ce sujet ont été publiées (série radon 222).

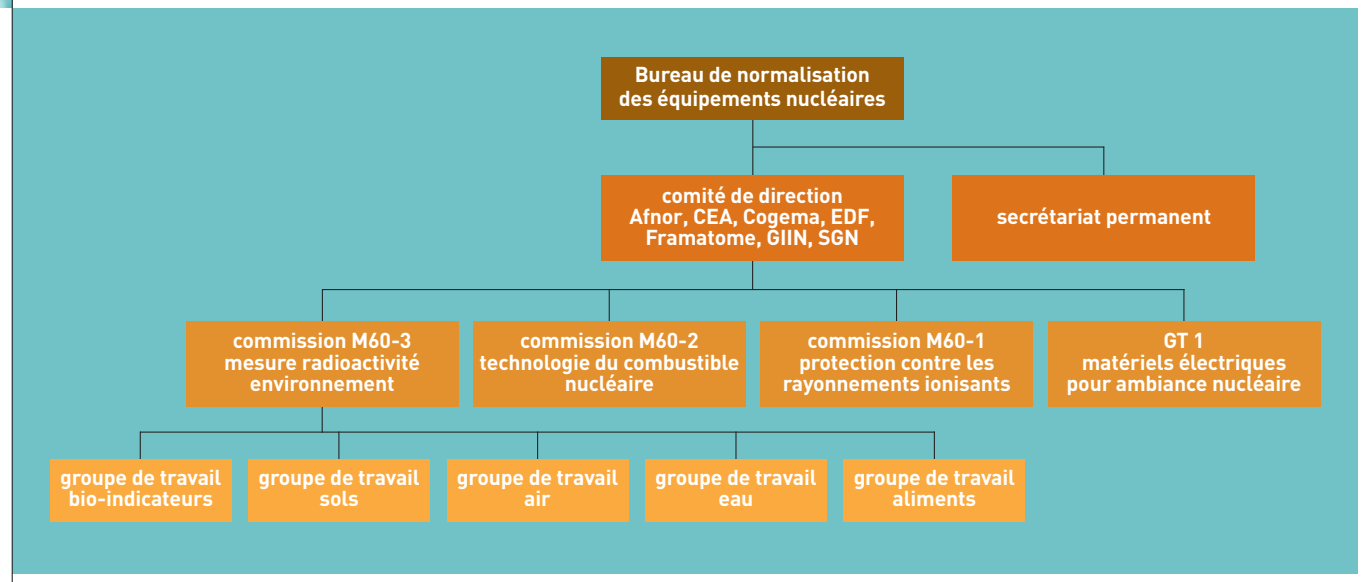
Sur le thème du radon, il faut également noter que la traduction de la norme ISO 13466 en français a été validée par des membres de la commission M60-3. Par ailleurs, dans le cadre des travaux de normalisation de la CEI, des membres de la commission participent au groupe de travail 45 B.

Qualité des sols

Les normes Afnor et ISO dans le domaine de la qualité des sols concernent les travaux portant sur les principes généraux de l'échantillonnage et de la préparation des échantillons de sols avant détection

