

Chapitre 33

La conduite incidentelle et accidentelle : de l'approche événementielle à l'approche par états

Parmi les leçons tirées de l'accident de la centrale nucléaire de Three Mile Island, il a été signalé au chapitre 32 l'effort de réécriture et d'amélioration générale des procédures de conduite incidentelle ou accidentelle des réacteurs du parc électronucléaire français. Il s'est agi d'un effort important, apportant un bénéfice significatif en termes de sûreté. Cet effort n'a pas, pour autant, réglé toutes les difficultés liées aux principes mêmes de l'élaboration des procédures, ce qui est développé dans le présent chapitre.

33.1. Les limites de l'approche événementielle

Par déclinaison de l'approche « événementielle », chaque procédure de conduite incidentelle ou accidentelle (I ou A) était relative à un événement initiateur unique bien identifié lors de la conception des réacteurs.

Par extension, les procédures complémentaires H ont traité des cumuls de défaillances simultanées bien identifiés puisqu'il s'agissait chaque fois de l'ensemble des voies d'un système redondant, et d'elles seules.

L'objectif assigné à ces procédures était d'éviter ou, à tout le moins, limiter les ruptures de gaines de crayons combustibles, source potentielle principale de dissémination de substances radioactives, et de ramener l'installation dans un état stable et durable.

Il est intéressant de comparer l'accident de Three Mile Island aux événements ou combinaisons d'événements initiateurs retenus pour l'élaboration des procédures I, A et H. Dans le cas de Three Mile Island, il s'agit en fait d'un événement initiateur relevant de la troisième catégorie de conditions de fonctionnement (le maintien de l'ouverture d'une vanne de décharge du pressuriseur, ce qui équivaut à une brèche au sommet de cet équipement), de la défaillance totale, mais limitée dans le temps, de l'alimentation en eau des générateurs de vapeur et de la défaillance totale de l'injection de sécurité due à un défaut de compréhension des opérateurs.

La réalité des situations peut, on le voit, être complexe.

De ce fait, les procédures de conduite dites événementielles ne pouvaient pas couvrir toutes les combinaisons possibles d'événements correspondant à des cumuls de défaillances matérielles ou humaines, simultanées ou différées, telles que, par exemple, une erreur de diagnostic initial, une mauvaise application d'une procédure, un cumul d'incidents ou d'accidents, une défaillance totale d'un système de sauvegarde... De plus, la multiplication des séquences ainsi étudiées accroîtrait le nombre des procédures de conduite et rendrait le diagnostic et donc le choix de la bonne procédure pratiquement impossibles – outre le fait qu'il faudrait maintenir les procédures à jour, d'où une complexification du travail documentaire.

L'approche « événementielle » présentait enfin une difficulté d'application pratique, à savoir l'impossibilité de reprendre le diagnostic initial en cas d'évolution de l'installation non conforme aux prévisions de ce diagnostic.

Pour sortir de cette impasse, Électricité de France et Framatome, constructeur des chaudières, ont proposé d'aborder le choix des mesures correctives à appliquer en situation incidentelle ou accidentelle, quelle qu'elle soit, par une voie différente: l'approche par états. Les discussions sur ce sujet avec le Service central de sûreté des installations nucléaires et l'IPSN ont démarré en 1984.

33.2. Le concept de l'approche par états

Le concept de l'approche par états repose sur un constat: si les événements accidentels et leur déroulement peuvent être très variés, les états de réactivité, de refroidissement et de confinement possibles du réacteur peuvent par contre être dénombrés, depuis les conditions normales de fonctionnement jusqu'aux états les plus dégradés.

Il est alors possible de déterminer, pour chacun des états anormaux, une stratégie de conduite et des actions à mener par les opérateurs permettant de ramener l'installation dans une situation plus satisfaisante au plan de la sûreté. L'équipe de conduite peut ainsi, sur la base d'un diagnostic permanent de l'installation, effectuer ces actions sans avoir nécessairement compris l'enchaînement des événements antérieurs.

Pour cela, il a fallu montrer qu'il existe une relation directe entre les états observables et des ensembles d'actions à mener par les opérateurs pour améliorer la situation.

Il a ainsi fallu caractériser les états de réactivité du réacteur et les actions à mener pour chaque état. Un effort équivalent a été effectué pour ce qui concerne la thermohydraulique, afin :

- de déterminer tous les états de refroidissement possibles de la chaudière, leurs domaines de stabilité et les transitions entre états,
- de caractériser ces différents états par des grandeurs physiques mesurables,
- de déterminer, pour chacun de ces états, les actions correctives ou réparatrices à mener par les opérateurs, considérées comme les meilleures, dans le sens qu'elles améliorent la situation pour l'ensemble des événements conduisant à cet état, sans obérer la suite,
- de construire une synthèse des points précédents où ne sont plus distingués que les sous-ensembles d'états nécessitant des actions différentes,
- de déterminer les mesures physiques et les traitements d'informations en salle de commande nécessaires pour effectuer le diagnostic d'état et suivre l'efficacité des actions effectuées.

