

NOTE D'INFORMATION

DATE : 21/04/2021

Les effets sur les écosystèmes résultant des accidents de Tchernobyl et de Fukushima : état des connaissances

Le public a pu voir, dans les grands média, des reportages et des œuvres de fiction sur la faune et la flore présentes dans les zones contaminées par les accidents nucléaires majeurs survenus sur les centrales de Tchernobyl le 26 avril 1986 ou de Fukushima le 11 mars 2011.

Les observations présentées dans ces reportages suscitent l'interrogation sur les effets induits sur la faune et la flore par les contaminations présentes sur ces sites. De nombreux travaux de recherche ont été menés sur certaines des espèces sauvages de ces territoires. Ces travaux de recherche contribuent à mieux comprendre les effets sur les écosystèmes induits par les contaminations radioactives présentes sur ces sites depuis 35 ans dans l'environnement de Tchernobyl et 10 ans dans celui de Fukushima.

Introduction

Les accidents nucléaires de Tchernobyl et Fukushima-Daïchi ont entraîné d'importants rejets radioactifs dans l'environnement. Les caractéristiques de ces rejets sont décrits et comparés dans la note : [Impact environnemental d'un accident nucléaire : comparaison entre Tchernobyl et Fukushima \(irsn.fr\) publiée sur le site internet de l'IRSN.](#)

Les radionucléides émis lors de ces accidents nucléaires se sont déposés puis dispersés et redistribués dans l'environnement au fil des années. La faune et la flore présentes sur ces territoires sont exposées aux rayonnements ionisants selon 2 voies : une exposition externe induite par les rayonnements émis par les radionucléides présents dans l'environnement, une exposition interne induite par les radionucléides ingérés, inhalés ou absorbés par la flore et la faune sauvages.

Les radionucléides émis lors des accidents ont conduit à une exposition aiguë de la faune et de la flore tout de suite après l'accident, cette exposition a produit des effets délétères sur certaines espèces dans les territoires contaminés. Aujourd'hui, les individus qui constituent la flore et la faune sauvages

dans les territoires contaminés, d'une part restent exposés quotidiennement, chroniquement aux radionucléides présents dans l'environnement, d'autre part sont issus des générations successives qui ont été produites par les individus initialement exposés ou par ceux qui ont migré postérieurement vers les territoires contaminés.

Ces constats posent diverses questions : les effets observés à court terme sont-ils toujours visibles? De nouveaux effets, sans lien avec les effets à court terme sont-ils apparus ?

Les travaux présentés ci-dessous visent à apporter un éclairage sur ces questions et reposent sur des connaissances récentes (publiée principalement depuis 2016) sur les effets sur la faune et la flore sauvages présentes sur les territoires contaminés par les accidents nucléaires survenus sur les centrales de Tchernobyl ou de Fukushima. Ils complètent les connaissances exposées dans la note rédigée en 2016 par l'IRSN qui peut être consultées à cette adresse : [Accidents de Tchernobyl et Fukushima : études écologiques sur la faune et la flore \(irsn.fr\)](https://www.irsn.fr/fr/actualites/accidents-de-tchernobyl-et-fukushima-etudes-ecologiques-sur-la-faune-et-la-flore)

I - Une première indication : l'abondance des organismes

Pour étudier l'état des populations, l'une des méthodes fréquemment utilisée en écologie est l'estimation de l'abondance des individus. Une variation d'abondance permet d'intégrer et d'estimer rapidement un ensemble d'effets délétères des rayonnements ionisants sur les populations. De nombreuses études ont été menées sur différents groupes d'organismes depuis les accidents et montrent des résultats contrastés en fonction de la région (Tchernobyl, Fukushima) et du groupe considéré (oiseaux, insectes, mammifères, ...).

Dans la région de Tchernobyl, plusieurs équipes de recherche ont quantifié l'abondance de grands mammifères, mais les résultats obtenus sont contradictoires (voir IRSN 2016, Møller et Mousseau, 2013, Deryabina et al., 2015, Gurung et al., 2015). Plus récemment, d'anciennes données recueillies par des équipes ayant précédemment réalisé des mesures d'abondance sur le terrain, ont été ré-analysées en intégrant une nouvelle estimation de la dose absorbée par les organismes (Beaugelin-Seiller et al., 2020). Différents paramètres pouvant influencer l'abondance ont été pris en compte (les activités humaines dans la zone d'exclusion, l'heure de l'observation, le type de couverture forestière). La méthode d'estimation de l'abondance étant basée sur les traces observées dans la neige, la durée écoulée depuis la dernière chute de neige est également un paramètre qui a été considéré. Cette nouvelle étude confirme les conclusions de la première analyse réalisée en 2013 et montre que les abondances mesurées dépendent effectivement de la dose estimée (les débits de dose absorbés étant compris entre 0,0066 et 610 $\mu\text{Gy/h}$) : dans les milieux les plus contaminés, une diminution de 60% du nombre de mammifères est observée pour une augmentation d'un facteur 10 de la dose (dose totale absorbée au cours du temps de génération de l'espèce considérée), cette diminution étant plus importante pour les « proies » (66%) que les « prédateurs » (50%).