références	titres des normes
qualité de l'eau	
NF M60-800	mesurage de l'indice de radioactivité bêta globale en équivalent strontium 90 et yttrium 90 dans l'eau peu chargée en sels
NF M60-801	mesurage de l'indice de radioactivité alpha en équivalent plutonium 239 dans l'eau peu chargée en sels
NF M60-802-1	mesurage de l'activité des émetteurs bêta par scintillation liquide : cas particulier du tritium
NF M60-802-2	mesurage de l'activité des émetteurs bêta par scintillation liquide : cas particulier du carbone 14
NF M60-802-3	mesurage de l'activité des émetteurs bêta par scintillation liquide : cas particulier de la présence simultanée du tritium et du carbone 14
NF M60-803	mesurage de l'activité du radium 226 dans l'eau
NF M60-804-1	mesurage de l'activité des transuraniens (Pu, Am, Cm, Np) par spectrométrie alpha dans l'eau - généralités
NF M60-805-1	mesurage de la concentration de l'uranium dans l'eau par fluorimétrie
NF M60-805-2	mesurage de la concentration de l'uranium dans l'eau par spectroscopie d'émission atomique avec plasma couplé par induction
NF M60-805-5	mesurage de l'activité de l'uranium dans l'eau par spectrométrie alpha
qualité de l'air	
NF M60-312	détermination de l'activité volumique du tritium dans l'environnement atmosphérique
NF M60-760	détermination par scintillation liquide de l'activité volumique du tritium atmosphérique prélevé par la technique de barbotage de l'air dans l'eau
NF M60-761	détermination de l'activité volumique des halogènes radioactifs dans l'environnement atmosphérique
NF M60-763	radon 222 et ses descendants à vie courte dans l'environnement atmosphérique : leurs origines et méthodes de mesure
NF M60 764	radon 222 : méthodes de mesure intégrée de l'énergie alpha potentielle volumique des descendants à vie courte du radon dans l'environnement atmosphérique
NF M60-765	radon 222 : méthodes de mesure ponctuelle de l'énergie alpha potentielle volumique des descendants à vie courte du radon dans l'environnement atmosphérique
NF M60-766	radon 222 : méthodes de mesure intégrée de l'activité volumique moyenne du radon dans l'environnement atmosphérique avec un prélèvement passif et une analyse en différé
NF M60-767	radon 222 : méthodes de mesure en continu de l'activité volumique du radon dans l'environnement atmosphérique
NF M60-768	radon 222 : méthodes d'estimation du flux surfacique d'exhalation par la méthode d'accumulation
NF M60-769	radon 222 : méthode de mesure ponctuelle de l'activité volumique du radon dans l'environnement atmosphérique
NF M60-770	collecte des dépôts atmosphériques au sol et détermination de l'activité des dépôts atmosphériques au sol
NF M60-771	radon 222 dans les bâtiments : méthodologies appliquées au dépistage et aux investigations complémentaires
qualité des sols	
NF M60-790-1	partie 1 : présentation générale et définitions
NF M60-790-2	partie 2 : guide pour la sélection des zones de prélèvement, l'échantillonnage, le transport et la conservation des échantillons de sol
NF M60-790-3	partie 3 : méthode pour le prétraitement des échantillons de sol
NF M60-790-4	partie 4 : méthode pour une mise en solution des échantillons de sol
NF M60-790-5	partie 5 : méthode de mesure de l'indice de radioactivité alpha globale en équivalent ^{239}Pu et de l'indice de radioactivité bêta globale en équivalent ^{90}Sr et ^{90}Y à l'équilibre dans les échantillons de sol
NF M60-790-6	partie 6 : méthode de mesure de l'activité des émetteurs gamma dans les échantillons de sol
NF M60-790-7	partie 7 : méthodes de mesure du strontium 90 dans les échantillons de sol
NF M60-790-8	partie 8 : méthodes de mesure des isotopes du plutonium (plutonium 238 et plutonium 239+240) dans les échantillons de sol
bio-indicateurs	
NF M60-780-0	principes généraux
NF M60-780-1	partie 1 : guide général pour l'établissement des programmes d'échantillonnage
NF M60-780-2	partie 2 : guide général sur les techniques d'échantillonnage
NF M60-780-3	partie 3 : guide général pour la conservation et la manipulation des échantillons
NF M60-780-4	partie 4 : guide général pour la préparation des échantillons
NF M60-780-5	partie 5 : guide général pour l'échantillonnage d'indicateurs biologiques du milieu terrestre
NF M60-780-6	partie 6 : guide général pour l'échantillonnage d'indicateurs biologiques du milieu dulçaquicole
NF M60-780-7	partie 7 : guide général pour l'échantillonnage d'indicateurs biologiques du milieu marin
NF M60-780-8	partie 8 : glossaire
aliments	
NF V 03 009-1	mesure de la radioactivité dans les denrées alimentaires – guide pour l'échantillonnage, le transport et la conservation des denrées alimentaires – obtention d'un échantillon pour laboratoire
NF V 03 009-2	mesure de la radioactivité dans les denrées alimentaires – guide pour la préparation des échantillons de denrées alimentaires – obtention d'un échantillon pour essai

Tableau.
Titres des normes rédigées par les groupes de travail de la commission M60-3 "Mesure de la radioactivité dans l'environnement" qui ont fait l'objet d'une publication Afnor.



Organisation du Bureau de normalisation des équipements nucléaires dans lequel quatre groupes de travail traitent spécifiquement des méthodologies de mesurage des radionucléides au sein des quatre grands types de matrices environnementales : air, eau, sols et organismes bio-indicateurs.

des radionucléides. Elles s'inscrivent dans la méthodologie d'étude de site, en particulier celle utilisée en radioécologie.
La commission M60-3 a donc repris les documents normatifs existants pour les adapter aux questions posées dans les expertises et études nécessitant des mesurages de radionucléides, en particulier pour les indices de radioactivité alpha globaux, les **émetteurs gamma**, le strontium 90 et le plutonium. Cette même approche a été suivie par l'ASTM.
Le groupe de travail sol a donc élaboré huit normes Afnor (série M60-790). Il s'est efforcé de répondre aux attentes des organismes chargés de déterminer les principaux radionucléides présents dans des sols, dans les cas d'une surveillance de routine, d'une expertise ou d'une caractérisation initiale de site, d'une étude de la distribution verticale des radionucléides dans les sols, ou d'une étude de la radioactivité superficielle des sols, en vue d'étudier les retombées atmosphériques ou la remise en suspension. Ces normes sont utilisées pour produire les données fiables nécessaires aux études simplifiées et détaillées de risques justifiant les assainissements d'anciens sites industriels dont les sols sont potentiellement contaminés par des radionucléides (guide méthodologique IRSN).
La première norme (NF M60-790-1) fixe le cadre général et les étapes à suivre. La deuxième norme est un guide pour la sélection des zones de prélèvement et d'échantillonnage, le transport et la conservation des échantillons de sol (NF M60-790-2). Les six autres normes présentent les méthodes de traitement et de mesurage des échantillons de sol en laboratoire. Les normes 790-3 et 790-4 concernent respectivement le séchage, le broyage, le tamisage et l'homogénéisation des échantillons, d'une part, et la mise en solution des radionucléides à mesurer, étape nécessaire à la recherche sélective de radionucléides émetteurs bêta purs (comme le strontium 90) et alpha (**isotopes** 238, 239 et 240 du plutonium), d'autre part. Le mesurage des indices de radioactivité alpha globale et bêta globale, qui permettent de réaliser une première évaluation de la dispersion des niveaux d'activité, fait l'objet de la norme NF M60-790-5. Le mesurage des radionucléides émetteurs gamma, en particulier les principaux descendants des **chaînes** naturelles de l'uranium et du thorium et les radionucléides artificiels, dont le césium 137, qui est présent dans tous les prélèvements de sol de surface (retombées des essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl), est traité dans la norme NF M60-790-6. Les parties 8 et 9 de cette série traitent respectivement du mesurage de strontium 90 et des isotopes émetteurs alpha du plutonium (plutonium 238, 239 et 240). Elles font appel à des protocoles opératoires complexes, dont l'intérêt est justifié par la **radiotoxicité potentielle** de ces éléments. Ces travaux complètent ceux de l'ISO sur les sédiments marins et aquatiques.

