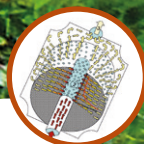


FOCUS

*Modéliser LE TRANSFERT
DU TRITIUM dans l'environnement
pour ÉVALUER SON IMPACT*

**AVANCÉES**

Traitement des effets
des radiothérapies
par CSM,
vers un protocole
plus efficace

**FORMATION**

Vers une estimation plus
réaliste de la dispersion
de l'iode dans
l'environnement
après un accident

MOINS D'INCERTITUDE POUR UNE DÉCISION PLUS JUSTE ?



© Antoine Desquard/IRSN

Diminuer les incertitudes. Un motif fréquent pour de nouveaux travaux, de thèse ou de recherche, qu'initie l'Institut. Pour le scientifique, elle est consubstantielle à l'aspiration de s'approcher d'une compréhension parfaite des phénomènes observés et modélisés ; pour l'expert des risques, elle est accentuée par le besoin d'une évaluation pertinente, qui ne doit sous-estimer ni un mécanisme d'agression ni l'appréciation de ses conséquences.

Un regard externe peut l'assimiler à une quête de maîtrise, de certitude, voire de précaution

maximale. Ce qui sous-tend l'article traitant de l'amélioration des incertitudes sur la dispersion de l'iode en situation accidentelle est d'une tout autre nature. Fruit d'une coopération entre des équipes des pôles sûreté et santé-environnement de l'Institut, la motivation première de ce besoin de connaissances accrues sur les formes de l'iode est de se départir des incertitudes qui viennent peser sur le résultat de calculs que l'IRSN serait appelé à faire dans une situation particulièrement délicate : celle de l'évaluation des conséquences d'une séquence accidentelle rejetant des radionucléides dans l'atmosphère, à l'instar de l'accident de Fukushima. Une évaluation qui, au titre de la radioprotection, postule que l'iode reste gazeux sur tout le trajet du panache, ne risque pas de sous-estimer la taille des zones sur lesquelles il faut faire porter des mesures d'urgence. *A contrario*, elle pousse le gestionnaire de la crise à retenir un périmètre probablement plus large que nécessaire et mobilisant des moyens accrus de protection civile. Alors bien sûr, il ne s'agit pas de revenir sur les critères fondamentaux sur lesquels reposent nos évaluations et nos recommandations. Mais chaque kilomètre carré et chaque zone habitée ou cultivée sur lesquels doivent être prises des décisions qui vont s'inscrire dans la durée méritent notre attention.

C'est le sens des moyens (trois thèses) que nous consacrons à ces travaux, et ce ne sont pas les seuls où, *in fine*, la quête d'une connaissance accrue et validée permet de préparer une décision au juste nécessaire.

Matthieu Schuler,

Directeur de la stratégie, du développement et des partenariats

Aktis est la lettre d'information scientifique de l'IRSN. Elle présente les principaux résultats de recherches menées par l'Institut dans les domaines de la radioprotection, de la sûreté et de la sécurité nucléaire. Gratuite, elle est aussi diffusée sous forme de mail. Éditeur IRSN - standard : +33 (0)1 58 35 88 88 - www.irsn.fr - Directeur de la publication : Jean-Christophe Niel - Directeur de la rédaction : Matthieu Schuler - Rédactrice en chef : Sandrine Marano - Comité de lecture : Christian Tamponnet, Matthieu Schuler - Comité éditorial : Gauzelin Barbier, Christian Tamponnet, Aleth Delattre, Richard Gonzalez, Christine Goudedranche, Pascale Monti, Audrey de Santis, Matthieu Schuler - Rédaction : Sandrine Marano, Audrey de Santis / UMAPS - Réalisation : www.grouperougevil.fr - 25064 Impression : Idéale Prod, certifiée Imprim'Vert - ISSN : 2110-588X - Droits de reproduction sous réserve d'accord de notre part et de mention de la source. Conformément à la loi N° 2004-801 du 6 août 2004 relative à la protection des personnes physiques à l'égard des traitements de données à caractère personnel et modifiant la loi N° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés, tout utilisateur ayant déposé des informations directement ou indirectement nominatives, peut demander la communication de ces informations et les faire rectifier le cas échéant.



SOMMAIRE

ÉDITO

Matthieu Schuler

AVANCÉES DE LA RECHERCHE

PAGE 3

- Traitement des effets des radiothérapies par CSM, vers un protocole plus efficace
- Exposition chronique à l'uranium et fonctionnement du cerveau

FOCUS

PAGE 6

Modéliser le transfert du tritium dans l'environnement pour évaluer son impact

FORMATION PAR LA RECHERCHE

PAGE 9

- Vers une estimation plus réaliste de la dispersion de l'iode dans l'environnement après un accident

VIE DE LA RECHERCHE

PAGE 11

- Publications
- Habilitation à diriger des recherches
- Thèses
- Congrès

Glossaire ^{GL0}

PAGE 12

Photo de couverture -
Zone expérimentale à La Hague
© IRSN

Traitement DES EFFETS des RADIOTHÉRAPIES par CSM, vers UN PROTOCOLE plus efficace

Dix pour cent des patients traités par radiothérapie pour des cancers de la zone abdomino-pelvienne développent des complications intestinales sévères environ dix ans après la fin de leur traitement. À ce jour, l'une des voies de traitement les plus prometteuses consiste à injecter par voie intraveineuse des cellules stromales mésenchymateuses (CSM) afin de réparer les tissus biologiques endommagés par les rayons. Depuis 2014, dans le cadre du programme ANR RPIB⁽¹⁾ ANTHOS⁽²⁾ qu'il pilote, l'IRSN effectue des recherches sur de nouvelles stratégies de thérapie cellulaire faisant appel aux CSM. Les premiers résultats de ce projet, qui s'est achevé en août 2017, ouvrent la voie à un protocole plus efficace.

Si l'efficacité de la radiothérapie n'est plus à démontrer dans le traitement des cancers abdomino-pelviens, afin d'éliminer les cellules cancéreuses, des zones de tissu sain se retrouvent inévitablement dans le champ d'irradiation. Peuvent s'en suivre des complications sévères (fistules, abcès, hémorragies...) jusqu'à dix ans après le traitement. Réduire les séquelles du traitement et améliorer la qualité de vie des patients est un des objectifs du 3^e plan cancer 2014-2019. Plusieurs molécules pharmaceutiques ont déjà été testées mais restent peu efficaces sur les lésions les plus sévères. Pour ces dernières, l'intervention chirurgicale est parfois possible mais les risques inhérents en limitent l'utilisation.

