

**IRSN**

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

# AKTIS

N° 18

L'actualité de la recherche à l'IRSN

octobre-décembre 2014

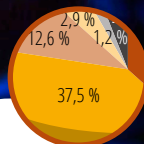
## FOCUS

*De nouvelles VOIES DE  
TRAITEMENT pour les  
brûlures RADIOLOGIQUES ?*



### AVANCÉES

Exposition au radon  
dans certaines  
habitations



### FORMATION

Mieux modéliser  
les rejets radioactifs  
lors de la rupture  
d'un tube  
de GV

# Protéger les hommes et l'environnement, un engagement quotidien



© Olivier Segonzac/Mikez Calvetti/IRSN

L'IRSN place au cœur de son action quotidienne la protection de l'environnement, des hommes et de leurs biens vis-à-vis des risques engendrés par les rayonnements ionisants.

Cet engagement se traduit d'abord par l'analyse de la source des rejets radioactifs, au sein des installations nucléaires, puis par la recherche et la proposition de solutions innovantes. En amont, l'Institut est activement présent dès les premières phases de conception des futures installations nucléaires tout en conservant

la distance nécessaire à une totale indépendance. C'est notamment le cas pour l'installation de fusion nucléaire ITER, dont il est question dans un article de ce numéro.

L'IRSN s'engage aussi à comprendre et réduire les conséquences sur les humains des rayonnements dans l'environnement, issus des installations nucléaires mais aussi dans certaines situations de la radioactivité naturelle. Il joue ainsi un rôle moteur dans la recherche sur les effets du radon, un gaz naturel cancérigène pulmonaire.

Afin de se donner les moyens d'accomplir ses missions, l'IRSN se prépare entre autres en s'investissant dans un large réseau de relations – en France, en Europe et dans le monde – afin d'échanger, partager, co-féliciter et innover. Une démarche mise en œuvre dans les plateformes européennes de recherche, et singulièrement en radioprotection.

## Giovanni Bruna,

Directeur scientifique

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. Trimestrielle et gratuite, elle existe aussi en version électronique sur abonnement. Éditeur IRSN - standard : +33 (0)1 58 35 88 88 - www.irsn.fr - Directeur de la publication : Jacques Repussard - Directeur de la rédaction : Matthieu Schuler - Rédactrice en chef : Sandrine Marano - Comité de lecture : Giovanni Bruna, Matthieu Schuler - Comité éditorial : Gauzelin Barbier, Giovanni Bruna, Aleth Delattre, Jean-Michel Evrard, Christine Goudebranché, Pascale Monti, Audrey de Santis, Matthieu Schuler - Rédaction : Sandrine Marano, Technoscope/Isabelle Bellin - Réalisation : [www.grouperougevit.fr](http://www.grouperougevit.fr) - 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 No 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 No 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

Giovanni Bruna

### AVANCÉES DE LA RECHERCHE

PAGE 3

- Exposition au radon dans certaines habitations : prévenir le risque sanitaire

### FOCUS

PAGE 5

De nouvelles voies de traitement pour les brûlures radiologiques ?

### FORMATION PAR LA RECHERCHE

PAGE 8

- Mieux modéliser les rejets radioactifs lors de la rupture d'un tube de générateur de vapeur
- Étude de l'explosion de mélanges d'hydrogène et de poussières
- Une nouvelle approche pour modéliser les propriétés des gaines de combustible après un accident

### VIE DE LA RECHERCHE

PAGE 11

- Congrès
- Soutenances
- Prix

### Glossaire <sup>GLO</sup>

PAGE 12

**Erratum :** une coquille s'est glissée dans le titre de couverture du n°17. Il fallait lire « Etudier les denrées japonaises terrestres contaminées pour améliorer l'appui à la gestion de crise »

Photo de couverture - Traitement par EPC. Coupe d'épiderme où les cellules progénitrices endothéliales (EPC) sont marquées en rouge et les vaisseaux en vert. Les EPC injectées apparaissent en jaune dans les tissus vasculaires en régénération.

© IRSN

# EXPOSITION *au radon* dans certaines habitations : prévenir le RISQUE SANITAIRE

Dans le cadre de sa mission de surveillance de l'exposition de la population aux rayonnements ionisants, l'IRSN étudie depuis de nombreuses années l'exposition au radon, gaz radioactif naturel classé cancérigène. Les travaux concernent, d'une part, les origines et la mesure du radon sur le territoire français, et, d'autre part, les effets de l'exposition à ce gaz. Les résultats obtenus permettent de mieux identifier les principaux paramètres influant sur la concentration de ce gaz, dont la présence constitue un facteur de risque de cancer que les travaux de l'Institut visent à mieux évaluer.

L'IRSN mène de longue date des recherches sur l'exposition au radon<sup>610</sup> et ses effets sur la santé. L'Institut a réalisé plusieurs campagnes de mesure en France entre 1982 et 2003 pour établir une cartographie nationale de la concentration en radon dans l'habitat, associée à des données sur la construction des maisons, le mode de vie de leurs occupants. Les concentrations de ce gaz radioactif varient sur le territoire entre quelques becquerels par mètre cube ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ) et plusieurs milliers avec une moyenne géométrique nationale de  $53 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ . Les mesures recueillies (plus de 10 000 pour l'ensemble de la France) couvrent environ un tiers des communes métropolitaines ; elles ont conduit les pouvoirs publics à définir dès 2004 une liste de 31 départements prioritaires pour la gestion du radon. Afin de préciser les zones les plus concernées, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a demandé à l'Institut de compléter ces données par l'étude de la capacité des formations géologiques à générer du radon en surface. L'IRSN a établi en 2010 une cartographie (voir site Internet) du potentiel radon géogénique<sup>610</sup> de la métropole en cinq classes de potentiel (faible à très élevé).

