

Comment vont évoluer les niveaux de contamination ?

S5

La compréhension des mécanismes d'évolution de la contamination des sols est précieuse pour anticiper les risques auxquels vont être confrontées les populations.

Il est en effet important de connaître les phénomènes qui conduisent à une redistribution de la contamination afin de comprendre quelles configurations de terrain vont être soumises à des accumulations et ainsi éviter ces zones pour se prémunir d'une surexposition.

De plus, en situation accidentelle, les mesures de la radioactivité des terrains sont souvent réalisées tardivement lorsque les risques pour les opérateurs sont plus réduits. Il faut donc tenir compte des phénomènes de redistribution de la contamination pour reconstituer correctement les dépôts initiaux. La compréhension de ces phénomènes peut ainsi permettre de déceler d'éventuelles erreurs, voire des manipulations, dans les communications : l'analyse de la radioactivité d'un sol issu d'une zone de déperdition donnera des résultats plus faibles et conduira à une minoration des dépôts, alors que celle d'un sol issu d'une zone d'accumulation conduira à leur surestimation.

*Lors d'un accident nucléaire, une fois les radionucléides déposés à la surface des sols, plusieurs phénomènes vont conduire à une évolution des niveaux de contamination. Dans les quelques jours et semaines qui suivent les dépôts, la **décroissance radioactive** des radionucléides est le facteur prédominant dans l'évolution globale des niveaux de contamination. Mais le sol n'étant pas une boîte étanche de laquelle aucun radionucléide ne s'échapperait, l'évolution de la contamination est également affectée par des **phénomènes physico-chimiques** complexes qui vont redistribuer spatialement la contamination, créant ainsi des **zones de déperdition** et des **zones d'accumulation**.*

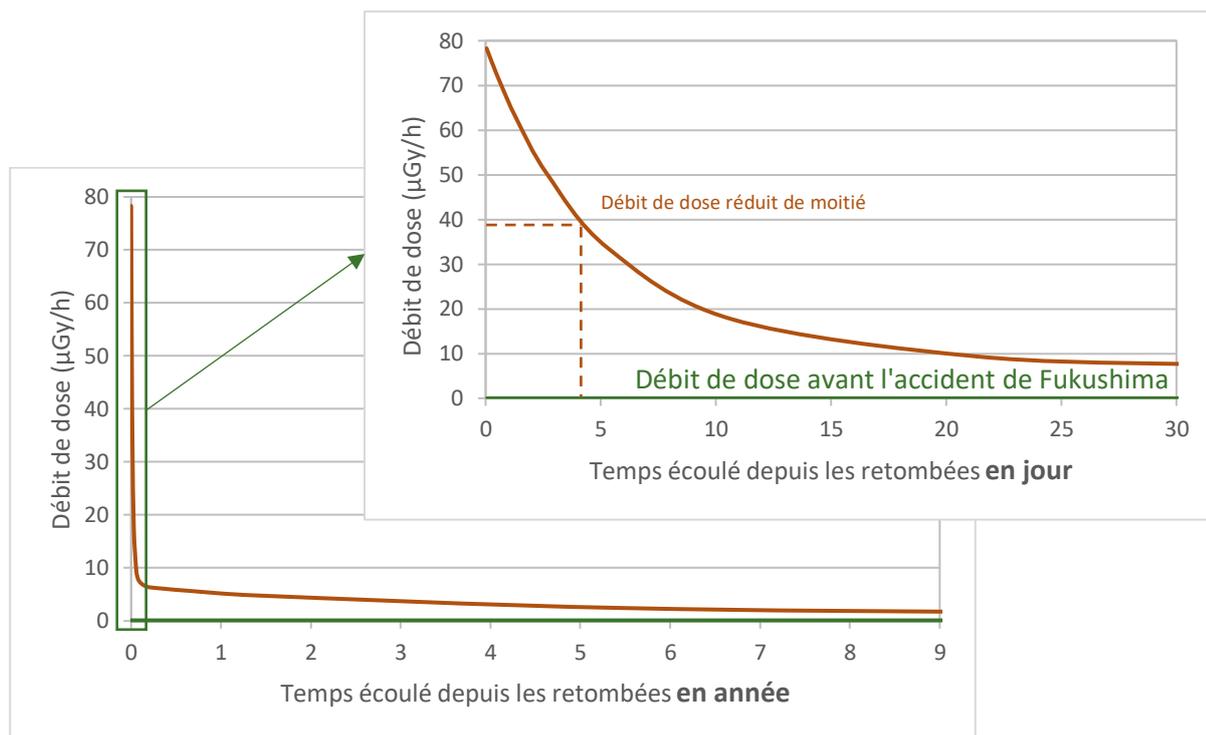
La décroissance radioactive des radionucléides