Cellule « médicament »

L'une des options que l'IRSN explore pour contrer ces effets s'appuie sur l'utilisation des CSM, et l'Institut en a démontré l'efficacité sur des modèles expérimentaux. En effet, ces études préalables au projet ANTHOS ont montré que l'injection systémique de CSM dans ces modèles animaux présente d'excellents résultats avec une amélioration de 25 % des dommages radio-induits de la muqueuse colique et de la fonction contractile du colon. L'épithélium lésé reste cependant plus perméable que le sain. Plusieurs études, dont celles de l'IRSN, suggèrent aussi que les CSM sécrètent une large palette de molécules actives – prorégénérative, anti-inflammatoire, angiogénique^{GLO} et antiapoptotique^{GLO} – capables de stimuler un processus de réparation préexistant dans le colon. Il existe cependant des limites à ce

traitement. Les études menées montrent que le taux de prise de greffe des CSM injectées par voie intraveineuse est très faible et qu'il faut donc en administrer une grande quantité de façon répétée pour en observer une certaine efficacité. De plus, leur durée de vie dans l'organisme n'excède pas 24h lors d'une injection par voie systémique. Sur cette base, le programme ANTHOS a été proposé à l'Agence nationale de recherche (ANR), avec pour objectif d'améliorer l'efficacité du traitement par CSM.

Encapsulées dans un hydrogel

Dans le cadre d'ANTHOS, la stratégie choisie s'appuie sur l'injection locale dans le colon, de CSM provenant du tissu adipeux (Ad-CSM) protégées dans un hydrogel (Si-HPMC, hydroxypropyl-méthylcellulose silanisé). Les Ad-CSM présentent les mêmes bénéfices thérapeutiques que les CSM issues de moelle osseuse (classiquement utilisées), mais sont plus faciles à prélever par simple liposuccion. L'administration locale par coloscopie vise à augmenter, par rapport à une administration intraveineuse, le taux de prise de greffe des cellules sur le site lésé et à diminuer le nombre de cellules injectées (1 million contre 5 millions). De plus, les Ad-CSM sont encapsulées dans un hydrogel, une matrice chargée de les protéger et permettant ainsi d'augmenter leur durée de vie et de présence dans l'organisme. Une des premières étapes du programme a consisté, pour le CHU-Université de Nantes, à adapter un hydrogel pour une utilisation dans le colon. Ce matériau a en effet déjà fait ses preuves dans le



CONTACT

Noëlle Mathieu
noelle.mathieu@irsn.fr

Laboratoire
de radiobiologie
des expositions
médicales - LRMed

⁽¹⁾ Programme
ANR Recherches
partenariales
et innovation
biomédicale (RPIB).

⁽²⁾ ANTHOS = Pré-requis
pour l'utilisation
des cellules stromales
mésenchymateuses
(CSM) combinées
à un hydrogel
et un HS-mimétique
en injection locale
pour le traitement
des séquelles
des radiothérapies
abdomino-pelviennes.

PUBLICATION

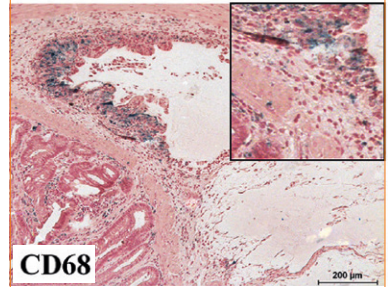
• Moussa L. et al.
« A biomaterial-assisted
mesenchymal stromal
cell therapy alleviates
colonic radiation-
induced damage »
Biomaterials, 115
(2017) 40e52.



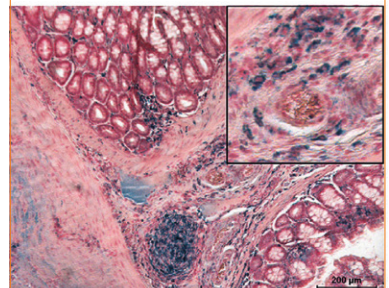
• Moussa L. et al.
« Bowel Radiation
Injury: Complexity
of the Pathophysiology
and Promises of Cell
and Tissue Engineering
Cell » *Transplantation*,
vol. 25 (2016)
pp. 1723-1746

traitement d'ischémie cardiaque mais se devait de présenter les propriétés rhéologiques nécessaires pour être injectable facilement à l'aide d'un coloscope. Dans un deuxième temps, ont été évaluées *in vitro* la viabilité des Ad-CSM incorporées à cette matrice ainsi que leur capacité à sécréter des molécules actives : la concentration optimale de l'hydrogel a été déterminée. Après 21 jours, 95 % des Ad-CSM sont encore viables, avec des fonctions sécrétrices complètes. Enfin, les chercheurs de l'IRSN ont réalisé des expérimentations *in vivo* sur des rats afin de valider le protocole de traitement le plus efficace avec cet ensemble Ad-CSM-biomatériau. Trois séries de rats ont été exposées à une dose de rayonnements ionisants créant des lésions coliques radio-induites comparables à celles des patients visés par ce futur protocole thérapeutique. Ils ont ensuite reçu soit des Ad-CSM seules par intraveineuse systémique, soit des Ad-CSM seules par voie locale, soit des Ad-CSM avec hydrogel par voie locale. Une semaine après l'administration du traitement, l'analyse comparative montre que la structure de l'épithélium a bénéficié des effets du duo Ad-CSM-hydrogel : baisse significative des lésions de la muqueuse colique et augmentation notable du processus de régénération des cryptes qui composent l'épithélium. Même constat concernant la fonction épithéliale : à l'inverse des Ad-CSM injectées par intraveineuse, le biomatériau injecté localement a réduit significativement l'hyperperméabilité du colon ainsi que la réaction inflammatoire inhérente au traitement des lésions radio-induites. Cela est d'autant plus vrai que les Ad-CSM combinées à l'hydrogel atténuent également l'infiltration des macrophages^{GL0} près de la zone où les cellules ont été injectées, alors que ceux-ci sont connus pour alimenter l'inflammation. Ces résultats précliniques montrent que la combinaison Ad-CSM-hydrogel développée par l'IRSN et l'Université de Nantes présentent de nombreux bénéfices : efficacité de traitement, facilité d'administration, etc. Des études complémentaires au programme ANTHOS sont actuellement en cours, sur le bénéfice apporté par l'ajout d'une molécule : le RGTA (*ReGenerating Agents*) aux Ad-CSM. L'IRSN continue par ailleurs de mener des études sur l'innocuité du traitement par thérapie cellulaire, qu'il soit associé ou non à des biomatériaux, dans l'objectif d'une application clinique à moyen terme.

