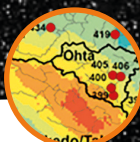


FOCUS

*Le COMPORTEMENT des poussières
dans le TOKAMAK, clé du risque
d'EXPLOSION dans ITER*



AVANCÉES

La contamination
à Fukushima :
des rivières
à la mer



FORMATION

Le brouillard
contribue-t-il
aux retombées
radioactives ?

AMORAD : UN EXEMPLE D'AMÉLIORATION CONTINUE DES OUTILS D'ÉVALUATION DES RISQUES



Au lendemain de la catastrophe de Fukushima, en mars 2011, l'analyse du déroulement de l'accident, ainsi que le constat des difficultés rencontrées par les habitants et les responsables de la gestion de l'environnement contaminé, ont montré la nécessité de poursuivre l'amélioration des connaissances dans plusieurs domaines de la sûreté nucléaire et de la radioprotection, au-delà des progrès déjà réalisés en France notamment à la suite des accidents de Three Mile Island et de Tchernobyl. Dès le mois de juin, le Gouvernement français a décidé de financer à hauteur

de 50 millions d'euros un ensemble de projets de recherche portés par le dispositif des Investissements d'avenir*.

Dans le domaine spécifique de la protection de l'Homme et de l'environnement, les enjeux ont porté principalement sur l'amélioration de la précision des outils développés après l'accident de Tchernobyl. Parmi les projets financés figure AMORAD, piloté par l'IRSN et qui fait l'objet d'un article dans cette livraison d'Aktis. Ce projet vise à améliorer les modèles de simulation de la dispersion et des transferts des radionucléides dans l'environnement, afin de réduire les incertitudes lors de l'évaluation des conséquences radiologiques en cas d'accident nucléaire.

L'objectif est aujourd'hui en grande partie atteint, notamment grâce aux collaborations avec le Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE)** et l'université de Tsukuba au Japon, et de nouveaux outils d'aide à la décision adaptés à la spécificité des zones impactées seront bientôt opérationnels. Pour aller au bout de cette réflexion, le projet AMORAD vient d'être prolongé de trois ans afin de fiabiliser les modélisations mais aussi d'intégrer une nouvelle dimension à l'évaluation du risque : la prise en compte de cet enjeu fondamental pour le pays que sont les conséquences économiques d'un accident nucléaire majeur.

Patrice Bueso, directeur de la stratégie

* L'Agence nationale de la recherche jouant le rôle d'opérateur du programme RSNR (Recherche en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection)

** CEA, CNRS, UVSQ, IPSL

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 : Patrice Bueso - Rédactrice en chef : Sandrine Marano - Comité de lecture : Patrice Bueso, Nathalie Lemaitre - Comité éditorial : Gauzelin Barbier, Patrice Bueso, Aleth Delattre, Audrey de Santis/UMAPS, Céline Dinocourt, Richard Gonzalez, Christine Goudeydranche, Nathalie Lemaitre, Sandrine Marano, Pascale Monti - Rédaction : Sandrine Marano - Réalisation : www.grouperougevif.fr - 26297 - Impression : Handi-Print, certifiée Imprim'Vert - ISSN : 2 110-588 - Droits de reproduction sous réserve d'accord de notre part et de mention de la source. Conformément au règlement (UE) général de protection des données (RGPD) n° 2016/679 du Parlement européen et du Conseil du 27 avril 2016, entré en vigueur le 25 mai 2018 et conformément à la loi n° 2018-493 relative à la protection des données personnelles. Toutes les données personnelles collectées directement ou indirectement dans le cadre de la lettre AKTIS sont traitées aux fins de mise à disposition de la lettre AKTIS. Les utilisateurs sont informés qu'ils disposent d'un droit d'accès, de modification, de suppression et d'effacement des informations personnelles les concernant. Ces droits peuvent être exercés sur simple demande écrite auprès de IRSN/DSDP/BC2S BP17 92262 Fontenay-aux-Roses

SOMMAIRE

ÉDITO

Patrice Bueso

AVANCÉES DE LA RECHERCHE

PAGE 3

- La contamination à Fukushima : des rivières à la mer

FOCUS

PAGE 6

Le comportement des poussières dans le tokamak, clé du risque d'explosion dans ITER

FORMATION PAR LA RECHERCHE

PAGE 9

- Effets métaboliques, transcriptomiques et épigénétiques de l'uranium à faibles doses
- Le brouillard contribue-t-il aux retombées radioactives ?

VIE DE LA RECHERCHE

PAGE 11

- Publications scientifiques
 - L'IRSN renforce son engagement pour la science ouverte
- Projets de recherche
 - Résultats de l'appel à projets H2020: l'IRSN participe à 8 projets de recherche
 - Appels à projets ANR et INCa: 5 projets auxquels participe l'IRSN sélectionnés en santé et en radioécologie
- HDR
 - Trois nouvelles soutenances

Glossaire ^{GL0}

PAGE 12

Photo de couverture - Caractérisation du jet diphasique (eau et vapeur) issu de l'entrée de l'eau dans un caisson à basse pression. © B. Blaisot/IRSN

La CONTAMINATION à Fukushima: des RIVIÈRES à la MER

En situation d'urgence nucléaire ou radiologique, comme en phase post-accidentelle, l'IRSN doit être en mesure de prédire le devenir des radionucléides dans l'environnement et d'évaluer leur impact sur l'homme et l'environnement afin d'aider les pouvoirs publics à prendre les décisions appropriées. Les outils de simulation utilisés après un accident permettent notamment de définir les zones de protection des populations ou de surveillance renforcée des territoires. L'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi a mis en lumière la nécessité de mieux comprendre, quantifier et prédire la distribution, dans l'espace et dans le temps, des radionucléides rejetés dans l'environnement, notamment au sein des forêts et sur les bassins versants et dans l'environnement marin. Le projet AMORAD⁽¹⁾ a été construit pour réduire les incertitudes sur le devenir à court, moyen et long termes des radionucléides dans l'environnement et leurs conséquences radiologiques et sanitaires, en particulier dans ces écosystèmes continentaux et marins. Au sein d'AMORAD, le programme ERO visait à mieux comprendre les processus d'érosion et de ruissellement des radionucléides dans la zone touchée par le panache de contamination au nord-est de la préfecture de Fukushima. Il a ainsi amélioré la prédiction des exports de contamination vers l'aval des bassins versants et à la mer.

