

NOTE DE LECTURE

Analyse par l'IRSN d'une étude ayant mis en évidence des défauts morphologiques sur des populations de pins japonais autour de la centrale de Fukushima - publiée dans Nature Scientific Reports le 28 août 2015

[Watanabe Y., Ichikawa S., Kubota M., Hoshino J., Kubota Y., Maruyama K., Fuma S., Kawaguchi I., Yoschenko V.I., Yoshida S. Morphological defects in native Japanese fir trees around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Sci. Rep.*, 5, 13232; doi: 10.1038/srep13232 (2015).]

Les laboratoires de l'IRSN sont impliqués dans plusieurs coopérations scientifiques visant à étudier l'impact sur la faune et la flore de la contamination radioactive de l'environnement consécutive à un accident nucléaire majeur. Notamment, les travaux conduits en collaboration avec les équipes du laboratoire international de radioécologie (IRL) implanté à Slavutych (Ukraine) s'intéressent aux conséquences environnementales de l'accident de Tchernobyl dans la zone d'exclusion de la centrale, près de 30 ans après. L'IRSN conduit également des études dans la zone des 80 km autour de la centrale de Fukushima Daiichi, études concernant les effets biologiques constatés sur diverses espèces animales (grenouilles, oiseaux) ou sur le cycle des radionucléides issus des retombées de l'accident au sein des écosystèmes forestiers (projet ANR RSNR AMORAD). L'Institut poursuit une veille scientifique sur les principales publications scientifiques dans ces domaines, à l'instar de la synthèse des données disponibles relatives aux effets d'irradiations expérimentales *in situ* ou de conséquences d'accidents sur les communautés végétales (Henner et Geras'kin, 2010¹).

A ce titre, l'Institut propose une analyse d'une publication récente ayant reporté des défauts dans la croissance de populations de pins japonais impactées par l'accident de Fukushima.

Ce que l'on sait- Les connaissances sur les effets des rayonnements ionisants sur les communautés végétales naturelles sont en grande partie issues d'études menées dans la zone d'exclusion de Tchernobyl. 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, et a conduit progressivement à la création de nouvelles niches écologiques ouvertes à des espèces immigrant dans la zone. Chez les végétaux terrestres plus spécifiquement, dans les premières semaines après l'accident, apparaît la « forêt rousse » où 90% des pins, espèce très radiosensible, meurent en raison de la dose absorbée variant de 10 à 20 Gy. Les effets sont exacerbés en raison de la période à laquelle s'est produit l'accident, coïncidant avec la pleine reprise de 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 de la germination des graines de diverses espèces, ainsi qu'une diminution de la vitalité de certains pollens (Geras'kin *et al.*, 2008)². Dans les zones fortement contaminées où les conifères ont pu persister, depuis 1993, de 50 à 60 % des jeunes conifères âgés de 2 à 9 ans présentent un développement anormal (Zelena *et al.*, 2005)³. Tout ceci s'est traduit par une diminution de la diversité et de l'abondance de certaines espèces, ce d'autant plus que la zone était fortement contaminée (Suvorova *et al.*, 1993)⁴. Finalement, une sélection s'est opérée avec l'élimination des individus les plus radiosensibles, et seuls

¹ Henner P., Geras'kin S. (2010) State-of-knowledge regarding the effects of ionizing radiation on plant communities: Pre-requisite for the definition of experimental studies on Chernobyl exclusion zone. Final report of TRASSE 2009-1B project, report IRSN/DEI-SECRE n° 10-58.

² Geras'kin SA, Fesenko SV, Alexakhin RM (2008). Effects of non-human species irradiation after the Chernobyl NPP accident. *Environment International* 34, 880-897.

