

L'ÉTUDE DE LA PHÉNOMÉNOLOGIE DES ACCIDENTS DE CRITICITÉ

Il n'est pas possible d'exclure totalement la survenue d'un accident de criticité lorsque la quantité de matière fissile présente vient à dépasser, malgré toutes les mesures de prévention, la masse critique. Que se passe-t-il alors et quels sont les risques encourus ? Des programmes d'étude répondent à ces questions. L'enjeu ? L'amélioration de la connaissance et de la modélisation des accidents afin d'en limiter les conséquences sur l'homme, l'environnement et les installations.



IPSN

Dosimétrie d'accident de criticité à Valduc (Côte-d'Or) auprès du réacteur Silène (entouré des écrans orange, à droite). Certains capteurs sont fixés sur des mannequins simulant des opérateurs.



Depuis 1945, une soixantaine d'accidents de criticité ont été recensés dans le monde, la plupart aux États-Unis et dans l'ex-URSS. Deux sur trois sont survenus dans des installations de recherche (réacteurs et assemblages **critiques**), les autres dans des installations du cycle du combustible. Ils ont entraîné le décès de dix-

neuf personnes au total, mais n'ont pas provoqué de rejets radioactifs significatifs dans l'environnement (tableau 1). En France, grâce aux dispositions prises, aucun incident entraînant une irradiation aiguë d'un opérateur n'a été à déplorer dans le cycle du combustible, mais des situations qui *auraient pu* conduire à un accident ont



date et lieu	durée personnes irradiées	nombre de fissions expositions corporelles (Gy = gray ; Sv = sievert)	circonstances, déroulement et causes
1 13/12/1978 Siberian Chemical Combine (Russie)	1 pic 1 personne fortement irradiée et amputée + 7 irradiés	3·10 ¹⁵ fissions 2,5 Gy 0,05 à 0,6 Gy	introduction d'un nombre trop élevé de lingots de plutonium (4 lingots soit 10,7 kg de Pu) dans un conteneur. Arrêt par éjection ou retrait du lingot
2 13/11/1965 Electrosta's Fuel Fabrication Plant (Russie)	1 pic	8·10 ¹⁵ fissions	accumulation de poudre d'UO ₂ (70 kg) enrichi à 6,5 %, soit 4,6 kg de ²³⁵ U dans la cuve d'eau de la pompe d'un circuit de vide suite à un percement des filtres ; arrêt par dispersion de l'oxyde
3 16/10/1959 Idaho (États-Unis)	20 minutes	1 ^{er} pic : 1·10 ¹⁷ fissions total : 4·10 ¹⁹ fissions	U (91 %) - 30,9 kg de ²³⁵ U dans 200 l à la concentration de 155 g/l et déversés dans une cuve de 19 m ³ contenant 600 l d'effluents ; arrêt par évaporation de 400 l de solution et cristallisation du nitrate
4 07/04/1962 Hanford (États-Unis)	37 heures 3 irradiés	1 ^{er} pic : 1·10 ¹⁶ fissions total : 8·10 ¹⁷ fissions 1,1 Sv 0,43 Sv 0,19 Sv	45 l de solution à la concentration de 28,7 g/l soit 1,29 kg de ²³⁹ Pu ; arrêt par évaporation
5 15/02/1971 Kurchatov Institute (Russie)	50 pics de puissance 2 irradiés aux pieds	2·10 ¹⁹ fissions 15 Sv	maquette critique d'assemblages combustibles d'uranium enrichi à 20 % dans de l'eau utilisée pour l'approche sous-critique, avec un réflecteur en béryllium et des éléments absorbants ; remplissage de la cuve alors que la source de neutrons n'était pas en place et les barres de contrôle en position basse ; arrêt par évaporation de l'eau et arrêt de la pompe de remplissage

Tableau 1. Caractéristiques de quelques accidents de criticité parmi les plus significatifs survenus dans le monde dans des milieux fissiles de formes physico-chimiques différentes (métalliques dans le cas n° 1, poudres dans le n° 2, aqueux (solutions d'uranium et de plutonium) dans les n° 3 et 4 et assemblages critiques de réseaux de crayons combustible entourés d'eau dans le n° 5). Ces exemples illustrent également le fait que l'accident de criticité peut durer l'instant d'un flash (cas n° 1) ou plusieurs dizaines d'heures (cas n° 4) et produire des énergies très variables (3·10¹⁵ fissions pour l'accident n° 1 et 4·10¹⁹ fissions pour l'accident n° 3).

été rencontrées. Pour les réacteurs, deux accidents se sont produits à Saclay dans les années soixante, sans entraîner d'irradiation grave du personnel.

L'étude de la phénoménologie des accidents de criticité pouvant survenir dans différentes configurations et leur modélisation dans des **logiciels de calcul** adaptés ont pour but de décrire les différents scénarios pouvant survenir dans un processus expérimental ou industriel donné. Leurs objectifs sont : apprécier les risques d'irradiation pour les opérateurs en cas d'accident, préciser les possibilités de détection en fonction de la cinétique de l'accident ainsi que des performances et de la position des moyens de détection, évaluer le comportement à long terme de la configu-

ration critique, estimer les conséquences possibles en termes de rejets radioactifs ou d'irradiation dans l'environnement et, enfin, préparer les possibilités d'intervention permettant de revenir à un état **sous-critique**.

Dès 1967, l'Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN) a initié, dans son laboratoire de criticité de Valduc (Côte-d'Or), des expériences reproduisant l'accident de criticité par **divergence** d'une solution **fissile** de nitrate d'uranyle.

