



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

# FEUILLE DE ROUTE IRSN-CNRS

**MOBILISER TOUT LE POTENTIEL DE LA SCIENCE  
POUR MAITRISER LES RISQUES NUCLEAIRES ET  
RADIOLOGIQUES ET CONTRIBUER AUX ENJEUX  
ENERGETIQUES ET DE SANTE**

Feuille de route associée à l'accord-cadre IRSN-CNRS signé le 13/11/2020

Ce document a été rédigé par les membres du comité de coordination de l'accord-cadre IRSN-CNRS :

- *Membres IRSN* : Laurent Audouin (SPOT<sup>1</sup>), Alain Brunisso (DST<sup>2</sup>), François Besnus (PSE-ENV<sup>3</sup>), Jean-Michel Bonnet (PSE-SAN<sup>4</sup>), Thierry Bourgois (DST), Didier Gay (DST), Patrice Giordano (PSN-RES<sup>5</sup>)
- *Membres CNRS* : Fanny Farget (IN2P3<sup>6</sup>), Stéphane Guillot (INSU<sup>7</sup>), Sébastien Incerti (IN2P3), Dominique Joly (INEE<sup>8</sup>), Alexandre Legris (INC<sup>9</sup>), Nathalie Magnillat (DAPP<sup>10</sup>), Laurent Orgeas (INSIS<sup>11</sup>)

Avec la contribution de :

- Thierry Loiseau et Constantin Vahlas (INC) pour le CNRS et de Gauzelin Barbier (PSN-RES) pour l'IRSN.

*A la mémoire de David Biron.*

<sup>1</sup> Service de soutien aux Plateformes scientifiques et techniques ; <sup>2</sup> Direction de la stratégie ; <sup>3</sup> Direction de l'environnement ; <sup>4</sup> Direction de la santé ; <sup>5</sup> Direction de la recherche en sûreté ; <sup>6</sup> Institut national de physique nucléaire et de physique des particules ; <sup>7</sup> Institut national des sciences de l'univers ; <sup>8</sup> Institut écologie et environnement ; <sup>9</sup> Institut de chimie ; <sup>10</sup> direction d'appui aux partenariats publics ; <sup>11</sup> Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes

## UNE FEUILLE DE ROUTE POUR FIXER UN CAP ET UNE AMBITION COMMUNE

Les équipes de recherche de l'IRSN et du CNRS collaborent de longue date sur une grande diversité de sujets. En 2014, la mise en place d'un accord-cadre a constitué une première étape dans la structuration de ce partenariat en définissant un cadre administratif et juridique unifié pour mener des collaborations scientifiques. Fin 2020, à l'occasion du renouvellement de cet accord-cadre, les deux organismes ont souhaité aller plus loin en donnant à leur partenariat une dimension institutionnelle et en en faisant un outil au service de leurs objectifs stratégiques respectifs.

Dans son contrat d'objectif et de performance 2019-2023, l'IRSN s'est engagé à développer des partenariats structurants avec des organismes de référence. La collaboration avec le CNRS constitue une étape importante pour atteindre cet objectif. Elle permet de mettre les connaissances scientifiques les plus avancées au service de la résolution des questions prioritaires inscrites dans sa stratégie scientifique. Elle est aussi un moyen d'ouvrir et de positionner ses plateformes expérimentales au sein des infrastructures de recherche nationales.

Pour le CNRS, la collaboration avec l'IRSN constitue un moyen de mettre l'excellence scientifique au service des enjeux sociétaux auxquels les technologies nucléaires contribuent : disposer de moyens de production d'énergie sûrs et décarbonés, protéger la santé des populations humaines et non-humaines et contribuer à la lutte contre le cancer en limitant les séquelles des traitements pour les patients. Compte tenu de la diversité des champs disciplinaires mobilisés par l'IRSN, elle présente également une occasion de renforcer et valoriser la dimension interdisciplinaire et la transversalité de ses recherches.

La volonté de conforter la dimension institutionnelle du partenariat s'est d'abord traduite par un renforcement des capacités d'animation et de suivi de l'accord-cadre avec la mise en place d'un comité de coordination constitué des représentants des trois unités de recherche de l'IRSN – les unités de recherche en sûreté, en environnement et en santé respectivement – et des cinq instituts du CNRS avec lesquels elles ont des collaborations particulièrement étroites : l'IN2P3, l'INC, l'INSIS, l'INSU et l'INEE.

En complément les deux partenaires ont décidé d'établir une feuille de route commune précisant les domaines et questions scientifiques sur lesquels ils décident de collaborer de manière prioritaire ainsi que les modalités envisagées pour cette collaboration. L'élaboration de cette feuille de route, qui porte sur la période 2021-2025 couverte par l'accord-cadre, a été confiée au comité de coordination.

Pour guider son travail, le comité de coordination a choisi de retenir deux critères principaux : d'une part, l'existence de collaborations nourries ou à fort potentiel entre équipes du CNRS et équipes de l'IRSN, d'autre part, l'importance des enjeux sociétaux associés aux thématiques de collaboration. Les discussions se sont également attachées à favoriser les sujets ayant un caractère transverse et interdisciplinaire.

Six thématiques principales ont ainsi été retenues pour structurer la feuille de route :

- L'altération des matériaux, des composants et des structures,
- Les séismes et les interactions sol-structure,
- Les recherches transverses in-situ dans le domaine de l'environnement,
- Les nouvelles techniques nucléaires pour la santé,
- Les capteurs et la métrologie,
- Les plateformes logicielles et la simulation.

Les thématiques précédentes définissent les domaines d'intérêt prioritaires. Elles ne doivent pas être considérées comme exclusives ; d'autres thématiques pourront être abordées en tant que de besoin dans le cadre du partenariat.

Le comité de coordination a ensuite identifié des domaines et questions scientifiques plus particulières sur lesquels des travaux communs sont attendus sur la durée de l'accord-cadre. Il a complété son travail en proposant des modalités de collaboration et d'animation du partenariat.

Les actions retenues sont présentées ci-après. Elles donnent un contenu à l'ambition commune que l'IRSN et le CNRS se fixent pour les prochaines années. Elles constituent de ce point de vue une base de travail qui fera l'objet d'un suivi régulier et pourra être révisée et complétée en tant que de besoin.

## SIX THEMATIQUES SCIENTIFIQUES POUR STRUCTURER LE PARTENARIAT

### 1. L'altération des matériaux des composants et des structures

#### *Pourquoi cette thématique ?*

Les équipements et systèmes sur lesquels reposent la sûreté des installations nucléaires sont soumis à des conditions d'environnement qui peuvent conduire à la dégradation progressive de leurs caractéristiques, de leurs fonctions et de leurs performances. La capacité à prédire et suivre l'altération des matériaux qui les constituent est de ce fait un enjeu important. Il l'est d'autant plus dans le contexte des projets d'extension de la durée d'exploitation des réacteurs du parc électronucléaire ou du recours envisagé à de nouvelles techniques de fabrication telles que la fabrication additive<sup>1</sup>. La capacité de prédiction de l'altération des matériaux est également fondamentale pour le projet de stockage géologique de déchets radioactifs Cigéo<sup>2</sup> dont la sûreté repose sur la performance à long terme des différentes barrières.

Dans le cadre de leur partenariat, l'IRSN et le CNRS ont prévu de s'intéresser plus particulièrement à deux types de matériaux : les matériaux métalliques et les matériaux polymères.

Les matériaux métalliques sont les matériaux des premières barrières de confinement des réacteurs nucléaires (gaines de combustible, circuits primaires et secondaires du cœur). Ils jouent également un rôle important dans de nombreuses installations du cycle du combustible ainsi que pour le projet Cigéo. Lors du fonctionnement de ces installations, les composants métalliques sont ou seront soumis à des environnements particulièrement exigeants voire agressifs, du fait des conditions de température, de pression, d'irradiation et de chimie. La faible accessibilité ou l'impossibilité de remplacer certains de ces composants (la cuve d'un réacteur en particulier) constituent pour cette thématique un enjeu supplémentaire.

Les matériaux polymères sont également des matériaux importants pour la sûreté des installations nucléaires. Ils sont un constituant essentiel de près de 1500 km de câbles électriques présents dans chacun des réacteurs en exploitation. Ils sont également les matériaux constitutifs des joints d'étanchéité et des peaux composites qui recouvrent certaines enceintes et assurent le confinement de la radioactivité.

Interpréter et prédire l'évolution de ces deux familles de composants dans le contexte de l'exploitation des installations nucléaires nécessite de s'appuyer sur les meilleures connaissances disponibles en sciences des matériaux pour prédire les comportements sur des durées et pour des conditions d'environnement spécifiques. La prise en compte des effets couplés associés à l'irradiation, aux mécanismes thermiques, mécaniques, chimiques... est pour cela essentielle.

---

<sup>1</sup> La fabrication additive ou impression 3D regroupe les procédés de fabrication de pièces en volume par ajout de matière en couches successives depuis une modélisation 3D

<sup>2</sup> Cigéo est le projet français de centre de stockage profond de déchets radioactifs développé par l'Andra, l'agence nationale de gestion des déchets radioactifs ; voir : <https://www.cigeo.gouv.fr/>

Pour y parvenir, le partenariat entre l'IRSN et le CNRS offre l'opportunité de combiner la connaissance fine du fonctionnement des installations nucléaires avec les compétences fondamentales rassemblées par les équipes de l'INSIS, de l'INC et de l'IN2P3 dans chacune des disciplines concernées. Il permet également de s'appuyer sur la large gamme d'installations expérimentales et de plateformes d'irradiation dont disposent les deux organismes.

### **L'ambition commune**

*Dans le cadre de leur partenariat, l'ambition de l'IRSN et du CNRS est d'améliorer l'évaluation du comportement à long terme des matériaux constitutifs des installations nucléaires en tenant compte des altérations qu'ils subissent dans les conditions particulières auxquelles ils sont soumis. L'enjeu est d'être en capacité d'identifier, notamment via le recours à la modélisation, les comportements à seuil et les potentiels effets falaise<sup>3</sup>.*

### **Les objectifs associés**

*En lien avec l'ambition générale précédente, l'IRSN et le CNRS s'engagent à mener des travaux de recherche sur l'altération des matériaux métalliques. Ils viseront plus particulièrement à améliorer la caractérisation des dommages consécutifs à l'irradiation, la description des mécanismes de corrosion et de fatigue<sup>4</sup> dans les ambiances spécifiques aux installations nucléaires, la description des mécanismes de fragilisation par l'hydrogène d'alliages à base de nickel et leurs couplages avec d'autres mécanismes (corrosion, irradiation).*

*Les travaux porteront notamment sur les méthodes de remontée d'échelles, permettant de passer d'une compréhension des processus à l'échelle microscopique jusqu'à l'analyse du comportement d'un matériau à l'échelle macroscopique, et sur la validation des modèles prédictifs.*

*L'étude de l'impact des dommages d'irradiation et des effets de la fatigue s'appuiera notamment sur la complémentarité des plateformes des deux organismes.*

*En complément, l'IRSN et le CNRS s'attacheront à définir les grandes questions scientifiques et les verrous méthodologiques relatifs au vieillissement des polymères utilisés dans les installations nucléaires et à la durabilité des pièces produites par des techniques de fabrication additive. L'intérêt d'un rapprochement entre les équipes de l'IRSN et les GDR animés par le CNRS dans ces domaines sera en particulier étudié.*

## **2. Les séismes et les interactions sols-structure**

### **Pourquoi cette thématique ?**

Les séismes constituent une source d'agression importante à prendre en compte pour la protection des sites et installations sensibles telles que les installations nucléaires. Cela nécessite d'évaluer les niveaux d'aléas envisageables, d'estimer les mouvements qu'ils peuvent provoquer au droit des installations et de définir les chargements à appliquer pour dimensionner et vérifier la tenue des structures de génie civil et des équipements qui les constituent.

En tant qu'expert public du risque nucléaire et radiologique en France, le rôle de l'IRSN est d'apprécier la pertinence des hypothèses retenues à chacune de ces étapes, en tenant compte des meilleures connaissances scientifiques disponibles. C'est la raison pour laquelle l'Institut développe, depuis plus de quarante ans, des programmes de recherche qu'il mène en collaboration avec le monde académique, dans lequel l'INSU joue un rôle de premier plan, et les autres organismes de recherche finalisés concernés.

<sup>3</sup> En sûreté nucléaire, l'effet falaise désigne l'altération brutale du comportement d'une installation, que suffit à provoquer une légère modification du scénario envisagé pour un accident dont les conséquences sont alors fortement aggravées

<sup>4</sup> La fatigue est un processus (succession de mécanismes) qui sous l'action de contraintes ou déformations variables dans le temps modifie les propriétés locales d'un matériau. Ces dernières peuvent entraîner la formation de fissures et éventuellement la rupture de la structure

En dépit d'importants progrès des connaissances intervenus ces dernières décennies, des travaux nécessitent d'être poursuivis dans plusieurs directions. Evaluer le risque sismique de manière fiable s'avère en effet encore difficile comme l'ont illustré le séisme de Tohoku, survenu en mars 2011, au Japon, en provoquant un tsunami et l'accident nucléaire de Fukushima, et celui du Teil, qui a frappé la région de Montélimar, le 11 novembre 2019, avec des caractéristiques peu communes qui ont surpris la communauté scientifique. Il s'agit plus particulièrement de progresser dans la caractérisation des failles actives à l'échelle du territoire métropolitain, dans la modélisation du mouvement sismique, en particulier la physique de la rupture, dans l'estimation des effets de site et dans le transfert du mouvement du sol aux structures de génie civil et aux équipements.

Les travaux à mener sont importants du point de vue de la sûreté nucléaire mais aussi, plus généralement, pour la prévention du risque sismique à l'échelle métropolitaine. Ils ont ainsi vocation à s'inscrire dans les feuilles de route relatives aux risques géologiques en cours d'élaboration à l'initiative du ministère chargé de l'environnement.

### **L'ambition commune**

*Au travers de leur partenariat, le CNRS et l'IRSN ambitionnent de faire progresser les connaissances scientifiques sur les questions clés pour l'évaluation du risque sismique mais également de démontrer l'apport d'une collaboration étroite entre la recherche fondamentale et la recherche finalisée dans un domaine où les acteurs sont nombreux et les besoins de coordination sont forts.*

*En dépassant le domaine de l'aléa sismique pour couvrir les interactions entre les sols et les structures et l'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages et équipements, le CNRS et l'IRSN veulent également renforcer le dialogue entre les géosciences et les sciences de l'ingénieur et stimuler l'interdisciplinarité.*

### **Les objectifs associés**

*En lien avec l'ambition générale précédente, l'IRSN et le CNRS s'engagent à :*

- *Favoriser les interactions entre les chercheurs des deux organismes, via, par exemple, l'organisation de séminaires et visites, et à coordonner leurs actions dans le cadre de l'infrastructure Résif, notamment en lien avec les travaux de mise à jour de l'aléa sismique de la France métropolitaine.*
- *Encourager les collaborations impliquant conjointement les équipes de l'INSU et celles de l'INSIS, pour le CNRS, et les spécialistes de mécanique des structures et d'aléa sismique, pour l'IRSN.*
- *Promouvoir la mise en commun de moyens expérimentaux et numériques : bases de données partagées ; accès aux infrastructures de calculs intensifs ; développements instrumentaux pour l'acquisition de données morphologiques à l'aide de systèmes de télédétection par laser LiDAR, de données géodésiques à l'aide de méthodes interférométriques InSAR, de données sismologiques et géophysiques à l'aide de systèmes d'antennes distribuées DAS.*

## **3. Recherches transverses in-situ et effets de la radioactivité sur l'environnement**

### **Pourquoi cette thématique ?**

Les effets des rayonnements ionisants sur le vivant ont été mis en évidence depuis plus d'un siècle. Au cours des dernières décennies, l'évolution du niveau de sensibilité de différents types d'organismes et l'identification des mécanismes biologiques en jeu ont beaucoup progressé. Les études conduites sur les territoires contaminés montrent toutefois la difficulté à mettre en cohérence les résultats des expérimentations menées en laboratoire et les observations de terrain. Elles illustrent également tout l'enjeu que représente le passage des connaissances acquises à l'échelle de la cellule ou de l'organisme à la compréhension des effets à l'échelle d'écosystèmes complets.