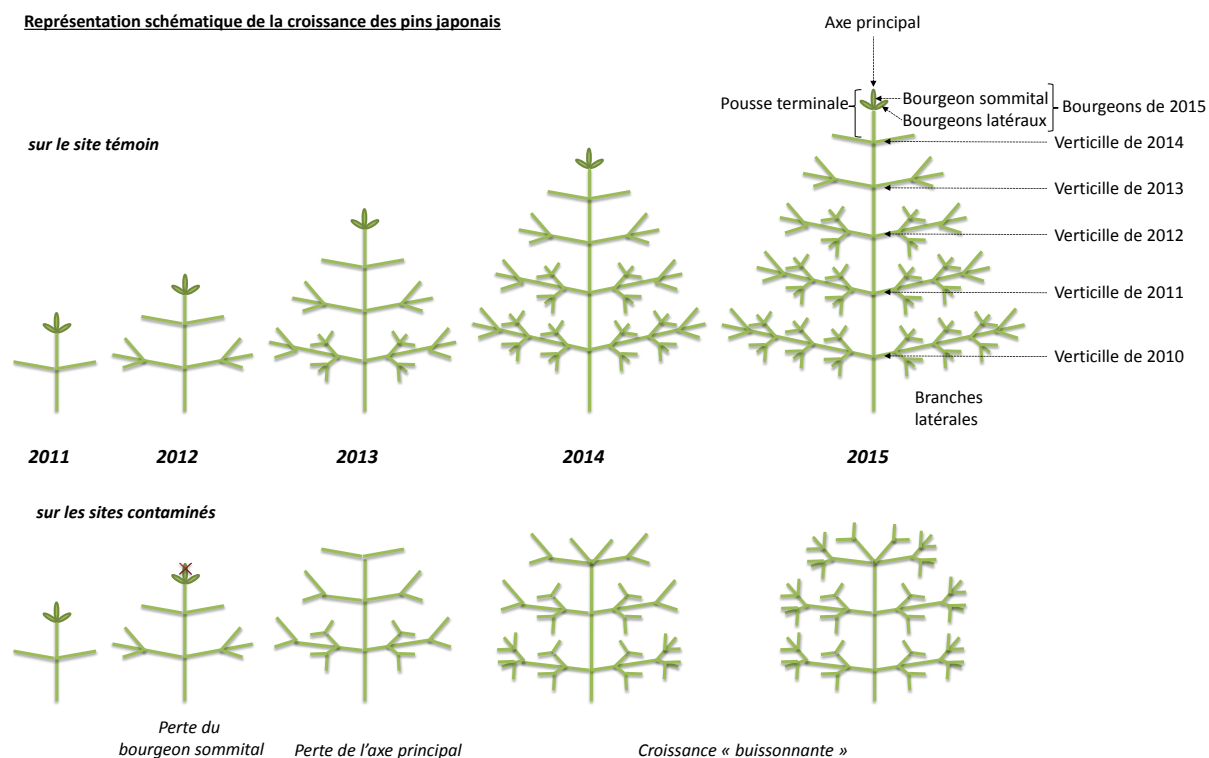
³ Zelena L, Sorochinsky B, vonS Arnold, vanL Zyl, Clapham DH (2005). Indications of limited gene expression in *Pinus sylvestris* trees from the Chernobyl region. *Journal of Environmental Radioactivity*, 84 : 363-373.

⁴ Suvorova LI, Spirin DA, Martyushov VZ, Smirnov EG, Tarasov OV, Shein GP (1993). Assessment of biological and ecological consequences of radioactive contamination of biogeocenoses. In: YuA Izrael, Editor, *Radiation aspects of the Chernobyl accident* vol. 2, Hydrometeoizdat, St. Petersburg, 321-325.

les individus et les espèces génétiquement les plus aptes à vivre dans un tel environnement ont persisté (Geras'kin *et al.*, 2008).

Description sommaire de l'étude- Les analyses ont été conduites en janvier 2015 sur 4 sites forestiers (1 témoin + 3 contaminés) composés de forêts mixtes feuillus/conifères à dominante de feuillus pour 3 des sites. La particularité de l'espèce analysée, le pin japonais (*Abies firma*) est de pouvoir se développer en sous-bois, ce qui fait que la population analysée comporte à la fois des arbres préexistants à l'accident et des individus ayant commencé leur développement après (hauteur des individus comprise entre 0,4 et 5 m). Sur chaque site, 10 à 12 parcelles de 10 m de côté sont délimitées. Des mesures sont effectuées sur tous les pins japonais présents dans chaque parcelle. Le principal paramètre mesuré est la perte de l'axe principal (disparition du bourgeon sommital au profit des bourgeons latéraux, voir figure). Elle est regardée dans les 5 derniers verticilles (étages de végétation latéraux) de l'arbre, permettant de dater l'apparition des dommages entre 2010 et 2014 (1 verticille/an). Le nombre de branches latérales de chaque verticille est également analysé. L'analyse des données concerne la fréquence d'apparition de l'anomalie ou le nombre de branches latérales pour chaque année en fonction des sites. Chaque site contaminé est comparé au site témoin et sur chaque site les résultats pour l'année n ($n > 2010$) sont comparés à ceux de 2010, via des tests statistiques *ad hoc*. Le débit de dose ambiant de chaque parcelle est défini comme la moyenne des mesures faites en janvier 2015 à 1 m du sol aux quatre coins et au centre de celle-ci. Le site témoin présente un débit de dose ambiant moyen de $0.13 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ et les sites contaminés de 6.85, 19.6 et $33.9 \mu\text{Sv.h}^{-1}$.