*Évaluer la concentration  
en radon*

Les deux cartographies (celle fondée sur les mesures et celle reposant sur l'étude

du potentiel des formations géologiques) ont été croisées pour hiérarchiser l'influence des caractéristiques de l'habitat, du potentiel géogénique et des habitudes de vie des habitants afin d'expliquer la variabilité de la concentration en radon : une première à l'échelle du territoire. L'analyse



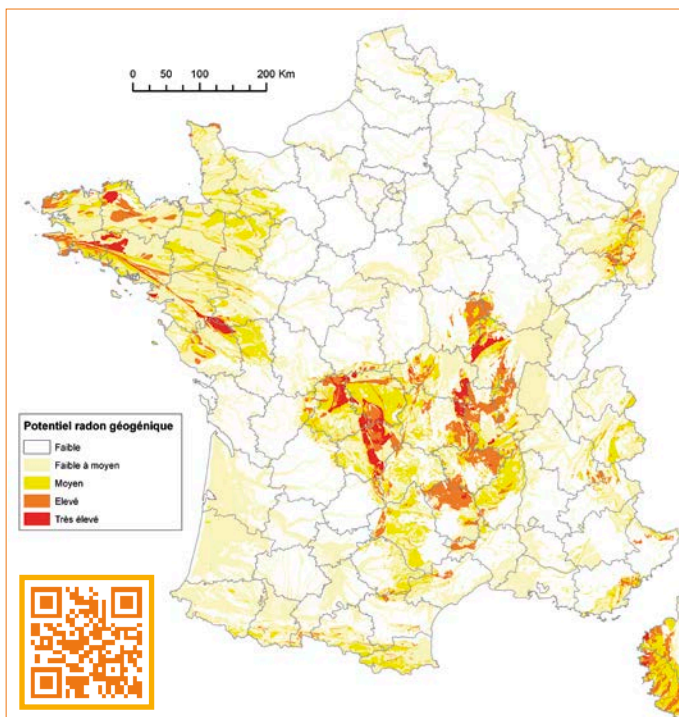
## CONTACTS

Géraldine Ielsch  
geraldine.ielsch@irsn.fr

Bureau d'évaluation des risques liés à la radioactivité naturelle (BRN) de l'IRSN

Dominique Laurier  
dominique.laurier@irsn.fr

Laboratoire d'épidémiologie des rayonnements ionisants (Lepid) de l'IRSN



Carte du potentiel géogénique [www.irsn.fr/carte-radon](http://www.irsn.fr/carte-radon)

<sup>(1)</sup> Notamment : étude européenne publiée en 2005 ; synthèse du comité scientifique des Nations unies sur les effets des rayonnements ionisants (UNScear) en 2006 ; étude de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) en 2009 ; Publication 115 de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) de 2010.

<sup>(2)</sup> Le projet Geocap étudie le rôle de différentes sources d'expositions environnementales géolocalisées (trafic routier, benzène, lignes à haute tension, PCBs, dioxines, radon, etc.) sur des cancers pédiatriques.

<sup>(3)</sup> Le projet Elfe suit une cohorte de 20 000 enfants nés en France en 2011 jusqu'à 20 ans pour comprendre comment l'environnement affecte leur développement, leur santé et leur socialisation.

## PUBLICATIONS

• Laurier D. « Progress in understanding radon risk. » *Radiation Protection* ; 2013 ; 168 ; 65-89.

• Demoury C., Ielsch G. *et al.* « A statistical evaluation of the influence of housing characteristics and geogenic radon potential on indoor radon concentrations in France. » *Journal of Environmental Radioactivity* 126 (2013) 216-225.

➕ En savoir plus sur l'évaluation réalisée à Bessines-sur-Gartempe



statistique de ces données a montré qu'un modèle prenant en compte le potentiel géogénique, en plus des caractéristiques de l'habitat et du mode de vie des habitants, permet de mieux expliquer la variabilité de la concentration en radon. Les résultats obtenus par ce modèle sont comparables à ceux obtenus en Suisse ou en Angleterre. Le potentiel radon géogénique s'avère être le paramètre prédominant : il influe directement sur la concentration moyenne en radon, à l'échelle locale, ainsi que sur la probabilité de dépasser certains seuils de concentration (par exemple 100 Bq.m<sup>-3</sup>, seuil recommandé par l'OMS, ou 400 Bq.m<sup>-3</sup>, niveau d'action fixé par la réglementation française pour les lieux ouverts au public). L'ensemble des paramètres d'habitat explique, quant à eux, environ 8 % de la variabilité. L'influence respective de chacun a été évaluée : les matériaux de construction, la nature du sol, le type de fondation, de bâtiment et l'année de construction importeraient bien plus que les habitudes de vie (fréquence d'aération, ventilation). Cette conclusion est à nuancer car elle n'est basée que sur les seules données qualitatives recueillies. Les résultats permettent de mieux estimer statistiquement l'exposition au radon dans une région donnée, notamment quand peu de mesures sont disponibles, et de définir les zones où la concentration en radon est susceptible d'être élevée. L'IRSN poursuit ses recherches en étudiant l'influence de facteurs géologiques spécifiques tels que les cavités souterraines, en développant des modèles géostatistiques, ou en modélisant le transport du radon dans les sols et l'habitat.

## Estimer les risques sanitaires

Le radon ayant été classé cancérigène pulmonaire en 1988 par le Centre international de recherches sur le cancer (Circ), l'IRSN a réalisé des études épidémiologiques, parallèlement aux mesures sur le terrain, pour évaluer son effet sur la santé, notamment pour les mineurs d'uranium qui constituent la population la plus exposée. À partir de la fin des années 1990, le cas des faibles concentrations que l'on trouve en particulier dans l'habitat a été analysé<sup>(1)</sup>. Dans ce but, un projet européen, qui a impliqué neuf pays avec un protocole unique et dont l'IRSN a mené l'étude française, a conclu que l'exposition au radon peut, dans l'habitat aussi, entraîner un cancer des poumons. L'étude européenne révèle ainsi qu'une exposition pendant 25 ans augmente de 16 % le risque par tranche de concentration de

radon de 100 Bq.m<sup>-3</sup>. Toutefois, des incertitudes importantes subsistent quant à l'impact sanitaire de très faibles concentrations (<200 Bq.m<sup>-3</sup>), en raison des lacunes des connaissances scientifiques dans le domaine plus large des effets des faibles doses de rayonnements ionisants. Selon le modèle utilisé, entre 3 et 12 % des décès par cancer du poumon pourraient être attribués à l'exposition au radon dans l'habitat. On estime que 27 % de ces cas attribuables au radon sont associés à des habitats présentant une concentration de plus de 200 Bq.m<sup>-3</sup>. Le radon est le deuxième cancérigène après le tabac. La Commission internationale de protection radiologique (CIPR) publiera sous peu des recommandations, auxquelles l'IRSN a contribué, sur la gestion du risque lié à l'exposition au radon dans l'habitat. Parallèlement, une directive européenne (2013/59/Euratom du 5 décembre 2013 sur les normes de base en radioprotection) doit être transposée en droit français pour mettre en place des dispositions de protection dans l'habitat en France à partir d'un certain niveau d'exposition que la directive fixe.

