

# IRSN

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

*Faire avancer la sûreté nucléaire*

Didier Jacquemain, Coordinateur

## Les accidents de fusion du cœur des réacteurs nucléaires de puissance

État des connaissances



**edp sciences**

© IRSN 2013



Collection sciences et techniques

# Les accidents de fusion du cœur des réacteurs nucléaires de puissance

## État des connaissances

Ahmed Bentaïb, Hervé Bonneville, Gérard Cénérino,  
Bernard Clément, François Corenwinder, Michel Cranga,  
Gérard Ducros, Florian Fichot, Didier Jacquemain,  
Christophe Journeau, Vincent Koundy, Denis Leteinturier,  
Daniel Magallon, Renaud Meignen, Frédérique Monroig,  
Georges Nahas, Frédérique Pichereau, Emmanuel Raimond,  
Jean-Marie Seiler, Bruno Tourniaire, Jean-Pierre Van-Dorselaere

Didier Jacquemain, Coordinateur



**Illustration de couverture :** Radiographie de dispositifs d'essai Phébus-PF et vision d'artiste du cœur du réacteur de TMI-2 après fusion du combustible.

Imprimé en France  
ISBN : 978-2-7598-0972-1

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© IRSN 2013

# Préface

---

Ce nouvel ouvrage consacré aux accidents de fusion de cœur, dits graves, pouvant survenir dans des réacteurs à eau légère sous pression représente l'une des sommes de connaissances les plus complètes jamais réalisées sur ce sujet. Elles sont en outre présentées avec le plus grand souci de pédagogie, et je tiens à remercier tous les contributeurs à ce vaste projet cités dans l'avant-propos de l'ouvrage et notamment D. Jacquemain qui en a assuré la coordination.

L'ouvrage était bien avancé, mais encore incomplet, lorsqu'est survenue la catastrophe de Fukushima Daiichi, troisième accident grave ayant entraîné la destruction de trois réacteurs électronucléaires et la dispersion en mer et dans l'atmosphère de grandes quantités de matières radioactives. La question s'est alors posée de reporter ce projet à plus tard pour pouvoir prendre en compte les leçons de ces nouveaux événements majeurs. La décision fût rapidement prise de finaliser le livre dès que possible, considérant que les enseignements scientifiques détaillés de l'accident de Fukushima Daiichi ne seraient pas disponibles avant plusieurs années et qu'après tout, les connaissances disponibles au sein de l'IRSN sur la phénoménologie de ce type d'accident, et les modèles associés, avaient permis de conduire un sérieux travail d'expertise en temps réel de l'évolution de l'état des réacteurs.

En effet, depuis plus de trente ans, l'IRSN a entrepris d'étudier expérimentalement les phénomènes conduisant à la fusion d'un cœur de réacteur, ou consécutifs à cette fusion. En effet, considérée à l'origine (*i.e.* lors des premières conceptions de réacteurs de puissance, dans les années 1960) comme ne pouvant pas survenir compte tenu des dispositions de conception de nature à la prévenir (marges de dimensionnement, redondance des systèmes de sûreté permettant l'arrêt de la réaction en chaîne et l'évacuation de la puissance générée dans le cœur, etc.) la fusion du cœur n'a pas été prise en compte pour la conception des réacteurs, en termes de limitation de ses conséquences. La survenue de l'accident de Three Mile Island en 1979 aux États-Unis, a remis en question cette approche. Mais il fallait dès lors comprendre dans quelles conditions le combustible pouvait se dégrader dans un cœur, en particulier comment progressait sa fusion par défaut de refroidissement

jusqu'à la rupture du circuit primaire, de la cuve notamment. Puis comprendre comment les réactions chimiques ou de radiolyse pouvaient conduire à d'importants dégagements d'hydrogène et de nombreux produits de fissions plus ou moins volatils et toxiques.

