

Contexte et statut des fiches



Geneviève Baumont/IRSN

Sommaire

Contenu et domaine de validité	3
Caractéristiques	3
Origines	3
Concentrations dans l'environnement	4
Métrologie, techniques d'analyse, limites de détection	4
Mobilité et biodisponibilité en milieu terrestre	4
Mobilité et biodisponibilité en milieu aquatique continental	4
Mobilité et biodisponibilité en milieu marins	5
Mobilité et biodisponibilité dans les écosystèmes semi-naturels	5
Toxicité environnementale	5
Récapitulatif des méthodes de mesure	6
Paramètres radioécologiques usuels	6
Paramètres radiotoxicologiques	7
Constitution de la bibliographie	7
Principes de rédaction et de vérification	7

Contexte et statut des fiches

Le Service de recherche et d'expertise sur les risques environnementaux (IRSN/PRP-ENV/SERIS) a pris l'initiative, en 2000, de constituer un ensemble de fiches **Radionucléides et environnement** qui présentent sous une forme synthétique un « état de l'art » relatif au comportement radioécologique des principaux radionucléides dans l'environnement, afin de mettre à la disposition de tous un support de connaissances facilement accessibles et compréhensibles. Dans cette optique, ces fiches, volontairement simplifiées, ne traduisent pas toujours les nuances, exceptions, contradictions, lacunes ou cas particuliers qui apparaissent au vu de la bibliographie. Il s'agit donc d'un résumé permettant en quelques pages de connaître les caractéristiques essentielles qui gouvernent le comportement du radionucléide étudié, l'accent étant mis sur les transferts vers l'homme *via* la chaîne alimentaire. Les données d'écotoxicité relatives à l'élément chimique y sont succinctement évoquées, dans la mesure de leur disponibilité.

Les informations contenues dans ces fiches, aussi bien qualitatives que quantitatives sont issues de sources référencées. En particulier, ces fiches présentent, à titre indicatif, des valeurs par défaut — isolées ou sous forme de gamme de variation — pour les principaux paramètres radioécologiques, afin d'en indiquer l'ordre de grandeur, le choix d'une valeur particulière (dite « site – spécifique ») étant fortement liée au contexte. Par conséquent, ces valeurs ne constituent en aucun cas une recommandation ou une préconisation de l'IRSN. Le choix et l'utilisation de ces valeurs est de la seule responsabilité du lecteur, à qui il appartiendra d'en justifier l'emploi. Toutefois, dans la mesure du possible, ont été privilégiées les valeurs pour lesquelles existe un consensus scientifique, notamment par la présentation de données numériques proposées dans le domaine de la radioécologie par les organismes internationaux tels que l'AIEA, Agence internationale de l'énergie atomique.

Contenu et domaine de validité

Le contenu des fiches, bien que basé sur un plan systématique (exception faite du tritium et du carbone 14) peut varier, principalement en raison de l'hétérogénéité des connaissances. Ceci conduit à une bibliographie abondante dans certains cas, tel celui du césium, ou au contraire très succincte, comme par exemple pour le niobium. Nous avons cependant tenté d'homogénéiser ces fiches afin qu'y figure l'essentiel de ce qu'il faut savoir du radionucléide pour avoir une idée complète de sa mobilité et de sa biodisponibilité, en n'en retenant que les aspects les plus significatifs. Nous avons, dans la mesure du possible, étendu les observations en reportant les principales données relatives aux isotopes stables de l'élément (s'ils existent) voire à ses analogues chimiques. Par ailleurs, l'importance de chacun des thèmes abordés dans chaque fiche peut évidemment varier en fonction des données acquises sur l'élément et de son comportement intrinsèque, un mécanisme particulier pouvant être décrit plus en détail si nécessaire (processus dominant le comportement de l'élément) ou au contraire n'être pas signalé (processus mineur).

Chaque fiche comporte un certain nombre de rubriques. Leur contenu et leur domaine de validité sont détaillés ci-après.

CARACTÉRISTIQUES

■ **Chimiques** : simple description de l'élément : famille, caractères majeurs, principaux états d'oxydation et formes chimiques dominantes dans l'environnement. Les analogues chimiques principaux peuvent être cités si besoin est. Les données sont en général issues du Handbook of Chemistry and Physics. (Lide 1999. 79th edition, Chemical Rubber Company CRC press, Florida, USA).

