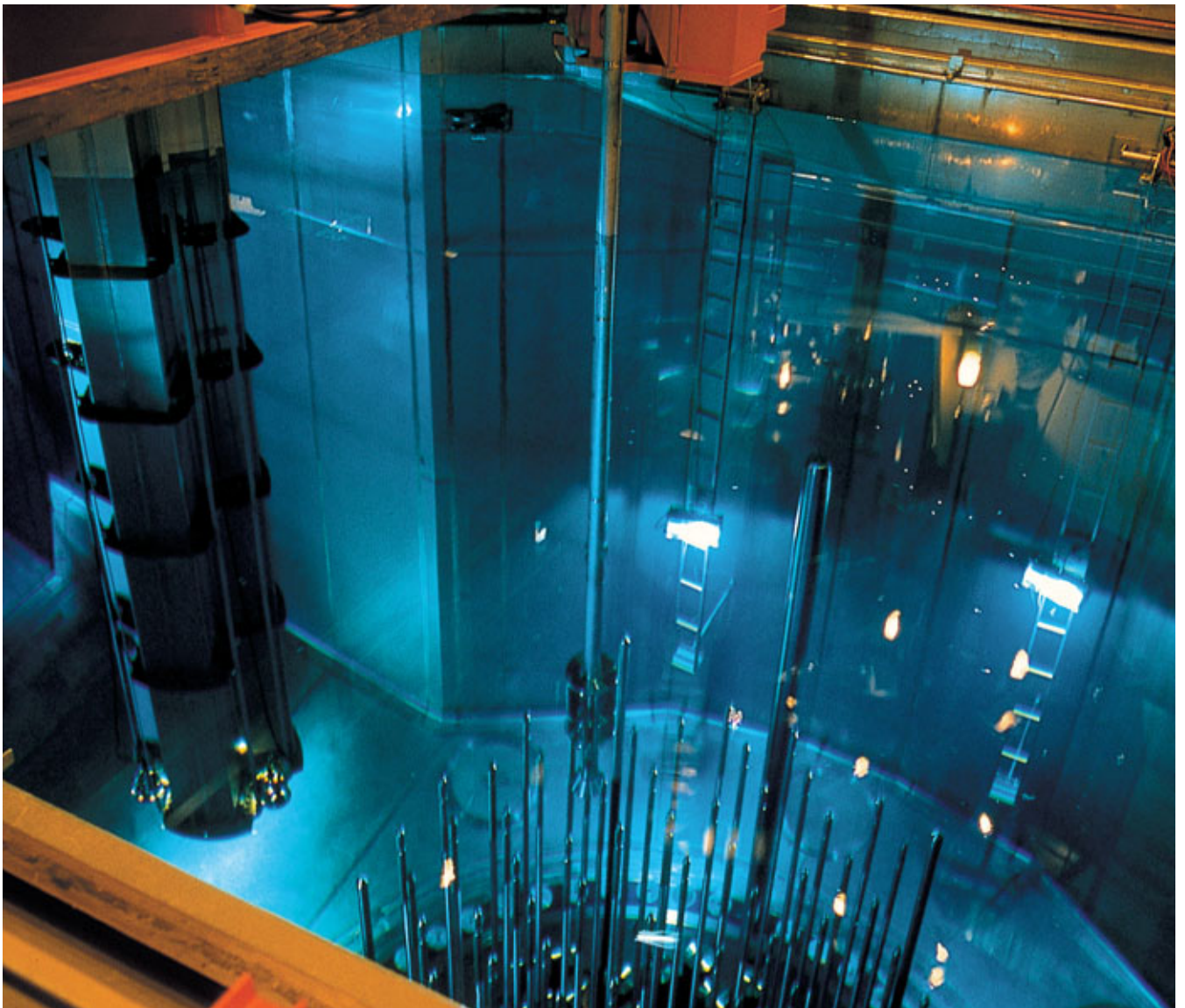


## II. PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET SÛRETÉ DES RÉACTEURS

### des réactions maîtrisées

La sûreté des réacteurs nucléaires repose sur la connaissance approfondie des phénomènes normaux, incidentels et accidentels. Ceux qui relèvent de la physique nucléaire et de la neutronique sont à cet égard fondamentaux, et interviennent dans les trois grands types de dysfonctionnement qui peuvent survenir : niveau de puissance trop élevé, difficulté à évacuer la puissance résiduelle et accident de criticité. Dans le cas d'une divergence incontrôlée comme dans celui d'un accident de criticité – lequel peut survenir aussi dans une installation autre qu'un réacteur où sont manipulées des matières radioactives en quantités suffisantes – des contre-réactions physiques bienvenues tendent intrinsèquement à enrayer le processus indésirable. Une évaluation toujours plus précise de la puissance résiduelle d'un réacteur arrêté, phénomène incontournable car lié à la décroissance radioactive des produits contenus dans le combustible irradié, permet d'autre part d'optimiser les moyens de son évacuation.



*Vissage des tiges de commande des grappes de contrôle dans le réacteur n° 1 de la centrale EDF de Civaux.*

C. Pauquet/Framatome

# RÉACTIONS NUCLÉAIRES ET CONTRE-RÉACTIONS

*L'affinement des données de base permet de définir avec un réalisme croissant les marges de sécurité d'un réacteur ou d'une autre installation nucléaire. C'est en particulier vrai pour les contre-réactions engendrées par les réactions nucléaires elles-mêmes, qui tendent à enrayer une évolution incontrôlée de la puissance. Cela l'est aussi pour la prise en compte de la puissance résiduelle d'un réacteur, qu'il faut pouvoir évacuer en toutes circonstances.*



*Accès au bâtiment du réacteur n° 2 de la centrale de Three Mile Island (Pennsylvanie). La fusion partielle du cœur du réacteur, en 1979, a mis en évidence le problème de l'évacuation de la puissance résiduelle.*