L'IRSN a, par ailleurs, récemment utilisé ce modèle de risque (développé dans le cadre de l'étude épidémiologique européenne) dans le cas exceptionnel d'une maison à Bessines-sur-Gartempe (87). Construite sur des remblais contenant des résidus miniers d'uranium, cette dernière présentait des concentrations de radon comprises entre 8 500 à 18 700 Bq.m<sup>-3</sup>. Le modèle a permis d'évaluer le risque de cancer du poumon pour les personnes qui y avaient séjourné.

Les données d'exposition (mesurées ou sous la forme de cartes de potentiel) ainsi que les analyses épidémiologiques et sanitaires évoquées précédemment sont désormais exploitées conjointement dans plusieurs projets. Le projet Geocap<sup>(2)</sup> mené avec l'Inserm doit évaluer l'impact de l'exposition au radon sur d'autres pathologies que le cancer du poumon comme les leucémies infantiles. L'IRSN participe par ailleurs à l'ambitieux projet Elfe<sup>(3)</sup> qui suit sur 20 ans une large cohorte d'enfants ; l'Institut évaluera les risques inhérents à l'exposition au radon en fonction de leur lieu d'habitation.

# De nouvelles voies de TRAITEMENT pour les brûlures RADIOLOGIQUES ?

La thérapie cellulaire a depuis dix ans révolutionné le traitement des brûlures de la peau occasionnées par une surexposition localisée aux rayonnements ionisants. Une collaboration très étroite entre les équipes de l'IRSN et celles de l'hôpital Percy (Clamart, Hauts-de-Seine) a, en effet, démontré l'efficacité de l'injection de cellules stromales mésenchymateuses (CSM) sur une dizaine de patients, en complément de la chirurgie. Cependant, l'utilisation des CSM comporte des limites, notamment pour l'accès au prélèvement et la durée de la mise en culture des cellules. Les chercheurs de l'IRSN continuent à explorer la possibilité d'utiliser d'autres types de cellules souches. Plusieurs pistes sont prometteuses pour le cas d'accident radiologique ou dans celui de complications des radiothérapies.


Une personne exposée accidentellement à de très fortes doses de rayonnements ionisants (20-25 Grays) développe de très graves lésions sur la peau. Il y a encore quelques années, leur cicatrisation était un défi majeur. Les rayonnements ionisants produisent des effets à la fois aigus et retardés touchant la peau et les tissus sous-cutanés pouvant conduire à la nécrose. De plus, ces lésions sont accompagnées de douleurs intenses. Les traitements classiquement utilisés pour des brûlures thermiques (exérèse<sup>GL0</sup> et chirurgie reconstructrice) sont insuffisants pour circonscrire leur évolution<sup>(1)</sup>. Une autre voie devait donc être recherchée.

## Les CSM, des propriétés immunomodulatrices

À la fin des années 1990, les chercheurs de l'IRSN ont exploré les possibilités des cellules stromales mésenchymateuses (CSM) extraites de la moelle osseuse pour traiter les lésions cutanées radio-induites. En effet, ces cellules<sup>(2)</sup> ont des propriétés

immunomodulatrices<sup>GL0</sup> et avaient déjà montré un bénéfice en médecine régénérative, elles sont faciles à isoler et à mettre en culture. Les chercheurs de l'IRSN ont démontré par des études expérimentales réalisées chez la souris et le porc que l'injection de CSM dans les lésions radio-induites favorise la régénération des tissus irradiés.

En 2005, un premier patient, victime au Chili d'un accident d'irradiation localisée, a été traité par injections de CSM autologues<sup>GL0</sup> en complément de l'exérèse des zones lésées. Cette exérèse s'est appuyée sur une cartographie des doses reçues en surface et en profondeur réalisée par l'IRSN à partir du scénario de l'accident ; il était important d'enlever les tissus ayant reçu plus de 20-25 Gy, doses à partir desquelles les tissus vont nécroser. Le protocole d'injection et l'exérèse, réalisés grâce à la collaboration des équipes de l'IRSN et de celles de l'hôpital Percy (Clamart, Hauts-de-Seine), ont conduit à un succès qui a été une première mondiale : les douleurs ont été fortement réduites, les lésions ont cessé de s'étendre et ont cicatrisé ; le suivi médical à long terme de ce

 Institut des vaisseaux et du sang, Inserm, Hôpital d'instruction des armées Percy, Centre de transfusion sanguine des armées (CTSÀ)


### CONTACT

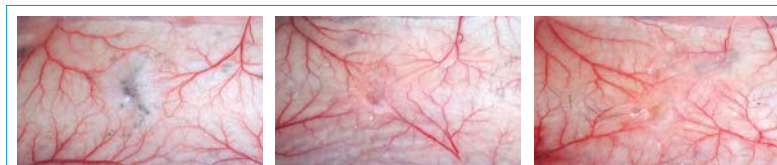
**Radia Tamarat**  
radia.tamarat@irsn.fr

Laboratoire de recherche en régénération des tissus sains irradiés (LRzI) de l'IRSN

<sup>(1)</sup> Lorsque ce traitement est appliqué à une lésion radio-induite, celle-ci peut être difficile à stabiliser : d'une part, parce que la limite entre les tissus sains et les tissus irradiés qui vont nécroser n'apparaît pas clairement ; d'autre part, parce que l'intervention chirurgicale elle-même stimule les poussées inflammatoires, renforçant le processus de fibrose et de nécrose, ce qui nécessite de nouvelles interventions chirurgicales.

