



HAL
open science

Quelles conséquences à long-terme des accidents nucléaires de Tchernobyl et de Fukushima sur les organismes sauvages ? Vers une approche éco-évolutive

Clément Car, Loïc Quevarec, Jean-Marc Bonzom, Patrick Laloi

► To cite this version:

Clément Car, Loïc Quevarec, Jean-Marc Bonzom, Patrick Laloi. Quelles conséquences à long-terme des accidents nucléaires de Tchernobyl et de Fukushima sur les organismes sauvages ? Vers une approche éco-évolutive. 2021. hal-04587416

HAL Id: hal-04587416

<https://hal.science/hal-04587416>

Submitted on 24 May 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Quelles conséquences à long-terme des accidents nucléaires de Tchernobyl et de Fukushima sur les organismes sauvages ? Vers une approche éco-évolutive

Introduction

Les accidents nucléaires majeurs de Tchernobyl (26 avril 1986, Ukraine) et Fukushima-Daiichi (11 mars 2011, Japon) ont entraîné d'importants rejets radioactifs dans l'environnement (IAEA, 2006 ; Giraudeau, Bonzom *et al.*, 2018). Les radionucléides émis lors de ces accidents nucléaires se sont dispersés et redistribués dans l'environnement au fil des années. Dans les premiers temps la faune et la flore ont subi une exposition aiguë aux rayonnements ionisants (Encadré 1), en particulier dans les régions touchées par les retombées des centrales accidentées (Figure 1). Cette exposition a produit des effets délétères sur plusieurs espèces dans certains territoires contaminés (e.g. Geras'Kin *et al.*, 2008). Aujourd'hui, les organismes sauvages présents sur ces territoires restent exposés chroniquement aux rayonnements ionisants. Quels sont les effets de ces rayonnements sur les individus, les populations, le fonctionnement des écosystèmes ?

Encadré 1. Les radionucléides : des spécificités à prendre en compte

La particularité des radionucléides vient de leur propriété à émettre des rayonnements dits ionisants susceptibles de produire des effets sur les organismes. Les effets des rayonnements ionisants sont exprimés non pas vis-à-vis de la concentration des radionucléides dans les milieux, comme c'est souvent le cas pour les substances chimiques conventionnelles mais au regard de la quantité d'énergie reçue par les organismes exposés. Il s'agit donc de déterminer, pour un organisme donné et des conditions d'exposition définies, la quantité d'énergie déposée dans cet organisme du fait de son exposition aux rayonnements émis par le(s) radionucléide(s) considéré(s). La faune et la flore présentes sur ces territoires radio-contaminés sont donc exposées aux rayonnements ionisants selon 2 voies : une exposition externe induite par les rayonnements émis par les radionucléides présents dans l'environnement (sol, eau, etc.), une exposition interne induite par les radionucléides ingérés, inhalés ou absorbés (passage percutané) par la flore et la faune sauvages. Il est donc nécessaire de prendre en compte l'ensemble des voies d'exposition possibles d'un organisme pour déterminer la quantité d'énergie qu'il reçoit (Beaugelin-Seiller, 2011 ; CEA EQ 2015 ; IRSN 2021).



Figure 1. Exemple de paysages dans la région de Tchernobyl et de Fukushima. Une forêt dans la zone d'exclusion de Tchernobyl (Ukraine, novembre 2010) où ont été réalisées des études sur les effets de la radio-contamination sur la décomposition des litières de feuilles (Bonzom *et al.*, 2016) (photo de gauche). Une rizière entourée de forêts dans la préfecture de Fukushima (Japon, juin 2013), le lieu de reproduction de plusieurs espèces de grenouilles, dont la rainette (*Dryophytes japonicus*) étudiée dans Giraudeau, Bonzom *et al.*, 2018 (photo de droite). Photos : Jean-Marc Bonzom/IRSN.

I - Une première indication : l'abondance des organismes

Une première méthode employée pour estimer l'état de ces populations est l'étude de l'abondance des populations de différents groupes d'organismes. Les résultats sont contrastés en fonction de la région (Tchernobyl, Fukushima) et du groupe biologique considéré (oiseaux, insectes, mammifères, ...). La levée d'une grande partie des pressions humaines dans ces régions par la mise en place de « zones d'exclusion » (c.-à-d., la population civile a été évacuée de ces zones) a favorisé la présence par exemple de grands mammifères (élans, chevreuils, sangliers, loups dans la zone d'exclusion de Tchernobyl (Deryabina *et al.*, 2015)). Néanmoins, d'autres études montrent dans la zone d'exclusion de Tchernobyl une diminution de l'abondance de certains mammifères en fonction de la contamination du milieu (Møller et Mousseau, 2013, Beaugelin *et al.*, 2020). Dans la préfecture de Fukushima, l'abondance des mammifères n'apparaît au contraire pas dépendre de la contamination du milieu ; les résultats montrent que de nombreuses espèces de mammifères sont plus abondantes dans les zones où l'activité humaine est limitée (Lyons *et al.*, 2020). Cette dernière étude 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.**

Ces mesures d'abondance permettent d'avoir un premier aperçu de l'état des populations, mais elles ne permettent pas à elles seules d'apprécier l'état de santé des individus. De plus, si la reproduction des individus présents dans les zones les plus contaminées est impactée, un système qualifié de « source-puit » (Dias, 1996), 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 (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 plusieurs années après les accidents ?

