

**IRSN**

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

# AKTIS

L'actualité de la recherche à l'IRSN

n° 12  
Avril - Juin  
2013

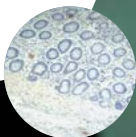


## Mieux comprendre le dépôt d'aérosols radioactifs pour mieux le quantifier

### > **Avancées**

Lésions radio-induites :  
une nouvelle étape  
vers la guérison

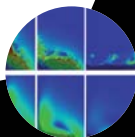
page 3



### > **Avancées**

Modélisation de l'effon-  
drement d'une colonne  
de grains immergés

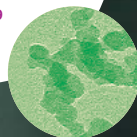
page 4



### > **Formation**

Vers la prédiction des  
taux de fuite des  
enceintes de confinement

page 9



# ÉDITORIAL



## Vers un renforcement des outils d'aide à la décision

*L'accident de la centrale de Fukushima Daiichi a émis d'importants rejets de substances radioactives qui ont été dispersées, entraînant l'exposition de centaines de milliers de personnes.*

*L'IRSN possède un savoir-faire reconnu sur la caractérisation et la quantification des rejets (« le terme source ») d'un*

*accident nucléaire. Il a veillé à enrichir ce capital au fil du temps par des programmes de recherche internationaux, dont la substance est désormais portée de façon opérationnelle dans le système Astec de simulation des accidents graves, et qui contribuent à l'amélioration de la prévention.*

*Malheureusement, il reste nécessaire aujourd'hui encore d'être préparé à affronter les conséquences d'un tel accident. Une fois les barrières franchies, la gestion des conséquences post-accidentelles repose en grande partie sur la capacité à prédire avec rapidité et sans majoration excessive les transferts de radionucléides dans l'air puis vers le sol, les fleuves ou la mer.*

*Nos outils de gestion de crise reproduisent avec une grande fidélité les transferts aériens sur moyenne et longue distance.*

*Mais pour les renforcer sur la phase qui va du transport aux dépôts, il a fallu investiguer plus avant différents mécanismes physico-chimiques : mobiliser les connaissances acquises par ailleurs sur le comportement des aérosols à l'intérieur des installations, combler les lacunes aux interfaces entre milieu (l'air et le sol ou les surfaces aquatiques), expliciter les lois associées au ruissellement ou au lessivage du milieu terrestre vers les cours d'eau...*

*Ainsi, nous faisons progresser la précision des méthodes en veillant au compromis entre rapidité d'exécution et fidélité des prédictions, au service d'un enjeu stratégique : le renforcement de nos outils opérationnels d'aide à la décision en situation de crise radiologique.*

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 nucléaires. Trimestrielle et gratuite, elle existe aussi en version électronique sur abonnement.

*Aktis* est une publication trimestrielle de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire. Éditeur IRSN - standard : +33 (0)1 58 35 88 88 - www.irsn.fr - Directeur de la publication : Jacques Reussard - Directeur de la rédaction : Matthieu Schuler - Rédactrice en chef : Sandrine Marano - Comité de lecture : Giovanni Bruna, Matthieu Schuler, Jeanne Suhany - Comité éditorial : Giovanni Bruna, Aleth Delattre, Dominique Franquard, Jean-Michel Évrard, Christine Gouedranche, Pascale Monti, Matthieu Schuler - Conception/réalisation : Aphania/A. Fiale ISSN : 2110-588X - Droits de reproduction sous réserve d'accord de notre part et de mention de la source. Conformément à la loi N° 2004-801 du 6 août 2004 relative à la protection des personnes physiques à l'égard des traitements de données à caractère personnel et modifiant la loi N° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés, tout utilisateur ayant déposé des informations directement ou indirectement nominatives, peut demander la communication de ces informations et les faire rectifier le cas échéant.

Couverture : Mesure des taux et des vitesses de particules par vélocimétrie laser. Thèse de Névénick Caléc. © IRSN

## SOMMAIRE

### Édito

Par Giovanni Bruna

### Avancées de la recherche

Pages 3 et 4

Lésions radio-induites : une nouvelle étape vers la guérison

Modélisation de l'effondrement d'une colonne de grains immergés

### FOCUS

Pages 5 à 8

Mieux comprendre le dépôt d'aérosols radioactifs pour mieux le quantifier



### Formation par la recherche

Pages 9 et 10

Mieux modéliser le dépôt des suies

Vers la prédiction des taux de fuite des enceintes de confinement

### La vie de la recherche

Page 11

Recherche européenne en sûreté

Développement des relations avec le Japon

Recherches sur le tritium avec l'AECL au Canada

Modélisation de la dispersion en mer

Recrutement des nouveaux doctorants

Prix Jean Bricard

### Glossaire

Page 12

## LÉSIONS RADIO-INDUITES : UNE NOUVELLE ÉTAPE VERS LA GUÉRISON

L'injection de cellules souches mésenchymateuses vient de montrer son efficacité sur les lésions colorectales sévères induites sur un modèle expérimental d'irradiation localisée chez le porc : une nouvelle étape importante vers l'utilisation en clinique de la thérapie cellulaire dans le traitement des complications sévères des radiothérapies abdomino-pelviennes.

Les radiothérapies abdomino-pelviennes peuvent induire des effets secondaires indésirables voire handicapants pour le patient, en générant des fibroses radio-induites. Dans le cas d'un surdosage accidentel, comme à l'hôpital d'Épinal entre 2000 et 2006, des pathologies particulièrement sévères<sup>(1)</sup> ont été observées pour lesquelles il n'existe pas actuellement de traitement efficace. L'IRSN étudie depuis plusieurs années l'utilisation des cellules stromales mésenchymateuses (CSM) comme facteur de traitement des atteintes tissulaires radio-induites.

une configuration de radiothérapie standard. Pour quatre d'entre eux, des CSM ont été prélevées dans la moelle osseuse 12 jours après l'irradiation, amplifiées *in vitro* puis réinjectées à trois reprises. Des coloscopies montrent que l'inflammation et l'ulcération des muqueuses, consécutives à l'irradiation, disparaissent progressivement après injection des CSM. À l'euthanasie des animaux, les tissus traités par CSM présentaient un état normal.

