



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité

**IRSN**  
INSTITUT DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Fontenay-aux-Roses, le 14 octobre 2020

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## AVIS IRSN N° 2020-00154

---

<b>Objet :</b>	<b>Réacteurs électronucléaires – EDF – Expertises complémentaires relatives au thème « prévention et limitation des accidents graves ».</b> <b>Étude du caractère suffisant du programme OCDE ROSAU pour permettre de se prononcer sur le besoin d'épaississement des radiers en béton très siliceux</b>
<b>Réf. :</b>	Avis IRSN/2019-00051 du 13 mars 2019. Saisine ASN CODEP-DCN-2020-025511 du 5 mai 2020.

---

## 1. INTRODUCTION

### 1.1. CONTEXTE

Dans le cadre de l'extension de la durée de fonctionnement des réacteurs au-delà de 40 ans et de la mise en œuvre d'améliorations de la robustesse des réacteurs aux situations extrêmes suite à l'accident nucléaire survenu à la centrale de Fukushima Dai-ichi en mars 2011, et en complément de la mise en place d'un ensemble de dispositions nouvelles destinées à réduire le risque de fusion du cœur, Électricité de France (EDF) met en œuvre un ensemble de dispositions spécifiques et une conduite adaptée visant à éviter des conséquences durables dans l'environnement en cas d'accident avec fusion du cœur (accident grave). Les accidents graves maîtrisés ne doivent conduire qu'à des mesures de protection des populations très limitées en termes d'étendue et de durée.

En particulier, la stratégie retenue par EDF vis-à-vis de la limitation du risque de percement du radier en béton du réacteur par interaction avec le corium (mélange de combustible et de matériaux de structure fondus formé lors de la fusion du cœur d'un réacteur nucléaire) consiste, après la rupture de la cuve, en une phase d'étalement à sec du corium, tout d'abord sur le radier du puits de cuve (local abritant la cuve contenant le cœur du réacteur) puis, après ablation d'une trappe fusible, sur le radier du local de l'instrumentation interne du cœur (RIC) adjacent au puits de cuve, suivie d'un noyage gravitaire du corium par l'eau contenue dans les puisards du fond de l'enceinte, préalablement remplis. Cette eau est ensuite refroidie grâce à un nouveau système qui permet d'évacuer la puissance thermique hors de l'enceinte.

MEMBRE DE  
**ETSON**

## 1.2. ENJEU DE SURETE

EDF retient, comme critère de sûreté à respecter pour éviter tout effet falaise sur les rejets radioactifs hors de l'enceinte lors de l'ablation du radier par le corium, de préserver l'intégrité du radier structurel de l'enceinte du réacteur<sup>1</sup>.

La stabilisation du corium et l'épaisseur de béton ablaté dépendent de l'efficacité des mécanismes physiques d'échanges de chaleur entre le corium et l'eau de refroidissement. Cette efficacité varie en fonction de la composition du béton constituant le radier. Ainsi pour ses études, EDF distingue trois familles de béton en fonction de leur composition : les bétons « silico-calcaires », « siliceux » et enfin « très siliceux ». À l'inverse des bétons « silico-calcaires » et des bétons « siliceux », l'efficacité de refroidissement d'un corium interagissant avec un béton « très siliceux » repose principalement sur le mécanisme « d'imbibition d'eau » qui est un échange de chaleur avec l'eau pénétrant au travers des fissures de la croûte du corium noyé.

L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a examiné en 2019, dans le cadre de l'avis cité en première référence, le caractère suffisant des dispositions de limitation du risque de percement ou de fuite par le radier lors de l'ablation de ce dernier par le corium. À l'issue de son expertise, l'IRSN a estimé que les épaisseurs de béton ablaté, restant limitées et n'atteignant pas le radier structurel, évaluées par EDF pour les réacteurs ayant un radier constitué de béton « silico-calcaire » ou « siliceux », étaient acceptables.

