

Conséquences écologiques de l'accident nucléaire de Tchernobyl

C. Adam-Guillermin, O. Armant, J-M Bonzom, P. Henner, C. Lecomte

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), PRP-ENV/SERIS,
Cadarache, St Paul Lez-Durance, 13115, France
Christelle.adam-quillermin@irsn.fr

Introduction

Trente ans après l'accident de Tchernobyl, de nombreux travaux ont été publiés sur les conséquences écologiques de cet accident sur la faune et la flore. Cette présentation propose une synthèse de ces données.

Effets sur les végétaux terrestres

Avant l'accident, la zone autour de la centrale de Tchernobyl était couverte majoritairement de forêts de pins (*Pinus sylvestris* L.) de 30 à 40 ans d'âge, caractérisées globalement par des écosystèmes matures et stables. La catastrophe, conduisant à des doses létales dans la zone des 30 km pour un certain nombre d'espèces, a altéré de manière drastique cet équilibre. Dans les premières semaines après l'accident, 90% des pins (*Pinus sylvestris* L.) sont morts en raison de la dose absorbée dans la zone dite de la « forêt rousse », celle-ci variant de 10 à 20 Gy. Les effets ont été exacerbés en raison de la période à laquelle s'est produit l'accident, coïncidant avec la pleine croissance printanière. Au cours de l'année qui a suivi l'accident, concernant les espèces herbacées, plusieurs études ont mis en évidence dans la zone d'exclusion une réduction du pouvoir germinatif des graines de diverses espèces, ainsi qu'une diminution de la vitalité de certains pollens (Geras'kin et al., 2008). L'ensemble de ces phénomènes a résulté en une sélection, suite à l'accident, des individus et des espèces génétiquement les plus aptes à vivre dans un tel environnement (Geras'kin et al., 2008). Dans les zones fortement contaminées où les conifères persistent, depuis 1993, 50 à 60 % des jeunes conifères âgés de 2 à 9 ans présentent une morphogénèse anormale (Zelena et al., 2005), notamment une perte de dominance apicale en lien avec la mort des méristèmes des bourgeons. Par contre les anomalies concernant les capacités reproductives ne sont plus significatives depuis 1995.

Assez peu d'études ont été conduites dans la zone d'exclusion de Tchernobyl afin d'évaluer les conséquences écologiques à long terme de l'accident. L'exposition chronique multi-générationnelle à des rayonnements ionisants a engendré des modifications indéniables des communautés végétales avec la mort des pins autour du réacteur endommagé suivie de l'établissement progressif de nouvelles espèces herbacées et d'arbres à feuilles caduques. Les analyses les plus récentes conduites sur des pins plantés dans la zone d'exclusion après l'accident (n.b. on s'affranchit ainsi de l'incertitude dans l'évaluation de la dose absorbée par chaque individu au moment de l'accident) et exposés chroniquement, ont montré que 10 % des individus présentent des anomalies morphologiques pour un débit de dose total (irradiation externe et interne) estimé à 1 µGy/h et 50 % des individus à 40 µGy/h (Yoschenko et al., 2011). Un décalage de l'occurrence de ces anomalies de 4 à 8 ans suggère que l'atteinte d'un seuil de dommages moléculaires soit nécessaire pour que l'effet se développe. Ceci expliquerait les différences de sensibilité avec les individus présents en phase accidentelle.

Effets sur les invertébrés

Après l'accident de Tchernobyl, la majeure partie des dépôts de radionucléides s'est concentrée dans les premiers centimètres du sol et dans la litière forestière exposant les organismes du sol à des doses supérieures à celles reçues par les autres animaux. Par voie de conséquence, dans les deux mois qui ont suivi l'accident de Tchernobyl, 90% des invertébrés du sol qui occupaient la zone entre 3 et 7 km autour de la centrale ont disparu

(Krivolutsky et Pokarzhevsky, 1992 ; Geras'kin et al., 2008). Certains auteurs ont notamment mis en évidence une perte de la biodiversité des microarthropodes, des myriapodes, des acariens ainsi qu'une mortalité importante chez certaines espèces de vers de terre dans la zone d'exclusion (Krivolutsky et Pokarzhevsky, 1992). Plusieurs taxons comme les araignées et certains coléoptères sont restés absents de la zone proche de la centrale pendant plusieurs mois. Ceci a eu pour conséquence de modifier considérablement la structure du réseau trophique et la composition des communautés qui occupent le sol.