### [ Le rôle clé de l'inflammation ]

Afin de mieux comprendre l'action des CSM au niveau tissulaire, les chercheurs ont étudié l'effet d'injections répétées sur l'inflammation, processus clé dans l'établissement de la fibrose radio-induite. L'analyse a montré une diminution significative du nombre de macrophages infiltrés dans les tissus après traitement et

des cytokines associées (MCP1, MIF). L'injection de CSM diminue l'accumulation anormale de collagène, phénomène caractéristique de la fibrose, en particulier *via* la diminution de l'expression de certains gènes clés (TGFB1, CTGF, MMP 3, 9/TIMP1). Ces résultats prometteurs confirment l'intérêt de ces recherches, qui se poursuivent. Ils ont contribué à l'autorisation de traitement compassionnel pour une quatrième victime de l'accident d'Épinal traité par injection de CSM.

Contact : Marc Benderitter - [marc.benderitter@irsn.fr](mailto:marc.benderitter@irsn.fr)  
(Laboratoire de radiopathologie  
et de thérapies expérimentales - LRTE)

<sup>(1)</sup> Cystites, entérites, rectites accompagnées de douleurs intenses réfractaires aux antalgiques.



Coupe histologique de la muqueuse rectale chez un porc témoin (gauche), chez un porc irradié localement au niveau du rectum (centre) et chez un porc irradié et injecté trois fois avec des CSM (grossissement : X40) (droite). On observe une restauration de la muqueuse intestinale.

### [ De l'in vitro au modèle de gros animal ]

Les CSM ont été utilisées, à titre compassionnel, pour soigner avec succès des brûlures radiologiques sévères chez huit personnes qui avaient manipulé accidentellement des sources radioactives. Les chercheurs de l'IRSN sont parvenus à étendre l'application de ce nouveau traitement à des organes du système digestif chez des souris (voir *Aktis* n° 2). Récemment, l'utilisation de la thérapie cellulaire pour traiter les complications des radiothérapies abdomino-pelviennes a franchi une nouvelle étape, préalable à un transfert clinique : l'efficacité d'injections répétées de CSM a été démontrée sur un modèle plus proche de l'homme, des porcs irradiés localement dans une configuration très proche des irradiations thérapeutiques pour le cancer de la prostate.

### [ Retour à l'état normal après les injections ]

Les études ont été menées sur sept porcs irradiés au niveau du rectum à une dose de 27 Gray, dans

Hôpital d'instruction des armées de Percy,  
CHU Saint Antoine.

+++ Linard C., *et al.* « Repeated MSC injections improve radiation-induced proctitis in pig », *International Society For Stem Cell Research World Congress 2012*, Yokohama, Japon 13-16 juin 2012.

## MODÉLISATION DE L'EFFONDREMENT D'UNE COLONNE DE GRAINS IMMERGÉS

**L'IRSN mène des recherches sur le comportement du combustible en situation accidentelle. En cas de rupture de la gaine qui le contient, déterminer la quantité de combustible qui passerait cette première barrière constitue un enjeu de sûreté. Cela nécessite d'être au plus proche des phénomènes en jeu, comme cette modélisation avancée d'interaction fluide-grains.**

Dans les accidents de réacteur nucléaire de type APRR<sup>GLO</sup> ou RIA<sup>GLO</sup>, le combustible peut se fragmenter et se présenter sous la forme d'un empilement dense de grains maintenu dans une gaine. Que deviendrait-il alors si la gaine venait à se rompre ? Pour répondre à cette question, une modélisation avancée des mécanismes mis en jeu a été élaborée par l'IRSN : elle tient compte aussi bien des interactions entre les particules de combustible fragmenté et le fluide (le réfrigérant du réacteur) que des interactions mutuelles entre particules.

Jusqu'à présent la plupart des simulations utilisaient des modèles relativement simples, qui privilégient soit la description du fluide, soit celle des grains. Or ces modèles ne peuvent représenter les mécanismes complexes qui régissent l'interaction entre un fluide interstitiel incompressible et une phase granulaire très dense (couplage du mouvement relatif des grains avec la pression du fluide dans les zones interstitielles), éléments nécessaires pour modéliser les mouvements des particules.

### [ Effets du fluide sur les grains ]

L'originalité du modèle développé par Vincent Topin durant son post-doctorat consiste dans le couplage d'une méthode discrète (Non Smooth Contact Dynamics, NSCD), très largement utilisée dans le domaine des milieux granulaires secs, avec une approche de simulation numérique (DNS)

permettant de résoudre les équations de mécanique des fluides (Navier-Stokes) à une échelle inférieure à celle des grains. À l'aide de ce modèle, V. Topin a effectué plusieurs simulations d'une colonne de grains s'effondrant dans un fluide. Testant différentes hauteurs de colonnes dans trois types de conditions différentes (air, eau et fluide fortement visqueux), il a mis en évidence les deux effets antagonistes du fluide sur le mouvement des particules immergées. D'une part, le fluide dissipe l'énergie cinétique des grains par frottement visqueux pendant la phase de chute ; d'autre part, il facilite l'écoulement pendant la phase d'étalement en lubrifiant les contacts entre les grains. La concurrence de ces deux effets explique que les distances d'étalement sont similaires dans tous les cas malgré des cinétiques (durées d'avalanches) sensiblement différentes.