Bio-indicateurs

L'utilisation d'organismes vivants, en particulier de bio-indicateurs caractérisés par une capacité d'accumulation élevée des contaminants industriels, y compris les radionucléides, permet d'évaluer les évolutions qualitative et quantitative de la contamination des milieux naturels. Les bio-indicateurs se révèlent particulièrement adaptés en tant qu'intégrateurs de toute forme de rejets de radionucléides susceptibles d'avoir un impact sur l'environnement.
En l'absence de précautions pour la conservation des échantillons, les indicateurs biologiques sont susceptibles de se dégrader entre la date du prélèvement et celle de leur analyse au laboratoire. La conservation des échantillons pendant le transport, ainsi que durant le temps où les échantillons sont stockés au laboratoire avant d'être analysés, doit garantir que les concentrations déterminées seront représentatives de celles de l'échantillon initial, en particulier pour les éléments majeurs constitutifs de la matière vivante.
L'identification d'un groupe bio-indicateurs au sein de la commission M60-3, qui n'apparaît pas dans les autres structures normatives, a conduit ce groupe à se rapprocher des normes existantes de l'Afnor et de

l'ISO dans les domaines de la qualité de l'eau, des produits agricoles et des aliments.
Les travaux normatifs ont débouché sur la rédaction de guides généraux sur les précautions à prendre pour le prélèvement, la conservation et la manipulation des échantillons d'indicateurs biologiques avant leur prise en charge au laboratoire (M60-780-1, -2, -3, -4). Une deuxième série de guides concernant l'échantillonnage d'indicateurs biologiques spécifiques des différents milieux terrestre, dulçaquicole et marin (M60-780-6, -7, -8) a également été publiée.

Aliments

Pour la partie aliments, sur le plan français, les travaux prévus par le groupe de travail du BNEN ont été présentés au Comité d'orientation stratégique (COS) agroalimentaire. Le programme a conduit la rédaction de deux normes qui viennent compléter celles produites sous l'égide de ce COS.

Qualité reconnue des projets français

La contamination potentielle de l'environnement par des matières radioactives entraîne régulièrement des débats de société. Dans ce contexte, il est également aisé d'imaginer l'importance de pouvoir identifier et quantifier précisément une source de contamination de l'environnement, de préciser les apports respectifs de différentes sources et/ou d'en exclure certaines. Dans ces situations, la qualité et la fiabilité des stratégies d'échantillonnage, la réalisation des prélèvements, ainsi que les résultats de mesurage, ne doivent pas être mis en doute par l'une ou l'autre des parties, afin que les discussions restent dans le champ de l'interprétation des résultats et non dans celui de leur contestation. Le mesurage doit donc s'appuyer sur une méthodologie exploratoire du milieu et une métrologie reconnues et référencées, si possible dans des normes qui sont le résultat d'un consensus entre les différents partenaires : exploitants, contrôleur, experts officiels ou associatifs. En apportant une réponse technique sans ambiguïté basée sur des échantillons représentatifs des niveaux environnementaux, dont le contenu radioactif sera mesuré par l'intermédiaire d'un laboratoire d'essais certifié ou accrédité ; l'expertise sur l'impact, déduite des résultats de radioactivité, gagnera alors en crédibilité.
Le développement de la normalisation dans le domaine de la mesure de la radioactivité, en particulier au plan français, est donc significatif d'une volonté de tous les acteurs de partager leur savoir-faire et d'améliorer la transparence dans leur domaine. Cet objectif de transparence est également conforme à la volonté des pouvoirs publics. La disponibilité de ces normes permet aujourd'hui de les intégrer comme outil de décision. L'enjeu est donc d'importance, et la participation des experts du CEA indispensable pour assurer le point de vue d'un organisme exploitant, mais aussi expert dans ce domaine.
L'objectif premier des membres de la commission M60-3 est donc d'achever un corpus de normes sur le mesurage des radionucléides présents au sein des différents **compartiments** de l'environnement (air, eau, sol et indicateurs biologiques). Ce travail collectif, avec la participation des experts du CEA, contribue au-delà de la demande initiale institutionnelle des ministères en charge de la santé, de l'écologie et de l'industrie et de celles des collectivités locales, à une meilleure appréciation de l'impact du nucléaire et de son rôle dans l'amélioration de la qualité de notre environnement dans un contexte de développement durable.
Notons le caractère parfois innovant des travaux réalisés par cette commission, notamment ceux sur les bio-indicateurs. Ce corpus de normes constituera un ensemble sans contrepartie sur le plan international. La décision a donc été prise, notamment par le BNEN et l'Afnor, de proposer l'internationalisation de ces normes, c'est-à-dire leur reconnaissance au niveau de l'ISO. En 1999, le jeu de normes relatif aux mesurages des radionucléides dans les sols a été soumis au vote de l'ISO comme nouveau sujet d'étude à traiter au sein de l'ISO/TC 85/SC 2/WG 17. Les pays membres de l'ISO ayant retenu le projet, reconnaissant ainsi la qualité de ces travaux, la première revue des projets français a été réalisée en mai 2000 lors de la réunion suivante de ce groupe de travail. Les projets de normes révisées sont aujourd'hui en circulation au niveau du sous-comité 2. Pour continuer dans cette voie, la prochaine soumission à l'ISO devrait porter sur les normes traitant du mesurage des radionucléides dans l'eau. Dans l'ensemble, il faut souligner le niveau soutenu de l'intérêt porté à ces travaux sur le plan international démontrant, s'il était besoin, l'importance et l'utilité des sujets traités pour des préoccupations qui dépassent le champ national.