<sup>(2)</sup> Le rôle des cellules stromales mésenchymateuses dans la moelle osseuse est de maintenir des niches de cellules souches hématopoïétiques<sup>GL0</sup>.

 Vidéos : adhésion des lymphocytes sur la paroi des cellules endothéliales



Traitement par cellules issues de la moelle osseuse. Activation endothéliale du réseau vasculaire de la peau durant le processus de cicatrisation, 60 jours après une irradiation à 20 Gy. Image de gauche, témoin non irradié ; image centrale, la peau irradiée et traitée par une injection de cellules de moelle osseuse montre une augmentation du flux sanguin ; image de droite, la peau irradiée n'a pas été traitée et montre des problèmes de perméabilité et de dilatation vasculaire. Voir aussi la vidéo *via* le QR code ci-contre.

© IRSN/V. Holler

## PUBLICATIONS

• Tamarat R. *et al.*  
« Stem cell therapy :  
from bench to  
bedside » *Radiation  
Protection Dosimetry*  
(2012) p 1-7.

• Foubert P. *et al.*  
« Strategies to  
enhance the efficacy  
of endothelial  
progenitor cells  
therapy by Ephrin b2  
pre-treatment and  
co administration  
with smooth muscle  
progenitor cells on  
vascular function  
during wound healing  
process in irradiated  
or not conditions »  
*Cell Transplantation*,  
2013 sept 10.

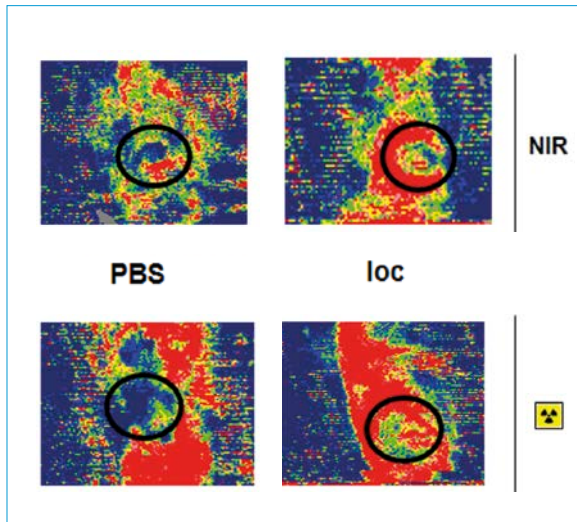
patient a confirmé ce résultat. Dix autres personnes victimes d'accidents de gravités similaires depuis 2005 ont bénéficié du même traitement avec le même résultat.

## Limites

Cependant, l'utilisation des CSM comporte des limites. En premier lieu, le protocole de production des CSM d'une qualité utilisable en clinique nécessite 15 jours de culture et donc autant de temps d'attente avant d'intervenir sur la lésion. Ensuite, les CSM sont obtenues à partir d'un prélèvement invasif et douloureux de moelle osseuse. Troisième limite : à l'issue de la culture, les cellules obtenues peuvent être écartées par les contrôles de qualité en raison d'anomalies du caryotype, ou parce que la zone de prélèvement de la moelle osseuse s'avère avoir été dans le champ d'irradiation. Enfin, en fonction de l'âge du donneur, le prélèvement de moelle osseuse peut être pauvre en CSM, et celles-ci peuvent avoir perdu une partie de leur fonctionnalité. Ces limites nécessitent de chercher d'autres sources de cellules souches pour amplifier le recours à ce traitement et le rendre plus opérationnel. Les chercheurs de l'IRSN explorent plusieurs voies.

## Injection directe

La première option est l'injection directe des cellules issues de la moelle osseuse au niveau de la lésion, ce qui évite l'étape de mise en culture. L'étude expérimentale menée par les chercheurs de l'IRSN sur des souris irradiées localement (20 Gy) montre que l'administration des cellules de moelle osseuse favorise la restauration du derme. L'expression des gènes de différents types de collagènes (qui constituent la matrice de la peau) est régulée par les cellules injectées, et favorise ainsi le remodelage de la matrice. Par ailleurs, il est apparu que l'administration des cellules de moelle osseuse favorise la revascularisation des zones lésées en induisant une hyperperméabilité, et qu'elle restaure les fonctions vasculaires. Ces deux éléments participent à la cicatrisation de la blessure. Enfin ces travaux ont démontré que les cellules de moelle osseuse réduisent l'inflammation induite par l'irradiation, probablement en limitant l'adhérence des leucocytes à la surface interne des vaisseaux sanguins. Une thérapie utilisant l'injection de moelle osseuse en cas de brûlure radiologique semble donc une alternative intéressante, dans le cas où la mise en culture des CSM ne pourrait pas être réalisée.



Traitement par cellules souches adipeuses. Photomicrographies au laser doppler de l'irrigation sanguine de la peau de souris irradiées (ligne du bas) et non irradiées (ligne du haut). Dans le cas des images de gauche, la peau n'a pas été traitée, et à droite, des cellules souches adipeuses ont été injectées. En bleu, zone de bas flux sanguin ; en rouge, zones de haut flux.

© IRSN

## EPC issues de cordon ombilical

Une autre voie consiste à stimuler la revascularisation du tissu (apport nutritif et oxygène) nécessaire à la cicatrisation de la peau. Pour ce faire, l'une des options envisagées est d'injecter des cellules progénitrices endothéliales (EPC en anglais) qui ont été prélevées dans du sang de cordon ombilical. Cette opération réalisée dans le cas de maladies cardiovasculaires a montré que les EPC injectées se localisent dans les tissus lésés et favorisent la micro-vascularisation nécessaire à leur régénération.