La phénoménologie générale d'un accident de criticité

L'accident de criticité résulte du déclenchement d'une **réaction de fission en chaîne** non contrôlée lorsque

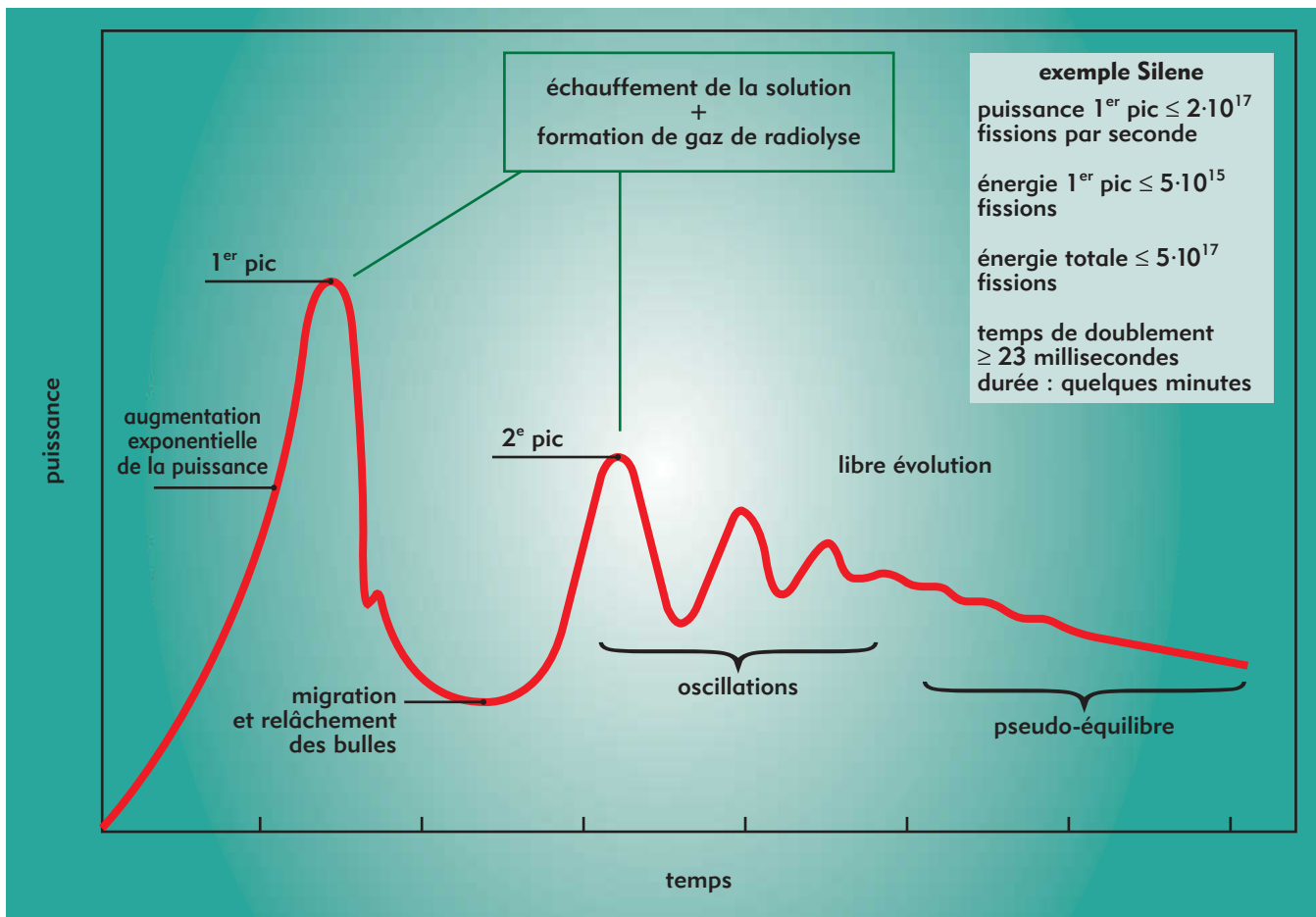
les quantités présentes de matières nucléaires (uranium ou plutonium) dépassent accidentellement un certain seuil appelé **masse critique**. Pour ce qui concerne la **neutronique**, dès que l'état critique est dépassé, la réaction en chaîne devient **divergente** et à caractère exponentiel avec une période qui dépend de la **réactivité** initiale du système. Il en résulte une évolution rapide du nombre de fissions produites au sein du milieu fissile, encore appelée **excursion de criticité**. Ce phénomène (voir *Le risque de criticité et sa prévention dans les usines, les laboratoires et les transports*) se traduit par un dégagement d'énergie, retrouvée essentiellement sous forme de chaleur, accompagné de l'émission intense de **rayonnements** neutronique et gamma ainsi que par le relâchement de gaz de fission. L'échauffement du milieu fissile se manifeste en général, toujours sur le plan neutronique, par l'apparition de mécanismes de contre-réaction qui viennent diminuer la réactivité jusqu'à rendre le système **sous-critique**, ne serait-ce que temporairement (voir cha-

pitre II). Il en résulte habituellement l'apparition d'un pic de puissance (figure 1). Après ce premier pic, les bulles de gaz de **radiolyse** ou de vapeur d'eau migrant vers la surface, l'effet d'**anti-réactivité** qui en résulte disparaît et l'excursion de puissance redémarre. C'est ce processus d'apparition puis de relâchement de ces bulles hors du système qui est à l'origine du phénomène oscillatoire généralement observé lors d'un accident de criticité.