Un ensemble d'expérimentations uniques au monde, prenant appui sur le réacteur Phébus construit par le CEA à Cadarache, fut alors lancé pour réaliser des essais de fusion de combustibles, à échelle réduite mais représentative des conditions réelles de fonctionnement d'un réacteur à eau sous pression. De cet imposant programme allaient naître des connaissances nouvelles, y compris un certain nombre de surprises par rapport à ce que la théorie avait prédit, puis l'élaboration de modèles intégrés dans des outils de calcul, validés sur ces essais, qui permettent de simuler ces phénomènes extrêmes dans le cas d'un réacteur à échelle réelle.

Les années passant, ces nouvelles connaissances sur les accidents graves conduisirent à adopter dans un certain nombre de pays des mesures concrètes d'amélioration de la sûreté des réacteurs de puissance existants ou en projet.

Un réseau international d'experts et de chercheurs piloté par l'IRSN, dénommé SARNET, coordonne désormais l'amélioration continue des connaissances, et aussi la qualité des modèles qui permettent de simuler les phénomènes dangereux dans différents types de réacteurs. Des expériences restent cependant nécessaires pour réduire les incertitudes sur certains phénomènes conditionnant de manière significative les conséquences, en particulier sanitaires, d'un accident grave ; mais sur la base des acquis du programme Phébus, celles-ci sont aujourd'hui conçues comme des essais analytiques, dits « à effets séparés », pour cibler le phénomène dont on souhaite affiner la connaissance : que se passe-t-il si on tente le « renoyage » d'un cœur fortement dégradé et partiellement fondu ? Comment se comporte le « corium », mélange agressif chimiquement et thermiquement de combustibles et de métaux fondus, une fois sorti de la cuve du réacteur ? Comment se comportent les différentes espèces chimiques plus ou moins volatiles d'iode et de ruthénium radioactifs produites en quantité à l'intérieur de l'enclume de confinement du réacteur – une question de première importance pour la radioprotection ?

L'IRSN et ses partenaires de recherche en France et dans le monde continueront de consacrer des efforts importants sur ces sujets au cours des années à venir. L'Institut a choisi depuis quinze ans de ne pas baisser la garde en matière de recherche sur les accidents graves. L'accident de Fukushima a malheureusement démontré qu'il avait raison. Toutes ces connaissances accumulées, et celles encore à venir, devraient être mises en pratique non seulement pour continuer à améliorer autant que faire se peut les réacteurs existants, mais aussi pour que l'industrie nucléaire du futur, pour les pays qui choisiront d'y recourir, développe enfin des réacteurs ne comportant plus ce risque inacceptable pour la plupart des sociétés humaines d'accidents conduisant à la contamination radiologique de portions de territoires potentiellement importantes. Puisse cet ouvrage contribuer à diffuser les connaissances existantes sur ce sujet important, à l'heure du renouvellement de génération de nombreux ingénieurs du secteur nucléaire, et à illustrer le bien-fondé de la poursuite des activités de recherche et d'innovation industrielle, clef essentielle de la poursuite des avancées indispensables en matière de sûreté nucléaire.

Jacques Repussard  
Directeur général de l'IRSN

# Liste des sigles

---

## Acronymes des institutions

AEAT : Atomic Energy Authority Technology, UK (Commissariat à l'énergie atomique en Angleterre)

AECL : Atomic Energy of Canada Limited (Énergie atomique du Canada Limitée, institut de recherche en sciences et techniques dans le nucléaire)

AEKI : Atomic Energy Research Institute, Budapest, Hongrie (Institut de recherche sur l'énergie atomique de Hongrie)

AEN : Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE (NEA : Nuclear Energy Agency, OECD)

AIEA : Agence internationale de l'énergie atomique, Vienne, Autriche

ANCCLI : Association nationale des comités et commissions locales d'information

ANL : Argonne National Laboratory, USA (Laboratoire national d'Argonne aux États-Unis)

ANR : Agence nationale pour la recherche

ASN : Autorité de sûreté nucléaire

AVN : Association Vinçotte nucléaire, Belgique

BARC : Bhabha Atomic Research Centre, Inde (Centre de recherche atomique de Bhabha en Inde)