DarkhorseStudio/Cogema

Prélèvement d'eau douce sur le site de Cluff Lake, au Saskatchewan (Canada) par un technicien de Cogema.

> **Dominique Calmet***
Direction des applications militaires
CEA centre DAM–Île de France
*Président de la commission M60-3 du BNEN et *project leader* de l'ISO pour le mesurage de la radioactivité dans l'environnement.

B Les voies d'atteinte de l'homme

L'**exposition** de l'homme, c'est-à-dire la mise en présence (par contact ou non) de l'organisme et d'un agent chimique, physique ou radiologique, peut s'effectuer de manière externe ou interne. Dans le cas des **rayonnements ionisants**, elle se traduit par un dépôt d'énergie sur tout ou partie du corps. Ils peuvent causer une **irradiation externe** directe lorsque le sujet se trouve placé sur la trajectoire d'un rayonnement émis par une source radioactive située à l'extérieur de l'organisme. L'individu peut être atteint directement ou après réflexion sur les surfaces environnantes. L'irradiation peut être **aiguë** ou **chronique**. Le terme de **contamination** est employé en cas de dépôt de matières (en l'occurrence **radioactives**) sur des structures, des surfaces, des objets ou, en l'occurrence, un organisme vivant. La contamination radiologique, imputable à la présence de **radionucléides**, peut s'effectuer par voie **externe**, à partir du milieu récepteur (air, eau) et des milieux vecteurs (sols, sédiments, couvertures végétales, matériels), par contact avec la peau et les cheveux (contamination cutanée), ou par voie **interne** lorsque les radionucléides sont **incorporés** soit par **inhalation** (gaz, particules) à partir de l'atmosphère, soit par **ingestion**, principalement à partir de produits alimentaires ou de boissons (eau, lait), soit encore par pénétration (blessure, brûlure ou passage à travers la peau). Il est question d'**intoxication** lorsque c'est essentiellement la toxicité chimique qui est en cause.

Dans le cas d'une **contamination interne**, la dose délivrée (appelée **dose "engagée"**) au sein de l'organisme, au cours du temps, est calculée sur 50 ans pour l'adulte, et jusqu'à l'âge de 70 ans pour l'enfant. Les paramètres pris en compte pour le calcul sont les suivants : la nature, la quantité incorporée de radionucléide (RN), la forme chimique du composé, la **période effective**[1] du RN dans l'organisme (fonction de la **période** physique et de la **période biologique**), le type de **rayonnement**, le mode d'exposition (inhalation, ingestion, blessure, passage cutané), la répartition dans l'organisme (dépôt dans des organes cibles ou répartition homogène), ainsi que la radiosensibilité des tissus et l'âge du sujet contaminé.

La **radiotoxicité**, enfin, est la toxicité due aux rayonnements ionisants émis par un radionucléide inhalé ou ingéré. C'est d'un tout autre ordre d'idée que relève la notion trompeuse de **radiotoxicité potentielle**, qui est en fait un *inventaire radiotoxique* difficile à évaluer et entaché de nombreuses incertitudes.

(1) La période effective (Te) est évaluée comme suit en fonction de la période physique (Tp) et de la période biologique (Tb) : $1 / Te = 1 / Tp + 1 / Tb$.