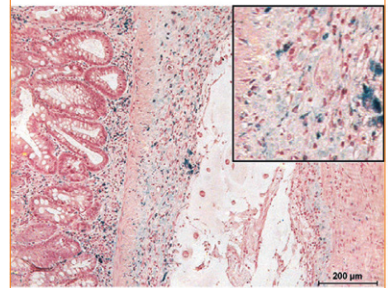
IR+hydrogel 1.5%



IR+MSC 1M loc



IR+MSC 1M+hydrogel 1.5%



Les macrophages s'infiltrent près des Ad-CSM injectées. En bleu, les marqueurs CD68 spécifiques aux macrophages, sept jours après l'injection des Ad-CSM. Moins de macrophages s'infiltrent lors d'une injection d'Ad-CSM dans la matrice hydrogel (photo du bas), cela signifiant que l'inflammation est réduite et que la réponse immunitaire n'est pas trop forte.

© IRSN

Exposition chronique À L'URANIUM et FONCTIONNEMENT du cerveau

L'un des axes de recherche de l'IRSN est de mieux connaître les effets sur la santé de l'exposition à des substances radioactives. Pour l'uranium naturel, de nouveaux travaux ont été menés pour investiguer les conséquences d'une exposition chronique sur le fonctionnement du cerveau.

Constituant naturel de la croûte terrestre, l'uranium peut se trouver dans l'environnement et, corrélativement, dans la chaîne alimentaire et les eaux de boisson. Pour cette chaîne, les concentrations typiques⁽¹⁾ avoisinent le microgramme par litre ou par kilo et ne dépassent qu'exceptionnellement le milligramme par litre ou par kilo.

Des travaux menés à l'IRSN ont montré que l'exposition chronique à ce radioélément n'a pas seulement des conséquences – bien connues – sur le rein, mais aussi des effets biologiques sur le cerveau, impliquant des troubles comportementaux⁽²⁾ chez les rongeurs. Quels mécanismes biologiques peuvent les expliquer ?

Des chercheurs de l'IRSN ont exposé des groupes de rats mâles et femelles à l'uranium naturel depuis la naissance et durant 9 mois *via* le lait maternel et l'eau de boisson, en utilisant des concentrations⁽³⁾ comprises entre 1,5 et 40 mg/l. Exposer les rongeurs tout au long de leur croissance est d'autant plus

pertinent que le cerveau est plus sensible aux polluants au cours de son développement. À 9 mois, les rats contaminés et les rats témoins ont été soumis à des tests de comportement. Ils ont montré que les comportements émotionnels, de type anxiété et dépression, sont exacerbés chez les animaux contaminés, et que l'uranium induit une diminution de la mémoire à court et moyen termes. Ces altérations sont beaucoup plus prononcées chez les mâles que chez les femelles. En parallèle, les chercheurs ont utilisé la métabolomique^{GLO}, technique qui permet d'identifier un spectre très large de métabolites, dans l'objectif de caractériser, par analyse statistique, des empreintes spécifiques en réponse à cette situation d'exposition. Cette technique a été appliquée à des échantillons de liquide céphalo-rachidien prélevé chez les rats exposés ou non à l'uranium afin d'identifier les voies métaboliques perturbées par cette exposition.

Analyse statistique multivariée

Ces analyses ont été réalisées par la plateforme CRIBIOM de l'université d'Aix-Marseille. Une analyse statistique multivariée a été conduite sur les 86 métabolites^{GLO} les plus discriminants observés chez les rats contaminés à l'uranium naturel par rapport aux rats témoins parmi les 1 244 métabolites détectés. Sept métabolites étaient spécifiques des femelles, sept spécifiques des mâles, et quatre métabolites ont été identifiés indépendants du sexe. Parmi ceux-ci figure l'acide butyrique, impliqué dans le processus de mémorisation.

L'identification de ces métabolites suggère que l'exposition à l'uranium, aux niveaux investigués, pendant le développement et jusqu'à l'âge adulte peut avoir un impact sur le fonctionnement du cerveau. Cette approche, combinant analyse comportementale et analyse métabolomique, pourrait à terme déboucher sur l'utilisation opérationnelle d'empreintes métabolomiques comme marqueurs d'exposition et d'effet.

 Plate-forme de criblage biologique de l'université d'Aix-Marseille (CRIBIOM)

CONTACT

Philippe Lestaavel
philippe.lesaavel@irsn.fr

Laboratoire de radiotoxicologie et radiobiologie expérimentale - LRTTox

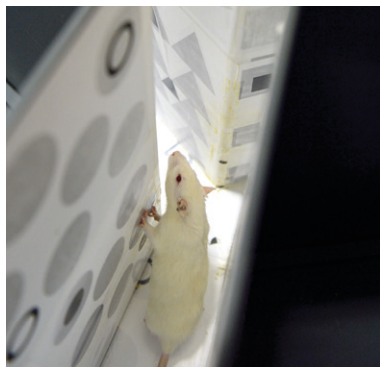
⁽¹⁾ Fiche radionucléide environnement : Uranium naturel et environnement, révision 12/2010, Garnier-Laplace & al.

⁽²⁾ Troubles mnésiques, de l'anxiété, de la locomotion ou de type dépressif.

⁽³⁾ Correspondant à des valeurs extrêmes de la gamme de variation rencontrées dans les eaux de source en Europe.

PUBLICATION

• Lestaavel P et al.
« Assessment of the Central Effects of Natural Uranium via Behavioural Performances and the Cerebrospinal Fluid Metabolome »
Neural Plast. 2016.



