

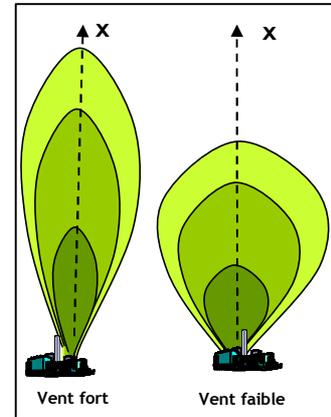
Contamination de l'air ambiant et répartition des dépôts dans l'environnement

CONTAMINATION DE L'AIR AMBIANT

AU COURS DES REJETS

En cas de rejets atmosphériques, l'air ambiant est le premier milieu contaminé. Il se forme un panache radioactif (le « nuage radioactif »), dont la contamination, dans le cas d'un rejet au niveau du sol, est d'autant plus importante que l'on est proche du point de rejet et de l'axe du vent.

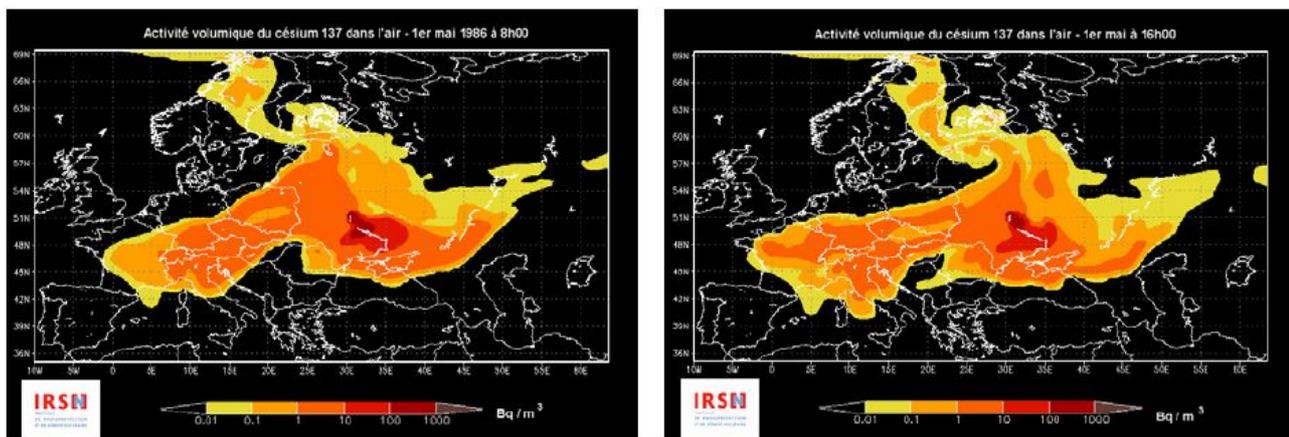
Dans ce panache, l'activité diminue avec le temps, par décroissance radioactive et dilution. A la suite des dépôts occasionnés par la chute des particules radioactives sous l'effet des précipitations pluvieuses et du contact des masses d'air avec les reliefs, le nuage est appauvri tandis que le couvert terrestre est contaminé.



Source : IRSN

Les conditions météorologiques au cours du rejet et la durée de celui-ci jouent un rôle prépondérant dans le déplacement de la masse d'air contaminée et, par la suite, sur l'ampleur et la répartition des dépôts.

Même s'il n'est pas transposable à tous les accidents, l'exemple de l'accident de Tchernobyl met en évidence l'importance des conditions météorologiques au cours d'un rejet dans la dispersion de la contamination à grande échelle. Dans le cas de cet accident, les rejets incontrôlés ont duré 10 jours durant lesquels, poussée par des vents changeants, la masse d'air polluée a emprunté plusieurs trajets et contaminé la plupart des pays d'Europe dans des proportions variables. Cela a également été le cas lors de l'accident de Fukushima Dai-ichi, survenu en mars 2011 au Japon.



