

Chapitre 4

Recherches sur les accidents de réactivité

Dans un réacteur à eau sous pression, l'accident de réactivité (en anglais *Reactivity Injection Accident* ou RIA) le plus sévère retenu pour la conception et le dimensionnement du réacteur en termes d'évolution incontrôlée de la réaction nucléaire est l'éjection d'une grappe de commande ; il s'agit de l'un des accidents classés dans la 4^e catégorie des conditions de fonctionnement. L'objectif de sûreté est d'assurer la refroidissabilité du cœur pour éviter sa fusion, en vérifiant aussi que cet accident serait sans effet sur l'intégrité de la cuve et du circuit primaire.

En cas de rupture du mécanisme de grappe, l'éjection de la grappe résulte de la différence de pression qui existe entre le circuit primaire (à 155 bars) et l'enceinte de confinement (à la pression atmosphérique). Cette éjection violente entraîne un emballement local de la réaction nucléaire pendant quelques dizaines de millisecondes (« pulse » de puissance), provoquant une augmentation rapide de la température du combustible. Les contre-réactions neutroniques limitent le transitoire de puissance avant l'arrêt automatique du réacteur (chute des grappes de commande intactes) qui intervient dans un second temps.

Un critère de sûreté spécifique relatif à l'éjection de grappe a été défini dans les années 1970 sur la base d'essais américains, limitant le « dépôt » d'énergie (enthalpie) dans le combustible (généralement exprimé en cal/g) lors du transitoire de réactivité. Mais au début des années 1990, l'accident de Tchernobyl, survenu à la suite d'un emballement de la réaction neutronique, et surtout l'accroissement progressif des taux de combustion des assemblages de combustible envisagé par les exploitants, ont conduit

la communauté scientifique internationale à s'interroger sur la validité du critère établi pour des taux de combustion modérés.

Dans ce contexte, des programmes de recherche ont été développés au Japon et en France, comprenant en particulier la réalisation par l'IPSN d'essais dans le réacteur CABRI. Ces programmes ont eu notamment pour objectif l'amélioration de la compréhension des phénomènes physiques pouvant conduire à une défaillance de l'étanchéité des gaines des crayons et à l'éjection de fragments de combustible dans le circuit primaire, une telle éjection étant susceptible de mettre en cause l'objectif de refroidissabilité du cœur.

Le rapport de l'OCDE cité en référence [1] présente un état des connaissances acquises en 2010 sur les RIA.

Deux modes de défaillance des gaines des crayons peuvent intervenir lors d'un RIA :

- la défaillance par interaction mécanique entre le combustible et les gaines, qui peut survenir dans les tout premiers instants de l'excursion de puissance (IPG³⁰ ou ImPG³¹, PCMI³² en anglais), le combustible chauffé brusquement se dilatant plus vite que la gaine encore froide ;
- à plus long terme (quelques centaines de millisecondes), la défaillance post-DNB³³ par un éclatement des gaines résultant de la dégradation du coefficient d'échange thermique gaine-fluide de refroidissement suivie d'une élévation rapide de la température des gaines, ainsi que de l'augmentation de la pression interne aux crayons à la suite du dégazage des gaz de fission initialement occlus dans le combustible.

Eu égard aux risques qui seraient induits par l'éclatement de gaines et la dispersion de combustible fragmenté [2] – pouvant entraîner une vaporisation de l'eau et un blocage du refroidissement des crayons –, l'U.S.NRC adopta en 1974, dans le *Regulatory guide* RG 1.77, la « valeur maximale conservatrice » de 280 cal/g d'UO₂ pour le dépôt d'énergie³⁴ (enthalpie) au cours d'un transitoire de puissance de type RIA. Cela visait à garantir un « endommagement minimal du cœur et la refroidissabilité du cœur à moyen et long termes ». La valeur retenue était déduite d'expériences réalisées avec du combustible non irradié et modérément irradié (jusqu'à 32 GWj/tU) dans le réacteur d'essai SPERT (*Special Power Excursion Reactor Tests* [1969–1970], en eau stagnante et à température ambiante). Toutefois, avec la poursuite d'expériences dans des conditions plus réalistes dans le réacteur PBF à l'INL (*Power Burst Facility* [1978–1980], eau circulante, conditions de température et de pression représentatives, mais seulement jusqu'à 6 GWj/tU), il apparut au début des années 1980 que la valeur de 280 cal/g n'offrait pas un conservatisme suffisant. Les critères furent donc revus à la baisse : en Europe, des valeurs de 220 cal/g pour du combustible vierge et 200 cal/g pour du combustible irradié furent adoptées.