Dans la préfecture de Fukushima, à l'aide de pièges photographiques, une équipe américaine en collaboration avec un centre de recherche japonais s'est également intéressée à l'abondance de mammifères et d'oiseaux galliformes suite à l'accident (Lyons et al., 2020). Comme dans le cas de l'étude précédente, les auteurs ont analysé les relations entre les niveaux de rayonnements et les abondances de ces organismes et ont également pris en compte d'autres paramètres comme le niveau d'activité humaine (la distance du chemin le plus proche et son utilisation), la végétation, l'altitude ou encore la distance au point d'eau le plus proche. Il s'agit de la première étude dans la préfecture de

Fukushima prenant en compte l'impact de l'activité humaine. Ce paramètre s'avère être très important car les résultats montrent qu'il est le premier facteur jouant sur l'abondance des populations, avec une majorité d'espèces plus abondantes dans les zones où l'activité humaine est limitée. Parmi les autres paramètres majeurs, les auteurs montrent également un effet de l'altitude sur l'abondance des populations. En revanche, l'abondance des animaux sauvages ne semble généralement pas dépendre de la dose ambiante. Seule une espèce de faisan est plus abondante dans les zones les plus contaminées. Cette étude est contrainte par le manque de mesures précises de la dose reçue par les organismes, mais elle souligne **l'importance de prendre en compte l'effet des activités humaines sur les populations sauvages lorsque l'on veut discerner les effets potentiels induits par l'exposition aux rayonnements ionisants de ceux relevant d'autres facteurs.** .

Récemment, un suivi des espèces marines présentes sur une large bande de la côte est du Japon, incluant la préfecture de Fukushima, a été réalisé en 2012 et 2013. La diversité et l'abondance des espèces présentes dans la zone balayée par les marées ont présenté une dépendance à la distance à la centrale de Fukushima. Spécifiquement, l'absence en 2012 d'un mollusque commun (*Thais clavigera*) dans l'ensemble des sites étudiés proches de la centrale (Horiguchi et al., 2016) a été observée, alors que les parties de la côte touchées seulement par le tsunami ne sont pas affectées. Mais des suivis plus récents ont à l'inverse mis en évidence une augmentation de l'abondance et de la diversité des organismes dans les zones les plus proches de la centrale à partir de 4 à 5 ans après l'accident (Horiguchi et al., 2020). Ces études montrent l'importance de suivre dans le temps l'abondance des populations, ce qui permet notamment de distinguer les effets issus de l'exposition aiguë (de courte durée, généralement associée à des doses élevées) de ceux issus de l'exposition chronique (de durée plus longue, généralement associée à de faibles doses).

La mesure d'abondance permet donc d'avoir un premier aperçu de l'état des populations sauvages exposées aux rayonnements ionisants, mais cette mesure seule ne permet pas d'apprécier l'état de santé des individus observés. De plus, si la reproduction des individus présents dans les zones les plus contaminées est impactée, un système qualifié de « source-puits » peut se mettre en place : la faible compétition pour les ressources induite du fait de la reproduction limitée dans les zones les plus contaminées peut favoriser la migration d'individus en direction de ces zones. Cette hypothèse a notamment été vérifiée pour des hirondelles rustiques (*Hirundo rustica*) dans la région de Tchernobyl (la moyenne des débits de dose ambiants sur les différents sites étudiés est comprise entre 0.22 et 3.42 $\mu\text{Sv/h}$) (Møller et al., 2006). Les populations dont on estime l'abondance peuvent ainsi être constituées par des individus dont l'exposition passée aux rayonnements ionisants diffère. **Il est donc fondamental d'étudier plus précisément si les individus des zones les plus contaminées présentent des capacités (survie, reproduction, ...) identiques aux individus présents dans les zones les moins contaminées.**

II – Quels effets individuels à long terme ?

L'exposition aux rayonnements ionisants peut avoir des conséquences sur les fonctions biologiques des organismes vivants. Ainsi de nombreuses études réalisées *in situ* dans la région de Tchernobyl et dans une moindre mesure dans la région de Fukushima, ont mis en évidence que la radiocontamination de l'environnement pouvaient engendrer chez différentes espèces des effets, comme par exemple du stress oxydatif, des dommages génétiques, une dépression du système immunitaire, des malformations des spermatozoïdes, un ralentissement de la capacité des cellules à se multiplier,

de l'albinisme partiel, des cataractes, etc. (Møller et Mousseau, 2006 ; Geras'kin et al., 2008 ; Aliyu et al., 2015 ; IRSN 2016 ; Cannon et Kiang, 2020 ; et plus spécifiquement, p. ex. : singe : Ochiai et al., 2014, Hayama et al. 2017, Urushihara et al. 2018 ; papillon : Taira et al., 2014).