Labyrinthe en Y pour évaluer la mémoire spatiale des rats, l'un des tests de comportement mis en œuvre durant cette étude. Ces expérimentations sont mises en œuvre après avis d'un comité d'éthique.

© Laurent Zylberman/Graphix-Images/IRSN

Modéliser LE TRANSFERT DU TRITIUM *dans l'environnement* pour ÉVALUER SON IMPACT

 Ce programme de recherche est réalisé dans le cadre d'un partenariat scientifique et financier avec EDF (GGP Environnement)

CONTACTS

Philippe Laguionie
philippe.laguionie@irsn.fr

Laboratoire
de radioécologie
de Cherbourg-
Octeville (LRC)

Séverine
Le Dizès-Maurel
severine.ledizes@irsn.fr

Laboratoire
de recherche
sur les transferts
des radionucléides
au sein des écosystèmes
terrestres (LReT)

Le tritium est, avec le carbone 14, l'un des radionucléides majoritaires parmi les rejets des installations nucléaires. Son impact dosimétrique sur l'homme est faible. Cependant plusieurs études internationales ont mis en exergue des incertitudes qui persistent sur la quantification des transferts du tritium au vivant ou l'existence de bioaccumulation. De plus, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) française a publié en 2010 un livre blanc formulant des recommandations sur les recherches à développer pour améliorer les connaissances dans ce domaine. VATO est un projet mené par l'IRSN avec le soutien d'EDF qui vise à mieux comprendre les transferts du tritium dans la chaîne alimentaire humaine. Son objectif final est de valider le modèle de transfert TOCATTA, développé par l'IRSN, d'évaluation des conséquences d'un rejet de tritium dans l'environnement. Ces travaux ont contribué au bilan de l'état des connaissances sur la quantification du tritium dans l'environnement que l'IRSN vient de publier.

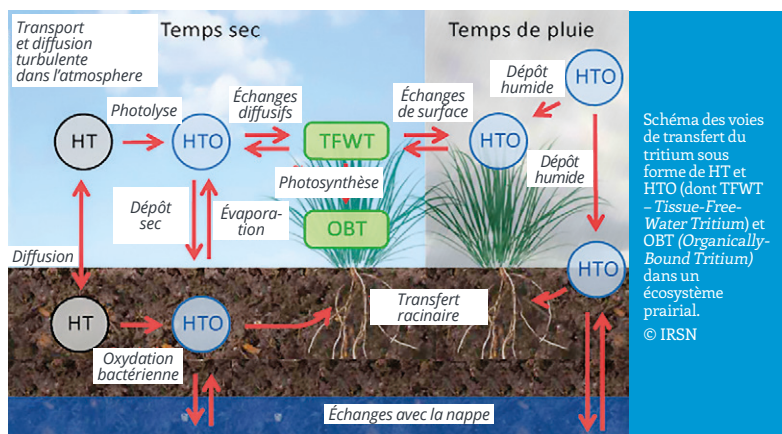
Le tritium (^3H), radionucléide émetteur β de période 12,3 ans, est émis dans l'environnement par de nombreuses installations nucléaires liées à la production d'électricité ou au cycle du combustible. Globalement, la concentration volumique du ^3H dans l'air a fortement diminué au fil des années depuis l'arrêt des essais atmosphériques d'armes nucléaires. Une construction de nouveaux réacteurs ou l'évolution des modes de gestion des combustibles nucléaires sont susceptibles de conduire à une augmentation des rejets de tritium.

Dispersé dans l'atmosphère, le tritium sous forme d'eau tritiée (HTO) peut être incorporé dans la végétation par diffusion foliaire et absorption racinaire. Le processus de photosynthèse conduit alors à son intégration à la matière organique. Si le rejet a lieu sous forme d'hydrogène tritié (HT), le tritium n'est pas directement métabolisé. Il faut qu'il subisse une étape d'oxydation par les micro-organismes des sols qui le transforment en HTO, avant d'être absorbé par les racines des végétaux. Le tritium sous forme HTO peut aussi être rejeté en mer et dans les cours d'eau, et dans ce cas être transféré à la végétation par voie racinaire.

Entre juin 2013 et mai 2016, les concentrations moyennes horaires sur la zone expérimentale de l'IRSN située près de l'usine de La Hague ont été pour HT de $0,2 \text{ Bq m}^{-3}$ d'air (min = 0 – max = 28,7), et pour HTO de $0,08 \text{ Bq m}^{-3}$ d'air (min = 0 – max = 8,6) et $10,7 \text{ Bq L}^{-1}$ d'eau de pluie (min = 0,1 – max = 367). À partir de prélèvements d'herbe et de sols réalisés tous les 15 jours à 1 mois, les concentrations moyennes ont été de $9,3 \text{ Bq L}^{-1}$ d'eau libre de l'herbe (TFWT variant de 2,1 à 62,4), pour OBT de $8,2 \text{ Bq L}^{-1}$ d'eau de combustion de la matière organique de l'herbe (min = 2,9 – max = 20,1), et pour HTO de $7,4 \text{ Bq L}^{-1}$ d'eau du sol (min = 2,8 – max = 16,6).

© IRSN





PUBLICATIONS

- Le Dizès S. *et al.* « Modeling and Validating Tritium Transfer in a Grassland Ecosystem in Response to 3H Releases » *Ecosystems and Sustainable Development X*, 2015, 23-32 [[DOI 10.2495/ECO150031]]
- Connan O. *et al.* « In situ measurements of tritium evapotranspiration (³H-ET) flux over grass and soil using the gradient and eddy covariance experimental methods and the FAO-56 model » (2015) *Journal of Environmental Radioactivity*, 148:1-9.

Des incertitudes persistent concernant la quantification des mécanismes qui peuvent conduire à l'incorporation du tritium dans les organismes vivants, notamment ceux constituant la chaîne alimentaire humaine. L'un des principaux objectifs du projet VATO (Validation de TOCATT) a été de contribuer à lever une partie de ces incertitudes, en quantifiant et évaluant les transferts de tritium sous forme HT et HTO au sein d'un écosystème prairial⁽¹⁾ entre 2013 et 2016. Ce projet fait suite à un projet similaire dédié au carbone 14 (2006-2012), au cours duquel il était apparu nécessaire de développer un modèle de transfert du carbone 14 et du tritium dans l'environnement fonctionnant à une échelle infra-journalière pour prendre en compte des rejets fortement variables au cours du temps, et basé sur les principaux processus éco-physiologiques de l'écosystème prairial. Ainsi en complément du modèle TOCATT⁽²⁾, initialement développé par l'IRSN à l'échelle journalière, un modèle TOCATT- χ a été développé pour estimer à pas de temps horaire les transferts de tritium et de carbone 14 au sein des écosystèmes terrestres suite à des rejets atmosphériques continus ou ponctuels. Le projet VATO a permis de valider ce modèle en produisant un jeu de données cohérent issu de l'observation du devenir du tritium sous toutes ses formes (notamment HTO, HT) dans les principaux compartiments d'un écosystème prairial – atmosphère, sol, herbe.