Le déroulement d'une excursion accidentelle de criticité est donc globalement régi par quatre paramètres principaux : la nature physico-chimique du milieu fissile divergent, la réactivité du système qui traduit le niveau de **surcriticité**, la source neutronique spontanée initiale, différente selon qu'il s'agit d'uranium enrichi non irradié, d'uranium irradié contenant du plutonium ou de plutonium seul, et les contre-réactions neutroniques. Ces dernières sont de trois types : les effets liés à l'échauffement de la matière fissile, qui sont d'une part les effets de température nucléaire (effets Doppler et de variation



Figure 1. Évolution de la puissance lors d'un accident de criticité en milieu fissile aqueux.



de spectre ; voir *Contrôle et pilotage des réacteurs à eau sous pression*, encadré 1) et d'autre part les effets d'expansion (effets de densité et effet de volume) et l'effet de vide (bulles de gaz de radiolyse dans le cas d'une solution, vapeur d'eau...). Intervient également l'environnement de l'installation (échanges thermiques avec l'extérieur, confinement du système divergent,...).

Les expériences réalisées dans le réacteur Silène (Source d'irradiation à libre évolution neutronique), à Valduc, ont confirmé que la combinaison des phénomènes précédents avec les conditions initiales de l'accident peut entraîner trois types de comportement (figure 2). Dans le premier cas, le système divergent redevient définitivement sous-critique par modification de la configuration (mélange, éjection ou dispersion de matière, modification de la géométrie...). Dans le deuxième, le sys-

tème est provisoirement rendu sous-critique par l'échauffement de la matière fissile : la réaction divergente est alors appelée à redémarrer après un intervalle de temps plus ou moins long en fonction des échanges thermiques avec le milieu environnant. Dans un troisième cas, le système, par suite d'une réactivité initiale importante, atteint les températures d'ébullition du milieu : l'évolution de la puissance est alors fonction de la sous- ou de la sur-**modération** du milieu. L'ébullition du liquide, et la reconcentration de la solution fissile qui en résulte, peuvent en effet conduire à une augmentation ou à une diminution de la réactivité du système. Le comportement durant la phase post-accidentelle du système divergent est donc différent selon qu'il s'agit d'un système *fermé*, c'est-à-dire dans lequel la vapeur peut se recondenser et revenir dans la solution, ou d'un système

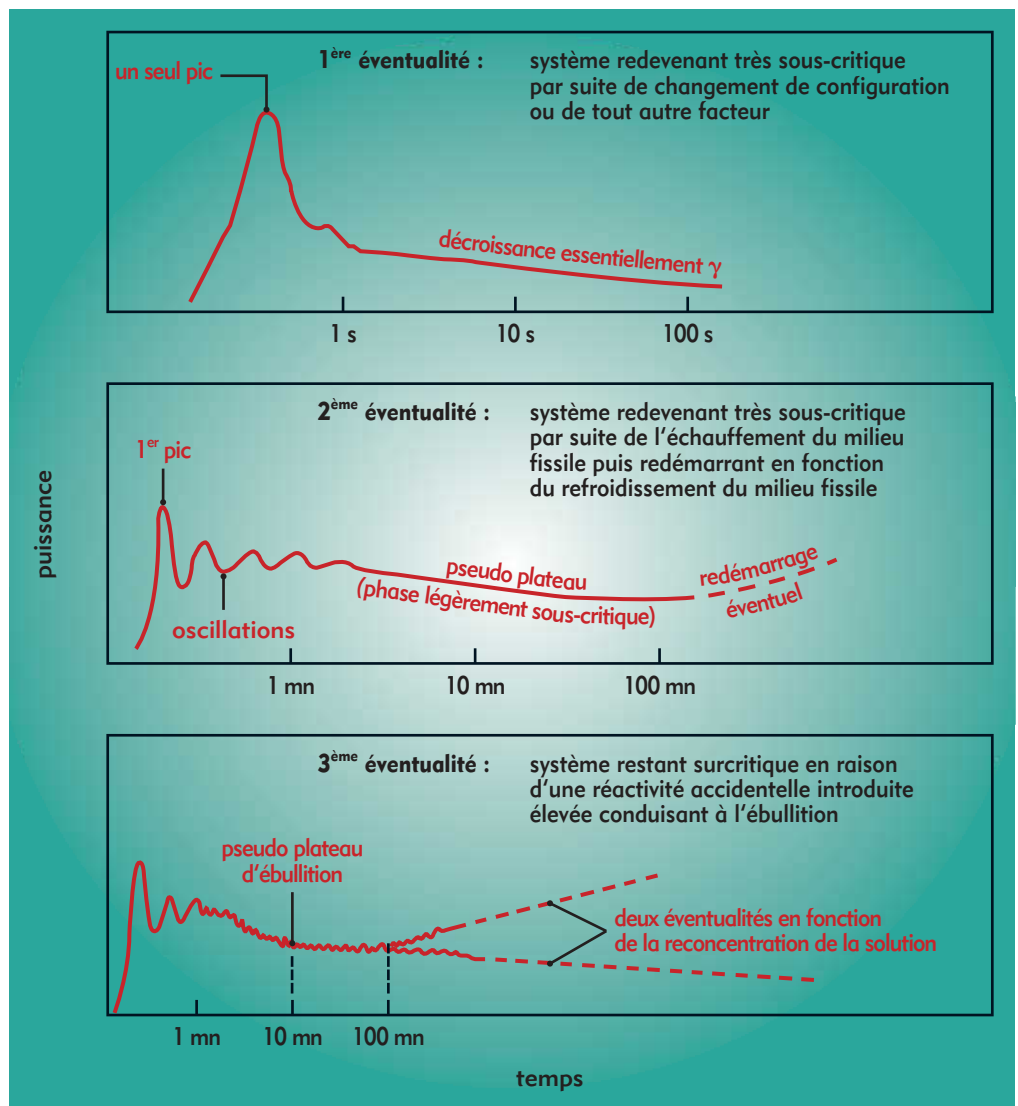


Figure 2. Phases post-accidentelles d'un accident de criticité.