Cette approche a été testée par les chercheurs de l'IRSN. Ils ont réalisé des études expérimentales pour évaluer le bénéfice d'une injection de cellules progénitrices endothéliales sur la cicatrisation de lésions de la peau, radio-induites ou non, tout en testant des solutions pour accroître l'efficacité de ces cellules. Deux stratégies ont été proposées : l'activation des EPC par des produits pharmaceutiques (Ephrine-B2 ou B4 notamment) préalable à l'injection pour augmenter leur nombre dans le site lésé ; et l'injection simultanée de cellules souches de muscle lisse (SMPC) afin de favori-

ser la formation de vaisseaux matures et plus fonctionnels. Les résultats obtenus sur les souris montrent que les EPC, comme dans le cas d'autres pathologies, favorisent la création de nouveaux vaisseaux et la cicatrisation (voir image de couverture). De plus, l'injection concomitante de SMPC en améliore encore l'efficacité par l'obtention de vaisseaux matures. Cette nouvelle voie de traitement comporte cependant une limite, car il est nécessaire d'avoir des volumes de sang très importants (une vingtaine de litres) pour obtenir une dose clinique de produit de thérapie cellulaire.

### Cellules souches adipeuses

Une troisième voie intéressante, les cellules souches adipeuses, présente plusieurs avantages, dont leur prélèvement par simple liposuction, procédure peu invasive et permettant d'obtenir une quantité assez importante. Le rôle important du tissu adipeux dans l'organisme a été révélé récemment<sup>(3)</sup> : il participe à un très grand éventail de processus biologiques. Les cellules souches dérivées des tissus adipeux ont la propriété de pouvoir se différencier en plusieurs types de cellules dont ceux de la peau et des vaisseaux, importants pour le processus de cicatrisation. Les chercheurs de l'IRSN ont

réalisé des expériences sur des souris pour tester si les tissus adipeux pouvaient avoir une action positive.

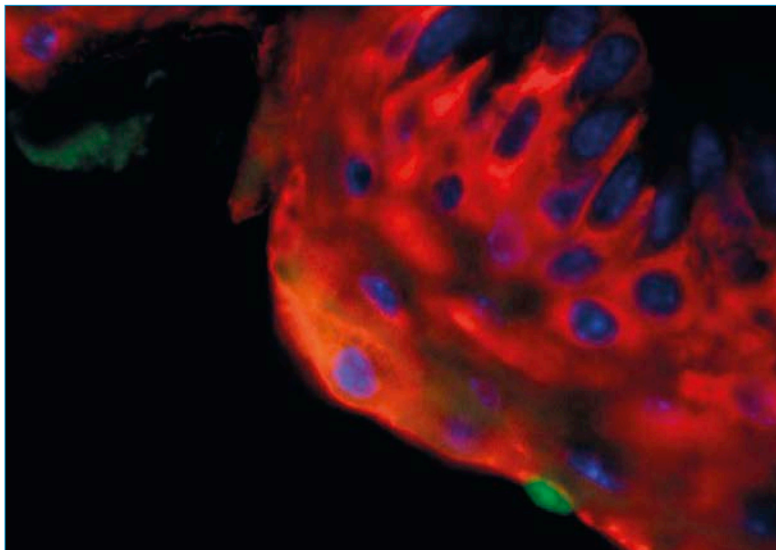
Les résultats ont montré un effet réparateur des cellules adipeuses sur la peau de souris irradiées. Il s'avère que les cellules souches adipeuses peuvent se différencier en kératinocytes (cellules constituant de l'épiderme) et favorisent la cicatrisation de la peau. Elles stimulent également la régénération de la vascularisation, grâce à leur capacité à se différencier aussi en cellules endothéliales (constitutives de la paroi des vaisseaux) tout en libérant des facteurs de croissance vasculaire (VEGF). Les cellules souches adipeuses confirment leur intérêt pour le traitement de lésions cutanées radio-induites.

En conclusion de ces trois approches, les études expérimentales réalisées par l'IRSN à partir des cellules souches adipeuses et du tissu graisseux sont prometteuses. Ces bons résultats doivent être maintenant confirmés par des essais sur de plus gros animaux, avant de passer aux tests cliniques, afin d'en valider le bénéfice thérapeutique. Il reste que, quel que soit le type cellulaire utilisé, plusieurs défis techniques et pratiques seront à relever afin de remplir les conditions idéales d'une thérapie cellulaire efficace sur le long terme et facilement applicable.

<sup>(3)</sup> Par une équipe de l'université Paul Sabatier.

#### PUBLICATIONS

- Holler V. *et al.* « Early and late protective effect of bone marrow mononuclear cell transplantation on radio-induced vascular dysfunction and skin lesions » *Cell Transplantation*, soumis.
- Ebrahimian T.G. *et al.* « Cell Therapy Based on Adipose Tissue-Derived Stromal Cells Promotes Physiological and Pathological Wound Healing » *Arterioscler Thromb Vasc Biol.* (2009); 29:503-510.



Traitement par cellules souches adipeuses. Sur une coupe de peau de souris, on visualise en vert clair une cellule souche adipeuse différenciée en kératinocyte dans l'épiderme (marquage K5).

© IRSN

# Mieux modéliser LES REJETS RADIOACTIFS lors de la rupture d'un tube de générateur DE VAPEUR

**L'un des scénarios d'accidents étudiés pour un réacteur nucléaire est la rupture d'un tube de générateur de vapeur, qui pourrait conduire à un rejet d'iode radioactif dans l'environnement. Quantifier ce rejet et en déterminer la nature permet de mieux se préparer à la gestion de ce type d'accidents.**

 EDF,  
laboratoire  
C3R commun IRSN/  
CNRS/Université  
de Lille 1 Sciences et  
Technologies.

## CONTACT

**Laurent Cantrel**  
laurent.cantrel@  
irsn.fr

Laboratoire d'étude du  
corium et du transfert  
des radioéléments  
(LETR) de l'IRSN

<sup>(1)</sup> La vapeur entraîne  
une turbine,  
elle-même reliée à  
un alternateur qui  
produit l'électricité.

<sup>(2)</sup> La protection du  
circuit secondaire  
imposerait de  
le dépressuriser,  
ce qui conduirait  
à un rejet de vapeur  
et d'eau à l'extérieur  
de l'enceinte.

## PUBLICATION

• *Contribution  
à l'étude du rejet  
à l'environnement  
de l'iode radioactif  
lors d'une séquence  
accidentelle de type  
RTGV*, thèse d'Adrien  
Cartonnet soutenue  
le 17 décembre 2013  
à Cadarache  
(Bouches-du-Rhône).