Au plan thermohydraulique, le fonctionnement de la chaudière a donc été analysé à partir des bilans fondamentaux de masse, d'énergie et d'impulsion de chacun de ses grands éléments. Peuvent alors être caractérisés :

- le cheminement de l'énergie : production dans le combustible – extraction par le fluide primaire – transport dans le circuit primaire – transfert hors du circuit primaire,
- l'accumulation ou la restitution d'énergie dans les circuits primaire et secondaire,
- les variations des masses d'eau primaire et secondaire.

Pour chacune de ces caractéristiques, différentes configurations ont été retenues, couvrant l'ensemble des possibilités physiques, distinguées par les valeurs de paramètres mesurables (pressions, niveaux, températures et leurs dérivées par rapport au temps, taux de vide dans le circuit primaire, radioactivité dans les circuits secondaires des générateurs de vapeur...).

Les combinaisons possibles de ces configurations ont été regroupées et il est apparu que :

- la masse du fluide primaire, la circulation de ce fluide et l'extraction de chaleur par le circuit primaire déterminent le comportement de la chaudière et l'extraction de chaleur du combustible ;
- l'extraction de chaleur hors du circuit primaire est fonction de l'état du circuit secondaire et de la présence éventuelle de gaz incondensables dans le circuit primaire, déterminée par l'écart de température entre l'eau du circuit primaire et celle de l'eau du circuit secondaire, qu'on appelle « pincement primaire-secondaire » ;
- l'état du circuit secondaire dépend lui-même de l'état de chacun des générateurs de vapeur, déterminé à partir des différentes masses de fluide

secondaire, pressions de vapeur et niveaux de radioactivité éventuelle du fluide secondaire.

À chaque état global ainsi défini sont associées des actions spécifiques sur les différents systèmes, en fonction de leur disponibilité (injection de sécurité, charge et décharge d'eau dans le circuit primaire, aspersion d'eau dans l'enceinte de confinement et décharge du pressuriseur, alimentation de secours en eau des générateurs de vapeur, décharge de vapeur d'eau par le circuit secondaire, isolement des lignes de vapeur et d'eau du circuit secondaire, etc.). Ces actions sont choisies en vue de stabiliser l'état de l'installation et si possible l'améliorer en progressant vers des états de moins en moins dégradés.

D'un point de vue pratique, les paramètres physiques caractérisant l'état de l'installation ont en définitive été regroupés en six fonctions d'état :

- la sous-criticité du cœur ou le niveau de puissance nucléaire,
- l'inventaire en eau du circuit primaire,
- l'évacuation de la puissance résiduelle hors du circuit du primaire,
- l'intégrité des générateurs de vapeur,
- l'inventaire en eau des générateurs de vapeur,
- l'intégrité de l'enceinte de confinement.

Pour tenir compte de l'état de l'instrumentation en place au début de l'application de l'approche par états – pas de mesure du taux de vide dans le circuit primaire, pas d'indication du niveau d'eau dans la cuve des tranches de 900 MWe –, des regroupements d'états ont été effectués sans remettre en cause la démarche.

33.3. Première application de l'approche par états

La première application de l'approche par états a été la mise au point d'une procédure de conduite qualifiée d'ultime, la procédure U1, en complément des procédures événementielles existantes.

La procédure U1 avait pour but d'assurer les meilleures conditions possibles de refroidissement de la chaudière et de sauvegarde du cœur du réacteur dans des situations où les procédures I, A et H, relatives à des séquences accidentelles bien identifiées, se révélaient inadaptées ou inefficaces. L'objectif était bien entendu d'éviter ou de retarder et limiter l'endommagement du cœur du réacteur et ses conséquences radiologiques, selon la gravité de la situation et les moyens disponibles.

La procédure U1 indiquait, en fonction de l'évolution des températures à la sortie du cœur du réacteur et de la disponibilité des systèmes et matériels, les meilleures actions en termes d'utilisation :

- des générateurs de vapeur,
- de l'injection de sécurité,

- des soupapes de décharge du pressuriseur,
- des pompes primaires,

pour arrêter, retarder ou atténuer les évolutions dangereuses, donnant ainsi du temps pour retrouver la disponibilité de systèmes défaillants.

La décision d'abandonner une procédure événementielle en cours d'utilisation pour la procédure U1 devait être prise, après un arrêt d'urgence, dans les cas suivants (très simplifiés – voir la figure 33.1) :

- température à la sortie du cœur du réacteur supérieure à 350 °C,
- marge par rapport à l'ébullition du fluide primaire (notée ΔT_{sat}) inférieure à 10 °C avec l'injection de sécurité indisponible,
- aucun générateur de vapeur disponible (c'est-à-dire capable d'évacuer une partie de la puissance résiduelle sans que la vapeur ne soit contaminée),
- évolution défavorable du couple pression-température du fluide primaire,
- système d'aspersion dans l'enceinte de confinement indisponible alors que la pression, la température ou la radioactivité y sont anormales.

