

Le transfert de la contamination aux denrées alimentaires

AL1

Lors d'un accident nucléaire conduisant à des rejets de radionucléides la population est exposée aux rayonnements ionisants de différentes manières.

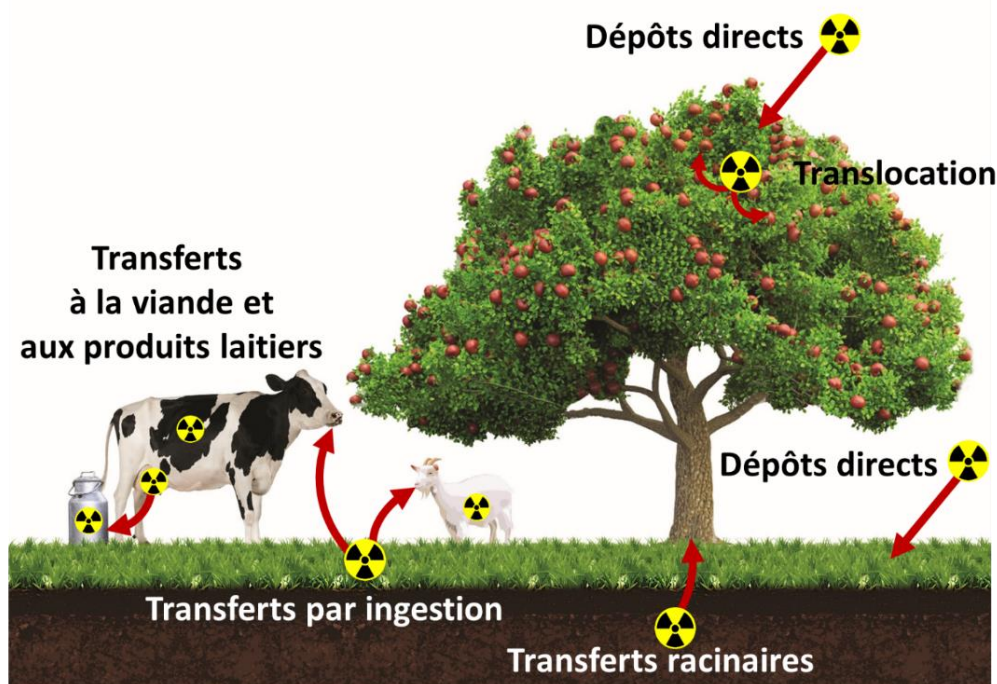
L'une des voies d'exposition est la contamination par ingestion de denrées contaminées.

Il est donc primordial de comprendre les mécanismes de transfert de la contamination de l'air aux denrées, puis des sols aux denrées afin de réduire autant que possible cette voie d'exposition.

Lors du passage des masses d'air contaminé, les radionucléides présents dans l'air se déposent peu à peu à la surface de la végétation, créant ainsi une contamination surfacique. Cette contamination peut ensuite être internalisée (absorption foliaire) et redistribuée via la sève aux autres organes végétatifs (translocation des radionucléides), y compris à ceux qui n'auraient pas été directement touchés. Après les retombées, une voie de contamination perdure, il s'agit du transfert racinaire des radionucléides des sols aux plantes.

La contamination de la végétation constitue la première étape de la contamination de la chaîne alimentaire. Du fait de l'ingestion de végétaux contaminés par les animaux d'élevage, cette contamination s'étend aux produits alimentaires d'origine animale tels que le lait, la viande, les œufs, etc. En fonction de leur nature, les radionucléides ingérés par les animaux s'accumulent préférentiellement dans le lait ou dans certains organes.

Certains aliments contribuent ainsi plus fortement que d'autres à la dose reçue par l'Homme. Il est donc important de les identifier et de les éviter autant que possible.



Les dépôts directs sur les végétaux

Lors d'un accident nucléaire, la première voie de contamination des aliments est le dépôt direct des radionucléides à la surface des végétaux.