Cependant, si ces effets sont bien réels, dans de nombreux cas les débits de doses décrits par les auteurs sont souvent sous-estimés. En effet, dans de nombreuses études seule une partie de l'exposition des organismes aux radiations est prise en compte. Elle se limite à l'irradiation gamma externe, sans tenir compte de la contamination interne, voie d'exposition prépondérante pour de nombreuses combinaisons d'organismes et de radionucléides (Giraudeau et al. 2018). Il est également à souligner qu'une partie des études menées *in situ* n'a pas mis en évidence d'impacts négatifs significatifs des rayonnements ionisants à l'échelle de l'organisme (p. ex. crustacé : Fuller et al., 2017, 2018 ; grenouille : Giraudeau et al., 2018 ; mouche du vinaigre : Itoh et al., 2018).

Ces études confirment qu'en plus de la dose absorbée par les organismes, la radiosensibilité des espèces et de la fonction biologique étudiée, le stade de vie auquel est exposé l'organisme, les effets transgénérationnels (Taira et al. 2015), ainsi que les capacités d'adaptation doivent être pris en compte pour évaluer les effets des rayonnements ionisants (Shuryak I., 2020).

Des avancées méthodologiques récentes sont à souligner. Elles consistent à effectuer une analyse globale et sans *a priori* des fonctions biologiques des organismes, à partir des modifications d'expression de gènes (analyse transcriptomique). C'est ainsi que Lerebours et al. (2020) ont étudié, 30 ans après l'accident nucléaire de Tchernobyl, les effets de la radio-contamination de 6 lacs ukrainiens et biélorusses sur une espèce de poisson, la perche (*Perca fluviatilis*), le débit de dose total auquel les perches étaient exposées variant de 0 à 15,7 $\mu\text{Gy/h}$. L'analyse effectuée est à considérer avec précaution, car elle n'a été réalisée que sur 3 individus par lac. Toutefois elle met en évidence des perturbations de l'expression de gènes impliqués dans des processus biologiques tels que la reproduction, la régulation des dommages à l'ADN et le métabolisme lipidique, en cohérence avec des effets sur la maturation des ovocytes qui ont été démontrés dans une étude sœur sur un nombre plus important de poissons (Lerebours et al. 2018). Une autre étude sans *a priori* sur la rate et le foie de campagnols roussâtres, *Myodes glareolus*, (Kesäniemi et al. 2019) prélevés dans la Zone d'exclusion de Tchernobyl et dans les alentours de Kiev, met en évidence des effets sur le système immunitaire ainsi que sur le métabolisme des lipides. L'estimation de la dose a été effectuée sur chaque animal. Encore une fois, l'importance de ces changements sur la survie des animaux reste difficile à évaluer, mais indiquent une modification de certaines fonctions biologiques en lien soit avec l'adaptation de ces individus, soit avec la dégradation de leur état de santé.

Ces analyses globales, sans a priori, présentent toutefois un défi méthodologique car les effectifs étudiés sont souvent limités, les variations interindividuelles peuvent masquer les effets recherchés et enfin, les bases de données nécessaires pour l'analyse des données sont souvent inexistantes pour les espèces sauvages étudiées. Les conclusions qui peuvent en être tirées à ce stade sont donc à prendre avec précaution et à croiser avec les résultats et observations obtenus au moyen d'approches déployées à d'autres échelles pour l'étude des effets des rayonnements sur les écosystèmes.

III – Les effets sur les individus induisent-ils des modifications persistantes à l'échelle des populations?

Au sein d'une même population tous les individus ne présentent pas les mêmes caractéristiques (morphologiques, comportementales, physiologiques, ...). Certaines caractéristiques peuvent être favorisées par un effet de sélection si elles permettent aux individus d'être plus aptes à survivre et à se reproduire dans des environnements contaminés. Ces individus sont sélectionnés, ils ont plus de descendants et/ou une meilleure survie. Au fil des générations, ces descendants peuvent devenir majoritaires au sein de la population. De telles caractéristiques sont qualifiées d'adaptations. Depuis les accidents de Tchernobyl et Fukushima, plusieurs générations d'organismes se sont succédé et il est probable que de telles adaptations se soient mises en place. De nombreuses études se sont ainsi intéressées à l'adaptation des organismes aux rayonnements ionisants, notamment dans le cas de l'accident de Tchernobyl, et ont été compilées dans une revue de la littérature (Møller et al., 2016). **Ce processus d'adaptation est souvent mentionné pour interpréter certains résultats obtenus sur le terrain, mais il reste très difficile à démontrer.** Pour identifier une adaptation, il faut notamment démontrer qu'elle persiste même après plusieurs générations placées dans un environnement non contaminé. Cette revue concluait ainsi, qu'en 2016, seule une étude permettait d'en faire la démonstration. Après avoir irradié des bactéries présentes sur les plumes d'hirondelles provenant de sites différemment contaminés dans la région de Tchernobyl et sur un site contrôle au Danemark, les auteurs de cette étude (Ruiz-Gonzalez et al., 2016) ont mis en évidence de meilleures capacités de survie et de multiplication des bactéries provenant des zones plus contaminées (en comparaison de celles provenant des zones moins contaminées, les débits de dose ambiants étant compris entre 0,03 et 2,9 $\mu\text{Gy/h}$).