Cinétiques de transfert

Pour ce faire, la zone expérimentale de l'IRSN, située sous les vents dominants de l'usine de traitement des combustibles usés Areva NC La Hague (au

nord-ouest de la France), a été instrumentée avec des matériels développés spécifiquement. La première phase de ce projet a permis de quantifier les cinétiques de transfert du tritium depuis l'air (vapeur d'eau) et l'eau de pluie vers une prairie. La présence (ou l'absence) des différentes formes physicochimiques du tritium dans l'atmosphère et le sol (aérosols tritiés, HT, HTO, tritium organique) au niveau de la zone expérimentale a été évaluée. Ceci a permis d'interpréter les résultats de la mesure du tritium dans les végétaux, qui dépend de ces formes physicochimiques. Les formes décelées ont été uniquement HTO et HT, la forme prédominante étant HT.

Une méthode innovante, englobant prélèvements, mesures et calculs, a été développée afin d'estimer, pour le compartiment atmosphérique, les concentrations de HT et de HTO à un pas de temps horaire cohérent vis-à-vis des processus écophysologiques. Par ailleurs, c'est ce pas de temps que le modèle TOCATT- χ requiert pour évaluer les cinétiques de transfert du tritium à l'eau libre (TFWT ou *Tissue-Free-Water Tritium*) et lié à la matière organique (OBT ou *Organically-Bound Tritium*) des végétaux. Cette méthode repose sur des mesures météorologiques (notamment la direction du vent), des prélèvements de tritium intégrés sur des périodes allant de 48 h (par exemple, de HTO à l'aide d'un appareil breveté conjointement par l'IRSN et la Marine nationale) à 1 mois (HT à l'aide d'un barboteur), et sur la mesure en temps réel (à l'aide d'un compteur proportionnel) de la concentration de Krypton 85 rejeté dans l'atmosphère par l'usine Areva NC La Hague de manière concomitante à HT.

⁽¹⁾ La prairie a été choisie car elle fait partie de la chaîne alimentaire humaine (e.g., lait, viande).

⁽²⁾ TOCATT (*Transfer Of Carbon And Tritium in Terrestrial and Aquatic environments*) est un modèle intégré à la plateforme SYMBIOSE qui permet de simuler le transfert de radionucléides dans les écosystèmes et estimer l'impact dosimétrique sur l'homme.

⁽³⁾ Il est basé sur le calcul d'une vitesse d'échange à l'interface air/feuilles supposée égale à l'inverse de la somme de résistances, dont la résistance aérodynamique et la résistance stomatique (analogie électrique).

⁽⁴⁾ Selon une version simplifiée d'un modèle écophysologique connu (PASIM, développé par l'INRA) et adapté au modèle TOCATTÀ.

⁽⁵⁾ Approche écophysologique PlantMod pour la photosynthèse foliaire.

PUBLICATIONS

• Maro D. *et al.* « The VATO project: An original methodology to study the transfer of tritium as HT and HTO in grassland ecosystem » *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, 167: 235-248.



• Le Dizès S. *et al.* « The VATO project: Development and validation of a dynamic transfer model of tritium in grassland ecosystem » *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, 171: 83-92.



Une attention particulière a été apportée, lors des manipulations au laboratoire, à la lyophilisation des échantillons et à leur réhydratation par de la vapeur d'eau de l'air exempt de tritium.

Processus éco-physiologiques

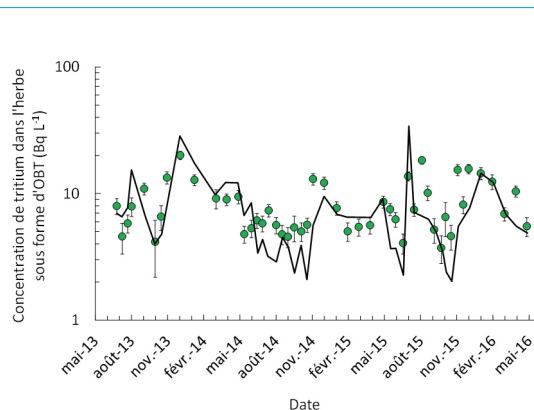
En parallèle, le modèle TOCATTÀ- χ a été développé pour simuler les transferts du tritium au sein du système air-végétation-sol. Plusieurs sous-modèles (modules) ont été créés sur un principe mécanistique décrivant les processus écophysologiques tels que la photosynthèse, la respiration, la croissance et la sénescence, ainsi que l'influence de l'environnement (climat, air, sol) sur ces processus. Un premier module représente les échanges diffusifs de la vapeur d'eau tritiée entre l'atmosphère et l'eau libre des feuilles, en fonction des conditions météorologiques et des caractéristiques physiologiques de la plante⁽³⁾. Un second module représente l'apport d'eau tritiée venant des racines. La formation de l'OBT est prise en compte dans un troisième module pour la période diurne en fonction de la concentration de tritium dans l'eau libre des feuilles, des taux photosynthétiques, respiratoires, et de croissance de la plante. Enfin, les échanges diffusifs de HTO entre l'atmosphère et la surface du sol sont pris en compte dans un dernier module comprenant le calcul d'une vitesse d'échange à l'interface sol/air. Les scientifiques ont associé plusieurs modèles existant dans la littérature pour tenir compte des différents aspects de la croissance et de la physiologie des plantes. Ainsi, la croissance de l'herbe est calculée sur une période de temps journalière en relation avec les flux de carbone et d'azote et les densités de biomasse⁽⁴⁾. De même, l'extrapolation du taux photosynthétique foliaire⁽⁵⁾ à l'échelle du couvert, l'indice de surface foliaire et le schéma de rayonnement ont été estimés d'une manière simplifiée à partir de différentes approches.