Des études à l'échelle individuelle ont mis en évidence des effets liés à la radio-contamination de l'environnement comme du stress oxydant, des dommages génétiques, une dépression du système immunitaire, des malformations de spermatozoïdes, un ralentissement de la capacité des cellules à se multiplier, de l'albinisme partiel, des cataractes, une perturbation de l'expression de gènes impliqués dans les grandes fonctions, ... (p.ex. 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 ; campagnol : Kesäniemi *et al.*, 2019 ; papillon : Taira *et al.*, 2014 ; poisson : Lerebours *et al.*, 2020).

Cependant, 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, Bonzom *et al.*, 2018) (Fig.1). Certaines études n'ont au contraire pas mis en évidence d'impacts négatifs des rayonnements ionisants à l'échelle individuelle (p. ex. crustacé : Fuller *et al.*, 2017, 2018 ; grenouille : Giraudeau, Bonzom *et al.*, 2018 ; mouche du vinaigre : Itoh *et al.*, 2018).

Malgré l'existence de certains effets, à partir de ce type d'études à l'échelle individuelle, il reste difficile d'estimer leurs conséquences sur l'état des populations et leur capacité à persister dans les régions radio-contaminées.

III – Des effets sur l'évolution des populations ?



Hyla orientalis
(J.-M. Bonzom/IRSN)

Au sein d'une 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. Au fil des générations, la fréquence de ces individus sélectionnés et leurs descendants peut alors s'accroître 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. Toutefois, bien que le processus d'adaptation soit souvent mentionné (Møller *et al.*, 2016) pour interpréter certains résultats obtenus sur le terrain, il reste très difficile à démontrer. Pour identifier une adaptation, il est nécessaire notamment de démontrer qu'elle persiste même après plusieurs générations placées dans un environnement non contaminé et qu'elle confère un avantage pour la survie et/ou la reproduction de l'organisme. Dans le cas de l'accident de Tchernobyl, très peu d'études en ont fait réellement la démonstration. Parmi elles, Ruiz-Gonzalez *et al.* (2016) ont isolé des bactéries associées aux plumes d'hirondelles rustiques capturées dans 3 sites différemment contaminés dans la région de Tchernobyl et dans un site contrôle au Danemark. Les auteurs de cette étude 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 $\mu\text{Gy/h}$). Plus récemment, une étude cherchant à tester l'hypothèse de l'adaptation a été réalisée dans la région de Tchernobyl. Arnaise *et al.* (2020) se sont intéressés à une potentielle adaptation de champignons (*Microbotryum lychnidis-dioicae*) infectant les parties reproductrices d'une plante à fleur. 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 étaient adaptés aux rayonnements depuis l'accident.

Si de potentielles 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 stressseurs. Dans le cas où d'autres modifications environnementales (climatiques, autres pollutions, ...) apparaîtraient dans les zones contaminées, il est possible que des organismes adaptés aux rayonnements ionisants soient moins susceptibles de supporter de nouveaux changements environnementaux (Bergelson et Purrington, 1996 ; Coustau, *et al.*, 2000). Une importante direction de recherche aujourd'hui est donc de caractériser le potentiel des populations à supporter des modifications futures de l'environnement. Ce potentiel peut être notamment 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 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 (Kesäniemi *et al.*, 2018). Une deuxième étude de la diversité génétique réalisée sur des populations de rainettes vertes (*Hyla orientalis*) montre également 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 (Car *et al.*, 2021). Cette étude conclue également à une augmentation du taux de mutation

dans cette zone, et indique que la diversité obtenue 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, a persisté dans la zone. Les autres ont probablement disparus du fait des effets des rayonnements ionisants, comme l'apparition de mutations délétères. Au contraire, d'autres études sur un crustacé aquatique (*Asellus aquaticus*) ou des vers de terre (*Octolasion lacteum*) ne montrent pas de différence de diversité en fonction du niveau de contamination radioactive (Fuller *et al.*, 2019 et Newbold *et al.*, 2019). Ce qui pourrait s'expliquer par une absence de modification des processus évolutifs, ou bien une compensation de processus ayant des effets antagonistes sur la diversité génétique (par exemple la dérive génétique et les mutations).