Durant l'année qui a suivi l'accident, l'abondance des acariens présents dans la litière était encore diminuée d'un facteur 30 alors que celle des acariens présents dans les couches profondes du sol n'était diminuée que d'un facteur 2-3 (Zaitsev et al., 2014). D'une manière générale l'abondance totale des invertébrés du sol dans la litière forestière a progressivement augmenté au cours de cette année jusqu'à atteindre 45% de celle qui précédait l'accident (Krivolutsky, 1996). Ce phénomène serait essentiellement lié à la migration d'insectes provenant des zones périphériques à la zone d'exclusion, ainsi qu'au remplacement d'espèces radiosensibles par d'autres plus résistantes. Par exemple, l'abondance et la diversité des isopodes, plus résistants que les vers de terre, sont restées globalement stables deux ans après l'accident à l'exception de la zone la plus contaminée (3 km de la centrale). L'espèce *Porcelio scaber* dominante dans cette zone a été remplacée par une l'espèce non dominante *Trachelipus difficilis* (Kuprianova, 1999 ; Zaitsev et al., 2014).

Deux ans et demi après l'accident la mésofaune du sol était quasiment complètement restaurée. Les conséquences de la contamination radiologique sur le long terme semblent plus difficiles à évaluer et les avis divergent notamment pour ce qui concerne les effets sur l'abondance et la diversité des espèces. Maksimova (2002) a observé, entre 1986 et 1996 une diminution de la densité et de la biomasse des diplopodes dans les forêts fortement contaminées de la région de Gomel (Biélorussie, 30 km au nord-est de la centrale) par rapport aux zones contrôle. Dix ans après l'accident, la diversité de la mésofaune dans la litière forestière était encore réduite de 20 % par rapport à ce qu'elle était avant l'accident (Hinton et al., 2007 ; Geras'kin et al., 2008). De plus, une augmentation des anomalies morphologiques a également été observée chez certaines espèces de coléoptères et de libellules présentes sur les sites contaminés (Sokolov et al., 1994). Chez les coléoptères ces anomalies morphologiques portaient sur des caractères sexuels secondaires susceptibles d'affecter les capacités d'accouplement des animaux impactés par la contamination (Møller, 2002). En 2005, Jackson et al. observent une diminution de la diversité (mais pas de l'abondance) des invertébrés du sol dans la zone d'exclusion pour des débits de dose externes compris entre 0,1 et 140 $\mu\text{Gy/h}$. Inversement, en 2009, Møller et Mousseau montrent quant à eux une diminution de l'abondance des insectes (bourdons, sauterelles, papillons, libellules et araignées) pour des doses externes d'un ordre de grandeur inférieures à celles publiées par Jackson et al. (2005). La diminution de l'abondance des pollinisateurs dans les zones contaminées semble s'accompagner d'une diminution de la production de fruits dans ces mêmes zones (Møller et al., 2012). Récemment, Lecomte-Pradines et al. (2014) ont montré un effet modéré de l'exposition aux rayonnements ionisants sur l'assemblage des nématodes du sol collectés sur des sites forestiers 25 ans après l'accident.

Effets sur les vertébrés

Les petits rongeurs constituent le groupe de mammifères le plus abondant à Tchernobyl. Ils ont été largement étudiés en raison de leur fertilité élevée, des rotations rapides des générations et de la dose absorbée importante due à leur mode de vie lié au sol de surface. De surcroît, ils sont, avec les oiseaux, parmi les taxons les plus radiosensibles (Garnier-Laplace et al., 2013).

Etant donné les niveaux d'exposition radiologique très élevés dans les sites contaminés autour de la centrale au printemps 1986 (dose cumulée pendant les 5 premiers mois après l'accident s'étendant de 12 à 110 Gy et de 580 à 4500 Gy pour le rayonnement γ et β respectivement), la plupart des animaux y vivant ont très probablement disparu (Hinton et al., 2007).

