

# Chapitre 1

## Introduction

---

La prévention des accidents susceptibles d'affecter une installation nucléaire et, dans une logique de défense en profondeur, la limitation de leurs conséquences reposent sur l'utilisation d'une approche robuste en accord avec l'état de l'art, le retour d'expérience et les réglementations, ainsi que sur la démonstration par l'exploitant de l'efficacité des dispositions et des mesures qu'il prend. Cette démonstration et son évaluation réalisée en France par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) – dans le cadre de ses missions d'expertise<sup>1</sup> – s'appuient sur un corpus de connaissances scientifiques qui s'est considérablement enrichi depuis près d'une quarantaine d'années de recherches et de développements associés (tout particulièrement en matière de logiciels de simulation).

**Le présent ouvrage vise à présenter un état de ces recherches et développements, menés par l'IRSN seul ou en collaboration, des enseignements qui en ont été tirés et qui ont bénéficié à la sûreté des réacteurs du parc électronucléaire français, ainsi que des travaux encore menés ou en projet pour améliorer ou acquérir de nouvelles connaissances.** Cet état n'a pas été établi avec un souci d'exhaustivité ; certains travaux de recherche et développement ne sont que cités ou évoqués succinctement à la fin du présent ouvrage. Par ailleurs, certains travaux de recherche qui y sont développés, tels que ceux relatifs aux risques sismiques, d'inondation et d'incendie, bénéficient à l'ensemble des installations nucléaires et pas seulement aux réacteurs électronucléaires.

Les réacteurs nucléaires sont des machines complexes et de grande taille. Le déroulement d'un accident se caractérise par l'interaction de nombreux phénomènes physiques complexes. Leur étude fait appel à des connaissances dans de nombreux domaines de la physique, tels que la neutronique, les transferts de chaleur, la mécanique

---

1. Définies dans le décret n° 2002-254 du 22 février 2002, puis n° 2016-283 du 10 mars 2016.

des fluides, la mécanique des structures, la métallurgie, la chimie sous rayonnement, etc. Dans ces conditions, il est évidemment impossible d'utiliser directement, à des fins de démonstration, les résultats des recherches expérimentales, effectuées le plus souvent à échelle réduite et de manière plus ou moins simplifiée. Aussi, est-il nécessaire de développer des modèles physiques sur la base de connaissances académiques ou d'expériences ciblées, aussi appelées expériences à effets séparés – voir le focus à la fin de cette introduction –, et d'intégrer ces modèles dans des logiciels de calcul permettant de simuler l'ensemble des phénomènes jugés essentiels à la bonne compréhension du déroulement de l'accident à l'échelle du réacteur.

Des expériences plus complexes, se rapprochant autant qu'il est possible des conditions réelles mais à échelle intermédiaire, aussi appelées expériences intégrales – voir également le focus – permettent d'évaluer la pertinence des calculs réalisés à l'aide de ces logiciels de simulation. Le cas échéant, ces expériences mettent en évidence des domaines où des recherches sont encore nécessaires pour compléter ou approfondir les connaissances. Des accidents tels que celui qui s'est produit aux États-Unis le 28 mars 1979 dans le réacteur n° 2 de la centrale de Three Mile Island (TMI), ainsi que celui survenu au Japon à la suite du séisme du 11 mars 2011 dans les réacteurs de la centrale de Fukushima Daiichi, ont aussi fourni des données uniques. Bien qu'incomplètes par manque d'instrumentation, elles contribuent pour autant à l'évaluation de la capacité des logiciels de simulation à prédire le déroulement d'accidents réels. Par ailleurs, l'accident du réacteur n° 4 de la centrale de Tchernobyl, survenu le 26 avril 1986, a conduit à s'interroger sur l'adéquation des modèles et donc l'aptitude des logiciels à prédire les rejets radioactifs des centrales occidentales dans le cas hypothétique d'une fusion de cœur et sur la validité des critères de sûreté adoptés jusqu'alors à l'égard des accidents de réactivité.

Si au cours des 40 dernières années des progrès considérables ont été réalisés dans la connaissance des phénomènes mis en jeu, l'évolution des conditions d'exploitation des réacteurs, l'utilisation de technologies innovantes et la recherche d'approches scientifiques plus précises, le tout développé dans un contexte de compétition industrielle toujours plus vive, font qu'il est toujours nécessaire d'approfondir certaines connaissances en matière de sûreté nucléaire. En effet, des hypothèses considérées comme prudentes ont souvent été prises lors de la conception et il est parfois nécessaire de vérifier et d'évaluer leur conservatisme et les marges réellement dégagées.