F Des rayonnements aux doses

La radioactivité est un processus par lequel certains nucléides naturels ou artificiels (en particulier ceux créés par fission, scission d'un noyau lourd en deux morceaux) subissent une désintégration spontanée, avec dégagement d'énergie, aboutissant généralement à la formation de nouveaux nucléides. Appelés pour cette raison radionucléides, ils sont instables du fait de leur nombre de nucléons (protons, d'une part, neutrons, de l'autre) ou de leur état énergétique. Ce phénomène s'accompagne de l'émission d'un ou de plusieurs types de rayonnements, ionisants ou non et/ou de particules. Les rayonnements ionisants sont des rayonnements électromagnétiques ou corpusculaires suffisamment énergétiques pour ioniser sur leur passage certains atomes de la matière traversée en leur arrachant des électrons. Ils peuvent l'être *directement* (c'est le cas des particules alpha) ou *indirectement* (cas des rayons gamma et des neutrons).

Le rayonnement alpha, formé de noyaux d'hélium 4 (deux protons et deux neutrons), est très peu pénétrant. Il est arrêté par une feuille de papier ou par les couches superficielles de la peau. Son trajet dans les tissus biologiques ne dépasse pas quelques dizaines de micromètres. Ce rayonnement est donc fortement ionisant, c'est-à-dire qu'il arrache facilement des électrons aux atomes du matériau traversé, car ses particules cèdent toute leur énergie sur un faible parcours. Pour cette raison, le risque présenté par les radionucléides émetteurs alpha est celui d'une exposition interne.

Le rayonnement bêta, constitué d'électrons (radioactivité bêta moins) ou de positons (radioactivité bêta plus), est moyennement pénétrant. Les particules émises par les émetteurs bêta sont arrêtées par quelques mètres d'air, une feuille d'aluminium ou sur quelques millimètres d'épaisseur dans les tissus biologiques. Ils peuvent donc traverser les couches superficielles de la peau.

Le rayonnement gamma, composé de photons de haute énergie peu ionisants mais très pénétrants (plus que les photons des rayons X utilisés en radiodiagnostic), peut parcourir plusieurs centaines de mètres dans l'air. D'épais écrans de béton ou de plomb sont nécessaires pour s'en protéger.

Pour le **rayonnement neutronique**, l'interaction est aléatoire et, de ce fait, il n'est arrêté que par une forte épaisseur de béton, d'eau ou de paraffine. Non chargé électriquement, le neutron n'est en effet arrêté dans l'air que par des noyaux d'éléments légers, noyaux dont la masse est proche de celle du neutron.

La quantité d'énergie délivrée par un rayonnement se traduit par une dose qui est évaluée de différentes manières, suivant qu'elle prend en compte la quantité d'énergie absorbée, son débit ou ses effets biologiques :

- la dose absorbée est la quantité d'énergie absorbée en un point par unité de masse de matière (inerte ou vivante), selon la définition de la Commission internationale des unités et des mesures radiologiques (ICRU). Elle s'exprime en grays (Gy) : 1 gray correspond à une énergie absorbée de 1 joule par kilogramme de matière. La *dose absorbée à l'organe* est obtenue en faisant la moyenne des doses absorbées en différents points, selon la définition de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) ;
- le débit de dose, quotient de l'accroissement de dose par l'intervalle de temps, définit l'intensité d'irradiation (énergie absorbée par la matière par unité de masse et de temps). L'unité légale est le gray par seconde (Gy/s), mais le Gy/mn est couramment utilisé. Par ailleurs, un rayonnement a une **efficacité biologique relative (EBR)** plus grande qu'un autre lorsque l'effet obtenu pour une même dose est plus important ou quand la dose nécessaire pour observer cet effet est plus faible ;
- la dose équivalente est la quantité de dose absorbée entendue comme le produit de la dose absorbée dans un tissu ou un organe par un facteur de pondération, différent selon la nature et à l'énergie du rayonnement et qui varie de 1 à 20 : les rayonnements alpha sont ainsi considérés comme 20 fois plus nocifs que les rayonnements gamma en fonction de leur efficacité biologique pour des effets aléatoires

Foulon/CEA

Techniciens aux télémanipulateurs d'une des chaînes de l'installation Atalante, au centre CEA de Marcoule. Blindées, ces chaînes arrêtent les rayonnements. Les opérateurs portent les dosimètres qui permettent d'en vérifier l'efficacité en permanence.

(ou **stochastiques**). Une dose équivalente s'exprime en **sieverts** (Sv) ;

• la **dose efficace** est une grandeur introduite pour tenter d'évaluer le détriment en terme d'effets stochastiques au niveau du corps entier. C'est la somme des doses équivalentes reçues par les différents organes et tissus d'un individu, pondérées par un facteur propre à chacun d'entre eux (facteurs de pondération) en fonction de sa sensibilité propre. Elle permet d'additionner des doses provenant de sources différentes, d'irradiation externe ou interne. Pour les situations d'exposition interne (**inhalation**, **ingestion**), la dose efficace est calculée sur la base du nombre de **becquerels** incorporés pour un radionucléide donné (**DPUI, dose par unité d'incorporation**). S'exprime en sieverts (Sv).