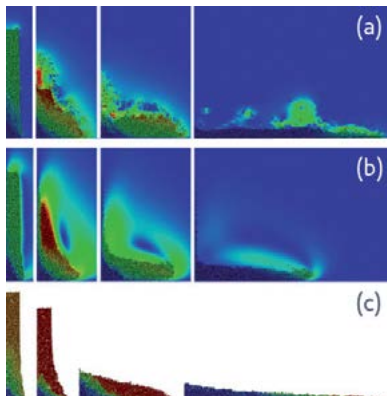
### [ Avancée significative ]

Ces travaux, qui ont bénéficié d'une reconnaissance particulière (cf. références), représentent une étape importante dans la compréhension du comportement d'une suspension granulaire dense et des transferts d'énergie entre ses phases liquide et solide. Au-delà du domaine de la sûreté du combustible nucléaire, la nouvelle méthode pourrait être utilisée pour étudier des situations telles que le colmatage de filtres par des particules ou la sédimentation des effluents dans les rivières

**Contact : Frédéric Perales - frederic.perales@irsn.fr**  
(Laboratoire de physique et de thermo-mécanique des matériaux - LPTM et Laboratoire Micromécanique et intégrité des structures - Mist)

4

Effondrement d'une colonne de grains dans un fluide inertiel (a), visqueux (b) et « sans fluide » (c). Les couleurs représentent les vitesses.



© V. Topin/IRSN



Laboratoire de mécanique et de génie civil (LMGC UMR 5508), CNRS/Université de Montpellier II via le Laboratoire commun Mist, Institut français du pétrole (IFP).

+++ Topin V., et al. « Micro-rheology of dense particulate flows: Application to immersed avalanches », *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2011, 166, Issues 1-2, pp. 63-72.

+++ Topin V., et al. « Collapse Dynamics and Runout of Dense Granular Materials in a Fluid », *Physical Review Letters*, 2012, 109: 188001.

# MIEUX COMPRENDRE LE DÉPÔT D'AÉROSOLS RADIOACTIFS POUR MIEUX LE QUANTIFIER

En cas d'accident nucléaire avec rejets radioactifs dans l'atmosphère, deux processus doivent être connus pour anticiper les conséquences environnementales et sanitaires : la dispersion atmosphérique des radionucléides (panache) et les dépôts des particules – ou aérosols. Le premier est assez bien prévu par les modèles opérationnels utilisés par l'IRSN. Le second l'est un peu moins, car il fait intervenir des mécanismes nombreux

et d'une grande complexité physique. Pour fournir des réponses rapides en situation de crise, les modèles opérationnels actuels reposent sur des hypothèses simplificatrices, raisonnablement majorantes. Dès que des mécanismes en jeu sont explicités, ces hypothèses sont réexaminées, et le paramétrage des outils de gestion de crise est optimisé ou corrigé. C'est un axe de recherche identifié par l'Institut pour réduire les incertitudes.



Soufflerie de l'Irpe avec un échantillon d'enduit de façade (thèse de P. Roupsard).

L'IRSN effectue des recherches sur le transfert des radionucléides sous forme d'aérosols afin de comprendre les mécanismes physiques sous-jacents et d'évaluer l'importance de paramètres non pris en compte. Quatre thèses récentes ont porté sur ces mécanismes de dépôt d'aérosols : deux ont concerné des dépôts dits « secs », c'est-à-dire sans précipitation, sur des surfaces encore peu étudiées, les deux autres ont approfondi la compréhension des dépôts « humides », qui se produisent avec la pluie ou la neige.

Définir les dépôts de radionucléides en suspension dans l'atmosphère revient à résoudre un problème d'interface entre l'air et la surface de dépôt. Par temps sec, le dépôt des aérosols dépend de facteurs liés à l'aérosol lui-même, aux caractéristiques des surfaces de dépôt et aux conditions météorologiques. Pour les environnements ruraux, notamment les prairies, les dépôts sont assez bien connus. Il n'en est pas de même lorsque la surface au sol est de l'eau en mouvement comme l'a étudié Névénick Caléc dans sa thèse, ni pour le milieu urbain, arrangement complexe de diverses surfaces et objet de la thèse de Pierre Roupsard.

## [ Dépôt sec en milieu urbain ]

Les études expérimentales ont été jusqu'à présent trop peu nombreuses pour permettre la compréhension et la modélisation des mécanismes de dépôt dans le cas des environnements urbains. La thèse que P. Roupsard a réalisée à l'IRSN – en lien avec le projet « Innovations pour une gestion durable de l'eau en ville » financé par l'ANR – a permis pour différentes conditions de quantifier le dépôt sec de particules fines (aérosols submicroniques susceptibles de porter des radionucléides) sur des surfaces urbaines en mesurant des vitesses de dépôt. Son approche expérimentale originale se décline en trois étapes complémentaires : la première en soufflerie pour étudier les phénomènes élémentaires, les deux autres en extérieur avec des expériences de courte et de longue durée, représentatives de contaminations accidentelles ou chroniques. Cette approche permet de hiérarchiser, pour différentes situations d'intérêt, l'importance des principaux phénomènes physiques impliqués.

Dans la soufflerie du laboratoire de l'Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre

(Irphe), les vitesses de dépôt ont été mesurées avec des particules de fluorescéine sodée, dont les tailles sont proches de celles des particules fines atmosphériques. Trois échantillons de surfaces urbaines de rugosité différente, chauffées ou non pour représenter l'effet d'une exposition au soleil, ont été testés : verre lisse, enduit de façade et herbe synthétique.

