

Eléments de réflexion sur la stratégie de rétention d'un corium en cuve de réacteur

Avant-propos

Les réacteurs nucléaires de troisième génération se caractérisent notamment par la prise en compte à la conception des accidents avec fusion du cœur. En particulier, des dispositions doivent être mises en œuvre afin d'éviter la percée du radier du bâtiment contenant le réacteur, et ce avec un grand niveau de confiance. A cet égard, la stratégie de rétention du corium dans la cuve du réacteur, si elle est supportée par des travaux appropriés de recherche et de développement, permet d'atteindre cet objectif.

L'IRSN réalise, seul ou en partenariat, des travaux visant à traiter l'ensemble des problématiques associées à la rétention du corium en cuve.

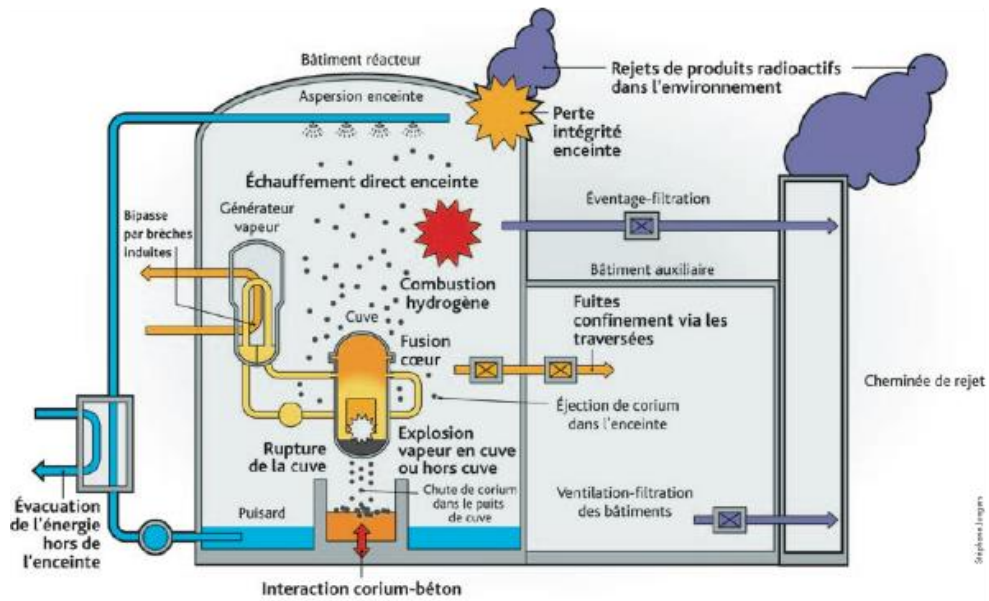
La présente fiche expose la stratégie de rétention du corium en cuve et ses limitations, ainsi que les programmes de recherche menés par l'IRSN dans ce domaine.

I. Introduction

En cas d'accident grave affectant un réacteur nucléaire, un questionnement spécifique concerne la gestion du mélange de combustible et de matériaux de structure du cœur (corium) résultant de la perte du refroidissement du combustible. A cet égard, les stratégies retenues à la conception des réacteurs nucléaires à eau de 3^{ème} génération relèvent pour l'essentiel de deux approches différentes, l'une retenant la stabilisation du corium hors de la cuve (cas notamment du réacteur EPR via un étalement et un refroidissement du corium après noyage), l'autre visant la rétention du corium dans la cuve (cas notamment du réacteur AP1000).

II. Gestion maîtrisée d'un accident grave

En cas d'accident avec fusion du cœur, **l'objectif majeur est de minimiser les rejets dans l'environnement, sources de doses pour les personnes du public et de contamination à long terme des territoires, ce qui nécessite notamment de maintenir l'étanchéité de l'enceinte de confinement du réacteur.**



Phénoménologie des accidents graves et identification des voies de rejets possibles vers l'environnement

Le risque de défaillance de la cuve peut être minimisé grâce à une injection précoce d'eau dans la cuve avec un débit suffisant pour extraire la puissance résiduelle dissipée par le combustible. La disponibilité d'une injection précoce est néanmoins peu probable car elle est conditionnée à la capacité de l'exploitant à retrouver, peu après le début de la dégradation du combustible, un moyen d'injection d'eau qui lui aura préalablement fait défaut et à le maintenir dans la durée.