BNL : Brookhaven National Laboratory, USA (Laboratoire national de Brookhaven aux États-Unis)

CCR : Centre commun de recherche (Commission européenne)

CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

CIPR : Commission internationale de la protection radiologique

CLI : Commission locale d'information

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

CSIN : Comité sur la sûreté des installations nucléaires de l'OCDE (CSNI : Committee on the Safety of Nuclear Installations, OECD)

EDF : Électricité de France

EPRI : Electric Power Research Institute, USA (Institut de recherche pour la production électrique aux États-Unis)

FAI : Fauske & Associates, Inc., USA

FzD : Forschungszentrum Dresden-Rossendorf, Allemagne (Laboratoire de recherche de Dresde en Allemagne)

FzK : Forschungszentrum Karlsruhe, Allemagne (Institut de technologie de Karlsruhe en Allemagne)

GRS : Gesellschaft für Anlagen - und Reaktorsicherheit, Allemagne (Société pour la sûreté des installations et des réacteurs nucléaires en Allemagne)

IAE-NNC-RK : Institute of Atomic Energy – National Nuclear Centre – Republic of Kazakhstan (Institut de l'énergie atomique - Centre nucléaire national de la République du Kazakhstan)

IBRAE : Nuclear Safety Institute of Russian Academy of Sciences (Institut de sûreté nucléaire de l'Académie des sciences russe)

IKE : Institut für Kernenergetik und Energiesysteme, Universität Stuttgart, Germany (Institut de technologie nucléaire et de systèmes énergétiques de Stuttgart en Allemagne)

INEL : Idaho National Engineering Laboratories, Idaho, États-Unis (Laboratoires nationaux d'ingénierie de l'Idaho aux États-Unis)

INL : Idaho National Laboratory, USA (Laboratoire national de l'Idaho aux États-Unis)

INSA : Institut national des sciences appliquées

IPSN : Institut de protection et de sûreté nucléaire

IREX : Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil

IRSN : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

ISS : Innovative Systems Software, USA (Société de systèmes de logiciels novateurs aux États-Unis)

ISTC : International Science and Technology Centre, CE (Centre international de sciences et de technologie dépendant de la Commission européenne)

JAEA : Japan Atomic Energy Agency (Agence de l'énergie atomique japonaise)

JAERI (ex-JAEA) : Japan Atomic Energy Research Institute (Agence de recherche de l'énergie atomique japonaise)

JNES : Japan Nuclear Energy Safety (Organisation de sûreté de l'énergie nucléaire japonaise)

JRC : Joint Research Centre (Centre commun de recherche, CE)

JSI : Josef Stefan Institute, Slovénie (Institut « Jozef Stefan » en Slovénie)

KAERI : Korea Atomic Energy Research Institute, Corée du Sud (Institut de recherche coréen sur l'énergie atomique)

KAIST : Korea Advanced Institute of Science and Technology, Corée du Sud (Institut supérieur de science et de technologie en Corée du sud)

KINS : Korea Institute of Nuclear Safety, Corée du Sud (Institut coréen de sécurité nucléaire)

KIT (ex-FzK) : Karlsruhe Institut für Technology, Allemagne (Institut de technologie de Karlsruhe en Allemagne)

KTH voir RIT

LUCH : Scientific Manufacturer Centre, Russie (Centre scientifique de manufacture en Russie)

MIT : Massachusetts Institute of Technology, USA (Institut de technologie du Massachusetts aux États-Unis)

NIIAR : Scientific Research Institute of Atomic Reactors, Russie (Institut de recherche scientifique sur les réacteurs nucléaires en Russie)

NITI : Aleksandrov Scientific Research Technological Institute, Saint-Pétersbourg, Russie (Institut Alexandrov de recherche scientifique technologique de Saint-Pétersbourg en Russie)

NRC-KI (ex-RRC-KI) : National Research Centre Kurchatov Institute, Moscou, Russie (Centre de recherche national – institut Kourtchatov de Moscou en Russie)