Dans le contexte de la décarbonation des politiques énergétiques, le nucléaire fait l'objet d'une attention particulière. Les débats qui accompagnent les choix à venir renforcent le besoin de disposer d'une appréciation objective et robuste des conséquences des expositions à la radioactivité. Lever les verrous de connaissance évoqués précédemment constitue de ce fait un enjeu particulier pour évaluer de manière précise et complète les impacts, à l'échelle d'un territoire, d'un accident nucléaire, du stockage de déchets nucléaires ou de la présence de radioactivité naturelle à des niveaux élevés. Pour y parvenir, il apparaît nécessaire de mobiliser les outils et concepts les plus avancés dans le domaine de l'écologie.

Cet enjeu d'amélioration des connaissances se pose dans le contexte des changements globaux (changement climatique et crise de la biodiversité en particulier). Ces changements globaux ont des effets directs sur les écosystèmes et sur leur sensibilité aux pressions anthropiques, celles qui seraient liées à une contamination radioactive par exemple.

Pour aborder ces enjeux globaux liés à la vulnérabilité des milieux et aux conséquences des actions de l'Homme sur l'environnement, le CNRS a développé une approche intégrative, combinant observation et rétro-observation, expérimentation et modélisation. Ses équipes mènent, dans ce cadre, des recherches au plus haut niveau international sur le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes, l'évolution de la biodiversité et les effets de l'anthropisation sur les changements globaux. Elles s'appuient notamment sur un réseau de zones ateliers et d'observatoires<sup>5</sup> mis en place par le CNRS et sur des nouveaux concepts, celui de « socio-écosystèmes » en particulier, qu'il a contribué à faire émerger.

L'inscription des travaux portés par l'IRSN dans le contexte plus général des recherches impulsées par le CNRS ouvrent des perspectives attractives pour les deux organismes : celle de progresser dans la connaissance des effets des rayonnements ionisants sur les écosystèmes et les territoires pour l'IRSN, celle de renforcer la prise en compte de la radioactivité dans son approche intégrative pour le CNRS.

## **L'ambition commune**

*Au travers de leur partenariat, le CNRS et l'IRSN ambitionnent de mobiliser les connaissances et les concepts les plus récents en écologie et en sciences de l'environnement pour évaluer les effets de la radioactivité sur les écosystèmes et les socio-écosystèmes, et les replacer dans le contexte des changements globaux.*

## **Les objectifs associés**

*En lien avec l'ambition générale précédente, l'IRSN et le CNRS s'engagent à :*

- *Collaborer à la compréhension des mécanismes biologiques et évolutifs associés à l'exposition à la radioactivité. Ils promouvront pour cela les contacts et collaborations entre équipes de l'IRSN et du CNRS menant des travaux sur le sujet dans des contextes différents.*
- *Explorer les perspectives de déclinaison du concept de services écosystémiques à l'évaluation des conséquences de contaminations radioactives ; réfléchir à la manière de qualifier les impacts liés aux rayonnements ionisants dans le contexte d'une modification globale et majeure des pressions qui s'exercent sur les écosystèmes et en intégrant la notion de service écosystémique.*
- *Exploiter les archives de la Terre pour comprendre, interpréter les changements en cours et se projeter dans le futur en exploitant la notion d'analogues naturels.*
- *Mobiliser de manière optimale les différentes échelles expérimentales et exploiter la complémentarité des plateformes de l'IRSN et du CNRS.*

<sup>5</sup> Réseau des zones ateliers et observatoires homme-milieu pour l'INEE, OZCAR, l'observatoire de la zone critique piloté pour l'INSU

## 4. Les nouvelles techniques nucléaires pour la santé

### *Pourquoi cette thématique ?*

Les technologies nucléaires jouent un rôle important dans la lutte contre le cancer que ce soit dans le domaine du diagnostic ou le domaine thérapeutique. Elles connaissent actuellement une dynamique d'innovation forte avec l'essor de techniques d'irradiation de haute intensité et haute précision, le recours à de nouveaux types de rayonnements ou le développement de substances capables de transporter des éléments radioactifs jusqu'à la tumeur ou d'amplifier les effets destructeurs d'une irradiation sur celle-ci.

La mise au point et le déploiement de ces techniques nécessitent de connaître leur efficacité mais aussi leur éventuelle toxicité sur les tissus sains. Il en va de la qualité de vie des patients atteints d'un cancer et des personnes qui y survivent. Limiter les séquelles liées aux traitements et améliorer la qualité de vie des patients constitue ainsi l'un des quatre axes de la stratégie décennale de lutte contre les cancers définie par la France pour la période 2021-2030. Cet objectif est également l'un des quatre domaines d'action retenus par la Commission Européenne dans le plan européen pour vaincre le cancer annoncé début 2021.

Evaluer et contribuer à limiter autant que possible les effets secondaires liés à l'utilisation des rayonnements ionisants dans le domaine médical est également au cœur des missions de l'IRSN. Il s'appuie pour cela sur ses propres équipes et plateformes de recherche mais aussi sur des collaborations mises en place depuis plusieurs années avec le CNRS.

Le CNRS joue en effet un rôle de premier plan dans l'étude des mécanismes fondamentaux à l'origine des effets des rayonnements ionisants sur les tissus biologiques. Il coordonne ainsi, au travers de l'IN2P3, le développement à l'échelle internationale de la plateforme ouverte Geant4-DNA destinée à modéliser ces effets biologiques à l'échelle de l'ADN. En réponse aux défis de la lutte contre le cancer, l'IN2P3 pilote également le GDR MI2B qui rassemble plus d'une vingtaine d'équipes de l'IN2P3, de l'INSB, de l'INS2I, de l'INP mais aussi de l'Inserm, à l'interface entre la physique et les sciences de la vie et de la santé. Le GDR MI2B est à l'origine de la mise en place du Réseau des Plateformes Nationales d'Irradiation (RESPLANDIR) qui regroupe les plateformes d'irradiation pour la dosimétrie et la radiobiologie.

### *L'ambition commune*

*Au travers de leur partenariat, le CNRS et l'IRSN ambitionnent de développer la connaissance des effets biologiques des rayonnements ionisants afin d'accompagner le développement de nouvelles technologies nucléaires dans le domaine médical. Au travers de cette ambition, ils entendent être en mesure d'en évaluer la toxicité et contribuer à l'objectif de préservation de la qualité de vie des patients atteints d'un cancer.*

### *Les objectifs associés*

*En lien avec l'ambition générale précédente, l'IRSN et le CNRS s'engagent à :*

- Poursuivre leur contribution commune au développement de la plateforme Geant4-DNA et à sa validation. Les travaux de validation s'appuieront sur les expérimentations menées sur les plateformes de l'IRSN et du réseau RESPLANDIR.
- Développer leur collaboration en radiobiologie, en lien avec les domaines d'innovation majeurs en radiothérapie externe (par exemple, la hadronthérapie, l'irradiation Flash à haut débit de dose) et interne (par exemple, la radiothérapie par capture neutronique sur le bore ou BNCT, les approches théranostiques consistant à combiner les méthodes diagnostiques et thérapeutiques).
- Développer la spectrométrie neutrons pour les radiothérapies externes innovantes. Des travaux seront pour cela menés sur la plateforme AMANDE de l'IRSN et le développement d'instruments innovants sera engagé pour caractériser les microfaisceaux des installations IRSN MIRCOM et CNRS AIFIRA.

## 5. Les capteurs et la métrologie

### *Pourquoi cette thématique ?*

Le développement des technologies sans fil et de l'Internet des objets a déclenché une révolution dans le domaine de la mesure. De nouvelles générations de capteurs fiables, communicants, compacts et autonomes se développent à un rythme rapide en ouvrant la voie à l'acquisition d'une large gamme de paramètres – physiques, chimiques, biologiques – dans des contextes très diversifiés – au laboratoire, dans une installation industrielle, dans l'environnement. Parallèlement le développement des algorithmes d'apprentissage, de l'intelligence artificielle et des capacités de calcul mais aussi des technologies de communication autorisent le déploiement de réseaux denses de capteurs. En facilitant l'accès à la mesure, ces progrès ouvrent aussi la voie au développement de l'observation citoyenne et des sciences participatives.

Ce contexte constitue une opportunité pour le progrès des connaissances dans les différents domaines de recherche sur lesquels l'IRSN et le CNRS collaborent. Dans le domaine de la radiobiologie, les nouvelles technologies de capteurs permettent d'envisager une caractérisation plus précise des faisceaux de neutrons et d'ions, indispensable à l'étude des effets biologiques des rayonnements ionisants aux échelles cellulaires et moléculaires. Dans le domaine de l'environnement et de l'écologie, elles permettent d'envisager l'observation simultanée in situ des différents processus qui régissent les dynamiques biotiques et abiotiques et ainsi d'en identifier les signatures et les interactions, à l'échelle d'une zone expérimentale ou d'un territoire. Le développement des réseaux denses est également à l'origine de progrès notables dans la capacité de modéliser les mouvements sismiques et la physique de la rupture des failles.

Dans le contexte du prolongement de la durée d'exploitation des installations nucléaires et du projet de stockage géologique Cigéo, le contrôle et le suivi temporel, de manière non destructive, de l'état d'un matériau ou d'un ouvrage constituent également un enjeu prioritaire auquel le développement rapide des capteurs peut contribuer à répondre. Il en est de même pour la caractérisation de contamination à l'intérieur d'une installation ou à l'échelle d'un territoire. La surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants justifie également des progrès dans le domaine de la mesure, pour la caractérisation de l'exposition au radon, en particulier, ou aux rayonnements cosmiques dans le cadre des futures missions spatiales.

La collaboration entre l'IRSN et le CNRS sur cette thématique pourra bénéficier du potentiel d'innovation des équipes des divers instituts du CNRS et des initiatives qu'ils pilotent dans plusieurs domaines : projet PIA TERRA FORMA pour ce qui concerne l'observation des socio-écosystèmes, mise en place du centre interdisciplinaire « Sciences pour l'IA, IA pour les Sciences » pour ce qui concerne l'analyse des données, par exemple.

### *L'ambition commune*

*Au travers de leur partenariat, le CNRS et l'IRSN ambitionnent de mettre à profit les avancées technologiques et les apports de l'intelligence artificielle pour progresser dans tous les domaines de recherche sur lesquels ils collaborent. Pour accéder à de nouvelles manières d'observer, de mesurer, d'acquérir des données et d'en tirer de l'information.*

### *Les objectifs associés*

*En lien avec l'ambition générale précédente, l'IRSN et le CNRS s'engagent à :*

- *Améliorer l'exploitation des données mesurées en mobilisant les connaissances avancées en algorithmique et intelligence artificielle. Les travaux communs pourront en particulier porter sur l'utilisation de techniques d'apprentissage automatique pour l'identification d'anomalies de mesures ou l'extraction d'informations pertinentes de données de surveillance.*
- *Développer de nouvelles technologies de détecteurs dans le domaine de la mesure nucléaire. Les collaborations porteront notamment sur la caractérisation de faisceaux de neutrons et d'ions en lien avec le développement de nouvelles formes de radiothérapie (telles que l'hadronthérapie) et les projets*

*d'exploration spatiale. Elles pourront également concerner le développement de détecteurs embarqués ou de terrain pour la caractérisation d'installations ou d'environnements contaminés et la surveillance environnementale.*

- *Promouvoir le rapprochement entre les innovations technologiques portées par les équipes du CNRS et les besoins associés aux recherches et expertises menées par l'IRSN.*

## 6. Les plateformes logicielles et la simulation

### **Pourquoi cette thématique ?**

Pour l'IRSN et le CNRS, les codes et plateformes de modélisation scientifiques sont un des outils et une des formes privilégiées de consolidation et de capitalisation des résultats de recherche. Pour l'IRSN, ils constituent ainsi une interface naturelle entre les activités de recherche et d'expertise.

Sous l'effet combiné de l'amélioration des connaissances fondamentales, des méthodes numériques et de la puissance des outils informatiques, les codes de modélisation scientifique ont évolué, au cours des dernières années, dans le sens d'une prise en compte de plus en plus explicite des mécanismes fondamentaux à l'origine des phénomènes étudiés. Cette tendance touche la plupart des champs disciplinaires. Dans les domaines les plus avancés, comme la physique des réacteurs, elle ouvre la voie à la mise au point de jumeaux numériques capables de simuler le comportement d'un système complexe dans un domaine de sollicitation étendu, en limitant dans une certaine mesure le recours à l'expérimentation.

Dans le contexte évoqué précédemment, le développement de modélisations avancées, visant à décrire les phénomènes au plus juste, occupe aujourd'hui une place importante dans la collaboration entre le CNRS et l'IRSN. Les phénomènes étudiés étant fondamentalement multi-physiques et multi-échelles, leur modélisation repose sur des approches complexes permettant de tenir compte des effets couplés et des interactions spatiales et temporelles. Les connaissances fondamentales qu'exigent ces approches, justifient de recourir aux compétences des équipes spécialisées du CNRS, au sein de l'INSIS, de l'INC ou de l'IN2P3.

Les évolutions en cours, portés par la forte croissance des capacités de calcul, de génération, stockage et exploitation de données numériques, conduisent à accorder une importance accrue à la simulation numérique dans les années à venir et à renforcer le partenariat entre l'IRSN et le CNRS sur cette thématique.

Le développement ou la réingénierie d'outils de simulations pour résoudre des problèmes scientifiques complexes, ainsi que la validation de ces outils, représentent un défi partagé par les deux organismes. Dans ce cadre, un intérêt particulier est exprimé pour développer les capacités de simulation de la neutronique de cœur de réacteur en exploitant les progrès permis par la généralisation des simulations Monte-Carlo.

### **L'ambition commune**

*Au travers de leur partenariat, le CNRS et l'IRSN ambitionnent d'améliorer la capacité des plateformes de simulation à reproduire les phénomènes et situations caractéristiques du fonctionnement des installations nucléaires en développant les couplages multiphysiques et en adoptant des méthodes numériques avancées.*

### **Les objectifs associés**

*En lien avec l'ambition générale précédente, l'IRSN et le CNRS s'engagent à :*

- *Œuvrer à l'amélioration de la simulation des accidents de criticité dans les cœurs des réacteurs à sels fondus et dans les entreposages de combustibles en piscine, via un couplage neutronique - thermohydraulique adapté et l'évaluation des incertitudes dues aux données nucléaires.*
- *Développer des stratégies de validation des outils de simulation multi-physiques et multi-échelles et de quantification des incertitudes associés à leurs résultats. Ces développements tiendront notamment compte de la limitation des données expérimentales ou de la difficulté à les produire.*

- *Mobiliser les méthodes avancées en simulation numérique pour la conception de nouveaux codes scientifiques ou la réingénierie de codes existants, afin d'en étendre les performances. Le recours aux calculs haute performance et massivement parallèles ainsi qu'aux méthodes liés à l'intelligence artificielle et aux sciences des données sera encouragé.*

## UN DISPOSITIF A PLUSIEURS NIVEAUX POUR ANIMER ET VALORISER LES COLLABORATIONS

### *L'ambition commune*

*Le CNRS et l'IRSN ambitionnent de voir leur partenariat déboucher sur des collaborations effectives et un dialogue productif entre leurs équipes de recherche.*

### *Les objectifs associés*

*Pour atteindre l'ambition précédente, l'IRSN et le CNRS s'engagent à mettre en place et à maintenir un dispositif et des initiatives destinées à animer et à mettre en valeur leur partenariat.*

#### **a) Le comité de coordination : un rôle central dans l'animation du partenariat**

*L'IRSN et le CNRS s'engagent à réunir de manière régulière le comité de coordination (objectif de trois réunions par an) et à maintenir des échanges réguliers entre ses membres en dehors de ces réunions.*

Le comité de coordination a montré sa capacité à animer et dynamiser le partenariat à l'occasion du travail d'élaboration de la feuille de route. Il jouera naturellement un rôle moteur pour accompagner sa mise en œuvre.