Depuis 2016, de nouvelles études cherchant à tester cette hypothèse de l'adaptation ont été réalisées dans la région de Tchernobyl. Dans l'une des plus récentes (Arnaise et al., 2020), les auteurs se sont intéressés à une potentielle adaptation de champignons infectant les parties reproductrices d'une plante à fleur. En irradiant de façon expérimentale des champignons prélevés dans des zones plus ou moins contaminées (les débits de doses ambiants étant compris entre 0,03 et 21,03 $\mu\text{Sv/h}$), ils montrent que les champignons provenant des zones les plus contaminées supportent moins les effets d'une irradiation expérimentale aiguë et forte. Ces résultats vont à l'encontre de ce qui aurait été attendu si les champignons provenant des zones les plus contaminées avaient acquis une adaptation aux rayonnements depuis l'accident.

Si ces adaptations sont souvent perçues comme bénéfiques pour la viabilité des organismes sauvages dans les zones contaminées, cette spécialisation peut cependant représenter un handicap face à d'autres stress. Dans le cas où des modifications environnementales, modifiant le milieu de vie de ces organismes, apparaîtraient dans les zones contaminées, il est possible que des organismes adaptés aux rayonnements ionisants soient moins susceptibles de supporter de nouveaux changements environnementaux (par exemples, induits par la sécheresse, des feux de forêts plus fréquents aujourd'hui dans la zone d'exclusion de Tchernobyl). Ainsi, la destruction au printemps des nids des oiseaux, par les feux, est susceptible d'affecter la dynamique des populations d'oiseaux spécifiquement adaptées aux organismes de la zone d'exclusion de Tchernobyl (Beresford et al., 2021).

Une importante direction de recherche aujourd'hui est donc de caractériser le potentiel des populations à supporter des modifications futures de l'environnement.

Le potentiel d'adaptation des populations est dépendant de processus évolutifs mettant en œuvre une modification persistante des populations au cours du temps. Ce potentiel peut être évalué par la mesure de la diversité génétique.

Dans le cas de l'accident de Tchernobyl, plusieurs études se sont intéressées à cette diversité génétique. Une première, réalisée sur des campagnols roussâtres (*Myodes glareolus*) (Baker et al, 2017), révèle l'existence d'une plus grande diversité génétique dans les zones les plus contaminées (les débits de dose absorbés sont compris entre 0,29 et 277,92 $\mu\text{Gy/h}$). Les auteurs concluent à l'existence d'un plus grand nombre de mutations dans les zones les plus contaminées, mais l'effet de la migration d'individus en direction de ces zones permettrait également d'obtenir une telle diversité (voir la question du système « source-puits » discutée précédemment, Kesäniemi et al., 2018). Au contraire, des études récentes sur des crustacés aquatiques (*Asellus aquaticus*) (pour des débits de doses absorbés compris entre 0,064 et 27,1 $\mu\text{Gy/h}$) et des vers de terre (pour des débits de doses absorbés comprises entre 0,096 et 53 $\mu\text{Gy/h}$) ne montrent pas de différence de diversité en fonction du niveau de contamination (Fuller et al., 2019 et Newbold et al., 2019).

A partir d'une analyse de la diversité génétique de populations de grenouilles arboricoles, les rainettes vertes (*Hyla orientalis*), une étude pilotée par l'IRSN a récemment montré, de façon similaire aux campagnols, une augmentation de la diversité génétique dans la zone d'exclusion de Tchernobyl en comparaison à d'autres populations situées dans des zones moins contaminées (les débits de doses absorbés compris entre 0,007 et 22,4 $\mu\text{Gy/h}$) (Car et al., soumis). En prenant en compte les variations connues de la diversité génétique de cette espèce en Europe, cette étude permet de montrer que des mutations apparaissent plus fréquemment dans les populations de la zone d'exclusion de Tchernobyl (une fréquence d'apparition environ cent fois plus élevée que celle connue). Il est admis que lorsqu'un grand nombre de mutations apparaît, seule une minorité permet une adaptation à l'environnement. En effet, la majorité des mutations ne modifie pas les caractéristiques des individus ou induit des effets délétères. Cette grande diversité génétique sur des populations des rainettes de la zone d'exclusion de Tchernobyl a été modélisée. Les modèles montrent que cette diversité n'a pu s'établir que sur des populations comprenant un faible nombre d'individus. Il résulte de cette étude que parmi la population initiale, seul ce faible nombre d'individus, qui présente la diversité génétique observable aujourd'hui, s'est adapté au milieu irradiant. Les autres ont probablement disparus du fait des effets délétères des mutations générées par les radiations.