En complément d'une injection d'eau dans la cuve, qui peut s'avérer tardive, le noyage du puits de cuve permet d'accroître les possibilités de maintenir le corium en cuve. La stratégie de rétention du corium dans la cuve repose ainsi sur une injection d'eau dans la cuve suffisamment précoce pour qu'un cœur déjà dégradé puisse être refroidi au moins en partie et sur les performances d'un circuit de refroidissement externe à la cuve.

La puissance résiduelle doit être évacuée hors de l'enceinte de confinement du réacteur pour éviter une montée lente en pression qui conduirait à sa défaillance, sauf à disposer d'un dispositif d'éventage-filtration dont l'instant d'ouverture et l'efficacité de rétention des aérosols et des espèces gazeuses conditionnent l'intensité du rejet dans l'environnement.

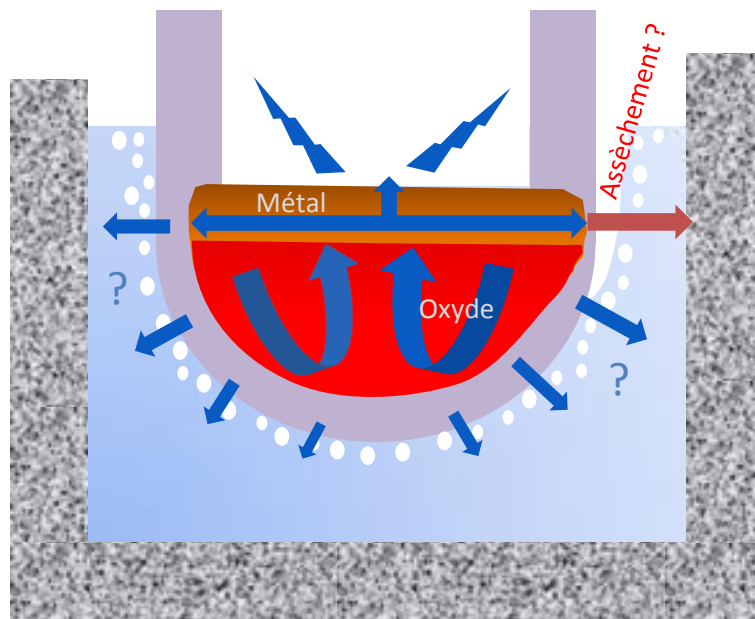
En cas d'impossibilité de maintenir le corium dans la cuve, la protection du radier repose sur des dispositions dédiées – pour le réacteur EPR, l'étalement du corium sur une surface suffisamment vaste pour diminuer les flux de chaleur à évacuer et son refroidissement.

Quelle que soit l'approche retenue (corium en cuve ou hors cuve), une injection d'eau et l'évacuation de la puissance résiduelle hors de l'enceinte de façon pérenne sont nécessaires et les risques associés en termes de défaillance du confinement, par mise en pression ou sollicitations dynamiques, doivent être examinés.

III. Points clés de la faisabilité d'une stratégie de rétention en cuve

La démonstration de la robustesse d'une stratégie de rétention en cuve repose sur la vérification que le flux de chaleur à évacuer par l'eau du circuit de refroidissement externe à la cuve peut être extrait en tous points de la face externe de la cuve sans risque d'assèchement de la paroi, en particulier dans les zones où le flux de chaleur est très élevé. Ceci dépend notamment de la distribution du flux de chaleur sur la face interne de la paroi de la cuve et de la variation du flux critique (voir ci-dessous) en chaque point de la face externe de la cuve.

La distribution du flux de chaleur sur la face interne de la paroi de la cuve résulte des mécanismes de convection naturelle au sein des différentes couches ou amas de corium situés au fond de la cuve. La présence d'un refroidissement externe à la cuve retarde son éventuelle rupture. Les équilibres physicochimiques au sein des matériaux constituant le corium vont être modifiés et la situation évolue progressivement vers un bain stratifié où une couche métallique non miscible surnage à la surface d'un bain d'oxydes pouvant être lui-même composé de deux phases de densités différentes.