■ **Nucléaires** : le ou les principaux radio-isotopes sont succinctement décrits en termes de période radioactive, précurseurs, descendants et principales émissions radioactives ; pour certains radionucléides, un schéma de décroissance illustre le texte. Par isotope principal, nous entendons un radio-isotope présentant une ou plusieurs des caractéristiques suivantes : présence ou rémanence dans l'environnement ; radio-isotope considéré comme susceptible de participer notablement à l'impact radiologique global en cas de rejet (effectif ou hypothétique) ; il peut également s'agir d'un radionucléide « médiatisé » pour une raison quelconque et pour lequel des informations sont les bienvenues. Les données sont issues du site Internet de l'ITU (Institute for Transuranium Elements), Nucleonica (<http://www.nucleonica.net/>).

ORIGINES

■ **Naturelle ou artificielle** : l'origine du (des) radio-isotope(s) est décrite succinctement en listant les principales sources naturelles (lithosphère, atmosphère, etc.) ou artificielles, qu'elles soient historiques (accidents ou rejets localisés, retombées d'essais d'armes, etc.), actuelles (rejets d'installations nucléaires, rejets d'industries conventionnelles, de laboratoires, d'hôpitaux, etc.) ou hypothétiques (déchets nucléaires futurs). Des indications sur les isotopes stables de l'élément, s'ils existent, sont également fournies lorsque leur présence influence le comportement des radio-isotopes ou lorsqu'il n'existe que peu de données strictement radioécologiques.

CONCENTRATIONS DANS L'ENVIRONNEMENT

■ Ce paragraphe donne les valeurs moyennes de concentration du radio-isotope (ou de l'élément stable) mesurées dans un environnement naturel (au sens de non soumis à des perturbations anthropiques) et éventuellement des valeurs extrêmes mesurées dans certains cas particuliers.

Les méthodes de mesures du (des) radio-isotope(s) sont brièvement décrites.

MÉTROLOGIE, TECHNIQUES D'ANALYSE ET LIMITES DE DÉTECTION

Les différentes méthodes de mesures du (des) radio-isotope(s) sont décrites avec les matériels spécifiques qui peuvent être nécessaires. Les prises d'essai sont mentionnées, en lien avec la nature des échantillons et les limites de détection/quantification de chaque méthode.

MOBILITÉ ET BIODISPONIBILITÉ EN MILIEU TERRESTRE

■ **Sols** : un aperçu de la mobilité du radionucléide est donné pour l'horizon superficiel du sol, en conditions dites *moyennes* c'est-à-dire sol généralement aéré, de potentiel rédox E_H compris entre environ 0 et 500 mV et de pH compris entre environ 5 et 8,5. Sont décrits : les principales phases porteuses connues pour intervenir dans la rétention de l'élément (minéraux argileux, composés organiques, oxydes et hydroxydes métalliques, carbonates, etc.), les mécanismes majeurs de sa sorption-désorption, ainsi que les paramètres (principalement pH, E_H et constituants majeurs du sol) susceptibles d'influencer sa mobilité. L'expression « *mobilité... moyenne... forte... faible* » s'entend en termes de comparaison entre éléments, e.g. le plutonium est réputé peu mobile, alors que le chlore est réputé très mobile dans le sol.

■ **Végétaux** : les principales données relatives au transfert foliaire ou racinaire vers le végétal sont récapitulées : intensité du transfert, principaux paramètres gouvernant la biodisponibilité, translocation aux parties consommables des végétaux.

■ **Animaux** : les transferts à partir de l'alimentation ou d'autres voies (inhalation, abreuvement) *via* les animaux d'élevage aux productions animales (laits, viandes, etc.) sont brièvement décrits. Les périodes biologiques sont données, le cas échéant.

■ **Produits transformés** : lorsque l'effet des transformations agro-alimentaires des aliments a été étudié (ce qui est rarement le cas), un paragraphe en donne les principaux résultats.