Les résultats montrent que, sans chauffage, la vitesse de dépôt dépend de la vitesse du vent, de la rugosité de la surface et de son orientation, horizontale ou verticale. La turbulence contribue donc de façon importante au dépôt. Cependant, lorsque la surface est chauffée, les dépôts diminuent en raison du phénomène de thermophorèse<sup>GL0</sup> qui peut devenir prépondérant.

### [ Phénomènes physiques et échelles de temps ]

Durant la deuxième étape, sept surfaces urbaines ont été exposées pendant une heure au même aérosol de fluorescéine sodée, mais cette fois en extérieur, dans des conditions de turbulence atmosphérique réelles. Il apparaît que les vitesses de dépôt mesurées sont du même ordre que celles mesurées en soufflerie, ce qui met en évidence les mêmes processus de dépôt. De plus, l'effet de la température des surfaces semble se confirmer.

augmente la taille des aérosols et leurs vitesses de dépôt sec.

Cette thèse a ainsi permis de mieux comprendre les processus mis en jeu dans le dépôt sec sur des surfaces urbaines, et de constituer une base de données importante pour valider ultérieurement les modèles développés pour le milieu urbain.

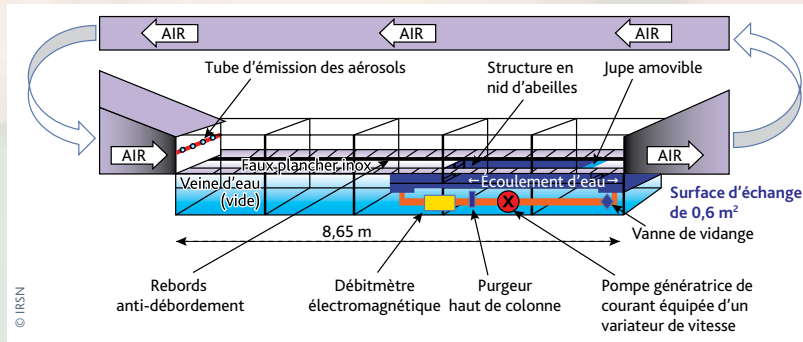
### [ Dépôt sec sur l'eau ]

Autre situation encore mal quantifiée : celle d'un dépôt sec sur une surface d'un cours d'eau, rivière ou fleuve, qui peut transporter et disséminer les aérosols radioactifs déposés.

La thèse que N. Caléc achève a permis de modéliser le dépôt de particules fines atmosphériques (inférieures au micromètre) sur des surfaces liquides sous l'action du vent et en présence d'un courant. Comme dans le cas de l'environnement urbain, il convient de vérifier si la vitesse de dépôt sec observée est cohérente avec celles des modèles existants qui tiennent essentiellement compte de la taille des aérosols et des conditions de vent. Pour acquérir des données expérimentales, N. Caléc a également utilisé la soufflerie de l'Irphe, couplée à un canal hydraulique. Des particules de fluorescéine sodée ont été injectées pendant 1 heure 30, avec différentes conditions

6

*Schéma de la soufflerie de l'Irphe pour les expériences de N. Caléc. Paramètres mesurés : vitesse de dépôt, granulométrie des particules, températures air et eau, hygrométrie, caractéristiques de surface de l'eau et de l'écoulement d'air.*



Pendant la troisième étape, les sept mêmes surfaces ont été exposées pendant un mois aux particules atmosphériques, dans les conditions météorologiques extérieures mais protégées de la pluie. Les essais ont été répétés pendant quinze mois consécutifs. Les vitesses de dépôt ont été mesurées à l'aide d'un radionucléide naturel fixé sur les particules, le béryllium 7. Dans ce cas, ni la température des surfaces, ni la turbulence atmosphérique ne semblent avoir d'influence observable sur les dépôts. Les dépôts obtenus seraient plutôt dus à la condensation de l'eau présente dans l'air qui

d'écoulement de l'air et de l'eau : eau sans courant, eau avec un courant dans le sens du vent ; et eau s'écoulant à contre-courant du vent. Les concentrations de fluorescéine sodée ont été mesurées toutes les 15 minutes dans l'air et l'eau afin d'en déduire les vitesses de dépôt sec.

### [ Dépôts, vent et courant ]

Les résultats montrent qu'à faible vent la vitesse de dépôt sec dépend de celle du courant et qu'elle est maximale lorsque le courant est dans le sens du vent. En revanche, l'effet du courant s'atténue lorsque le vent accélère.

Les modèles les plus courants de dépôt sec sur l'eau ont été confrontés à ces nouvelles données. N. Colec a ainsi vérifié qu'ils ne représentent pas correctement le phénomène. Essentiellement centrés sur le rôle de la vitesse du vent, ces modèles n'intègrent pas suffisamment les effets de la vitesse de l'eau, du gradient de température entre l'air et l'eau, et de l'humidité ambiante, qui caractérisent les contributions de l'évaporation de l'eau et du grossissement des particules hygroscopiques, au dépôt.

Les travaux de N. Colec ont ainsi permis d'identifier et de pondérer les différents mécanismes qui participent au dépôt sec des aérosols submicroniques sur les surfaces liquides. Il a ainsi pu proposer les corrections à apporter aux modèles de références pour étendre leur validité aux surfaces liquides en mouvement.

### **[ Dépôt par temps de pluie ]**

Les principaux dépôts de radionucléides au sol, lors des accidents de Tchernobyl et de Fukushima, se sont produits par temps de pluie ou de neige. Ce dépôt humide a depuis longtemps fait l'objet de nombreuses études. Néanmoins, sa compréhension et sa modélisation peuvent être améliorées en explorant l'efficacité de la collecte des aérosols par la pluie sous le nuage.