La quantité de radionucléides interceptée par la végétation dépend principalement de l'espèce végétale et de son stade végétatif au moment du dépôt. Plus il sera avancé et le feuillage développé, plus la surface d'interception sera grande et la quantité de radionucléides interceptée importante.

Plus les végétaux auront un large feuillage, plus leur surface d'interception sera grande. Des feuilles rugueuses ou pourvues de poils présenteront également une forte capacité d'interception.

Lorsqu'ils sont déjà développés les fruits peuvent également recevoir des dépôts directs.

Selon le type de dépôt : sec ou humide, les facteurs qui influencent la quantité interceptée diffèrent.

Pour les dépôts secs, le facteur prédominant est la taille des particules qui est lui-même dépendant des caractéristiques du rejet et de la distance à la source de contamination. L'interception est d'autant plus efficace que les particules sont petites. Pour l'iode, c'est la forme chimique, particulaire, gazeuse ou organique, qui a le plus d'influence sur le dépôt. Sous forme gazeuse, l'iode est plus facilement intercepté.

Il a été constaté que lorsque la végétation était humide ou mouillée, les dépôts étaient considérablement plus élevés.

Les conditions météorologiques au moment du dépôt impactent également la quantité de radionucléides déposée.

Pour les dépôts humides, l'interception par la végétation résulte de la combinaison de facteurs plus complexes tels que la capacité de la surface végétale à retenir l'eau, les propriétés physicochimiques des radionucléides, la nature des précipitations (brouillard, neige, pluies, grêles) et leur intensité.

Durant un épisode pluvieux, l'interception de l'eau par la feuille augmente jusqu'à un certain point. Au-delà, l'eau ruisselle à la surface et s'égoutte.

Sous l'effet du vent la capacité de rétention de l'eau par les feuilles a tendance à diminuer.

Les phénomènes de réduction des dépôts surfaciques

Certains phénomènes peuvent intervenir après les dépôts et réduire la quantité de radionucléides interceptés par les plantes. Parmi ces phénomènes on compte, le lessivage par la pluie ou par l'eau d'arrosage des matières interceptées, l'abrasion de la surface des feuilles sous l'effet du vent, la remise en suspension des particules et la volatilisation ou l'évaporation des radionucléides gazeux.

Bien qu'une partie des radionucléides soit perdue sous l'effet de ces phénomènes, la majorité du dépôt perdure et contamine la végétation. Ainsi, la consommation de végétaux ou de fruits sans aucune précaution peut conduire à l'exposition des consommateurs à des doses de rayonnements élevées, voire très élevées.

Quelques jours après la catastrophe nucléaire de Fukushima Daiichi, les activités mesurées dans des épinards prélevés dans la circonscription d'IBARAKI, à près de 100 km au sud de la centrale nucléaire étaient de l'ordre de 6 100 Bq/kg à 15 020 Bq/kg pour l'iode 131. Ces niveaux de contamination étaient de 3 fois à près de 8 fois supérieurs au niveau maximal admissible de contamination (NMA)¹ pour l'iode qui est de 2 000 Bq/kg (une valeur elle-même très élevée). A de tels niveaux, les produits concernés doivent impérativement être retirés du marché.

Le transfert foliaire ou translocation

Les radionucléides déposés à la surface des végétaux peuvent être incorporés à l'intérieur du végétal. Lorsque les dépôts ont lieu sur les feuilles, on parle de transfert foliaire ou de translocation. Cette translocation résulte de phénomènes complexes qui conduisent à la fixation des radionucléides à la surface du feuillage, à leur pénétration dans la cuticule (couche externe des feuilles), à l'incorporation dans les cellules des feuilles et à leur transfert à la sève qui les transporte et les redistribue dans l'ensemble de la plante.

Les radionucléides déposés peuvent ainsi atteindre les différentes parties de la plante (fleurs, fruits, tiges et racines) même si elles n'ont pas été impactées par les retombées. Ce transport dépend largement du stade de croissance de la plante.