IPSN

ouvert, auquel cas la vaporisation ou l'éjection de la solution permettent le retour à la sous-criticité.

Cette description correspond à des situations typiques mais n'est en aucune manière exhaustive. Chaque accident peut présenter des caractéristiques particulières, comme en témoignent ceux survenus dans le monde et plus particulièrement le dernier, celui de Tokai Mura (Japon) en 1999, au cours duquel un dispositif de réfrigération de la cuve qui "divergeait" a modifié le déroulement de la phase post-accidentelle (voir *L'accident de criticité de Tokai Mura*).

L'accident de criticité est par ailleurs accompagné de l'émission de rayonnements neutronique et gamma ainsi que d'un relâchement de **produits de fission** radioactifs gazeux et d'aérosols. Les programmes expérimentaux menés à Valduc ont permis d'évaluer les risques d'irradiation et de contamination associés et de mettre en évidence la nécessité de détecter l'accident, d'en suivre l'évolution durant la phase post-accidentelle et de prévoir des dispositions pour arrêter le processus.

Crac et Silène pour en savoir plus sur les accidents en milieu aqueux

La France a été le premier pays à engager un programme d'études dans ce domaine où les informations détaillées sur les accidents survenus dans le monde sont relativement récentes. Environ soixante-dix expériences reproduisant des accidents de criticité en milieu fissile aqueux ont été réalisées au Laboratoire de criticité de Valduc dans l'installation Crac (Conséquences radiologiques d'un accident de criticité) de 1967 à 1972. Les études ont été poursuivies à partir de 1974 dans le réacteur Silène.

Lors des expériences Crac, l'insertion de réactivité était en général obtenue par introduction continue par une pompe, à un débit pouvant atteindre 1 800 l/h, d'une solution de nitrate d'uranyle dans des cuves cylindriques de 0,3 et 0,8 m de diamètre. Dans Silène, constitué d'une cuve annulaire de 0,36 m, la réactivité est apportée par extraction d'une barre de contrôle hors du cœur.

Vue générale de l'installation Crac de Valduc où les expériences sur les conséquences radiologiques d'un accident de criticité ont débuté en 1967.





Les enseignements expérimentaux sur la physique de l'accident de criticité

Les enseignements tirés des expérimentations sur les accidents de criticité peuvent se résumer en cinq points principaux :

Premier pic de puissance et effets associés

Les essais en milieu homogène ont permis d'explorer un domaine caractérisé par un "échelon" de réactivité allant de 35 à 2 350 pcm (3 \$), une "rampe" de réactivité allant jusqu'à 2 \$/s, une période T_e de montée en puissance allant de 0,9 ms (essai Crac) à 4 minutes (essai Silène) et une puissance maximale comprise entre 10^{12} et $3 \cdot 10^{19}$ fissions/s. Les valeurs maximales de l'énergie totale du premier pic de puissance ont été observées pour les volumes les plus importants ($3 \cdot 10^{17}$ fissions).

Quatre observations sont particulièrement importantes.

Le première est l'apparition d'une onde de pression pour les cinétiques rapides ($T_e < 10$ ms), également à l'origine d'un effet sonore, la deuxième, pour ces mêmes cinétiques, l'éjection de solution hors de la cuve d'expérimentation lorsque celle-ci n'est pas munie d'un couvercle. Troisième événement : l'apparition d'une lueur bleue, due à l'effet Čerenkov, concomitante avec l'apparition des pics de puissance, d'où la notion de "flash" souvent associée à l'accident de criticité. Le quatrième élément est l'influence importante de la source initiale de neutrons sur le premier pic, la probabilité d'amorçage de l'excursion de puissance étant fonction de la population

de neutrons présente dans le milieu.

Ainsi, pour des solutions de plutonium dans lesquelles une source neutronique intrinsèque existe de par les fissions spontanées et les réactions (α, n), l'insertion de réactivité sera plus proche d'une "rampe" alors que, pour des solutions d'uranium ayant une source neutronique faible, l'accident peut être plus "rapide" et correspondre à un "échelon" de réactivité.

Énergie récupérée sous forme thermique

La comparaison du nombre total de fissions, déterminé par radiochimie sur les produits de fission formés, et du bilan thermique déduit de l'échauffement de la solution fissile permet de déterminer la fraction de l'énergie libérée effectivement récupérée sous forme thermique. La valeur mesurée lors des essais Crac et Silène est de l'ordre de $1,45 \cdot 10^{11}$ fissions/cal soit environ 180 MeV récupérés sous forme de chaleur, pour 200 MeV environ émis par fission.

Formation de gaz de radiolyse et effets annexes

De nombreuses expériences ont mis en évidence un taux de formation de gaz de radiolyse correspondant à $1,1 \cdot 10^{-13}$ cm³/fission, soit environ 110 litres de gaz pour 10^{18} fissions. Par ailleurs le seuil d'apparition de ces gaz est estimé à $1,5 \cdot 10^{15}$ fissions par litre de solution dans les milieux étudiés.

Ébullition de la solution

Pour des excursions de puissance consécutives à une réactivité élevée

(plusieurs \$ ou quelques milliers de pcm), il a été observé lors des expériences Crac et Silène que la température d'ébullition de la solution (environ 102 °C) est atteinte pour une énergie correspondant à environ $1,1 \cdot 10^{16}$ fissions par litre. Ces données sont valables pour une excursion de puissance de quelques minutes et un système ne faisant pas l'objet d'un refroidissement forcé.