NUPEC : Nuclear Power Engineering Corporation, Japon (Corporation japonaise d'ingénierie de l'énergie nucléaire)

OCDE : Organisation de coopération et de développement économique (OECD : Organisation for Economic Co-operation and Development)

ORNL : Oak Ridge National Laboratory, USA (Laboratoire national d'Oak Ridge aux États-Unis)

PSI : Paul Scherrer Institute, Suisse (Institut Paul Scherrer en Suisse)

RIT (ex-KTH) : Royal Institute of Technology, Stockholm, Suède (Institut Royal de technologie de Stockholm en Suède)

RRC-KI : Russian Research Centre Kurchatov Institute, Moscou, Russie (Centre de recherche russe - institut Kourtchatov de Moscou)

SKI : Swedish Nuclear Power Inspectorate (Autorité de sûreté suédoise)

SNL : Sandia National Laboratory, USA (Laboratoire national de Sandia aux États-Unis)

UCLA : University of California, USA (Université de Californie de Los Angeles aux États-Unis)

UCSB : University of California, Santa Barbara, USA (Université de Californie à Santa Barbara aux États-Unis)

VTT : Technical Research Centre, Finlande (Centre de recherche technique en Finlande)

UJV : Nuclear Research Institute Rez, République Tchèque (Institut de recherche nucléaire en République Tchèque)

US NRC : United States Nuclear Regulatory Commission, USA (Commission nucléaire réglementaire des États-Unis)

### **Acronymes techniques**

AIC : Argent-Indium-Cadmium

AICC : combustion complète adiabatique et isochore

AES : alimentation électrique de secours

APRP : accident de perte de réfrigérant primaire

ARE : alimentation normale des générateurs de vapeur

ARTIST : Aerosol Trapping in a Steam-Generator (programme expérimental consacré à la rétention des aérosols dans un générateur de vapeur réalisé par l'institut PSI)

ASG : alimentation auxiliaire de secours des générateurs de vapeur

ATWS : Anticipated Transient Without Scram (arrêt automatique du réacteur sans chute de barres ou transitoires avec échec de l'arrêt automatique)

BAN : bâtiments des auxiliaires nucléaires

BAS : bâtiments des auxiliaires de sauvegarde

BIP : Behaviour of Iodine Project (programme international consacré au comportement de l'iode réalisé sous l'égide de l'OCDE)

BK : bâtiment combustible

BL : bâtiment électrique

BR : bâtiment réacteur

BWR : Boiling Water Reactor (réacteur à eau bouillante)

CANDU : CANada Deuterium Uranium reactor (réacteur à eau lourde)

CFD : Computational fluid dynamics (calcul de mécanique des fluides)

CHF : Critical Heat Flux (flux de chaleur critique)

CHRS : Containment Heat Removal System (système d'aspersion du réacteur EPR dédié aux accidents graves)

CODIR-PA : Comité directeur pour la gestion de la phase post-accidentelle d'un accident nucléaire

CRP : Coordinated Research Program on Severe Accident Analysis, AIEA (programme de recherche coordonné sur l'analyse des accidents graves)

CSARP : Cooperative Severe Accident Research Program (programme de recherche commun sur les accidents graves coordonné par l'US NRC)

CSD : combustible sévèrement dégradé

DAC : décret d'autorisation de création d'une installation

DCH : Direct Containment Heating (échauffement direct des gaz de l'enceinte de confinement)

E3B : extension de la troisième barrière de confinement

EAS : aspersion de secours de l'enceinte

ECS : évaluations complémentaires de sûreté

EDE : mise en dépression de l'espace entre les deux enceintes (réacteurs de 1 300 MWe, 1 450 MWe et EPR)

EDI : état dégradé de l'installation

EEE : espace entre enceintes (réacteurs de 1 300 MWe, 1 450 MWe et EPR)

ENACEEF : enceinte d'accélération de flamme, installation expérimentale du CNRS/ICARE d'Orléans