Les générateurs de vapeur permettent d'extraire la chaleur produite par un réacteur nucléaire. De l'eau non radioactive (circuit secondaire) y transite et se transforme en vapeur<sup>(1)</sup> au contact d'un grand nombre de tubes où circule sous pression l'eau chauffée par la fission nucléaire dans le cœur (circuit primaire). Si une brèche s'ouvrait sur un tube, l'eau du circuit primaire, qui contient notamment de l'iode radioactif, jaillirait dans le circuit secondaire sous forme d'un jet de vapeur et de fines gouttes d'eau liquide. Une fraction de l'iode pourrait alors être transportée jusque dans l'environnement<sup>(2)</sup>. Pour mieux évaluer ce rejet radioactif, il est nécessaire de connaître sous quelles formes chimiques l'iode arrive à la brèche et de caractériser la structure du jet : la partition de vapeur et de liquide ainsi que la distribution granulométrique des gouttes.

## Distribution granulométrique

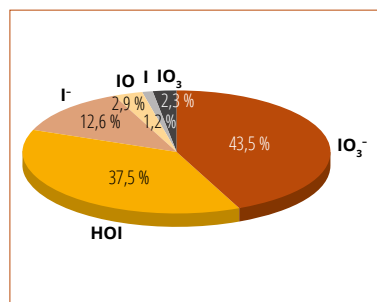
Pendant sa thèse, Adrien Cartonnet a étudié les deux mécanismes contrôlant la distribution granulométrique des gouttes. Le premier est la fragmentation mécanique des gouttes en sortie de brèche, due aux instabilités hydrodynamiques ; le doctorant l'a modélisé par une corrélation empirique. Le second est la fragmentation thermique qui résulte de la croissance explosive des microbulles de vapeur contenues dans les gouttes. Pour modéliser ce second mécanisme, Adrien Cartonnet a montré que la dépressurisation initiale des gouttes conduit le plus souvent à la formation d'un très grand nombre de microbulles de vapeur (de l'ordre de 10 nm) dans les gouttes. Puis il a établi une équation différentielle en décrivant la croissance de ces microbulles (extension du modèle MRG<sup>GL0</sup>). Enfin, il a développé une description théorique originale de l'explosion

des gouttes sous la pression des microbulles pour obtenir la distribution en taille des fragments de gouttes.

## Partition vapeur/liquide du jet

Disposant ainsi de la surface d'échange entre les gouttes et l'atmosphère environnante, il a calculé la quantité de vapeur produite par évaporation surfacique et l'a ajoutée à la vapeur contenue par les microbulles et libérée par l'éclatement des gouttes ; ceci lui a permis de déterminer le « flashing » ou taux de vaporisation de l'eau issue du circuit primaire. Les résultats ainsi obtenus sont en bon accord avec les données expérimentales publiées dans la littérature.

La répartition des formes de l'iode arrivant à la brèche a été calculée à l'aide d'un modèle de chimie de l'iode en solution dans le circuit primaire. Ceci a permis de réaliser des évaluations plus réalistes des rejets pouvant se produire lors d'accidents de rupture de tubes de générateur de vapeur.



Répartition possible des formes chimiques de l'iode près de la brèche, calculée à l'aide des modèles mis au point durant la thèse de A. Cartonnet.

© IRSN



# Étude de l'explosion de MÉLANGES D'HYDROGÈNE et de POUSSIÈRES

**L'IRSN a suivi les études de sûreté de la future installation de fusion ITER dès sa conception. Certains scénarios accidentels envisagés peuvent conduire à une explosion concomitante de l'hydrogène et des poussières dans la chambre à vide. Une thèse a permis de mieux comprendre ce phénomène.**

**P**endant le fonctionnement normal de l'installation ITER, les parois de la chambre à vide seront progressivement érodées par le plasma, produisant jusqu'à quelques centaines de kilogrammes de poussières de béryllium et de tungstène. Si de la vapeur ou de l'air entrainé accidentellement dans la chambre à vide, l'écoulement généré mettrait en suspension les poussières déposées sur les parois. Par ailleurs, l'oxygène apporté par l'air pourrait rendre l'atmosphère inflammable. Ceci pourrait provoquer la combustion explosive des isotopes d'hydrogène (deutérium et tritium) présents et des poussières en suspension, ce qui conduirait à la destruction de la chambre à vide.

## Modes de combustion

Dans le cadre de sa thèse, Jérémy Sabard a contribué à déterminer les limites d'inflammabilité de mélanges constitués d'oxygène, d'azote, d'hydrogène et de poussières. Il a également identifié les modes de combustion pouvant résulter de configurations représentatives des situations accidentelles. Pour ce faire, il a utilisé une enceinte sphérique du laboratoire Icare du CNRS à Orléans, équipée de systèmes de diagnostic permettant de visualiser l'évolution de la flamme et la montée en pression qu'elle génère. Cette enceinte a été munie d'un dispositif d'injection

de poussières et d'une mesure de la concentration de poussières par extinction laser.

Il a d'abord déterminé les propriétés d'explosivité (vitesses des flammes, temps de combustion, pressions maximales et indice de déflagration<sup>(1)</sup>) de mélanges ayant des fractions molaires en hydrogène comprises entre 0,1 et 0,6 et des rapports molaires  $N_2/O_2$  compris entre 0,66 et 9, valeurs correspondant aux situations accidentelles spécifiques étudiées dans ITER.

## Propriétés d'explosivité

Il a ensuite étudié des propriétés d'explosivité de mélanges d'hydrogène et de poussières de tungstène. Il a ainsi montré que l'augmentation de température et de pression résultant de la combustion de l'hydrogène pouvait conduire à l'inflammation des particules de tungstène et donc à l'explosion concomitante de ces poussières. Les travaux de Jérémy Sabard ont permis de constituer une base de données complète et unique au monde sur les modes de combustion des mélanges diphasiques composés d'oxygène, d'azote, d'hydrogène et de poussières de tungstène. À l'aide de ces résultats, de nouveaux modèles d'explosion de poussières ont été élaborés et validés. Implantés dans le logiciel DUST<sup>(1)</sup>, ils permettront d'évaluer les dispositions de sûreté proposées par l'exploitant.