Distribution du flux de chaleur et risque d'assèchement

Sans injection d'eau dans la cuve, ceci conduit à un déséquilibre important dans les températures aux frontières de la couche métallique : les transferts de chaleur par convection naturelle se font vers la paroi de la cuve (à température de fusion de l'acier) et vers la surface du bain de corium qui est à une température supérieure, les échanges de chaleur avec les structures encore présentes ne s'opérant alors que par rayonnement. Ceci se traduit par un phénomène de concentration de flux, appelé « focusing effect », qui est d'autant plus marqué que l'épaisseur de métal est faible et que la masse

d'oxydes, dans laquelle la puissance résiduelle est libérée, présente sous la couche métallique, est importante.

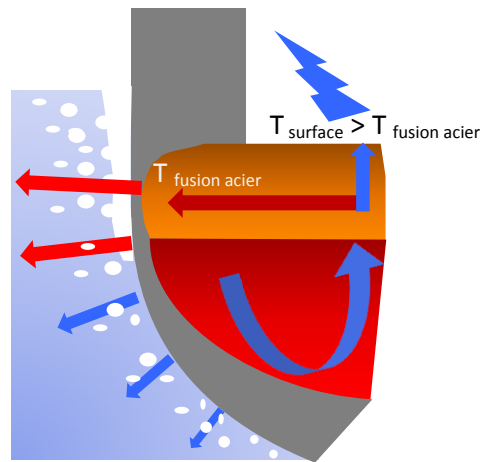


Illustration du phénomène de « focussing effect »

L'injection d'eau dans la cuve conditionne la distribution du flux de chaleur dans la mesure où elle permet de refroidir tout ou partie du cœur dégradé avant que le corium n'atteigne le fond de la cuve et où elle supprime le phénomène de « focusing effect ». L'état de dégradation du cœur au moment de l'injection d'eau conditionne fortement l'efficacité du refroidissement et donc la fraction du corium présent au fond de la cuve. De manière enveloppe, des pics de flux de chaleur de plus de $1,5 \text{ MW/m}^2$ sont à considérer en l'absence d'injection d'eau dans la cuve pour des réacteurs de $1\ 000 \text{ MWe}$.

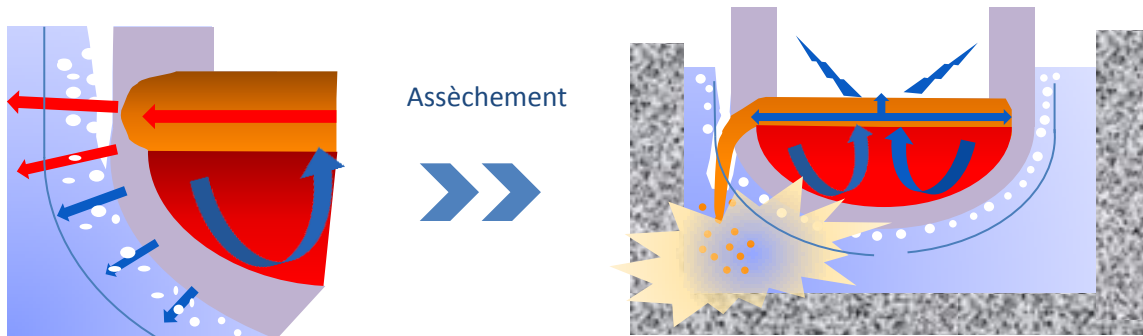
La détermination du flux critique sur la face externe de la cuve consiste à évaluer en tous points du fond de cuve la limite d'assèchement en fonction des caractéristiques locales de l'écoulement. Cette limite est d'autant plus élevée que la paroi de la cuve est verticale (d'où une évacuation plus facile de la vapeur) ou que l'eau est sous-saturée à l'entrée du circuit de refroidissement externe de la cuve.

Le refroidissement peut être assuré en noyant le puits de cuve, mais il est plus efficace d'aménager un espace qui canalise la circulation de l'eau (sous forme liquide et de vapeur) autour de la cuve et augmente le débit de refroidissement quand la circulation se fait en convection naturelle. A cet égard, la présence d'un calorifuge autour de la cuve peut, selon ses caractéristiques, conduire à la constitution d'un espace contribuant à canaliser l'écoulement ou constituer un obstacle empêchant une évacuation correcte de la vapeur.

Il convient de souligner qu'il n'est pas possible de raisonner sur une valeur absolue de flux critique, qui dépend des conditions locales et d'un débit qui est déterminé par les caractéristiques du circuit de refroidissement. En convection naturelle, le débit de refroidissement s'adapte à la hauteur manométrique disponible et aux pertes de charge diphasiques, notamment au sein de l'espace aménagé autour de la cuve. Pour l'AP1000, les essais ULPU réalisés aux USA ont permis d'atteindre des valeurs de 2 MW/m^2 dans les zones les plus verticales de la cuve.