Après l'accident de Fukushima, de larges zones ont été contaminées par des retombées radioactives sur les sols, les forêts et les villages de la région. Les plus contaminées (au-delà de 100 kBq/m² initialement) couvrent une surface d'environ 3 000 km² au nord-est de la centrale et sont drainées par plusieurs rivières côtières. Sur ces bassins versants, le radiocésium est entraîné par ruissellement, soit sous forme dissoute, soit sous forme solide en étant intégré à des particules transportées par l'eau (érosion hydrique). Le flux particulaire est largement majoritaire dans la quantité annuelle de radiocésium exporté (en effet, le radiocésium se fixe facilement sur les particules), notamment en périodes de forts débits (typhons, fonte des neiges) où la charge particulaire est très forte. Le flux dissous est mineur, mais il peut cependant constituer jusqu'à 50 % du flux total en conditions de bas débit hydrique.

Le programme « Erosion des bassins versants » ou ERO, piloté au sein d'AMORAD par le Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE, unité mixte CEA-CNRS), s'est intéressé à cinq bassins versants côtiers drainant la zone contaminée par le panache de l'accident. L'IRSN y a

contribué pour quantifier et caractériser les formes sous lesquelles le radiocésium (isotopes 134 et 137) est transporté dans les rivières en conditions de bas débit, et modéliser les flux de radiocésium depuis les bassins versants jusqu'à l'océan.

Biomasse contaminée

Les campagnes de prélèvement de l'IRSN ont ciblé des périodes de bas débit des rivières précédant la saison des typhons hivernaux, périodes caractérisées par de faibles teneurs en matières en suspension. La première campagne en novembre 2013 a permis de récolter des sédiments et de l'eau en plusieurs points de cinq rivières côtières au nord de la centrale nucléaire.

Les données analysées montrent que les concentrations de césium 137 dissous et particulaire sont restées proches de celles relevées le mois qui a suivi l'accident, et qu'elles sont par ailleurs directement proportionnelles aux niveaux de contamination des sols des bassins versants. Le nouveau résultat apporté par ces travaux est l'observation d'une corrélation positive entre les concentrations de radiocésium dans les matières en suspension ou les sédiments et la teneur de ces derniers en matière organique.

 Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE, Gif-sur-Yvette, France); Center of Research in Isotopes and Environmental Dynamics (CRIED - Tsukuba University, Japon)

CONTACTS

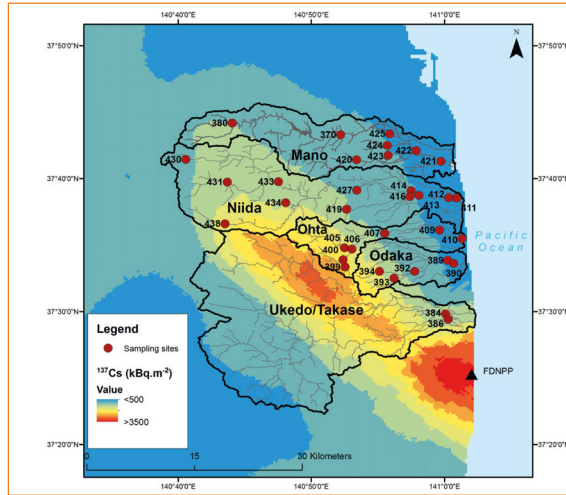
Frédérique Eyrolle
frederique.eyrolle@irsn.fr

Laboratoire de recherche sur les transferts des radionucléides dans les écosystèmes aquatiques - LRTA

Laurent Garcia-Sanchez
laurent.garcia-sanchez@irsn.fr

Laboratoire de recherche sur les transferts des radionucléides dans les écosystèmes terrestres - LRzT

⁽¹⁾ AMORAD est financé par l'appel à projets Recherche en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection du Programme d'investissements d'avenir (PIA-RNSR).



Points de prélèvement sur les cinq rivières étudiées. FDNPP signifie Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant et désigne sur cette carte et la suivante le site de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi. © Science of the Total Environment 579 (2017) 1560–1571

PUBLICATIONS

• Eyrolle-Boyer F. *et al.* « Behaviour of radiocaesium in coastal rivers of the Fukushima Prefecture (Japan) during conditions of low flow and low turbidity - Insight on the possible role of small particles and detrital organic compounds » *Journal of Environmental Radioactivity* 151 (2016) 328–340.



• Naulier M. *et al.* « Particulate organic matter in rivers of Fukushima: An unexpected carrier phase for radiocesiums » *Science of the Total Environment* 579 (2017) 1560–1571

• Delmas M. *et al.* « Improving transfer functions to describe radiocesium wash-off fluxes for the Niida River by a Bayesian approach » *Journal of Environmental Radioactivity* 167 (2017) 100e109

On considérait jusqu'ici que le césium était transporté principalement sur les phases argileuses issues des sols. Le résultat obtenu par Laboratoire de recherche sur les transferts de radionucléides dans les écosystèmes aquatiques (LRTA) de l'IRSN suggère au contraire que la biomasse contaminée des bassins versants contribue de façon non négligeable au transfert de la contamination par les cours d'eau, au moins dans le contexte étudié.

Deux autres campagnes de prélèvements ont été menées en octobre 2014 et mars 2016. Les concentrations de césium 137 n'ont pas montré d'évolution d'une année sur l'autre indiquant un niveau de contamination stable pour ces rivières. Ces nouvelles données ont en outre confirmé une relation entre concentration en césium et concentration en matière organique. Dans des conditions de faibles débits, la fraction portée par les particules organiques est plus importante que celle existant sur les particules minérales, ce qui est contraire aux observations faites à Tchernobyl. Hors périodes de typhons ou de fonte des neiges, la contamination des rivières pourrait donc venir principalement des matières organiques, en particulier de celles issues de la forêt très présente sur les bassins versants étudiés. Sachant que la matière organique adsorbe peu le radiocésium, les chercheurs formulent l'hypothèse qu'il s'agit probablement de résidus de feuilles mortes ou de résidus organiques contaminés immédiatement après l'accident et progressivement exportés vers les cours d'eau. Il est cependant possible que des

particules vitrifiées contaminées se soient mêlées à la matière organique. Un point important mais encore non étudié est que cette fraction associée à la matière organique pourrait être plus disponible pour les organismes vivants qui s'en nourrissent (mollusques, poissons, vers...), augmentant alors le transfert vers les espèces aquatiques et marines.