En fonction de différentes caractéristiques (nombre de descendants par portée, durée de vie, ...) des organismes comme les grands mammifères pourraient être plus sensibles que les rainettes à de telles mutations délétères. Une méta-analyse regroupant des études utilisant diverses méthodes et sur de nombreux groupes d'organismes a été réalisée par Møller et Mousseau (2015) et montre un large effet des rayonnements ionisants sur l'accroissement des mutations suite à l'accident de Tchernobyl. Ils ne montrent cependant pas d'évolution à la baisse des mutations au cours du temps, ce qui aurait pu être attendu du fait de la diminution de l'exposition des organismes. Si cet effet des rayonnements ionisants semble ainsi généralisable à de nombreux groupes d'organismes, **l'étude détaillée de l'impact sur la diversité génétique concerne pour l'instant peu de ces groupes et cela ne permet pas aujourd'hui d'avoir une vision précise des effets des accidents nucléaires sur l'évolution à long-terme des populations.**

IV - Prendre en compte les interactions entre les organismes, quelles conséquences sur le fonctionnement de l'écosystème ?

Les effets des accidents nucléaires sont généralement étudiés à l'échelle d'un individu ou de populations d'une même espèce, mais un écosystème ne se résume pas à une simple juxtaposition d'organismes. En effet, des interactions façonnent ces écosystèmes, allant de la prédation de certains mammifères aux mutualismes entre des bactéries et les racines de plantes en passant par la reproduction de plantes à fleurs par l'intermédiaire des pollinisateurs. Une direction de recherche particulièrement intéressante aujourd'hui vise à intégrer ces interactions dans l'étude des effets des rayonnements ionisants.

L'une des premières études sur les effets des rayonnements ionisants sur les écosystèmes et les interactions qui les constituent a été réalisée par Møller et al. (2012). Après avoir constaté une diminution de l'abondance d'oiseaux et d'insectes pollinisateurs dans les zones les plus contaminées, les auteurs se sont intéressés à l'abondance des jeunes arbres fruitiers. Puisque ces arbres sont dépendants des insectes pollinisateurs qui permettent à l'échange de pollen de se faire, et des oiseaux qui permettent la dispersion des graines, les auteurs ont alors fait l'hypothèse que ces diminutions d'abondances animales pouvaient induire une diminution de l'apparition de jeunes arbres fruitiers. Les résultats de cette étude montrent effectivement une diminution de l'abondance de jeunes arbres fruitiers en fonction de la contamination de l'environnement (des débits de doses ambiants sont compris entre 0,01 et 379,70 $\mu\text{Sv/h}$) et soulignent la dépendance de cette abondance des jeunes arbres fruitiers à la diminution des insectes pollinisateurs et des oiseaux frugivores. Ainsi, en plus de potentiels effets délétères des rayonnements ionisants sur ces arbres fruitiers, les interactions inter-espèces peuvent induire des effets, que l'on qualifie d'« **effets indirects** ».

Un exemple particulièrement intéressant et bien documenté d'effet indirect induit par les rayonnements ionisants est celui des petits papillons bleus (*Zizeeria maha*) de la préfecture de Fukushima. Depuis l'accident de Fukushima, de nombreuses études ont été menées sur ce papillon, montrant par exemple une augmentation des anomalies au niveau des ailes, des yeux, des antennes, des pattes ou encore des parties buccales des papillons échantillonnés dans les zones les plus contaminées (débits de doses ambiantes compris entre 0,08 et 3,09 $\mu\text{Sv/h}$) (Hiyama et al. 2012). Pour comprendre les mécanismes à l'origine de cet effet, des chercheurs ont élevé des chenilles en laboratoire en les alimentant avec leur plante hôte, le trèfle *Oxalis corniculata*. En alimentant des chenilles avec des trèfles provenant de milieux contaminés par l'accident, les auteurs ont observé des effets (par exemple des anomalies morphologiques) identiques à ceux observés sur le terrain. Cependant, lorsque les chenilles sont contaminées directement avec des radionucléides, sans passer par la contamination des trèfles, de tels effets ne sont plus observés (Gurung, 2018). Les auteurs de cette étude ont alors suspecté un effet indirect des rayonnements ionisants lié aux trèfles et à la modification de la composition du trèfle après contamination. L'étude la plus récente sur cette interaction papillon-trèfle met effectivement en évidence une modification de la composition en nutriments des feuilles de trèfle après contamination, avec notamment une diminution de la concentration en sodium (Sakauchi et al., 2021). Le lien entre la modification des nutriments présents dans les feuilles et les malformations attend encore d'être étudié mais cet exemple montre à quel point **des effets très spécifiques de la contamination par les radionucléides sur certains organismes peuvent potentiellement induire en cascade un ensemble de modifications sur d'autres organismes, et donc à l'ensemble de l'écosystème associé.**

