

Les mécanismes de transfert de la contamination au sol

S1

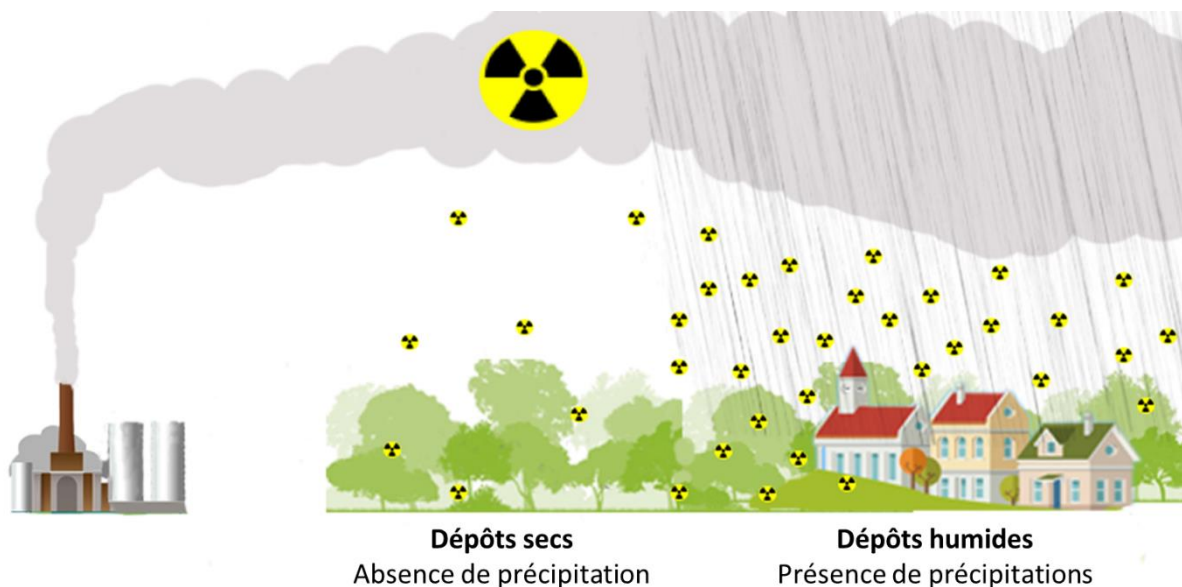
En cas d'accident nucléaire conduisant à des rejets de radionucléides dans l'atmosphère, la contamination radioactive va se déplacer avec les masses d'air au gré des vents.

Une partie de cette contamination mobile va peu à peu retomber au sol sous l'effet de plusieurs phénomènes qui seront évoqués dans cette fiche.

La mesure de ces dépôts au sol revêt un grand intérêt car cela va permettre d'anticiper la contamination de la chaîne alimentaire et de prendre des mesures de protection le plus en amont possible.

Les voies de dépôt

Les transferts de radionucléides de l'air vers le sol peuvent se faire par deux biais : soit par **dépôt sec**, soit par **dépôt humide**.



Le dépôt sec

Le dépôt sec intervient en l'absence de tous types de précipitations. Les principaux processus qui mènent à ce type de dépôt sont la sédimentation (sous l'effet de la gravité), les impacts par inertie ou interception et la diffusion. Les 3 premiers mécanismes ne concernent que les particules alors que la diffusion concerne aussi bien les gaz que les particules.

Le dépôt sec dépend principalement de la quantité de radionucléides présents dans l'air au niveau du sol. Mais plusieurs paramètres peuvent également influencer ce type de dépôt : la nature du radionucléide (ses propriétés physiques, sa charge électrostatique, etc.), le diamètre des aérosols, les propriétés de la surface (présence ou absence de rugosité, taux d'humidité, etc.) ou les conditions météorologiques (instabilité et vitesse de déplacement de la masse d'air contaminé par exemple).

La nature du radionucléide, particulaire ou gazeuse et sa taille vont déterminer par quels mécanismes vont avoir lieu les dépôts. Les particules grossières, dont la taille est supérieure à 10 microns, vont principalement se déposer sous l'effet de la gravité. Les particules plus petites vont, quant à elles, être très sensibles aux phénomènes d'impact.

Le dépôt d'un radionucléide gazeux va être plus complexe. On considèrera que le gaz est effectivement déposé lorsqu'il est adsorbé (fixation superficielle) ou absorbé (pénétration) par la surface.