Correctement modélisés

À l'issue de ces développements, le modèle TOCATTÀ- χ a été alimenté par les données horaires de

concentrations de HT et de HTO atmosphériques, ainsi que les données météorologiques issues des mesures réalisées sur la zone expérimentale de l'IRSN de La Hague. Les résultats des calculs réalisés sur trois années (juin 2013-juin 2016) montrent que le modèle reproduit correctement les variations de concentration en tritium dans l'eau libre de l'herbe. Ceci indique que les échanges rapides, de l'ordre de l'heure, entre le HTO atmosphérique et les feuilles sont correctement modélisés. Concernant la concentration d'OBT dans l'herbe, la confrontation entre les mesures et le résultat des calculs a montré la nécessité de considérer deux types d'OBT dans l'herbe : l'un à renouvellement rapide, de l'ordre de l'heure, et l'autre à renouvellement plus lent, de l'ordre de 15 jours.

Ces recherches ont permis de développer et de valider le modèle TOCATTÀ- χ pour évaluer les transferts de tritium à une prairie, l'un des premiers maillons de la chaîne alimentaire humaine. Parmi les voies d'amélioration de TOCATTÀ- χ , les processus d'évapotranspiration et d'oxydation bactérienne de HT en HTO dans le sol sont actuellement pris en compte dans le cadre de la thèse d'Hugo Renard qui se termine fin 2017. Le modèle TOCATTÀ- χ sera intégré courant 2018 à la plateforme SYMBIOSE. Par ailleurs, un nouveau projet, LEGATO, a été lancé par l'IRSN et EDF en 2017 pour une période de quatre ans, afin de mieux quantifier le transfert du tritium aux légumes feuilles, fruits et racines.



Concentrations d'OBT dans l'herbe de la zone expérimentale de l'IRSN de La Hague, mesurées (points verts) et modélisées par TOCATTÀ- χ (trait noir). © IRSN

Vers une ESTIMATION plus réaliste de la DISPERSION DE L'IODE dans l'environnement après un ACCIDENT

Après un accident nucléaire, la prise en charge des personnes exposées et la gestion des territoires contaminés reposent en particulier sur l'évaluation des rejets de produits radioactifs hors de l'installation. Parmi ces produits, l'un des radionucléides présentant le plus de risque pour la santé humaine est l'iode 131. Sa dispersion dans l'atmosphère est évaluée à l'aide de modèles qui prennent en compte différentes formes physico-chimiques de l'iode, tous isotopes confondus. Mais la modélisation ne tient pas compte de l'évolution au cours du temps de ces formes dans l'atmosphère. De nouvelles thèses vont permettre de rendre plus réaliste l'estimation des rejets pour, *in fine*, améliorer les prises de décisions. Par ailleurs, un nouveau dispositif a été développé pour surveiller les concentrations en iode radioactif gazeux de manière plus sensible, et a donné lieu à un brevet.

Les iodes radioactifs font partie des radionucléides produits par fission nucléaire dans le réacteur et peuvent donc être rejetés lors d'un accident nucléaire. Dans une telle situation et en l'absence de mesure de protection adaptée, l'exposition des populations aux iodes radioactifs, notamment à l'isotope 131, augmente le risque de cancer de la thyroïde, plus particulièrement chez les jeunes enfants. La gestion de l'accident repose dans un premier temps sur la modélisation de la dispersion de ces radionucléides dans l'atmosphère et leur dépôt sur les surfaces continentales ou marines. Cette modélisation est la base de l'évaluation des conséquences environnementales qui guide le choix et la mise en place des mesures de protection des populations. Par ailleurs, des mesures des dépôts dans l'environnement permettent de recalculer les résultats de la modélisation et ainsi d'affiner l'estimation des conséquences. Pour l'instant, les modèles prennent en compte l'iode sous forme d'aérosol et sous forme gazeuse organique et inorganique. En effet, chacune a un impact différent en termes de contamination des territoires⁽¹⁾ et de dose radiologique pour la population exposée par inhalation⁽²⁾. Mais les modèles considèrent que ces formes physico-chimiques n'évoluent pas une fois rejetées. Or, une thèse, menée par Julien Trincal, vient de montrer qu'en réalité, les iodes gazeux interagissent fortement avec les éléments présents dans l'atmosphère.

Les espèces d'iode gazeux relâchées lors d'un accident grave sont l'iode moléculaire, I_2 , et des composés organo-iodés notamment l'iodure de méthyle, ICH_3 . Pour développer un modèle de réactivité chimique – ou mécanisme réactionnel – de ces espèces dans l'atmosphère, Julien Trincal a réalisé une revue des données existantes dans la littérature sur les réactions élémentaires impliquant l'iode gazeux et les composés inorganiques et organiques volatils (ou COV⁽³⁾). Il a ainsi établi un mécanisme réactionnel global de l'iode gazeux dans l'atmosphère incluant les réactions inorganiques et organiques, soit 246 réactions élémentaires dont 13 réactions de photolyse^{GL0}.

Simulations 0D et 3D

Ce mécanisme a été intégré dans deux logiciels permettant de réaliser des simulations de l'évolution des formes de l'iode dans l'atmosphère : simulations 0D (les conditions limites et la composition de l'atmosphère sont imposées, logiciel ASTEC), et simulations 3D modélisant la dispersion des iodes dans l'atmosphère et leur dépôt en tenant compte des conditions météorologiques et de l'évolution de la composition de l'atmosphère (logiciel de chimie transport POLAIR3D, plateforme de calcul Polyphemus pour la qualité de l'air). Les résultats ont montré une réactivité importante des iodes volatils dans l'atmosphère. Celle-ci dépend

 Université de Lille 1 dans le cadre du laboratoire commun C3R (IRS – UMR 8522 de l'université de Lille 1).

CONTACTS

Laurent Cantrel
laurent.cantrel@irs.fr

Laboratoire d'expérimentation environnement et chimie – L2EC

Olivier Masson
olivier.masson@irs.fr

Laboratoire d'étude et d'expertise sur la radioactivité de l'environnement – Leren

⁽¹⁾ La vitesse de dépôt varie fortement en fonction de la forme physico-chimique. Cela aboutit par exemple à contaminer les sols à plus ou moins longue distance. Cela influe également sur la concentration et la spéciation chimique des radionucléides auxquels les populations sont exposées.

