

3 FORMULES AU CHOIX



À renvoyer accompagné de votre règlement à :

PAG20STD



**OUI, je m'abonne
pour 1 an à** **POUR LA SCIENCE**

1

FORMULE
PAPIER

- 12 n° du magazine papier

59€
Au lieu de

~~82.80€~~

01A59E



FORMULE **PAPIER**
+ **HORS SÉRIE**

- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

79€

Au lieu de
114 ~~40€~~

P1A79E



FORMULE INTÉGRALE

- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

996

99€
Au lieu de
~~174,16€~~

11A99E

☐ M. ☐ Mme

Nom: Prénom:

Adresse:

Code postal | | | | | Ville:

Téléphone | | | | | | | | |

Email : (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science

☐ OUI ☐ NON☐ **Par chèque à l'ordre de Pour la Science**☐ Carte bancaire

Nº

--	--	--	--

--	--	--	--

--	--	--	--

--	--	--	--

Date d'expiration Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire:

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pourlascience.fr>. Photos non contractuelles.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société *Pour la Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour la Science* ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à *Pour la Science*. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://lebrand.fr/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.



Fukushima

Que devient le césium radioactif dans les forêts ?

CONTEXTE :

> Les accidents nucléaires graves de Tchernobyl et Fukushima ont dispersé des éléments radioactifs sur de vastes territoires. Passé la phase d'urgence de gestion de crise et de protection des populations vient la problématique de la contamination de l'environnement et de ses effets à plus long terme sur l'homme et les écosystèmes. Si la gestion des surfaces agricoles et

urbanisées est maintenant assez bien connue, celle des forêts, plus complexe, nécessite une connaissance fine des mécanismes de contamination et de recyclage de la radioactivité. À ce titre, les forêts japonaises particulièrement impactées par l'accident de la centrale de Fukushima en 2011 font l'objet d'un programme de recherche.

Cahier partenaire
réalisé avec

IRSN

www.irsn.fr

Neuf ans après l'accident nucléaire de Fukushima, que sait-on du niveau de radioactivité dans les forêts environnantes ? Les nombreuses études de terrain ouvrent la voie à une modélisation fiable des mécanismes de recyclage du césium-137 au sein de l'écosystème forestier, qui permet d'expliquer et de prédire l'évolution de la contamination.

Le 11 mars 2011, un mégaséisme localisé à 80 kilomètres à l'est de l'île de Honshu, au Japon, et le tsunami qu'il déclenche endommagent la centrale nucléaire du Fukushima Daiichi. Trois jours plus tard, la catastrophe a dispersé une énorme quantité d'éléments radioactifs dans l'atmosphère, environ 7 milliards de milliards de becquerels [1]. La plus grande partie est retombée dans l'océan, mais 20 % de ces éléments environ se sont déposés sur le sol japonais. Et 75 % des zones terrestres les plus contaminées sont des forêts, qui, contrairement aux zones urbaines et agricoles, ne seront pas décontaminées. Aujourd'hui que sait-on du niveau de radioactivité de ces territoires forestiers ?

La réponse à cette question passe d'abord par une connaissance précise de l'évolution et du devenir du césium radioactif dans cet environnement. En effet, parmi les

radionucléides relâchés lors de l'accident, la plupart se sont déjà désintégrés du fait de leur courte période radioactive. Ce n'est pas le cas du césium-137, qui à ce jour persiste en raison de sa demi-vie de l'ordre de trente ans. Mais depuis l'accident, comment a-t-il été recyclé par la forêt ? Où se trouve-t-il exactement et en quelles concentrations ?

Dans le cadre du projet AMORAD*, programme lancé en 2013, les chercheurs de l'IRSN se sont fixé un objectif : développer un outil de simulation des transferts du césium-137 au sein de tous les compartiments de l'écosystème forestier le plus précis possible pour mieux comprendre l'évolution de la contamination. Et ce en le confrontant à des mesures *in situ*, suivies dans le temps. Ainsi entre 2013 et 2018, Frédéric Coppin, géochimiste et Pierre Hurtevent, agronome, spécialistes de l'écosystème forestier à l'IRSN, ont mené cinq campagnes de mesures avec leurs partenaires japonais d'AMORAD sur trois sites emblématiques des forêts de >

► Fukushima situés à Kawamata. « Grâce à la collaboration avec nos collègues Yuichi Onda et Hiroaki Kato, de l'université de Tsukuba, nous avons bénéficié de sites instrumentés dès juillet 2011. Deux parcelles de forêts de conifères : des cèdres japonais (*Cryptomeria japonica*). Et une forêt de chênes (*Quercus serrata*) qui jouxte l'école élémentaire du village Yamakiya », précise Pierre Hurtevent. Sur ces parcelles, on évalue les retombées à partir des mesures aéroportées de 2011 entre 420 et 450 kBq/m².

ÉCHANTILLONNAGE DE TOUS LES COMPARTIMENTS

Les chercheurs de l'IRSN complètent alors l'échantillonnage des composantes clés de la forêt pour être en mesure de décrire très finement tout le cycle biogéochimique du césium. Aux mesures permettant de caractériser les transferts du césium-137 de l'arbre vers le sol, en raison du lessivage des feuilles et des troncs par les pluies et de la chute de feuilles et de branches, déjà réalisées par leurs collègues japonais entre 2011 et 2013, ils ajoutent un examen minutieux de chaque compartiment.