Deux approches complémentaires ont été récemment adoptées à l'IRSN : Arnaud Quérel a retenu une approche analytique en étudiant en laboratoire la collecte des aérosols sous l'angle microphysique, à l'échelle de la goutte ; et Guillaume Depuydt a opté pour une approche de terrain, en mesurant et analysant l'impact des précipitations sur l'évolution de la distribution en tailles des aérosols dans le temps.

En examinant les performances d'un modèle courant de lessivage des radioéléments par la pluie, A. Quérel a identifié la nécessité, pour l'affiner, de déterminer expérimentalement l'efficacité de la collecte des aérosols par des gouttes. Il a alors réalisé l'expérience Bergame, qui permet de générer des gouttes représentatives de celles de la pluie, en taille (diamètre compris entre 1 et 5 mm) comme en vitesse de chute. Produites en haut d'une colonne de 10 m de hauteur, les gouttes atteignent leur vitesse limite lorsqu'elles traversent une cuve enssemencée en aérosols et située à la base de la colonne. Pour déterminer l'efficacité de la collecte, les gouttes sont récupérées et la masse de particules captées par les gouttes au cours de cette traversée est mesurée.

*Champ de vitesse de l'air autour d'une goutte au cours de sa chute mesuré par vélocimétrie laser (A. Quérel).*

© IRSN



### **[ Efficacité et écoulement d'air ]**

L'aérosol choisi pour représenter les particules fines (de 0,1 à 10  $\mu\text{m}$ ) de l'atmosphère est là encore la fluorescéine sodée. Plus de 160 mesures d'efficacité ont ainsi été obtenues. Par ailleurs, les techniques de mesure disponibles dans le laboratoire (ombroscopie et Particule Image Velocimetry ou PIV) ont fourni les caractéristiques des écoulements d'air autour des gouttes lors de leur chute. A. Quérel a ainsi mis en évidence le rôle que les vortex<sup>GLO</sup> créés dans le sillage de la goutte ont sur la collecte des particules submicroniques. Grâce à ces résultats, les modèles décrits dans la littérature (Slinn, 1977 et Flossmann, 1986) ont été corrigés, ce qui a permis à A. Quérel de modéliser le lessivage de particules radioactives par les précipitations, lors d'orages.

Cette approche permet d'améliorer la précision des mesures de la contamination des sols induite par les précipitations à l'échelle plus globale de la pluie. Bien que trop détaillé pour être appliqué dans les logiciels de gestion de crise, ce modèle leur fournit une base de validation solide.

Enfin, cette modélisation permet de mieux comprendre le couplage complexe entre les précipitations et la dynamique des écoulements atmosphériques. Et donc de mieux analyser l'ensemble des mesures effectuées dans l'environnement.

### **[ Données pluviométriques ]**

G. Depuydt a, comme A. Quérel, analysé la collecte des aérosols par la pluie sous le nuage, et ce, par l'expérience de terrain. Son objectif est de déterminer, à partir de mesures *in situ*, l'efficacité du lessivage sur la concentration en aérosols dans l'air, pour différents types de précipitations. Sur trois sites aux conditions climatiques et



Les mesures *in situ* ont été réalisées grâce à l'association d'un granulomètre<sup>GL0</sup> pour la mesure des concentrations volumiques d'aérosols et d'un disdromètre<sup>GL0</sup> laser pour déterminer les caractéristiques des précipitations (G. Depuydt).

d'empoussièrement distinctes, les caractéristiques des précipitations (intensité pluviométrique, taille et vitesse de chute des hydrométéores...) et les concentrations volumiques d'aérosols ont été mesurées toutes les minutes durant plusieurs mois. Dans un premier temps, les coefficients de lessivage ont été calculés à partir des concentrations d'aérosols mesurées juste avant et juste après la pluie, pour des aérosols d'un diamètre compris entre 5 nm et 32 µm. L'interprétation de ces données *in situ* a nécessité une phase préalable de tri afin d'éliminer les effets parasites liés au renouvellement des masses d'air.

À partir de l'évolution de l'intensité pluviométrique en fonction du temps (hyéogramme), les pluies ont été classées selon leur force (intensité pluviométrique). G. Depuydt a ainsi obtenu un coefficient de lessivage caractéristique pour différentes familles de pluie. Ces données sont directement utilisables : en identifiant rapidement le type de pluie (à partir de données fournies par Météo France par exemple), elles permettent de connaître les coefficients de lessivage les plus représentatifs de la situation en cours, et de les intégrer dans les modèles numériques pour estimer les dépôts. G. Depuydt poursuit actuellement son étude pour affiner ses hypothèses de départ en étudiant notamment l'effet de la variation de l'intensité de la pluie sur le coefficient de lessivage. Cette approche qualifiée « d'intra-événementielle » permet d'établir une relation entre l'intensité pluviométrique et les coefficients de lessivage. Ces résultats seront *in fine* comparés aux paramètres utilisés actuellement dans les modèles de l'IRSN.

Les mécanismes régissant les transferts d'aérosols à l'interface entre l'atmosphère et les surfaces demeurent complexes à bien identifier et à modéliser du fait de la diversité des situations rencontrées (nature des surfaces, milieux naturels ou urbains), des conditions météorologiques existantes (turbulence, humidité relative, différence de températures entre l'air et les surfaces...), et des échelles de temps à traiter. Néanmoins, en choisissant d'étudier ces mécanismes par des approches variées (études de terrain, expériences analytiques de laboratoires), les résultats de ces quatre thèses ont permis de conforter les grandes options choisies pour la modélisation des dépôts d'aérosols sur des surfaces. Elles permettent aussi d'améliorer les modèles, lorsque cela s'avère nécessaire et réalisable compte tenu de l'utilisation attendue des modèles de dépôt.