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 à la suite de 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 évolutif de cet effet 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 majeurs de Tchernobyl et de Fukushima sur l'évolution à long-terme des populations impactés par la radio-contamination.** L'étude des processus évolutifs ayant cours dans les zones contaminées et mobilisant diverses méthodologies (généralisation de la diversité génétique à de nombreuses espèces, utilisation de marqueurs génétiques donnant une image plus complète du génome (omiques), comparaison génotypes/phénotypes, etc.) seraient nécessaires à mettre en place de manière à mieux caractériser notamment la viabilité de ces 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 des individus ou de populations d'une même espèce, mais un écosystème ne se résume pas à une simple juxtaposition d'organismes. Une direction de recherche particulièrement intéressante aujourd'hui vise à intégrer ces interactions dans l'étude des effets des rayonnements ionisants. Par exemple, après avoir constaté une diminution de l'abondance d'oiseaux et d'insectes pollinisateurs dans les zones les plus contaminées de la zone d'exclusion de Tchernobyl, Møller *et al.*, (2012) se sont intéressés à l'abondance des jeunes arbres fruitiers. Puisque ces arbres sont dépendants à la fois des insectes pour la pollinisation et des oiseaux pour 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 en fonction de la contamination radioactive de l'environnement et soulignent leur dépendance aux insectes pollinisateurs et aux oiseaux frugivores. Ainsi, en plus de potentiels effets délétères des rayonnements ionisants sur ces arbres, les interactions inter-espèces peuvent induire des « **effets indirects** ». Dans le cas de petits papillons bleus (*Zizeeria maha*) de la préfecture de Fukushima, de nombreuses études ont été menées depuis l'accident, 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 (Hiyama *et al.*, 2012). Pour comprendre les mécanismes à l'origine de ces effets, Gurung *et al.* (2018) ont élevé des chenilles en laboratoire en les alimentant avec leur plante hôte *Oxalis corniculata*. En alimentant des chenilles avec des oxalis 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. A l'inverse, lorsque les chenilles sont contaminées directement avec des radionucléides et alimentées avec des oxalis non contaminées, ces anomalies ne sont pas observées. Sakauchi *et al.*, (2021) ont alors suspecté un effet indirect des

rayonnements ionisants lié aux oxalis et à la modification de leur composition en nutriments après contamination, et ont pu notamment montrer une diminution de leur concentration en sodium. **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.**

Dans certains cas, la modification des interactions peut ne pas induire d'effet indirect strict, mais peut moduler la réponse des organismes aux rayonnements ionisants. Mappes *et al.* (2019) se sont par exemple demandé si les effets des rayonnements ionisants sur des campagnols (*Myodes glareolus*) présents dans la zone contaminée de Tchernobyl pouvaient être modulés par un apport supplémentaire de nourriture. Sans apport de nourriture, les résultats ont montré une diminution de l'abondance avec l'augmentation des rayonnements ionisants, alors qu'avec un apport en nourriture au contraire on observait une augmentation de l'abondance dans les zones les moins contaminées et aucun effet dans les zones les plus contaminées. 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 telles que la décomposition de la matière végétale ont été étudiées dans la région de Tchernobyl. Mousseau *et al.* (2014) ont mis en évidence une diminution du taux de décomposition des litières de feuilles, et une augmentation de l'épaisseur de la litière au sol, en lien avec une augmentation de la radioactivité ambiante. 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, Bonzom *et al.* (2016) ont montré que le taux de décomposition des litières de feuilles augmentait avec l'accroissement du niveau de radiation absorbé par les organismes décomposeurs (Fig.1). Les auteurs proposent deux hypothèses pour expliquer ce résultat : (i) sous l'effet des rayonnements ionisants les organismes décomposeurs ont pu répondre en augmentant leur survie et leur succès reproducteur, et *de facto*, leur abondance dans les zones contaminées. (ii) Les décomposeurs ont consommé préférentiellement la litière déposée expérimentalement (issue de zones non contaminées) plutôt que la litière locale contaminée. Certains paramètres comme le gradient de contamination, l'estimation de la dose ou encore la nature des feuilles utilisées pourraient expliquer la contradiction entre les résultats de ces deux études.

La prise en compte de l'effet de la contamination radioactive de l'environnement à la suite des accidents nucléaires majeurs sur les interactions et le fonctionnement des écosystèmes reste, à ce jour, très marginale. Pour autant, il s'agit d'un axe de recherche central pour une évaluation holistique des conséquences écologiques d'une radio-contamination de l'environnement.

Comprendre et mesurer les conséquences d'une radio-contamination de l'environnement sur l'évolution des populations ainsi que sur le fonctionnement des écosystèmes apparaît donc essentiel pour mieux défendre le vivant et déterminer de manière éclairée des critères de protection assurant le bon état écologique des écosystèmes, cible de la protection. Ce type d'approche bénéficierait à l'étude des effets de l'ensemble des modifications environnementales d'origine anthropique (pollution diverses, dérèglement climatique, ...).