Calculs de l'évolution de l'activité volumique du césium dans l'air à la suite de l'accident de Tchernobyl - Source : IRSN

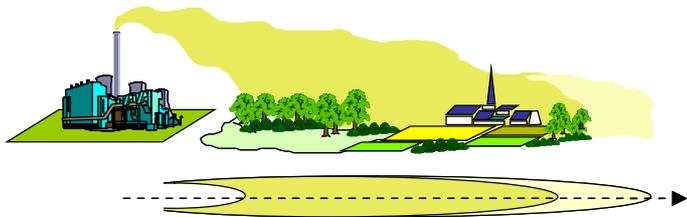
A LA FIN DES REJETS ET A PLUS LONG TERME

A la fin du passage du panache, la contamination de l'air devient très faible. Les éléments radioactifs déposés sur le sol peuvent cependant être remis en suspension, principalement par le vent ou certaines pratiques humaines (circulation automobile, labour...) mais les conséquences de ce phénomène restent locales et n'engendrent pas des niveaux de contamination de l'air importants.

LA REPARTITION DES DEPÔTS

Les surfaces, quelles qu'elles soient (naturelles, agricoles, bâties, extérieures et intérieures des bâtiments), sont contaminées à des niveaux plus ou moins élevés par les dépôts de particules radioactives contenues dans le panache. L'intensité des dépôts varie principalement en fonction des conditions météorologiques mais aussi du relief et de la couverture du sol.

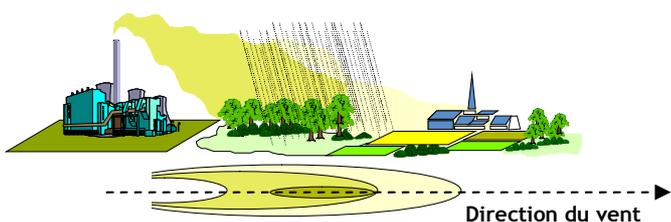
INFLUENCE DES CONDITIONS METEOROLOGIQUES



Source : IRSN

Niveaux de dépôts (Bq/m²)

-			+
---	--	--	---



Source : IRSN

Par temps sec, les particules se déposent sous l'effet du vent, des turbulences qu'il engendre et de la gravité. Seule l'activité de la couche d'air située à proximité du sol est concernée. Les dépôts sont par conséquent plus faibles (en Bq/m²) qu'en cas de pluie. Pour les aérosols¹, la taille des particules rejetées est également un paramètre important. Pour les gaz, la vitesse de dépôt est surtout influencée par les affinités chimiques entre les radionucléides et la surface de dépôt.

⁽¹⁾particules en suspension dans l'air, de dimensions comprises entre quelques fractions de nanomètre et 100 micromètres.

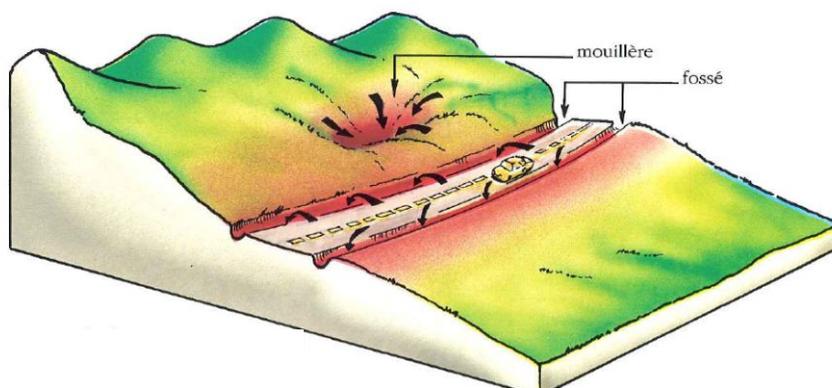
Par temps de pluie, les gouttes d'eau entraînent les particules vers le sol. Par rapport au dépôt sec, le lessivage concerne une couche d'air beaucoup plus importante. Sous les averses, les dépôts peuvent être 10 fois plus importants que par temps sec. On parle alors de « taches de contamination ». La répartition spatiale et la nature des dépôts sont très hétérogènes.