Formulations mathématiques

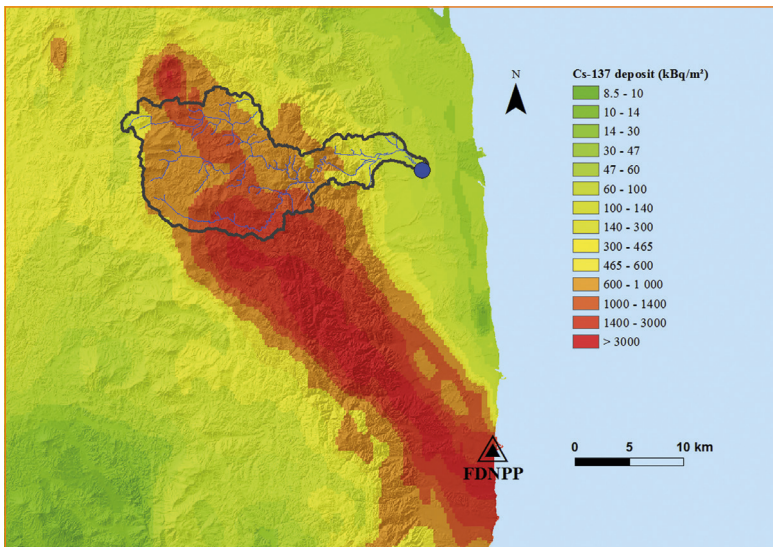
Le programme ERO visait aussi à perfectionner les outils de simulation qui représentent le transfert de la contamination *via* les rivières jusqu'à l'océan, en exploitant la grande quantité de mesures réalisées sur le terrain par les partenaires du programme ainsi que par les autorités et scientifiques japonais. Les chercheurs ont étudié comment améliorer les formulations mathématiques (fonctions de transfert) utilisées dans les modèles opérationnels pour simuler le transport du radiocésium. Il est admis que la concentration de radiocésium dans l'eau des rivières en aval d'un bassin versant contaminé suit en moyenne une courbe de décroissance exponentielle dans le temps, mais que de fortes variations locales et temporelles apparaissent dans ces données notamment en fonction des saisons (typhons, fonte des neiges, ou bas débit). Les scientifiques ont alors construit trois modèles différents puis comparé les simulations avec les données de terrain. Le premier modèle utilisait une fonction de transfert générique qui

permet de définir le flux de lessivage moyen d'un bassin versant après un pic de contamination, et ce uniquement en fonction du temps. Cette fonction a été validée par des mesures réalisées à Tchernobyl et après les essais nucléaires atmosphériques du XX^e siècle. Deux autres modèles ont ensuite été construits sur cette base et prennent en compte l'évolution du débit d'eau en plus du temps. Le premier considère une variation linéaire entre le flux de césium et le débit d'eau instantané ; et le deuxième tient compte en outre des évolutions hydrologiques antérieures qui peuvent avoir eu une influence sur le lessivage du césium (par exemple, les concentrations de radiocésium en période de bas débit peuvent varier selon qu'un typhon a eu lieu juste avant ou non). Le travail a été réalisé sur la rivière Niida sur la base de mesures de débit d'eau et de concentrations totales en radiocésium obtenues entre 2011 et 2015. Ces données étant toutefois parcellaires ou incomplètes, une méthode bayésienne a été développée pour estimer au mieux les paramètres des trois modèles et leurs incertitudes. La comparaison entre les résultats des modèles et les données collectées a révélé que le dernier modèle, qui intègre les fluctuations liées au débit de la rivière, était le plus juste pour évaluer les flux de césium exportés. Les bilans réalisés montrent que le

flux exporté annuellement ne représente que 0,1 % des dépôts sur le bassin versant, c'est-à-dire que plus de 99 % de ces dépôts restent stockés. Le ruissellement naturel ne suffit pas à la décontamination des territoires. Les ordres de grandeurs proposés sont cohérents avec ceux reportés dans la littérature. Bien qu'il soit très faible comparé aux dépôts (si l'on rapporte la valeur du flux exporté à l'ensemble de la surface contaminée), ce ruissellement apparaît comme une source de radiocésium non négligeable pour l'océan en comparaison des apports directs venant de la centrale lors de l'accident. L'originalité de ce travail était de prendre en compte le débit dans les fonctions de transfert pour mieux décrire les fluctuations observées dans les flux en raison des orages tropicaux. Mais elle est donc spécifique à cette zone géographique et ne peut être davantage extrapolée sans données sur d'autres bassins versants.

Le projet ERO a ainsi permis d'affiner les modèles d'érosion des bassins versants et de proposer un nouveau modèle pour décrire à la fois la diminution moyenne avec le temps des flux de radiocésium exportés et ses fluctuations à court terme. Il a aussi révélé le rôle inattendu des particules organiques érodées des sols forestiers contaminés pour le transfert de radiocésium vers l'océan.

En savoir plus sur le projet AMORAD



Bassin versant de la rivière Niida

© Journal of Environmental Radioactivity 167 (2017) 100e109

Le COMPORTEMENT des poussières dans le TOKAMAK, clé du risque d'EXPLOSION dans ITER

 CEA
(Institut de
recherche sur la fusion
par confinement
magnétique et Institut
des sciences du vivant
Frédéric Joliot), projet
européen *Enabling
Research* (consortium
Eurofusion).