Comme cela a été évoqué dans les fiches G1 et A1, tout radionucléide se caractérise par sa période radioactive, c'est-à-dire le temps au bout duquel son activité est divisée par 2. Lors d'un accident nucléaire conduisant à des rejets dans l'environnement, le débit de dose gamma mesuré résulte de la contribution de tous les radionucléides émetteurs gamma présents. Or, une partie de ces radionucléides possède des périodes radioactives courtes, de l'ordre de quelques heures ou jours.

A l'issue, entre 25 et 45 km au nord-ouest de la centrale de Fukushima Daiichi, des universitaires japonais ont reconstitué l'évolution des débits de dose au cours du temps, à l'issue des retombées radioactives. Ils se sont appuyés pour cela sur des mesures de sol et des calculs basés sur les périodes radioactives des radionucléides détectés (T. IMANAKA, et al., 2011¹).

L'évolution du débit de dose au cours du temps est représentée sur les graphiques suivants. Si l'on considère les 30 premiers jours, on observe une décroissance très rapide du débit de dose qui est réduit de moitié dans les 4 jours qui suivent les retombées du fait de la décroissance rapide des radionucléides à période courtes. C'est le cas par exemple du tellure 132 de 78 heures de période ou de l'iode 131 dont la période est de 8 jours.

¹ <http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NSRG/seminar/No110/litate-interim-report110404.pdf>



Le débit de dose décroît ensuite très lentement, du fait de la présence persistante de radionucléides à période plus longue : le césium 134 avec une période de 2 ans et le césium 137 dont la période est de 30 ans. Dans cet exemple, l'exposition est particulièrement élevée durant les premiers jours après les retombées, mais elle reste préoccupante, même après plusieurs années.

L'action de l'eau, de la végétation, du vent et de l'Homme va cependant complexifier l'évolution de la contamination.

Les phénomènes physico-chimiques

L'action de l'eau

L'eau est un vecteur très important. Par ruissellement sur les surfaces, elle conduit à des transferts horizontaux de la contamination et, par infiltration dans les sols, à un transfert vertical.

Les transferts horizontaux :

La pluie en ruisselant entraîne les particules radioactives déposées sur les surfaces (végétation, bâtiments, sol, etc.) et les concentre dans les points bas tels que les cuvettes, les fossés, etc. La fiche S3 présente ces points d'accumulation.

Les dépôts neigeux contaminés agissent de la même façon en relarguant les radionucléides progressivement et de manière différée lors de la fonte des neiges.

Les transferts verticaux :

En général, une pluie intense aura pour effet d'entraîner les radionucléides plus en profondeur dans le sol. Mais de nombreux paramètres influencent le transfert vertical : la forme physico-chimique des radionucléides déposés, la composition minéralogique du sol, son humidité, le pH, le taux de matière organique, la teneur et le type d'argile constituant le sol, la capacité d'échange cationique, etc. En général, plus l'eau du sol est acide (pH faible) et la teneur en argile faible, plus la mobilité des radionucléides est grande et leur migration vers les strates inférieures importante. La matière organique présente dans le sol affecte également la mobilité des radionucléides en fonction de leur capacité à former ou non des complexes organiques.