Par ailleurs, pour les réacteurs de nouvelle génération de type EPR (*European Pressurized Water Reactor*), la possibilité d'une fusion du cœur a été prise en compte dès le stade de leur conception, ce qui n'a pas été le cas pour les réacteurs mis en service au XX<sup>e</sup> siècle, même s'ils ont bénéficié par la suite d'améliorations pour prendre en compte ce risque. L'extension de la durée d'exploitation de ces derniers au-delà de 40 ans ne peut donc s'envisager sans une amélioration significative de leur niveau de sûreté en termes de prévention des accidents de fusion du cœur et de limitation de leurs conséquences, ce qui renforce le besoin de recherche dans ce domaine. Les évaluations complémentaires de sûreté (ECS) réalisées à la suite de l'accident de la centrale de Fukushima Daiichi ont souligné la nécessité de poursuivre les recherches sur les agressions externes initiatrices potentielles d'accidents de fusion du cœur, sur le risque

et les conséquences d'explosions d'hydrogène ainsi que sur la filtration des rejets radioactifs.

En France, les principaux acteurs de la recherche en sûreté nucléaire sont l'IRSN, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) et l'exploitant Électricité de France (EDF), ainsi que dans une certaine mesure, le concepteur AREVA (Framatome avant 2006). L'approfondissement de la compréhension des phénomènes élémentaires implique également le monde de la recherche académique (universités, écoles d'ingénieurs, CNRS<sup>2</sup>).

S'il incombe à l'exploitant de fournir à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) les bases techniques utilisées dans ses démonstrations de sûreté, y compris les résultats des recherches effectuées en support, il est primordial que l'IRSN conduise également ses propres recherches. En effet, elles permettent à l'Institut de développer et de maintenir ses compétences sur des thématiques scientifiques complexes dont la maîtrise est cruciale pour assurer la pertinence et l'indépendance de son expertise de ces démonstrations, et d'être force de propositions pour l'avancée de la sûreté. L'Institut réalise dans ses laboratoires ou fait réaliser dans ceux de ses partenaires (au CEA notamment) – ou encore bénéficie de la réalisation par des partenaires – des programmes de recherche expérimentale et développe dans la mesure du possible ses propres modèles et logiciels de simulation. Il assure ou s'assure de la validation des logiciels de simulation indispensables à ses activités de recherche et d'études en soutien à ses expertises.

Les connaissances ainsi acquises et les logiciels de simulation développés et validés permettent également à l'Institut d'apporter un appui scientifique et technique aux pouvoirs publics en cas de crise. C'est ainsi que l'Institut a été en mesure d'informer les pouvoirs publics, le public et les médias de manière pertinente sur les événements qui se déroulaient dans la centrale de Fukushima Daiichi.

Certaines recherches peuvent également permettre à l'Institut de préciser ou consolider son questionnement technique sur des sujets qui pourraient contribuer à améliorer notablement la sûreté, par exemple en matière de contrôle non destructif des circuits et composants des réacteurs.

Une spécificité de la recherche en sûreté nucléaire est le délai, en général relativement long, nécessaire à l'obtention de résultats utilisables pour l'expertise (par exemple environ dix ans pour les recherches impliquant l'utilisation d'un réacteur nucléaire de recherche ou nécessitant la conception d'un dispositif expérimental innovant au plan technologique). Cela est lié à la complexité des dispositifs d'expérimentation à concevoir et à mettre en œuvre – notamment ceux qui doivent être installés dans des réacteurs nucléaires de recherche – et aux délais des examens post-mortem (ou post essais) en laboratoires spécialisés, tout particulièrement lorsque de la matière radioactive a été mise en œuvre au cours des essais. Il importe donc d'anticiper suffisamment tôt les besoins en connaissance et en logiciels de simulation. Pour les exploitants et les experts de l'IRSN, cette anticipation est primordiale pour être prêts aux grands rendez-vous de la sûreté des installations tels que les réexamens périodiques de sûreté des réacteurs ou

---

2. Centre national de la recherche scientifique.

l'examen des conditions de sûreté d'une augmentation de la durée d'exploitation des réacteurs au-delà de 40 ans (projet « durée de fonctionnement » ou DDF d'EDF), etc.

Du fait de leurs coûts, nombre de ces recherches, notamment expérimentales, sont conduites dans un cadre coopératif réunissant des industriels, des organismes équivalents à l'IRSN à l'étranger et l'IRSN, chaque partenaire exploitant librement les résultats de ces recherches.