INFLUENCE DE LA COUVERTURE DU SOL

Une végétation haute et couvrante intercepte efficacement les particules radioactives. En forêt, les dépôts secs peuvent être jusqu'à deux fois plus importants qu'en terrain découvert.

INFLUENCE DU RELIEF

A la rencontre d'un relief, les turbulences de l'air s'amplifient et les précipitations s'intensifient. Les dépôts sont, par conséquent, a priori plus forts qu'en plaine. A une échelle locale, lors de dépôts pluvieux ou après la fonte des neiges, le ruissellement contribue à l'accumulation des éléments radioactifs dans les points bas par le lessivage des terrains en pente.



Source : « Agriculture, Environnement et Nucléaire : Comment réagir en cas d'accident » - FNSEA, CNIEL, IPSN

Contamination de l'environnement bâti d'une exploitation agricole

Au moment des dépôts, la contamination des surfaces (quelles qu'elles soient) est principalement influencée par la **nature** de celles-ci et les structures bâties qu'elles composent et par les **conditions météorologiques**. Les radionucléides déposés sur une même surface se répartissent en fonction de leur nature en deux phases : la « **fraction mobile** », facilement remobilisable par l'eau (notamment les premières pluies suivant l'accident), et la « **fraction fixée** » plus fermement liée à la surface de dépôt et plus lentement remobilisable.

CARACTERISTIQUES DE L'ENVIRONNEMENT BÂTI D'UNE EXPLOITATION AGRICOLE

ETANCHEITE DES BATIMENTS VIS-A-VIS DE L'AIR EXTERIEUR

Tous les bâtiments, abris ou installations ne présentent pas la même étanchéité vis-à-vis de l'air extérieur en cas de passage d'un nuage radioactif.

Les **bâtiments ouverts** présentent une **étanchéité très faible** de leur structure vis-à-vis de l'air extérieur. Ils sont même parfois construits de manière à favoriser la circulation de l'air à l'intérieur du bâtiment, comme c'est le cas pour certains bâtiments d'élevage. Il s'agit principalement des tunnels plastiques dont les bâches sont généralement trouées ou en mauvais état, des bâtiments d'élevages anciens ou vétustes (stabulations entravées, ...), de certains types de bâtiments d'élevage de volailles, des stabulations libres pour l'élevage (bovins, ovins, caprins) et des hangars de stockage (matériel agricole, paille...).

Les **bâtiments fermés et aérés** présentent une **étanchéité qui peut être importante** de leur structure vis-à-vis de l'air extérieur. Les **systèmes d'aération** ou de **ventilation** fonctionnent soit de manière **statique** soit de manière **dynamique**. Leurs ouvertures et fermetures peuvent être commandées manuellement ou automatiquement. Il s'agit principalement des habitations, des bâtiments d'élevage pour porcs, volailles, veaux, de certains bâtiments de stockage comme les silos et des serres agricoles, notamment en verre, voire en plastique.

CARACTERISTIQUES DES SURFACES A L'INTERIEUR DES BATIMENTS OU DES INSTALLATIONS

L'intérieur des bâtiments ou des installations agricoles abrite, en fonction du type d'activité pratiquée, des surfaces de natures diverses (sol brut, terre battue, béton...) dont le nettoyage est plus ou moins aisé.

Dans les **bâtiments d'élevage**, on trouve :

- des **surfaces en terre battue recouverte ou non de litière** (majorité des élevages de poulets, dindes, pintades, bovins viande et génisses). Leur nettoyage est en général effectué par enlèvement des effluents d'élevage, stockés ou non dans des ouvrages prévus à cet effet avant épandage sur les surfaces agricoles ;
- des **surfaces bétonnées recouvertes ou non de litière** (bâtiments d'élevage des troupeaux laitiers), nettoyées à l'eau et raclées plusieurs fois par jour. Les effluents sont stockés dans des fosses avant épandage ;
- des **caillebotis** (majorité des bâtiments d'élevage de porcs et de canards). Leur nettoyage est effectué à l'eau, en fin de bande. Les effluents sont stockés dans les fosses à lisiers ;
- **d'autres types d'installations**, comme les cages (souvent superposées les unes sur les autres) dans les élevages de poules pondeuses ou de gavage de canards gras. Leur nettoyage est effectué à la fin de chaque bande (un nettoyage par an pour les poules pondeuses, tous les 14 jours pour les canards).