**Contacts : Denis Maro - [denis.maro@irsn.fr](mailto:denis.maro@irsn.fr)**  
(Laboratoire de radioécologie de Cherbourg-Octeville - LRC)

**Patrick Boyer - [patrick.boyer@irsn.fr](mailto:patrick.boyer@irsn.fr)**  
(Laboratoire de modélisation pour l'expertise environnementale - LM2E)

**Pascal Lemaître - [pascal.lemaître@irsn.fr](mailto:pascal.lemaître@irsn.fr)**  
**Emmanuel Porcheron - [emmanuel.porcheron@irsn.fr](mailto:emmanuel.porcheron@irsn.fr)**  
(Laboratoire d'expérimentations en confinement, épuration et ventilation - Lecev)

**Guillaume Depuydt - [guillaume.depuydt@irsn.fr](mailto:guillaume.depuydt@irsn.fr)**  
**Olivier Masson - [olivier.masson@irsn.fr](mailto:olivier.masson@irsn.fr)**  
(Laboratoire d'études radioécologiques en milieu continental et marin - LERCM)



Insa de Rouen, Complexe de recherche interprofessionnel en aérothermochimie (Coria - UMR 6614), Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre (Irphe - CNRS/Université Aix-Marseille), École centrale de Marseille, Université de Mayence (Allemagne), Laboratoire de météorologie physique (UMR 6016 CNRS/UBP), Groupe d'études de l'atmosphère météorologique (Centre national de recherches météorologiques, UMR 3589 CNRS/Météo-France), Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement (UMR 5183 CNRS/UJF Grenoble).

+++ *Étude phénoménologique du dépôt sec d'aérosols en milieu urbain : influence des propriétés des surfaces, de la turbulence et des conditions météorologiques.*  
Thèse soutenue par Pierre Roupsard le 21 janvier 2013 à Saint-Étienne-du-Rouvray.

+++ Calec N., et al. « Dry deposition of sub-micro aerosol on surface water », *International Aerosol Conference, IAC 2010, Helsinki* (Finlande).

+++ *Étude expérimentale analytique du rabattement des aérosols atmosphériques par des précipitations dédiée à la quantification de l'influence des différents phénomènes physiques induits par les conditions naturalistes.*  
Thèse soutenue par Arnaud Quérel le 7 décembre 2012 à Clermont-Ferrand.

+++ Depuydt G., et al. « Étude *in situ* du lessivage des aérosols nanométriques à supermicroniques », 28<sup>e</sup> congrès sur les aérosols CFA 2013, Paris.



## MIEUX MODÉLISER LE DÉPÔT DES SUIES

Dans le domaine de l'incendie, les recherches de l'IRSN s'orientent pour les prochaines années vers les questions de la sectorisation, de la propagation et des effets induits par l'incendie (fumées, suies). Grâce à un nouveau dispositif expérimental mis au point pendant sa thèse, Édouard Brugière a pu mesurer la vitesse de dépôt par thermophorèse d'agrégats de carbone, pour progresser dans la maîtrise des effets induits par les suies.

Évaluer le risque de perte du confinement des radioéléments en cas d'incendie dans une installation nucléaire nécessite de prédire quelle fraction des suies générées va se fixer sur les filtres à très haute efficacité. Le dépôt des suies risque en effet de conduire au colmatage et à une possible rupture des filtres. Pour cela il faut connaître la quantité de suie qui se dépose, notamment par thermophorèse<sup>GLO</sup>, à l'amont des filtres, sur les parois de l'installation. Les modèles de thermophorèse existant à ce jour ont été établis pour des particules sphériques, or les suies sont surtout constituées d'agrégats de particules nanométriques. Peu de données fiables permettant de quantifier les différences de comportement entre une sphère et un agrégat, É. Brugière s'est attaché durant sa thèse à mettre au point un dispositif expérimental capable de quantifier la vitesse de dépôt par thermophorèse d'agrégats et plus particulièrement de suies de carbone élémentaire.

### [ Dispositif expérimental ]

Ce dispositif, le spectromètre thermophorétique circulaire, est constitué de deux disques parallèles distants de 4 mm entre lesquels est injecté l'aérosol avec un écoulement radial. L'un des disques est chauffé et l'autre refroidi, créant le gradient de température moteur de la thermophorèse. É. Brugière a réalisé différents essais avec des particules sphériques (diamètre compris entre 64 nm et 500 nm) et des agrégats de carbone (diamètre de mobilité électrique<sup>GLO</sup> compris entre 30 nm et 600 nm).

### [ Vitesse et diamètre ]

Les résultats ont montré que les vitesses de thermophorèse d'une particule sphérique et d'un

agrégat de même diamètre de mobilité peuvent atteindre des écarts de 60 %. De plus, contrairement à ce qui se produit pour les particules sphériques, la vitesse de thermophorèse des agrégats augmente avec leur diamètre de mobilité. Une étude morphologique a montré qu'il existe une corrélation entre la vitesse de thermophorèse et le nombre de particules primaires nanométriques constituant l'agrégat. Ces résultats expérimentaux ont confirmé, pour la première fois, les résultats d'une approche théorique établie en 2006 à l'université d'Auburn (États-Unis d'Amérique). La principale explication de ces observations réside dans la différence de comportement entre un agrégat et une particule sphérique soumis à un gradient de température. Dans l'agrégat, les jonctions entre particules primaires induisent des résistances thermiques supplé-

mentaires qui permettent d'atteindre des écarts de température plus marqués entre ses faces chaudes et froides et augmentent ainsi la force de thermophorèse.