¹ Voir fiche AL2

La translocation est ainsi maximale lorsque la demande interne en nutriments de la plante est maximale, ce qui correspond à la formation des parties reproductrices de la plantes (fleurs, fruits et graines). Dans le blé, la translocation du césium 137 atteint son niveau le plus élevé lors de la floraison alors que pour le strontium 90, le pic a lieu lors du développement des grains.

Le transfert racinaire

Pour se développer, la plupart des végétaux terrestres puisent dans le sol les minéraux qui sont nécessaires à leur croissance. Après un accident nucléaire conduisant à la contamination des sols, la végétation incorpore via ses racines les radionucléides contenus dans le sol. Dans les premiers temps, les transferts racinaires sont nettement plus faibles que les transferts foliaires, mais avec le temps ils deviennent la voie prédominante de contamination des végétaux.

Le transfert racinaire dépend de 6 principaux facteurs : la forme des radionucléides présents dans le sol (forme particulaire, dissoute) et leurs propriétés physico-chimiques, du temps écoulé depuis le dépôt, du type de sol et de ses caractéristiques physico-chimiques, du type de culture, des pratiques agricoles (apport d'engrais, irrigation, labour, chaulage, etc.) et des conditions climatiques.

Les propriétés du sol

Les transferts racinaires pour une même espèce végétale peuvent différer de 3 ordres de grandeur en fonction de la nature du sol. Cette variation dépend principalement de la composition minéralogique et granulométrique du sol, de sa teneur en matière organique et de son pH. A titre d'exemple, beaucoup de radionucléides présenteront une plus grande biodisponibilité pour les plantes dans des sols sableux contrairement aux sols argileux. Cette disponibilité tend à diminuer avec l'augmentation de la teneur en argile.

Dans les sols riches en matière organique, beaucoup de radionucléides auront tendance à être plus facilement transférés aux plantes.

Propriétés des cultures

Les besoins en nutriments varient d'une plante à l'autre. Certains des principaux radionucléides rejetés lors d'accident nucléaire possèdent des analogues chimiques dont les plantes ont besoin pour leur croissance. Pour le césium il s'agit du potassium, pour le strontium du calcium et du manganèse.

Les plantes peuvent également avoir une distribution racinaire différente, des durées de période végétative variables qui vont influencer leur capacité à absorber les radionucléides contenus dans le sol.

Par ailleurs, les différentes parties d'une plante ne vont pas concentrer de la même manière les radionucléides. En général, le transfert est plus important pour les feuilles et les tiges que pour les autres parties de la plante.

Les pratiques agricoles

Les pratiques agricoles ont une grande influence sur les transferts racinaires aux plantes. D'après un document technique de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA)², l'irrigation a pour effet d'augmenter l'accumulation des radionucléides dans les plantes d'un facteur 1 à 2. Le labour, tend plutôt à réduire les transferts d'environ un facteur 2. Le chaulage (apport de calcium) réduit également le transfert du césium et du strontium d'un facteur 2 à 3 et l'apport d'engrais potassiques d'un facteur 2 à 5. La quantité de césium 137 absorbé par les plantes est fonction de la quantité de potassium 40 disponible dans le sol. Ainsi, les transferts aux plantes peuvent être limités par des apports réguliers de potassium. Cependant l'utilisation de ces engrais potassiques peut poser des problèmes de radioactivité naturelle car ils contiennent des teneurs élevées en potassium 40 radioactif.

Bien que ces mesures puissent réduire les transferts racinaires aux plantes, en cas de contamination très élevée, elles resteront insuffisantes, voire dérisoires.