Dans les **serres en verre ou en plastique abritant des cultures hors sol**, l'allée centrale est souvent bétonnée. Le reste de la surface du sol est le plus souvent recouvert d'un film en plastique (qui peut donc être retiré).

Les **chais de vinification et de vieillissement** peuvent également présenter des surfaces diverses : terre battue, aires bétonnées....

LES ABORDS DES BATIMENTS AGRICOLES

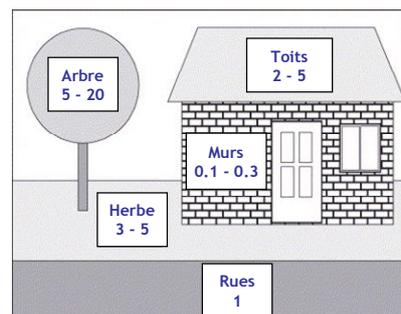
Les abords des bâtiments peuvent être constitués de **surfaces en terre battue**, de **surfaces enherbées** et d'**aires bétonnées, pavées ou stabilisées**. Il n'existe généralement pas de systèmes de récupération des eaux pluviales.

CONTAMINATION DE L'ESPACE BATI

EN CAS DE DEPOT SEC

En cas de dépôt sec, la contamination des surfaces horizontales est très souvent supérieure à celle relevée sur les surfaces verticales, avec un niveau de dépôt plus faible des aérosols « volatils » (I, Cs, Ru) que pour les aérosols « réfractaires » (Ba, Ce, Zr).

Sur les murs, les dépôts sont généralement plus faibles que pour les toits et les surfaces enherbées. Cependant, la force et la direction du vent peuvent conduire à une contamination forte et irrégulière des murs les plus exposés. Une partie des radionucléides dispersés dans l'air peut pénétrer à l'intérieur des bâtiments par les différentes ouvertures (ventilation...). Pendant le passage du panache radioactif, la concentration à l'intérieur des bâtiments reste néanmoins inférieure à la concentration à l'extérieur. Après le passage du panache, par contre, la concentration à l'extérieur a tendance à décroître plus rapidement qu'à l'intérieur du fait de la pluie, du ruissellement... Au cours du temps, l'intérieur des bâtiments est également contaminé par l'entrée de particules remises en suspension et par les mouvements de personnes ou d'animaux.

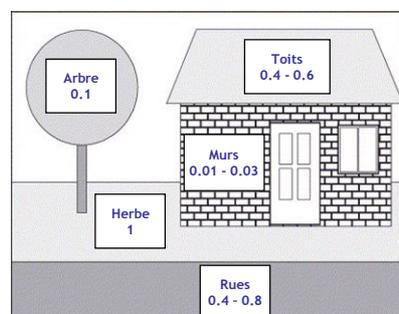


Dépôt sec relatif pour 1 Bq déposé de 137Cs

En phase post-accidentelle, l'importance relative de la « fraction mobile » du dépôt sec décroît dans le temps. La plupart des radionucléides appartenant initialement à cette fraction sont transférés dans les eaux de ruissellement par la pluie ou bien renforcent la « fraction fixée ». L'importance relative de ces phénomènes est fonction du délai d'occurrence et de l'intensité des premières pluies, les interactions entre les radionucléides et les surfaces augmentant au cours du temps. En général, la première pluie suivant le dépôt peut remobiliser une grande partie de la fraction mobile du dépôt. A plus long terme, l'activité déposée tend à décroître dans le temps du fait de la décroissance radioactive ainsi que des processus naturels de ruissellement et de remise en suspension.