L'assèchement de la paroi pour des flux de chaleur élevés entraînant la défaillance de la cuve par fusion, le phénomène qui est alors à redouter est une interaction du corium avec l'eau du puits de

cuve conduisant à une explosion de vapeur suffisamment énergétique pour dégrader l'étanchéité de l'enceinte de confinement ou des circuits qui la traversent.



Conséquence d'un assèchement de la face externe de la cuve

IV. Impact de la puissance du réacteur sur la robustesse d'une démarche de rétention en cuve

En l'état actuel des connaissances et sous certaines hypothèses dont le conservatisme reste à étayer, il est possible :

- d'évaluer la production d'hydrogène au cours de la dégradation du cœur puis pendant la phase de renoyage ;
- d'évaluer la progression du corium du cœur vers le fond de la cuve et les chargements thermiques enveloppes pour la cuve ;
- d'évaluer les performances d'un circuit de refroidissement externe à la cuve ;
- d'évaluer la tenue mécanique de la cuve ;
- d'estimer le chargement dynamique résultant d'une interaction entre le corium et l'eau ou d'une déflagration d'hydrogène.

Ces connaissances ont permis de réaliser des simulations et de valider, pour les réacteurs dont la puissance est inférieure ou de l'ordre de 600 MWe, la robustesse d'une stratégie de rétention du corium en cuve pour peu que le circuit de refroidissement externe ait été conçu en regard de cet objectif et que le fond de cuve ne présente pas de singularité géométrique telle qu'un décrochement à la jonction entre la virole et le fond de cuve ou une géométrie induisant des restrictions de section de passage.

L'approche avec rétention en cuve a été retenue à la fin des années 90 par les Finlandais qui souhaitent accroître la puissance de leurs réacteurs VVER-440/213. Pour atteindre cet objectif, un dispositif avec calorifuge mobile a été mis en place pour aménager un espace de refroidissement autour de la cuve et le circuit de ventilation du puits de cuve a été modifié pour créer un circuit de refroidissement. Les programmes expérimentaux (COPO en Finlande et ULPU aux USA) et les simulations ont permis de vérifier que le circuit de refroidissement présentait des performances suffisantes compte tenu des distributions enveloppes du flux de chaleur sur le fond de la cuve.

Concernant les nouveaux réacteurs, l'AP600 a été conçu en tenant compte d'une stratégie de rétention en cuve. Compte tenu de son niveau de puissance, les marges sont suffisantes, y compris en l'absence d'injection d'eau dans la cuve, pour valider la démonstration, ce qui a permis à la NRC de certifier ce réacteur en 1999. **La démarche adoptée pour l'AP600 a ensuite été étendue à l'AP1000.**

Parmi les réacteurs de faible puissance, figurent également le réacteur d'essais RES, dont les performances du circuit de refroidissement ont été vérifiées lors des essais CNU réalisés au CEA, et les SMR pour lesquels il est possible d'être confiant sur les possibilités de refroidissement d'un corium en cuve.

Statuer pour les réacteurs de 900 à 1 000 MWe est plus délicat car les flux de chaleur à évacuer du corium sont plus élevés et, avec certaines hypothèses, les limites d'assèchement sont dépassées. Le noyage du puits de cuve et une injection d'eau en cuve sont nécessaires pour réduire la masse de corium au fond de la cuve et supprimer le phénomène de « focusing effect ». Pour des scénarios de dégradation rapide conduisant à la présence de corium dans le fond de la cuve en quelques heures seulement, la fenêtre temporelle pour retrouver une possibilité d'injection en cuve, qui a fait préalablement défaut, est trop courte pour pouvoir écarter le risque de défaillance de la cuve. Dès lors, la robustesse de la démonstration de la maîtrise de l'accident grave nécessite l'évaluation des conséquences d'une interaction entre le corium et l'eau dans un puits de cuve noyé. En l'état actuel des connaissances, cette évaluation n'offre pas suffisamment de garanties pour pouvoir exclure les risques de dégradation à court terme du confinement et de rejets précoces dans l'environnement.