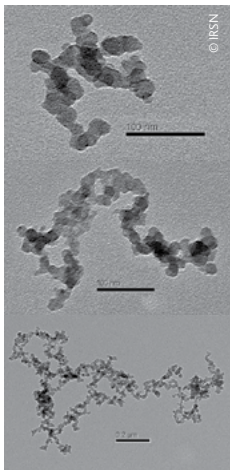
Cette thèse confirme la nécessité de modèles spécifiques aux agrégats, qui contribueront à améliorer l'évaluation du maintien du confinement en situation d'incendie.

Contact : François Gensdarmes  
francois.gensdarmes@irsn.fr  
(Laboratoire de physique  
et de métrologie des aérosols - LPMA)



Complexe de recherche interprofessionnel  
en aérothermochimie (Coria - UMR 6614),  
Université de Rouen.

+++ Le spectromètre thermophorétique circulaire, un nouvel instrument pour mesurer la thermophorèse : application aux agrégats de suies de morphologie fractale. Thèse soutenue par Édouard Brugière à l'université de Rouen, le 3 décembre 2012.



Agrégats de carbone de diamètre de mobilité électrique<sup>GLO</sup> égal à 64 nm, 200 nm et 600 nm.

## VERS LA PRÉDICTION DES TAUX DE FUITE DES ENCEINTES DE CONFINEMENT

L'IRSN mène des recherches sur les phénomènes de vieillissement des installations, des systèmes et équipements. Concernant le génie civil, l'Institut travaille à établir des indicateurs de résistance dans la durée et à détecter les pathologies liées au vieillissement. La thèse de Rafik Affes permet de progresser vers la quantification des pertes de confinement qui peuvent se produire par des fissurations dues au vieillissement des matériaux.

En vieillissant, les bétons peuvent se fissurer sous l'action des différentes contraintes environnementales et structurelles auxquelles ils sont soumis. Ces fissures peuvent engendrer des fuites qu'il est nécessaire de quantifier dans le cas des enceintes de confinement des installations nucléaires, ultime barrière à la dispersion des produits radioactifs dans l'atmosphère. Durant sa thèse, R. Affes a étudié l'étanchéité des bétons sous l'angle de la micromécanique, en les considérant comme des matériaux granulaires cimentés poreux.

### [Modèle micromécanique]

Dans ces matériaux, les chemins de fissuration sont influencés par les fortes variations microstructurales observables : densité d'agrégats et de pores, distribution granulométrique, adhésion agrégat-matrice, etc. R. Affes a caractérisé finement l'effet de ces variations en trois étapes : une méthode numérique tridimensionnelle (utilisant un réseau

de points reliés par des liens élastiques fragiles) a été adoptée pour simuler la fissuration ; cette méthode a ensuite été appliquée à des bétons numériques à microstructures réalistes ; enfin, les différentes configurations de microstructures ont été analysées par des approches statistiques poussées. Cette démarche l'a notamment conduit à proposer un

modèle micromécanique de résistance à la traction des bétons.

### [Microstructure et morphologie des fissures]

Parmi les cas étudiés, un scénario de fissuration analogue à celui observé dans des bétons réels a été identifié. Son analyse statistique a permis de relier la microstructure du béton et

la « tortuosité » des fissures (progression non rectiligne par contournement des agrégats du béton). Une relation tortuosité-microstructure a été établie en exprimant la tortuosité comme une fonction explicite de la densité d'agrégats et de leur distribution granulométrique.

### [Sur la base d'une micrographie]

Enfin, la capacité globale d'un réseau de fissures à permettre l'écoulement d'un fluide (perméabilité apparente) a été estimée par une approche numérique de type Lattice-Boltzmann. R. Affes a montré que l'inverse de cette perméabilité est une fonction affine croissante de la tortuosité. Compte tenu de la relation tortuosité-microstructure obtenue précédemment, une corrélation a été établie entre la perméabilité et la microstructure initiale du béton.

Ce résultat permet de prédire les taux de fuite d'un béton avec une précision d'environ 20 % sur la base d'une simple micrographie du matériau. Ce dernier résultat doit être confirmé quant à sa sensibilité à l'ouverture des fissures.

**Contact : Yann Monerie - [yann.monerie@irsn.fr](mailto:yann.monerie@irsn.fr)**  
(Laboratoire de physique et thermomécanique des matériaux - LPTM et Laboratoire Micromécanique et intégrité des structures - Mist)

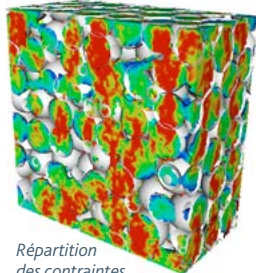


Laboratoire de mécanique et de génie civil (LMGC UMR 5508) CNRS/Université de Montpellier II via le laboratoire commun Mist.

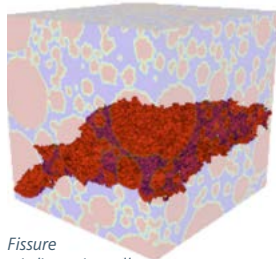
+++ Affes R., Delenne J.-Y., Monerie Y., Radjai F., Topin V. « Tensile strength and fracture of cemented granular aggregates », *European Physical Journal E*, 35 (11): 117, 2012.

+++ Relations microstructure-fissuration-perméabilité dans les milieux granulaires cimentés, thèse soutenue par Raffik Affes le 6 décembre 2012 à l'université Montpellier II.

10



Répartition des contraintes axiales de traction dans un milieu granulaire à matrice cimentée poreuse. [Réf.1 - avec l'aimable autorisation de l'EPJ.]