⁽²⁾ Lorsqu'elles sont inhalées, l'impact dosimétrique chez l'homme des espèces d'iode radioactif dépend de la forme gaz ou aérosol considérée. Dans la plupart des cas, les iodes gazeux conduisent à des coefficients de dose différents et plus élevés que pour les formes particulières. En ingestion, la forme physico-chimique ne joue pas.

⁽³⁾ Les composés organiques volatils comprennent de nombreuses substances ayant pour point commun d'être des composés du carbone et d'être volatils à température ambiante.

PUBLICATIONS

• *Modélisation du comportement de l'iode dans l'atmosphère*, thèse soutenue le 30/10/2015 par Julien Trincal à l'université de Lille 1



• *Impact of Atmospheric Species Reactivity on Radioactive Gaseous Iodine Transport in Severe Accident Conditions* - J. Trincal et al. - *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, vol. 198, pp. 77-86, 2015

• La demande de brevet a été publiée et est accessible au public sous le n° FR3029799. N° de brevet attendu pour début 2018

⁽⁴⁾ Voir un exemple sur le site Internet.



fortement des conditions météorologiques, notamment du cycle jour/nuit qui impacte directement la photolyse des composés iodés mais aussi les teneurs en composés tels que l'ozone, O_3 , ou le dioxyde d'azote, NO_2 . La présence de $COV^{(3)}$ conduit à la formation de composés organo-iodés. La nuit, la réactivité est plus faible et l'iode moléculaire issu des rejets se transforme principalement en INO_2 . Ces nouvelles formes d'iode soit restent gazeuses, soit forment des particules par nucléation^{GL0}. Ce travail a montré que les interactions de l'iode avec l'atmosphère doivent être intégrées dans les modèles pour améliorer la prévision de la contamination de l'environnement.

Afin d'utiliser à terme ces composantes dans un outil opérationnel, l'IRSN a lancé en 2015 la thèse de Camille Fortin. Son objectif est d'intégrer dans un modèle de dispersion atmosphérique 3D une phase aérosol. Son travail a par ailleurs permis d'identifier trois types de données à acquérir : des constantes de photolyse pour certains composés iodés ; des données permettant de prendre en compte les interactions entre iodes volatils et aérosols atmosphériques ; des données complémentaires portant sur des constantes de dépôts (secs ou humides selon la présence de pluie). Trois nouvelles thèses démarrent à l'automne 2017 sur ces sujets.

Brevet

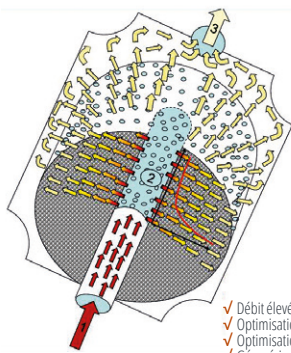
Afin de conforter les simulations et affiner la prévision des conséquences radiologiques environnementales et sanitaires, la mesure

physico-chimique *in situ* est nécessaire. L'IRSN dispose d'un réseau de stations de surveillance (OPERA-Air) des niveaux d'activité des radionucléides présents dans l'atmosphère.

Il collecte les aérosols présents dans l'atmosphère avec des débits de filtration compris entre une centaine et plusieurs centaines de m^3/h . Ceci permet de déceler la présence d'iode radioactif sous forme particulière à l'état de traces⁽⁴⁾ soit entre 0,1 et quelques $\mu Bq/m^3$. La mesure de l'iode radioactif gazeux est en revanche plus délicate ; c'est pourtant sous cette forme qu'il est majoritairement attendu dans l'environnement après un rejet accidentel.

Sur le réseau OPERA-Air, sa collecte est réalisée à l'aide de cartouches à charbon. Le débit d'air est toutefois beaucoup plus faible que celui pour la collecte d'aérosols, ce qui se traduit par des limites de détection environ 100 fois plus élevées que pour l'iode sous forme particulière. Ces limites sont suffisantes en cas de rejets importants mais elles ne permettent pas la détection de l'iode gazeux à de très faibles concentrations (de quelques dizaines à une centaine de $\mu Bq/m^3$). De plus, l'inhomogénéité de la répartition de l'iode piégé dans le charbon complique la mesure. Afin d'abaisser les limites de détection et de mieux connaître le rapport entre la fraction gazeuse et la fraction particulière dans l'atmosphère après un rejet, des chercheurs de l'IRSN ont conçu un dispositif optimisant à la fois le piégeage et la mesure de l'iode. Son principe est de concentrer l'iode dans la partie centrale d'une géométrie dite « enveloppante », à l'endroit même où est placé un détecteur germanium pour sa mesure.

Schéma de principe



- ✓ Débit élevé
- ✓ Optimisation du piégeage
- ✓ Optimisation de la détection
- ✓ Géométrie conventionnelle

Schéma du piège à iode breveté. L'air suit le trajet matérialisé par les flèches. Celles-ci sont représentées du rouge au jaune clair au fur et à mesure que l'iode est piégé. L'ellipse grise correspond au piège contenant le charbon actif, et les points bleus aux trous permettant à l'air de traverser la paroi du piège.

© IRSN

Cette configuration permet un rendement de détection optimum. Ce dispositif est dimensionné pour traiter des débits 30 fois plus importants que celui traversant les cartouches utilisées actuellement. Il est par ailleurs prévu de doter le piège de résistances chauffantes afin de limiter la compétition entre le piégeage des vapeurs d'iode et de la vapeur d'eau présente dans l'air. Le dispositif, qui fait d'ores et déjà l'objet d'un brevet, sera installé à partir de la fin de l'année dans les stations de collecte d'aérosols à très grand débit du réseau OPERA-Air de l'IRSN. L'étape suivante concerne la spéciation des deux formes gazeuses (I_2 et ICH_3) à partir du dispositif déjà breveté.