Dans cette gamme de puissances (900 – 1 000 MWe), les simulations réalisées pour les REP 900 MWe du parc français, mais également pour le réacteur AP1000, ne permettent pas d'exclure la possibilité d'une défaillance de la cuve et de rejets précoces dans l'environnement du fait d'une explosion de vapeur dans le puits de cuve. A cet égard, la certification de l'AP1000 par la NRC en 2005 a reposé sur des arguments déterministes et des arguments probabilistes.

Sur un plan déterministe, la réglementation américaine demande d'exclure tout risque de rejets massifs pendant 24 h après le début de dégradation du cœur. Dans sa démonstration, le concepteur a considéré qu'en cas de défaillance de la cuve, une explosion de vapeur dans un puits de cuve noyé endommagerait les structures internes du bâtiment du réacteur, mais ne mettrait pas en cause l'intégrité de l'enceinte de confinement métallique. Il a par ailleurs montré que le percement du radier n'interviendrait qu'après 48 heures.

Sur un plan probabiliste, la réglementation américaine demande de montrer que la fréquence des rejets massifs est inférieure à 10^{-6} /année.réacteur. Compte tenu des incertitudes sur les modèles de progression du corium vers le fond de la cuve, le concepteur a considéré une probabilité conditionnelle de défaillance de la cuve comprise entre 4 et 30 % et postulé une défaillance systématique de l'enceinte et un rejet massif dans l'environnement. Compte tenu de la fréquence calculée de défaillance du confinement de $1,9 \cdot 10^{-8}$ /année.réacteur, dont 38 % conduisent à des rejets précoces, le concepteur a conclu qu'il est très en deçà de l'objectif fixé.

Pour l'IRSN, les incertitudes sur la détermination des chargements mécaniques induits par une explosion de vapeur dans un puits de cuve noyé ne permettent pas de conclure à l'absence de rejets

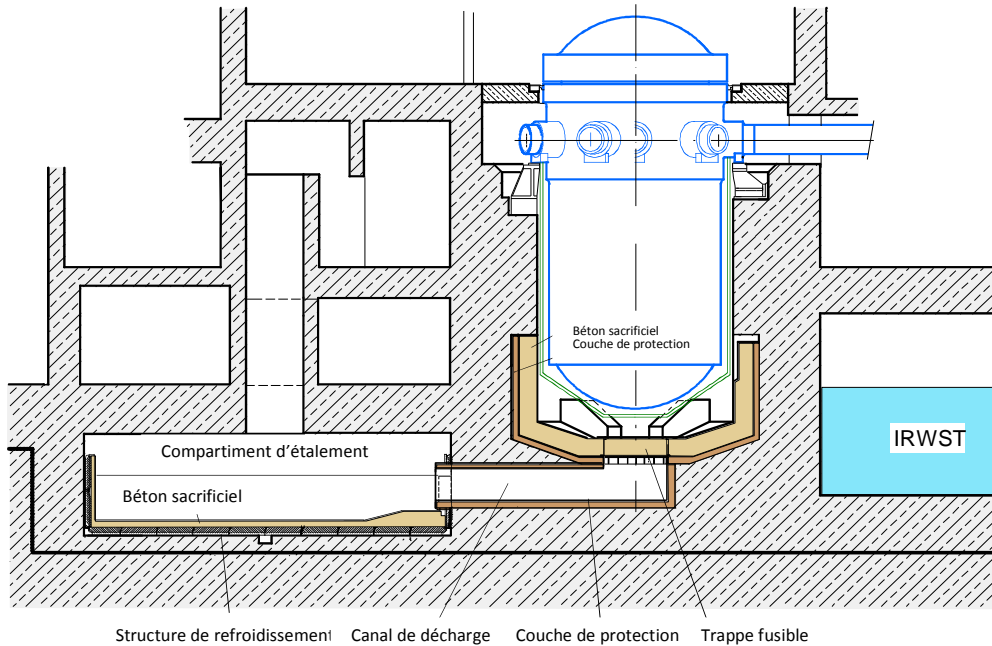
massifs précoces et des chargements thermiques transitoires plus sévères que ceux considérés peuvent encore augmenter les probabilités de défaillance de la cuve.

Pour les réacteurs de plus forte puissance (1300 à 1600 MWe), l'efficacité d'une stratégie de rétention en cuve est d'autant moins robuste que la densité de puissance à extraire de la cuve est élevée. Les flux de chaleur à extraire sont plus élevés et les scénarios dépassant les limites d'assèchement plus probables.