Quelques facteurs de transfert

Le facteur de transfert des sols aux plantes définit la capacité d'une plante à absorber via son système racinaire, les radionucléides présents dans un sol. Sa valeur correspond au rapport entre l'activité d'un radionucléide donné dans la plante et son activité dans le sol. Ainsi, plus les facteurs de transfert sont grands, plus la végétation absorbe de radionucléides. Le tableau suivant présente quelques valeurs de facteurs de transfert pour le césium, le strontium et le

² IAEA, 2010, Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Report Series N°472. IAEA, Vienna, Austria.

plutonium, pour différents végétaux (céréales et légumes feuilles) et différents types de sol (sableux et argileux). Les données sont issues du document technique de l'AIEA². Ces valeurs rendent compte de l'état des connaissances à un certain moment, mais elles ne tiennent pas forcément compte de tous les cas particuliers.

Végétaux	Type de sol	Nombre de valeurs	Valeur moyenne	Valeur minimale	Valeur maximale
Césium 137					
Céréales (grains)	Sableux	156	0,039	0,0020	0,66
	Argileux	110	0,011	0,0002	0,09
Légumes feuilles (feuilles)	Sableux	96	0,12	0,0021	0,98
	Argileux	67	0,018	0,0005	0,72
Strontium 90					
Céréales (grains)	Sableux	123	0,14	0,0036	1
	Argileux	72	0,078	0,0053	0,71
Légumes feuilles (feuilles)	Sableux	72	1,7	0,064	7,8
	Argileux	54	0,15	0,0039	2,2
Plutonium					
Céréales (grains)	Sableux	76	0,000033	0,0000005	0,00036
	Argileux	16	0,0000074	0,0000002	0,00051

Tableau 1 : Facteurs de transfert des sols aux plantes pour différents types de plantes et de sols.

D'après ces valeurs, pour un sol sableux contenant 1 000 Bq/kg sec de césium, une salade contiendrait en moyenne 120 Bq/kg sec (1 000 Bq/kg x 0,12). Il est important de noter qu'il s'agit d'une valeur moyenne. Dans notre exemple, la fourchette de valeurs s'étendrait de 2,1 Bq/kg sec minimum (1 000 Bq/kg x 0,0021) à 980 Bq/kg sec maximum (1 000 Bq/kg x 0,98). Aux incertitudes sur le calcul de la valeur moyenne s'ajoute l'incertitude sur l'estimation de la masse sèche de notre sol et de notre salade puisque les facteurs sont donnés pour des masses sèches.

Par ailleurs, ces facteurs ne sont valables que pour un sol présentant une contamination homogène sur la profondeur du labour. Ils sont donc utilisés pour déterminer le transfert résiduel des sols aux plantes qui seraient cultivées sur un sol ayant été contaminé il y a plus d'une année.

Pour une situation accidentelle où la contamination ne serait localisée qu'en surface et les plantes en cours de croissance au moment des retombées, d'autres facteurs de transfert doivent être utilisés.

Cas particuliers du transfert racinaire aux champignons

Du fait de leur physiologie particulière, les champignons sont capables d'extraire de manière plus efficace les nutriments présents dans le sol. L'absorption se fait grâce à des récepteurs spécifiques situés sur les membranes du mycélium, la partie souterraine et vivace du champignon. Le champignon a également la particularité d'accumuler les éléments extraits, du fait d'un métabolisme assez lent et d'une certaine longévité : de plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines d'années. Alors que par transferts racinaires, les végétaux présentent généralement des activités très inférieures à celles du sol, chez certaines espèces de champignons, le phénomène s'inverse : le mycélium parvient à concentrer les radionucléides. Lorsque ces espèces sont comestibles, leur contamination doit être prise en compte. Certains champignons comme la chanterelle en tube, le pied de mouton ou le bolet bai sont des espèces particulièrement à risque. Dans les années qui ont suivi l'accident de Tchernobyl, le laboratoire de la CRIIRAD avait analysé plusieurs centaines d'échantillons de champignons provenant de France. Les activités maximales en césium 137 dépassaient 1 000 Bq/kg frais. La CRIIRAD a constaté une décroissance progressive des activités dans les champignons en France, mais les problèmes persistent dans le temps. En 1997, un échantillon de Petit gris (*Tricholoma terreum*) prélevé dans les Alpes Maritimes contenait jusqu'à 3 000 Bq/kg. En 2015, certains champignons cueillis en France dépassaient toujours le seuil d'importation des produits du Japon mis en place après Fukushima (100 Bq/kg frais).