CONTACTS

Emmanuel Porcheron
emmanuel.porcheron
@irsn.fr

Samuel Peillon
samuel.peillon
@irsn.fr

François Gensdarmes
francois.gensdarmes
@irsn.fr

Laboratoire
de physique et
de métrologie des
aérosols - LPMA

Thomas Gelain
thomas.gelain
@irsn.fr

Laboratoire
d'expérimentations
et de modélisation
en aérodispersion et
confinement - LEMAC

Ahmed Bentaib
ahmed.bentaib
@irsn.fr

Service des accidents
graves - SAG

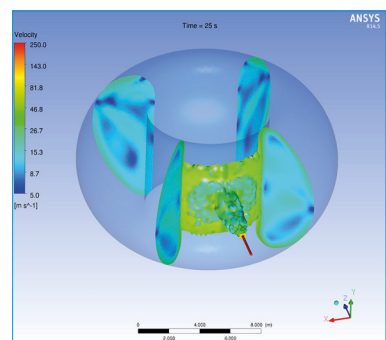
⁽¹⁾ La chambre à vide est une enceinte en acier inoxydable. 45 trappes fermées durant le fonctionnement de l'installation permettront d'effectuer les opérations de maintenance et d'obtenir le vide. C'est la présence de ces ouvertures qui induit un risque d'entrée d'air ou d'eau dans la chambre à vide. Dans le cas du LOVA, et selon leur concentration, les poussières de métal peuvent exploser à la suite de la combustion de l'hydrogène. Dans le cas de l'ICE, la vapeur d'eau produite fait augmenter la

L'IRSN mène depuis plusieurs années des recherches sur certains phénomènes physiques pouvant avoir un fort impact sur la sûreté de l'installation de fusion ITER. Il s'agit de disposer des connaissances utiles à l'analyse des rapports de sûreté associés à la demande de la mise en service de l'installation. Les deux principaux accidents majeurs envisagés pouvant conduire à la dissémination des produits radioactifs sont l'accident de perte de vide par entrée d'air dans la chambre à vide (*Loss of Vacuum by Air Ingress* ou LOVA) et l'accident d'entrée d'eau (*Ingress of Coolant Event* ou ICE). La présence d'oxygène et de vapeur d'eau, dans ce système sous vide et inerté en conditions normales, serait susceptible d'entraîner l'explosion des poussières métalliques de béryllium et de tungstène produites pendant le fonctionnement de l'installation, si elles étaient mises en suspension par l'écoulement d'entrée d'air ou d'eau. Ces explosions conduiraient à la destruction de la chambre à vide et, par conséquent, à la dissémination des poussières extrêmement toxiques de béryllium et de tungstène associées au tritium. Le comportement des poussières lors de ces accidents est donc un phénomène clé que l'IRSN étudie depuis quelques années et dont les premiers résultats ont été mis à profit dans les avis de l'IRSN associés à l'analyse des dossiers de démonstration de sûreté de l'installation ITER.

Lorsqu'on parle de fusion pour générer de l'énergie, il s'agit de porter des atomes de tritium et de deutérium à une température de 150 à 300 millions de degrés afin de créer un plasma suffisamment agité pour que les noyaux puissent fusionner en dégageant de l'énergie. Dans l'installation ITER, le plasma est créé dans un tokamak, une chambre en forme de tore sous un vide poussé, où il est maintenu à distance des parois à l'aide de champs magnétiques très intenses. Les parois du tokamak en acier sont recouvertes sur leur face interne de tungstène et de béryllium, deux matériaux capables de résister aux conditions de chaleur et de pression extrêmes ainsi qu'aux flux de neutrons émis par les réactions nucléaires dans le plasma.

Lors du fonctionnement d'ITER, les matériaux faisant face au plasma auront à subir des flux de neutrons et des flux de chaleur de plusieurs mégawatts par mètre carré, voire un contact avec le plasma lors d'instabilités du confinement magnétique appelées disruptions, ce qui aura pour effet de les éroder. Des centaines de kilogrammes de poussières de béryllium et de tungstène seront ainsi produites dans la chambre

à vide⁽¹⁾ et sédimenteront rapidement sur les parois entre deux opérations de dépoussiérage⁽²⁾ par des robots. Si de la vapeur d'eau ou de l'air entrain accidentellement dans cette enceinte, l'écoulement aéraulique induit mettrait en suspension les poussières déposées. L'oxygène



Champs de vélocité du flux d'air dans le tore de ITER et contour du jet d'air 25 s après l'entrée d'air. L'installation est située à côté du centre de Cadarache, dans les Bouches-du-Rhône.

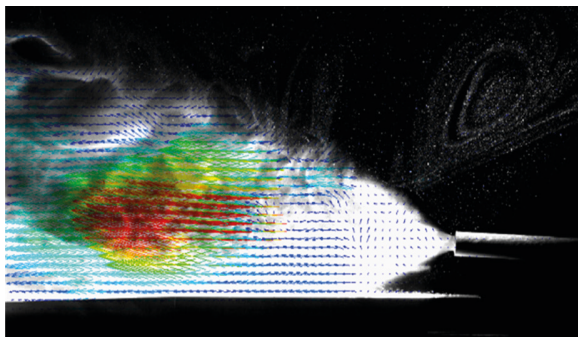
© T. Gelain/IRSN Fusion Engineering and Design
100 (2015) 87-99

apporté rendrait inflammable l'atmosphère de la chambre à vide et pourrait provoquer la combustion du deutérium et du tritium, isotopes de l'hydrogène. L'énergie ainsi produite serait susceptible de déclencher l'explosion des poussières pouvant mener à la destruction de l'enceinte. Aussi, la quantité de poussières remise en suspension est un paramètre très important pour évaluer la pression générée par l'explosion.

Comprendre et modéliser le phénomène de la remise en suspension des particules dans les conditions d'un accident LOVA ou ICE est donc crucial. Il résulte de la compétition entre les forces de frottement dues aux écoulements d'air et les forces d'adhérence⁽³⁾. Mais, dans ITER, sa représentation est complexe car la perte de vide entraîne l'évolution des caractéristiques des flux d'air dans le temps et dans l'espace. Des travaux de recherche, menés notamment dans le cadre de thèses de doctorat, ont été lancés à l'IRSN pour modéliser le phénomène de remise en suspension de particules lors d'un scénario LOVA. Une thèse expérimentale (soutenue par Antony Rondeau en 2015) a d'abord permis de quantifier les vitesses d'écoulement d'air nécessaires pour décoller les particules et les remettre en suspension dans les conditions de pression allant de la pression atmosphérique à 10 millibars. Mettant en œuvre plusieurs types de dépôts de particule, le doctorant a mesuré ces vitesses dans des chambres aérauliques à l'IRSN (installation BISE) et à l'université d'Aarhus au Danemark (installation AWTS-II). En parallèle, des essais de perte de vide par entrée d'air ont été réalisés dans l'installation TOSQAN de l'IRSN, pour des conditions initiales de vide primaire (1 mbar).