En revanche, l'IRSN ne partageait pas la position d'EDF sur l'efficacité du refroidissement du corium noyé pour les réacteurs ayant un radier constitué de béton « très siliceux ». Plus précisément, l'IRSN faisait part de son désaccord concernant la validation de la modélisation retenue par EDF pour le mécanisme « d'imbibition d'eau ». Selon les données expérimentales disponibles sur le mécanisme de refroidissement du corium noyé par imbibition de la croûte par l'eau, le flux de chaleur échangé entre l'eau et le corium diminue au fur et à mesure de l'ablation notamment du fait de l'incorporation de béton ablaté dans le corium. De telles données expérimentales ne sont toutefois disponibles que jusqu'à une fraction de béton incorporé correspondant à une durée d'ablation de quelques heures, bien inférieure aux durées susceptibles d'être rencontrées en cas d'accident grave. EDF extrapole la modélisation aux proportions de béton incorporé plus importantes en retenant un flux de refroidissement du corium constant, quel que soit le type de béton, alors que l'IRSN considère que les données expérimentales disponibles ne permettent pas de valider cette extrapolation. Le choix d'une extrapolation constante ou décroissante pour le flux de refroidissement du corium entraîne des différences importantes sur l'épaisseur ablatée calculée des radiers constitués de béton « très siliceux ». Une autre source d'incertitudes sur le flux de chaleur extrait par « imbibition d'eau » concerne l'impact de la fraction de composants métalliques dans le corium pour lequel il n'y a pas non plus de données expérimentales disponibles. L'IRSN considèrerait donc que l'efficacité de ce mécanisme dans des conditions représentatives d'un accident grave était trop incertaine pour conclure sur le respect du critère d'intégrité du radier structurel de l'enceinte du réacteur. À ce titre, l'IRSN a recommandé dans l'avis cité en première référence, pour les bâtiments des réacteurs de 900 MWe ayant un radier constitué de béton « très siliceux », qu'EDF épaisse le radier du puits de cuve et du local RIC avec un béton « silico-calcaire ». Pour les bâtiments des réacteurs de 1300 MWe ayant un radier constitué de béton « très siliceux », l'IRSN a recommandé qu'EDF propose des modifications matérielles de nature à répondre aux mêmes objectifs.

---

<sup>1</sup> La partie basse des enceintes est composée de deux radiers : le radier des structures internes et le radier structurel de l'enceinte. Le premier assure la répartition des descentes de charges des structures internes de l'enceinte, tandis que le second, situé sous le premier, assure la tenue structurelle de l'enceinte.

### 1.3. DEMARCHE PROPOSEE PAR EDF POUR LEVER LES ELEMENTS DE DESACCORD

Pour lever les éléments de désaccord avec l'IRSN susmentionnés, EDF propose une démarche s'appuyant sur le volet DCAM (« Debris coolability and MCCI ») du programme international ROSAU (« Reduction of severe accident uncertainties »), réalisé sous l'égide de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques), opéré par l'ANL (« Argonne national laboratory ») aux USA et auquel participent notamment EDF, le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) et l'IRSN.

D'une durée de cinq ans (2020-2024), ce programme est constitué de deux volets. Le volet DCAM du programme ROSAU s'intéresse à la capacité de refroidissement du corium sous eau et vise en particulier à compléter les connaissances issues du programme antérieur d'essais SSWICS (« Small-scale water ingression and crust strength tests ») sur le phénomène « d'imbibition d'eau » lors d'une interaction entre le béton et le corium sous eau.

Le volet DCAM du programme ROSAU consistera en la réalisation de cinq essais qui mettront en jeu des bains de corium prototypes, c'est-à-dire des mélanges constitués des mêmes matériaux que ceux rencontrés lors d'un accident de fusion du cœur sur un réacteur.

La composition initiale du corium des essais DCAM du programme ROSAU pourra intégrer une masse de métal représentative des quantités de métal potentiellement présent lors d'une interaction entre le béton et le corium lors d'un accident grave dans un réacteur, composition pour laquelle il n'y a pas de donnée expérimentale sur l'efficacité du mécanisme d'imbibition.

Par ailleurs, EDF a décidé récemment de faire réaliser trois essais du type DCAM supplémentaires par l'ANL, en parallèle à la réalisation du programme ROSAU, dont il prévoit d'utiliser les résultats pour conforter son évaluation du respect, pour les réacteurs au radier en béton « très siliceux », du critère d'intégrité du radier des structures internes.