Les caractéristiques de la surface ont également une grande influence sur les quantités déposées. Un sol recouvert de végétation va intercepter plus de particules et de gaz, du fait d'une plus grande surface de contact avec l'atmosphère et du fait d'une rugosité plus importante. Un sol nu présentera une surface d'échange plus faible.

Le dépôt humide

Les dépôts humides se produisent en présence de précipitations (pluie, neige, grêle). On distingue généralement de ces dépôts les dépôts occultes qui sont associés aux brouillards ou aux nuages de basse altitude.

La contamination des précipitations peut se produire soit dans le nuage lors du processus de formation des gouttes d'eau qui vont capter les radionucléides présents dans l'air, soit lorsque les précipitations vont traverser un volume d'air contaminé et vont s'enrichir en produits radioactifs. Ces phénomènes de « lessivage » entraînent au sol les produits radioactifs en quantités nettement supérieures aux dépôts secs.

La nature des radionucléides et leurs formes physico-chimiques vont influencer les quantités de radionucléides rabattus au sol. Plus un radionucléide gazeux est soluble, mieux il sera lessivé. Pour les particules, elles sont en général incorporées dans les gouttes de pluie lors de collision entre les particules et les gouttes. L'efficacité de collection pour une goutte de pluie est minimale pour les particules fines (diamètre compris entre 0,1 et 2,5 microns) comparée à celles des particules ultra fines (diamètres inférieurs à 0,1 micron) et des particules grossières (diamètres supérieurs à 2,5 microns).

La concentration en radionucléides de la masse d'air contaminé, l'intensité des précipitations, leur nature (neige, pluie, grêle, brouillard) vont également influencer les quantités déposées.

Pour une contamination de l'air équivalente, les gouttelettes d'eau d'un brouillard sont en moyenne 10 à 20 fois plus concentrées en radionucléides que les gouttes de pluie. Toutefois, la quantité d'eau déposée lors d'un épisode de brouillard est très faible par rapport à celle déposée lors d'un épisode pluvieux. La contribution des brouillards aux retombées radioactives reste donc faible en comparaison des épisodes pluvieux. Cependant, en l'absence d'épisode pluvieux, la présence de brouillard va augmenter les quantités déposées.

Vitesse de dépôt

La vitesse de dépôt est un indicateur important de la capacité d'un aérosol atmosphérique à se déposer sur une surface. En pratique, les vitesses de dépôts en mètre par seconde (m/s) sont calculées à partir de la concentration dans l'air des radionucléides, exprimée en becquerel par mètre cube (Bq/m^3) et de l'activité déposée sur une surface donnée et en un temps donné qui s'exprime en becquerel par mètre carré par seconde ($Bq/m^2/s$).

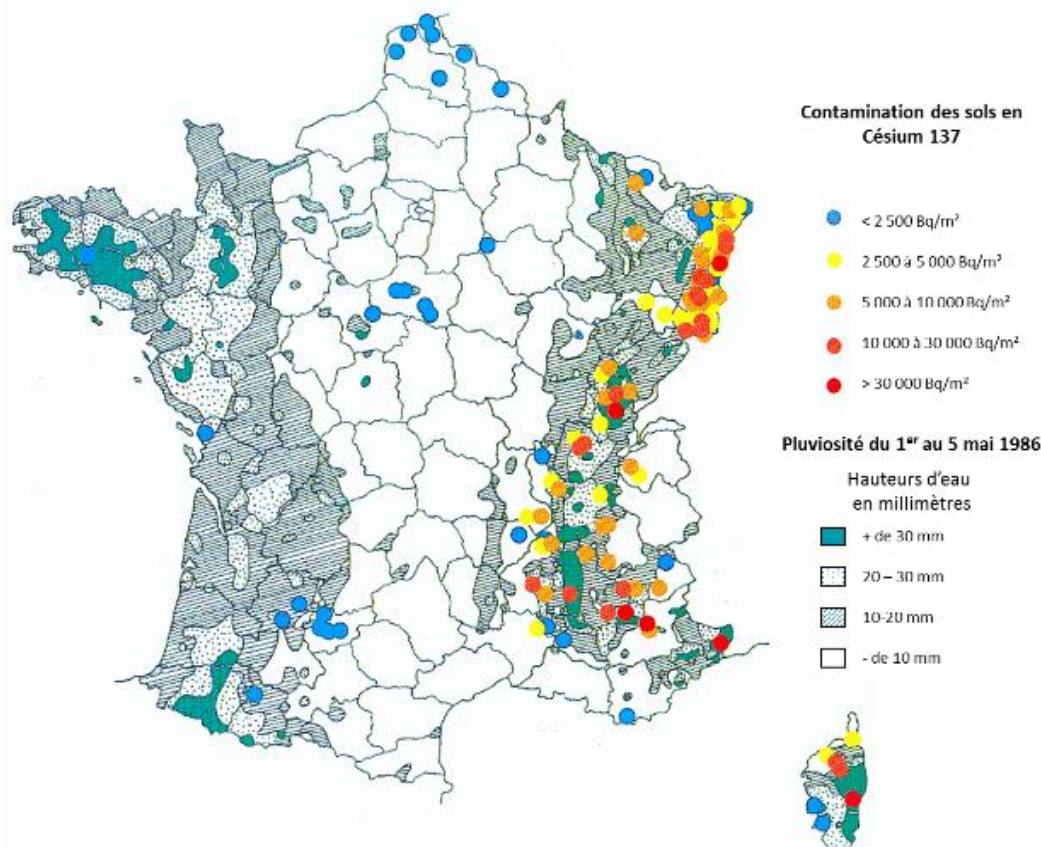
Suite à l'accident de Fukushima au Japon en 2011, des scientifiques japonais ont quantifié les vitesses de dépôts des principaux radionucléides rejetés (iode 131, césium 137 et césium 134) dans les quelques jours qui ont suivi les rejets.