Forces d'adhésion par mesure directe à l'AFM

Les forces d'adhésion de particules sur des surfaces rugueuses, qui font actuellement l'objet de la thèse de Samuel Peillon, sont difficilement mesurables en raison de leur complexité : elles dépendent notamment des conditions d'humidité et de température, de la géométrie (taille, rugosité) des surfaces en contact et des interactions chimiques. Les premiers travaux du doctorant ont permis de quantifier ces forces par une mesure directe à l'aide d'un microscope à force atomique (AFM) sur une seule



Champs de vitesses des particules lors d'une entrée d'air à basse pression simulée dans l'installation TOSQAN. En bleu, 100 m.s⁻¹; en rouge, 1000 m.s⁻¹
© E. Porcheron/IRSN

particule⁽⁴⁾, en utilisant des sphères de tungstène micrométriques sur des surfaces de tungstène de différentes rugosités. La forme sphérique permet de comparer plus simplement les modèles existants pour les forces d'adhésion avec les mesures relevées. Les mesures obtenues pour les forces d'adhésion ont montré un bon accord avec un modèle théorique prenant en compte la rugosité des surfaces. Ce modèle pourrait ainsi remplacer les corrélations empiriques classiquement utilisées dans les modèles de mise en suspension. De plus, l'analyse de ces données expérimentales a montré qu'une rugosité de surface de l'ordre du micromètre (semblable à celle des surfaces dégradées par un plasma) diminue l'adhérence des particules de deux ordres de grandeur par rapport à ce qui se produit sur une surface parfaitement lisse. Ceci implique nécessairement une augmentation de la quantité de particules remises en suspension pour un scénario donné.

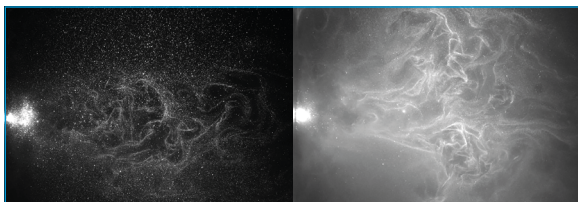
Par ailleurs, l'IRSN a implémenté le modèle de remise en suspension de particules Rock'n'Roll (proposé en 2001 par M. W. Reeks et D. Hall) dans un logiciel de simulation de type CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Des simulations numériques des flux d'air et de la remise en suspension ont ainsi pu être réalisées dans une géométrie représentative d'un tokamak lors d'une perte de vide. Elles ont permis de calculer l'évolution des vitesses de frottement de l'air le long des parois de la chambre à vide, qui jouent un rôle fondamental dans la remise en suspension, puis d'en déduire les forces

pression interne qui se transfère, avec l'hydrogène produit, dans des réservoirs de décharge non inertés, rendant possible l'explosion.

- ⁽²⁾ La sûreté de l'installation impose que la masse de poussières métallique ne dépasse pas quelques centaines de kilogrammes, et environ 1 kilogramme pour le tritium.
- ⁽³⁾ La gravité, les forces de Van der Waals et autres forces électrostatiques.
- ⁽⁴⁾ Contrairement aux méthodes existantes qui mesurent la force opposée à la force d'adhésion d'un ensemble de particules.

PUBLICATIONS

• *Étude de la mise en suspension aéraulique appliquée à la problématique des poussières dans le futur tokamak ITER*, thèse soutenue par Anthony Rondeau le 7 décembre 2015 à l'université Paris-Saclay, École doctorale des sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences, spécialité : mécanique des fluides.



Caractérisation du jet diphasique (eau et vapeur) issu de l'entrée d'eau dans l'installation FAAMUS à basse pression.

© B. Blaisot /IRSN

PUBLICATIONS

- Gelain *et al.* « CFD modelling of the wall friction velocity field in the ITER tokamak resulting from airflow during a loss of vacuum accident - Consequences for particle resuspension » *Fusion Engineering and Design* 100 (2015) 87-99
- Porcheron E. *et al.* « Investigation of air ingress into a vacuum vessel related to particle resuspension and distribution for dust issues in ITER » Proceedings of ICONF-25, 25th International Conference on Nuclear Engineering, 2-6 juillet 2017, Shanghai, Chine
- Peillon S. *et al.* « Adhesion of tungsten particles on rough tungsten surfaces using Atomic Force Microscopy » (2019) *Journal of Aerosol Science*, 137, 105431
- Blaisot B. *et al.* « Flash-boiling characterization during ingress coolant event (ICE) for dust issues in ITER » Proceedings of ICONF-27, 27th International Conference on Nuclear Engineering, 19-24 mai 2019, Ibaraki, Japon
- García-Cascalesa J.R. *et al.* « Characterisation of metal combustion with DUST code » *Fusion Engineering and Design* (oct 2015) Vol 98-99, pp 2142-2146

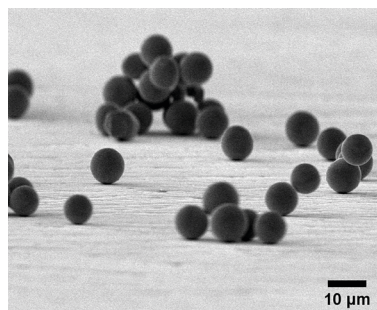
aérodynamiques exercées sur les particules lors de l'augmentation de pression induite par la perte de vide. Ces résultats ont montré que le diamètre des particules et la densité du fluide entrant sont des éléments importants dans l'évolution du phénomène. En comparant les forces adhésives et les forces des flux d'air, il apparaît que l'accident LOVA peut remettre en suspension des particules de l'ordre du micromètre. Il est donc nécessaire de bien connaître la taille et la répartition des particules pour évaluer le risque engendré par un accident de perte de vide.