Contacts

Clément Car, Loïc Quevarec, Jean-Marc Bonzom, Patrick Laloi

IRSN – Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire
Laboratoire de recherche sur les effets des radionucléides sur les écosystèmes (LECO)/PSE-ENV/SRTE,

Centre de Cadarache-B.P. 3 – Bât 183 –
13115 St Paul Lez Durance, France

Courriels : clement.car@irsn.fr ; loic.quevarec@irsn.fr ;
jean-marc.bonzom@irsn.fr ; patrick.laloi@irsn.fr



Bibliographie citée

- 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.
- Arnaise, S, Shykoff, JA, Møller, AP, et al. 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.
- 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.
- Beaugelin-Seiller (2011). IRSN - Fiche radionucléide environnement : dosimétrie environnementale.
- 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.
- Bergelson, J., & Purrington, C. B. 1996. Surveying patterns in the cost of resistance in plants. *Am. Nat.*, 148, 536–558.
- 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.
- Cannon, G., Kiang, J., 2020. A review of the impact on the ecosystem after ionizing irradiation: wildlife population, *Int. J. Radiat. Biol.*
- Car, C., Gilles, A., Armant, O., et al. 2021. Unusual evolution of tree frog populations in the Chernobyl exclusion zone. *Evol. Appl.*, 00, 1– 17.
- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC (2015). Procédure d'évaluation du risque radiotoxique pour l'environnement, Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 28 p. et annexes.
- Coustau, C., Chevillon, C., & French-Constant, R. 2000. Resistance to xenobiotics and parasites: Can we count the cost? *Trends Ecol. Evol.*, 15, 378–383.
- Deryabina, T., Kuchmel, S., Nagorskaya, L., et al. 2015. Long-term census data reveal abundant wildlife populations at Chernobyl. *Curr. Biol.* 25(19): 824-826.
- Dias, P. C. 1996. Sources and sinks in population biology. *Trends Ecol. Evol.*, 11(8), 326–330.
- 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.
- 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.
- 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.
- Geras'Kin, S. A., Fesenko, S. V., & Alexakhin, R. M. 2008. Effects of non-human species irradiation after the Chernobyl NPP accident. *Environ. Int.* 34(6), 880-897.
- 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. *Sci. Rep.* 8(1): 7438.
- 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.
- 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.
- 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.
- IAEA (2006). Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Environment" (EGE), International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IRSN (2016). Adam-Guillermin C, Armant O, Bonzom J-M, et al. 2016. Conséquences écologiques des accidents nucléaires de Tchernobyl et Fukushima. Rapport n° IRSN/PRP-ENV/SERIS/2016-006.
- IRSN (2021). Guide méthodologique pour l'évaluation du risque radiologique pour la faune et la flore sauvages Concepts, éléments de base et mise en œuvre au sein de l'étude d'impact. Rapport IRSN/2021-00838.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Lyons, P., Okuda, K., Hamilton, M., et al. 2020. Rewilding of Fukushima's human evacuation zone. *Front Ecol Environ.* 18(3) : 127-134.
- Mappes, T., Boratyński, Z., Kivisaari, K., et al. 2019. Ecological mechanisms can modify radiation effects in a key forest mammal of Chernobyl. *Ecosphere* 10(4): e02667.
- 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. *Ecol. Indic.* 26: 112-116.
- Møller, A., Hobson, K., Mousseau, T., et al. 2006. Chernobyl as a population sink for barn swallows : tracking dispersal using stable-isotope profiles. *Ecol. Appl.* 16 : 1696-1705.
- Møller, A., Mousseau, T. 2006. Biological consequences of Chernobyl: 20 years on. *Trends Ecol Evol.* 21(4):200-7.
- Møller, A., Mousseau, T. 2015. Strong effects of ionizing radiation from Chernobyl on mutation rates. *Sci Rep* 5, 8363.
- Møller, A.P., Barnier, F. & Mousseau, T.A. 2012. Ecosystems effects 25 years after Chernobyl: pollinators, fruit set and recruitment. *Oecologia* 170, 1155–1165.
- Møller, A. and Mousseau, T. 2016. Are Organisms Adapting to Ionizing Radiation at Chernobyl? *Trends Ecol. Evol.* 31 (4): 281-289.
- 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.
- 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. *Environ. Pollut.* 2019. 255, Part 1.
- 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.
- Ruiz-González, M., Cziráj, G., Genevaux, P. et al. 2016. Resistance of Feather-Associated Bacteria to Intermediate Levels of Ionizing Radiation near Chernobyl. *Sci Rep.* 6 : 22969.
- 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.
- 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.
- 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.