Ainsi, durant l'automne 1986, le nombre de petits rongeurs habitant en des lieux très contaminés a décliné d'un facteur 2 à 10 (Taskaev et Testov, 1999), notamment en raison d'une baisse de la reproduction due à une diminution de la survie embryonnaire, et cela malgré une augmentation de la fertilité des femelles due à l'accroissement du nombre de cellules reproductrices (Sokolov et al., 1993). Cependant, dès le printemps suivant, la taille des populations augmente de nouveau, certainement en raison de l'arrivée d'individus migrants provenant des zones les moins contaminées et de l'évacuation des populations humaines entraînant un accroissement de la ressource en nourriture (Geras'kin et al., 2008). A partir de cette période, aucune différence n'est mise en évidence entre les populations de micro-mammifères vivant dans des sites contaminés et celles des sites témoins en ce qui concerne la distribution en âge, le sexe ratio, la diversité, l'abondance et la tératogénèse (Baker et al., 1996 ; Baker et Chesser, 2000 ; Jackson et al., 2004). Cependant, malgré ce bien-être clinique apparent, de nombreux changements sont observés chez les organismes (anomalies de la formule sanguine (Materiy, 1996), altérations histologiques de la rate et du foie (Materiy et Goncharov, 1996 ; Shishkina et al., 1992) ainsi que du système endocrinien (Ermakova, 1996)).

Chez les oiseaux, la majorité des études ont été réalisées plusieurs années après l'accident. Diverses publications de Møller et Mousseau (Møller et al., 2006 ; Møller et Mousseau, 2009) indiquent que, plus de 30 ans après l'accident, dans la zone d'exclusion du site de Tchernobyl, la richesse spécifique, l'abondance et la densité des populations d'oiseaux en milieu forestier décroissent avec l'augmentation du niveau d'exposition aux rayonnements ionisants. Les auteurs concluent sur la cause de cette décroissance drastique par une relation statistique entre les niveaux d'exposition et l'intensité des effets observés à ces niveaux d'exposition. L'abondance des oiseaux diminuerait de 60% entre les sites présentant des débits de dose ambiants allant de 0,1 à 1 mGy/h en irradiation externe (sans donner toutefois d'informations sur le niveau de contamination interne) et les sites témoins. Les auteurs avancent l'hypothèse d'un effet direct des niveaux d'exposition aux rayonnements ionisants sur le taux de survie et de fécondité, de 25 % en zone contaminée, diminuant la taille des populations (Møller et al., 2005) et/ou d'effets indirects associés à un comportement d'évitement des habitats contaminés (Møller et Mousseau, 2007a) ou à une diminution de l'abondance de la nourriture essentiellement composée d'invertébrés du sol (Møller et Mousseau, 2007b ; 2009). La susceptibilité des oiseaux est différente en fonction du stade de vie et du sexe. Ainsi, les ratios d'âge observés sur les populations d'oiseaux dans la zone d'exclusion sont en faveur des stades les plus jeunes, indiquant une mortalité importante des adultes. Egalement, le sexe ratio est fortement en faveur des mâles, qui chantent beaucoup plus fort dans les zones les plus contaminées, probablement pour attirer plus de femelles lorsque celles-ci deviennent rares (Møller et al., 2012).

A l'heure actuelle, la question relative à l'abondance de la faune des grands mammifères résidant dans la zone d'exclusion alimente toujours un vif débat scientifique et public. Cependant, les deux études récentes menées à ce sujet sont contradictoires. L'abondance des mammifères a été étudiée par le dénombrement des traces dans la neige (Møller and Mousseau, 2013). Parmi les 12 espèces recensées, l'abondance était corrélée négativement avec le niveau de radiations ambiant, avec des effets très marqués pour certaines espèces comme le renard et beaucoup moins pour d'autres espèces comme le loup. La seconde étude a couplé des campagnes pluri-annuelles de dénombrement de traces dans la neige et des comptages par surveillance aérienne, donnant des indications sur la dynamique des populations de mammifères (Deryabina et al., 2015). Cette étude montre que la densité des mammifères n'est pas corrélée à la contamination radioactive. De surcroît, les densités de grands ongulés tels que l'élan, le cerf, le chevreuil ou le sanglier sont comparables avec celles observées dans des réserves naturelles non contaminées, la densité des loups dans la zone d'exclusion étant même 7 fois supérieure à celle observée dans ces réserves. Enfin, 10 ans de données de surveillance aérienne obtenues entre 1987 et 1996 montrent une augmentation des densités d'élans, de chevreuils et de sangliers. Toutefois, ces données ne

permettent pas de séparer l'effet positif dû à l'abandon de la zone par les populations humaines (engendrant un arrêt des activités de chasse, d'agriculture et d'exploitation forestière) d'un potentiel effet négatif des radiations ionisantes.