PUBLICATIONS

PERCEPTION DES RISQUES BAROMÈTRE IRSN 2017 : À L'HEURE DU PARTAGE ET DE L'OPEN DATA

Après avoir donné l'an dernier un accès libre aux données de l'enquête, le Baromètre IRSN de la perception des risques et de la sécurité par les Français enrichit cette année son contenu avec une mise en perspective des analyses de l'Institut par celles de scientifiques externes. Les principaux enseignements de l'édition 2017 sont la première place conservée par le terrorisme au sein des préoccupations des Français et l'absence d'évolution significative pour une majorité d'aspects du domaine nucléaire par rapport à l'édition 2016, à l'exception notable de la perception des acteurs.

BILAN DES CONNAISSANCES SUR LE TRITIUM DANS L'ENVIRONNEMENT

L'IRSN publie un bilan des connaissances acquises depuis 2010 sur le comportement du tritium dans l'environnement. Il synthétise les principales avancées de la recherche, obtenues par l'IRSN et des équipes de chercheurs à l'international, à un stade qui permet d'éclairer les questions de métrologie du tritium, de ses formes physico-chimiques, de niveaux mesurés dans les milieux (air, eau, sols, sédiments), de bioaccumulation et de transfert le long de la chaîne alimentaire.

50 ANS D'ÉTUDES ÉPIDÉMIOLOGIQUES SUR LES TRAVAILLEURS DU CYCLE ÉLECTRONUCLÉAIRE EN FRANCE

L'IRSN publie mi-décembre le bilan des études épidémiologiques réalisées depuis les années 1990 sur les travailleurs du cycle électronucléaire en France. Ces études ont un double objectif. Tout d'abord celui d'améliorer les connaissances sur les effets sanitaires à long terme d'une exposition chronique à de faibles doses de rayonnements ionisants. Ensuite, de fournir des éléments d'information aux experts en radioprotection, en santé au travail et en santé publique, et au-delà, au public. Les études mises en place par l'IRSN concernent près de 75 000 travailleurs suivis depuis 1945 pour les plus anciens et s'intéressent aux activités de l'ensemble du cycle électronucléaire, depuis l'extraction de l'uranium jusqu'à la production d'électricité. Elles permettent par leur diversité d'étudier les effets de différentes sources de rayonnements (exposition aux rayonnements gamma, contamination par l'uranium, inhalation de radon...). Les résultats de ces études contribuent à la consolidation des hypothèses sous-jacentes au système de radioprotection pour les travailleurs et le public.

THÈSES

LES DERNIÈRES SOUTENANCES DE THÈSE

- *Changements phénotypiques des cellules endothéliales au cours du développement des lésions radiques pulmonaires*, par Jérémy Lavigne le 16 octobre à Fontenay-aux-Roses ;
- *Dépôt de radionucléides par les nuages et les brouillards sur les végétaux*, par Jackie Tav, le 12 octobre 2017 à Cadarache.
- *Effets sanitaires d'une exposition chronique à de faibles doses de rayonnements ionisants : contribution à l'estimation des risques radio-induits de cancers dans une cohorte française de travailleurs du nucléaire*, par Lucie Fournier le 22 septembre 2017 à Fontenay-aux-Roses ;
- *Apport des enregistrements de séismes et de bruit de fond pour l'évaluation site-spécifique de l'aléa sismique en zone de sismicité faible à modérée*, par Vincent Perron le 15 septembre 2017 à Saint-Martin-d'Hères ;
- *Identification des ligands biologiques de l'uranium dans les gonades de Danio rerio - Impact sur leur fonctionnalité*, par Yvan Eb-Levadoux le 3 avril 2017 à Pau.

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

HDR D'ALAIN CHAPEL

Alain Chapel a soutenu son habilitation à diriger des recherches (HDR) « *Biothérapie des irradiations* » le 12 juin 2017 à Orsay.

CONGRÈS

ICRP-ERPW, DU 10 AU 12 OCTOBRE 2017

L'IRSN a organisé le 4^e symposium international sur le système de radioprotection, organisé conjointement avec la 2^e Semaine européenne de la recherche en radioprotection du 10 au 12 octobre à Paris.

PREMIER COLLOQUE DU PROGRAMME AGORAS

Comment se construisent et évoluent les équilibres institutionnels entre les différents acteurs impliqués dans la prévention d'un accident nucléaire ou dans sa gestion s'il se produit ? Le projet AGORAS, dont le premier colloque a été organisé par l'IRSN et s'est tenu mardi 21 novembre 2017 à la Cité universitaire de Paris, a pour objectif de répondre à cette question.

En savoir plus sur les risques Baromètre IRSN 2017



En savoir plus sur le bilan des connaissances sur le tritium dans l'environnement



ANGIOGÉNIQUE:

qui améliore
la vascularisation,
c'est-à-dire la production
de vaisseaux sanguins
dans un tissu.

ANTIAPOPTOTIQUE:

Qui empêche
la mort cellulaire.

MACROPHAGE:

Cellule de l'immunité innée.

MÉTABOLITES:

Molécules organiques
de petite taille
(masse < 1000g.mol⁻¹)
produites par des voies
métaboliques ou cascades
enzymatiques
(glucose, acides aminés,
acides gras...) contenus
dans un organisme.

MÉTABOLOMIQUE:

Analyse globale de l'ensemble
des métabolites mesurables
dans un milieu biologique.

NUCLÉATION:

Agglomération de molécules
gazeuses entre elles
sous l'effet thermique
ou à la surface de particules
déjà présentes.

PHOTOLYSE:

Décomposition chimique
par la lumière.

L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) est un organisme public d'expertise et de recherche pour la sûreté et la sécurité nucléaires et la radioprotection. Il intervient comme expert en appui aux autorités publiques. Il exerce également des missions de service public qui lui sont confiées par la réglementation. Il contribue notamment à la surveillance radiologique du territoire national et des travailleurs, à la gestion des situations d'urgence et à l'information du public. Il met son expertise à la disposition de partenaires et de clients français ou étrangers.

Pour consulter la version numérique d'Aktis, accéder aux publications scientifiques et aux informations complémentaires en ligne, et pour s'abonner, rendez-vous sur le site Internet de l'IRSN : www.irsnn.fr/aktis

**SIÈGE SOCIAL**

31 avenue de la Division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses
France
RCS Nanterre B 440 546 018

TÉLÉPHONE

+33 (0)1 58 35 88 88

COURRIER

BP 17 - 92262 Fontenay-aux-Roses
Cedex - France

SITE INTERNET

www.irsnn.fr