Représentation schématique de la croissance des pins japonais



Principales conclusions des auteurs- Une augmentation significative de la fréquence de perte de l'axe principal (croissance verticale) est observée pour les sites contaminés à partir de 2012 (en 2011, cette tendance n'est pas significative), tandis que la fréquence d'apparition de ce type de dommage ne varie pas sur le site non contaminé. Le pic d'apparition des dommages est mesuré en 2013 : par exemple, près de 90 % des arbres sans anomalie en 2012 présentent un dommage sur le site le plus contaminé. En 2014, la fréquence d'apparition des dommages diminue : par exemple pour le site le plus contaminé, 70% des arbres sans anomalie en 2013, présentent ce défaut en 2014. La fréquence des dommages augmente avec la valeur du débit de dose ambiant ce qui, selon les auteurs, suggère un lien avec le niveau d'exposition aux rayonnements ionisants. Cependant les auteurs restent prudents dans leurs conclusions étant donné que la perte de l'axe principal est un mécanisme non spécifique de l'effet des radiations ionisantes (comme le montre le faible niveau de dommages sur les sites témoins et avant 2011) et qu'un décalage temporel d'un an est constaté entre le pic d'exposition et le pic de dommages. De plus les mécanismes biologiques sous-jacents et leur lien avec la dose

cumulée par l'arbre et sa répartition (dose externe ou interne) sont peu connus, ce qui ne permet pas d'établir un lien de causalité robuste.

Analyse de cette publication par l'IRSN- Ce travail sur les pins de la zone impactée par l'accident de Fukushima est très intéressant car il a permis de collecter des données sur les processus de développement pouvant avoir une incidence sur une fonction physiologique majeure (la croissance), dès le début de la phase post-accidentelle avec une comparaison à la situation pré-accidentelle. Son principal point fort réside dans le choix de l'espèce, un conifère, ceux-ci étant connus pour leur forte radiosensibilité.

Avant d'analyser la portée scientifique des résultats présentés, une analyse de la pertinence méthodologique mise en œuvre est nécessaire. Entre 100 et 200 arbres sont analysés sur chaque site, échantillonnés sur une dizaine de parcelles par site et ce de manière exhaustive sur chaque parcelle, ce qui apparaît pertinent pour ce type d'étude. Les auteurs ne sur-interprètent pas leurs résultats et restent prudents quant aux conclusions concernant le lien de causalité entre niveau d'apparition des dommages mis en évidence et débit de dose ambiant. Cette prudence est tout à fait appropriée, étant donné que cette étude présente un certain nombre de faiblesses méthodologiques (traitements statistiques et estimation de l'exposition), par ailleurs classiquement reportées pour ce type d'étude de terrain :

- les analyses statistiques réalisées dans cette étude souffrent de fortes lacunes. Premièrement, les données sont comparées entre sites uniquement en fonction du débit de dose ambiant, alors que d'autres facteurs (type de sol, structure de la forêt...) pourraient également expliquer des différences de croissance des pins entre les sites. Par ailleurs, les données sont analysées au travers d'une analyse très simple de variance, ce qui n'est pas approprié : cette étude nécessiterait l'usage de modèles linéaires généralisés mixtes (GLMM) au lieu de modèles linéaires, l'usage de lois de distribution statistiques en adéquation avec la nature des données (loi de Poisson pour le nombre de branches latérales), ainsi que la prise en compte de la variabilité liée à l'échantillonnage par parcelle.
- comme le précisent les auteurs, la mesure du débit de dose ambiant à 1 m du sol en 2015 n'est pas suffisante pour apprécier l'exposition réelle (externe et interne) de chaque individu, sachant que celle-ci va pouvoir varier selon l'âge/taille des individus et la structure de la forêt. Vu la complexité des phénomènes biologiques sous-jacents à l'effet observé, cette information pourrait se révéler critique. Il serait ainsi intéressant de compléter les données acquises par des données de taille et d'âge des individus, des données relatives à la contamination de la couche de surface du sol et d'irradiation à hauteur de bourgeon sommital, ainsi qu'une évaluation de la charge en radionucléides des structures végétales représentatives de chaque étage, de sorte à évaluer de manière plus précise l'évolution temporelle des doses externe et interne absorbées par la partie sommitale de chaque individu au sein de la population.