Ebullitions-flashes de jets d'eau

Le cas de l'accident de type ICE, et ce qu'il induit pour les poussières, fait de son côté l'objet de la thèse de Benjamin Blaisot. À son entrée dans la chambre à vide, l'eau se vaporiserait brutalement au sein d'un jet qui serait diphasique (eau et vapeur) du fait de la fragmentation thermique et des mécanismes d'ébullition avant et après la brèche. Pour étudier les mécanismes de remise en suspension des poussières, les caractéristiques de ce jet doivent donc d'abord être connues. Le doctorant a réalisé dans l'installation FAAMUS, conçue dans le cadre de la thèse, des expériences d'ébullition-flash de jets d'eau dans des conditions de vide primaire (1 mbar à 10 mbar). Deux techniques de mesure disponibles dans l'installation, l'ombroscopie rapide et la PIV rapide (*Particle Image Velocimetry*), lui ont permis d'étudier le comportement et la structure de l'écoulement de l'eau surchauffée (20 °C à 140 °C) injectée sous vide. L'écoulement diphasique a ainsi été caractérisé, en amont et en aval de la brèche : régime d'ébullition, géométrie de la pulvérisation, vitesses des gouttelettes et du gaz pour différentes conditions de surchauffe et de débits massiques d'eau injectée. Les résultats

montrent en particulier que la fragmentation du jet liquide et donc la production du flux de vapeur est très dépendante des mécanismes d'ébullition qui s'opèrent en amont de la brèche. Ce travail se poursuit avec l'étude de l'interaction entre le spray et des particules déposées sur une paroi dans FAAMUS. L'objectif de cette expérimentation est de mesurer notamment l'impact de la vitesse de frottement du jet de vapeur d'eau entrant dans la chambre à vide sur la mise en suspension des particules.

Pour les deux scénarios accidentels, la remise en suspension des particules et la présence d'oxygène conduisent à la formation d'une atmosphère explosible (ATEX). Les premières évaluations des pressions générées par l'explosion concomitante des isotopes de l'hydrogène et des poussières ont été réalisées avec le logiciel DUST développé en collaboration entre l'université de Carthagène (Espagne) et l'IRSN dont les modèles de combustion s'appuient sur les résultats de thèse de Jérémy Sabard. Un nouveau logiciel, P²REMICS, est par ailleurs développé à l'IRSN pour simuler l'explosion de gaz et de poussières, y compris mélangés, dans les installations nucléaires pour une très large palette de configurations. Les différents résultats obtenus lors de ces thèses vont servir à compléter les modélisations existantes de la remise en suspension des particules et de l'explosion, qui contribueront à qualifier l'utilisation de P²REMICS pour la configuration et les scénarios accidentels d'ITER.



Dépôt de particules de tungstène sphériques sur une surface de tungstène. Des sphères de 1 à 10 micromètres ont été utilisées sur des surfaces ayant des rugosités de l'ordre du nanomètre, du dixième de micromètre et du micromètre. Image obtenue par microscopie électronique à balayage.

© A. Roynette/S. Peillon IRSN

Effets MÉTABOLOMIQUES, TRANSCRIPTOMIQUES et ÉPIGÉNÉTIQUES de l'uranium à faibles doses

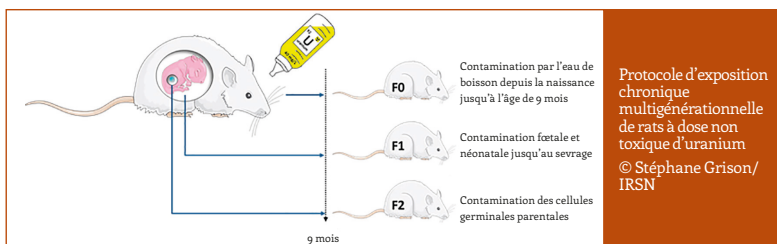
Les recherches menées par l'IRSN sur les expositions chroniques à faible dose d'uranium ont permis de caractériser des effets biologiques au niveau de certains métabolismes et systèmes physiologiques. Une thèse de doctorat a ainsi été réalisée à l'Institut sur l'impact multigénérationnel des faibles doses d'uranium.

 Aix-Marseille Université ;
Université Clermont-Auvergne

CONTACT

Stéphane Grison
stephane.grison
@irsn.fr

Laboratoire de radiotoxicologie et radiobiologie expérimentale - LRTox



⁽⁴⁾ Qui associent la mesure exhaustive d'un système moléculaire et des méthodes statistiques et informatiques adaptées au traitement simultané de grands nombres de données

⁽⁵⁾ Phases de développement particulièrement sensibles.

Pour évaluer la toxicité potentielle d'une exposition chronique à faible dose d'uranium, la démarche a consisté à s'intéresser aux cibles biologiques de l'uranium, à l'incidence du sexe des individus sur la réponse biologique ainsi qu'à la transmission d'effets aux générations suivantes. Dans ce but, Stéphane Grison a étudié durant sa thèse l'impact d'une contamination chronique (de plusieurs mois) à dose non toxique d'uranium sur différents systèmes moléculaires (métaboliques, géniques, épigénétiques) chez le rat. Ce travail a été réalisé en employant des techniques analytiques⁽¹⁾ adaptées au décryptage des systèmes de régulation complexes et intégrés : métabolomique^{GL0}, transcriptomique^{GL0} et épigénomique^{GL0}.

L'analyse métabolomique des échantillons de sang, d'urine et de rein (cible de l'uranium) a révélé l'existence d'effets de l'uranium sur certains métabolismes pour des doses extrêmement faibles. En outre, la relation entre la dose et l'effet dépend du temps d'exposition et du sexe des animaux. Cette influence du sexe des animaux sur la réponse biologique à l'uranium a été confirmée au niveau génique, par analyse transcriptomique^{GL0} (ARNm et micro-ARN) des reins. Les données fournies par ces analyses omiques (de l'expression des gènes jusqu'au métabolisme) ont mis en évidence des

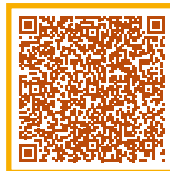
relations moléculaires entre les différents niveaux de régulation pouvant expliquer une partie des mécanismes d'action de l'uranium.

Pour savoir si ces effets étaient transmissibles, Stéphane Grison s'est ensuite intéressé aux effets de l'uranium sur trois générations de rats. La première génération (F0) a été contaminée durant toute sa vie depuis la naissance, la seconde (F1) exposée *in utero*⁽²⁾ et la troisième (F2) exposée *via* les cellules germinales^{GL0} de F1. Le suivi clinique réalisé sur les animaux n'a pas montré d'effet majeur, hormis une légère baisse du poids corporel des deuxième et troisième générations. En revanche, Stéphane Grison a observé que l'impact de l'uranium sur le métabolisme varie selon le sexe des animaux pour les trois générations. Au niveau épigénétique, cet effet se traduit par une augmentation du niveau de méthylation^{GL0} de l'ADN des cellules rénales des mâles des groupes contaminés des deux dernières générations (F1, F2) seulement.