 Institut de  
combustion,  
aérothermique,  
réactivité et  
environnement (Icare)

## CONTACT


**Ahmed Bentaib**  
ahmed.bentaib@irsn.fr  
Bureau d'études  
et d'expertises en  
accident grave et rejets  
radioactifs de l'IRSN  
(BzEGR)

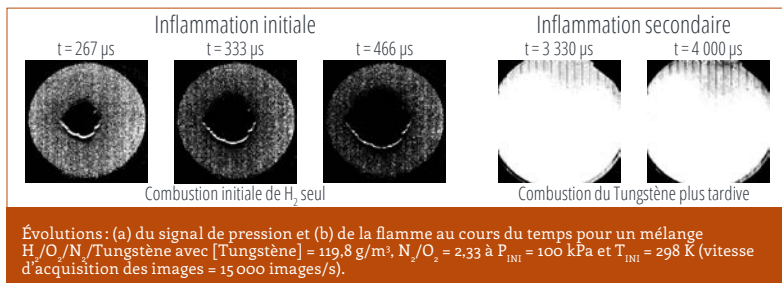
<sup>(1)</sup> Le code DUST est développé par l'IRSN depuis 2007, en collaboration avec l'université polytechnique de Carthagène en Espagne, avec l'objectif de simuler la mobilisation et la combustion des poussières dans ITER.

## PUBLICATIONS

• *Étude de l'explosion de mélanges diphasiques: hydrogène et poussières*, thèse soutenue le 6 septembre 2013 à l'université d'Orléans, école doctorale: énergie, matériaux, sciences de la terre et de l'univers.

• J. Sabard et al. « Determination of explosion combustion parameters of  $H_2/O_2/N_2$  mixtures », *International Symposium on Hazard, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE)*, juillet 2012, Cracovie, Pologne. Cette présentation a reçu un des cinq prix d'excellence décernés par les organisateurs du congrès.

 En savoir plus sur le film de l'explosion hydrogène-poussières réalisé à l'aide d'une caméra ultra-rapide.



# Une NOUVELLE APPROCHE pour modéliser les propriétés des gaines de COMBUSTIBLE après un accident

La perte de l'eau de refroidissement fait partie des accidents étudiés pour les réacteurs nucléaires à eau légère. Une fois l'accident maîtrisé, comment ont évolué les propriétés mécaniques des gaines de combustible, et quelle est alors leur résistance à une manutention ? Une première étape vers la modélisation de cette évolution a été franchie.

Dans un réacteur, une brèche sur le circuit de l'eau de refroidissement<sup>(1)</sup> a pour conséquence de transformer cette eau en vapeur. Celle-ci oxyde les gaines en Zircaloy<sup>®</sup> qui contiennent le combustible nucléaire, les fragilisant. La tenue des gaines est alors assurée essentiellement par leur couche interne, non oxydée, dont la structure après l'accident est devenue hétérogène : elle est constituée de micro-inclusions (quelques dizaines de microns) d'une phase cristallographique du zirconium riche en oxygène (nommée alpha) dans une matrice d'une phase pauvre en oxygène (dite ex-bêta). La thèse de Quoc-Tang Vo visait à fournir les données expérimentales nécessaires à la validation de modèles permettant de prédire le comportement mécanique du matériau composite.

## Mesures macroscopiques et mesures locales

Le modèle étudié<sup>(2)</sup> pendant la thèse est basé sur une méthode d'homogénéisation. Il décrit le comportement macroscopique d'un matériau hétérogène à partir de la connaissance des propriétés et de la répartition de ses constituants. Afin de le valider, Quoc-Tang Vo a exploité le modèle dans une approche inverse : les propriétés inconnues de l'un des constituants sont déterminées à partir de celles mesurées pour l'autre constituant et pour l'ensemble. Pour cela, il a mis au point un dispositif expérimental original qui permet des mesures à la fois macroscopiques, à savoir l'allongement global du matériau, et locales (échelle du micron) des déformations. Il est constitué d'une machine de traction, couplée à un microscope optique à longue distance équipé d'une caméra haute résolution. Pendant que des échantillons de gaines sont soumis à des tractions uniaxiales, la caméra capte l'évolution du matériau au niveau

de sa microstructure. Les champs de déformations en sont déduits par corrélation d'images numériques (CIN).

## Incertitude inférieure à 10 %

Les essais de traction ont été réalisés sur des échantillons de matériau biphasé obtenu en oxydant du Zircaloy-4 à haute température. La microstructure de ce matériau s'approche de celle d'une gaine de combustible après un APRP<sup>(1)</sup>. Sur la base des propriétés de la matrice<sup>(3)</sup> existant dans la littérature, le module d'Young des inclusions, qui caractérise leur raideur, est évalué avec une incertitude inférieure à 10 %. Le modèle estime donc correctement les propriétés mécaniques d'ensemble.

Ces travaux contribuent au développement des méthodes d'homogénéisation. Celles-ci constituent une voie prometteuse pour affiner la modélisation du comportement des matériaux hétérogènes dans des conditions difficilement accessibles par l'expérience, ce qui est souvent le cas des matériaux du nucléaire notamment en situation accidentelle.

 MIST,  
laboratoire  
commun IRSN  
et université de  
Montpellier 2.

## CONTACT

Christian Duriez  
christian.duriez@  
irsn.fr

Laboratoire  
d'expérimentation  
en mécanique et  
matériaux (LE2M) de  
l'IRSN

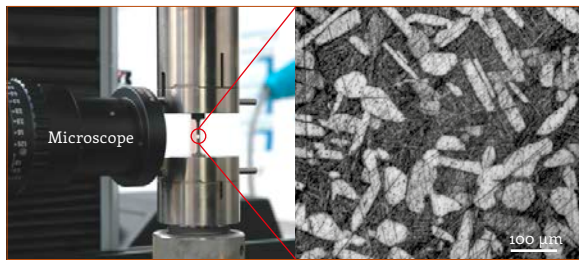
<sup>(1)</sup> Accident dit accident de perte de réfrigérant primaire (APRP).