Une question récente traitée par Mappes et al. (2019), consiste à se demander si l'impact d'une contamination sur des organismes peut être modulé par des effets indirects. Plus précisément, les effets des rayonnements ionisants sur des campagnols (*Myodes glareolus*) présents dans la zone contaminée de Tchernobyl peuvent-ils être modulés par un apport supplémentaire de nourriture ? Sans apport de nourriture, les auteurs ont observé que l'abondance des campagnols diminue avec une augmentation de l'exposition aux rayonnements ionisants (débits de doses ambiantes compris entre 0,01 to 95,55 $\mu\text{Sv/h}$). Un apport alimentaire supplémentaire a entraîné une augmentation de l'abondance des populations, mais uniquement dans les endroits où la contamination radioactive était faible ($< 1 \mu\text{Sv/h}$), alors que dans les zones à plus forte contamination, la supplémentation alimentaire n'a montré aucun effet détectable. Ainsi, les auteurs concluent qu'un apport alimentaire supplémentaire peut jusqu'à un certain point atténuer les effets néfastes d'un environnement contaminé par des radionucléides. De nouveau, cette étude met en évidence **l'importance de la prise en compte des interactions entre les organismes sur le terrain qui peuvent profondément influencer les relations entre l'exposition aux rayonnements ionisants et leurs effets**. Puisque les interactions entre organismes peuvent être impactées par l'exposition aux rayonnements ionisants, cela peut *in fine* affecter le fonctionnement de l'écosystème contaminé. Pour étudier ces effets, les grandes fonctions structurant le fonctionnement des écosystèmes telles que la décomposition de la matière végétale ont été étudiées dans la région de Tchernobyl.

Ainsi, Mousseau et al. (2014) ont mis en évidence une diminution du taux de décomposition des litières, et une augmentation de l'épaisseur de la litière au sol, en lien avec une augmentation de la radioactivité ambiante (le débit de dose absorbée est compris entre 0,09 et 240 $\mu\text{Gy/h}$). Ces résultats suggèrent un recyclage de la matière organique plus lent en réponse à un niveau de radioactivité ambiant plus élevé, possiblement à cause d'un impact négatif sur les communautés d'organismes décomposeurs (bactéries, champignons, faune du sol). A l'opposé, après avoir réalisé le même type d'expérimentation, une étude pilotée par l'IRSN a montré que le taux de décomposition des litières de feuilles augmentait avec l'accroissement du niveau de radiation absorbé (le débit de dose absorbée est compris entre 0,3 et 150 $\mu\text{Gy/h}$) par les organismes décomposeurs (Bonzom et al., 2016). Les auteurs proposent deux hypothèses pour expliquer ce résultat : (i) sous l'effet d'un stress modéré (ici des rayonnements ionisants) les organismes décomposeurs ont pu répondre à cette perturbation en augmentant leur survie et leur succès reproducteur, ce qui a conduit à une plus grande abondance des organismes décomposeurs dans les zones radiocontaminées. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet hormétique (Calabrese et Baldwin, 2002). (ii) les décomposeurs ont consommé préférentiellement la litière issue de zones non contaminée plutôt que la litière contaminée qui se trouvait initialement dans leur habitat (pour les besoins de l'expérience de la litière non contaminée a en effet été déposée au-dessus de la litière contaminée de la zone choisie pour l'étude). Certains paramètres comme le gradient de contamination, l'estimation de la dose, la nature des feuilles utilisées, etc., pourraient expliquer la contradiction entre les résultats de ces deux études.

La prise en compte de l'effet de la contamination de l'environnement suite aux accidents nucléaires sur le fonctionnement des écosystèmes reste, à ce jour, très marginale. Pour autant, il s'agit d'une perspective de recherche centrale, du fait notamment que du bon fonctionnement de ces écosystèmes dépendent un ensemble de services rendus par ces écosystèmes aux populations humaines (Millennium Ecosystem Assessment, 2005 ; IPBES, 2019). La question de ces « services écosystémiques » est une question de première importance dans le domaine plus général de l'étude des effets des changements globaux, et mériterait d'être plus largement intégrée à l'étude des conséquences des accidents nucléaires.