Les vitesses de dépôts du 14 au 17 mars, où aucun épisode de précipitations n'a eu lieu étaient comprises entre 0,002 et 0,003 m/s pour les césiums 137 et 134. Plus tard, entre le 21 et le 24 mars, la région a connu des pluies (pluviométrie de 38 mm). Les vitesses de dépôts ont alors été nettement plus grandes : entre 0,01 et 0,14 m/s pour les césiums 134 et 137. Ces observations confirment l'influence des précipitations dans les quantités de radionucléides déposées.

Du fait des nombreux paramètres impliqués dans les processus de dépôt, la contamination du sol résultante va présenter une forte hétérogénéité, quelle que soit l'échelle considérée.

Une grande hétérogénéité des dépôts

Les premiers travaux de la CRIIRAD sur les retombées de Tchernobyl en France¹ ont permis de montrer une grande hétérogénéité de la contamination (voir carte ci-dessous).



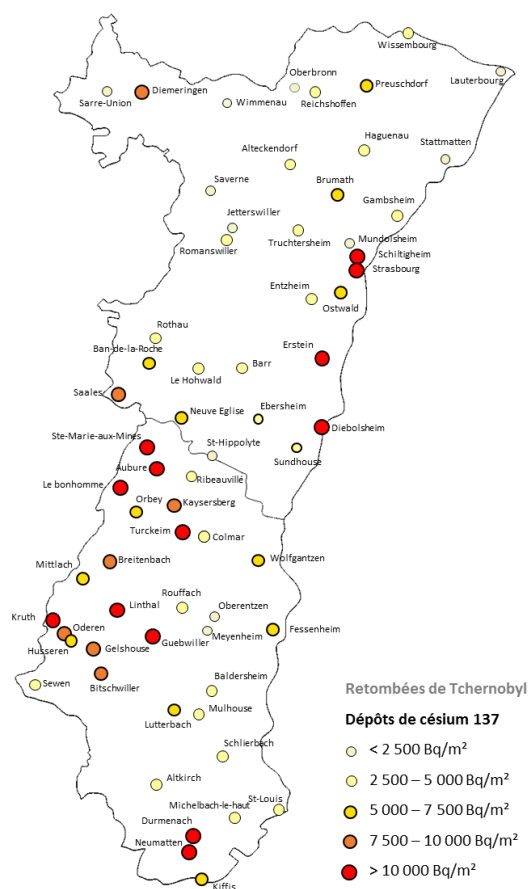
A l'échelle du territoire français, 3 zones se distinguent :

- L'ouest qui a subi des pluies importantes du 1^{er} au 5 mai 1986 mais où les dépôts ont été faibles du fait de la quasi absence de pluies durant le temps bref où les masses d'air contaminé ont séjourné.
- Le centre, où il n'y a pas eu de pluies du 1^{er} au 5 mai, lorsque les masses d'air ont survolé le territoire.
- L'est qui a cumulé plusieurs facteurs pénalisants avec l'arrivée des masses d'air contaminé dès le 29 avril 1986, un reflux venant du sud-est le 5 mai et de nombreux épisodes pluvieux.