Les aspects directement liés à la physique nucléaire et à la neutronique sont essentiels dans l'évaluation de la sûreté des installations nucléaires, en situation normale, incidentelle ou accidentelle. Dans un souci de simplification, ce sont ces seuls phénomènes qu'examine le présent numéro de *Clefs CEA*, mais il est important de garder à l'esprit qu'à ces éléments s'ajouteraient, dans un scénario réel, tout un ensemble de phénomènes liés à la **thermohydraulique**, à la thermomécanique, à la physico-chimie, etc.

## Les principaux risques liés à la physique nucléaire

Le principal risque que présente une centrale nucléaire est le rejet de produits **radioactifs** en cas de rupture des "**barrières**" successives placées entre le cœur



## Les trois barrières, illustration du concept de “défense en profondeur”

D

La sûreté des centrales nucléaires est, en particulier en France, fondée sur la philosophie de la “défense en profondeur” qui s’organise autour de niveaux multiples de protection comprenant des barrières successives qui ramènent à un niveau extrêmement faible la probabilité qu’un accident puisse avoir des répercussions à l’extérieur de la centrale. L’idée est que chaque dispositif de sécurité doit *a priori* être considéré comme vulnérable et doit donc être protégé par un autre dispositif.

C’est ainsi que dans un réacteur à eau sous pression (REP) du type de

ceux qu’exploite EDF, la prise en compte du concept de défense en profondeur implique l’existence entre les corps potentiellement dangereux créés par la fission et l’extérieur de toute une série de barrières étanches et résistantes. Il suffit en effet de maintenir les produits radioactifs parfaitement confinés pour prévenir les conséquences d’un accident nucléaire sur la population et l’environnement.

Dans un REP, ces barrières sont au nombre de trois (encadré E, **Les principaux éléments d’un REP**).

La première est constituée par la gaine métallique du combustible, la

deuxième par l’enveloppe du circuit de refroidissement (dont la cuve, où se trouve le combustible, constitue une part essentielle) et la troisième par l’enceinte en béton, elle-même doublée dans les réacteurs les plus récents.