L'IRSN prend part, en partenariats, à plus d'une dizaine de projets retenus par l'Agence nationale de la recherche (ANR), notamment dans le cadre de l'appel à projets « Recherches en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection » lancé à la suite de l'accident de Fukushima. Mais la coopération en matière de recherche ne se limite pas à la France. Comme nous le verrons par la suite, les principaux pays qui ont conçu et construit des réacteurs nucléaires électrogènes (États-Unis, Canada, Japon, Allemagne, Royaume-Uni, Suisse, Russie, etc.) ont conduit et conduisent encore des programmes de recherche en sûreté nucléaire. Grâce à des accords bilatéraux ou multilatéraux, l'IRSN bénéficie du financement de partenaires internationaux pour la plupart de ses programmes de recherche et, de manière symétrique, a accès aux résultats des programmes réalisés à l'étranger auxquels il contribue financièrement.

L'Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques<sup>3</sup> (OCDE/AEN) joue un rôle très important en « *aidant ses pays membres à maintenir et à approfondir, par l'intermédiaire de la coopération internationale, les bases scientifiques, technologiques et juridiques indispensables à une utilisation sûre, respectueuse de l'environnement et économique de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques* ». Elle fait émerger des consensus d'experts sur l'état des connaissances (rapports du type *State-Of-the-Art Report* ou SOAR), les lacunes à combler et les priorités concernant les recherches à mener. Elle organise au plan international des exercices d'intercomparaison (benchmarks), permettant de confronter les différents logiciels de simulation avec des résultats d'expérience (*International Standard Problems* ou ISP), exercices toujours très riches d'enseignements. Elle facilite également le montage de projets de recherche internationaux (*Joint Projects*) proposés par l'un de ses membres – en agrégeant d'autres membres partenaires – permettant de réunir les financements nécessaires et ainsi de faire progresser les connaissances dans des domaines où elles sont jugées insuffisantes. Dans le cadre des activités de l'OCDE/AEN, l'IRSN s'implique tout particulièrement dans le Comité sur la sûreté des installations nucléaires (CSIN) (*Committee on the Safety of Nuclear Installations* ou CSNI) – dont la mission est d'aider les pays membres à maintenir et à développer les connaissances scientifiques et techniques nécessaires pour évaluer la sûreté des réacteurs nucléaires et des installations du cycle du combustible – et plus directement dans ses différents groupes de travail sur :

- l'évaluation des risques (*Working Group on Risk Assessment* ou WGRISK),
- la sûreté du combustible (*Working Group on Fuel Safety* ou WGFS),
- l'analyse et la gestion des accidents (*Working Group on Analysis and Management of Accidents* ou WGAMA),

---

3. Au 1<sup>er</sup> janvier 2015, l'AEN comptait 31 pays membres d'Europe, d'Amérique du Nord et de la région Asie-Pacifique.

- l'intégrité et le vieillissement des composants et des structures (*Working Group on Integrity and Ageing of Components and Structures* ou WGIAGE),
- les facteurs humains et organisationnels (*Working Group on Human and Organisational Factors* ou WGHOFF),
- la sûreté du cycle du combustible (*Working Group on Fuel Cycle Safety* ou WGFCSS),
- les événements externes (*Working Group on External Events* ou WGEV),
- les systèmes électriques de puissance (*Working Group on Electrical Power Systems* [WGELE]).

La Commission européenne contribue également, pour une part non négligeable, au financement de projets de recherches et de développements internationaux en sûreté nucléaire. Des appels à projets autour de thématiques jugées prioritaires par la Commission sont lancés dans le cadre du volet Euratom des Programmes cadres pour la recherche et le développement (PCRD) pluriannuels, en place depuis 1984. Ils sont conduits dans un cadre coopératif rassemblant le plus souvent industriels, exploitants de centrales nucléaires, organismes d'expertise et laboratoires de recherche.

Il est aussi à noter que l'IRSN est impliqué dans des instances de niveau européen ayant pour mission d'orienter la recherche prénormative dans différents domaines (mécanique des structures métalliques et de génie civil, logiciels de contrôle-commande).