Ainsi, l'un des principaux résultats est qu'une contamination chronique à faible dose d'uranium peut entraîner des effets biologiques (non cliniques) observables à différentes échelles moléculaires sur plusieurs générations de rats, effets étroitement dépendant du sexe des animaux. Les données recueillies peuvent contribuer à l'évaluation du risque des expositions chroniques à l'uranium chez l'homme.

PUBLICATION

• *Étude des effets multigénérationnels d'une exposition chronique à faible dose d'uranium par analyses omiques*, thèse de doctorat soutenue par Stéphane Grison le 13 décembre 2018 à Fontenay-aux-Roses, École doctorale des sciences de la vie et de la santé - agronomie - environnement (Université Clermont Auvergne).



Le BROUILLARD contribue-t-il aux RETOMBÉES RADIOACTIVES ?

Météo-France /
CNRM; Federal
Authority for Nuclear
Regulation

CONTACT

Olivier Masson
olivier.masson@irsn.fr

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

⁽¹⁾ Plateforme
d'observation
atmosphérique
de l'Andra à
Houdelaincourt
(Meuse); station
de recherche
atmosphérique de
l'OPGC/CNRS2 au
sommet du Puy-de-
Dôme; plateforme
d'étude atmosphérique
SIRTA3 de l'IPSL4 à
Palaiseau (Essonne).

⁽²⁾ Il s'agit de traces
de plomb 210,
radionucléide naturel
dérivant du radon,
et fréquemment
utilisé comme traceur
atmosphérique.

PUBLICATION

• *Étude du dépôt
de radionucléides
par les gouttelettes
de brouillards et
de nuages sur les
végétaux à partir
d'expérimentations
in situ*, thèse
soutenue par Jacky
Tav le 12 octobre
2017 à l'université
de Toulouse, École
doctorale des sciences
de l'univers de
l'environnement et de
l'espace (SDUEE).



La gestion des conséquences d'un accident nucléaire repose notamment sur des modèles décrivant le transfert des radionucléides dans l'environnement. L'IRSN consacre une partie de ses travaux expérimentaux à mieux comprendre les mécanismes de ce transfert, au travers notamment d'une thèse menée pour quantifier la contribution des brouillards au dépôt de radionucléides sur les végétaux.

Faut-il tenir compte de la présence des brouillards pour évaluer le dépôt de radionucléides en cas d'accident nucléaire ? Afin d'estimer ces dépôts trop faibles pour être mesurés par des instruments classiques, une thèse expérimentale a été conduite par Jackie Tav sur plusieurs sites exposés aux brouillards ou aux nuages, en Meuse, dans le Puy-de Dôme et en Île-de-France⁽¹⁾.

Durant deux campagnes de mesures en 2015 et 2016, la doctorante a caractérisé l'eau présente dans les brouillards et nuages bas (nombre et taille des gouttelettes) et mesuré les quantités d'eau déposées sur différents types de végétaux. Elle a pu calculer que la vitesse de dépôt des gouttelettes de brouillard pouvait atteindre plusieurs dizaines de centimètres par seconde dans le cas de grosses gouttelettes (diamètre médian de 20 µm). Ces vitesses élevées mettent en évidence l'importance de la sédimentation des gouttelettes et de la turbulence atmosphérique, même minime dans

les brouillards, en particulier en présence de végétaux à structure foliaire tridimensionnelle (aiguilles) comme les conifères. L'effet d'une densité de feuilles élevée limitant le dépôt au-delà des premiers obstacles, a également été quantifié.

25% des dépôts

Les concentrations en radionucléides présents à l'état de traces⁽²⁾ dans les gouttes ont par ailleurs été mesurées par le LMRE, laboratoire spécialisé de l'IRSN. Les résultats ont montré que la concentration dans l'eau de brouillard pouvait être jusqu'à 20 fois supérieure à celle de l'eau de pluie (plus diluée en raison de la condensation de vapeur d'eau sur les gouttelettes au cours de leur grossissement). Ainsi, sur le site meusien, les mesures réalisées à l'automne et à l'hiver montrent que le dépôt, via les brouillards, de radionucléides naturellement présents dans l'atmosphère a représenté à lui seul 25 % des dépôts totaux de radionucléides. En cas de rejet accidentel, la présence de brouillard pourrait conduire à un dépôt supplémentaire équivalent à 15 % de celui qui serait observé par temps sec.

Ces résultats montrent que la présence de brouillard ou de nuages bas doit être prise en compte pour mieux quantifier les retombées radioactives en situation accidentelle ou post-accidentelle sur les régions les plus exposées à ces manifestations météorologiques et notamment autour des installations nucléaires proches de cours d'eau. L'ajout d'un module de dépôt par le brouillard a d'ores et déjà été prévu dans les modèles de transport atmosphérique de radionucléides utilisés à l'IRSN.

Ces travaux restent à compléter pour quantifier et modéliser la turbulence induite par l'écoulement de l'air au voisinage des obstacles comme des végétaux de grandes tailles ou à l'échelle d'un massif forestier.



Collecteurs de brouillard.
© IRSN

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

L'IRSN RENFORCE SON ENGAGEMENT POUR LA SCIENCE OUVERTE

Depuis le 1^{er} juillet, les publications scientifiques de l'IRSN sont automatiquement déposées sur la plateforme nationale d'archive ouverte HAL (Hyper articles en ligne) développée en 2001 par le Centre pour la communication scientifique directe (CCSD) du CNRS. L'IRSN entend ainsi rendre accessibles à tous les articles scientifiques rédigés par ses chercheurs au format numérique, gratuitement et dans le respect des droits de diffusion imposés par l'éditeur.