<sup>(2)</sup> Mori, T., Tanaka, K. (1973). « Average Stress in the Matrix and Average Elastic Energy of Materials with Misfitting Inclusions ». Acta metall. 21: 571-574.

<sup>(3)</sup> La matrice est similaire au Zircaloy sans oxygène.

## PUBLICATION

• *Imagerie d'essais mécaniques sur des composites à matrice métallique : contribution expérimentale à la validation de méthodes d'homogénéisation et identification de propriétés mécaniques par phases*, thèse soutenue par Quoc-Thang Vo le 18 décembre 2013 à Montpellier.



À gauche, dispositif expérimental avec l'objectif du microscope et une éprouvette en place dans les mors de la machine de traction. À droite, image de la zone visée pour une éprouvette biphasée obtenue par oxydation de Zircaloy-4 à haute température.

© IRSN

## CONGRÈS

### 6<sup>E</sup> CONFÉRENCE INTERNATIONALE MELODI

La 6<sup>e</sup> conférence internationale MELODI, dédiée aux recherches sur les effets des expositions à de faibles doses de rayonnements ionisants, s'est tenue les 7, 8 et 9 octobre 2014 au Parc de recherche biomédicale de Barcelone, avec pour objectif de bâtir un consensus sur les étapes à venir et poser les fondations de futurs projets de recherche.

Cet événement était organisé pour le compte de l'association européenne MELODI, qui regroupe les principaux organismes de recherche compétents pour ces problématiques. Il était placé sous la responsabilité conjointe du Centre de recherche en épidémiologie environnementale (CREAL), de l'Université autonome de Madrid (UAM) et de l'université Rovira i Virgili (Tarragona). L'édition 2014 a mis plus particulièrement l'accent sur la recherche expérimentale et la recherche intégrée.

## SOUTENANCES

### THÈSES

Six thèses ont été récemment soutenues par des doctorants de l'IRSN :

- Le 20 novembre 2014 à Paris, Simon Delcour sur *L'étude des mécanismes physico-chimiques de mise en suspension de contaminants particulaires lors de la dégradation thermique de matériaux représentatifs des installations nucléaires.*
- Le 14 novembre 2014 à Villejuif, Neige Journy sur *L'analyse de la relation entre l'exposition aux rayonnements ionisants lors d'examen tomographique et la survenue de pathologies tumorales au sein de la cohorte « enfants scanner ».*
- Le 17 octobre 2014 à Cadarache, Emmanuel Mathé sur le *Comportement des radio-contaminants dans les confinements d'un réacteur à neutrons rapides en situations accidentelles.*
- Le 10 octobre 2014 à Paris, Cyril Moignier sur la *Dosimétrie des faisceaux de photons de petites dimensions utilisés en radiothérapie stéréotaxiques : détermination des données dosimétriques de base et évaluation des systèmes de planification de traitement.*
- Le 25 septembre 2014 à Fontenay-aux-Roses, Ghislain Ferran sur les *Nouvelles méthodes nu-*

*mériques pour le traitement des sections efficaces nucléaires.*

- Le 25 septembre 2014 à Orsay, Alice Petitguillaume sur le sujet *De la dosimétrie standard à la dosimétrie personnalisée en médecine nucléaire : prise en compte de la morphologie et de la biocinétique spécifique au patient.*

## PRIX

### ÉMILIE RANNOU REÇOIT DEUX PRIX POUR SON TRAVAIL DE THÈSE

Émilie Rannou, doctorante dans le Laboratoire de recherche en radiobiologie et radiopathologie (L3R) de l'IRSN, a été lauréate de deux prix pour ses travaux sur les conséquences de la délétion spécifique de PAI-1 dans l'endothélium dans la réponse radio-induite de l'intestin. Le prix Young Investigators' Award 2014 lui a été remis par l'International Society for Fibrinolysis and Proteolysis (ISFP) lors du 22<sup>e</sup> congrès international de la fibrinolyse et de la protéolyse qui s'est tenu à Marseille du 6 au 9 juillet 2014 pour sa présentation « Consequences of conditional inactivation of PAI-1 in endothelium on physiopathological functions associated with radiation therapy side effects ». Un autre prix Young Investigators' Awards lui a été décerné pour sa présentation « Endothelial PAI-1 deletion protects from radiation-induced intestinal damages and influences inflammatory response » au 41<sup>e</sup> congrès annuel de la European Radiation Research society (ERR 2014), qui s'est déroulé à Rhodes (Grèce) du 14 au 19 septembre 2014.



En savoir plus sur la 6<sup>e</sup> conférence internationale MELODI



En savoir plus sur les thèses



En savoir plus sur la thèse d'Émilie Rannou



**AUTOLOGUE :**

constituants de l'organisme tels que cellules, tissus, qui sont propres à un individu. Une greffe autologue est donc réalisée à l'aide d'un prélèvement effectué sur le patient lui-même, limitant les risques de rejet.

**EXÉRÈSE :** ablation.

**GÉOGÉNIQUE :** qui est lié à la formation et à l'évolution de la Terre.

**HÉMATOPOÏÉTIQUE :** relatif à l'hématopoïèse, qui est le processus physiologique permettant la création et le renouvellement des cellules sanguines.

**IMMUNOMODULATEUR :** produit qui modifie la réponse immunitaire de l'organisme.

**INDICE DE DÉFLAGRATION :** coefficient d'explosivité.

**MODÈLE MRG :** la croissance des germes de vapeur au sein d'une goutte est pilotée par un régime d'abord inertiel (phase contrôlée par les forces d'inertie du liquide) puis diffusif (phase contrôlée par le transfert de chaleur dans la phase liquide). Le modèle MRG permet de combiner les deux modèles de croissance en fonction du degré de surchauffe du liquide.

**RADON :** gaz issu de la désintégration de l'uranium et du radium présents dans la croûte terrestre. Présent partout à la surface de la planète à des concentrations variables, il provient surtout des sous-sols granitiques et volcaniques et de certains matériaux de construction.

**ZIRCALOY :** alliage de zirconium utilisé pour la fabrication des gaines de combustible nucléaire.

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](http://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](http://www.irsn.fr)