EN CAS DE DEPOT HUMIDE

En cas de dépôt humide, le niveau de contamination des surfaces bâties est fonction de la quantité de pluie reçue par celles-ci. La contamination apportée aux surfaces est plus importante que par dépôt sec [Cf. FICHE 3.2] mais une part de celle-ci (« fraction mobile ») est directement emportée par l'eau de pluie. Des séries de mesures effectuées à Gävle (Suède) après l'accident de Tchernobyl ont montré que, en cas de dépôt humide, 40% à 80 % du césium est retenu sur les surfaces pavées, 30% à 90 % sur les toits et 1% à 3% sur les murs. A l'intérieur des bâtiments fermés, aucune pénétration de radionucléides n'a été observée.



Dépôts secs relatifs pour 1 Bq déposé de 137Cs

En conditions froides, la neige peut engendrer des dépôts légèrement supérieurs aux dépôts humides. Par contre, contrairement aux dépôts humides, les dépôts accompagnés de neige ne sont pas suivis d'un lessivage immédiat des surfaces, celui-ci ne se produisant qu'au moment de la fonte de la neige.

	Contamination à l'intérieur des bâtiments fermés	Evolution du dépôt à l'extérieur
EN CAS DE DEPOT SEC	<p>Bâtiments fermés : Entrée des gaz et aérosols par les systèmes de ventilation.</p> <p>Bâtiments ouverts : Contamination à l'intérieur semblable à celle de l'extérieur du bâtiment.</p>	<p>Lessivage de la fraction mobile (%) par les premières pluies.</p> <p>Fixation progressive des radionucléides sur les surfaces.</p>
EN CAS DE DEPOT HUMIDE	<p>Bâtiments fermés : Négligeable.</p> <p>Bâtiments ouverts : Contamination à l'intérieur plus faible qu'à l'extérieur (mais fonction du bâtiment et des conditions météorologiques).</p>	<p>Dépôt composé principalement de la fraction fixée aux surfaces.</p>

Contamination des productions végétales et des sols agricoles

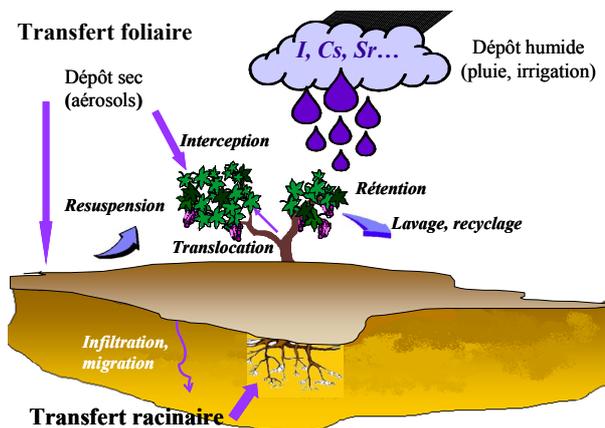
La contamination des productions végétales et des sols agricoles dépend en premier lieu de la couverture du sol au moment du passage du nuage radioactif. Celle-ci peut varier au cours de l'année, en fonction du type de production végétale et des pratiques agricoles. On distingue ainsi :

- les cultures à cycle court, comme de nombreuses cultures maraîchères (épinards, salades, carottes...) qui peuvent s'enchaîner au cours d'une année sur une parcelle ;
- les cultures annuelles, semées à l'automne ou au printemps, comme les grandes cultures de céréales ou d'oléoprotéagineux dont les périodes de culture alternent avec des périodes dites d'interculture, courtes (moins d'un mois) ou longues (jusqu'à 6 mois), durant lesquelles le sol peut être laissé nu, présenter des repousses de plantes cultivées ou adventices ou être cultivé (cultures pièges à nitrates ou cultures fourragères dérobée) ;
- les cultures pluriannuelles, telles que la luzerne (7 ans), les asperges (10 ans), ou les prairies temporaires (souvent de 3 à 6 années), qui couvrent le sol durant la durée de la culture ;
- les cultures pérennes, comme la vigne, les arbres fruitiers mais également les prairies permanentes.