Jean-Christophe Niel, directeur général de l'IRSN, inaugure le nouvel outil de diffusion des publications de l'IRSN vers HAL. À ses côtés, Audrey Legendre, chargée d'ingénierie des connaissances

© Sandrine Marano / IRSN

PROJETS DE RECHERCHE

RÉSULTATS DE L'APPEL À PROJETS H2020 : L'IRSN PARTICIPE À 8 PROJETS DE RECHERCHE

La Commission européenne a publié en juin les résultats de son appel à projets Euratom H2020 2018-2019. L'IRSN participe à huit des treize nouveaux projets européens qui seront lancés dans l'année dans l'objectif d'améliorer la sûreté et la radioprotection. Dans le domaine de la sûreté nucléaire : deux projets auxquels l'IRSN participe concernent les réacteurs de génération II et III, R2CA (*Reduction of Radiological Consequence in design based Assessment*) piloté par l'Institut, sur les conséquences radiologiques des accidents de dimensionnement et leur stratégie de gestion, et MUSA (*Management and Uncertainties in Severe Accidents*), sur l'amélioration des outils de simulations d'accidents graves. Dans le domaine de la sûreté des réacteurs de génération IV, l'Institut participe au projet SAMOSAFER (*Severe Accident Modeling and Safety Assessment for Fluid-fuel Energy Reactors*). Dans celui de la sûreté des réacteurs modulaires à eau légère, il concourt au projet ELSMOR (*towards European Licensing of Small Modular Reactors*). L'Institut va également rejoindre la suite d'un projet sur les données nucléaires pour les applications de modélisations : SANDA

follow-up (*Supplying Accurate Nuclear Data for energy and non-energy Applications*) et participe au projet SHARE (*Stakeholder-based Analysis of REsearch for decommissioning*) à propos de l'élaboration d'une feuille de route pour la recherche sur le déclassement des installations. Dans le domaine de la gestion des déchets nucléaires, il participe au programme EURAD (*EUROpean joint programming on RAdioactive waste management and Disposal*) sur tous les aspects techniques du stockage géologique profond des déchets. Enfin, dans le domaine de la radioprotection, au projet HARMONIC (*Health effect of Ardiac fluoRoscropy and MODerN radlotherapy In paediatricS*), qui porte sur les effets sur la santé de la fluoroscopie (ou radioscopie) et de nouvelles approches de radiothérapie cardiaque pédiatrique.

En savoir plus sur l'appel à projets H2020



En savoir plus sur les publications scientifiques



APPELS À PROJETS : 3 PROJETS ANR ET 2 PROJETS INCA AUXQUELS PARTICIPE L'IRSN SÉLECTIONNÉS EN SANTÉ ET EN RADIOÉCOLOGIE

L'Agence nationale pour la recherche (ANR) et l'Institut national du cancer (INCa) ont publié fin juillet les résultats de leurs appels à projets pour 2019. L'IRSN pilote quatre des projets sélectionnés et participe à un cinquième. Les projets Trajectoire et OPEN (ANR) pilotés par l'IRSN visent respectivement à étudier le témoignage des archives sédimentaires pour mieux appréhender l'impact environnemental des nouvelles technologies, et à concevoir des patchs auto-enroulés biorésorbables pour le traitement local de l'inflammation post-irradiation du colon, suite à une radiothérapie de la zone abdomino-pelvienne ; quant au projet INTRUST (ANR-Astrid), il s'intéresse à une innovation thérapeutique pour le traitement du syndrome gastro-intestinal radio-induit. Côté INCa, le projet « Estimation du risque d'incidence de cancer après exposition au scanner dans l'enfance » piloté par l'IRSN vise à mieux comprendre les risques associés à l'utilisation du scanner dans l'enfance, enfin le projet « Homéostasie moléculaire du myotube après exposition aux rayonnements ionisants », piloté par le CNRS, étudie les atteintes musculo-squelettiques lors d'une irradiation, qu'elle soit accidentelle ou maîtrisée, en radiothérapie.

HDR

TROIS NOUVELLES SOUTENANCES

Béatrice Gagnaire du Laboratoire d'écotoxicologie des radionucléides (LECO) de l'IRSN a soutenu son habilitation à diriger des recherches (HDR) de l'université Aix-Marseille intitulée *Évaluation des effets in vivo et in situ de polluants sur la santé des poissons : développement de biomarqueurs – intérêt dans l'évaluation du risque environnemental* le jeudi 19 septembre.

Christelle Huet du Laboratoire de dosimétrie des rayonnements ionisants (LDRI) de l'IRSN a soutenu son HDR de l'université Paris-Saclay intitulée *Accidents radiologiques et radiothérapie stéréotaxique : développements méthodologiques pour une dosimétrie optimisée* le 9 juillet 2019 à l'IRSN (Fontenay-aux-Roses).

Alkiviadis Gourgios du Laboratoire sur le devenir des pollutions des sites radioactifs (LELI) de l'IRSN a soutenu son HDR de l'université Paris-Sud intitulée *Sur le chemin de l'isotopie : développements analytiques et applications à la géochimie et à la radioprotection* le 1^{er} juillet 2019 à l'IRSN (Fontenay-aux-Roses).

CELLULES GERMINALES:

les cellules germinales sont les cellules à l'origine des gamètes (spermatozoïdes et ovules). Ces cellules transmettent le patrimoine génétique à la génération suivante.

ÉPIGÉNÉTIQUE: mécanismes régulant l'expression des gènes sans en changer la séquence nucléotidique. Ces régulations géniques sont réversibles mais elles peuvent aussi être transmises au fil des divisions cellulaires des cellules somatiques ou germinales. Les principaux modes de régulation épigénétique sont la méthylation de l'ADN, la méthylation et l'acétylation des histones et la régulation post-transcriptionnelle des micro-ARNs.

ÉPIGÉNOMIQUE: analyse globale des mécanismes régulant l'expression des gènes.

MÉTABOLITES: molécules organiques de petite taille (masse < 1000 g.mol⁻¹) produites par des voies métaboliques ou cascades enzymatiques (glucose, acides aminés, acides gras...).

MÉTABOLOMIQUE: analyse globale de l'ensemble des métabolites mesurables dans un milieu biologique à un instant donné.

MÉTHYLATION DE L'ADN: fixation de groupements méthyles sur les cytosines de l'ADN. La méthylation de l'ADN se traduit généralement par une inhibition de l'expression des gènes. La méthylation de l'ADN est le premier processus épigénétique découvert et reste le plus étudié aujourd'hui. Il est reconnu qu'une méthylation aberrante est en cause dans une grande variété de maladies, dont certains cancers.

TRANSCRIPTOMIQUE: étude globale de l'ensemble des ARNs produits par transcription du génome.

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.irsn.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.irsn.fr