MOBILITÉ ET BIODISPONIBILITÉ EN MILIEU AQUATIQUE CONTINENTAL

■ **Eaux** : la particularité des eaux de surface est la grande variabilité de leurs caractéristiques physico-chimiques, notamment en fonction de la nature des bassins versants traversés, des saisons et de la pluviométrie. Il est considéré toutefois que la mobilité du radionucléide dans les eaux continentales superficielles (rivières et lacs) est abordée pour des conditions usuelles de ces milieux, c'est à dire pour un pH compris entre 7 et 8,5, une conductivité moyenne d'environ $500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, une température moyenne annuelle comprise entre 9 et 18 °C et des conditions oxydantes. La spéciation de l'élément est précisée, ainsi que la solubilité de certains de ses composés. La possibilité de complexation est envisagée, avec formation éventuelle de colloïdes. Les particularités de la phase dissoute et de la phase particulaire sont autant que possible spécifiées, par exemple au travers d'un coefficient de partage eau-matières en suspension.

■ **Sédiments** : ce compartiment constitue une zone de stockage des polluants dans les milieux aquatiques. Il est donc particulièrement important d'y caractériser la mobilité de ceux-ci, ce qui est fait par le coefficient de partage eau-sédiments. En fonction des sols érodés, de la nature des apports des bassins versants et des conditions d'écoulement et de dépôt, les sédiments peuvent présenter des caractéristiques physico-chimiques très variables. La mobilité du radionucléide est traitée pour les conditions habituelles des sédiments, soit un pH de l'ordre de 6 à 8 et un potentiel redox allant de - 0,5 à 1 V. Les processus et les conditions déterminant l'évolution de la fixation du polluant sont présentés lorsqu'ils sont connus.

■ **Végétaux** : les données relatives au transfert à trois grandes catégories de végétaux : algues microscopiques – phytoplancton – mousses et végétaux supérieurs, sont présentées. Dans la mesure du possible, les voies de transfert sont précisées, ainsi que les processus engagés. Toutefois, dans le domaine aquatique, le transfert aux végétaux est généralement traité de façon globale, sous la forme d'un facteur de concentration eau → végétal.

■ **Animaux** : le rôle biologique de l'élément, s'il est connu, est spécifié, accompagné des informations disponibles sur sa mobilité et sa biodisponibilité. Pour ce qui est des transferts aux organismes, les cinétiques d'échange sont parfois indiquées. Systématiquement, deux types de paramètres sont traités dans cette rubrique. À l'exemple des végétaux, un facteur de concentration eau → organisme est fourni, à *minima* par niveau trophique (producteurs primaires, consommateurs de premier ordre et d'ordres

supérieurs). La distinction entre différents organes peut être faite, notamment dans l'optique des possibilités de transfert trophique (parties molles des mollusques, muscles des poissons, etc.). Cette seconde voie est abordée sous l'angle d'un facteur de transfert trophique, entre la proie et le prédateur.

MOBILITÉ ET BIODISPONIBILITÉ EN MILIEU MARIN

■ **Eaux** : les caractéristiques physiques et chimiques des eaux sont à prendre en compte pour expliquer le comportement de certains radionucléides dans des zones à grande variabilité de leurs caractéristiques physico-chimiques comme les estuaires (turbidité, salinité, etc.). Les états d'oxydation dans l'eau et les formes physico-chimiques sont précisés. La répartition entre les phases soluble et particulaire est indiquée. Les teneurs en isotopes stables, s'ils existent, sont en général mentionnées.

■ **Sédiments** : ce compartiment constitue une zone de stockage, temporaire ou définitif, pour de nombreux polluants dans les milieux aquatiques marins et estuariens. Il est donc particulièrement important de caractériser leur capacité de fixation, soit par le coefficient de partage eau-sédiments, soit, quand cela est possible, en identifiant les phases sédimentaires porteuses de ces polluants. Les processus et les conditions déterminant l'évolution de la fixation du polluant sur les particules ou de son immobilisation dans la colonne sédimentaire sont présentés lorsqu'ils sont connus.

■ **Végétaux** : les données relatives au transfert aux algues sont présentées ; les données sur les végétaux supérieurs sont rares. Dans le domaine aquatique, le transfert aux végétaux est généralement traité de façon globale, sous la forme d'un facteur de concentration eau → plante entière.