Dans le cadre de la réunion du GPR du 28 mars 2013 concernant le réexamen de sûreté VD3 1300, EDF a montré qu'il était possible, pour un puits de cuve noyé, de refroidir le corium malgré la présence d'un calorifuge. Toutefois, au cours de l'instruction technique avec l'IRSN, il a admis que les singularités géométriques de la cuve associées à la possibilité d'une absence de refroidissement interne à la cuve et à une localisation de tout l'inventaire du cœur en fond de cuve pouvaient conduire à dépasser le flux critique et ne permettaient donc pas de garantir la tenue du fond de la cuve. Les divergences entre l'IRSN et EDF portent in fine sur l'appréciation des conséquences d'une explosion de vapeur dans le puits de cuve. L'IRSN a donc continué de préconiser de maintenir autant que possible le puits de cuve sec avant la percée de la cuve de manière à éviter une explosion de vapeur, mais également à faciliter l'étalement du corium sur l'ensemble de la surface du radier avant de procéder à son refroidissement dans un deuxième temps en noyant le puits de cuve, ce qui nécessite de réaliser des modifications de conception de l'installation.

La stratégie de gestion des accidents graves pour l'APR 1400 coréen n'est pas arrêtée et peut faire l'objet d'adaptations. La version standard valoriserait une approche de rétention en cuve tandis qu'une version modifiée pour le marché européen disposerait d'un récupérateur à étalement refroidi de type EPR, mais disposé directement sous la cuve, ce qui présente des inconvénients car il n'est alors pas protégé d'agressions dues à l'effondrement ou à la projection de matériaux issus de la cuve.

Concernant le réacteur EPR, les concepteurs, sur la base des programmes BALI et SULTAN réalisés au CEA dans les années 90, ont conclu défavorablement à la robustesse d'une solution de rétention en cuve. Ils ont opté pour un récupérateur hors cuve, avec une première phase de collecte du corium dans le puits de cuve puis une seconde phase d'étalement dans un dispositif assurant un refroidissement par circulation d'eau sous le corium puis par débordement pour recouvrir la surface de la coulée.



Stratégie de rétention hors cuve après étalement du corium adoptée sur EPR

V. Rendre une stratégie de rétention en cuve robuste pour être étendue à des réacteurs de plus de 600 MWe

V.1 Les évolutions technologiques

La fusion d'un cœur de réacteur résultant de l'incapacité à assurer à un moment donné son refroidissement, il serait paradoxal de considérer qu'une injection ultérieure d'eau en cuve puisse être systématiquement garantie, en particulier pour les situations conduisant à la présence de corium au fond de la cuve au bout de quelques heures seulement.

Une approche ne nécessitant pas d'injection d'eau en cuve serait donc plus robuste. Pour atteindre cet objectif, il faudrait pouvoir évacuer des flux de chaleur plus élevés ou diminuer les flux de chaleur sur la face interne de la cuve.

Différents moyens pourraient être explorés pour améliorer les capacités d'un circuit de refroidissement externe :

- l'adaptation du circuit de refroidissement externe afin d'améliorer la circulation de l'écoulement de l'eau et de la vapeur autour de la cuve ;
- le recours à une circulation forcée en complément d'une circulation naturelle, en particulier en cas de cinétique rapide ;

- la mise en œuvre d'un revêtement de cuve à base de nanoparticules permettant de retarder le phénomène d'assèchement.

Certaines conceptions de réacteur mettent en jeu des masses métalliques importantes pour atténuer le phénomène de « focusing effect ». Cette approche fait toutefois abstraction des chargements thermiques transitoires. Une variante consisterait à utiliser des matériaux miscibles avec le corium, pour accroître la surface de la cuve en contact avec le corium et réduire les flux de chaleur. En l'absence de matériaux de dilution, l'augmentation de la surface de contact entre le corium et la cuve nécessiterait de revoir la conception du fond de cuve.

Si, en l'absence d'injection d'eau dans la cuve, le risque de défaillance de celle-ci ne pouvait pas être écarté, l'effort devrait porter sur des dispositions de nature à pratiquement éliminer le risque d'interaction entre le corium et l'eau. Un concept où la circulation du réfrigérant se ferait uniquement dans une enveloppe aménagée autour de la cuve pourrait être envisagé de manière à minimiser la quantité d'eau rencontrant le corium, en cas de rupture de la cuve. La gestion du corium se ferait ensuite hors de la cuve.