Fissure tri-dimensionnelle traversante dans un béton numérique à microstructure réaliste. [Réf.1 - avec l'aimable autorisation de l'EPJ.]

## STRATÉGIE

### RECHERCHE EUROPÉENNE EN SÛRETÉ



La plateforme européenne SNE-TP (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform) a publié fin février une version révisée de son agenda stratégique de recherche et d'innovation (SRIA). Ce document définit les axes de recherche et de développement prioritaires en Europe pour l'énergie nucléaire de fission à court (2015), moyen (2020) et long termes (2050). Il formalise une vision commune à ses quelque 110 organisations-membres, regroupées en trois structures : l'association Nugenia créée en 2012 pour la R&D sur les réacteurs actuels, de génération II et III ; l'initiative Esnii pour le déploiement des réacteurs de génération IV à neutrons rapides ; et Cogen, spécialisée dans la cogénération nucléaire. L'IRSN, très impliqué dans Nugenia, a fortement contribué à mettre en exergue les besoins en R&D de la sûreté nucléaire dans la vision européenne. En complément du SRIA, un document spécifique aux domaines de recherche liés à l'accident de Fukushima a également été publié par la plateforme.

## COLLABORATIONS

### DÉVELOPPEMENT DES RELATIONS AVEC LE JAPON

Le 17 décembre 2012, l'IRSN et l'université de Fukushima ont signé un accord de coopération portant sur le suivi des conséquences environnementales et sanitaires de l'accident de Fukushima-Daiichi, la formation à la sûreté nucléaire et l'implication de la population dans la gestion post-accidentelle. Dans un domaine similaire, un accord avait été signé le 11 juillet 2012 avec l'université de Tsukuba pour mieux comprendre, modéliser et quantifier le cycle biogéochimique du césium en forêt. Un troisième accord est en cours avec l'université de Rikkyo sur l'influence des rayonnements ionisants sur les populations d'espèces sauvages, découlant du projet Freebird mené en commun.



### RECHERCHES SUR LE TRITIUM AVEC L'AECL AU CANADA

L'IRSN et l'Atomic Energy of Canada Limited (AECL) ont signé en janvier 2013 d'un accord de collaboration de sept ans dans le domaine de la radioécologie et de la radioprotection de l'environnement. Il concerne l'investigation des risques associés au tritium dans l'environnement, en particulier sa bioaccumulation dans les organismes aquatiques et l'examen des conséquences écologiques susceptibles d'en découler. Cet accord étend à l'étude de l'impact sur l'environnement une collaboration entre l'IRSN et AECL qui a débuté en juin 2011 par un programme expérimental sur les effets sanitaires potentiels d'une exposition chronique au tritium à faibles doses. L'ensemble de ces travaux s'inscrit dans le programme Envirhom de l'IRSN, dédié à l'étude des faibles doses de rayonnements.

### MODÉLISATION DE LA DISPERSION EN MER

L'IRSN a signé le 1<sup>er</sup> octobre 2012 avec l'Ifremer et l'Université de Bretagne occidentale (UBO) un accord de collaboration tripartite afin de développer, d'ici l'automne 2013, un code de calcul dédié à la dispersion, en cas d'accident, de radionucléides et à leur transfert dans les espèces marines.

## THÈSES

### CAMPAGNE DE RECRUTEMENT DES NOUVEAUX DOCTORANTS

L'IRSN a publié sur son site Internet la liste des sujets proposés pour les thèses qui commenceront à l'automne 2013. Les candidats doivent contacter directement les tuteurs de thèse pour préparer un dossier d'ici à mi-mai : une première session de recrutement aura lieu en juin. Une seconde session est prévue en septembre.

## PRIX

### UN DOCTEUR DE L'IRSN

**REÇOIT LE PRIX JEAN BRICARD**  
Pierre Rouspard, qui a réalisé sa thèse au Laboratoire de radioécologie de Cherbourg-Octeville de l'IRSN, a reçu le prix Jean Bricard décerné par l'Association française d'études et de recherches sur les aérosols (Asfera) lors de sa réunion annuelle le 23 janvier 2013. Le prix récompense son travail de thèse, soutenue le 21 janvier, *Étude phénoménologique du dépôt sec d'aérosols en milieu urbain : influence des propriétés des surfaces, de la turbulence et des conditions météorologiques.* (Cf. Focus).

**APRP**

Accident de perte de réfrigérant primaire.

**DIAMÈTRE ÉQUIVALENT DE MOBILITÉ ÉLECTRIQUE D'UNE PARTICULE**

Diamètre d'une sphère, qui pour une même charge électrique, a la même vitesse de déplacement que la particule considérée sous l'effet d'un même champ électrique.

**DISDROMÈTRE**

Capteur de gouttelettes qui mesure notamment la distribution de diamètre des hydrométéores (gouttes de pluie, grêlons, flocons de neige), le cumul et l'intensité des précipitations, et leur vitesse.

**GRANULOMÈTRE**

Appareil qui effectue les mesures de produits sous forme de grains (poudres, farines, précipitations...) ou de particules en suspension dans une solution.

**RIA**

Reactivity Initiated Accident ou accident de réactivité.

**THERMOPHORÈSE**

Phénomène suivant lequel un aérosol se déplace dans un gradient de température de la zone chaude vers la zone froide. L'origine de ce phénomène provient du déséquilibre de quantité de mouvement apporté par les collisions avec les molécules du gaz environnant sur les faces chaudes et froides d'une particule.

**VORTEX**

Tourbillon creux créé par un écoulement de fluide.

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**

<http://www.irsn.fr>

**IRSN**

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE