

## CONTAMINATION DANS L'ENVIRONNEMENT A PROXIMITE DU SITE DE TCHERNOBYL

Yves THIRY

Andra, Direction R&D  
1-7, rue Jean-Monnet, 92298 Châtenay-Malabry cedex  
[yves.thiry@andra.fr](mailto:yves.thiry@andra.fr)

L'explosion du réacteur nucléaire n°4 de Tchernobyl, et l'incendie qui a suivi, ont été à l'origine du relâchement de grandes quantités de radionucléides (RN) et d'une contamination radioactive majeure de l'environnement, en particulier des écosystèmes proches du réacteur accidenté. Différentes particules « chaudes » (parfois aussi appelées particules de combustibles) de taille micrométrique sont une spécificité des premiers dépôts secs atmosphériques de Tchernobyl qui ont affecté environ 2000 km<sup>2</sup> aux alentours du site (Kashparov, 2003). Ces dépôts particuliers concernent essentiellement la zone d'exclusion (ZE) d'un rayon de 30 km, telle que délimitée après l'accident. On estime que les RN relâchés et déposés sous forme particulière au sein de la ZE correspondent à 0.4-0.5% de leur inventaire dans le réacteur au moment de l'accident. Environ 70-80% de ces dépôts sont concentrés dans la partie centrale de la ZE, qui représente moins de 10% de la superficie totale de la zone.

Les particules « chaudes » collectées dans la ZE ont été classées dans deux catégories (Kashparov et al., 2004):

- Des particules de combustibles non oxydées (3-10 µm), issues du relâchement initial (26/04/1986) et principalement formées par la destruction mécanique du combustible nucléaire lors de l'explosion. Ces dépôts particuliers, d'importance décroissante en fonction de la distance au réacteur, ont été détectés sur une bande de territoire d'environ 100 km de long et 1 km de large, à l'ouest de la centrale.
- Des particules oxydées de combustible formées à haute température pendant l'incendie du réacteur (du 26/04 au 5/05/1986). Ces particules ont plutôt concerné un panache des retombées en direction du nord et du sud.

Lors de l'accident, divers radionucléides tels que <sup>95</sup>Zr, <sup>95</sup>Nb, <sup>99</sup>Mo, <sup>141,144</sup>Ce, <sup>154,155</sup>Eu, <sup>237,239</sup>Np, <sup>238-242</sup>Pu, <sup>241,243</sup>Am, et <sup>242,244</sup>Cm ont été relâchés uniquement sous forme de particules « chaudes », donc en grande majorité à proximité du site. Les retombées particulières, prédominantes au sein de la ZE, concernent également plus de 90% des relâchements de <sup>89,90</sup>Sr et <sup>103,106</sup>Ru. D'autres produits de fission plus volatils, tels que les radio-isotopes du césium, <sup>134,137</sup>Cs, (ainsi que I et Te) ont condensés à la surface des particules et sur des poussières de composition complexe suite à la réaction du combustible en fusion avec divers matériaux de structure. L'enrichissement en radiocésium à la surface des particules les plus fines a été à l'origine d'une dispersion atmosphérique sur de plus longues distances.

L'extrême irradiation liée aux panaches et aux dépôts radioactifs initiaux autour de la centrale accidentée a causé le dépérissement des peuplements de conifères, très répandus dans le paysage local, sur une surface d'environ 1500 ha. La végétation de la « forêt rouge », ainsi dénommée à cause de la couleur des arbres morts sur pieds à 2 km à l'ouest du réacteur, aurait reçu une dose absorbée supérieure à la dose létale pour le pin sylvestre, soit > 60 Gray (Arkipov et al., 1994).

Suite à l'accident, les activités de décontamination d'urgence ont privilégié l'enfouissement des sols de surfaces, des arbres morts et autres débris de façon à limiter l'exposition des travailleurs. Dans la « forêt rouge », cette opération a été à l'origine d'environ 200 tranchées (2-3 m de profondeur) contenant plusieurs centaines de milliers de mètres cubes de matières hautement contaminées ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ). Les tranchées ont ensuite été recouvertes par 20-30 cm de sol non contaminé. Entre 1987 et 1990, environ 450 ha du site, incluant des zones de tranchées, ont été replantés avec diverses essences forestières pérennes (pin, bouleau, arbustes ...) de façon à stabiliser l'hydrologie du site et à prévenir les risques de contamination secondaire associés à l'érosion ou à la resuspension.

La tranchée n°22 (~ 600 GBq de  $^{137}\text{Cs}$  et ~290 GBq de  $^{90}\text{Sr}$ ) du site pilote de Tchernobyl situé au sein de la « forêt rouge » a fait l'objet de nombreuses études coordonnées par l'IGS, l'UIAR et l'IRSN (Bugai et al., 2005). Une question centrale concerne l'incertitude associée à la remobilisation des RN incorporés dans les particules « chaudes », exposées à l'altération naturelle à l'intérieur des tranchées. Il semble que, 14 ans après l'accident, la majeure partie de l'activité en  $^{90}\text{Sr}$  (soit environ 70 %) était encore associée aux particules de combustible (Ahamdach & Stammose, 2000). Plus tard, il a été précisé qu'une quantité importante (30-60 %) de l'inventaire de la tranchée était liée à des particules d' $\text{UO}_2$  non oxydées, caractérisées par une dissolution lente, une autre fraction, plus faible (10-30 %), étant incluse dans des particules très stables de type Zr-U-O (Dewiere et al., 2004).