À noter que cette dernière barrière fait totalement défaut dans les réacteurs de la filière russe RBMK à laquelle appartiennent ceux de la centrale de Tchernobyl. Cette lacune a ainsi permis la dissémination dans l’environnement des radionucléides relâchés par l’accident du réacteur n°4, le 26 avril 1986.

du réacteur et l’environnement (encadré D, **Les trois barrières, illustration du concept de “défense en profondeur”**). Fondamentalement, ce risque est lié au dégagement d’énergie essentiellement imputable aux réactions nucléaires, d’une part aux **fissions** et d’autre part à la décroissance radioactive des éléments présents dans le combustible. Un incident ou un accident survient lorsque ce dégagement d’énergie n’est plus contrôlé, soit parce que la puissance dépasse le niveau qui a été prévu et peut être évacué, soit parce que les dispositifs normaux d’extraction de la puissance, ainsi que les dispositifs de secours, sont défaillants.

### Le risque associé à la fission

Le risque associé à la fission est lié au déclenchement ou à l’amplification inopinée d’une **réaction en chaîne**. Le contexte est différent selon qu’il s’agit d’un réacteur ou d’un autre type d’installation nucléaire. Dans un réacteur en fonctionnement normal, une réaction en chaîne stabilisée est entretenue : un accident peut être généré par une extension non prévue et excessive (“**divergence** incontrôlée”) de cette réaction en chaîne : c’est l’accident de **réactivité**. Dans les autres types d’installations nucléaires, toute réaction en

chaîne est soigneusement évitée. Il n’est cependant pas possible d’exclure qu’en raison d’une erreur opératoire une réaction en chaîne se déclenche à cause d’une configuration “favorable” en termes de bilan neutronique : c’est le risque de **criticité** dans une installation où sont manipulées des matières nucléaires.

Ces deux aspects sont traités en détail dans cette deuxième partie consacrée aux accidents de réactivité et dans la troisième partie en ce qui concerne la criticité. Il apparaît que, dans les deux cas, une contre-réaction intervient pour enrayer efficacement et rapidement une “**excursion**” incontrôlée de la **puissance**.

### Le risque associé à la radioactivité

Le risque associé à la radioactivité apparaît essentiellement dans un réacteur quand on arrête la réaction en chaîne. En effet, en situation nominale, la puissance générée par la décroissance radioactive des éléments présents dans le combustible est faible en comparaison de la puissance résultant directement des fissions : elle ne représente qu’une petite partie (quelques pour cent) de la puissance totale nominale d’un réacteur. Mais elle subsiste seule



quand la réaction en chaîne est stoppée. Il est facile d'arrêter cette dernière, par exemple en faisant chuter dans le cœur des **barres de contrôle** absorbant les neutrons. En revanche, il est impossible de stopper la décroissance radioactive des éléments présents dans le combustible. Cette décroissance s'accompagne d'un dégagement d'énergie qui va continuer pendant très longtemps, en diminuant, certes, mais à un rythme relativement lent. Il faut donc prévoir d'évacuer cette énergie afin d'éviter tout risque de graves détériorations dues à l'échauffement.

## Accidents nucléaires et logiciels de calcul

Un accident nucléaire, en particulier sur un **réacteur**, est par conception même hautement hypothétique. Il ne peut résulter que d'un enchaînement de nombreux phénomènes physiques. Il est donc nécessaire, d'une part, d'identifier les phénomènes élémentaires susceptibles de contribuer à une telle éventualité, de les étudier et de les modéliser, d'autre part de prévoir comment ils interfèrent et de quelle manière chacun va

conditionner les autres. Par exemple, un couplage beaucoup plus fort qu'en situation normale entre la **thermohydraulique** et la **neutronique** interviendrait en cas d'accident. La première est conditionnée par les sources de chaleur, en l'occurrence par le nombre de **fissions** induites par les **neutrons** ; inversement, le **bilan neutronique** et la distribution spatiale des fissions sont très sensibles aux températures et aux densités des matériaux, c'est-à-dire aux transferts thermiques et hydrauliques.

En pratique, les spécialistes calculent le déroulement d'un improbable accident avec un **logiciel de calcul** "système" capable de prendre en compte ces couplages, de faire appel à des "modules" traitant les phénomènes élémentaires et de réaliser les itérations nécessaires pour prendre en compte toutes les contre-réactions. ●

**Paul Reuss**

Unité d'enseignement réacteurs  
et techniques de l'ingénieur  
Institut national des sciences  
et techniques nucléaires  
*CEA/Saclay*