Relation entre l'énergie et le volume de solution

Une relation empirique exprimant l'évolution du nombre total de fissions N_f en fonction du volume de la solution (en litres) et du temps (en secondes) a été établie. À partir des expériences Crac et Silène les plus représentatives en milieu homogène :

$$N_f(t) = \frac{t}{3,55 \cdot 10^{-15} + 6,38 \cdot 10^{-17} \times t} \times V$$

Elle peut être considérée comme donnant une valeur "enveloppe" du nombre de fissions sur une durée de quelques minutes jusqu'à l'ébullition de la solution, la phase post-ébullition devant être traitée séparément en fonction du scénario accidentel considéré. Elle met notamment en évidence l'importance du volume de solution fissile sur l'énergie susceptible d'être produite.

Une modélisation physique détaillée des phénomènes à partir des expériences Crac et Silène a abouti au développement du logiciel de calcul Critex.

Les paramètres de ces expériences représentatives de situations accidentelles étaient une concentration en uranium comprise entre 20 et 340 g/l, une réactivité potentielle inférieure à 10 dollars (\$) ⁽¹⁾ en système homogène, des "rampes" et "échelons" de réactivité allant respectivement jusqu'à 2 \$/s et 3 \$ et une source neutronique de démarrage variable.

Physique de l'accident : de l'expérience à la modélisation

La phénoménologie globale du déroulement d'une excursion de criticité en

(1) Le dollar (\$) est la valeur de la réactivité correspondant à l'état critique "prompt".

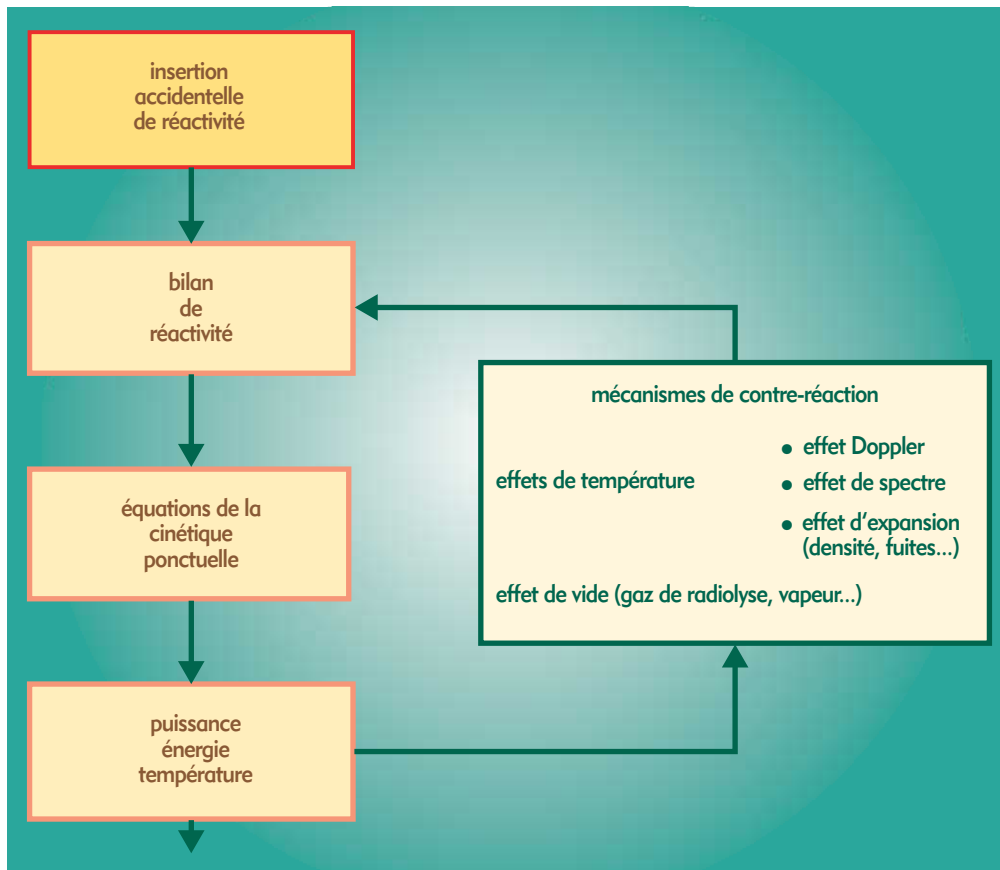
milieu fissile aqueux a été décrite précédemment. Les expérimentations ont donné des résultats et permis de tirer des enseignements dans cinq domaines principaux (encadré 1).

Une analyse rapide des accidents de criticité répertoriés à ce jour illustre l'extrême diversité des situations (milieux fissiles différents, configurations complexes, causes diverses) ainsi que celle des effets observés (puissance, énergie, durée...). C'est dire la complexité des modèles de calcul qu'il faut développer pour rendre compte de toutes ces situations.

Il convient d'abord de souligner que l'énergie produite lors d'un accident de criticité (souvent exprimée en nombre de fissions) est très inférieure à celle qui résulterait d'un accident de réacteur (dans le cas de Tchernobyl, le nombre de fissions a été estimé entre 6 et $8 \cdot 10^{21}$ fissions). Un accident de criticité de 10^{18} fissions libère une énergie de l'ordre d'une trentaine de mégajoules ($1 \text{ joule} = 3,1 \cdot 10^{10}$ fissions) et représente une "consommation" d'uranium ou de plutonium inférieure au milligramme de matière. L'examen

des accidents montre que l'énergie peut varier de quelques 10^{15} fissions à $4 \cdot 10^{19}$ fissions pour les installations du cycle du combustible, la puissance lors du premier pic pouvant atteindre 10^{21} fissions/s durant un temps très court. Quant à la durée d'un accident de criticité, elle peut se réduire à un "flash" de l'ordre de la milliseconde comme elle peut se prolonger durant des dizaines d'heures.