De l'analyse des concepts actuels de rétention en cuve, il ressort que les connaissances restent insuffisantes essentiellement dans deux domaines :

- les chargements transitoires résultant de la progression du corium du cœur vers le fond de la cuve, avec ou sans injection d'eau dans la cuve ;
- les incertitudes sur l'évaluation des chargements dynamiques pouvant résulter d'une explosion de vapeur.

L'augmentation des capacités de refroidissement externe de la cuve relève quant à elle plus d'actions d'adaptation, de développements technologiques ou de travaux de qualification à l'échelle 1 des circuits de refroidissement.

V.2 Les apports attendus de la recherche : stratégie scientifique de l'IRSN

L'IRSN vise à disposer des bases scientifiques lui permettant d'évaluer les stratégies de gestion d'un accident avec fusion du cœur et plus particulièrement la gestion des appoints d'eau. L'atteinte de cet objectif nécessite le développement et la qualification de modèles réduisant les incertitudes actuelles ainsi que l'amélioration du réalisme des simulations réalisées.

Pour ce faire, l'IRSN a engagé un programme de recherche portant sur trois axes :

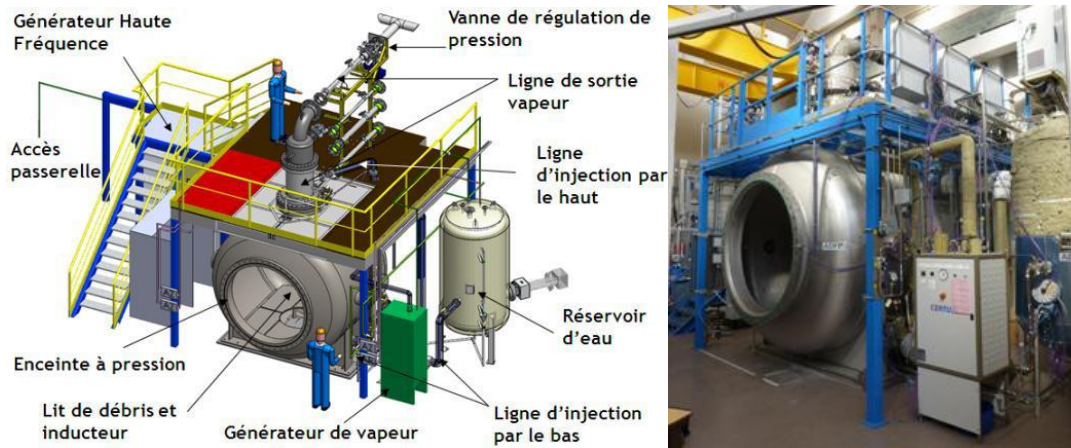
- le renoyage d'un cœur dégradé et la possibilité de refroidir un lit de débris de combustible dans la cuve ;
- les configurations des coulées de corium dans le fond de la cuve ;
- les mécanismes liés à l'interaction entre le corium et l'eau.

Concernant le premier axe de recherche, les travaux concernent plus particulièrement :

- la modélisation des caractéristiques géométriques des différentes configurations possibles de lits de débris (porosité, surfaces d'échange, perméabilité...) ;

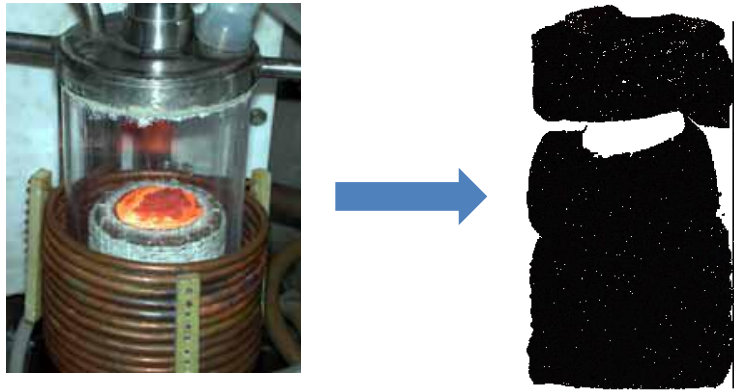
- la modélisation des phénomènes thermohydrauliques susceptibles d'être rencontrés lors d'un renoyage pour ces différentes configurations ;
- la modélisation des phénomènes d'oxydation des mélanges oxyde-métal de corium et de production de gaz incondensables ;
- la réalisation d'études d'impact du couplage de l'ensemble des phénomènes.