Les échanges entre réunions du comité de coordination permettront de fluidifier les relations entre les deux organismes par un échange régulier d'informations, de faciliter la mise en contact entre équipes de recherche et de piloter des actions spécifiques. Le comité de collaboration s'efforcera également de mesurer la vitalité du partenariat au travers du suivi de quelques indicateurs<sup>6</sup>.

Un travail a été engagé à l'occasion de l'élaboration de la feuille de route pour référencer les plateformes de l'IRSN et du CNRS présentant un intérêt potentiel pour le partenariat. Il pourra être mis à profit pour assurer une meilleure connaissance réciproque de ces plateformes en vue d'en promouvoir l'utilisation dans le cadre de la collaboration ou, de manière plus générale, pour en promouvoir l'ouverture et la valorisation.

Le comité de coordination pourra enfin étudier les cadres les plus adaptés pour renforcer ou pérenniser les collaborations entre équipes ou groupes d'équipes. Il pourra pour cela s'appuyer sur le retour d'expérience issue des équipes communes en place par le CNRS et l'IRSN<sup>7</sup>.

#### **b) Des événements réguliers pour mettre en contact et stimuler les échanges scientifiques**

*L'IRSN et le CNRS s'engagent à organiser de manière régulière des rencontres, ateliers et journées scientifiques réunissant les équipes des deux organismes avec un objectif d'au moins un événement tous les deux ans.*

Ces événements seront l'occasion de valoriser le partenariat au sein des deux établissements et éventuellement vers un public plus large via une communication adaptée. Ils veilleront à accorder une place particulière à la population des doctorants et aux travaux menés dans le cadre de thèses communes, compte tenu de leur importance pour la collaboration entre les deux organismes.

<sup>6</sup> Les indicateurs pourront par exemple se baser sur le nombre de publications communes, le nombre de thèses en co-tutelle, le nombre de réponses communes aux appels à projet nationaux, européens et internationaux...

<sup>7</sup> Laboratoires communs MIST entre l'IRSN et le LMGC et LIMA entre l'IRSN et le LRPG ; deux autres ont fonctionné dans le passé : C3R avec le LS2A et l'IUSTI

Le partenariat sera à ce titre promu au travers des journées des thèses que l'IRSN organise chaque année. Les représentants du CNRS au sein du comité de coordination seront invités à y participer et ils pourront être sollicités pour présider des sessions techniques. De chercheurs du CNRS pourront par ailleurs être sollicités pour intervenir lors de tables rondes et conférences invitées.

*D'une manière plus générale, l'IRSN et le CNRS s'engagent à informer les membres du comité de coordination des événements internes et journées thématiques organisées par leur organisme et à étudier l'opportunité d'une implication de leur partenaire.*

### **c) Une implication renforcée dans les structures de coordination et d'animation thématique**

*L'IRSN et le CNRS s'engagent à s'appuyer sur les structures d'animation de la recherche pertinentes dans les domaines d'intérêt commun, pour renforcer et élargir leurs collaborations.*

L'IRSN maintiendra ainsi son implication dans les programmes et structures de collaborations scientifiques pilotés par le CNRS tels que le programme NEEDS<sup>8</sup>, la ZATU<sup>9</sup>, l'OSR<sup>10</sup>.

Une réflexion sera par ailleurs poursuivie en vue d'une implication de l'IRSN dans les GDR identifiés comme d'intérêt potentiel pour les six thématiques couvertes par la feuille de route.

La réflexion explorera également l'intérêt d'une intégration de la plateforme AMANDE aux réseaux EMIR&A et RESPLANDIR ou de la mise en réseau du laboratoire de recherche souterrain de Tournemire avec les autres laboratoires de recherche souterrains français.

L'IRSN et le CNRS pourront également s'appuyer sur la MITI<sup>11</sup> pour favoriser l'interdisciplinarité et l'implication dans le partenariat d'autres Instituts du CNRS que ceux représentés au sein du comité de coordination. L'opportunité et la faisabilité d'un appel à projet sur des thématiques d'intérêt commun pourra être étudiée dans ce cadre.

### **d) Un partenariat placé sous le signe de la responsabilité environnementale et climatique**

*L'IRSN et le CNRS conduiront leur collaboration en cohérence avec leurs engagements environnementaux et climatiques respectifs et promouvoir l'exemplarité dans ces domaines auprès de leurs équipes.*

Dans sa feuille de route RSE 2021-2023, l'IRSN s'est engagé à s'inscrire dans une logique de recherche responsable en identifiant l'impact de ses activités de recherche et en intégrant la nouvelle donne du climat dans ses programmes de recherche.

De son côté, le CNRS incite les laboratoires dont il est tutelle à mettre en place une réflexion sur l'impact environnemental de leurs activités et à mesurer, analyser et réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Il a pour cela encouragé l'initiative du collectif Labos 1point5 regroupant plus de 2 000 chercheuses, chercheurs et personnels du monde de la recherche et mis en place un GDR dont l'objectif est de structurer les activités de recherche sur l'empreinte carbone à l'échelle de la France.<sup>12</sup>

*Au travers de leur partenariat, le CNRS et l'IRSN s'engagent à contribuer aux travaux du GDR Labos 1point5 et à promouvoir ses actions et publications.*

<sup>8</sup> NEEDS (Nucléaire : Énergie, Environnement, Déchets, Société) : programme multipartenaires porté par le CNRS avec l'Andra, le BRGM, le CEA, EDF, Framatome, l'IRSN et Orano

<sup>9</sup> ZATU : Zone Atelier Territoires Uranifères

<sup>10</sup> OSR : observatoire des sédiments du Rhône

<sup>11</sup> MITI : Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires du CNRS

<sup>12</sup> <https://labos1point5.org/>

## ANNEXES

Thématique « altération des matériaux, des composants et structures ».....	14
Thématique « séismes et interaction sol-structure » .....	18
Thématique « recherches transverses in-situ et effets de la radioactivité sur l'environnement » ...	24
Thématique « nouvelles techniques nucléaires pour la santé ».....	28
Thématique « capteurs et métrologie ».....	33
Thématique « plateformes logicielles et de simulation » .....	36

# Thématique « altération des matériaux, des composants et structures »

**Pilotes : Thierry Loiseau et Constantin Vahlas (CNRS/INC) et Patrice Giordano et Gauzelin Barbier (IRSN/Unité de recherche en sûreté)**

## 1. Introduction

La thématique relative à l'altération des matériaux, composants et structures a fait l'objet d'échanges entre les équipes de l'unité de recherche en sûreté de l'IRSN et des équipes de recherche de l'INC, de l'INSIS et de l'IN2P3. Les échanges ont été pilotés par Thierry Loiseau et Constantin Vahlas pour l'INC, Patrice Giordano et Gauzelin Barbier pour l'IRSN. Pour des raisons de temps et de disponibilité des équipes, les discussions ont principalement porté sur les matériaux métalliques. Les matériaux polymères faisant l'objet de travaux de moindre ampleur de la part de l'IRSN, ils ont été abordés dans un premier temps de manière plus sommaire.

Au cours d'un premier temps, les chercheurs et experts des deux organismes ont identifié les questions scientifiques sur lesquels un besoin de connaissances était attendu et une progression commune envisageable.

A l'issue de ce travail préalable, un premier séminaire dédié aux matériaux métalliques a permis aux équipes des deux organismes de se rencontrer afin de partager leur état de connaissance sur les questions scientifiques identifiées et d'explorer les sujets et modalités de collaboration envisageables.

A l'instar de ce qui a été fait sur les matériaux métalliques, un séminaire d'une demi-journée sera programmé au cours du deuxième trimestre 2022 sur la thématique des matériaux polymères.

## 2. Structuration et contenu des échanges

Compte tenu de la nature finalisée des recherches de l'IRSN, la première étape de la réflexion a eu comme point de départ la présentation par les experts de l'Institut des besoins de connaissances découlant de l'analyse du fonctionnement des installations nucléaires et des enjeux de sûreté associés. L'objectif a été d'identifier quelles actions de recherche du CNRS seraient à associer et quelles compétences à mobiliser.

Pour chacune des deux thématiques (matériaux métalliques et matériaux polymères), les premiers échanges ont associé, côté IRSN, un chercheur (portant la connaissance sur le matériau) et un représentant de l'expertise (portant la connaissance et l'expression du besoin au niveau structure et équipement) et côté CNRS un ou deux chercheurs ayant une vision élargie de la thématique et pouvant relayer les questions de recherche auprès des unités du CNRS.

Ces échanges avec les chercheurs ou experts des deux organismes ont permis d'identifier pour chacune des thématiques, les sujets d'intérêts communs associés aux chercheurs reconnus dans les disciplines visées. Pour ce qui est des matériaux polymères, parmi les problématiques d'intérêt on note l'étanchéité / adhérence des peaux composites et joints d'étanchéité et la perte d'isolant des câbles électriques sous irradiation. Ces thématiques seront le point d'entrée pour le séminaire à venir. Les sujets identifiés pour des matériaux métalliques seront énumérés ci-après.

Concernant la thématique *Matériaux métalliques*, un séminaire s'est tenu le 13 octobre 2021 et a regroupé une quarantaine de chercheurs et experts des 2 organismes. Le programme et les animateurs des différentes sessions sont détaillés au chapitre 4 ci-après. Ce séminaire a permis d'identifier trois axes de collaboration scientifique, s'appuyant sur des projets et collaborations existantes ou sur des intérêts communs autour de futures collaborations. Les trois axes de collaboration sont présentés ci-après.

## **a) Comportement des matériaux soumis à un flux neutronique et dommages induits**

La représentativité des irradiations par des ions pour simuler les irradiations aux neutrons a été montrée en s'appuyant sur quelques résultats du projet RAISIN (Représentativité des irradiations aux ions pour simuler les irradiations).

A cet égard, l'intérêt de la plateforme GENESIS (Generator of Neutrons for Science and Irradiation) de compréhension des mécanismes de vieillissement sous irradiation des aciers austénitiques et le réseau français d'accélérateurs d'irradiation et d'analyse de matériaux (réseau EMIR&A) a été rappelé.

## **b) Vieillissement des aciers inoxydables issus de la fabrication additive**

Ce séminaire a permis d'aborder la tenue des matériaux sur le long terme et de souligner le besoin d'étude pour ce qui concerne les effets de l'irradiation sur la microstructure et les oxydes formés dans les aciers inoxydables austénitiques, la formation de cavités dans les aciers austénitiques et la passivation des aciers à caractère inoxydable.

Après avoir abordé la compréhension des mécanismes de tenue à la corrosion dans un circuit primaire de réacteur, une étude comparative du comportement en corrosion et de corrosion sous contrainte d'un acier inoxydable issu de la fabrication additive et de son homologue conventionnel a fait l'objet d'échanges entre les participants.

## **c) Corrosion et fatigue environnementale des matériaux**

Concernant le comportement des aciers en présence d'acide nitrique concentré comme rencontré dans les usines de retraitement, le besoin de connaissance relatif à la compréhension de l'effet de la radiolyse ou des flux thermiques sur les conditions électrochimiques a été présenté.

L'effet de l'environnement sur la fatigue (mécanismes d'initiation et de propagation de fissures) des aciers inoxydables austénitiques et le domaine de validité des résultats expérimentaux (effets de la géométrie d'éprouvettes et de changement d'échelle) constituent également des sujets d'intérêts pour les deux organismes.

Il a été noté l'intérêt commun d'étude de l'influence de la vitesse de déformation et de la forme du signal pour simuler la fatigue environnementale des aciers inoxydables austénitiques. Enfin, l'IRSN a rappelé son besoin de compréhension des mécanismes de fragilisation par l'hydrogène des alliages à base de Nickel.

A l'issue de ce séminaire, il a été convenu de :

- retenir deux sujets de thèse portés par l'IRSN et le CNRS sur i) les effets des polluants (plomb, soufre...) sur les mécanismes d'endommagement par corrosion, ii) les mécanismes et phénomènes de fatigue oligocyclique (à faible nombre de cycles). Ces thèses portent sur des besoins de connaissances encore peu investigués et pourront démarrer à l'automne 2022 ;
- poursuivre les échanges sur les sujets d'intérêt, à savoir ; les dommages consécutifs à l'irradiation, la tenue à la corrosion, la fatigue environnementale, la fragilisation par l'hydrogène. Pour cela, il est convenu d'organiser une revue périodique de ces sujets avec pour objet de préciser les besoins et les moyens (inclus les besoins en lien avec les plateformes expérimentales notamment d'irradiation), les possibilités de collaboration et d'identifier les perspectives à retenir. Pour l'année 2022, il est convenu d'échanger notamment sur :
  - les méthodes d'analyse des incertitudes en simulation neutronique ;
  - la valorisation d'expériences d'irradiation ionique pour simuler les dommages d'une irradiation neutronique en s'attachant au projet structurant RAISIN du programme NEEDS, 2020-2022 ;

- les mécanismes de corrosion des aciers dans des solutions d'acide nitrique concentré dans le contexte du recyclage des combustibles usés ;
- les mécanismes de fragilisation par l'hydrogène d'alliages base nickel du circuit primaire des réacteurs ;
- identifier dans quelle mesure les questions scientifiques identifiées dans le cadre des échanges entre l'IRSN et le CNRS peuvent être abordées via les structures d'animation transverse que constituent les GDR et le cas échéant envisager une participation active des équipes impliquées dans le partenariat IRSN-CNRS à ces structures. Par exemple, des échanges sont en cours avec le GDR SCINEE (Sciences Nucléaires pour l'Energie et l'Environnement : Systèmes et scénarios, cycle du combustible, matériaux sous irradiation, environnement et radioécologie) et plus particulièrement son Pôle 3 : Matériaux du nucléaire sous stress.

### 3. Programme du séminaire

Date : mercredi 13 octobre 2021 - 9h45-17h00

Lieu : Auditorium IRSN - Fontenay aux Roses

<b>Introduction : 9h45</b>	
<b>Comportement des matériaux sous irradiation : Neutronique / aspects nucléaires &amp; Dommages d'irradiation : 10h00 -11h00</b>	
Prise en compte des aspects nucléaires (énergie des neutrons, données nucléaires et incertitudes) vis-à-vis des dommages induits dans les matériaux (25 mn)	Mariya Brovchenko, IRSN/SNC <sup>13</sup> Fabienne Ribeiro, IRSN/SEMIA <sup>14</sup> Xavier Doligez, IJCLab Orsay <sup>15</sup>
La représentativité des irradiations aux ions pour simuler les irradiations aux neutrons : Démarche et quelques résultats du projet RAISIN (20 mn)	Marie-France Barthe, CEMHTI Orléans <sup>16</sup>
<b>Echanges (15 mn)</b>	
<b>Pause : 11h00 – 11h15</b>	
<b>Comportement des matériaux sous irradiation : Vieillessement des aciers inoxydables issus de la fabrication additive : 11h15-12h40</b>	
Problématique de la tenue sur le long terme des alliages sous irradiation (15 mn)	Ian de Curières, IRSN/SES <sup>17</sup>
Effet de l'irradiation sur la microstructure et les oxydes formés en milieu REP des aciers inoxydables austénitiques (fabriqués conventionnellement) (10 mn)	Lydia Laffont, CIRIMAT Toulouse <sup>18</sup>
Apport de la plateforme GENESIS à la compréhension des mécanismes de vieillissement sous irradiation des aciers austénitiques (10 mn)	Bertrand Radiguet, GPM Rouen <sup>19</sup>
Simulation expérimentale du vieillissement sous irradiation : exemple de la formation de cavités dans des aciers austénitiques inoxydables (fabriqués conventionnellement) lors d'une irradiation couplée à une incorporation d'hélium in situ dans un MET (10 mn)	Aurélien Gentils, IJCLab Orsay
Effet de l'irradiation sur la passivation des aciers à caractère inoxydable (10 mn)	Nicolas Bérerd, IP2I Lyon <sup>20</sup>
Intérêt de l'utilisation des faisceaux d'ions (réseau EMIR&A) pour étudier les effets de radiolyse aux interfaces (10 mn)	Nathalie Moncoffre, IP2I Lyon
<b>Echanges (20 mn)</b>	