### 1.4. SAISINE DE L'ASN

Par la lettre citée en seconde référence, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a demandé l'avis de l'IRSN « *en ce qui concerne la pertinence du programme ROSAU présenté par EDF et, le cas échéant, sur la suffisance des dispositions qu'EDF compte mettre en œuvre pour faire face aux manquements identifiés* ». Plus précisément, l'ASN requiert l'avis de l'IRSN sur :

- la valeur ajoutée du programme par rapport aux programmes d'essais expérimentaux déjà effectués (SSWICS, CCI) ;
- l'intérêt des deux premiers essais du programme pour répondre à cet objectif, essais dont les résultats devraient être disponibles en 2021 ;
- le caractère suffisant du programme ROSAU dans sa proposition actuelle pour permettre à l'ASN de se prononcer sur le besoin de l'épaississement des radiers « très siliceux », et le cas échéant les compléments que l'IRSN estime nécessaires à ce programme pour pouvoir conclure ;
- le cas échéant, la nécessité pour EDF de réaliser des essais supplémentaires pour traiter des spécificités des réacteurs EDF ;
- la pertinence des conclusions qui pourraient être tirées du programme vis-à-vis des incertitudes expérimentales ;
- la capacité du programme à répondre à l'objectif de réduction des incertitudes sur les phénomènes d'interaction entre le béton et le corium, et notamment sur le phénomène « d'imbibition d'eau ».

L'IRSN présente ci-après les conclusions de son expertise.

## 2. ANALYSE DE L'IRSN

### 2.1. PERTINENCE DU PROGRAMME ROSAU

#### 2.1.1. Valeur ajoutée du programme ROSAU par rapport aux essais déjà effectués

L'IRSN note que, comme pour tous les programmes du même type réalisés dans le cadre de l'OCDE, les conditions de l'ensemble des cinq essais du volet DCAM du programme ROSAU ne sont pas complètement définies. Seuls les deux premiers essais ont fait l'objet d'un consensus entre les partenaires internationaux du programme. Les conditions des essais suivants seront définies par les partenaires au fur et à mesure de la réalisation des essais.

**Dans ce contexte, l'IRSN estime que les essais réalisés dans le cadre du volet DCAM du programme ROSAU permettront d'obtenir des données expérimentales contribuant à caractériser l'impact d'une masse importante de métal dans le corium sur l'efficacité du phénomène d'imbibition de la croûte formée au-dessus du bain de corium par l'eau la recouvrant.** En effet, il s'agit d'un objectif clairement partagé entre tous les participants du programme ROSAU.

En revanche, pour l'heure, l'objectif de réaliser des essais permettant d'apprécier l'impact de fractions importantes de béton dans le corium, correspondant à une ablation au-delà des premières heures d'interaction entre le corium et un béton « très siliceux », n'est pas partagé entre tous les participants.

L'IRSN estime donc qu'il subsiste actuellement un doute sur la valeur ajoutée du programme ROSAU pour répondre à ce besoin de connaissances, mais note qu'EDF prévoit d'y pallier par la réalisation d'essais dédiés (voir paragraphe 2.2).

#### 2.1.2. Intérêt des deux premiers essais dont les résultats devraient être disponibles en 2021

Le premier essai du volet DCAM du programme ROSAU sera réalisé avec un corium dont la composition ne contient pas de béton ; **il permettra d'acquérir des données sur le phénomène « d'imbibition d'eau » pour un bain représentatif s'écoulant hors de la cuve et permettra d'améliorer la modélisation de ce phénomène pour des fractions de béton ablaté incorporées dans le corium restant limitées.**

**Le second essai sera représentatif des premières heures d'interaction entre le béton et le corium sous eau lors d'un accident grave, avant l'ouverture du voile fusible menant à l'étalement du corium dans la salle RIC adjacente.** La comparaison directe des résultats avec ceux d'un des essais SSWICS réalisés antérieurement permettra d'apprécier l'impact de la présence initiale de métal sur le phénomène d'imbibition de la croûte de corium noyé.

#### 2.1.3. Caractère suffisant du programme ROSAU dans sa proposition actuelle pour permettre à l'ASN de se prononcer sur le besoin d'épaissement des radiers en béton « très siliceux »

L'IRSN rappelle que, pour être en mesure de valider à court terme une modélisation du phénomène d'imbibition, il est nécessaire d'obtenir un nombre suffisant de nouveaux points expérimentaux, en particulier pour des fractions de béton élevées dans le corium. Cette problématique n'est pas partagée par l'ensemble des partenaires du programme ROSAU.