30. Interaction pastille-gaine.

31. Interaction mécanique entre la pastille et la gaine.

32. *Pellet Cladding Mechanical Interaction*.

33. *Departure from Nucleate Boiling* ou crise d'ébullition

34. Valeur moyenne radiale.

Or l'augmentation des taux de combustion jusqu'à 52 GWj/tU, voire davantage, valeur envisagée³⁵ par quasiment tous les exploitants de centrales nucléaires au monde, dont EDF, peut conduire à dégrader les propriétés mécaniques des gaines en Zircaloy (voir le paragraphe 3.2) alors que le combustible, contenu à l'intérieur, a subi des modifications importantes du fait du fonctionnement du réacteur (fragmentation, augmentation de la quantité des gaz de fission occlus).

Pour examiner la validité du critère, l'IPSN a conduit dans le réacteur CABRI un programme de 14 essais (Cabri REP-Na, 1993–2002), réalisés avec du combustible provenant de centrales nucléaires et dont le taux de combustion était compris entre 33 et 76 GWj/tU. Le combustible pour quatre de ces essais était constitué de MOX³⁶ (mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium).

Comme cela a été indiqué au chapitre 2, le réacteur CABRI permet, grâce à la dépressurisation de barres préalablement remplies d'un gaz neutrophage (³He), de réaliser des pics de puissance représentatifs de ceux qui pourraient survenir lors d'un accident de réactivité dans un REP. Le crayon de combustible testé est placé dans un dispositif d'essai, introduit dans une cellule située au centre du réacteur. D'une longueur d'un mètre, la quasi-totalité des crayons étudiés lors du programme Cabri REP-Na ont été reconstitués à partir de crayons déchargés de réacteurs exploités par EDF. Un dispositif de visualisation en ligne du combustible (hodoscope), ainsi qu'un ensemble d'instruments plus conventionnels (mesures de débit, de température, de pression, mesures acoustiques) permettent de déterminer avec précision l'instant de rupture de la gaine, d'estimer la quantité de combustible dispersé et de mesurer l'onde de pression engendrée. L'installation CABRI ayant été utilisée jusqu'en 1992 pour réaliser des essais de sûreté concernant le combustible employé dans les réacteurs à neutrons rapides, elle était équipée d'une boucle en sodium. Ces essais furent donc réalisés avec du sodium circulant autour des crayons testés, ce qui a été jugé acceptable pour étudier les phénomènes essentiellement mécaniques se déroulant au cours des premières dizaines de milli-secondes de l'excursion de puissance, pendant lesquelles la température de la gaine est peu affectée.

Pour étudier les phénomènes survenant après les premières centaines de milli-secondes (assèchement et éclatement des gaines), ainsi que les conséquences sur les structures du réacteur en termes d'onde de pression d'une éventuelle dispersion de combustible dans le réfrigérant, l'IPSN a lancé un nouveau programme expérimental nécessitant une refonte de l'installation. Il s'agit du projet de l'OCDE/AEN intitulé *CABRI International Program* (CIP : 2000–2015), mené en partenariat avec EDF et de nombreux organismes de sûreté et industriels étrangers. Le programme prévoit 12 essais, dont deux ont été réalisés en 2002 dans l'ancienne installation avec des combustibles à très forts taux de combustion (75 GWj/tU). L'installation a ensuite subi de profondes modifications : renforcement de la tenue sismique de l'ensemble du réacteur, mise en place d'une nouvelle

35. Adoptée et autorisée dans des pays.

36. *Mixed oxyde fuel*.

cellule reliée à un circuit d'eau sous pression permettant de reproduire des conditions thermohydrauliques représentatives, remplacement de nombreux composants.

Il est à noter que deux essais du programme CIP sont prévus pour étudier tout particulièrement les phénomènes « post-rupture » (CIP3-1 et CIP3-2). Des essais sont aussi envisagés à faibles dépôts d'énergie sur des crayons avec gaine préalablement fragilisée pour un programme post-CIP. De tels essais permettraient en effet de conforter les critères d'énergie déposée en examinant si, même avec une fragilisation ou un défaut préexistant dans une gaine, la dispersion de combustible dans l'eau ne conduirait pas à entraver la refroidissabilité du cœur³⁷.

Le CEA a réalisé pour le compte de l'IPSN (puis de l'IRSN) et d'EDF des essais à caractère analytique concernant le comportement mécanique de gaines prélevées sur des crayons déchargés de centrales (programme PROMETRA³⁸ mis en œuvre au centre d'études de Saclay) et les phénomènes de caléfaction lors de l'échauffement rapide d'une paroi (détermination du flux de chaleur critique en régime transitoire – programme PATRICIA mis en œuvre au centre d'études de Grenoble).