<sup>13</sup> SNC : Service de Neutronique, Unité de recherche en sûreté, IRSN

<sup>14</sup> SEMIA : Service de Maîtrise des Incidents et Accidents, Unité de recherche en sûreté, IRSN

<sup>15</sup> IJCLab : Laboratoire de physique des 2 infinis – Irène Joliot-Curie, UMR9012, CNRS/IN2P3 et INP

<sup>16</sup> CEMHTI : Conditions Extrêmes et Matériaux : Haute Température et Irradiation, UPR 3079 CNRS/INC

<sup>17</sup> SES : Service d'Expertise des équipements et des Structures, Unité de recherche en sûreté, IRSN

<sup>18</sup> CIRIMAT : Centre Inter-universitaire de Recherche et d'Ingénierie des Matériaux - UMR 5085, CNRS/INC et INSIS

<sup>19</sup> GPM : Groupe de Physique des Matériaux, UMR 6634, CNRS/INP et INSIS

<sup>20</sup> IP2I de Lyon : Institut de Physique des deux Infinis de Lyon, UMR 5822, CNRS/IN2P3

<b>Pause déjeuner : 12h40 – 14h00</b>	
<b>Corrosion et fatigue environnementale des matériaux : 14h00-16h40</b>	
Aciers inoxydables issus de la fabrication additive – Compréhension des mécanismes de tenue à la corrosion en milieu primaire (5 mn)	Ian de Curières, IRSN/SNC
Etude comparative du comportement en corrosion et CSC d'un acier inoxydable issu de la fabrication additive et de son homologue conventionnel (15 mn)	Christine Blanc, CIRIMAT Toulouse
<b>Echanges (15 mn)</b>	
Compréhension de l'effet de la radiolyse, ou des flux thermiques, sur les conditions électrochimiques en milieu acide nitrique concentré (10 mn)	Ian de Curières, IRSN
Mécanismes de corrosion des aciers inoxydables dans l'acide nitrique concentré (15 mn)	Vincent Vivier, LISE Paris <sup>21</sup>
<b>Echanges (15 mn)</b>	
<b>Pause : 15h10-15h20</b>	
Effet de l'environnement sur la fatigue (mécanismes d'initiation et de propagation de fissures) des aciers inoxydables austénitiques. Domaine de validité des résultats expérimentaux : effets de géométrie d'éprouvettes, de changement d'échelle (10 mn)	Walter Chitty, IRSN/SEREX <sup>22</sup>
Fatigue environnementale des aciers inoxydables austénitiques : influence de la vitesse de déformation et de la forme du signal (10 mn)	Gilbert Henaff, PPRIM Poitiers <sup>23</sup>
Compréhension des mécanismes de fragilisation par l'hydrogène des alliages à base de Nickel : lien avec la microstructure, nature des pièges à hydrogène, etc (10 mn)	Ian de Curières, IRSN/SES
Mécanismes physiques associés à la fragilisation par l'hydrogène des alliages base-nickel : interactions défauts / soluté et leurs conséquences (15 mn)	Xavier Feaugas, LaSIE la Rochelle <sup>24</sup>
<b>Echanges (10 mn)</b>	
<b>Conclusion : 16h40 -17h00</b>	

<sup>21</sup> LISE : Laboratoire Interfaces et Systèmes Electrochimiques, UMR 8235, CNRS/INC

<sup>22</sup> SEREX : Service d'Etude et de Recherche Expérimentale

<sup>23</sup> Institut P' : UPR 3346, CNRS/ INSIS et INP

<sup>24</sup> LaSIE : Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE) UMR 7356, CNRS/INSIS

# Thématique « séismes et interaction sol-structure »

*Pilotes : François Besnus (IRSN/Unité de recherche en environnement) et Stéphane Guillot (CNRS/INSU)*

## 1. Introduction

Au travers de l'Infrastructure de Recherche Résif<sup>25</sup> et en particulier l'Action Transverse Sismicité mais aussi ses services nationaux d'observation et ses personnels au sein des laboratoires de recherche et des Observatoires, le CNRS joue un rôle central au niveau national et international pour faire progresser la connaissance en matière d'aléa et de risque sismique. De son côté, l'IRSN, au titre de sa mission d'expert public des risques nucléaires et radiologiques, exerce un rôle majeur dans l'évaluation du risque sismique pour la sûreté des installations nucléaires et a développé en particulier un important savoir-faire dans l'évaluation de l'aléa sismique, fondé sur la recherche qu'il initie ou réalise en partenariat avec les principaux acteurs du domaine, notamment le CNRS, aux côtés duquel il contribue également aux travaux effectués au sein de RESIF.

La thématique « séismes et interaction sol-structure » a fait l'objet d'une série d'échanges qui ont impliqué les équipes IRSN en charge de l'évaluation de l'aléa sismique et celles en charge de l'évaluation de la tenue des ouvrages de génie civil et côté CNRS les équipes de l'INSU ainsi que des équipes de l'INSIS et d'autres organismes partenaires comme le CEREMA (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) ou l'IPGP (Institut de physique du globe de Paris). Elle s'est développée autour de cinq axes :

- l'évaluation de l'aléa sismique ;
- la caractérisation des failles actives ;
- la modélisation du mouvement sismique ;
- l'estimation des effets de site ;
- le transfert du mouvement du sol à la structure.

Cette série d'échanges a été organisée autour d'un séminaire qui s'est tenu le 15 décembre 2021. Il a réuni 24 chercheurs issus de l'unité de recherche en environnement et de l'unité de recherche en sûreté de l'IRSN et de 10 unités de recherche du CNRS.

## 2. Structuration et contenu des échanges

Les échanges ont pu s'appuyer sur le long historique de collaboration entre l'IRSN et le CNRS sur la thématique. Celui-ci a notamment pris la forme :

- de co-encadrements de stages de masters, de thèses et de post-docs ;
- de projets communs de recherche portant sur l'acquisition/amélioration des techniques et des connaissances dans le domaine de l'évaluation du risque sismique (i.e. ANR, TelluS<sup>26</sup>) ;
- d'actions coanimées sur la sismicité de la France Métropolitaine dans le cadre du consortium Résif,
- de travaux menés à l'étranger dans des zones dont la sismicité est favorable au développement de nouvelles approches méthodologiques.

Au fil des échanges, l'Infrastructure de Recherche Résif a été reconnue comme le cadre privilégié d'échange entre les chercheurs issus du monde académique et ceux appartenant aux instituts de recherche appliquée comme

<sup>25</sup> Résif : Réseau sismologique et géodésique français : l'INSU coordonne le consortium Résif-Epos. Composé de la majorité des universités et organismes français concernés par la recherche en Géosciences, c'est une infrastructure de recherche nationale dédiée à l'observation des mouvements telluriques. Les actions au sein de Résif se structurent autour de Résif-RAP (Réseau Accélérométrique Permanent) et des Axes Transverses Sismicité (ATS).

<sup>26</sup> TelluS est le grand programme du domaine Terre Solide du CNRS-INSU. Son objectif principal est de faire un effet de levier à des nouveaux projets leur permettant ainsi d'accéder à de plus gros financements auprès de l'ANR ou de l'Europe (H2020, ERC) mais aussi encourager des actions interdisciplinaires et inter-organismes.

l'IRSN. Elle apparaît comme un lieu adapté pour mener un travail conjoint d'acquisition et/ou d'amélioration des connaissances nécessaires à l'évaluation de l'aléa sismique en France.

Le programme IRiMa<sup>27</sup>, soumis en décembre 2021 dans le cadre de l'appel PEPR exploratoire du PIA4 et en cours d'évaluation à la date de rédaction de la présente note, a été également identifié comme un instrument particulièrement favorable pour le développement de collaborations entre l'IRSN et le CNRS sur la thématique du risque sismique.

A partir de ce large domaine de collaborations actives, les discussions menées dans le contexte de l'élaboration de la feuille de route IRSN-CNRS se sont progressivement resserrées autour de quatre initiatives et travaux en cours ou en projet :

- la mise à jour de l'aléa sismique de la France métropolitaine pilotée par Résif,
- les études couplées autour du séisme du Teil en Ardèche (failles, mouvements sismiques),
- l'étude de l'impact du site sur le signal sismique dans des contextes géologiques complexes (projet ANR-DARE<sup>28</sup>) ;
- l'élaboration d'une méthodologie visant à établir des relations entre mouvements sismiques et la vulnérabilité de bâtiments (projet ANR-ACROSS<sup>29</sup>).

Ces initiatives et travaux ont conduit à proposer les domaines prioritaires de collaboration développés ci-après.

### a) Évaluation de l'aléa sismique – France Métropolitaine

Dans le cadre de l'Action Transverse Sismicité Résif, et en réponse à une sollicitation du Ministère de la Transition Ecologique (MTE-DGPR), une feuille de route a été établie en vue de produire un calcul d'aléa sismique probabiliste de la France Métropolitaine à l'échéance 2025-2026. Un des objectifs majeurs de ce projet est de mobiliser les meilleures connaissances scientifiques détenues par la communauté des spécialistes de l'aléa sismique (CNRS, IRSN, universités, autres instituts labélisés Résif) pour établir les modèles destinés à servir de référence pour estimer le risque sismique à l'échelle nationale et européenne. Il s'agit notamment de définir un nouveau zonage sismotectonique intégrant les taux de déformations issus des données géodésiques, les connaissances sur les failles potentiellement actives et les catalogues de sismicité instrumentale et historique de référence.

L'initiative engagée par le MTE nécessitera la réalisation de travaux spécifiques destinés par exemple à adapter les modèles généraux de prédiction du mouvement sismique au contexte particulier de la France Métropolitaine. Ces travaux spécifiques auxquels l'IRSN et le CNRS contribueront conjointement seront réalisées courant 2022-2025 en amont de la production du modèle d'aléa probabiliste visé *in fine*. Elle permettra de lever des verrous scientifiques et de produire des bases de données robustes et partagées pour l'évaluation de l'aléa. Elle permettra également d'opérer un rapprochement et une mise en commun des compétences détenues par la communauté académique d'un côté, et les organismes publics de recherche finalisée de l'autre, au profit des autorités publiques. Au travers de leur partenariat, l'IRSN et le CNRS ont l'ambition de jouer un rôle moteur dans ce rapprochement dont toute la société a vocation à bénéficier.

<sup>27</sup> Le PEPR exploratoire IRiMa a pour objectif de formaliser une « science du risque » pour contribuer à l'élaboration d'une nouvelle stratégie de gestion des risques et des catastrophes et leurs impacts dans le contexte de changements globaux, anthropiques et climatiques. Son pilotage est assuré par le CNRS, le BRGM et l'Université de Grenoble Alpes. L'IRSN en est partenaire.

<sup>28</sup> DARE : Projet DARE : Utilisation de réseaux sismiques denses pour l'estimation des effets de site en zone de sismicité faible à modérée – Application au paléo-canyon Messinien du Rhône. Le coordinateur du projet est l'IRSN. L'University of Potsdam, le German Research Centre for Geosciences, l'institut des sciences de la Terre sont partenaires du projet.

<sup>29</sup> ACROSS : ArChaeology, inventory of RecOnstruction, Seismology and Structural - Définition d'une stratégie pour caractériser le mouvement sismique basée sur l'archéologie, l'identification des reconstructions, la sismologie et l'ingénierie des structures. Le coordinateur du projet est l'IRSN. L'Istituto Nazionale Geofisica e Vulcanologia / Sezione di Bologna, le laboratoire d'Archéologie et philologie d'Orient et d'Occident, le Laboratoire de Mécanique et Technologie, l'Università di Siena / Dipartimento Scienze storiche e dei beni culturali, le Laboratoire de Mécanique des Sols, Structures et Matériaux, le Laboratoire de géologie de l'Ecole Normale Supérieure, le Cerema Mouvements Gravitaires et Sismiques dans les sols, les roches et les structures, le Consiglio Nazionale delle Ricerche / Istituto per la Conservazione e la Valorizzazione dei Beni Culturali, le Consiglio Nazionale delle Ricerche / Laboratorio di Modellizzazione Tettonica sont partenaires du projet.

## b) Étude des failles actives

La caractérisation des failles actives est un des enjeux majeurs pour avancer dans la connaissance des processus de déformation et pour développer les modèles d'aléa sismique. Dans le cadre de leur partenariat, le CNRS et l'IRSN se proposent de développer les méthodologies d'étude des failles, à collecter les données pertinentes et à les mettre en forme pour intégrer les failles actives dans les études d'aléa sismique (mouvement vibratoire et rupture de surface) et dans les modélisations géodynamiques.

Les enjeux majeurs dans ce domaine sont l'identification des failles capables de produire de la sismicité et de rompre la surface, la mise en évidence et la datation des marqueurs de la déformation, la quantification de la récurrence des séismes majeurs. Vis-à-vis de ces enjeux, l'IRSN et le CNRS reconnaissent l'intérêt de mener des travaux dans les zones européennes à forte déformation, focalisés sur les systèmes de failles responsables de séismes historiques. L'étude de ces systèmes permettent en effet, d'une part de disposer d'informations paléosismologiques nécessaires à la localisation de la faille-source et à la détermination du mode de rupture et du fonctionnement sismotectonique, d'autre part d'exploiter des données géodésiques (InSAR, GPS) fournissant des données de déformation (e.g. Apennin Central, Croatie).

En France, les actions menées au sein de l'axe Failles ACTives France de Résif (FACT) et l'occurrence du séisme du Teil ont mobilisé la communauté scientifique autour de la question de l'activité des failles en France et des moyens à mettre en œuvre pour leur caractérisation, en particulier par des approches géologiques (morphotectonique, paléosismologie). Le CNRS et l'IRSN jugent pour cela nécessaire de développer des études permettant de préciser et compléter les données existantes qui apparaissent largement incomplètes. Un enjeu important est le choix des marqueurs pertinents pour l'étude des failles, notamment en termes de marqueurs morphologiques et stratigraphiques, ainsi que la période de retour entre deux séismes. En termes de cibles, les chantiers prioritaires sont bien identifiés (e.g. Région sud-est, Fossé rhénan, Alpes, Massif armoricain) (Ritz et al., 2021).

Enfin, un effort important est encore jugé utile pour progresser dans l'évaluation du risque de déplacement à la surface du sol lors de séisme (« *Fault Displacement Hazard Analysis* »). Il est pour cela nécessaire de poursuivre le développement de la base de données des ruptures de surface, d'explorer l'utilisation des données de l'imagerie satellitaire ou optique pour caractériser la déformation co-sismique de manière complémentaire aux mesures de terrain. Les efforts de modélisation des ruptures de surface sont également l'occasion d'améliorer la compréhension et la prise en compte des observations de terrain dans le calcul d'aléa, notamment pour la déformation « off-fault » associée à une rupture de surface.

## c) Modélisation du mouvement sismique

Concernant la modélisation du mouvement sismique, les propositions de collaboration concernent d'une part, la modélisation de la physique de la rupture pour améliorer la description de la source sismique, d'autre part, la construction d'un modèle statistique de prédiction du mouvement sismique adapté à la France métropolitaine.

La modélisation de la physique de la rupture implique de se placer à l'interface entre différentes thématiques (failles, mouvement, effet de site, aléa). Elle conduit à relier les observations (rupture de surface, déformations, mouvements sismiques) à des modèles de séismes sous contrôle de nombreuses connaissances amont (géologie locale, modèle géophysique de site, processus physiques). De tels modèles sont aujourd'hui essentiels pour lever de nombreux verrous sur lesquels travaillent les équipes du CNRS et de l'IRSN, depuis la caractérisation des processus sismologiques fondamentaux jusqu'à l'aléa sismique sur site. Pour ne parler que du mouvement sismique, les modélisations apparaissent comme le meilleur moyen de palier le nombre insuffisant de mesures au voisinage immédiat de la faille, là où les mouvements sont les plus forts, et aujourd'hui encore les moins bien connus.

Pour cette raison, les collaborations envisagées privilégient, d'une part l'amélioration continue des modèles au travers d'une confrontation des prédictions des mouvements sismiques large-bande avec les observations disponibles, d'autre part l'étude des caractéristiques du mouvement sismique en champ proche.