Créée en 2007, la « plateforme technologique » européenne SNETP (*Sustainable Nuclear Energy Technology Platform*) – qui regroupe des représentants de l'industrie nucléaire, de la recherche, des organismes de sûreté, des associations et des ONG<sup>4</sup> – a pour objectif d'élaborer une vision commune européenne de la contribution que peut avoir la fission nucléaire dans une transition vers une énergie à bas carbone d'ici à 2050. Dans ce cadre, la SNETP a publié divers documents dont un *Strategic Research Agenda* (janvier 2009) et un *Strategic Research and Innovation Agenda* (février 2013), qui prend en compte, entre autres, un certain nombre de problématiques de sûreté en rapport avec les réacteurs électronucléaires à eau de générations II et III, ainsi qu'un document spécifique *Identification of Research Areas in Response to the Fukushima Accident* (janvier 2013). Ces documents constituent des supports à la Commission européenne pour l'établissement de ses Programmes cadres de recherche et de développement. Il est à noter que depuis 2012, les acteurs (hormis les ONG) de la « plateforme technologique » SNETP pour les réacteurs de générations II et III se sont associés à des organes (réseaux) déjà existants (SARNET [*Severe Accident Research NETWORK of excellence*] pour les accidents de fusion du cœur, NULIFE, ETSO, etc.), constituant l'association de droit belge NUGENIA (*NUclear GENeration II & III Association*) ; deux publications de cette association sont à citer : en octobre 2013, *NUGENIA Roadmap – Challenges & Priorities*, puis en avril 2015 *NUGENIA Global Vision*. L'IRSN s'implique fortement dans SNETP et NUGENIA.

---

4. Organisation non gouvernementale.

Nous allons maintenant passer en revue les principaux programmes de recherche en sûreté, notamment ceux réalisés en France par l'IPSN puis l'IRSN, et les grandes lignes des enseignements qui en ont été tirés. Nous évoquerons également les principaux programmes de recherche menés dans les mêmes domaines à l'étranger, sans toutefois prétendre être exhaustif.

Il a été retenu de présenter en premier les recherches relatives à l'accident retenu pour le dimensionnement des équipements de sauvegarde d'un réacteur à eau sous pression (REP), à savoir la rupture d'une tuyauterie principale du circuit primaire (accident de perte de réfrigérant primaire ou APRP). Elles constituaient en effet la majeure partie des premières recherches en sûreté nucléaire, effectuées dès les années 1970, et avaient pour objectif de développer les connaissances et les outils de calcul permettant d'étudier cet accident.

Pour chacun des thèmes de recherches et de développements traités dans cet ouvrage – positionnés schématiquement dans la démonstration de sûreté « déterministe » sur la figure 1.1 en page suivante –, nous rappellerons les objectifs de sûreté visés pour la démonstration de sûreté et les questions ou difficultés que cette démonstration a pu soulever ou soulève encore en l'état actuel des connaissances.

En préalable, nous donnerons des éléments descriptifs de quelques-uns des instruments de recherche privilégiés de l'IRSN en matière de sûreté des réacteurs électrogènes, dont il sera fait état dans la suite de l'ouvrage.

Le choix a été fait de ne faire référence – en règle générale – qu'à quelques documents jugés les plus significatifs ou ayant l'avantage de constituer en eux-mêmes des synthèses de connaissances acquises sur certains des sujets traités (par exemple certains rapports de l'OCDE du type SOAR), eux-mêmes faisant généralement référence à de nombreux documents scientifiques.

## ► Des recherches inscrites dans le cadre d'orientations et de programmes à caractère stratégique

Les thèmes et sujets de recherche dont il est fait état dans cet ouvrage se sont inscrits dans le cadre d'orientations et de programmes scientifiques, de nature stratégique, visant à ce que l'IPSN, puis l'IRSN, soient en mesure d'asseoir leurs expertises et leurs interventions, y compris en situation de crise, sur les meilleures connaissances scientifiques. Ces orientations et programmes scientifiques ont été naturellement déterminés par les questions soulevées dans le cadre des analyses de sûreté, par l'évolution de la conception des réacteurs, par les enseignements tirés du retour d'expérience de leur exploitation (notamment des incidents), par les accidents survenus (TMI, Tchernobyl et plus récemment, Fukushima Daiichi), et aussi par les résultats des travaux de recherche. L'IRSN rend dorénavant publique sa stratégie scientifique. Concernant plus directement la sûreté des réacteurs à eau sous pression, le document cité en référence [1], d'octobre 2015, l'évoque dans sept « questions scientifiques prioritaires » – dont l'une à caractère transverse concernant les aspects organisationnels et humains – correspondant à des thèmes et sujets abordés dans le présent ouvrage.