Compte tenu de l'augmentation possible du stock de RN bio-disponibles suite à l'altération des particules, une étude complémentaire a porté sur l'impact de la revégétation et du développement des nouvelles plantations forestières sur l'extraction potentielle à long terme de la radioactivité contenue dans les tranchées et sur son recyclage vers la surface des sols (Thiry et al., 2009). Plusieurs observations ont été faites :

- Après 15 ans de croissance, les arbres se développant directement sur la tranchée ont extrait et accumulé une activité équivalente à 0.02 % de l'inventaire en  $^{137}\text{Cs}$  et à 2.5 % de celui en  $^{90}\text{Sr}$ .
- Le flux annuel ascendant de  $^{90}\text{Sr}$  vers les arbres, résultant du prélèvement racinaire, est comparable à celui des pertes par lessivage hors de la tranchée (Dewiere et al., 2004), soit 0.8% du contenu en  $^{90}\text{Sr}$  dans la tranchée,
- Selon un modèle de cycle biologique (Goor & Thiry, 2004), un transfert maximum du  $^{90}\text{Sr}$  serait atteint 40 ans après la plantation, et impliquerait une accumulation dans la biomasse des arbres, équivalente à 7 % du contenu de la tranchée, et un transfert à la surface du sol (suite aux retours par la litière) de 12 % du contenu.

De nouvelles études ont mis en évidence une atténuation graduelle naturelle de la mobilité du  $^{90}\text{Sr}$  au sein de la tranchée n°22 en lien avec une diminution des concentrations en cations majeurs dans l'eau du sol ainsi qu'un retard augmenté de la migration du  $^{90}\text{Sr}$  dans la nappe sous-jacente (Bugai et al., 2012). A plus grande échelle, du fait de l'hétérogénéité des zones de tranchées, le rôle de la végétation dans le recyclage à long terme de la contamination des tranchées reste incertain, en particulier si le développement de la biomasse en place et la colonisation par d'autres espèces invasives ne sont pas maîtrisés. L'environnement à proximité de Tchernobyl demeure un des endroits les plus contaminés au monde. De vastes étendues de forêts sont concernées, en plus des nouvelles plantations se développant dans la zone des tranchées. Les forêts naturelles, denses, peu accessibles, sont enclines à des feux extrêmes, difficilement contrôlables, en cas de sécheresse. L'absence d'aménagement des écosystèmes forestiers à proximité du site de Tchernobyl font craindre à différents experts une accumulation dangereuse de biomasse sur pieds et de bois morts fortement contaminés pouvant conduire à de nouveaux relâchement et transferts atmosphériques en cas d'incendie de forêt.

En ce qui concerne la « forêt rouge », et d'autres secteurs similaires, qui concentrent les activités les plus élevées, on a répertorié à ce jour plus de 470 tranchées, correspondant à 884 000 m<sup>3</sup> de déchets radioactifs. La zone concernée par ces stockages transitoires est vaste (~12 km<sup>2</sup>) et n'a encore été investiguée qu'à environ 70%. Un projet européen (Project U4.01/10, cf. <https://webgate.ec.europa.eu/europeaid/online-services>), lancé en 2014 dans le cadre d'un programme de coopération avec l'Ukraine (EC- Ukraine International Nuclear Safety Cooperation Program), a pour objectif de consolider l'inventaire des déchets de la ZE, incluant ceux des tranchées, et d'identifier les options de remédiation nécessaires pour stocker les matériaux contaminés dans des conditions fiables de sûreté à long terme.

### Références:

Ahamdach, N. and Stammose, D., 2000. Isolation and microscopic characterization of nuclear fuel particles from two contaminated soils of Chernobyl. *C.R.A.S.* 330, 415–422.

Arkhipov, N.P., Kuchman, D., Askbrant, S., Pasternak, P.S., Musica, V.V., 1994. Acute and long-term effects of irradiation on pine (*Pinus sylvestris*) stands post-Chernobyl. *Science of the Total Environment* 157 (1–3), 383–386.

Bugai, D., Kashparov, V., Dewiere, L., Khomutinin, Yu., Levchuk, S., Yoschenko, V., 2005. Characterization of subsurface geometry and radioactivity distribution in the trench containing Chernobyl clean-up wastes. *Environmental Geology* 47, 869–881.

Bugai, D., Tkachenko, E., Van Meir, N., Simonucci, C., Martin-Garin, A., Roux, C., Le Gal La Salle, C., Kubko, Y., 2012. Geochemical influence of waste trench no.22T at Chernobyl Pilot Site at the aquifer: Long-term trends, governing processes, and implications for radionuclide migration. *Applied Geochemistry* 27, 1320–1338.

Dewiere, L., Bugai, D., Grenier, C., Kashparov, V., Ahamdach, N., 2004. 90Sr migration to the geo-sphere from a waste burial in the Chernobyl exclusion zone. *Journal of Environmental Radioactivity* 74, 139–150.

Goor, F. and Thiry, Y. (2004). Processes, dynamics and modelling of radiocaesium cycling in a chronosequence of Chernobyl-contaminated Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations. *Science of the Total Environment* 325, 163-180.

Kashparov, V.A., 2003. Hot Particles at Chernobyl. *Environmental Science & Pollution Research*, Special Issue 1, 21-30.

Kashparov, V.A., Ahamdach, N., Zvarich, S.I., Yoschenko, V.I., Maloshtan, I.M., Dewiere, L., 2004. Kinetics of dissolution of Chernobyl fuel particles in soil in natural conditions. *Journal of Environmental Radioactivity* 72, 335-353.

Thiry, Y., Colle, C., Yoschenko, V., Levchuk, S., Van Hees, M., Hurtevent, P. and Kashparov, V., 2009. Impact of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantings on long term 137Cs and 90Sr recycling from a waste burial in the Chernobyl Red Forest. *Journal of Environmental Radioactivity* 100, 1062-1068.