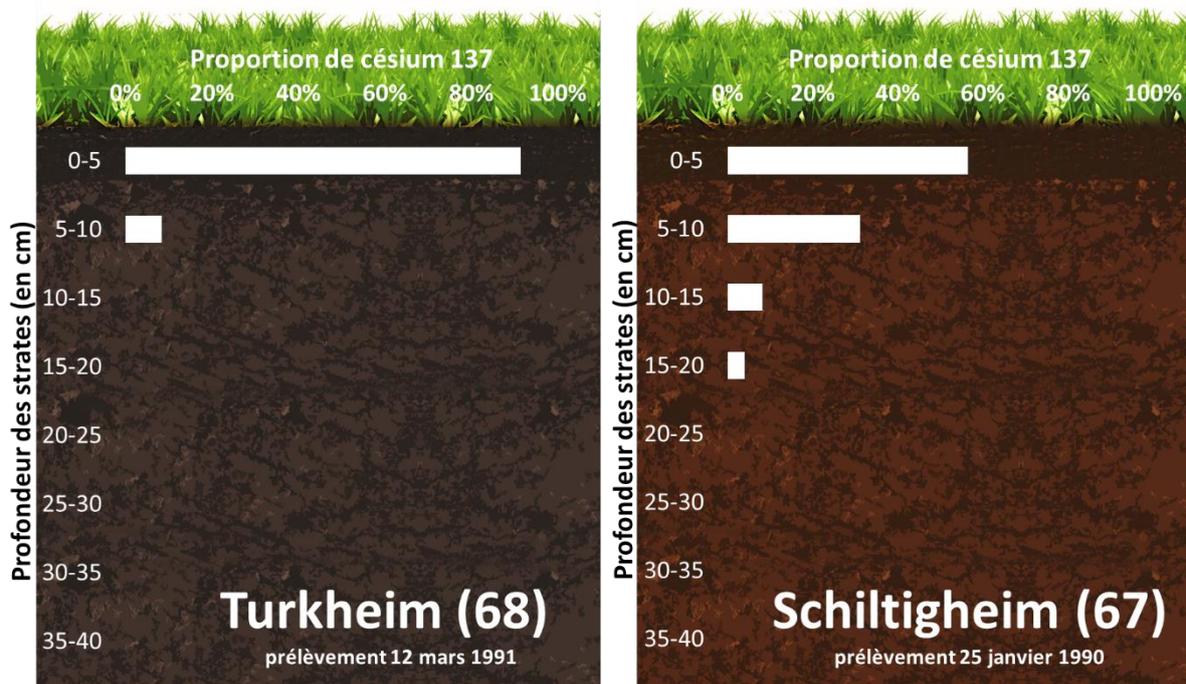
La composition physico-chimique du sol a donc une grande influence sur le transfert vertical.

Dans le cadre d'études sur l'évaluation des retombées de Tchernobyl en France, la CRIIRAD a réalisé un grand nombre de carottages de sol sur tout le territoire. La technique du carottage consiste à prélever à l'aide d'un tube métallique des échantillons de sol par strate de même épaisseur. Le tube fait en quelque sorte office d'emporte-pièce. Il est tout

d'abord enfoncé sur 5 centimètres puis retiré. L'échantillon extrait correspond ainsi à la strate de 0 à 5 cm. L'opération se poursuit de la même manière en enfonçant le tube métallique par pas de 5 ou 10 cm jusqu'à atteindre une profondeur de 40 ou 50 cm. Cela permet d'avoir une représentation de la distribution verticale de la radioactivité.

Les profils de contamination des sols par le césium 137 ainsi obtenus sont très variables. Les graphiques ci-dessous concernent deux sols alsaciens prélevés quelques années après les retombées de Tchernobyl.