On estime ainsi à moins de 2 500 Bq/m² la contamination en césium 137 des zones n'ayant pas reçu de précipitations durant le passage des masses d'air à plus de 30 000 Bq/m² pour les zones ayant connu de fortes pluies (pluviométrie supérieure à 30 mm sur la période du 1^{er} au 5 mai).

¹ La CRIIRAD a réalisé un travail pilote sur les retombées de Tchernobyl en France dans une période où les données officielles étaient manquantes, voire fausses. Les connaissances sur le sujet ont fortement évolué depuis. Il est par exemple établi que les masses d'air contaminé ont atteint la moitié Est de la France dès les 29-30 avril 1986.

A l'échelle régionale, les études ont également révélé de grandes disparités dans les retombées. C'est le cas par exemple en Alsace où, grâce au soutien financier de la Région, la CRIIRAD a réalisé des carottages de sol sur 66 communes alsaciennes entre janvier 1990 et mars 1991. Les prélèvements de sols ont été réalisés 4 ans après les retombées, il a donc fallu s'affranchir des phénomènes de déperdition et d'accumulation de la contamination qui interviennent immédiatement après le dépôt (voir fiche S5). Pour cela, le laboratoire a appliqué un protocole très strict pour le choix des sites en respectant plusieurs caractéristiques : terrain nu, plat, dégagé, non cultivé et non remanié. Les résultats ont révélé d'énormes différences d'activités dans les sols : l'activité maximale de césium 137 provenant de Tchernobyl était de l'ordre de 30 000 Bq/m² à Diebolsheim dans le Bas-Rhin alors que 6 et 12 km plus loin, à Sundhouse et Ebersheim, les activités mesurées étaient 10 fois moins importantes. De même à Strasbourg où l'activité en césium 137 était de l'ordre de 17 000 Bq/m² quand, 6 km plus loin, à Mundolsheim, elle était 8 fois moins importante. De telles différences sont en partie expliquées par la pluviométrie locale. Les précipitations durant cette période étaient constituées de cellules orageuses très localisées : la pluviométrie de Diebolsheim sur la période du 1^{er} au 5 mai était ainsi de 20,1 mm alors qu'elle n'était que de 9,8 mm et 9,6 mm aux stations météorologiques de Sundhouse et Ebersheim.



A l'échelle plus locale d'un terrain, on retrouve encore d'autres hétérogénéités. Les phénomènes responsables de ces hétérogénéités sont présentés plus en détail dans les fiches S3 et S5.

Comment évaluer les dépôts au sol ?

En cas d'accident nucléaire, comme ceux de Tchernobyl ou Fukushima, il n'existe pas de manière simple d'évaluer, à partir des teneurs en radionucléides dans l'atmosphère, quelles seront les retombées radioactives qui vont impacter le sol de mon jardin, tant les paramètres en jeu sont complexes. Les conditions les plus pénalisantes sont la combinaison d'un déplacement lent des masses d'air contaminé et d'épisodes de précipitations intenses.

Afin d'évaluer les retombées au sol d'un accident nucléaire et ainsi les doses reçues par les populations, les scientifiques vont utiliser des modèles numériques qui tiennent compte plus ou moins précisément des paramètres influençant les retombées. Ces simulations permettent de connaître l'ordre de grandeur des retombées attendues mais elles ne constituent pas une représentation exacte des dépôts.

Une évaluation plus précise des quantités de radionucléides déposées au sol peut être faite à partir de mesures dans l'eau de pluie. Il est alors possible, à partir de la concentration volumique mesurée et de la pluviométrie donnée par les stations météorologiques, de calculer les retombées au sol.

Pour les retombées sous forme de dépôts secs, il existe des systèmes de collecteurs passifs.

Ces dispositifs de collecte d'aérosol et d'eau de pluie sont indispensables mais le maillage du territoire est en général très lâche.

La réalisation de prélèvements d'herbe ou de sol peut venir parfaire l'estimation si tant est que les phénomènes d'évolution de la contamination qui vont immédiatement intervenir soient pris en compte (voir la fiche S5).