La diversité de ces effets est en relation directe avec les paramètres influençant la phénoménologie de l'accident. Différents modèles d'accidents ont donc été développés en distinguant quatre grandes catégories de milieux : liquide, poudre, métal, crayons combustibles et eau. L'architecture commune des logiciels correspondants apparaît dans la figure 3. Les logiciels de calcul d'accident actuellement développés (Critex pour les milieux aqueux, Powder pour les poudres, Chateau pour les crayons combustibles immergés) permettent d'estimer l'évolution de la puissance, de l'énergie et de la température du milieu en fonction du temps sur une durée limitée (les premières minutes de



● ● ● ● ●
 Figure 3. Architecture générale des codes de calcul des accidents de criticité.

l'accident). Il est possible à partir de leurs résultats d'estimer les conséquences éventuelles pour l'homme et l'environnement, c'est-à-dire les risques d'irradiation et de contamination résultant des rayonnements émis et des radionucléides relâchés.

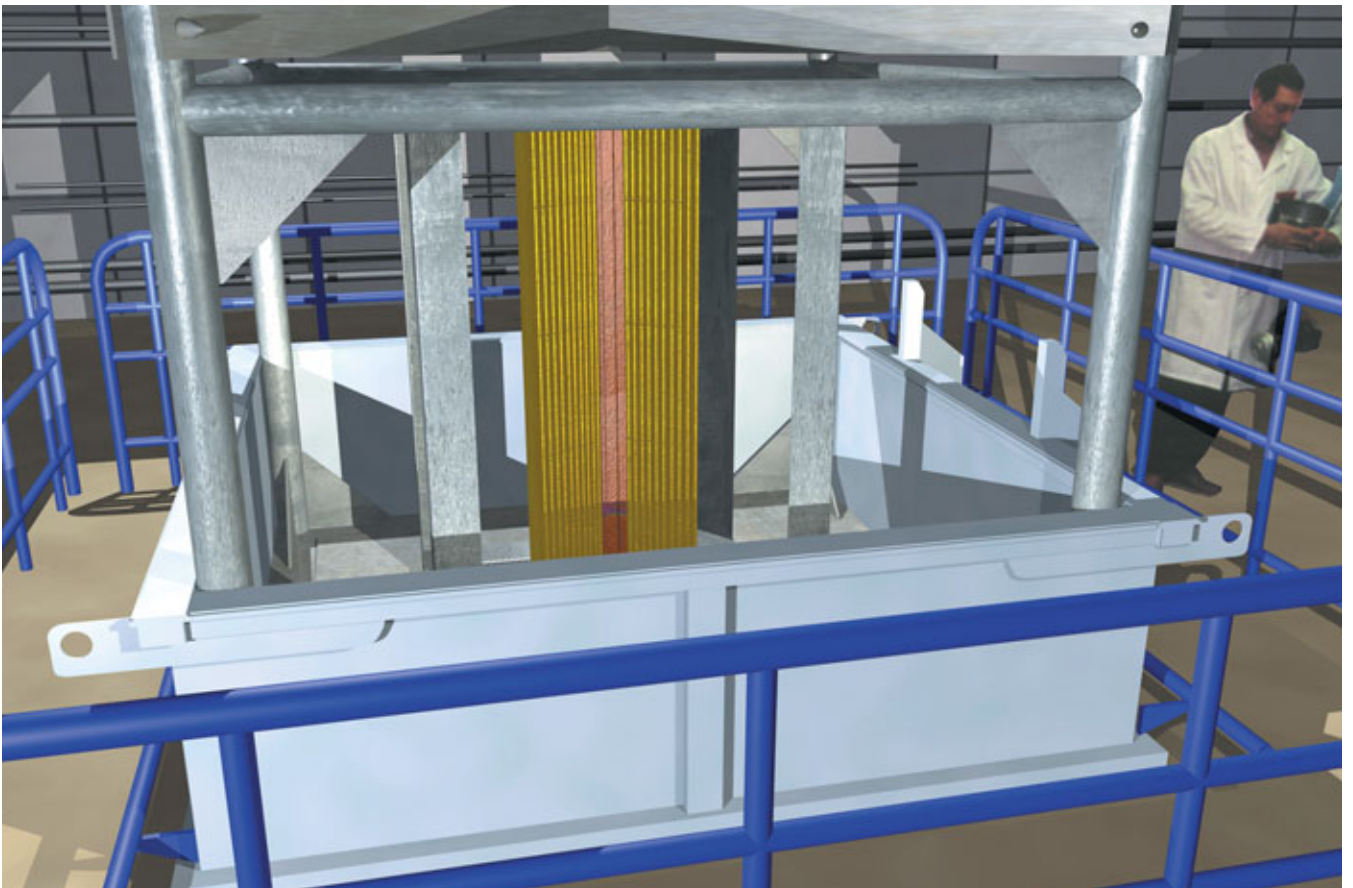
Risques d'exposition : les doses mesurées autour de Crac et de Silène

L'accident de criticité est accompagné par une émission intense de rayonnements neutroniques et gamma de durée variable, pouvant aller de quelques secondes à plusieurs heures selon la phénoménologie de l'**excursion de puissance**. Le champ de rayonnement initial est un champ complexe de neutrons et de rayonnements gamma d'énergie allant jusqu'à une dizaine de MeV. La contribution des uns et des autres à la dose radioactive totale est très variable selon la nature de la matière fissile (métal, poudre, liquide...), les dimensions et compositions du système qui diverge et son

environnement. Ainsi le rapport de la **dose** "neutrons" à la dose "gamma" peut varier de 10 pour une source "métallique" à 0,2 pour un milieu très hydrogéné. À mesure que l'on s'éloigne de la source, le champ de rayonnement se dégrade en énergie et son intensité diminue très rapidement, approximativement en fonction inverse du carré de la distance pour les premiers mètres. Au delà, les lois de propagation sont plus complexes, compte tenu des effets liés au sol et à l'atmosphère.