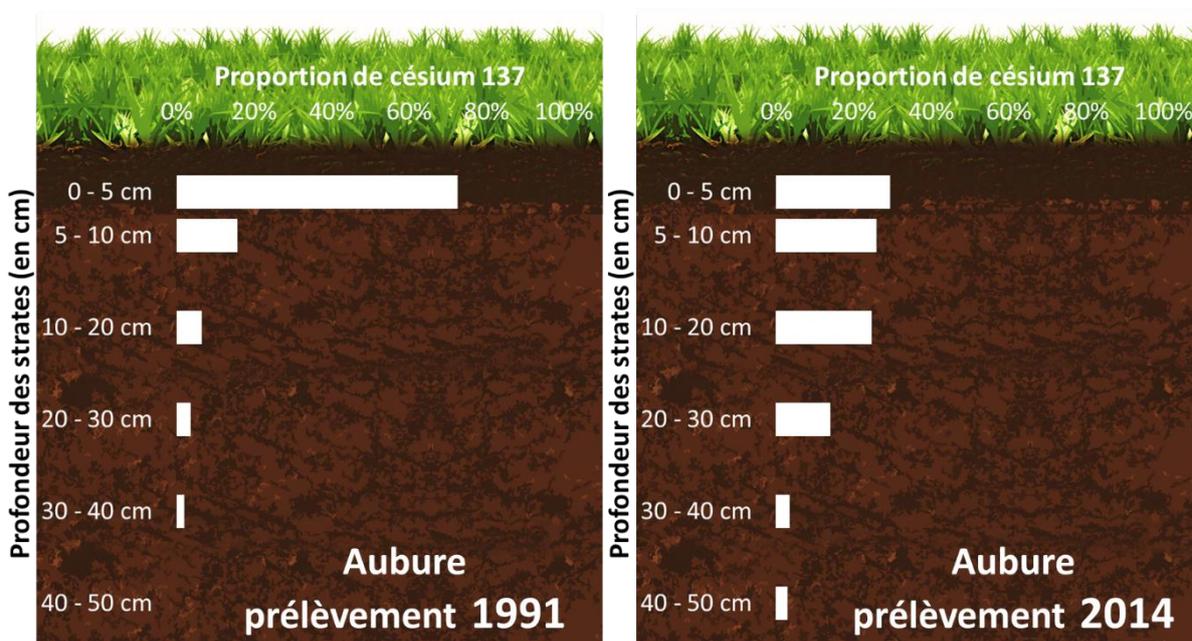
Pour le sol de Turkheim, même 5 ans après les retombées, la totalité du césium 137 de Tchernobyl se retrouve dans les 10 premiers centimètres de sol (92% sont contenus dans les 5 premiers centimètres, 8% de 5 à 10 cm). Dans le sol de Schiltigheim, pourtant prélevé un an auparavant, on retrouve du césium 137 de Tchernobyl jusqu'à 20 cm de profondeur (57 % seulement sont contenus dans les 5 premiers centimètres et 31% de 5 à 10 cm). La majorité du césium (environ 90%) est cependant toujours contenue dans les 10 premiers centimètres de sol.



Ce phénomène de migration verticale revêt une grande importance lorsque l'on cherche à reconstituer les dépôts initiaux à partir de prélèvements de sol. En effet, prélever uniquement les 5 premiers centimètres conduirait à une sous-estimation de la quantité totale déposée.

Afin de connaître l'évolution à plus long terme de la contamination des sols en césium 137, la CRIIRAD a complété ses premières études par de nouveaux carottages en 2014 et 2015. Par exemple, pour le site d'Aubure en Alsace on remarque que, dans les premières années suivant les retombées, plus de 90% de la contamination en césium 137 total (retombées de Tchernobyl et des essais nucléaires atmosphériques) était contenue dans les 10 premiers centimètres de sol. 25 ans après, les 10 premiers centimètres n'en contiennent plus que 60 %.

En comparant l'activité mesurée en 2014 à celle mesurée en 1991, on observe une déperdition notable de césium 137 qui ne s'explique pas par sa seule décroissance radioactive. Le transfert à la végétation, surtout si celle-ci est retirée lors de récolte, tonte ou fauchage, la migration horizontale due à l'action de l'eau, l'érosion et la migration verticale au-delà de 50 cm sont les principaux processus responsables de cette déperdition.