D'autres programmes réalisés à l'étranger avec des combustibles à taux de combustion élevés sont à mentionner ici :

- les essais réalisés dans les réacteurs russes IGR (*Impulse Graphite reactor*) (47 à 49 GWj/tU, de 1990 à 1992) et BGR (47 à 60 GWj/tU, de 1997 à 2000) ;
- les essais (une soixantaine) réalisés dans le réacteur japonais NSRR (*Nuclear Safety Research Reactor*³⁹) de JAEA (combustibles REP, BWR (*Boiling Water Reactor*) et MOX, couvrant un spectre de taux de combustion de 20 à 77 GWj/tU, de 1975 à 2011).

En tout, près de 140 essais en réacteur ont été réalisés sur des combustibles ayant un taux de combustion élevés. L'analyse des résultats montre que le combustible peut se disperser dans le réfrigérant à des niveaux d'énergie déposée bien inférieurs à la valeur du critère (200 cal/g d'UO₂), soit vers 120 cal/g, dès lors que le taux de combustion excède 40 GWj/tU. Cette dispersion se produit à la suite d'une rupture brutale de la gaine qui s'explique par :

37. Il s'agit d'une question que l'IPSN avait déjà posée de façon similaire dès le début des années 1980 lors des instructions techniques relatives au réacteur SUPERPHÉNIX pour le cas de la remontée intempestive de barre de commande, d'autant plus que cet événement était alors étudié comme une condition de fonctionnement de 2^e catégorie.

38. Propriétés mécaniques en transitoire.

39. Réacteur piscine de type TRIGA (*Training, Research, Isotopes, General Atomics*) conçu et fabriqué par General Atomics, en service depuis 1975. L'excursion de puissance est produite par l'éjection rapide de barres absorbant les neutrons. La nature du combustible, un alliage d'uranium et d'hydrure de zirconium enrichi à environ 20 % en uranium 235 fait que l'excursion est rapidement arrêtée. La largeur des pics de puissance est assez étroite (de 4,4 à 7 ms à mi-puissance) alors que, dans le réacteur CABRI, le réglage des vannes de dépressurisation des barres transitoires permet d'ajuster la largeur du pic de dix à quelques centaines de millisecondes.

- les contraintes exercées par le combustible dont le volume tend à augmenter à la suite de son échauffement (dilatation thermique et pressurisation interne par les gaz de fission), sachant que le jeu interne initial entre le combustible et la gaine est rattrapé dès que le taux de combustion excède quelques dizaines de GWj/tU ;
- la réduction des propriétés mécaniques de la gaine à la suite de la formation d'hydrures de zirconium qui la fragilise ; ces hydrures résultent de la diffusion à l'intérieur de la gaine d'une partie de l'hydrogène libéré par la décomposition de l'eau à la surface de la gaine lors de son séjour en centrale.

Mais les essais ont aussi montré la grande sensibilité des résultats à la nature du matériau de gainage. Les plus mauvais résultats ont été obtenus avec le Zircaloy-4 : le crayon gainé avec du Zircaloy-4 utilisé lors de l'essai Cabri REP-Na 1 (64 GWj/tU) présentait des traces de desquamation⁴⁰ de la couche externe de zircone formée lors de son séjour en réacteur. Il a rompu pour un accroissement d'enthalpie de seulement 30 cal/g d'UO₂ et environ 2 % du combustible s'est dispersé dans le sodium. Les alliages développés plus récemment (Zircaloy « bas étain », ZirloTM, M5TM) sont moins sensibles à l'hydruration et offrent une meilleure résistance, même à des taux de combustion élevés.

Seuls 13 essais ont été réalisés dans le monde avec du combustible MOX ; les résultats des essais réalisés dans le cadre du programme Cabri REP-Na suggèrent qu'à énergie identique, la gaine serait plus sollicitée et que, en cas de rupture de celle-ci, la quantité de combustible dispersée serait plus importante. Les mécanismes qui pourraient expliquer cette différence de comportement ne sont pas encore clairement identifiés et d'autres expériences sont prévues dans le cadre du *CABRI International Program* pour les étudier.

JAEA a également lancé en 2010 le programme international de recherche ALPS-II (*Advanced Light water reactor Performance and Safety-II*) dans le réacteur NSRR pour approfondir les connaissances dans le domaine des combustibles à taux de combustion élevé et des MOX. Il fait suite à un premier programme ALPS réalisé de 2002 à 2010, qui a comporté 14 essais sur des combustibles à taux de combustion élevés (de 67 à 77 GWj/tU) et des combustibles MOX (45 à 59 GWj/tU).