Malgré ces faiblesses méthodologiques, l'augmentation des anomalies mise en évidence dans cette étude semble cohérente avec la littérature décrivant les effets des rayonnements ionisants sur les végétaux. Dans les études conduites à Tchernobyl, des anomalies de fonctionnement des bourgeons chez les pins ont été observées, conduisant à des segments plus courts et une croissance sous forme « buissonnante ». Comme souligné par les auteurs, le manque de connaissances sur les mécanismes sous-jacents n'aide pas à la compréhension des dommages mis en évidence. Les connaissances existantes dans la littérature sur des pins irradiés suggèrent que la radiosensibilité des bourgeons ne dépend pas de la taille des arbres et aucun résultat ne pointe vers une plus grande sensibilité des bourgeons sommitaux par rapport aux bourgeons latéraux. Les connaissances acquises sur les pins à Tchernobyl ont montré des anomalies chez 50-60% des conifères de 2 à 9 ans depuis 1993 au niveau des sites très contaminés (Zelena *et al.*, 2005). Les fréquences rapportées dans cette étude sont donc proches. Afin de compléter l'analyse, il serait intéressant de disposer des données de croissance de chaque segment annuel entre 2010 et 2015. Par ailleurs, s'agissant de l'inhibition de l'axe de croissance principal, il serait pertinent de s'intéresser aux effets sur les hormones de croissance, notamment l'Acide Indole Acétique, car cette hormone est directement impliquée dans le maintien de l'axe principal via sa sécrétion par le bourgeon terminal. En effet, certains auteurs auraient montré (voir références citées dans

Chandorkar et Clark, 1986⁵) que l'enzyme impliquée dans la conversion de l'indole acétaldéhyde en acide indole acétique est particulièrement radiosensible. De plus, les valeurs de débit de dose présentées comme létales pour les bourgeons dans les études post-Tchernobyl sont de plusieurs dizaines de mGy/h, beaucoup plus élevées que celles rapportées ici et les bourgeons latéraux ne sont pas touchés ce qui pointe vers d'autres mécanismes que la mort du bourgeon ou la destruction du méristème. Des effets proches ont été constatés à Tchernobyl sur les pins pour des niveaux de dose supérieurs à ceux rapportés dans cette étude. Chandorkar et Clark (1986) ont montré des effets sur des pins plantés sur un site de stockage de déchets pour un débit de dose (externe prépondérante) de 90 µGy/h, pourtant considéré alors comme potentiellement sans effet. De la même manière, les débits de doses présentant un effet sur les pins dans la présente étude sont du même ordre de grandeur que la gamme de variation des débits de dose correspondant à une très faible probabilité d'apparition d'effets délétères chez les individus publiée par la CIPR 108 (soit 4 à 40 µGy/h). Il est donc difficile de conclure au vu de ces différents résultats voire de comparer les études. Un des enseignements de l'analyse bibliographique de l'IRSN en 2010 (Henner et Geras'kin, 2010) est que la sensibilité des espèces en milieu naturel à l'irradiation gamma semblait être plus forte que celle enregistrée lors d'étude en conditions contrôlées. Trois raisons principales peuvent être identifiées : l'évaluation très difficile de la dose réelle absorbée par les individus sur site (mesure limitée au niveau de dose ambiant à une distance donnée du sol), le manque de données d'effets pour les situations d'exposition chronique et enfin l'existence d'effets indirects en milieu naturel par rapport à des études en conditions contrôlées. Par exemple, la modification des compétitions entre individus ou espèces, le changement de lumière et de température lié à la perte du feuillage ou de la strate la plus élevée, les modifications de fertilité du sol liés aux changements de la microflore du sol et de son fonctionnement, peuvent générer des stress additionnels qui vont modifier la capacité à répondre au seul stress direct lié aux radionucléides. Ce dernier point plaide d'ailleurs pour la prise en compte de facteurs autre que le niveau de débit de dose ambiant dans les études sur site.

Il est fort probable que les effets mesurés et leurs dynamiques temporelles résultent d'un ensemble complexe d'effets directs et indirects. Dans ce contexte, l'établissement d'un lien de causalité entre doses et effets biologiques, ainsi que la comparaison des résultats de cette étude réalisée à Fukushima avec ceux obtenus à Tchernobyl, ne pourront être réalisés qu'à la lumière d'une estimation robuste des expositions, l'identification des facteurs confondants et l'utilisation de méthodes statistiques appropriées.

⁵ Chandorkar K.R., Clark G.M. (1986) Physiological and morphological responses of *Pinus strobus* L. and *Pinus sylvestris* L. seedlings subjected to low-level continuous gamma irradiation at a radioactive waste disposal area. *Environmental and Experimental Botany*, 26(3) : 259-270.