Le transfert aux animaux et aux produits d'origine animale

La contamination de produits alimentaires d'origine animale peut représenter une source importante d'exposition aux rayonnements pour l'Homme. Il existe 3 voies de transfert de la contamination aux animaux : les dépôts directs sur la peau, l'inhalation d'aérosols ou de gaz radioactifs et l'ingestion d'aliments, d'eau ou de particules de sol contaminés.

L'absorption transcutanée et le passage à travers les lésions de la peau constituent une voie de transfert très secondaire.

Le transfert via l'inhalation est plus important. La capacité des radionucléides à traverser les membranes pulmonaires et à passer dans le sang varie considérablement d'un radioélément à l'autre et dépend de leur forme: composés gazeux, aérosols ou particules. Une fois dans le sang ils peuvent atteindre les muscles et les divers organes ou le lait.

L'ingestion représente au final la voie dominante de transfert de la contamination aux animaux. Les apports de radionucléides du fait de l'ingestion de sol peuvent être significatifs, mais ils sont en général présents sous une forme difficilement assimilable par l'organisme. L'ingestion d'eau contaminée peut représenter une voie de contamination non négligeable en fonction des circonstances. Par exemple, pour un troupeau en stabulation qui consomme un fourrage non contaminé mais qui est abreuvé avec de l'eau de pluie contaminée, ce vecteur sera prépondérant. En général cependant, c'est l'ingestion de nourriture contaminée et les processus d'absorption et de rétention par l'organisme qui déterminent la teneur en radionucléides des tissus et organes de l'animal. Le niveau de contamination des animaux, et surtout des ruminants, dépend de la quantité d'aliments contaminés ingérée quotidiennement.

Lors des processus de digestion, les conditions d'acidité peuvent conduire à la modification de la forme des radionucléides qui deviennent plus disponibles pour l'organisme.

L'absorption des radionucléides par l'organisme est fortement dépendante de sa demande en isotopes stables (le manganèse 55 stable pour le manganèse 54 par exemple) ou en éléments essentiels analogues (par exemple le calcium naturel pour le strontium 90).

Les besoins physiologiques sont souvent plus importants chez un jeune animal ce qui conduit à un taux d'absorption plus élevé chez les jeunes individus.

Le tableau suivant présente quelques coefficients³ d'absorption des radionucléides par voie intestinale chez des ruminants. L'absorption est quasiment totale pour l'iode et plus forte pour le césium que pour le strontium. Pour le plutonium, comme pour d'autres éléments de masses atomiques importantes et qui ne sont pas essentiels pour l'organisme ou ne possèdent pas d'analogue chimique, l'absorption est très faible. Ces radionucléides sont très radiotoxiques et malgré de très faibles taux d'absorption, leur ingestion n'est jamais sans risque.

Radionucléides	Nombre de valeurs	Valeur moyenne	Valeur minimale	Valeur maximale
Cs	14	0,8	0,67	0,93
I	13	0,98	0,7	1,1
Sr	21	0,11	0,055	0,27
Pu	3	0,000085	0,000065	0,00012

Tableau 2 : Coefficients d'absorption des radionucléides par voie intestinale chez les ruminants.

Une fois absorbés, les radionucléides passent dans le système sanguin et sont redistribués aux différents organes. La forme des radionucléides peut alors être modifiée. Certains radionucléides peuvent ainsi se retrouver fixés à des molécules organiques. L'iode peut par exemple être incorporé à certaines hormones de la thyroïde.

En fonction de leur nature, les radionucléides se retrouvent accumulés dans différents tissus. L'organe de stockage de l'iode est la thyroïde mais on en retrouve également dans les glandes mammaires ce qui conduit à son transfert dans le lait. Il suffit de quelques heures après l'ingestion pour que l'iode contamine le lait.