CONTAMINATION DES VEGETAUX

Il existe deux voies principales de contamination des végétaux :

- Le **transfert foliaire** : dépôt direct sur les parties aériennes des plantes
- Le **transfert racinaire** : absorption racinaire des radioéléments accumulés dans le sol.



Source : IRSN

DEPOT DIRECT SUR LES PARTIES AERIENNES

Le transfert vers la plante des radionucléides présents dans l'atmosphère dépend de plusieurs facteurs :

- les **conditions climatiques** : à dépôt total constant, les contaminations foliaires des produits agricoles sont plus fortes pour les dépôts secs que pour les dépôts humides. En effet, lors d'un dépôt humide, la pluie crée un film d'eau à la surface des feuilles. Ce film d'eau ne peut pas dépasser une certaine épaisseur (en moyenne 2mm) sur les feuilles. Si la pluie est trop importante (en moyenne à partir de 5mm), les feuilles ne peuvent pas retenir la totalité de l'eau et s'égouttent. L'eau contaminée tombe alors sur la terre et augmente ainsi les dépôts au sol, alors que les dépôts sur les feuilles restent constants.
- la **capacité d'interception**, fonction de la nature de la végétation et de son stade végétatif au moment du dépôt. De même, la structure de certaines feuilles fait qu'elles retiennent bien les poussières ou l'eau (ex : feuilles de thym). En général, plus le stade végétatif de la culture est proche de la maturité commerciale, plus la capacité d'interception est élevée.
- le **radionucléide** : une fraction de la radioactivité déposée peut pénétrer à l'intérieur du végétal et se répartir dans les différents organes. Ce phénomène de contamination par transfert et stockage dans la plante est appelé « **translocation** » et varie selon les radionucléides (ex : le césium pénètre facilement, le strontium moins, le plutonium très peu). C'est ainsi qu'une petite partie des éléments radioactifs déposés sur les feuilles peut se retrouver dans les fruits et les racines.
- la **vitesse d'élimination naturelle** du dépôt sur les surfaces (lessivage par les pluies, chute des feuilles...) et la **dilution par croissance** des végétaux (dilution de la contamination dans la quantité de matière végétale)

ABSORPTION RACINAIRE

Cette contamination se manifeste au fur et à mesure que les radionucléides se répartissent dans la couche racinaire. L'importance de cette voie de contamination dépend :

- de l'**élément radioactif** : tous les radionucléides ne sont pas retenus dans les sols, ni absorbés de la même manière : l'iode et le chlore migrent très vite en profondeur, le césium reste majoritairement en surface ; le strontium et l'iode sont assez bien absorbés par les végétaux, le césium moins bien, le plutonium très peu.
- de la nature du sol : les sols acides, sableux ou à faible capacité d'échange sont favorables à des transferts plus élevés que les sols lourds ou argileux pour les principaux radionucléides (cations).
- du **travail du sol** (enfouissement mécanique, notamment par le labour) et l'**apport de fertilisants ou d'amendements analogues des radionucléides** (potassium et calcium sont des compétiteurs respectifs du césium et du strontium...).

Pour les cultures présentes au moment des dépôts, le transfert foliaire est la principale voie de contamination. Les végétaux à feuilles comme les salades ou les épinards sont les plus sensibles à la contamination par dépôt direct sur les parties aériennes. A long terme, le transfert racinaire prédomine nettement et se poursuit tant que le radionucléide est présent dans la zone racinaire.

CONTAMINATION DES SOLS AGRICOLES

AU MOMENT DU PASSAGE DU PANACHE ET A COURT TERME

En cas de dépôt sec, une partie non négligeable de la contamination peut être interceptée par la végétation couvrant le sol, si celle-ci est suffisamment dense et développée. Les premières pluies ou l'irrigation par aspersion amèneront, par la suite, la majorité de cette contamination au sol. A court terme, la radioactivité déposée sur le sol reste très superficielle.