• la **dose engagée**, à la suite d'une exposition interne, est la dose cumulée reçue dans les cinquante années (pour les travailleurs et les adultes) ou jusqu'à l'âge de soixante-dix ans (pour les moins de 20 ans) suivant l'année de l'**incorporation** du radionucléide, si celui-ci n'a pas disparu auparavant par décroissance physique ou élimination biologique ;

• la **dose collective** est la dose reçue par une population, définie comme le produit du nombre d'individus (par exemple ceux travaillant dans une installation nucléaire où c'est un outil utile dans le cadre de l'organisation et de l'application du principe ALARA) par la dose moyenne équivalente ou efficace reçue par cette population ou comme la somme des doses efficaces individuelles reçues. Elle s'exprime en homme-sieverts (H.Sv). Elle ne devrait s'utiliser que pour des groupes relativement homogènes quant à la nature de leur exposition.

A Radioactivité naturelle et radioactivité artificielle

Tout ce qui se trouve à la surface de la Terre a toujours été soumis à l'action de rayonnements ionisants provenant de sources naturelles. L'irradiation naturelle, qui représente près de 85,5 % de la radioactivité totale (naturelle et artificielle), est due, pour plus de 71 %, aux rayonnements telluriques et, pour environ 14,5 %, aux rayonnements cosmiques.

Les radionucléides formés par interaction des **rayonnements cosmiques**, issus des étoiles et surtout du Soleil, avec les noyaux des éléments présents dans l'atmosphère (oxygène et azote) sont, dans l'ordre d'importance des doses (encadré F, *Des rayonnements aux doses*, p. 66) qu'ils engendrent pour l'homme : le carbone 14, le béryllium 7, le sodium 22 et le tritium (hydrogène 3). Ces deux derniers entraînent des doses extrêmement faibles.

Le **carbone 14**, de période **5 730 ans**, se retrouve dans l'organisme humain. Son activité par unité de masse de carbone a varié au cours du temps : elle a diminué avec les rejets de gaz carbonique provenant de la combustion des combustibles fossiles puis augmenté avec les essais nucléaires atmosphériques.

Le **béryllium 7**, de période **53,6 jours**, se dépose sur les surfaces foliaires des végétaux et pénètre par ingestion dans l'organisme humain (encadré B, *Les voies d'atteinte de l'homme*, p. 13). Environ 50 Bq (becquerels) par an de béryllium 7 sont ainsi ingérés.

Les principaux **radionucléides** dits **"primordiaux"** sont le potassium 40, l'uranium 238 et le thorium 232. Avec leurs descendants radioactifs, ces éléments sont présents dans les roches, les sols et dans beaucoup de matériaux de construction. Leur concentration est généralement très faible mais elle est variable selon la nature des roches. Les rayonnements gamma émis par ces radionucléides constituent le **rayonnement tellurique** qui entraîne une exposition externe de l'organisme. Les radionucléides primordiaux et beaucoup de leurs descendants à vie longue se retrouvent également à l'état de traces dans les eaux de boisson et les végétaux : d'où une exposition interne par ingestion à laquelle peut s'ajouter une faible exposition par inhalation après une remise en suspension dans l'air par les poussières.

Émetteur bêta et gamma de période **1,2 milliard d'années**, le **potassium 40** n'a pas de descendants radioactifs. Présent à raison de 0,0118 % dans le potassium naturel, cet isotope radioactif pénètre dans l'organisme humain par ingestion. La masse de potassium naturel dans le corps humain est indépendante de la quantité ingérée.

Émetteur alpha de période **4,47 milliards d'années**, **l'uranium 238** a treize principaux descendants radioactifs émetteurs alpha, bêta et gamma, dont le **radon 222** (**3,82 jours**) et l'**uranium 234** (**0,246 million d'années**). L'uranium 238 avec ses deux descendants, le **thorium 234** (**24,1 jours**) et le **protactinium 234m**[1] (**1,18 minute**), et l'**uranium 234** sont essentiellement incorporés par ingestion et se concentrent majoritairement dans les os et les reins. Le **thorium 230**, engendré par l'uranium 234, est un émetteur alpha de période **80 000 ans**. C'est un ostéotrope, mais il pénètre surtout par la voie pulmonaire (inhalation). Le **radium 226**, descendant du thorium 230, est un émetteur alpha de période **1 600 ans**. C'est également un ostéotrope et son apport à l'organisme dépend avant tout de sa présence dans l'alimentation. Un autre ostéotrope, le **plomb 210** (**22,3 ans**), est incorporé par inhalation et surtout par ingestion.

Émetteur alpha de période **14,1 milliards d'années**, le **thorium 232** compte dix principaux descendants radioactifs émetteurs alpha, bêta et gamma, dont le **radon 220** (**55 secondes**). Le thorium 232 pénètre surtout dans l'organisme par inhalation. Le **radium 228**, descendant direct du thorium 232, est un émetteur bêta et a une période de **5,75 ans**. Son apport à l'organisme est essentiellement dû à l'alimentation.

Le radon, descendant radioactif gazeux de l'uranium 238 et du thorium 232, émane du sol et des matériaux de construction et constitue avec ses descendants à vie courte émetteurs alpha une source d'exposition interne par inhalation. Le radon représente la source la plus importante de l'irradiation naturelle (de l'ordre de 40 % de la radioactivité totale).