Les collaborations dans ce domaine se concrétisent déjà par l'encadrement en commun de stages de Master, de thèses, postdoc, soutenus financièrement par des projets ANR (DISRUPT<sup>30</sup>, EQ-TIME<sup>31</sup>, ACROSS) et par la mobilisation des moyens de calcul intensif du CNRS. Elles concernent la modélisation intégrée du mouvement sismique depuis sa source jusqu'au site d'intérêt.

Le séisme du Teil constitue, pour ces collaborations, un champ d'étude d'un intérêt particulier. Pour ce séisme, les simulations numériques tenant compte de la physique de la rupture de la faille et de l'estimation des effets de site pourront ainsi servir à estimer les mouvements sismiques en champ proche. Elles pourront être complétées par des analyses de sensibilité destinées à évaluer les paramètres qui contrôlent le mouvement sismique au premier ordre. Pour le champ lointain, la modélisation permettra d'étudier l'influence du contraste de propriétés mécaniques des couches sédimentaires sur l'atténuation des ondes à différentes fréquences et d'améliorer l'interprétation des enregistrements du séisme.

#### **d) Estimation des effets de site**

Les collaborations envisagées par l'IRSN et le CNRS s'articulent autour des méthodes de caractérisation des sites dans des contextes géologiques complexes (e.g., vallée glaciaire, canyon messinien, vallée profonde, sites avec forte variabilité spatiale/temporelle des propriétés du sol) et de l'estimation de leur réponse sismique. Les principales questions associées concernent la détermination des propriétés des formations géologiques (propriétés géométriques, mécaniques), la modélisation de la propagation des ondes en tenant compte de la variabilité spatiale et temporelle du mouvement sismique et à la prédiction de la réponse sismique en tenant compte des incertitudes.

Pour cela, l'acquisition de données (bruit de fond, séisme), la mise en œuvre de simulations numériques et les études méthodologiques constituent des approches nécessaires pour améliorer l'estimation des effets de site. Un défi particulier concerne le contexte de sismicité faible à modérée de la France Métropolitaine. A cet égard, des études dans des contextes de sismicité plus actifs sont utiles pour évaluer les méthodes d'estimation des effets de site. De plus, il est possible d'étudier la variabilité de la réponse d'un site en fonction de la nature du sol et de l'amplitude du mouvement incident dans ces contextes de sismicité plus actifs.

Dans le cadre de la collaboration entre l'IRSN et le CNRS, il est proposé d'explorer différentes approches en termes de méthodes de mesure et de calcul des effets de site. Compte tenu de l'importance de ces effets pour l'estimation du mouvement sismique et de l'aléa sismique, l'objectif est de mettre en œuvre ces approches sur des sites d'intérêt commun, notamment en France Métropolitaine. La collaboration pourra, par exemple s'appuyer sur les travaux débutés dans le cadre du projet Tellus FremTeil dont l'objectif est d'améliorer l'estimation des effets de site dans la région du Teil et plus généralement la prédiction du mouvement sismique (voir partie modélisation du mouvement sismique). Le partenariat CNRS-IRSN offrira également l'opportunité de tester différentes méthodes d'acquisition de données (e.g., mesure acoustique distribuée (DAS), réseau dense). Il pourra pour cela s'appuyer sur les travaux réalisés dans le cadre du projet ANR DARE en cours dans l'objectif de mieux caractériser le canyon messinien du Rhône dans le secteur de Tricastin ainsi que sa réponse sismique. Enfin, la collaboration pourra permettre de mettre à profit les moyens de calcul intensif (HPC) du CNRS pour obtenir des prédictions du mouvement du sol basées sur des modèles réalistes du contexte géologique local et l'exploration des incertitudes. A terme, ces études ont vocation à alimenter l'estimation du mouvement sismique et de l'aléa sismique.

<sup>30</sup> DISRUPT : Déformation et ruptures sismiques de surface: Observation et Modèles. Le coordinateur du projet est l'Institut de physique du Globe. Le Laboratoire en sciences et technologies de l'information géographique, l'IRSN, le GEC (géosciences et environnement Cergy) sont partenaires du projet.

<sup>31</sup> EQ-TIME : Quantifying the temporal and spatial slip variability in the earthquake cycle spanning months to million years timescales. Le Centre National de la Recherche Scientifique Provence et Corse est coordinateur du projet. L'Istituto nazionale di oceanografia e di geofisica sperimentale, le laboratoire Géoscience Montpellier, l'Università degli studi « G. D'Annunzio » Chieti-Pescara, l'IRSN, l'Institut des Sciences de la Terre sont partenaires du projet.

### e) Impact du mouvement du sol sur la réponse de la structure.

Les travaux conduits jusqu'à présent visent à évaluer les corrélations entre le mouvement sismique et la vulnérabilité de la structure. Leurs résultats ont mis en évidence l'influence importante du modèle de structure, des conditions d'interface sol/fondation et des caractéristiques du signal sismique. Or, disposer d'une meilleure caractérisation des conditions d'interface entre le sol et la structure étudiée ainsi que d'un modèle de structure réaliste demande l'acquisition de données *in situ* et la mise au point de méthodes de calcul intégrant ces données. Pour cela, les échanges ont conduit à identifier trois axes de travail.

Le premier consiste en la mise en œuvre d'un dispositif expérimental *in situ* pour caractériser les fonctions d'impédance de sols sous séisme. Son intérêt est de disposer de données expérimentales de référence auxquelles confronter les méthodes de description de l'interface entre le sol et la structure. Il pourra s'appuyer sur les travaux débutés au travers de la thèse de J. Clément, co-encadrée par l'IRSN et l'ENSTA/CNRS.

Le second vise à améliorer les stratégies de calibration des modèles structuraux (paramètres mécaniques et géométriques) notamment au travers de techniques de mesure et d'analyse de la vibration ambiante dans un bâtiment pour la reconstruction de sa base modale. Cette information est utilisée pour la construction de la maquette numérique jumelle du bâtiment étudié, un élément fondamental pour le développement du troisième axe qui porte sur les études de corrélation sol – fondation- structure qui seront conduites dans le but d'identifier les mouvements induisant des désordres structuraux.

Les deux derniers pourront s'appuyer sur les travaux conduits dans le projet ANR-ACROSS. Piloté par l'IRSN avec la participation du CNRS et du CEREMA, ce projet a pour objet la définition d'une stratégie pour caractériser le mouvement sismique basée sur l'archéologie, l'identification des reconstructions, la sismologie et l'ingénierie des structures.

## 3. Programme du séminaire

Date : mercredi 15 décembre 2021

Lieu : format distanciel (TEAMS)

Participants :

*Jean-François Ritz (Géosciences Montpellier ; UMR 5243, CNRS/INSU), Stéphane Baize (IRSN ; SCAN/BERSSIN, unité de recherche environnement), Jean-Paul Ampuero (IRD, GéoAzur ; UMR 7329, CNRS/INSU), Sébastien Hok (IRSN ; SCAN/BERSSIN, unité de recherche environnement), Fabian Bonilla (IPGP, équipe sismologie ; UMR 7154, CNRS/INSU), Céline Gélis (IRSN ; SCAN/BERSSIN, unité de recherche environnement), Jean François Semblat (ENSTA Paris Tech ; IMSIA, UMR 9219, CNRS/INSIS), Diego Mercerat (CEREMA, équipe de recherche REPSODY), Maria Lancieri (IRSN ; SCAN/BERSSIN, unité de recherche environnement), Benjamin Richard (IRSN ; SES/LMAPS, unité de recherche en sûreté), Stéphane Mazzotti (Géosciences Montpellier ; UMR 5243, CNRS/INSU), Céline Beauval (IRD, ISTERre ; UMR 5275, CNRS/INSU), Hervé Jomard (IRSN ; SCAN/BERSSIN, unité de recherche environnement), Yann Klinger (IPGP, équipe Tectonique et mécanique de la lithosphère ; UMR 7154, CNRS/INSU), Magali Rizza (CEREGE ; UMR 7330, CNRS/INSU), Christophe Larroque (GeoAzur ; UMR 7329, CNRS/INSU), Lucilia Benedetti (CEREGE ; UMR 7330, CNRS/INSU), Mathieu Causse (ISTERre ; UMR 5275, CNRS/INSU), Philippe Gueguen (ISTERre ; UMR 5275, CNRS/INSU), Cedric Giry (ENS Paris-Saclay, LMT ; UMR 8535, CNRS/INSIS), Julie Renier (CEREMA, équipe de recherche REPSODY), Nathalie Glinsky (CEREMA, équipe de recherche REPSODY), Luca Lenti (CEREMA, équipe de recherche REPSODY), Pierre Antoine (LGP ; UMR 8591, CNRS/INSU)*

<p><b>Introduction : objectifs et approche – 9h00-9h15</b> François Besnus (IRSN, unité de recherche environnement), Stéphane Guillot (CNRS/INSU)</p>
<p><b>Thématique Failles – 9h15-10h00</b> Jean-François Ritz (Géosciences Montpellier ; UMR 5243, CNRS/INSU) Stéphane Baize (IRSN ; SCAN/BERSSIN, unité de recherche environnement)</p>
<p><b>Thématique Modélisation du mouvement sismique – 10h00-10h45</b> Jean-Paul Ampuero (IRD, GéoAzur ; UMR 7329, CNRS/INSU) Sébastien Hok (IRSN ; SCAN/BERSSIN, unité de recherche environnement)</p>
<p><b>Pause : 10h45 – 11h00</b></p>
<p><b>Thématique Effets de site – 11h00-11h45</b> Fabian Bonilla (IPGP, équipe sismologie ; UMR 7154, CNRS/INSU) Céline Gélis (IRSN ; SCAN/BERSSIN, unité de recherche environnement)</p>
<p><b>Thématique Mouvement - vulnérabilité des structures – 12h45-13h30</b> Jean François Semblat (ENSTA Paris Tech ; IMSIA, UMR 9219, CNRS/INSIS), Diego Mercerat (CEREMA, équipe de recherche REPSODY), Maria Lancieri (IRSN ; SCAN/BERSSIN, unité de recherche environnement) Benjamin Richard (IRSN ; SES/LMAPS, unité de recherche en sûreté)</p>
<p><b>Thématique Aléas – 13h30-14h15</b> Stéphane Mazzotti (Géosciences Montpellier ; UMR 5243, CNRS/INSU) Céline Beauval (IRD, Isterre ; UMR 5275, CNRS/INSU) Hervé Jomard (IRSN ; SCAN/BERSSIN, unité de recherche environnement)</p>
<p><b>Discussion Générale – 14h15-14h45</b></p>
<p><b>Synthèse et conclusions – 14h45-15h00</b> François Besnus (IRSN, unité de recherche environnement), Stéphane Guillot (CNRS/INSU)</p>
<p><b>Conclusion : 16h40 -17h00</b></p>

# Thématique « recherches transverses in-situ et effets de la radioactivité sur l'environnement »

*Pilotes : Dominique Joly (CNRS/INEE), Didier Gay (IRSN/Direction de la Stratégie)*

## 1. Introduction

Un séminaire en lien avec cet atelier s'est tenu le 13 septembre 2021. Il était organisé en trois sessions qui ont permis d'aborder successivement :

- les effets des rayonnements ionisants sur les écosystèmes ;
- les conséquences des changements globaux sur le piégeage et la remobilisation de contaminants et l'apport des analogues naturels pour étudier les mécanismes évolutifs ;
- la dimension sociétale des recherches sur l'environnement.

Il a réuni une soixantaine de chercheurs et a conduit à mettre en contact une quinzaine d'unités du CNRS avec les équipes de l'IRSN menant des recherches sur le devenir des pollutions de sites radioactifs, en radioécologie et dans le domaine des SHS ainsi que celles en charge de la surveillance de l'environnement.

Le programme détaillé, la liste des participants ainsi que le support des interventions sont disponibles sur le site <https://indico.in2p3.fr/event/24651>.

## 2. Structuration et contenu des échanges

Dans le domaine des effets des radionucléides sur les écosystèmes, les présentations et les échanges ont conduit à souligner l'existence de collaborations actives qui se sont notamment concrétisées par le dépôt de plusieurs propositions aux derniers appels à projets génériques de l'ANR (projet Meetfrog et Irrasoil). L'ampleur des enjeux et la complexité des verrous scientifiques à lever pour comprendre les mécanismes de toxicité induits par l'exposition prolongée à de faibles doses de radioactivité justifient de mutualiser les forces et de renforcer et intensifier ces collaborations.

Les observations de terrain et les expérimentations en laboratoire, associées au recours aux méthodes omiques ont d'ores et déjà permis de mettre en évidence l'existence d'effets multi- et trans-générationnels, le rôle des mécanismes épigénétiques et l'influence des processus d'adaptation. L'extrapolation des connaissances acquises à la réalité et à la complexité du terrain constitue néanmoins un défi important qui nécessite un travail spécifique sur la représentativité des espèces de laboratoire par rapport aux espèces sauvages, l'influence in situ des facteurs confondants ou encore la sélection et la caractérisation des sites et données « témoins » ou « contrôles ».

Le partenariat IRSN-CNRS offre de réels atouts pour lever ces verrous en permettant la mise en œuvre des outils et méthodes les plus avancés dans le domaine de l'écologie. **Le recours aux outils d'analyse des données omiques tels que DRomics est considéré comme une des pistes intéressantes à explorer. Le croisement des réponses épigénétiques observées par les équipes du CNRS et de l'IRSN, respectivement sur les espèces cavernicoles et les grenouilles vivant dans les territoires contaminés autour de Tchernobyl et Fukushima, apparait également comme une action à encourager.**

Sur la deuxième thématique, les collaborations en cours portent, d'une part, sur l'étude de l'origine et de la mobilité de l'uranium et des éléments qui lui sont associés dans le contexte de l'exploitation minière, d'autre part, sur le piégeage de la radioactivité dans les sédiments des fleuves nucléarisés. La ZATU et l'OSR constituent des cadres privilégiés pour ces travaux. **La notion d'analogue naturel est apparue comme un élément potentiellement structurant pour aborder le fonctionnement des systèmes hydrologiques et hydrogéologique et le comportement des éléments d'intérêt aux différentes échelles spatiales et temporelles.**

Les thématiques abordées au cours des deux premières sessions ont par ailleurs fait apparaître **l'intérêt de renforcer les collaborations dans le domaine de l'instrumentation et des capteurs et dans le domaine de la prise en compte du changement climatique.**

Le développement de techniques de mesures haute fréquence et *in situ* à l'aide de capteurs connectés constitue un besoin fort pour l'IRSN, à la fois pour le suivi hydrogéochimique de sites et pour l'observation écologique. Ce besoin rejoint le développement des concepts d'observatoire intelligent ou d'écosystème connecté portés par le CNRS dans le cadre des projets TerraForma et eConnect.

Le changement climatique apparaît également comme un domaine transverse susceptible de jouer un rôle structurant pour le partenariat entre l'IRSN et le CNRS. Il constitue en effet un déterminant important pour le contrôle des cycles biogéochimiques et ses effets peuvent être étudiés *via* le décryptage des « archives de la Terre », ce qui renvoie au concept d'analogie naturelle. Le changement climatique détermine aussi les conditions environnementales dans lesquelles les écosystèmes évoluent et nécessite de ce fait d'être pris en compte pour étudier et prédire leur réponse à des pressions supplémentaires telles qu'une exposition à la radioactivité.

En complément de l'intérêt manifesté pour l'instrumentation et le changement climatique, les échanges montrent l'utilité de réfléchir plus en détail à la complémentarité et à l'articulation entre les différents types d'infrastructures et d'expérimentation : laboratoire, zones ateliers, observatoires... **L'apport des mésocosmes, en tant que maillon intermédiaire entre expérimentation en labo et observation in situ, ainsi que les spécificités des laboratoires de l'IRSN compte tenu de leur aptitude à manipuler de la radioactivité ont été identifiés comme des sujets de discussion à approfondir.** Les liens possibles entre l'infrastructure de recherche expérimentale pan-Européenne AnaEE et le futur partenariat en radioprotection Pianoforte pourront être explorés dans ce cadre.