Effets observés à l'échelle moléculaire

L'ADN génomique situé au cœur de toutes les cellules des organismes vivants est une molécule sensible aux radiations ionisantes. L'accumulation d'altérations génomiques augmentant avec la dose d'exposition, des mutations peuvent être induites et persister, engendrant des effets à d'autres niveaux d'organisation biologique chez les organismes exposés. Des études sur des hirondelles cinq à dix ans après l'accident de Tchernobyl, démontrent une augmentation du nombre de mutations dans la lignée germinale des oiseaux capturés en zone contaminée (débit de dose ambiante de 5 $\mu\text{Gy/h}$) par rapport à des individus prélevés sur des sites non contaminés (Ellegren et al., 1997). Cet effet continue à être observé sur des populations d'oiseaux 20 ans après l'accident (Bonisoli-Alquati et al., 2010). Chez les mammifères, l'analyse de souris domestiques exposées à des doses de 0.2-2 mGy/h deux ans après l'accident de Tchernobyl démontre une augmentation des réarrangements chromosomiques dans les gamètes mâles corrélée à une baisse de la fertilité (Pomerantseva et al., 1997). Si un accroissement d'anomalies cytogénétiques (micronoyaux) est reporté dans la moelle épinière de rongeurs (souris et campagnols) prélevés à grande distance de Tchernobyl (Italie et Suède) (Cristaldi et al., 1990, 1991), chez des campagnols roussâtres prélevés à Tchernobyl et ayant absorbé une dose de près de 36 mGy sur 30 jours, aucune augmentation significative de ces micronoyaux n'est mise en évidence (Rodgers et al., 2001). Ces discordances mettent en relief des différences de susceptibilité aux radiations ionisantes entre espèces et soulignent l'importance de la prise en compte d'autres polluants dans le milieu pouvant avoir des effets synergiques avec les radiations.

En plus des effets directs sur la molécule d'ADN, les rayonnements ionisants produisent des radicaux libres dérivés de l'oxygène, très réactifs et capables d'endommager les différents compartiments cellulaires. Les stocks intracellulaires d'antioxydants tels que les caroténoïdes et les vitamines A, C et E sont mobilisés pour diminuer ce stress oxydant, avec des conséquences importantes et variées sur la physiologie des vertébrés. En effet, les stocks de ces antioxydants étant limités chez les vertébrés, une allocation importante de ces molécules dans la lutte contre le stress oxydant radio-induit diminuera leur disponibilité pour d'autres fonctions physiologiques où ils sont également employés, comme l'immunité, la synthèse de pigments ou la production de gamètes. En conséquence, le nombre de leucocytes et d'immunoglobulines diminue chez des hirondelles prélevées en 1996 à Tchernobyl (débit de dose ambiante de 5 $\mu\text{Gy/h}$) (Camplani et al., 1999) conjointement à une augmentation du stress oxydant (Bonisoli-Alquati et al., 2010) et une déplétion des stocks de caroténoïdes (Møller et al., 2005). De même, le nombre de cas d'albinisme partiel, ainsi que la proportion de gamètes mâles anormaux dans les populations d'oiseaux augmentent significativement à des débits de doses ambiants de 4 $\mu\text{Gy/h}$ (Camplani et al., 1999 ; Møller et Mousseau, 2001 ; Møller et al., 2008 ; Hermosell et al., 2013). En lien avec ces hypothèses, une diminution de l'abondance des populations d'oiseaux avec le niveau de radiations est observée majoritairement chez les espèces ayant des colorations à base de phéomélanine (elle-même synthétisée à partir du stock intracellulaire d'antioxydant et en particulier du glutathion) et de caroténoïdes (Galvan et al., 2011).

Conclusion

Les effets rapportés dans la littérature sur les conséquences écologiques de l'accident de Tchernobyl sont souvent contradictoires, voire sujets à des controverses scientifiques en raison d'une multitude de facteurs potentiellement confondants, comme l'extrême hétérogénéité spatiale de l'exposition pour les espèces sauvages mobiles dans la zone d'exclusion, les facteurs environnementaux divers tels que la saison par exemple ou le manque d'observations de même nature pour de vrais témoins non exposés. Dans ce contexte, un des défis majeurs pour une évaluation robuste des conséquences écologiques

de l'exposition aux rayonnements ionisants engendrées par ces accidents majeurs reste celui de la prise en compte de la dose absorbée totale, ce qui doit impliquer des collaborations entre différentes équipes et champs disciplinaires, tel que réalisé récemment sur des données issues de Fukushima (Garnier-Laplace et al., 2015).

Pour en savoir plus : une version étendue de cette synthèse est disponible sous forme de rapport IRSN (N°IRSN/PRP-ENV/SERIS/2016-00006)