L'organisme humain contient près de 4 500 Bq de potassium 40, 3 700 Bq de carbone 14 et 13 Bq de radium 226, essentiellement apportés par l'alimentation.

À l'irradiation naturelle s'ajoute la composante due aux activités humaines, qui résulte des applications médicales des rayonnements ionisants et dans une moindre mesure de l'industrie nucléaire. Elle représente environ 14,5 % de la radioactivité totale au niveau global, beaucoup plus dans les pays les plus développés. Dans le domaine médical (plus de 1 mSv/an en moyenne en France), l'irradiation par des sources externes est prépondérante : radiodiagnostic (rayons X) et radiothérapie, qui après avoir utilisé des sources de césium 137 et de cobalt 60, est réalisée de plus en plus souvent des accélérateurs linéaires. L'irradiation par des voies internes (curiethérapie par iridium 192) a des indications plus restreintes (cancer du col de l'utérus par exemple). Les propriétés métaboliques et physicochimiques d'une vingtaine de radionucléides sont utilisées pour des **activités médicales** et en **recherche biologique**. Les applications médicales en sont, d'une part, les radiodiagnostics (scintigraphies et radio-immunologie) et,

d'autre part, les traitements, parmi lesquels ceux de pathologies de la thyroïde par l'iode 131, la radio-immunothérapie dans certaines maladies hématologiques (phosphore 32) ou le traitement de métastases osseuses par du strontium 89 ou des phosphonates marqués, à côté d'autres utilisations de produits radiopharmaceutiques. Parmi les radionucléides les plus employés : le **technétium 99m**[1] de période **6,02 heures** et le **thallium 201** de période **3,04 jours** (scintigraphie), l'**iode 131** de période **8,04 jours** (traitement de l'hyperthyroïdie), l'**iode 125** de période **60,14 jours** (radio-immunologie), le **cobalt 60** de période **5,27 ans** (radiothérapie), l'**iridium 192** de période **73,82 jours** (curiethérapie). La contribution des examens radiologiques à la radioactivité totale représente en moyenne 14,2 %.

Les **anciens essais nucléaires dans l'atmosphère** ont engendré des retombées sur l'ensemble du globe et ont donné lieu à une exposition des populations et à une **contamination** de la chaîne alimentaire par un certain nombre de radionucléides, dont la plupart ont aujourd'hui complètement disparu, étant donné leur période radioactive. Subsistent le **césium 137** (**30 ans**), le **strontium 90** (**29,12 ans**), partiellement le **krypton 85** (**10,4 ans**) et le **tritium** (**12,35 ans**), et les isotopes du **plutonium** (période de **87,7 ans** à **24 100 ans**). Actuellement, les doses correspondant aux retombées de ces essais sont essentiellement imputables aux **produits de fission** (césium 137) et au carbone 14, loin devant les **produits d'activation** et le plutonium.

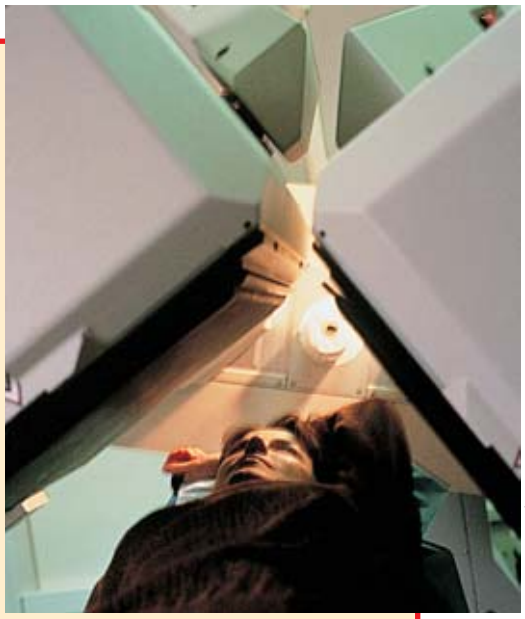
Lors de l'**accident de Tchernobyl** (Ukraine), survenu en 1986, la radioactivité totale rejetée dans l'atmosphère a été de l'ordre de 12 milliards de milliards de becquerels sur une durée de 10 jours. Des radionucléides appartenant à trois catégories ont été disséminés. La première est constituée des produits de fission volatils tels que l'**iode 131**, l'**iode 133** (**20,8 heures**), le **césium 134** (**2,06 ans**), le **césium 137**, le **tellure 132** (**3,26 jours**). La deuxième catégorie est composée par les produits de fission solides et les **actinides** qui ont été relâchés dans des proportions beaucoup plus faibles, en particulier les isotopes du strontium (^{89}**Sr** de période **50,5 jours** et ^{90}**Sr**), les isotopes du ruthénium (^{103}**Ru** de période **39,3 jours** et ^{106}**Ru** de période **368,2 jours**) et le **plutonium 239** (**24 100 ans**). La troisième catégorie se rapporte aux gaz rares qui, bien que représentant la majorité de l'activité émise, se sont rapidement dilués dans l'atmosphère. Ce sont principalement le **xénon 133** (**5,24 jours**) et le **krypton 85**.