La troisième session a montré un intérêt partagé pour renforcer la prise en compte du volet sociétal et mobiliser plus directement les compétences en sciences humaines et sociales. **Une des pistes identifiées consiste à étudier les modalités de déclinaison du concept de services éco-systémiques dans le cadre de l'évaluation de territoires contaminés.** La réflexion pourra être étendue à la notion de socio-écosystèmes et au développement de modèles SES croisant les connaissances scientifiques et l'analyse SHS pour en prédire la trajectoire.

### 3. Programme du séminaire

Date : lundi 13 septembre 2021

Lieu : format distanciel (TEAMS)

Participants :

*Alain Brunisso (IRSN ; Direction de la stratégie), Alexandru Milcu (CNRS ; Ecotron Européen de Montpellier), Alkiviadis Gourgiotis (IRSN ; SEDRE/LELI, unité de recherche environnement), Arnaud Elger (Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement, UMR 5245, CNRS/INEE), Arnaud Mangeret (IRSN ; SEDRE/LELI, unité de recherche environnement), Beatrice Gagnaire (IRSN ; SRTE/LECO, unité de recherche environnement), Catherine Leblanc (Laboratoire de Biologie Intégrative des Modèles Marins, UMR 8227, CNRS/INEE), Catherine Lecomte (IRSN ; unité de recherche environnement), Charlotte Cazala (IRSN ; SEDRE/LELI, unité de recherche environnement), Christian Lubat (Beeguard ; projet ECONNECT), Christophe Debayle (IRSN ; SEDRE, unité de recherche environnement), Christophe Douady (Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés, UMR 5023, CNRS/INEE), Claire Sergeant (LP2I de Bordeaux ; UMR 5797, CNRS/IN2P3), Clément Car (IRSN ; SRTE/LECO, unité de recherche environnement), David Biron (UCA, LMGE, UMR 6023 ; Zone Atelier Territoires Uranifères, CNRS/INEE), Didier Gay (IRSN ; Direction de la stratégie), Dominique Joly (CNRS/INEE), Fanny Farget (CNRS/IN2P3), Fanny Greullet (UNISTRA), Franck Gilbert (Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement, UMR 5245, CNRS/INEE), François Paquet (IRSN ; SRTE, unité de recherche environnement), François Jeffroy (IRSN ; SHOT/LSHS, unité de recherche en sûreté), Frédéric Coppin (IRSN ; SRTE/LR2T, unité de recherche environnement), Frédérique Eyrolle (IRSN ;*

SRTE/LRTA, unité de recherche environnement), Février Laureline (IRSN ; SRTE/LR2T, unité de recherche environnement), Gael Le Roux (Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement, UMR 5245, CNRS/INEE), Gilles Montavon (Subatech, UMR 6457, CNRS/IN2P3), Gregory Mathieu (IRSN ; SEREN/LEREN, unité de recherche environnement), Hugo Delile (Archéorient, UMR 5133, CNRS/INSHS), Jean-Marc Bonzom (IRSN ; SRTE/LECO, unité de recherche environnement), Jon Marco Church (HABITER-ICMR, Zone Atelier Argonne, CNRS/INEE), Josselin Gorny (IRSN ; SEDRE/LELI, unité de recherche environnement), Jérôme Guillevic (IRSN ; SEREN, unité de recherche environnement), Patrick Laloi (IRSN ; SRTE/LECO, unité de recherche environnement), Laurent Audouin (IRSN ; Service de soutien aux Plateformes scientifiques et techniques, pôle patrimoine et territoire), Lionel Saey (IRSN ; SEREN/LEREN, unité de recherche environnement), Loïc Quevarec (IRSN ; SRTE/LECO, unité de recherche environnement), Luc Camoin (Marseille Protéomique - Centre de Recherche en Cancérologie de Marseille, UMR 7258, CNRS/INSB), Maria Boltoeva (IPHC, UMR 7178, CNRS/IN2P3), Maria Rosa Beccia (Institut de Chimie de Nice, UMR 7272, CNRS/INC), Marie Simon-Cornu (IRSN ; SEREN, unité de recherche environnement), Marie Laure Delignette-Muller (Laboratoire de Biométrie et Biologie Evolutive, UMR 5558, CNRS/INEE), Mathieu Giraudeau (LIENSs, UMRi 7266, INEE, INSU, INSHS), Mathieu Le Coz (IRSN ; SEDRE/LELI, unité de recherche environnement), Mathieu Lihoreau (Centre de Recherche sur la Cognition Animale, UMR 51,69, CNRS/INEE), Mathilde Zebracki (IRSN ; SEDRE/LELI, unité de recherche environnement), Mirella Del Nero (IPHC, UMR 7178, CNRS/IN2P3), Nathanaëlle Saclier (ISEM, UMR 5554, CNRS/INEE), Olivier Armant (IRSN ; SRTE/LECO, unité de recherche environnement), Olivier Courson (IPHC, UMR 7178, CNRS/IN2P3), Olivier Radakovitch (IRSN ; SRTE/LRTA, unité de recherche environnement), Olivier Simon (IRSN ; SRTE/LECO, unité de recherche environnement), Pascale Henner (IRSN ; SRTE/LR2T, unité de recherche environnement), Patrice Gonzalez (EPOC), Pauline Mejean (Géosciences Environnement Toulouse, UMR 5563, Observatoire Midi-Pyrénées, CNRS/INSU), Philippe Volant (IRSN ; Direction des affaires européennes et internationales), Rodolphe Gilbin (IRSN ; SRTE, unité de recherche environnement), Samuel Abiven (CEREEP - Ecotron Ile-de-France, UMS 3194, ENS Géologie, CNRS/INEE), Sandrine Frelon (IRSN ; SRTE/LECO, unité de recherche environnement), Sofia Kolovi (Laboratoire de Physique de Clermont, UMR 6533, CNRS/IN2P3), Sophie Beauquier (IRSN ; SEDDER, unité de recherche environnement), Stephan Hättenschwiler (Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, UMR 5175, CNRS/INEE), Sylvia Becerra (Géosciences Environnement Toulouse, UMR 5563, CNRS/INSU), Sylvie Huet (INRAE, Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Complexes), Thierry Bourgois (IRSN ; Direction de la stratégie), Thomas Zambardi (OMP - LEGOS – LAFARA, UMR 5566, Observatoire Midi-Pyrénées, CNRS/INSU), Tristan Lefebure (Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés, UMR 5023, CNRS/INEE), Téléphore Sime-Ngando (LMGE, UMR 6023, CNRS/INEE)

<b>Introduction</b> Dominique Joly (CNRS/INEE) et Didier Gay (IRSN/Direction de la stratégie)
<b>Prospectives issues du programme NEEDS Environnement</b> Gael Leroux (CIRCE) et Olivier Radakovitch (IRSN ; SRTE/LRTA, UR environnement)
<b>Effets des rayonnements ionisants sur les écosystèmes</b> Catherine Lecomte (IRSN ; UR environnement) et Tristan Lefebure (LEHNA)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Approche intégrée pour la caractérisation in situ des conséquences écologiques de la radio-contamination de l'environnement.</b> Patrick Laloi (IRSN ; SRTE/LECO, UR environnement)</li> <li>• <b>Utilisation de capteurs connectés pour le suivi in situ d'espèces sentinelles.</b> Arnaud Elger (Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement)</li> <li>• <b>BEERAD : évaluation des effets des rayonnements ionisants sur les abeilles.</b> Béatrice Gagnaire (IRSN ; SRTE/LECO, UR environnement)</li> <li>• <b>IRRASOL : Impacts des rayonnements ionisants, dans le contexte des changements climatiques, sur la biodiversité du sol et les processus fonctionnels associés.</b> Stephan Hättenschwiler (CEFE), Franck Gilbert (LEFE), Jean Marc Bonzom (IRSN ; SRTE/LECO, UR environnement)</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Etude multi-échelle des effets chroniques d'une radio-contamination de l'environnement sur la faune sauvage : cas de la rainette arboricole à Fukushima (Japon) et Tchernobyl (Ukraine).</b> Marie Laure Delignette (LBBE)</li> <li>• <b>Effet à long terme de la radioactivité naturelle sur l'évolution du vivant.</b> Nathanaëlle Saclier (ISEM)</li> </ul>
<p><b>Piégeage, remobilisation et changements globaux et analogues naturels</b></p> <p>Franck Gilbert (Laboratoire écologie fonctionnelle et environnement) et Charlotte Cazala (IRSN ; SEDRE/LELI, UR environnement)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Comment appréhender les changements environnementaux dans les modèles prédictifs : comportements des RNs et de leurs analogues isotopiques endogènes.</b> Laureline Février, Frédéric Coppin (IRSN ; SRTE/LR2T, UR environnement), Arnaud Martin-Garin (IRSN ; SRTE, UR environnement)</li> <li>• <b>La tranchée T22 de Tchernobyl : étude in-situ de l'influence de la variabilité climatique et de l'évolution de l'occupation du sol sur la migration des radionucléides.</b> Mathieu Le Coz, Charlotte Cazala (IRSN ; SEDRE/LELI, UR environnement)</li> <li>• <b>Origine et devenir des stocks particuliers de contaminants hérités dans le continuum Rhône-Méditerranée.</b> Hugo Delile (Laboratoire Archéorient)</li> <li>• <b>La Zone Atelier Territoires Uranifères : un programme de recherche pluridisciplinaire autour du site instrumenté de Rophin pour évaluer le comportement et les effets des « NOR » (« Naturally-Occurring Radionuclides »).</b> Gilles Montavon (Subatech)</li> <li>• <b>Présentation du Projet "C4-PON": Establishment of a Cross-border Competence Center for the Characterization of (micro) Pollutants and their (in)organic Nanovectors around decommissioning sites.</b> Mireille Del Nero (IPHC)</li> <li>• <b>Les analogues naturels au service de problématiques impliquant de grandes échelles de temps : exemple de la gestion des déchets radioactifs.</b> Alkiviadis Gourgiotis (IRSN ; SEDRE/LELI, UR environnement)</li> <li>• <b>Simuler les écosystèmes à grande échelle pour analyser les processus et interactions des changements globaux : les écotrons européens de Montpellier et d'Ile de France.</b> Samuel Abiven (ENS Géologie), Alexandru Milcu (Ecotron Européen de Montpellier)</li> </ul>
<p><b>Environnement et société</b></p> <p>David Biron (LMGE) et Rodolphe Gilbin (IRSN; SRTE, UR environnement)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Les SHS à la rencontre de la recherche et de l'expertise en environnement.</b> Rodolphe Gilbin (IRSN ; SRTE, UR environnement), François Jeffroy (RSN ; SRDS/SHOT/LSHS, UR sûreté)</li> <li>• <b>Les Etudes Radiologiques de Site : un moyen pour l'IRSN de renforcer l'utilité de sa surveillance de l'environnement.</b> Lionel Saey (IRSN; SEREN/LEREN, UR environnement)</li> <li>• <b>Risques versus ressources de la radioactivité naturelle sur les territoires à potentiel minier.</b> Sylvia Becerra (Géosciences Environnement Toulouse)</li> <li>• <b>Concept de socioécosystème et différentes approches et méthodes.</b> Jon Marco Church (HABITER-ICMR)</li> </ul>

# Thématique « nouvelles techniques nucléaires pour la santé »

*Pilotes : Sébastien Incerti (CNRS/IN2P3), Jean-Michel Bonnet (IRSN/Unité de recherche en Santé), Denis Dauvergne (CNRS/IN2P3, GDR Mi2B), Isabelle Clairand (IRSN/SDOS/Unité de recherche en Santé)*

## 1. Introduction

L'IRSN et le CNRS ont mené une réflexion commune sur le thème des « Nouvelles techniques nucléaires dans le domaine de la santé ». Ce thème rassemble un certain nombre de défis ambitieux à forte composante sociétale, depuis la compréhension des mécanismes fondamentaux d'interaction entre les rayonnements ionisants et la matière vivante jusqu'à la radioprotection, autour d'approches innovantes en imagerie médicale et en radiothérapie interne et externe.

La réflexion menée a pris place au sein de deux ateliers CNRS-IRSN rassemblant une soixantaine de participants et accessibles aux adresses : <https://indico.in2p3.fr/event/23651/> et <https://indico.in2p3.fr/event/24720/>

Les laboratoires ayant contribué à cette réflexion sont les suivants :

- Pour le CNRS : IN2P3 (CCPM, CENBG, GANIL, IJCLab, IP2I, IPHC, LLR, LPC, LPCC, LPSC, SUBATECH), INP (LOA), INSB (INCLIA), INS2I-INSIS (CREATIS).
- Pour l'IRSN : les équipes du SDOS/LMDN, SDOS/LDRI, SDOS/LEDI, SERAMED/LRMED, SERAMED/LRAcc, SESANE/LRSI, SESANE/LRTOX de l'unité de recherche en santé.

## 2. Structuration et contenu des échanges

La réflexion a permis d'identifier quatre axes de collaboration scientifique, s'appuyant sur des projets et collaborations existantes ou sur des intérêts communs autour de futures collaborations, et d'émettre plusieurs propositions pour leur investigation.

Les quatre axes de collaboration ainsi que les propositions relatives à chacun sont détaillés ci-après.

### a) Vers une approche globale multi échelle de la modélisation des effets des rayonnements ionisants sur le vivant

Le LDRI de l'unité de recherche en santé de l'IRSN et le CENBG du CNRS/IN2P3 contribuent depuis plus de 10 ans, dans le cadre d'une collaboration internationale, au développement de l'outil **Geant4-DNA** (<http://geant4-dna.org>). Les principaux axes de développements communs de Geant4-DNA entre les deux organismes prennent place aujourd'hui au sein du projet européen BioRad III financé par l'Agence Spatiale Européenne (2021-2023) et sont principalement dédiés à l'implémentation de modèles de réparation biologique, à l'intégration dans Geant4 des chaînes de simulation des dommages biologiques et à la livraison d'une bibliothèque multi-échelle de géométries de cibles biologiques.

Pour la suite immédiate de ces activités (2023-2026), les sujets identifiés qui intéressent l'IRSN et l'IN2P3 sont notamment la poursuite de l'intégration dans Geant4 des chaînes de simulation existantes avec en particulier une version consensuelle de la simulation de l'étape chimique (approche "IRT"), la poursuite du développement des modèles de réparation biologique, la contribution à la validation/vérification des simulations de la radiolyse auprès de plateformes d'irradiation complémentaires (protons, alphas, ions carbone...) et par comparaison à d'autres codes de calcul, et les validations des simulations avec des cellules présentant des différences en termes de concentration d'oxygène ou de pH.

Malgré des effectifs réduits, d'autres activités ont été également identifiées : l'inclusion de modèles biophysiques dans la plateforme de simulation Monte-Carlo **GATE** (Geant4 Application for Tomographic Emission) pour la hadronthérapie, la production de **données chimiques et biologiques** sur les plateformes du réseau RESPLANDIR

(Réseau des Plateformes Nationales d'Irradiation), les études autour des **nanoparticules**, la **BNCT** (Boron Neutron Capture Therapy) et les **dommages à la mitochondrie**.

Des actions conjointes à mettre en place pourraient ainsi concerner le développement et la validation de la chimie dans Geant4-DNA (thèse commune par exemple), la mise en place d'un plan de travail expérimental sur la radiolyse en lien avec RESPLANDIR et des réponses aux futurs AAP comme par ex. ceux de l'ANR ou de l'AVIESAN.