³ Les valeurs sont issues du document technique de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique : IAEA, 2010, Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Report Series N°472. IAEA, Vienna, Austria.

L'analyse de 3 échantillons de lait prélevés entre le 16 et le 18 mars 2011 dans la circonscription de Fukushima révélait des teneurs en iode 131 de 1 190 Bq/kg, 1 510 Bq/kg et 932 Bq/kg, ce qui est bien au-delà du niveau maximal admissible fixé pour les pays de l'Union Européenne pour l'iode dans le lait (500 Bq/l)⁴.

Le strontium ayant un comportement analogue au calcium, il est principalement accumulé dans les os mais est également transféré au lait. Le césium se comportant comme le potassium, il se retrouve dans tous les tissus et plus particulièrement dans les muscles (donc dans la viande). Le foie et les reins sont des organes qui accumulent particulièrement toute sorte de polluants dont les radionucléides tels que les actinides (uranium, plutonium, américium, etc.).

En ce qui concerne les produits laitiers dérivés, les transferts des radionucléides montrent une assez grande variabilité, du fait de la grande diversité de méthodes de production fromagère. Le césium se retrouve principalement dans la phase aqueuse du lait. On en retrouvera donc beaucoup moins dans la crème et le beurre. Le coefficient de transfert du strontium aux fromages varie d'un type de fromage à un autre, en fonction de la concentration en calcium dans le fromage. Dans les fromages à pâte dure qui sont enrichis en calcium on retrouve ainsi plus de strontium 90.

Quels sont les aliments à risques ?

Compte tenu des différents processus décrits ci-dessus il est possible de cibler un certain nombre d'aliments qui vont présenter un risque accru de contamination.

A court terme, **les végétaux à larges feuilles** font partie des aliments les plus à risque. Ainsi, on trouve classiquement parmi les légumes les plus contaminés les blettes, les épinards, les salades, les poireaux et certaines variétés de choux... Ils sont impactés dès le passage des masses d'air par les dépôts directs. Plus le temps écoulé entre les retombées et la récolte est court, plus la contamination est importante. En fonction des niveaux de contamination, ces aliments doivent impérativement être proscrits de l'alimentation. Dans des secteurs moins touchés par les retombées et faute d'approvisionnement en aliments sains, un rinçage soigneux des légumes permet de réduire la contamination surfacique qui n'a pas encore été incorporée dans les feuilles. Le retrait des feuilles externes les plus développées réduira encore la quantité ingérée.

En l'absence de mesures prises pour éviter la contamination du bétail, **le lait** présente d'importants risques, notamment s'il est consommé par de jeunes enfants, et ce, dès les premiers jours qui suivent les retombées. Parmi les différents laits, celui de chèvre et de brebis concentre plus l'iode radioactif que celui de vache. **Les fromages frais** lorsqu'ils sont fabriqués avec du lait contaminé sont également à risque. En Corse, des niveaux de contamination très élevés avaient été mesurés dans le bruccio suite aux retombées de Tchernobyl.

La viande est également un aliment à risque. Sa contamination intervient plus lentement que pour le lait mais plus durablement si l'animal continue de pâturer de l'herbe contaminée. La viande de gibier peut présenter une contamination plus importante du fait notamment de la consommation pas les animaux de végétaux bioaccumulateurs (qui accumulent les radionucléides) tels que les champignons pour le sanglier et les lichens pour les cervidés.

Les champignons sont des aliments qui présentent un risque sur un très long terme puisque nous avons vu précédemment qu'ils sont capables de concentrer les radionucléides. Pour de très grands consommateurs de champignons, les doses reçues peuvent être très importantes. Il est donc important de veiller à leur provenance.

⁴ Cette limite est fixée par le [règlement \(Euratom\) 2016/52 du 15 janvier 2016](#)