Références

- Aliyu, A., Evangelidou, N., Mousseau, T., et al. 2015. An overview of current knowledge concerning the health and environmental consequences of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (FDNPP) accident. *Environ Int.* 85:213-28. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.09.020>. Epub 2015 Sep 29. PMID: 26425805.
- Arnaise, S, Shykoff, JA, Møller, AP, Mousseau, TA, Giraud, T. 2020. Anther-smut fungi from more contaminated sites in Chernobyl show lower infection ability and lower viability following experimental irradiation. *Ecol Evol.* 10: 6409–6420. <https://doi.org/10.1002/ece3.6376>
- Baker, RJ, Dickins, B, Wickliffe, JK, et al. 2017. Elevated mitochondrial genome variation after 50 generations of radiation exposure in a wild rodent. *Evol Appl.* 10: 784–791 <https://doi.org/10.1111/eva.12475>
- Beaugelin-Seiller, K., Garnier-Laplace, J., Della-Vedova, C. et al. 2020. Dose reconstruction supports the interpretation of decreased abundance of mammals in the Chernobyl Exclusion Zone. *Sci Rep.* 10, 14083 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70699-3>
- Beresford, N. A., Barnett, C. L., Gashchak, S., Kashparov, V., Kirieiev, S. I., Levchuk, S., ... & Wood, M. D. (2021). Wildfires in the Chernobyl Exclusion Zone—risks and consequences. *Integrated Environmental Assessment and Management.* <https://doi.org/10.1002/ieam.4424>
- Bonzom, J-M., Hättenschwiler, S., Lecomte-Pradines, C., et al. 2016. Effects of radionuclide contamination on leaf litter decomposition in the Chernobyl exclusion zone. *Sci. Tot. Env.,* 562 : 596-603. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.006>
- Calabrese, E., Baldwin, L, 2002. Defining hormesis human and experimental. *Toxicology,* 21, 91–97.
- Cannon, G., Kiang, J., 2020. A review of the impact on the ecosystem after ionizing irradiation: wildlife population, *International Journal of Radiation Biology,* <https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1793021>.
- Car, C., Gilles, A., Armant, A., et al. Unusual evolution of tree frog populations in the Chernobyl exclusion zone. <https://doi.org/10.1101/2020.12.04.412114>
- Deryabina, T., Kuchmel, S., Nagorskaya, L., et al. 2015. Long-term census data reveal abundant wildlife populations at Chernobyl. *Current biology.* 25(19) : 824-826. (2015) <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.08.017>
- Fuller, N, Ford, AT, Lerebours, A, et al. 2019. Chronic radiation exposure at Chernobyl shows no effect on genetic diversity in the freshwater crustacean, *Asellus aquaticus* thirty years on. *Ecol Evol.* 2019; 9: 10135– 10144. <https://doi.org/10.1002/ece3.5478>
- Fuller, N., Ford, A., Nagorskaya L., et al. 2018. Reproduction in the freshwater crustacean *Asellus aquaticus* along a gradient of radionuclide contamination at Chernobyl. *Sci Total Environ.* 628-629:11-17. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.309>.
- Fuller, N., Smith, J., Nagorskaya, L., et al. 2017. Does Chernobyl-derived radiation impact the developmental stability of *Asellus aquaticus* 30 years on? *Sci Total Environ.* 576:242-250. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.097>.
- Geras' Kin, S. A., Fesenko, S. V., & Alexakhin, R. M. (2008). Effects of non-human species irradiation after the Chernobyl NPP accident. *Environment International,* 34(6), 880-897. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.12.012>
- Giraudeau, M., Bonzom, J-M, Ducatez, S., et al. 2018. Carotenoid distribution in wild Japanese tree frogs (*Hyla japonica*) exposed to ionizing radiation in Fukushima. *Scientific Reports.* 8(1) : 7438. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25495-5>.
- Gurung, R., Taira, W., Sakauchi, K., et al. 2019. Tolerance of High Oral Doses of Nonradioactive and Radioactive Caesium Chloride in the Pale Grass Blue Butterfly *Zizeeria maha*. *Insects* 10, 290. <https://doi.org/10.3390/insects10090290>
- Hayama, S., Tsuchiya, M., Ochiai, K. et al. 2017. Small head size and delayed body weight growth in wild Japanese monkey fetuses after the Fukushima Daiichi nuclear disaster. *Sci Rep.* 14;7(1):3528. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03866-8>.
- Hiyama, A., Nohara, C., Kinjo, S. et al. 2012. The biological impacts of the Fukushima nuclear accident on the pale grass blue butterfly. *Sci Rep* 2, 570 <https://doi.org/10.1038/srep00570>
- Horiguchi T., Kodama K., Kume G., Kang I.J. 2020. Delayed Recovery from Declines in the Population Densities and Species Richness of Intertidal Invertebrates Near Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. In: Fukumoto M. (eds) *Low-Dose Radiation Effects on Animals and Ecosystems.* Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8218-5_6
- Horiguchi, T., Yoshii, H., Mizuno, S. et al. 2016. Decline in intertidal biota after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami and the Fukushima nuclear disaster: field observations. *Sci Rep.* 6, 20416 (2016). <https://doi.org/10.1038/srep20416>
- IPBES, 2019. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo (editors). IPBES secretariat, Bonn, Germany.
- IRSN 2016. Adam-Guillermin C, Armant O, Bonzom J-M, Henner P, Lecomte C. 2016. Conséquences écologiques des accidents nucléaires de Tchernobyl et Fukushima. Rapport n° IRSN/PRP-ENV/SERIS/2016-006
- Itoh, M., Kajihara, R., Kato, Y. et al. 2018. Frequencies of chromosomal inversions in *Drosophila melanogaster* in Fukushima after the nuclear power plant accident. *PLoS One.* 13(2):e0192096. DOI: [10.1371/journal.pone.0192096](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192096)
- Kesäniemi, J, Boratyński, Z, Danforth, J, et al. 2018. Analysis of heteroplasmy in bank voles inhabiting the Chernobyl exclusion zone: A commentary on Baker et al. (2017) “Elevated mitochondrial genome variation after 50 generations of radiation exposure in a wild rodent.”. *Evol Appl.* 11: 820– 826. <https://doi.org/10.1111/eva.12578>