Le développement des modèles et leur qualification s'appuient notamment sur les essais réalisés dans l'installation à petite échelle PRELUDE et ceux actuellement en cours de réalisation sur l'installation PEARL dans le cadre du programme expérimental analytique sur le renoyage de lits de débris (PROGRES) mené par l'IRSN.



Installation PEARL dédiée à l'étude du renoyage des lits de débris

Concernant le deuxième axe de recherche, l'IRSN s'intéresse plus particulièrement aux cinétiques de transition entre les couches d'oxyde de combustible et de matériaux métalliques du fait notamment de l'apparition de croûtes aux interfaces. Les expériences à ce sujet sont conduites dans le cadre du programme CORDEB (CORium-DEBris) réalisé par l'Alexandrov Research Institute of Technology à Saint-Petersbourg pour le compte de l'IRSN, d'EDF, d'AREVA et du CEA. Le programme CORDEB comporte la réalisation d'une quinzaine d'expériences utilisant des matériaux simulants dans différentes configurations visant à mettre en évidence et à permettre la quantification des principaux phénomènes impliqués : séparation physico-chimique des phases, inversion des couches par instabilité turbulente, interactions entre les débris et les couches ...



Expérience du programme CORDEB réalisée pour étudier les cinétiques de stratification des bains de corium

Enfin, concernant le dernier axe de recherche, l'activité est fédérée au sein du projet ANR-RSNR « ICE », traitant de l'interaction entre le corium et l'eau, et repose sur les conclusions du programme OCDE SERENA 2. Les travaux concernent :

- les mécanismes intrinsèques de fragmentation du jet, moteur de l'interaction ;
- l'impact de l'oxydation et de la solidification des matériaux ;
- les processus de montée en pression en phase d'explosion ;
- les effets tridimensionnels (jets non verticaux, coulées décentrées...).

Les trois axes de recherche comprennent des activités expérimentales ainsi que des actions d'interprétation et de modélisation.

Plus globalement, sur le thème de la rétention du corium en cuve, l'IRSN coordonne une proposition de projet dans le cadre de l'appel d'offres européen H2020. Ce projet, qui associe plus de 20 partenaires, vise à prendre en compte l'ensemble des problématiques scientifiques concernées. Pour sa part, l'IRSN prolongera, dans ce cadre, ses travaux sur le refroidissement de lits de débris pour traiter le refroidissement de zones compactes environnées de débris. Il bénéficiera des travaux menés par les autres partenaires qui porteront notamment sur le refroidissement externe de la cuve (incluant des développements technologiques) et la résistance mécanique d'une cuve partiellement ablatée. Un volet important du projet porte sur la réalisation de calculs d'inter comparaison pour différents concepts et différents réacteurs, dans l'objectif de définir une méthodologie partagée permettant d'évaluer la robustesse d'une solution de rétention en cuve.

VI. Conclusion

Pour les réacteurs dont la puissance ne dépasse pas 600 MWe, les connaissances actuelles permettent de retenir une stratégie avec rétention du corium dans la cuve, même en l'absence d'injection d'eau dans la cuve, sous réserve que la géométrie de la cuve et la conception du circuit de refroidissement externe soient adaptées.

Au-delà de ce niveau de puissance, en l'état actuel des connaissances, la capacité de refroidissement du corium en cuve ne peut pas être démontrée pour l'ensemble des situations

accidentelles et les risques de défaillance de la cuve sont d'autant plus importants que la puissance du réacteur est élevée, ce qui augmente les risques d'explosion de vapeur entre le corium et l'eau du système de refroidissement externe.

Une stratégie de maintien du corium en cuve pour des réacteurs de puissance supérieure à 600 MWe nécessiterait des efforts de R&D, voire des évolutions technologiques, d'autant plus importants que la puissance du réacteur est élevée, **avec une démonstration de sûreté difficile à établir, compte tenu de la variété des scénarios à couvrir et de la complexité des phénomènes physiques à considérer.**

Pour sa part, l'IRSN a engagé un certain nombre de travaux de recherche en vue de renforcer ses connaissances afin d'être à même d'évaluer la robustesse d'une solution de rétention d'un corium dans la cuve d'un réacteur, qui pourrait être proposée par les exploitants ou les concepteurs pour des réacteurs existants ou dans le cadre de nouveaux concepts de réacteur.