Les résultats dosimétriques obtenus sur Crac et Silène doivent être considérés comme représentatifs de la dose à laquelle le personnel peut être exposé lors d'un accident de criticité dans une solution de nitrate d'uranyle, le système divergent étant situé dans un local en béton. Pour des sources de configurations très différentes (diamètre de cylindre et concentration variables), il n'y a pas proportionnalité entre le nombre de fissions et la dose émise car les rayonnements de **fuite** dépendent des caractéristiques de la source. Le

• • • • •
*Vue d'artiste du cœur
de l'installation expérimentale
de criticité Appareillage B,
à Valduc, utilisée pour
des expériences sous-critiques
de validation des codes
de sûreté-criticité.*





EURYSIS

Les divers éléments de l'Ensemble de détection et d'alarme de criticité (Edac).



rapport dose/nombre de fissions s'avère maximum pour des sources de petites dimensions et de faibles concentrations. La valeur maximale de la dose observée lors des essais Crac et Silène est de $5,8 \cdot 10^2$ **grays** (Gy) à 1 m de l'axe de la source pour 10^{18} fissions avec un cylindre de 0,3 m de diamètre à une concentration de 80 g/l. À titre indicatif, les doses délivrées lors du premier pic de puissance sur Silène pour 10^{17} fissions à 1 m d'un "cœur" de 40 litres de solution de nitrate d'uranyle sont de 20 Gy pour la dose neutrons (kerma tissus)⁽²⁾ et de 25 Gy pour la dose gamma.

En matière d'accident de criticité, il n'y a donc pas de proportionnalité directe entre le nombre de fissions et la dose émise pour des sources différentes. La nature du milieu fissile, ses dimensions et sa géométrie jouent un rôle essentiel dans l'estimation des risques d'exposition. Ces valeurs mettent en tout cas en évidence que le

risque d'exposition est un risque majeur en cas d'accident de criticité et que les doses associées peuvent être fatales pour le personnel travaillant dans l'environnement immédiat de l'équipement concerné.

La détection des accidents de criticité

L'objectif d'un système de détection de la criticité est de déclencher dans les plus brefs délais une alarme afin de provoquer l'évacuation du personnel dès le début de l'excursion accidentelle et de limiter ainsi les risques d'exposition. Le CEA a ainsi conçu en 1976, à partir des informations recueillies dans Crac et Silène, un système baptisé Ensemble de détection et d'alarme de criticité (Edac), basé sur une unité de surveillance à laquelle sont connectées au moins trois sondes de criticité. L'alarme de criticité n'est déclenchée que si au minimum deux d'entre elles envoient un signal d'alerte à cette unité. Ce signal n'est généré que si deux conditions sont réunies au niveau des sondes : dépassement d'un seuil de dose prédéterminé, généralement réglé à 25 μ Gy et dépassement d'un seuil de **débit de dose** fixé à environ 10 mGy/h. Le système repose sur une mesure de la dose totale de rayonnements grâce à deux scintillateurs⁽³⁾ respectivement sensibles au rayonnement neutronique et au rayonnement gamma. Les tests réalisés dans Silène ont démontré que le

(2) Le Kerma (acronyme pour *Kinetic Energy Released in Materials*) est la somme des énergies cinétiques initiales de toutes les particules chargées libérées par des rayonnements ionisants non chargés (neutrons et photons) dans un échantillon de matière divisée par la masse de cet échantillon. S'exprime en gray ou en ses sous-multiples.

(3) Partie sensible d'un appareil de détection de particules basé sur la propriété que présentent certaines matières d'émettre de la lumière sous l'effet d'un rayonnement.

famille de radionucléides	activités maximales rejetées (Bq) et doses (mSv) pour 10^{18} fissions (soit environ 0,4 mg d'uranium fissionné) en fonction du temps de refroidissement		
	10 secondes	1 heure	10 heures
gaz rares, halogènes (hors Iodes) et aérosols (Bq)	$3,0 \cdot 10^{14}$	$2,5 \cdot 10^{13}$	$9,0 \cdot 10^{11}$
iodes (Bq)	$1,7 \cdot 10^{12}$	$1,8 \cdot 10^{12}$	$2,6 \cdot 10^{11}$
inhalation à 500 m en DN5 (doses engagées à la thyroïde et aux poumons) (mSv)	0,12	0,20	0,12
irradiation directe par le panache à 500 m en DN5 (mSv)	0,50	0,13	0,004

Tableau 2. Quantités de produits de fission rejetées de la solution lors d'un accident de criticité et conséquences de ces rejets sous le vent à 500 m en conditions de diffusion normale avec un vent de 5 m/s (conditions dites "DN5"), pour plusieurs "temps de refroidissement" de ces produits au moment du rejet.