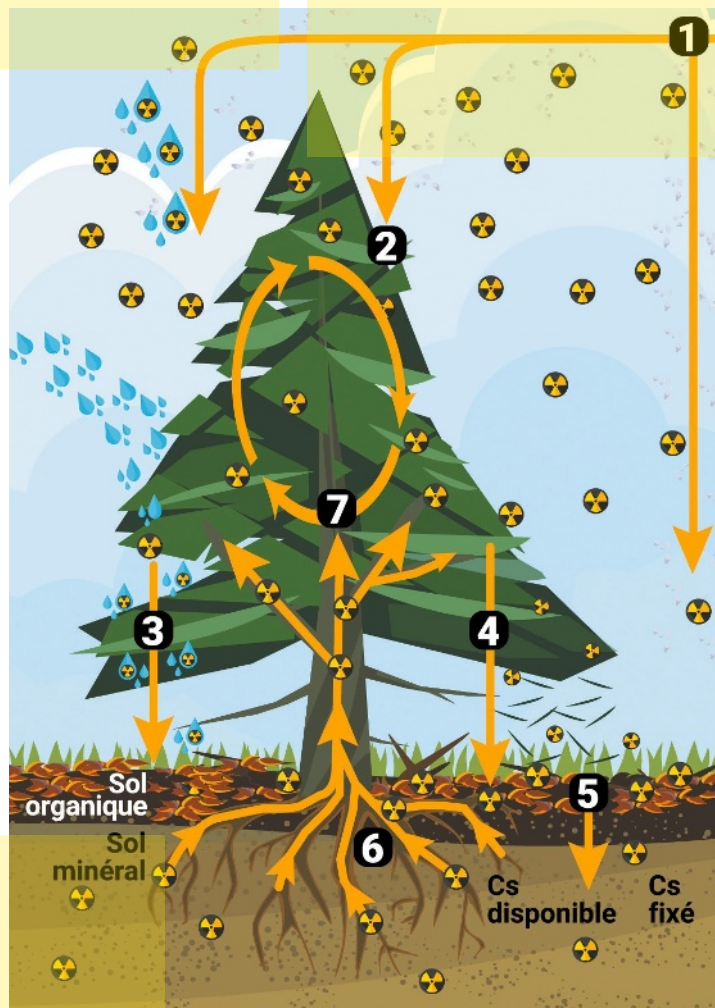
Dans les arbres, ils mesurent la contamination des feuilles, des branches, de l'écorce, du bois et des racines. Dans le sol, ils prélèvent systématiquement deux couches dans la partie dite « organique » : la litière — c'est-à-dire la couche superficielle de feuilles et branches tombées dans l'année — et l'humus — la couche sous-jacente plus dégradée. Et en dessous, dans la partie dite « minérale » du sol, ils analysent trois autres niveaux, jusqu'à 20 centimètres de profondeur.

La précision de l'échantillonnage est déterminante. Le cèdre japonais renouvelle en moyenne son feuillage tous les quatre à cinq ans. « Toutes les aiguilles n'ont pas la même histoire : une aiguille de trois ans en novembre 2013 a reçu directement le dépôt radioactif alors que ce n'est pas le cas de celle de deux ans ou de celle de l'année. Si ces dernières contiennent du césium-137, c'est qu'il vient de l'intérieur de l'arbre ou du lessivage des aiguilles plus anciennes. Quand vous faites une

mesure globale des aiguilles vous perdez toutes ces informations », explique Frédéric Coppin. Cet inventaire précis a permis de mieux comprendre les processus de recyclage du césium-137 entre l'arbre et le sol mais aussi au sein même de chacun de ses compartiments. Il a permis en particulier de quantifier certains phénomènes de translocation, c'est-à-dire de transfert via les flux de sève, entre les aiguilles et les différents organes de l'arbre. Tout comme ont été évalués la fraction de césium-137 retournée au sol par les chutes d'aiguilles et de branches et son temps de résidence dans les sols organiques.

Autant de données qui n'existent pas pour les forêts contaminées par l'accident de Tchernobyl puisque les premières mesures n'y ont été réalisées qu'à partir de 1992, soit six ans après la contamination. Les premiers modèles élaborés suite à cet accident ont souffert de ce manque d'informations et sont restés longtemps rudimentaires. Aujourd'hui, grâce à toutes les données acquises dans les forêts de Fukushima entre 2011 et 2017, les modélisateurs ont affiné leur outil. En confrontant résultats des simulations et observations, Marc-André Gonze, spécialiste de modélisation et Philippe Calmon, radio-écologiste, en charge du développement de l'outil, ont amélioré le modèle de l'IRSN : le modèle TREE4 (Transfer of Radio-nuclides and External Exposure in FORest systems). « C'est le seul modèle qui intègre les transferts physiques, chimiques et biologiques au sein de tous les compartiments, en tenant compte à ce niveau de détail des caractéristiques

physiologiques de l'arbre », précise Marc-André Gonze. TREE4 tient compte en effet de l'ensemble des transferts de césium à différentes échelles : il calcule l'interception du césium-137 atmosphérique par la canopée, le transfert vers le sol via le lessivage et la chute de litière, l'écoulement sur les tiges et l'écorce. À l'intérieur de l'arbre, il modélise l'incorporation du césium-137 par les processus physiologiques des parties externes vers les parties internes (du feuillage vers le tronc) et, inversement, il quantifie aussi



LE RECYCLAGE DU CÉSIMUM RADIOACTIF

Les retombées de césium-137 **1** sont interceptées en majeure partie par le feuillage **2**. Ce dépôt atteint ensuite le sol, soit lessivé par les pluies **3** soit via la chute d'aiguilles ou de branches **4**. Puis, il migre dans le sol **5**. De là, une partie du césium-137 disponible remonte dans l'arbre par les racines **6** et se répartit dans le tronc, les branches et les feuilles par transfert interne **7**.