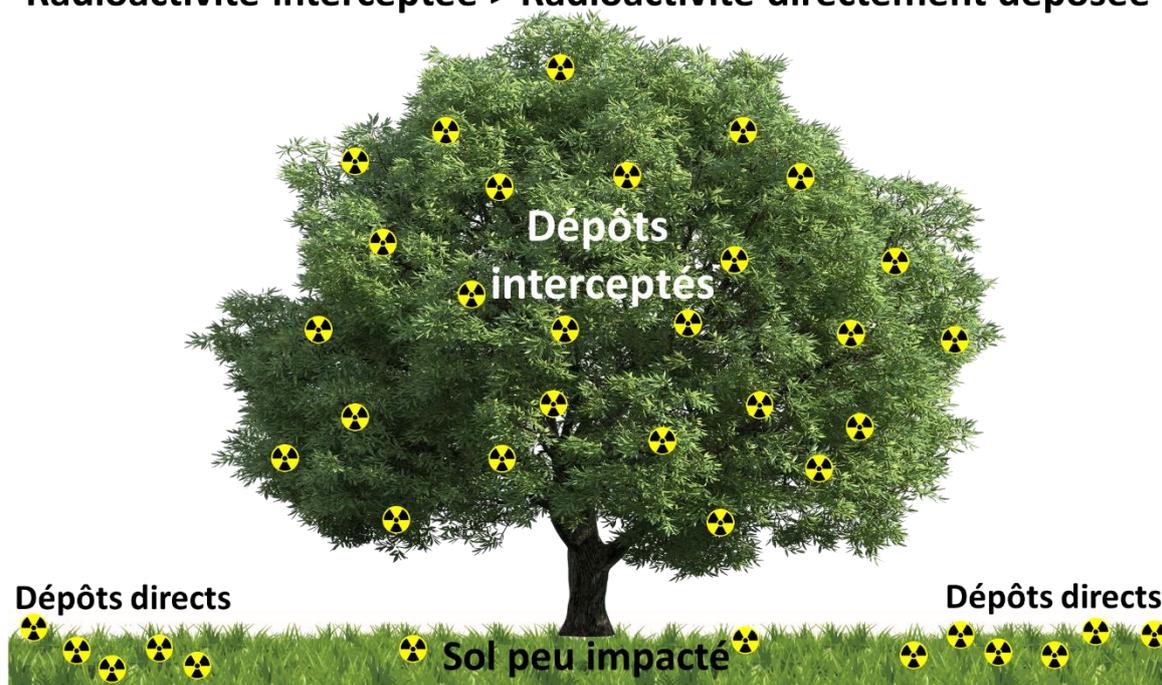
L'action de la végétation

Interception de la contamination

En fonction de la nature du couvert végétal (prairie, forêt), de la présence ou non du feuillage au moment des retombées, de la forme des branches ou des feuilles, la végétation intercepte plus ou moins la contamination. Du fait d'une plus grande surface foliaire, un arbre couvert de feuilles intercepte ou adsorbe plus de radionucléides qu'un parterre enherbé.

Ainsi, dans le cas d'un rejet accidentel se produisant au printemps alors que le feuillage des arbres est déjà développé, les sols situés sous le feuillage d'un arbre ou sous couvert forestier sont, dans un premier temps, en grande partie protégés des retombées alors qu'un sol recevra directement la totalité des dépôts.

Radioactivité interceptée > Radioactivité directement déposée



Lors d'épisodes pluvieux, les gouttes de pluie vont ruisseler à la surface des feuilles et se charger en radionucléides qui n'ont pas été métabolisés. Au moment de la chute des feuilles, toute la contamination qu'elles ont incorporée se retrouve déposée au sol. Les retombées au sol peuvent alors être bien plus importantes que si le sol avait été nu.

Lors d'épisodes pluvieux, les gouttes de pluie vont ruisseler à la surface des feuilles, se charger en radionucléides qui n'ont pas été métabolisés et contaminer le sol sous-jacent. Puis, lors de la chute des feuilles, toute la contamination qu'elles concentrent se dépose au sol.

Prélèvements de la contamination par la végétation

Une partie de la contamination du sol est transférée à la végétation via le système racinaire. Les propriétés physico-chimiques des sols et des radionucléides ainsi que le type de végétation sont autant de paramètres qui vont influencer ces transferts. La fiche AL1 détaille les mécanismes en jeu et présente des exemples de facteur de transfert de la contamination des sols aux plantes.

Lorsque la contamination, qu'elle ait lieu par dépôt direct ou par transfert racinaire, touche des végétaux cultivés pour l'alimentation ou pâturés par du bétail, l'ensemble de la chaîne alimentaire est affectée.

Sur les parcelles cultivées, une partie de la contamination est retirée lors des récoltes. L'importance du prélèvement dépend des végétaux cultivés et de la partie récoltée. Il peut en effet s'agir de la plante entière dans le cas de légumes feuilles (salades, épinards, blettes par exemple) ou de certaines parties seulement (fruits, graines, racines).

Dans le cas de parcelles pâturées, la végétation est ingérée par le bétail : une partie de la contamination est alors métabolisée par l'animal, mais une autre part est restituée par ses déjections.

Lorsque les terrains ne sont pas exploités, la matière végétale contaminée se dégrade sur place et les radionucléides sont alors transférés au sol.

L'action du vent

Le vent a pour effet de remettre en suspension les particules radioactives déposés sur les différentes surfaces (végétation, bâti, sol, etc.) et de redistribuer ainsi la contamination. Selon sa puissance et la taille des particules radioactives, ces dernières peuvent être déplacées sur de très grandes distances : plus le diamètre des particules est faible, plus elles sont susceptibles d'être mises en suspension dans l'air et plus longtemps elles y resteront. Ces phénomènes de dispersion de particules contaminées liés à l'érosion éolienne peuvent se poursuivre dans le temps dès lors que les radionucléides ont des périodes radioactives longues.