**L'IRSN estime donc que, en raison de l'incertitude sur l'intégration dans le volet DCAM du programme ROSAU d'un essai avec une proportion de béton au-delà de 25 %, il n'est pas possible de conclure quant à la suffisance du programme ROSAU pour permettre à l'ASN de se prononcer sur le besoin d'épaissement des radiers en béton « très siliceux ».**

## **2.2. STRATEGIE D'EDF POUR FAIRE FACE AUX INCERTITUDES CONCERNANT LA DEFINITION DE CERTAINS ESSAIS DU PROGRAMME ROSAU**

Compte tenu des incertitudes relatives à la définition de certains essais du programme ROSAU, EDF a pris la décision de faire réaliser trois essais supplémentaires de type SSWICS par l'ANL, en parallèle de la réalisation des essais du volet DCAM du programme ROSAU. Les proportions exactes de béton contenu dans le corium seront ajustées pour compléter (et non répéter) celles choisies par les partenaires du projet ROSAU.

EDF vise la réalisation d'un essai supplémentaire par an dès 2020, les trois essais étant réalisés avant la fin 2022.

**L'IRSN estime que la réalisation de ces trois essais supplémentaires devrait permettre d'obtenir, d'ici fin 2022, les points expérimentaux manquants correspondant aux besoins de connaissance sur le phénomène d'imbibition de la croûte du corium noyé.**

Une prise de position sur le caractère suffisant des dispositions définies par EDF pour limiter le risque de percée du radier des réacteurs en béton « très siliceux » avec les éléments disponibles à la fin de ces essais implique de tirer le meilleur parti des résultats expérimentaux à mesure qu'ils seront disponibles et de justifier l'ensemble des hypothèses de modélisation et de calculs au regard des enseignements des programmes expérimentaux concernés. **À cet égard, EDF a indiqué son intention de partager avec l'IRSN les résultats de ces trois essais supplémentaires au fur et à mesure de leur réalisation.**

## **2.3. AUTRES THEMATIQUES POUVANT IMPACTER LA PRISE DE DECISION RELATIVE AU BESOIN D'ÉPAISSISSEMENT DES RADIERS EN BETON « TRES SILICEUX »**

### **2.3.1. Nécessité ou non d'essais spécifiques complémentaires pour traiter de spécificités des réacteurs EDF**

Les spécificités des réacteurs français, notamment en termes de proportions de composés métalliques et de composants du béton « très siliceux » ablaté incorporés dans le corium lors d'un accident grave seront prises en compte dans les trois essais supplémentaires au volet DCAM du programme ROSAU.

**Concernant la refroidissabilité d'un corium interagissant avec un béton « très siliceux », l'IRSN n'a ainsi pas identifié de spécificités des réacteurs EDF qui nécessiteraient la réalisation d'essais dans d'autres conditions expérimentales que celles couvertes par les essais du volet DCAM du programme ROSAU et par les essais complémentaires prévus par EDF.**

### **2.3.2. Reprise des essais de type SSWICS**

La décision de réaliser l'essai n°1 du volet DCAM du programme ROSAU dans des conditions expérimentales proches de celles d'essais existants du type SSWICS permettra de limiter le risque lié à la reprise d'essais de ce type.

De plus, par le passé, les équipes d'ANL ont réalisé et documenté des essais qui, s'ils avaient d'autres finalités, faisaient intervenir des fractions importantes de métal et de béton, ce qui limite le risque inhérent à la reprise d'essais de type SSWICS dans de telles configurations.

**L'IRSN estime satisfaisantes les précautions prises par les équipes d'ANL pour limiter les risques inhérents à la reprise des essais de type SSWICS.**

### 2.3.3. Pertinence des conclusions qui pourront être tirées de l'ensemble du programme d'essais compte tenu des incertitudes expérimentales

L'IRSN note que l'intégralité des essais menés dans le volet DCAM du programme ROSAU ainsi que les trois essais supplémentaires demandés par EDF à l'ANL seront réalisés dans le dispositif dans lequel ont été réalisés de nombreux essais du même type, dispositif qui sera remis à neuf.

La bonne connaissance de ce dispositif par les équipes d'ANL, le retour d'expérience des essais déjà réalisés durant tous les programmes précédents permettent à l'IRSN de considérer que les incertitudes expérimentales attendues des nouveaux essais devraient être du même ordre de grandeur que celles présentes dans les essais des programmes antérieurs, lesquels ont permis des progrès significatifs pour les modélisations.