■ **Animaux** : les voies de transfert (eau, sédiment, trophique) sont précisées et les facteurs de transfert sont fournis, principalement entre l'eau et les animaux. Les différences entre espèces sont mentionnées, et la distinction entre différents organes peut être faite. Les cinétiques d'accumulation et d'élimination sont parfois indiquées, ainsi que le rôle biologique de l'élément, s'il est connu. Des informations sur la mobilité ou la biodisponibilité sont mentionnées.

MOBILITÉ ET BIODISPONIBILITÉ DANS LES ÉCOSYSTEMES SEMI-NATURELS

Dans un objectif de radioprotection, la prise en considération des trois écosystèmes terrestre, aquatique continental et marin n'est pas suffisante pour couvrir la diversité des milieux potentiellement contaminés par les substances radioactives et/ou utilisés par l'homme. Trois environnements complémentaires sont également de premier intérêt, réunis sous le terme d'écosystèmes semi-naturels : il s'agit des forêts, des écosystèmes arctiques et alpins.

■ **Forêts** : les forêts sont utilisées par l'homme à divers titres, que ce soit pour l'exploitation du bois, pour la chasse et la cueillette, ou encore comme zones protégées pour la vie végétale et animale. Les données relatives au transfert au bois (arbres), aux baies, aux champignons, au gibier sont ainsi présentées lorsqu'elles sont disponibles. Elles sont cependant peu abondantes et se rapportent essentiellement à trois radionucléides, Cs, Sr et Pu.

■ **Écosystèmes arctiques** : les écosystèmes arctiques constituent comme les forêts des zones où l'agriculture au sens traditionnel est très restreinte, mais dont les productions sont largement exploitées par l'homme, et pour les mêmes usages. Les données relatives aux espèces typiques de ces écosystèmes et d'intérêt pour l'homme sont présentées lorsqu'elles sont disponibles.

■ **Écosystèmes alpins** : la troisième composante des écosystèmes semi-naturels présente la même problématique que les deux précédentes, et est abordée dans la même optique. Les quelques données spécifiques au transfert des radionucléides dans cet environnement sont exposées à chaque fois que possible.

TOXICITÉ ENVIRONNEMENTALE

Les parties précédentes sont dédiées à la caractérisation de la mobilité et de la biodisponibilité des radionucléides dans l'environnement. Dans l'optique de l'évaluation du risque lié au rejet ou à la présence de ces substances radioactives dans les milieux naturels, les informations ainsi produites permettent de décrire l'exposition des organismes vivants. Elles demandent à être complétées par des éléments se rapportant aux effets des substances considérées, expriment leur toxicité environnementale. Avant d'être radioactifs, les radionucléides sont des éléments chimiques susceptibles à ce titre d'être toxiques. Les deux aspects, chimiotoxicité et radiotoxicité, sont examinés dans les fiches.

■ **Chimiotoxicité** : les connaissances relatives à la chimiotoxicité de l'élément sont exposées, depuis les données brutes d'écotoxicité si nécessaire jusqu'aux critères de protection recensés dans la littérature.

■ **Radiotoxicité** : la radiotoxicité des radionucléides est caractérisée via la présentation des coefficients de conversion de dose calculés pour une série d'espèces modèles, en indiquant l'importance relative de

l'exposition interne et de l'exposition externe. Afin de limiter le contenu des fiches à l'information concernant strictement le radionucléide considéré, une fiche complémentaire transverse, intitulée « Dosimétrie environnementale », donne les grands principes soutenant ce domaine.

RÉCAPITULATIF DES MÉTHODES DE MESURE

Un tableau de synthèse présente les principales caractéristiques des diverses méthodes de mesure mentionnées, depuis le type d'analyse, ses limites de détection, les incertitudes associées, les délais et les prises d'essais.

PARAMÈTRES RADIOÉCOLOGIQUES USUELS

Pour chaque élément, les valeurs des principaux paramètres radioécologiques présentées en tant que *valeurs par défaut* par divers organismes internationaux (principalement l'AIEA, mais aussi éventuellement le NRPB, National Radiological Protection Board, le US-DOE, United States Department of Energy, etc.) figurent sous forme de tableaux. À ces valeurs peuvent être adjointes des données – généralement spécifiques – issues de sources plus récentes. Les définitions données ci-après sont relatives à la plupart des tableaux présents systématiquement ; toutefois, dans certains cas, des facteurs radioécologiques peuvent être présentés sous une forme différente ou avec d'autres unités que celles habituelles. Dans ce cas, une indication en fait précisément mention.