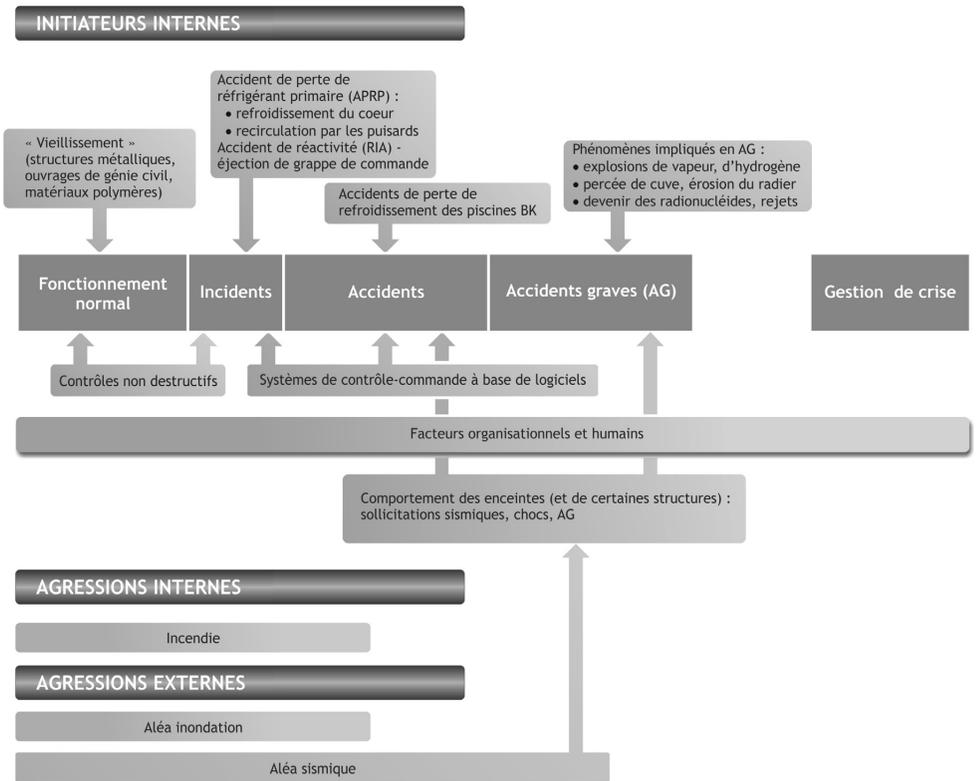


Figure 1.1. Thèmes de recherches et développements abordés (ou simplement évoqués) dans le présent ouvrage. © Georges Goué/IRSN.

#FOCUS.....

## **Expériences à effets séparés ou analytiques *versus* expériences intégrales**

Les expériences à effets séparés sont des expériences très bien instrumentées permettant d'étudier en détail un phénomène physique particulier dont on cherche à déterminer avec précision les lois de la physique qui le gouvernent. Des « plans d'expérience » permettent de faire varier systématiquement les paramètres physiques influants. Par exemple, la cinétique d'oxydation des gaines des crayons de combustible est déterminée en plaçant un échantillon de gaine dans une veine parcourue par un débit de vapeur d'eau à l'intérieur d'un four à température régulée. L'échantillon est suspendu à une balance et la mesure de l'augmentation de sa masse en fonction du temps, pour différentes températures, fournit l'information recherchée.

Les expériences intégrales au contraire privilégient la reproduction de la complexité des phénomènes étudiés, souvent au prix d'une mesure plus globale et moins précise des grandeurs physiques. Par exemple, l'étude de l'endommagement d'un assemblage de crayons de combustible consécutif à une perte de refroidissement a été réalisée en irradiant dans le réacteur PHEBUS une grappe de 20 crayons de combustible situés dans un canal alimenté par un débit de vapeur et isolé thermiquement. Les phénomènes physiques en jeu sont les réactions de fission nucléaire qui produisent un échauffement du combustible, l'oxydation des gaines au-delà d'une certaine température qui consomme de la vapeur d'eau, libère de l'hydrogène et produit de la chaleur, et les transferts de chaleur dans la grappe par conduction, convection et rayonnement. Pour étudier les phénomènes, on ne dispose que de la mesure de la puissance du réacteur, du débit de vapeur alimentant le canal, de quelques mesures locales de température dans le combustible et le canal, ainsi que de la mesure de l'ensemble de l'hydrogène produit.

---

## **Référence**

- [1] La stratégie scientifique de l'IRSN, octobre 2015 : [http://www.irsn.fr/FR/IRSN/presentation/Documents/IRSN\\_Strategie-scientifique\\_2015.pdf](http://www.irsn.fr/FR/IRSN/presentation/Documents/IRSN_Strategie-scientifique_2015.pdf)