**L'IRSN estime donc que les incertitudes expérimentales du programme d'essais ROSAU et des trois essais supplémentaires demandés par EDF à l'ANL ne seront pas de nature à entraver l'acquisition de connaissances nouvelles concernant le phénomène « d'imbibition d'eau ».**

### 2.3.4. Capacité de l'ensemble du programme d'essais à répondre à l'objectif de réduction des incertitudes sur les phénomènes d'interaction entre le béton et le corium

Les nouveaux points expérimentaux des essais du volet DCAM du programme ROSAU ainsi que les trois essais supplémentaires demandés par EDF à l'ANL, réalisés avec des coriums prototypiques, devraient permettre d'améliorer significativement la précision de la modélisation du phénomène « d'imbibition d'eau ». En particulier, l'ajout de métal dans ces essais devrait fournir des informations au moins qualitatives pour améliorer la représentativité des modèles pour les conditions d'une interaction entre le béton et le corium lors d'un accident grave.

Par ailleurs, la possibilité d'obtenir de nouveaux points expérimentaux pour des fractions de béton plus élevées dans le corium que celles obtenues jusqu'à présent permettra d'améliorer la modélisation actuellement retenue du phénomène « d'imbibition d'eau » lors de la phase long terme d'un accident grave.

**Au final, l'analyse des essais restera complexe mais les nouveaux points expérimentaux devraient permettre d'améliorer significativement la précision de la modélisation du phénomène d'imbibition de la croûte au-dessus du bain de corium noyé et de réduire les incertitudes soulevées par l'IRSN quant aux résultats des calculs réalisés par EDF et examinés dans le cadre de l'avis en première référence. Ceci devrait participer à une meilleure évaluation de nature à favoriser une prise de position quant à la nécessité d'épaissir le radier des réacteurs constitué de béton « très siliceux ».**

## 3. CONCLUSION

L'IRSN considère que les essais réalisés dans le volet DCAM du programme ROSAU complétés des trois essais supplémentaires financés par EDF sont de nature à combler les lacunes des données expérimentales actuelles vis-à-vis de l'impact d'une masse importante de métal dans le corium sur l'efficacité de refroidissement du corium sous eau et vis-à-vis de l'impact de proportions élevées de produits de décomposition du béton ablaté dans le corium.

L'IRSN estime que les résultats attendus des essais permettront soit de confirmer la validité des modèles actuels et donc des évaluations fournies par EDF et examinées dans le cadre de l'avis en première référence, soit de mettre en évidence la nécessité de les faire évoluer. L'IRSN rappelle à cet égard que la nécessité d'épaissir les radiers des réacteurs constitués de béton « très siliceux » s'appréciera *in fine*, pour chaque réacteur, en tenant compte de ses spécificités, sur la base d'évaluations consolidées de la hauteur de béton structurel restée intègre.

L'IRSN souligne enfin qu'une prise de position sur le caractère suffisant des dispositions définies par EDF pour limiter le risque de percée du radier des réacteurs en béton « très siliceux » avec les éléments disponibles à la

fin de ces essais implique de tirer le meilleur parti des résultats expérimentaux à mesure qu'ils seront disponibles et de justifier l'ensemble des hypothèses de modélisation et de calculs au regard des enseignements des programmes expérimentaux susmentionnés.

**À ce titre, EDF a pris l'engagement mentionné en annexe. L'IRSN estime que cet engagement d'EDF, qui présente un calendrier progressif de partage de l'analyse et des enseignements du programme ROSAU et des essais supplémentaires décidés par EDF, est de nature à favoriser une prise de position quant à la nécessité d'épaissir le radier des réacteurs constitué de béton « très siliceux » dans des délais raisonnables, ce qui est satisfaisant.**

Pour le Directeur général et par délégation,  
Frédérique PICHEREAU  
Adjointe au Directeur de l'expertise de sûreté

## ANNEXE A L'AVIS IRSN N° 2020-00154 DU 14 OCTOBRE 2020

### Engagement de l'exploitant

Compte tenu du planning cible du programme ROSAU et du programme d'essais complémentaires mis en place actuellement entre EDF et ANL, EDF s'est engagé à transmettre à échéance de :

- mi-2022 : un premier bilan des essais qui auront été réalisés à date (quatre d'après le planning cible) et les évolutions de modélisation envisagées le cas échéant ;
- fin-2022 : un second bilan analysant comment les résultats des nouveaux essais (deux d'après le planning cible) s'intègrent dans l'analyse déjà réalisée et, si nécessaire, les adaptations apportées aux travaux précédents. Ces actions permettront de conclure quant à la nécessité de mettre à jour les calculs déjà réalisés pour le GP Réacteur de 2019. Dans l'affirmative, les hypothèses de modélisation et de calculs seront précisées à la même échéance ;
- mi-2023 : une mise à jour des calculs si celle-ci s'avérait nécessaire à l'issue des analyses précédentes.