EPFH : évaluation probabiliste des facteurs humains

EPR : European Pressurized Water Reactor (réacteur européen à eau sous pression de génération III)

EPS : étude probabiliste de sûreté  
ETY : système de contrôle du taux d'hydrogène dans l'enceinte  
GAEC : guide d'action des équipes de crise  
GIAG : guide d'intervention en cas d'accident grave  
GV : générateur de vapeur  
H1 : accidents de perte totale de la source froide ou des systèmes associés  
H3 : accidents avec perte totale des alimentations électriques  
HTR : High Temperature Reactor (réacteur à haute température)  
ICB : interaction corium-béton (MCCI : Molten Core-Concrete Interaction en anglais)  
IRWST : In-containment Refueling Water Storage Tank (réservoir d'eau borée situé à l'intérieur de l'enceinte de confinement du réacteur EPR)  
IS : injection de sécurité  
ISBP : injection de sécurité à basse pression  
ISMP : injection de sécurité à moyenne pression  
ISHP : injection de sécurité à haute pression  
ISP : International Standard Problem (problème standard international)  
ISTP : International Source Term Program (programme de recherche international Terme Source)  
LHF : Lower Head Failure (défaillance de la partie basse de la cuve du réacteur)  
MOX : Mixed Oxide Fuel (combustible mixte  $UO_2 + PuO_2$ )  
NMA : niveau maximal de radioactivité admissible  
OLHF : Lower Head Failure (programme de recherche de l'OCDE consacré à l'étude de la défaillance de la partie basse de la cuve)  
ORSEC : plan d'organisation des secours  
PBMR : Pebble Bed Modular Reactor (réacteur modulaire à lit de boulets – réacteur à hautes températures – HTR)  
PCRD : Programme cadre pour la recherche et le développement de la Commission européenne  
PDS : pertes des sources électriques internes  
PF : produits de fission  
PPI : plan particulier d'intervention  
PTR : système de traitement et refroidissement de l'eau des piscines  
PUI : plan d'urgence interne  
PWR : Pressurized Water Reactor (réacteur à eau sous pression)  
RBMK : Reactor Bolchoï Molchnasti Kanalnyi (réacteur russe de grande puissance à tube de force)  
RCP : circuit primaire  
RCV : système de contrôle chimique et volumétrique  
RDP : réservoir de décharge du pressuriseur  
REB : réacteur à eau bouillante

REP : réacteur à eau sous pression  
RFS : règles fondamentales de sûreté  
RIS : système d'injection de sécurité  
RIS BP : système d'injection de sécurité à basse pression  
RNR : réacteur à neutrons rapides  
RRA : système de refroidissement du réacteur à l'arrêt  
RRI : système de refroidissement intermédiaire  
RTE : rupture de tuyauterie d'alimentation en eau des générateurs de vapeur  
RTGV : rupture de tubes de générateur de vapeur  
RTV : rupture de tuyauterie vapeur  
SARNET : Severe Accident Research NETwork of excellence (réseau d'excellence international sur les accidents de fusion du cœur)  
SEC : système d'eau brute secourue  
SERENA : Steam Explosion REsolution for Nuclear Applications (résolution de l'explosion de vapeur pour des applications nucléaires), programme de recherche de l'OCDE  
SMHV : séisme maximal historiquement vraisemblable  
SMS : séisme majoré de sécurité  
SOAR : State of the Art Report (rapport d'état de l'art)  
TAM : tampon d'accès des matériels  
TDD : transition déflagration détonation  
TGT : tube à gradient thermique  
TGTA-H2 : accident avec perte totale de l'alimentation en eau des générateurs de vapeur et échec du fonctionnement en mode « gavé-ouvert » (ou transitoires sur le circuit secondaire)  
TMI : Three Mile Island, États-Unis  
TMI-2 : réacteur n°2 de la centrale de Three Mile Island (États-Unis).  
TRCP : transitoires sur le circuit primaire  
UNGG : réacteur uranium naturel-graphite-gaz  
VCI : visite complète initiale  
VD : visite décennale  
V-LOCA : Loss of Coolant Accident (accidents de bipasse du confinement ou accidents de perte de réfrigérant primaire à l'extérieur de l'enceinte de confinement)  
VVER : Vodo-Vodianoï Energuetitcheski Reaktor (réacteur de puissance à caloporteur et modérateur d'eau russe)  
ZPP : zone de protection des populations  
ZST : zone de surveillance renforcée des territoires