Milieu terrestre

■ Le **coefficient de distribution K_d** de l'élément est défini comme le rapport, à l'équilibre, de l'activité massique de la phase solide à l'activité volumique de la phase liquide dans le système sol – solution du sol. Il est exprimé, en toute rigueur, en $\text{mol.g}^{-1} \text{ sec par mol.cm}^{-3}$; pour les sols l'unité usuelle L.kg^{-1} est celle utilisée dans les fiches. Comme pour toutes les données relatives au sol, son expression est *toujours exprimée par rapport à la masse du sol sec*, tamisé à 2 mm.

■ Le **facteur de transfert foliaire** représente l'ensemble du phénomène de transfert lié à un dépôt foliaire. Il intègre le transfert par voie foliaire, le transfert éventuel par voie racinaire (en particulier pour un dépôt sur de jeunes plants), ainsi que la translocation lorsqu'il est relatif à une partie du végétal. Il représente, en général, le rapport de l'activité massique du végétal frais (ou d'une partie du végétal) au moment de la récolte à la densité de dépôt sur l'ensemble sol et végétal ; il s'exprime en Bq.kg^{-1} de végétal sec ou frais par Bq.m^{-2} .

■ Le **facteur de transfert racinaire** est défini par le rapport de l'activité massique du végétal, ou d'une partie du végétal, lors de la récolte, à celle du sol sec. La contamination du sol est considérée constante et homogène dans la couche de sol labourée (ou pour les prairies permanentes dans les dix premiers centimètres), durant la croissance du végétal. Les valeurs relatives aux végétaux sont exprimées par rapport au poids sec ou au poids frais alors que celles relatives au sol sont toujours relatives au sol sec. On l'exprime donc en kg de sol sec par kg de végétal sec ou frais. L'hypothèse implicite contenue dans cette définition est que la concentration de la solution du sol est liée de façon parfaitement linéaire à l'activité massique du sol en moyenne dans la couche cultivée. Les facteurs de transfert racinaire de l'élément concerné sont, lorsqu'ils sont connus, donnés sous forme de tableaux de valeurs par défaut.

■ Les **transformations agro-alimentaires** sont quantifiées par le rapport des activités massiques du radionucléide entre le produit final (aliment transformé) et le produit initial (produit agricole récolté). Il est exprimé en Bq.kg^{-1} de produit transformé par Bq.kg^{-1} de produit récolté.

Eaux douces

■ Le **coefficient de distribution K_d** de l'élément est défini comme le rapport, à l'équilibre, de l'activité massique de la phase solide à l'activité volumique de la phase liquide dans le système particules en suspension - eau libre ou sédiment - eau interstitielle. Il est exprimé, en toute rigueur, en $\text{mol.g}^{-1} \text{ sec par mol.cm}^{-3}$; pour les sédiments ou les particules en suspension, l'unité usuelle L.kg^{-1} est celle utilisée dans les fiches. Comme pour toutes les données relatives au sédiment, l'activité de la phase solide est toujours exprimée par rapport à la masse de sédiment sec, tamisé à 2 mm, si nécessaire.

■ Le **facteur de concentration** est défini par le rapport à l'équilibre de la concentration de l'organisme à celle de l'eau. Il est exprimé en litre d'eau par kilogramme frais d'organismes ou d'organes. Il représente généralement pour les végétaux l'ensemble des voies de transfert : transfert foliaire, transfert racinaire et translocation. Pour les animaux, il représente en toute rigueur le transfert lié aux échanges d'eau (filtration, ingestion). De façon implicite, d'autres transferts (à partir du sédiment ou par voie trophique) peuvent aussi y être intégrés, en « cumulant » les facteurs de transfert pour l'ensemble des voies.

■ Le **facteur de transfert trophique** est défini comme le rapport, à l'équilibre, de l'activité massique du prédateur à celle de sa proie. Il est exprimé en kilogramme frais de proie par kilogramme frais de prédateur.