## **b) La radiobiologie, depuis l'échelle moléculaire jusqu'à la réponse tumorale et à la toxicité aux tissus sains**

Dans cet axe, quatre thématiques de collaborations ont été identifiées :

- **La hadronthérapie** : il existe un fort intérêt commun pour développer des projets de recherche en radiobiologie sur les effets biologiques spécifiques à la hadronthérapie (protons, ions carbone, etc.) par rapport à la radiothérapie conventionnelle et sur ceux des irradiations innovantes (Flash, minibeam, combinaisons de faisceaux). Plusieurs éléments constituent un frein au développement de ces recherches importantes (nécessité d'encourager l'implication des installations à l'échelle nationale en s'appuyant sur le réseau RESPLANDIR, besoin d'accompagnement auprès des plateformes, accessibilité du temps faisceau, coûts, irradiation de petits animaux, harmonisation des protocoles) et il est apparu nécessaire de renforcer les liens autour de la hadronthérapie au sein du réseau RESPLANDIR. Certaines plateformes semblent tout particulièrement adaptées pour y mener ces recherches : ARCHADE, Arronax, Cyncé, I. Curie, MIRCOM...
- **La radiothérapie interne vectorisée** : l'étude de la dosimétrie, de la bio-distribution, des effets biologiques et des risques associés constituent des sujets d'intérêt pour les deux organismes, idéalement en collaboration avec l'Inserm et d'autres équipes externes. Le GDR Mi2B, piloté par l'IN2P3 et l'INSB, pourrait intégrer les équipes de l'IRSN et ainsi aider à structurer les études menées en collaboration. La BNCT apparaît comme un sujet particulièrement intéressant.
- **Les thérapies combinées** : il s'agit essentiellement d'étudier les effets des radiosensibilisants (ex. nanoparticules Gd ou Au, nanotubes de C, ...). Le Labex PRIMES fournit un soutien fort aux équipes impliquées sur le sujet. Un des enjeux est la modélisation de la dose qui nécessite notamment des outils de simulation adaptés. Un renforcement des moyens humains apparaît cependant nécessaire.
- Enfin, **explorer le potentiel de la combinaison de l'imagerie et de la radiothérapie**, vers la prédiction de la réponse tumorale, la radiothérapie adaptative ou la prédiction de la radiotoxicité par la mise en œuvre d'études radiomiques.

De manière générale, il a été noté l'intérêt commun **d'améliorer les modèles prédictifs de réponse des tumeurs et des tissus sains** après des expositions en hadronthérapie/irradiations innovantes par des mesures biologiques multiples rendant compte de ces réponses, mais aussi par des modèles de simulation. L'IRSN est d'ailleurs déjà impliqué dans l'évaluation de l'EBR (Efficacité Biologique Relative) par des mesures de radiobiologie multiparamétriques.

Pour accompagner ces activités, l'intégration déjà forte du CNRS et des radiobiologistes de l'IRSN dans le réseau RESPLANDIR, créé dans le cadre du GDR Mi2B, facilite l'accès et les échanges scientifiques et techniques autour des plateformes d'irradiation. Ces échanges sont d'intérêt notamment pour homogénéiser les protocoles d'essais et faciliter ainsi la comparaison et l'utilisation croisée des résultats produits, cela constitue un vecteur important pour une collaboration fructueuse. Concernant les appels d'offres d'intérêt commun, les initiatives nationales (Radiotransnet) et européenne (Pianoforte) offriront certainement des opportunités futures à saisir.

### c) L'irradiation externe : depuis les nouvelles modalités d'irradiation jusqu'à l'imagerie et à la dosimétrie patient

Quatre thématiques d'intérêt ont été identifiées, les deux premières étant à prioriser :

- **Les neutrons en santé** : il est proposé de mettre en place un groupe de travail qui regrouperait les équipes du CNRS (LPSC, IPHC) et de l'IRSN (LMDN, LDRI) travaillant sur la BNCT (ANR commun déposé, thèse co-dirigée entre le LMDN et le LPSC démarrée en 2021), sur le développement d'instrumentation pour la métrologie des neutrons et la mesure des neutrons secondaires en radiothérapie (photons, protons, ions), notamment auprès de l'installation AMANDE.
- **Les microfaisceaux** : l'instrumentation pour le monitoring et la caractérisation du microfaisceau de l'installation MIRCOM de l'IRSN (LMDN) est une priorité. Une demande de thèse 80PRIME au CNRS est prévue en 2022 (LPSC, Institut Néel, LMDN) pour développer des détecteurs diamants amincis. Des travaux concernant la mise en œuvre sur MIRCOM du détecteur silicium 3D pour la radiobiologie développé par l'IJCLab sont également envisagés. Il serait en outre opportun d'élargir la collaboration sur cette thématique microfaisceau en y incluant la plate-forme AIFIRA (CENBG).
- **La dosimétrie en imagerie médicale X** : mesurer et calculer les doses délivrées aux organes durant un acte d'imagerie sous rayons X (scanographie au LPC, radiologie interventionnelle entre l'IPHC et le LDRI). Les implications au sein d'EURADOS permettront notamment de renforcer ces liens et les réponses aux AAP.
- **Les gels dosimétriques** : collaborer sur l'étude de gels permettant la mesure de la dose à la peau en RT mammaire (LDRI et IPHC).

### d) L'irradiation interne : de la production des radionucléides (RN) jusqu'à l'imagerie et à la dosimétrie patient

Sur cet axe, quatre thèmes collaboratifs ont été identifiés entre l'IN2P3 et l'IRSN :

- **La thérapie utilisant les particules de haut-TEL** : l'objectif est de comprendre la biodistribution des RN dans l'organisme et les effets de toxicité associés, en se focalisant sur les émetteurs alpha et Auger.
- **Le théranostic** : il s'agit ici de travailler à bâtir un « TPS » (Treatment Planning System) qui permettrait d'optimiser le traitement en anticipant l'impact sur les organes à risques et la réponse à la tumeur.
- **La radioprotection des travailleurs** : développer les outils nécessaires au calcul de dose en cas d'exposition accidentelle des travailleurs aux radiopharmaceutiques innovants et étudier les molécules permettant la décorporation en cas de contamination.
- **L'utilisation des plateformes** : augmenter l'accessibilité des plateformes.

Plusieurs priorités et actions ont été identifiées :

1. Développer les collaborations pour promouvoir le développement et la mise en œuvre de systèmes de planification de traitement (TPS) basés sur une optimisation de la dose absorbée estimée par simulation du transport des particules avec GATE et OEDIPE, à partir des images anatomiques et de fixation des patients.
2. Mettre en place un projet permettant de travailler sur la meilleure compréhension de la toxicité des émetteurs  $\alpha$ .
3. Contribuer au développement de nouveaux radiopharmaceutiques pour l'approche théranostique à travers la production de nouveaux radiopharmaceutiques pour le CNRS ou l'évaluation de leur toxicité aux organes sensibles pour l'IRSN (thèse pour laquelle un co-financement CNRS-IRSN sera sollicité).
4. Élaborer des méthodes de décorporation et des protocoles de prise en charge des personnes.

Plus généralement, il apparaît opportun de mettre en place un accord cadre pour l'accès aux plateformes RESPLANDIR / IRSN et aux moyens de calcul.

### 3. Programme du séminaire

Dates : le vendredi 2 juillet 2021 - 9h00-16h00 puis le mercredi 6 octobre - 14h30-19h00 et jeudi 7 octobre - 10h30-13h30

Lieu : format distanciel (TEAMS) puis Auditorium IRSN - Fontenay aux Roses

Participants :

*Alain Chapel (IRSN ; SERAMED/LRMed, unité de recherche santé), Ali Ouadi (IPHC), Anne-Marie Frelin (GANIL), Arnaud Guertin (SUBATECH), Benadjaoud Mohamed Amine (IRSN ; SERAMED, unité de recherche santé), Benjamin Serrano (CHPG), Cairo Caplan (AMU), Charles-Olivier Bacri (IJCLab), Christelle Adam (IRSN ; SDOS/LMDN, unité de recherche santé), Christelle Huet (IRSN ; SDOS/LDRI, unité de recherche santé), Christian Morel (CPPM), Christophe Thiebaut (LLR Ecole polytechnique), Consuelo Guardiola (IJCLab), Céline Baldeyron (IRSN ; SERAMED/LRAcc, unité de recherche santé), Céline Bouvier-Capely (IRSN ; SESANE/LRSI, unité de recherche santé), Daniel Cussol (LPC – Caen), Daniel Santos (LPSC), Daphnée Villoing (Medpace), David Brasse (IPHC), Denis Dauvergne (LPSC), Didier Franck (IRSN ; SDOS, unité de recherche santé), Dmitry Klovov (IRSN ; SESANE/LRTOX, unité de recherche santé), Elif Hindié (CHU Bordeaux), Emilie Bayart (ENSTA), Fabien Milliat (IRSN ; SERAMED/LRMed, unité de recherche santé), Ferid Haddad (Laboratoire de Physique Subatomique et des Technologies Associées), François Vianna-Legros (IRSN ; SDOS/LMDN, unité de recherche santé), Françoise Praz (INSB), Gaëtan Gruel (IRSN ; SERAMED/LRAcc, unité de recherche santé), Gilles de France (GANIL), Géraldine Gonon (IRSN ; SERAMED/LRAcc, unité de recherche santé), Imene Garali-Zineddine (IRSN ; SESANE/LRTOX, unité de recherche santé), Isabelle Clairand (IRSN ; SDOS, unité de recherche santé), Jean Michel Létang (Laboratoire CREATIS), Jean-François Bottolier (IRSN ; unité de recherche santé), Jean-Marc Fontbonne (LPC – Caen), Laurent Menard (IJCLab), Marc Benderitter (IRSN ; SERAMED, unité de recherche santé), Marc Rousseau (IPHC), Marc-Antoine Verdier (IJCLab), Marie Dutreix (SFC), Marie-Laure Gallin-Martel (LPSC), Mathieu Dupont (CPPM), Michaël Beuve (IP2I Lyon), Nicolas Arbor (IPHC), Olivier Guipaud (IRSN ; SERAMED/LRMed, unité de recherche santé), Patrick Vernet (LP – Clermont), Philippe Laniece (IJCLab), Rachel Delorme (LPSC), Romain Khaled, Sophie Heinrich (Institut Curie), Steve Muanza (CPPM), Tiffany Beaumont (IRSN ; SDOS/LEDI, unité de recherche santé), Valerie Holler (IRSN ; Direction de la stratégie), Vincent Gressier (BIPM), Vincent Métivier (SUBATECH), Vincent Paget (IRSN ; SERAMED/LRMed, unité de recherche santé), Yann Perrot (IRSN ; SDOS/LDRI, unité de recherche santé), Yizheng Wang (SUBATECH), Yolande Petegnief (APCRAP)*

<p><b>Accueil et présentation de l'atelier 1</b> Sébastien INERTI (IN2P3) et Jean Michel Bonnet (IRSN, unité de recherche santé)</p>
<p><b>Outils et méthodes pour les radiothérapies innovantes</b> Rachel Delorme (LPSC - Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie)</p>
<p><b>Outils et méthodes pour l'imagerie par rayonnements ionisants</b> Mathieu Dupont (Centre de Physique des Particules de Marseille)</p>
<p><b>Outils et plateformes pour la radiobiologie</b> Michaël Beuve (LIRIS)</p>
<p><b>La simulation Monte Carlo à l'interface physique-médecine-biologie : les outils Geant4-DNA et GATE</b> Lydia Maigne (Laboratoire de Physique de Clermont)</p>
<p><b>Caractérisation biologique, biophysique et biochimique</b> Mathilde Badoual (IJCLab), Patrick Vernet (Laboratoire de Physique de Clermont)</p>
<p><b>Radionucléides pour la santé</b> Ali Ouadi (Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien), Ferid Haddad (Subatech)</p>
<p><b>Outils et méthodes dosimétriques associées aux applications médicales des RI</b> Didier Franck, Isabelle Clairand (IRSN/PSE-SANTE/SDOS)</p>
<p><b>Le programme ROSIRIS, du dépôt d'énergie à l'échelle cellulaire aux effets précoces radio-induits (axe 1)</b> Carmen Villagrasa (IRSN/PSE-SANTE/SDOS/LDRI), Gaëtan Gruel (IRSN/PSE-SANTE/SERAMED/LRAcc)</p>
<p><b>La plateforme microfaisceau d'ions MIRCOM</b> François Vianna-Legros (IRSN/PSE-SANTE/SDOS/LMDN)</p>
<p><b>Prédire les risques aux tissus sains après radiothérapie : programme de recherche en radiobiologie à l'IRSN</b> Fabien Milliat (IRSN/PSE-SANTE/SERAMED/LRMed)</p>
<p><b>Radiotoxicologie et outils analytiques</b> Céline Bouvier-Capely (IRSN ; SESANE/LRSI, unité de recherche santé), Dmitry Klokov (IRSN ; SESANE/LRTOX, unité de recherche santé)</p>
<p><b>Accueil et présentation de l'atelier atelier 2</b> Sébastien INERTI (IN2P3) et Jean Michel Bonnet (IRSN, unité de recherche santé)</p>
<p><b>Vers une approche globale multi-échelle de la modélisation des effets des rayonnements ionisants sur le vivant</b> Lydia Maigne (Laboratoire de Physique de Clermont) et Carmen Villagras (IRSN ; SDOS/LDRI, unité de recherche santé)</p>
<p><b>La radiobiologie, depuis l'échelle moléculaire jusqu'à la réponse tumorale et à la toxicité aux tissus sains</b> Fabien Milliat (IRSN ; SERAMED/LRMed, unité de recherche santé) et Claire Rodriguez-Lafrasse (Institut de Physique des deux Infinis de Lyon)</p>
<p><b>L'irradiation externe : depuis les nouvelles modalités d'irradiation jusqu'à l'imagerie et à la dosimétrie patient</b> Nicolas Arbor (Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien) et Christelle Huet (IRSN ; SDOS/LDRI, unité de recherche santé)</p>

# Thématique « capteurs et métrologie »

*Pilotes : Fanny Farget (CNRS/IN2P3), Laurent Audouin (IRSN/SPOT, pôle patrimoine et territoires)*

## 1. Introduction

Deux séminaires en lien avec cet atelier se sont tenus les 11 juin et 25 juin 2021. Ils ont réuni une soixantaine de chercheurs chacun.

Les présentations et les participants à ces deux séminaires sont disponibles sur les sites indico des événements : <https://indico.in2p3.fr/event/24036/> et <https://indico.in2p3.fr/event/24092/>

## 2. Structuration et contenu des échanges

Au cours du premier séminaire d'acculturation, les techniques de traitement du signal et l'apport de l'intelligence artificielle, la radiobiologie, la mesure du radon, la surveillance d'ouvrages ont été présentés et les besoins d'expertise et de recherche ont fait l'objet d'échanges entre les participants. Le second séminaire a permis d'approfondir et de préciser au cours de discussions les intérêts communs de collaboration.

Il ressort des échanges que des liens forts existent entre les équipes des deux organismes mais que de nouveaux liens suscitent un intérêt manifeste de la part des participants. En particulier sur l'apport de l'intelligence artificielle vis-à-vis de l'autonomie et la géolocalisation des capteurs, ainsi que sur la simplification des processus. L'étude de la résistance des capteurs aux rayonnements ionisants se révèle également un sujet émergent d'intérêt.

### a) Intelligence artificielle

Même si la science des données intervient principalement dans la partie aval de la chaîne de mesure, elle doit également guider le développement de la technologie des capteurs, et de la métrologie associée. Elle doit donc être prise en compte dès la conception de la mesure.

L'intelligence artificielle permet la modélisation de phénomènes complexes qui se déroulent dans les détecteurs (phénomènes complexes d'ionisation, mais également de modification de réponse due à une élévation de température extérieure par exemple). Elle permet également, par un algorithme d'apprentissage automatique supervisé, un démêlage spectral plus efficace pour la surveillance de la radioactivité. Beaucoup d'algorithmes sont disponibles et une expertise est nécessaire pour identifier ce qui reste à développer ou qui peut encore être amélioré.

Des collaborations existent (LPSC, LMDN) sur le sujet de l'interprétation des mesures dans le domaine de la neutronique. Dans le domaine des gaines optiques et du démêlage spectral, une collaboration est à construire et des thèses en co-tutelle CNRS – IRSN semblent être le bon vecteur.

### b) Radiobiologie

Concernant la radiobiologie, le développement de détecteurs diamant pour la faisceaologie présente beaucoup de potentiel et d'intérêt. Que ce soit pour la faisceaologie de plateforme telle que MIRCOM, mais également pour le spatial, en particulier l'étude de la résistance de l'électronique aux rayonnements ionisants. Une collaboration tri-partite, que ce soit avec le CNES (à étudier) ou avec une entreprise de fabrication de diamants en couches minces (DIAM-FAB) est à envisager. Le domaine du spatial va certainement faire l'objet d'appels à projets européens ou du CNES, et il est important de pouvoir y répondre ensemble. Ce thème est en forte connexion avec l'atelier « techniques nucléaires pour la santé ».