- Kesäniemi, J., Jernfors, T., Lavrinienko, A. et al. 2019. Exposure to environmental radionuclides is associated with altered metabolic and immunity pathways in a wild rodent. *Mol Ecol.* (20):4620-4635. <https://doi.org/10.1111/mec.15241>.
- Lerebours, A., Gudkov, D., Nagorskaya, L., et al. 2018. Impact of Environmental Radiation on the Health and Reproductive Status of Fish from Chernobyl. *Environ Sci Technol.* 52(16):9442-9450. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02378>.
- Lerebours, A., Robson, S., Sharpe, C., et al. 2020. Transcriptional Changes in the Ovaries of Perch from Chernobyl. *Environ Sci Technol.* 54(16):10078-10087. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02575>.
- Lyons, P., Okuda, K., Hamilton, M., et al. 2020. Rewilding of Fukushima's human evacuation zone. *Front Ecol Environ.* 18(3) : 127-134. <https://doi.org/10.1002/fee.2149>
- Mappes, T., Boratyński, Z., Kivisaari, K., Lavrinienko, A., Milinevsky, G., Mousseau, T. A., Møller, A. P., Tukalenko, E., and Watts, P. C.. 2019. Ecological mechanisms can modify radiation effects in a key forest mammal of Chernobyl. *Ecosphere* 10(4):e02667. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2667>
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- Møller, A. and Mousseau T. et al. 2013. Assessing effects of radiation on abundance of mammals and predator–prey interactions in Chernobyl using tracks in the snow. *Ecological Indicators.* 26 : 112-116. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.10.025>
- Møller, A., Hobson, K., Mousseau, T., et al. 2006. Chernobyl as a population sink for barn swallows : tracking dispersal using stable-isotope profiles. *Ecological Applications.* 16 : 1696-1705. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[1696:CAAPSF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[1696:CAAPSF]2.0.CO;2)
- Møller, A., Mousseau, T. 2006. Biological consequences of Chernobyl: 20 years on. *Trends Ecol Evol.* 21(4):200-7. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.01.008>.
- Møller, A., Mousseau, T. 2015. Strong effects of ionizing radiation from Chernobyl on mutation rates. *Sci Rep* 5, 8363. <https://doi.org/10.1038/srep08363>
- Møller, A.P., Barnier, F. & Mousseau, T.A. 2012. Ecosystems effects 25 years after Chernobyl: pollinators, fruit set and recruitment. *Oecologia* 170, 1155–1165. <https://doi.org/10.1007/s00442-012-2374-0>
- Møller, A. and Mousseau, T. 2016. Are Organisms Adapting to Ionizing Radiation at Chernobyl ? *Trends in Ecology & Evolution* 31 (4) : 281-289 <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.01.005>
- Mousseau, T.A., Milinevsky, G., Kenney-Hunt, J. et al. 2014. Highly reduced mass loss rates and increased litter layer in radioactively contaminated areas. *Oecologia* 175, 429–437. <https://doi.org/10.1007/s00442-014-2908-8>
- Newbold, L., Robinson, A., Rasnaca, I., et al. 2019. Genetic, epigenetic and microbiome characterisation of an earthworm species (*Octolasion lacteum*) along a radiation exposure gradient at Chernobyl. *Environmental Pollution*, 2019. 255, Part 1. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113238>
- Ochiai, K., Hayama, S., Nakiri, S. et al. 2014. Low blood cell counts in wild Japanese monkeys after the Fukushima Daiichi nuclear disaster. *Sci Rep.* 4:5793. <https://doi.org/10.1038/srep05793>.
- Ruiz-González, M., Czirják, G., Genevoux, P. et al. 2016. Resistance of Feather-Associated Bacteria to Intermediate Levels of Ionizing Radiation near Chernobyl. *Sci Rep.* 6 : 22969 <https://doi.org/10.1038/srep22969>
- Sakauchi, K., Taira, W., Toki, M., et al. (2021). Nutrient Imbalance of the Host Plant for Larvae of the Pale Grass Blue Butterfly May Mediate the Field Effect of Low-Dose Radiation Exposure in Fukushima: Dose-Dependent Changes in the Sodium Content. *Insects* 2021, 12, 149. <https://doi.org/10.3390/insects12020149>
- Shuryak, I. 2020. Review of resistance to chronic ionizing radiation exposure under environmental conditions in multicellular organisms. *J Environ Radioact.* 212:106128. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106128>.
- Taira, W., Hiyama, A., Nohara, C., et al. 2015. Ingestional and transgenerational effects of the Fukushima nuclear accident on the pale grass blue butterfly. *J Radiat Res.* 56 Suppl 1(Suppl 1):i2-18. <https://doi.org/10.1093/jrr/rrv068>.
- Taira, W., Nohara, C., Hiyama, et al. 2014. Fukushima's biological impacts: the case of the pale grass blue butterfly. *J Hered.* 105(5):710-22. <https://doi.org/10.1093/jhered/esu013>.
- Urushihara, Y., Suzuki, T., Shimizu, Y. et al. 2018. Haematological analysis of Japanese macaques (*Macaca fuscata*) in the area affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Sci Rep.* 8(1):16748. doi: 10.1038/s41598-018-35104-0.