Milieu marin

■ Le **coefficient de distribution Kd** de l'élément est défini comme le rapport, à l'équilibre, de l'activité massique de la phase solide à l'activité volumique de la phase liquide dans le système particules en suspension - eau libre ou sédiment - eau interstitielle. Il est exprimé, en toute rigueur, en $\text{mol.g}^{-1} \text{ sec par mol.cm}^{-3}$; pour les sédiments ou les particules en suspension, l'unité usuelle L.kg^{-1} est celle utilisée dans les fiches. Comme pour toutes les données relatives au sédiment, l'activité de la phase solide est *toujours exprimée par rapport à la masse de sédiment sec*, tamisé à 2 mm, si nécessaire.

■ Le **facteur de concentration** est défini par le rapport à l'équilibre de la concentration en radionucléide de l'organisme à celle de l'eau. Il est exprimé en litre d'eau par kilogramme frais d'organismes ou d'organes. En fait, ce facteur de concentration correspond à une comparaison exprimée par un rapport entre les niveaux de radioactivité chez les organismes et les niveaux dans l'eau de mer ; il n'exprime pas un transfert dû au seul vecteur eau de mer, le niveau d'activité chez les organismes étant le fait de l'ensemble des voies de transfert.

PARAMÈTRES RADIOTOXICOLOGIQUES

Pour chaque élément, les valeurs des coefficients de conversion de dose (DCC) calculés pour une série d'organismes de référence représentés par des espèces modèles typiques de la structure et du fonctionnement de chacun des trois principaux écosystèmes figurent sous forme de tableaux.

Constitution de la bibliographie

La liste des références qui figurent dans les fiches n'est pas exhaustive. Le nombre de références bibliographiques mentionnées a été volontairement restreint, de ce fait ont été privilégiées les citations de livres, rapports ou publications qui présentent des synthèses bibliographiques. Cependant, les articles récents (5 dernières années) ou dont la portée est assez générale ont été systématiquement recherchés et, le cas échéant, leurs principaux résultats sont inclus dans la synthèse bibliographique. En complément, des recherches sur Internet ont été faites et dans ce cas les sites consultés sont mentionnés ainsi que la date de consultation.

Principes de rédaction et de vérification

Le processus initial de rédaction a fait intervenir deux agents du Service de recherche et d'expertise sur les risques environnementaux (SERIS), dont les compétences principales étaient orientées respectivement vers le milieu terrestre et le milieu aquatique continental. Ces auteurs procédaient ensuite à une relecture croisée de l'ensemble, suivie d'une vérification par une ou deux personnes différentes des rédacteurs initiaux.

Une première révision des fiches est intervenue à partir de 2004 pour y intégrer, si nécessaire, le domaine marin, et, d'autre part pour homogénéiser et compléter leur contenu et mettre à jour la bibliographie. Elle a été effectuée par au moins trois personnes appartenant au SERIS ou au Service d'étude et de surveillance de la radioactivité dans l'environnement (SESURE), dont les compétences principales étaient orientées respectivement vers les milieux terrestre, aquatique continental et marin. L'intégralité de la fiche a alors été à nouveau vérifiée par un quatrième intervenant du SERIS ou du SESURE.

La deuxième révision des fiches a débuté en 2010, afin notamment d'étoffer leur partie métrologique, d'y ajouter écosystèmes semi-naturels et toxicité environnementale et de procéder à leur mise à jour au regard des grandes synthèses récemment publiées. Le principe de rédaction reste le même, à savoir que les auteurs sont sollicités en fonction de leurs compétences dans les diverses unités relevant de la thématique Environnement au sein du pôle Radioprotection, environnement, déchets et crise. Ce sont au minimum cinq intervenants qui contribuent aujourd'hui aux nouvelles versions des fiches, dans les domaines suivants :

- radioécologie terrestre (SERIS) ;
- radioécologie aquatique continentale (SERIS) ;
- radioécologie marine (SERIS) ;
- métrologie des rayonnements ionisants (STEME) ;
- concentrations des radionucléides dans l'environnement (SESURE).

Le coordinateur assure une première relecture, doublée d'une vérification hiérarchique. Après traduction en anglais, les fiches sont mises à disposition sur le site Internet de l'Institut.

Les auteurs et vérificateurs sont cités sur chaque fiche.