En cas de dépôt humide, la majorité de la contamination atteint rapidement le sol et s'infiltré sur quelques centimètres.

A MOYEN ET LONG TERMES

A moyen et long termes, le ruissellement contribue au **transfert oblique** de la contamination et à l'accumulation de radioéléments dans les points bas des terrains en pente [Cf. FICHE 3.2].

Dans les sols, le **transfert vertical** des radionucléides dépend de leur mobilité, spécifique à chaque type de sol. Ce phénomène est accéléré par le **travail du sol** qui contribue à répartir la contamination dans la couche de labour, par la **pluie** et, parfois, par les **mouvements de la nappe phréatique**. Ces mouvements dépendent également beaucoup de la nature des radioéléments.

Mobilité verticale des radioéléments en fonction de la nature des sols

Sols alcalins (argilo-calcaires)	Faible
Sols riches en matière organique	Variable (généralement faible)
Sols acides, à faible CEC (sols sableux)	Forte

Mobilité verticale de quelques radioéléments dans les sols

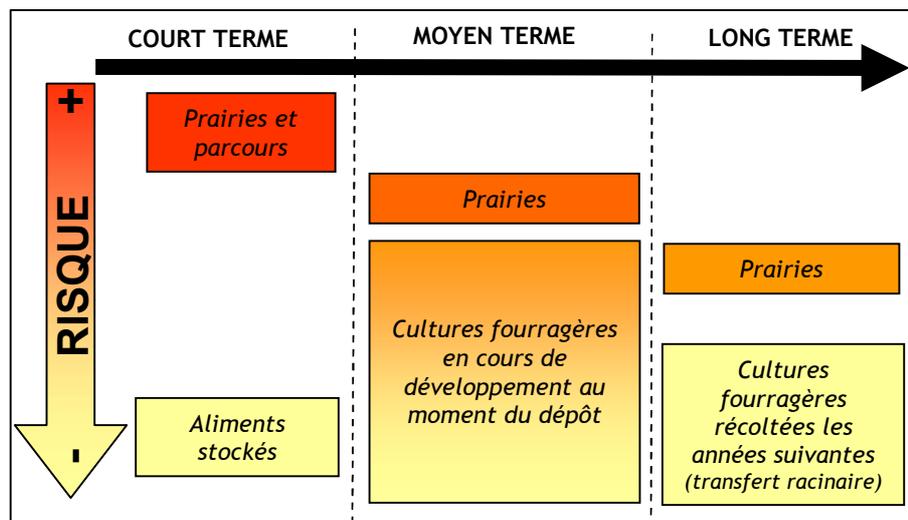
Strontium 90 (⁹⁰ Sr)	A court terme, le strontium est peu retenu par le complexe absorbant du sol. Progressivement, il s'y intègre et sa mobilité diminue. A la fin de la première année, il reste présent dans les premiers centimètres du sol.
Césium 137 et 134 (¹³⁷ Cs et ¹³⁴ Cs)	Le césium est rapidement et fortement retenu par l'argile et la matière organique. Dans les sols non agricoles, il reste très longtemps dans les premiers centimètres du sol. Dans les sols agricoles labourés, il se maintient dans la couche de labour.
Ruthénium 106 (¹⁰⁶ Ru) Terres rares (la plupart) Transuraniens	Le ruthénium, les terres rares et les transuraniens ne sont pas mobiles.
Certains iodes	Certains composés de l'iode suivent les mouvements de l'eau. Cependant, la majorité des isotopes de l'iode disparaissent par décroissance radioactive avant d'atteindre la nappe phréatique.
Tritium (³ H)	Le tritium est étroitement associé à l'eau dont il suit le comportement.

Contamination des productions animales

PRINCIPALE VOIE DE CONTAMINATION : L'INGESTION DE DENREES CONTAMINEES

Les produits d'origine animale sont principalement contaminés à la suite de l'ingestion d'aliments (et de lait pour les mammifères) et d'eau contaminés. L'inhalation et le transfert à travers la peau sont négligeables devant l'ingestion.