Le système permet de détecter tous les types d'accident, c'est-à-dire les excursions de puissance à cinétique rapide et celles à cinétique lente (soit quelques 100 μ s à quelques minutes pour la période du premier pic de puissance). Ils ont également montré que les détecteurs donnent une réponse en dose proportionnelle à la dose totale dans un champ mixte de rayonnements neutronique et gamma et qu'ils restent fiables même après avoir subi les débits de

dose élevés délivrés par ce premier pic, permettant ainsi de suivre l'évolution de l'accident après le déclenchement de l'alarme.

Le système Edac donnant la possibilité d'enregistrer et de suivre à partir des sondes de criticité l'évolution de l'accident, notamment grâce à une console placée hors de la zone d'évacuation, sa contribution peut être essentielle pour la gestion de la situation post-accidentelle et de l'intervention.



Test auprès du cœur du réacteur Silène de sondes du système de détection d'accident Edac.

Des rejets sans commune mesure avec ceux d'un hypothétique accident de réacteur

Un programme expérimental a été conduit avec Silène pour déterminer les taux de relâchement des produits de fission (PF) émis au cours d'un accident de criticité dans un milieu fissile aqueux, les conditions allant jusqu'à l'ébullition de la solution pour favoriser ce relâchement. L'étude a porté essentiellement sur les éléments ayant un impact radiologique sur l'homme et l'environnement. Les produits concernés peuvent être classés en fonction de leur nature physico-chimique en trois catégories (gaz rares, aérosols et isotopes d'iode, de brome et de ruthénium) pour lesquelles le programme a permis de tirer divers enseignements (encadré 2).

À titre d'information, le tableau 2 présente les quantités de produits de fission rejetées de la solution, ainsi que les conséquences de ces rejets sous le vent à 500 m en conditions de diffusion nor-

male avec un vent de 5 m/s, pour plusieurs "temps de refroidissement" des produits de fission au moment du rejet. Ces valeurs mettent en évidence que le risque d'exposition des populations lors d'un accident de criticité sont faibles et sans aucune commune mesure avec les conséquences potentielles d'un accident de réacteur.

Meilleure évaluation des risques

Depuis 1967, des équipes pluridisciplinaires de physiciens, de spécialistes de la dosimétrie et de radiobiologistes ont acquis une compétence unique sur les accidents de criticité grâce aux expériences réalisées dans Silène. Les études ont permis d'améliorer la connaissance dans les domaines de la physique de l'accident, de la détection, de la dosimétrie et des effets des rayonnements neutronique et gamma émis ainsi que du rejet de radionucléides dans l'environnement. Ces résultats contribuent à une meilleure évaluation des risques associés à un

accident de criticité ainsi qu'à la mise en œuvre de dispositions en matière d'intervention et de gestion de crise.

Sur un plan plus général, le retour d'expérience des accidents survenus dans le monde, conforté par les résultats expérimentaux français, apporte trois enseignements principaux. D'abord, l'énergie libérée lors d'un accident de criticité est en général limitée puisque pour l'accident maximum connu dans les installations du cycle du combustible elle est de $4 \cdot 10^{19}$ fissions, ce qui reste inférieur de plus de cent fois à l'énergie libérée lors de l'accident de Tchernobyl. Les conséquences pour l'environnement sont par ailleurs faibles, les rejets gazeux étant très limités comparés à ceux qu'un accident de réacteur pourrait entraîner. En revanche, les risques d'irradiation pour le personnel travaillant à proximité de l'équipement concerné sont importants et peuvent conduire à des doses létales.

L'accident de Tokai Mura a également mis en évidence le fait que les conséquences peuvent être d'une autre dimension sur le plan médiatique et sur celui de l'acceptabilité du risque nucléaire. Il importe donc d'être en mesure de détecter *a priori* toute possibilité de situation incidentelle malgré toutes les précautions déjà prises en matière de prévention du risque de criticité et de mettre en place, outre les dispositions prévues dans les plans d'intervention, les moyens nécessaires pour stopper, sur le plan de la neutronique, le processus accidentel.

Francis Barbry
Institut de protection
et de sûreté nucléaire
Valduc (Côte-d'Or)

Relâchement des produits de fission : 2 les acquis de Silène

Les principaux résultats du programme expérimental, conduit avec le réacteur Silène, sur les taux de relâchement des produits de fission au cours d'un accident de criticité dans un milieu fissile aqueux portent sur les trois familles de produits :

Les gaz rares (xénon et krypton) : les taux de relâchement sont pratiquement égaux à 100 % pour les gaz aux temps supérieurs à la minute. Ils varient entre 10 % et 50 % pour les temps allant de quelques secondes à la minute, et sont de l'ordre de 10 % pour les temps très courts (inférieurs à 2 secondes).

Les aérosols : à l'ébullition, une granulométrie de 0,1 μm environ est observée alors qu'à une température inférieure, elle peut être de l'ordre de $5 \cdot 10^{-3}$ μm . Le piégeage de ces aéro-

sols sur des filtres peut induire un risque local d'irradiation important.

Les isotopes d'iode, de brome et de ruthénium : pour les premiers, il faut souligner l'importance de la chimie du milieu (acidité, teneur pondérale initiale en iode dans le cas, par exemple, de la dissolution de combustibles usés). Dans les expériences Silène, les taux de relâchement maximaux observés pour une acidité voisine de 2N étaient très inférieurs à 1 % en cas d'ébullition de la solution. Un taux de relâchement de 10 % a pu être mesuré au niveau du cœur dans le cas d'une très faible acidité de la solution et d'une teneur pondérale initiale en iode élevée de la solution. Pour les isotopes de brome et de ruthénium, autres produits volatils, les taux maximaux d'émission sont estimés à respectivement 20 % et 1 %.