Les contributions des anciens essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl à la radioactivité totale avoisinent respectivement 0,2 % (0,005 mSv) et 0,07 % (0,002 mSv).

La **production d'énergie d'origine nucléaire**, pour l'ensemble de son cycle, ne représente qu'environ 0,007 % de la radioactivité totale. La quasi-totalité des radionucléides reste confinée dans les réacteurs nucléaires et les installations du cycle du **combustible**. Dans un réacteur nucléaire, les réactions ayant lieu au sein du combustible conduisent à la formation de **transuraniens**. L'**uranium 238**, non **fissile**, peut capturer des neutrons, donnant notamment naissance à des isotopes du plutonium (^{239}**Pu**, ^{240}**Pu** de période **6 560 ans** et ^{241}**Pu** de période **14,4 ans**) et à de l'**américium 241** (**432,7 ans**). Les produits de fission les plus importants engendrés lors des réactions de fission de l'**uranium 235** (**704 millions d'années**) et du **plutonium 239** sont l'**iode 131**, le **césium 134**, le **césium 137**, le **strontium 90** et le **sélénium 79** (**1,1 million d'années**).

Les principaux radionucléides présents dans les rejets, s'effectuant dans un cadre réglementaire très strict, sont, pour les rejets liquides, le **tritium**, le **cobalt 58** (**70,8 jours**), le **cobalt 60**, l'**iode 131**, le **césium 134**, le **césium 137** et l'**argent 110m** (**249,9 jours**). Pour les rejets gazeux, le **carbone 14** est le radionucléide le plus fréquent, émis dans la plupart des cas sous la forme de gaz carbonique. Pour l'ensemble des réacteurs dans le monde, la production totale de gaz carbonique correspond au dixième de la production naturelle annuelle d'origine cosmique.

Par ailleurs, certains radionucléides liés à la filière nucléaire présentent une **toxicité chimique** (encadré D, *Toxicité radiologique et toxicité chimique*, p. 32).



Laurence Médard/CEA

Scintigraphie conventionnelle réalisée au Service hospitalier Frédéric Joliot (SHFJ). La gamma caméra permet d'obtenir une imagerie fonctionnelle d'un organe après administration, le plus souvent par voie intraveineuse, d'un médicament radioactif (radiopharmaceutique) au patient. Les radionucléides utilisés sont spécifiques de l'organe étudié : par exemple, le technétium 99m pour les reins et les os, le thallium 201 pour le myocarde. Le radiopharmaceutique injecté émet de simples photons gamma captés par deux détecteurs plans qui sont placés à 180° ou à 45° selon l'examen.

(1) m pour métastable. Un nucléide est dit métastable lorsqu'il existe un retard de transition entre l'état excité et l'état stable de l'atome.

D Toxicité radiologique et toxicité chimique

Parmi les toxiques chimiques liés à la filière nucléaire se trouvent, outre l'**uranium** (U) et le **cobalt** (Co), le **bore** (B), utilisé pour ses propriétés d'absorption des neutrons dans les fluides caloporteurs des centrales nucléaires, le **béryllium** (Be), employé pour ralentir ces mêmes neutrons, et le **cadmium** (Cd), servant à les capturer. Or le bore est un élément essentiel pour la croissance des plantes. Le cadmium, tout comme le plomb (Pb), a des effets toxiques sur le système nerveux central.

Pour un même élément dont la toxicité peut être à la fois radiologique et chimique, par exemple le plutonium (Pu), l'uranium, le neptunium, le technétium ou le cobalt, il s'agit de déterminer, quand cela est possible, ce qui relève de la toxicité radiologique et ce qui relève de la toxicité chimique, l'une n'étant évidemment pas exclusive de l'autre (voir *Limites de la comparaison du risque radiologique et du risque chimique*, p. 77).

Pour les éléments **radioactifs** à longue **période** physique, la toxicité chimique est un risque beaucoup plus grand que la toxicité radiologique, comme le montre l'exemple du rubidium (Rb) ou de l'uranium naturel. Ainsi la toxicité chimique de l'uranium, qui prévaut sur sa toxicité radiologique, a conduit la réglementation française à fixer des limites de masse **ingérée** ou **inhalée** de composés chimiques d'uranium à respectivement 150 mg et 2,5 mg par jour quelle que soit la composition **isotopique** de l'élément (voir *L'uranium, chaque jour mieux connu*, p. 31).

Certains métaux ou **métalloïdes** non toxiques à faible concentration peuvent le devenir à forte concentration ou sous leur forme radioactive. C'est le cas du cobalt, pouvant agir comme **génotoxique**, du sélénium (Se) (naturellement incorporé dans des **protéines** ou des **ARN**), du technétium (Tc) et de l'iode (I).

Cyrille Dupont/CEA

Analyse d'images de gels d'électrophorèse bidimensionnelle réalisée dans le cadre d'études de toxicologie nucléaire au centre CEA de Marcoule, dans la vallée du Rhône.