- **A court terme**, les contaminations les plus élevées concernent les animaux présents à l'extérieur au moment du passage du panache et dans les jours suivants. Leur alimentation est alors difficilement maîtrisable et elle est composée d'aliments directement contaminés par le dépôt (herbe, graines, eau...). A l'intérieur des bâtiments d'élevage, les animaux sont essentiellement nourris à partir d'aliments stockés et en partie protégés par la structure de stockage. Leur alimentation y est, en outre, plus facilement maîtrisable.
- **A moyen terme**, le risque majeur de contamination provient des pâturages et des cultures fourragères en cours de développement au moment des dépôts, contaminées par dépôt direct et transfert foliaire [Cf. FICHE 3.4].
- **A plus long terme**, les prairies non améliorées (vis-à-vis de la contamination radiologique) constituent la source de contamination la plus importante. Le travail du sol conjugué à un transfert racinaire réduisent fortement la contamination des cultures fourragères.

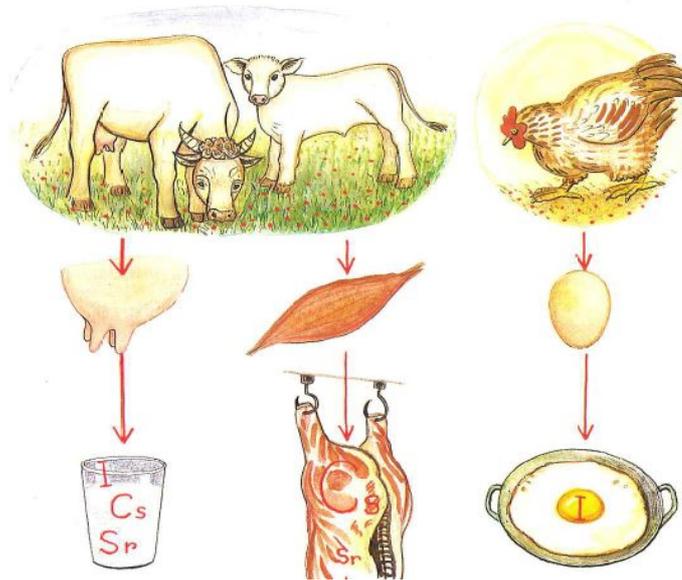


REPARTITION HETEROGENE DES RADIONUCLEIDES

En fonction de leur nature et des organismes qu'ils contaminent, les radionucléides ne sont pas métabolisés de la même manière et se différencient par :

- leur **répartition dans l'organisme** (ex : le césium se retrouve principalement dans la viande, le strontium dans les os et l'iode dans le lait et les œufs) ;
- leur **cinétique de transfert** (ex : l'iode se retrouve très rapidement dans le lait, tandis que le césium atteint sa contamination maximale un mois après la fin des dépôts) ;
- leur **cinétique d'élimination** (période biologique) : les radioéléments sont éliminés par les déjections (urines, fèces) et les produits animaux (lait, œufs) à des vitesses variables suivant leur nature et l'animal. La gestion des déjections animales, stockées temporairement sur les exploitations agricoles puis ramenées aux champs par épandage, constitue donc une source possible de contamination de ces surfaces. Néanmoins, l'ajout de

contamination ne sera pas significatif si l'alimentation des animaux provient de parcelles dont les niveaux de contamination sont proches de la parcelle servant à l'épandage des déjections (fonctionnement en circuit fermé).



Source : La Dépêche Vétérinaire - Supplément technique n°25

CONSEQUENCES POUR LES ANIMAUX

Des effets, mortels ou non, ne s'observent sur les animaux que pour des expositions très élevées. Chez l'animal, les doses létales 50% varient avec l'espèce. De telles expositions ne pourraient résulter que d'un accident majeur et dans la zone proche du site accidenté, c'est-à-dire dans des circonstances où les problèmes posés à la population seraient très largement dominants.