Les essais réalisés dans le réacteur NSRR utilisent une capsule instrumentée acceptant des crayons reconstitués de 120 mm de hauteur de combustible ; un seul crayon est testé lors d'un essai et la gaine est entourée d'eau stagnante qui dans tous les essais réalisés jusqu'à ceux du programme ALPS était initialement à température et pression ambiantes. L'instrumentation permet de mesurer les températures de la gaine et du réfrigérant, de détecter l'instant de rupture de la gaine et de mesurer l'énergie mécanique développée lors de la dispersion du combustible et de la vaporisation de l'eau.

Pour le programme ALPS, JAEA a conçu une capsule dite à haute température (HT⁴¹) pouvant fonctionner à 280 °C et 7 MPa, conditions plus réalistes. Six essais ont été réalisés dans de telles capsules. Les résultats ont clairement montré l'effet de la température initiale de la gaine qui, plus fragile du fait notamment de la présence

40. La desquamation correspond à la perte localisée d'une partie de la couche d'oxyde de zirconium (zircone) qui se forme à la surface du crayon au cours de son séjour en réacteur.

41. *High temperature.*

d'hydrures de zirconium, se rompt à faible température à des niveaux d'énergie sensiblement inférieurs.

Le programme ALPS-II devrait comporter 12 à 14 essais réalisés avec des échantillons de crayons ayant servi dans des réacteurs européens (notamment, pour ce qui concerne la France, un crayon UO_2 de 76 GWj/tU provenant du réacteur n° 5 de la centrale de Gravelines et un crayon MOX de 61 GWj/tU provenant du réacteur B3 de la centrale de Chinon, tous deux gainés en alliage M5TM). La moitié des essais seront effectués dans une capsule HT. Le programme comporte également quatre à six essais à caractère analytique (essais *Fission Gas Dynamics* ou FGD), réalisés par JAEA en partenariat avec l'IRSN qui participe à la conception du dispositif expérimental, pour mesurer les quantités de gaz de fission relâchées lors d'une excursion de puissance par des combustibles provenant des réacteurs français et un combustible expérimental irradié jusqu'à 130 GWj/tU.

L'arrêt de tous les réacteurs japonais après l'accident de Fukushima a gelé ce programme de recherche.

Comme dans beaucoup d'autres domaines, la compréhension fine des phénomènes et la transposition des résultats expérimentaux à l'étude d'accidents de réactivité à l'échelle du réacteur nécessitent des logiciels de simulation. Le logiciel de simulation SCANAIR⁴² développé par l'IRSN permet de calculer les champs de températures et de contraintes dans le combustible et la gaine. Il calcule également les pressions engendrées par les gaz de fission à l'intérieur du combustible. Des travaux de recherche plus académiques sont également menés en parallèle avec le CNRS (laboratoire « sans mur » regroupant l'IRSN, le CNRS et l'Université de Montpellier, dénommé MIST⁴³) pour établir des lois de propagation de fissures à l'intérieur de gaines hydrurées et établir des critères de rupture.

La plus grande partie des pays exploitant des réacteurs à eau sous pression estiment qu'une évolution des critères relatifs au combustible est nécessaire à l'égard des accidents de type RIA et cofinancent des programmes expérimentaux visant à compléter les connaissances sur le comportement des combustibles (CIP [IRSN] et ALPS [JAEA]). En France, depuis le début des années 2010, des discussions sont menées entre l'IRSN, l'Autorité de sûreté nucléaire et EDF sur la proposition de ce dernier d'un « domaine de découplage » visant à garantir l'absence de rupture de gaine par interaction mécanique pastille-gaine en cas d'accident de réactivité, que les gaines soient desquamées ou non, décliné en termes :

- de taux de combustion moyen du crayon,
- d'épaisseur maximale (en moyenne azimutale) de la couche d'oxyde externe,
- de variation d'enthalpie,
- de largeur du pulse à mi-hauteur,
- de température maximale de gaine.

42. Système de codes pour l'analyse d'accidents d'insertion de réactivité.

43. Laboratoire de micromécanique et intégrité des structures.

Références

- [1] Nuclear Fuel Behaviour under Reactivity-initiated Accident (RIA) Conditions. State-Of-the-Art Report, OECD 2010, NEA No. 6847, 2010.
- [2] Nuclear Fuel Safety Criteria Technical Review, *Second Edition* – OECD 2012, NEA No. 7072, 2012.