Le vent contribue également à amplifier la dispersion des particules radioactives lors de travaux, labours, moissons ou chantiers où des particules contaminées sont remises en suspension par le passage des engins. Sur des terrains où les dépôts sont élevés et surtout là où des radionucléides très radiotoxiques ont été déposés (comme le plutonium par exemple), ces phénomènes nécessitent des mesures de protection car les particules remises en suspension peuvent être inhalées par les conducteurs d'engins et les riverains.

Les incendies de végétation contaminée comme cela a été le cas au printemps 2020 dans la zone d'exclusion de Tchernobyl remettent également en suspension des particules radioactives. En effet le bois, le couvert végétal, et la litière en forêt, sont des réservoirs de contamination. La combustion de ces matériaux contaminés propulse alors dans l'atmosphère une partie des substances radioactives accumulées. Les personnes soumises à ces fumées sont exposées immédiatement à une irradiation externe par le panache et à une exposition interne par inhalation d'air contaminé. Elles sont ensuite soumises à une exposition différée, à l'issue des retombées (par exemple contamination par ingestion de denrées contaminées par les nouveaux dépôts au sol). Le niveau de risque dépend évidemment des niveaux de contamination.

L'action de l'homme

Le labour

Les sols soumis au labour présentent des profils de contamination complètement remaniés : en surface le profil présente peu de contamination puisque les strates plus profondes non affectées par les dépôts ont été ramenées en surface. Les strates de surfaces plus contaminées se retrouvent quant à elles à la profondeur atteinte par le labour. Cette intervention a pour effet de limiter l'exposition externe puisque les radionucléides se retrouvent sous environ 20 cm de terre. Par ailleurs, les radionucléides enfouis seront généralement moins disponibles pour le transfert

racinaire. Au fil du temps et de la succession des labours, la contamination va progressivement s'homogénéiser sur toute la profondeur du labour.

Le fauchage et la tonte

Le fauchage ou la tonte de la végétation contaminée et son retrait vont permettre d'ôter une partie de la contamination qui a été déposée et incorporée par les plantes. Les apports de contaminant au sol vont ainsi être réduits. Cependant la gestion de la végétation retirée pose une véritable question. Suite à l'accident de Fukushima au Japon, l'Etat japonais a dû créer plus de 1 000 sites de stockage temporaires de déchets (sols, végétaux). Fin mars 2019, les déchets de certains sites ont été évacués soit vers des centres de traitements, soit vers le site d'entreposage intermédiaire créé par le gouvernement japonais autour de la centrale de Fukushima Daiichi, sur les communes de Futaba et Okuma. Ce site de 16 km² prévoit d'accueillir pour une durée de 30 ans (de 2015 à 2045), 30 millions de tonnes de déchets les plus contaminés. La solution n'est donc que temporaire et la situation de la plupart des entreposages reste très précaire.

Afin de réaliser une évaluation des retombées la plus juste possible, les phénomènes précédemment cités qui concourent à la modification de la distribution des radionucléides doivent impérativement être pris en compte. Un prélèvement réalisé sur les 5 premiers centimètres de sol alors qu'une partie des radionucléides a déjà commencé à migrer en profondeur aura pour effet de minorer la contamination. A l'inverse, se baser sur les résultats d'une zone d'accumulation pour estimer le dépôt moyen d'un secteur conduirait à surestimer la contamination.

Dans le cadre de ces études¹ sur les retombées de Tchernobyl en France, le protocole de carottage de sol établi par la CRIIRAD a été pensé dans ce sens. Des critères très stricts pour le choix des sites étudiés ont été appliqués. Les sites devaient être des terrains :

- nus et dégagés, ce qui permettait de s'affranchir des phénomènes d'interception par la végétation,
- plats, afin de limiter la migration horizontale,
- non cultivés, pour s'affranchir du retrait de la végétation contaminée,
- non remaniés.

La profondeur sondée s'étendait de 0 à 40 cm par tronçons de 5 cm d'épaisseur ce qui devait permettre sauf exception d'intégrer l'ensemble des dépôts de Tchernobyl.

¹ Ces études étaient destinées à évaluer a posteriori les retombées de Tchernobyl sur les surfaces cultivées et donc le risque sanitaire. De 1987 à 1992, 169 sites ont fait l'objet d'un carottage.