# Avant-propos

---

Cet ouvrage de synthèse sur les accidents de fusion du cœur est un travail collectif qui a été rédigé en majeure partie par des auteurs de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), avec pour certains paragraphes des contributions d'auteurs du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA). Des experts de ces deux organismes et d'Électricité de France (EDF) ont également contribué à la relecture attentive des différents chapitres de l'ouvrage. Nous tenons ici à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de cet ouvrage.

Didier Jacquemain de l'IRSN a assuré la coordination du projet.

Ont contribué à la rédaction de l'ouvrage :

- pour les chapitres 1, 2, 3 et 9 : Didier Jacquemain ;
- pour le chapitre 4 : Gérard Cénérimo, François Corenwinder, Didier Jacquemain et Emmanuel Raimond de l'IRSN ;
- pour le chapitre 5 : Ahmed Bentaïb de l'IRSN (§ 5.2.2), Hervé Bonneville de l'IRSN (§ 5.1.4), Bernard Clément de l'IRSN (§ 5.5), Michel Cranga de l'IRSN (§ 5.3, 5.4.2 et 5.4.3), Gérard Ducros du CEA (§ 5.5), Florian Fichot de l'IRSN (§ 5.1.1, 5.1.2 et 5.4.1), Christophe Journeau du CEA (§ 5.4.3), Vincent Koundy de l'IRSN (§ 5.1.3), Daniel Magallon du CEA (§ 5.2.3), Renaud Meignen de l'IRSN (§ 5.2.1 et 5.2.3), Jean-Marie Seiler du CEA (§ 5.4.1) et Bruno Tourniaire du CEA (§ 5.3 et 5.4.2) ;
- pour le chapitre 6 : François Corenwinder, Denis Leteinturier, Frédérique Monroig, Georges Nahas et Frédérique Pichereau de l'IRSN ;
- pour le chapitre 7 : Bernard Clément (§ 7.3) et Didier Jacquemain (§ 7.1 et 7.2) ;
- pour le chapitre 8 : Jean-Pierre Van-Dorsselaere de l'IRSN.

Ont contribué activement à la relecture de parties de l'ouvrage dans leur domaine d'expertise :

- pour l'IRSN : Jean Couturier, Cécile Debaudringhien, Anna Duprat, Patricia Dupuy, Jean-Michel Evrard et Grégory Nicaise ;
- pour le CEA : Georges Berthoud et Étienne Studer ;
- pour EDF : François Andréo, Kresna Atkhen, Thierry Dagusé, Alain Dubreuil-Chambardel, François Kappler, Gérard Labadie et Andreas Schumm.

Randall O. Gauntt de l'US Nuclear Regulatory Commission (États-Unis) et Jonathan Birchley de l'institut Paul Scherrer (Suisse) ont validé le texte consacré à la description du logiciel de calcul MELCOR dans le chapitre 8.

Denis Boulaud, Bernard Chaumont, Bernard Clément, Richard Gonzalez, Didier Jacquemain, Daniel Quéniart, Jean Peltier, Frédérique Pichereau de l'IRSN et Michel Durin du CEA ont contribué par plusieurs relectures d'ensemble à la cohérence de l'ouvrage.

Georges Goué, Odile Lefèvre et Sandrine Marano de l'IRSN ont assuré les travaux préparatoires à l'édition de l'ouvrage.

Enfin, cet ouvrage n'aurait pas pu être réalisé sans l'investissement des directeurs scientifiques de l'IRSN Jean-Dominique Gobin et Michel Schwarz et du directeur général de l'IRSN Jacques Repussard.