### c) Mesure du radon

La mesure du Radon dans l'environnement présente un fort point d'accroche entre les deux organismes. Une collaboration tripartite avec une entreprise dédiée aux capteurs environnementaux (CARMELEC) est à étudier.

La surveillance de l'environnement est également une thématique présentant de nombreux intérêts communs. En particulier, l'intelligence artificielle comme l'apprentissage automatique et profond ont un rôle important à jouer dans l'optimisation de la mesure, l'interprétation d'un nombre limité de données, mais aussi la reconnaissance d'anomalies dans les séries temporelles ou spatiales.

Les développements effectués sur les capteurs connectés pour l'étude de systèmes écologiques peuvent être transposés aux mesures dans l'environnement et, en particulier, à la radioécologie. Les développements pour une économie de puissance des capteurs et leur autonomie associée sont des points importants pour une surveillance accrue en termes de distribution spatiale et de durée. Dans le cas particulier des capteurs embarqués sur drone, les points de géolocalisation et la prise en compte des perturbations de l'air générées par les pales sur les panaches restent une difficulté à surmonter dans le cadre de mesures atmosphériques.

### d) Surveillance d'ouvrages

Les problématiques liées à la surveillance d'ouvrage rejoignent celles identifiées pour la surveillance de l'environnement, avec quelques caractéristiques additionnelles, comme en particulier la haute résolution spatiale, la compréhension et la modélisation de la réponse du milieu qui peut évoluer en fonction de la température, l'humidité ou d'autres paramètres au regard de la méthode de mesure mise en œuvre (sondes acoustiques, fibres optiques). Des rapprochements sont à organiser avec des laboratoires de l'INSU et de l'INSIS sur ce thème.

## 3. Programme du séminaire

Date : vendredi 11 juin et vendredi 25 juin 2021

Lieu : format distanciel (TEAMS)

Participants :

*Nicolas Arbor (IPHC), Christophe Ardois (IRSN ; SAME/LMRE, unité de recherche environnement), Laurent Audouin (IRSN ; SPOT, pôle patrimoine et territoires), Dominique Baillargeat (SPICES), Jean-François Bottollier-Depois (IRSN, unité de recherche santé), Olivier Bour (Géosciences Rennes), Vincent Breton (LPC), Alain Brunisso (IRSN ; direction de la stratégie), Jose Busto (CPPM), Cedric Cerna (CENBG), Patrick Chardon (LPC), Nicolas Chevillon (IPHC), Francisco Chinesta (PIMM Lab), Eric Chojnacki (IRSN ; SEMIA/LSMA, unité de recherche sûreté), Cécilia Damon (IRSN ; D3NSI/SVDDA/CVD, direction de la transformation), Ghislain Darley (IRSN ; D3NSI/SVDDA/BDASp, direction de la transformation), Anne de Vismes (IRSN ; SAME/LMRE, unité de recherche environnement), Christophe Debayle (IRSN ; SEDRE, unité de recherche environnement), Christian Duriez (IRSN ; SEREX, unité de recherche sûreté), Arnaud Elger (Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement), Fanny Farget (IN2P3), Vincent Faure (IRSN ; SIRSE/LER-SUD, unité de recherche environnement), Jean-Marc Fontbonne (LPC Caen), Bérénice Froment (IRSN ; SCAN/BERSSIN, unité de recherche environnement), Marie-Laure Gallin-Martel (LPSC), Didier Gay (IRSN ; direction de la stratégie), Marc Gleizes (IRSN ; unité de recherche environnement), Quentin Grando (IRSN ; SIPR/LR2E, unité de recherche sûreté), Claire Gréau (IRSN ; SEREN/BERAD, unité de recherche environnement), Stéphane Guillot (INSU), Sebastien Incerti (IN2P3), Dominique Joly (INEE), Pierre Kern (INSU), Maria Klepikova (Géosciences), Veronique Lacoste (IRSN ; SDOS/LMDN, unité de recherche santé), Pauline Lacote (IRSN ; SEREX/LE2M, unité de recherche sûreté), Philippe Laguionie (IRSN ; SRTE/LRC, unité de recherche environnement), Eric Larose (ISTERRE), Catherine Lecomte (IRSN ; unité de recherche environnement), Laurent Longuevergne (Géosciences), Laurent Menard (IJCLab - Pôle Santé), Nathalie Michielsen (IRSN ; SEREN/BERAD, unité de recherche environnement), Mohamed Amine Benadjaoud (IRSN ; SERAMED, unité de recherche santé),*

*Christian Morel (CPPM), Mejdi Neji (IRSN ; SEDRE/LETIS, unité de recherche environnement), Laurent Orgeas (INSIS), Patrice Giordano (IRSN, unité de recherche sûreté), Michael Petit (IRSN ; SES, unité de recherche sûreté), Bastien Poubeau (IRSN, unité de recherche sûreté), Philippe Querre (IRSN ; SA2I, unité de recherche sûreté), Daniel Santos (LPSC/Grenoble), Pascale Scanf (IRSN/DTR), Tomo Suzuki (Subatech), Luca Terray (LPC Clermont), François Trompier (IRSN ; SDOS/LDRI, unité de recherche santé), François Vianna-Legros (IRSN ; SDOS/LMDN, unité de recherche santé), Romain Vidal (IRSN ; SIRSE/LTD, unité de recherche environnement), Thibaut Vinchon (IRSN ; SDOS/LMDN, unité de recherche santé)*

<b>Introduction</b>	
Fanny Farget (IN2P3) et Laurent Audouin (IRSN/PPT-SPOT)	
<b>1. Intelligence artificielle</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Apprentissage automatique : les principes et applications futures</b> - Eric Chojnacki (IRSN; SEMIA/LSMA, unité de recherche sûreté)</li> <li>• <b>Empowering diagnosis and prognosis by using the HAI -Hybrid Artificial Intelligence- paradigm embracing physics-based and data-driven approaches</b> - Francisco Chinesta (Laboratoire PIMM)</li> <li>• <b>Système de mesure numérique pour l'imagerie nucléaire</b> - Nicolas Chevillon (IPHC)</li> <li>• <b>Méthodes multirésolutions et modélisation parcimonieuse pour l'analyse de données</b> - Patrick Querre (IRSN ; SA2I, unité de recherche sûreté)</li> </ul>	
<b>2. Techniques pour la radiobiologie : Faisceauologie</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Faisceauologie-Dosimétrie neutron</b> - Daniel Santos (LPSC)</li> <li>• <b>Développement des références et instrumentation associée</b> - François Vianna-Legros, Véronique Lacoste (IRSN ; SDOS/LMDN, unité de recherche santé),</li> <li>• <b>Faisceauologie- Dosimétrie. Développements de détecteurs diamant innovants</b> - Marie-Laure Gallin-Martel (LPSC)</li> </ul>	
<b>3. Mesure du Radon</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Techniques innovantes pour la mesure du radon dans l'environnement</b> - Jose Busto (CPPM)</li> <li>• <b>Métrologie du radon et de ses descendants à vie courte – Contexte et besoins à l'IRSN</b> - Claire Gréau, Nathalie Michielsen (IRSN ; SEREN/BERAD, unité de recherche environnement)</li> </ul>	
<b>4. Surveillance de l'environnement</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Utilisation de capteurs connectés pour le suivi in situ d'espèces sentinelles</b> - Arnaud ELGER (ECOLAB)</li> <li>• <b>Les évolutions du réseau Téléray et les Moyens de mesure Embarqués</b> - Romain VIDAL (IRSN/PSE-ENV/SIRSE/LTD)</li> <li>• <b>Applications de la technologie du drone : Cartographie radiologique géolocalisée sans GPS et dispersion d'un panache atmosphérique. Deux défis pour une nouvelle technologie</b> - Philippe Laguionie (IRSN/PSE-ENV/SRTE/LRC), Vincent Faure (IRSN/PSE-ENV/SIRSE/LER-SUD)</li> <li>• <b>Systèmes mobiles de spectrométrie gamma/neutron</b> - Nicolas ARBOR (IPHC)</li> </ul>	
<b>5. Surveillance d'ouvrages</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Surveillance de structure par fibres optiques sur la plateforme ODE</b> - Quentin Grando (IRSN/PSN-RES/SIPR/LR2E)</li> <li>• <b>Suivi des structures par fibre optique</b> - Laurent LONGUEVERGNE (Géosciences)</li> <li>• <b>Détection et caractérisation de fissure et mesure de l'évolution du champ de contrainte dans les bétons par méthode ultrasonore diffuse (LOCADIFF)</b> - Eric Larose (ISTerre)</li> <li>• <b>Techniques d'imageries utilisées sur gaines de Zircaloy et sur matériaux cimentaires : Cas pratiques et défis</b> - Christian DURIEZ (IRSN/PSN-RES/SEREX/LE2M)</li> </ul>	

# Thématique « plateformes logicielles et de simulation »

*Pilotes : Patrice Giordano (IRSN/Unité de recherche en sûreté) et Sébastien Incerti (CNRS/IN2P3) avec la contribution de Sophie Pignet (IRSN ; SNC, unité de recherche en sûreté), Adrien Bidaud (LPSC, Grenoble INP-UGA ; CNRS/IN2P3), Annick Billebaud (LPSC et GDR SciNEE ; CNRS/IN2P3), Fabienne Ribeiro (IRSN ; SEMIA, unité de recherche en sûreté), Laurent Orgeas (CNRS/INSIS), Olivier Marchand (IRSN/Unité de recherche en sûreté)*

## 1. Introduction

L'IRSN et le CNRS ont mené une réflexion commune sur le thème des « Plateformes logicielles et de simulations ». L'ambition visée par les deux organismes concerne principalement le développement et l'amélioration de plateformes logicielles de modélisation, notamment pour les études de sûreté dans le domaine de l'énergie nucléaire, en s'appuyant sur des méthodes computationnelles innovantes.

La réflexion menée a pris la forme de discussions entre experts des deux organismes et a permis d'identifier les domaines de collaboration existants, de possibles nouveaux domaines et sujets, ainsi que des actions à mettre en place pour faciliter la collaboration dans le domaine des « plateformes logicielles et simulations » et rendre le partenariat durable.

Les laboratoires ayant contribué à ce document sont les suivants :

- Pour le CNRS : IN2P3 (IP2I, IPHC, LPSC, direction d'institut), INSIS (direction d'institut).
- Pour l'IRSN : l'unité de recherche en sûreté (échelon Direction) et deux de ses équipes le SEMIA/LSMA (Laboratoire de Statistique et de Mathématiques Appliquées) et le SNC/LN (Laboratoire de Neutronique).

## 2. Structuration et contenu des échanges

### a) Les domaines de collaboration existants : acquis à consolider sur lesquels on peut s'appuyer pour étendre le partenariat

L'IRSN inscrit une partie importante de sa R&D sur le développement d'outils de modélisation avancée dans le cadre de laboratoires communs, regroupant des approches de modélisation et des capacités expérimentales permettant la validation des outils développés (exemples : MIST pour les matériaux hétérogènes, C3R pour le transport de l'iode dans le circuit primaire, LIMA sur la filtration).

Au sein du programme structurant NEEDS, les axes de collaboration concernent surtout les données nucléaires, la propagation des incertitudes liées aux données et les expériences de physique du cœur. Ces travaux sont menés en parallèle à d'autres projets impliquant de nombreux partenaires nationaux (EDF, le CEA, l'Université de Toulouse, l'ANCRE...) sur la validation des modélisations et des calculs d'incertitudes associés.

### b) Les domaines et sujets nouveaux à investir, à explorer, sur lesquels le partenariat est à construire ou à structurer

Les réflexions menées ont conduit à créer trois « Groupes d'Animation Scientifique » (GAS) de façon à favoriser les échanges entre les chercheurs de l'IRSN et du CNRS et fournir un cadre privilégié au développement des collaborations sur les sujets prioritaires pour les deux organismes.

1. **Le GAS « Codes Monte-Carlo & Neutronique »** : des échanges il ressort que le premier sujet porte sur l'étude des couplages neutronique / thermohydraulique, notamment pour la simulation d'accidents de criticité dans les réacteurs à sels fondus et pour les études des risques de criticité en piscine. Un autre sujet à traiter concerne l'intégration des méthodes de machine-learning pour l'interpolation de tables de sections efficaces

macroscopiques des calculs neutroniques de cœur. Enfin, un groupe d'utilisateurs IRSN-CNRS dans le domaine de la neutronique déterministe avec les codes DRAGON-DONJON doit être créé afin de faciliter l'expérience utilisateur avec ces outils.

2. **Le GAS « Couplage Multi-physique et Vérification & Validation »** : pour ce thème, il s'agit de développer et de valider des outils multi-physiques travaillant à différentes échelles d'espace et de temps. Dans cet objectif, trois interrogations majeures ont été soulevées et doivent faire l'objet de travaux communs : comment raccorder et assurer la cohérence du niveau de description entre les différents modules et quantifier les incertitudes globales des outils couplés (cohérence au niveau des précisions, de la description, de la prise en compte des phénomènes pertinents, quantification et propagation des incertitudes...) ? Comment dépasser les limitations expérimentales pour valider ces outils de modélisation (représentativité des données expérimentales disponibles pour des domaines investigués souvent inaccessibles expérimentalement, nécessité d'accéder aux mêmes niveaux de précision sur les données de référence et numériques, intérêt des calculs ab initio ou de moindres approximations dans les bases de référence...) ? Enfin, comment quantifier la représentativité et la qualité d'une base de données de référence (vers une méthodologie générique et formelle pour analyser la pertinence de bases de données par des méthodes multicritères) ?
3. **Le GAS « Ingénierie Logiciel »** : Les deux organismes proposent d'établir un canal technique autour de la parallélisation des codes déterministes et des codes existants (amélioration des performances, nouvelles architectures de calcul), de l'intégration de l'IA dans les logiciels, du couplage des codes de type CFD (computational fluid dynamics) avec les codes à zones dans le domaine de la thermo-hydraulique monophasique, et sur le développement, la validation et l'interfaçage des techniques de type CFD en thermo-hydraulique diphasique.

### **c) Les leviers à activer, l'organisation à mettre en place pour faciliter la collaboration, mutualiser nos réflexions, rendre le partenariat durable**

Il est convenu de privilégier, dans un premier temps, l'organisation d'ateliers thématiques sur chacun des GAS précités.

Par ailleurs, les GDR du CNRS étant des outils de structuration et d'animation scientifique très efficaces, la participation active de l'IRSN à certains GDR sera encouragée (SciNEE, Macot NUM, MaNu, GPL, IM).

Des échanges doivent se poursuivre afin de partager une cartographie des plateformes logicielles de modélisations avancées développées au sein du CNRS ou de l'IRSN et visant des applications technologiques industrielles. Les porteurs de ces plateformes pourraient réfléchir à l'opportunité de constituer le noyau d'un nouveau GDR auquel l'IRSN serait associé.

Les AAP NEEDS, comme indiqué précédemment, ont démontré leur efficacité quant à l'émergence de nouvelles collaborations. Ces actions doivent être poursuivies et encouragées.

Enfin, les échanges et discussions doivent se poursuivre autour des partages possibles avec des structures existant entre le CNRS et d'autres entités de la sphère du nucléaire tel que l'Institut des Sciences de la Mécanique et Applications Industrielles (UMR EDF-ENSTA-CNRS-CEA 9219).

**ADRESSE**

3, rue Michel-Ange  
75794 Paris Cedex 16

**TÉLÉPHONE**

+33 (0)1 44 96 40 00

**SITE INTERNET**

[www.cnrs.fr](http://www.cnrs.fr)

**E-MAIL**

[dapp.secretariat@cnrs.fr](mailto:dapp.secretariat@cnrs.fr)

 @CNRS

**ADRESSE**

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

**COURRIER**

B.P 17  
92260 Fontenay-aux-Roses Cedex

**TÉLÉPHONE**

+33 (0)1 58 35 88 88

**SITE INTERNET**

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

**E-MAIL**

[contact@irsn.fr](mailto:contact@irsn.fr)

 @IRSNFrance