Plutôt que d'introduire ces critères dans chacune des procédures « événementielles », il est apparu intéressant de prévoir un diagnostic permanent :

- selon une logique indépendante, et redondante, des procédures existantes, qui restaient dès lors inchangées et étaient susceptibles d'évoluer ultérieurement de façon autonome ;
- faisant appel à l'ingénieur de sûreté (IS), ce qui assurait une redondance humaine par rapport aux opérateurs ;
- s'appuyant sur l'étude des états de refroidissement de la chaudière, complétée par l'analyse de la disponibilité des systèmes de sauvegarde ;
- utilisant l'instrumentation disponible.

Une procédure particulière de surveillance permanente après incident (SPI) avait en conséquence été établie ; elle devait être appliquée de manière cyclique par l'ingénieur de sûreté, appelé en salle de commande dès que se déclenchait un arrêt d'urgence du réacteur ou que la marge à l'ébullition du fluide primaire devenait inférieure à 20 °C, jusqu'au retour à une situation normale. Cette surveillance portait sur les paramètres suivants :

- la disponibilité de chaque générateur de vapeur, c'est-à-dire sa capacité à évacuer une partie de la puissance résiduelle sans que la vapeur soit contaminée,
- la masse d'eau dans le circuit primaire et la température de cette eau à la sortie du cœur du réacteur,
- la capacité du circuit secondaire à refroidir et à dépressuriser le circuit primaire,

- la mise en service effective des systèmes de sauvegarde (alimentation de secours des générateurs de vapeur, injection de sécurité à haute ou à moyenne pression, injection de sécurité à basse pression, aspersion d'eau dans l'enceinte de confinement, etc.),
- la pression, la température et la radioactivité dans l'enceinte de confinement,
- l'état de criticité du cœur (flux neutronique, positions des grappes de contrôle, concentration du bore, etc.).

Cette surveillance devait permettre, le cas échéant, à l'ingénieur de sûreté de demander aux opérateurs d'abandonner la procédure (I, A ou H) en cours d'utilisation pour appliquer la procédure U1. Il devait continuer ensuite sa mission de surveillance en utilisant la procédure SPU, nouvelle procédure cyclique de suivi de l'évolution de la chaudière en situation ultime déclarée.

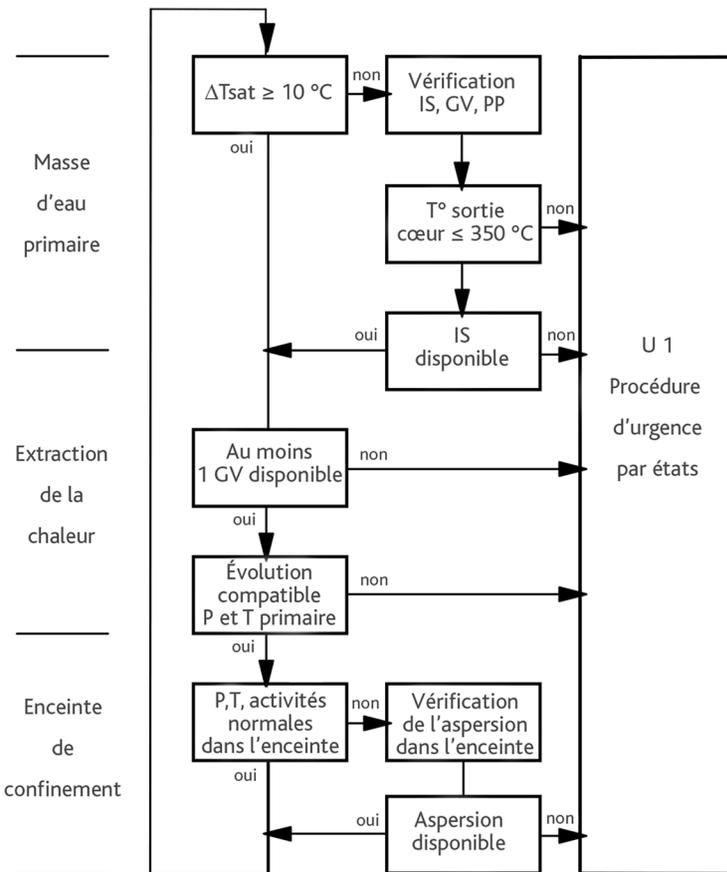


Figure 33.1. Première application de l'approche par états: procédure de surveillance permanente SPI et procédure U1. IRSN.

L'application de la procédure SPI conduisait, le plus souvent, à confirmer avec un léger décalage dans le temps les principales actions déjà demandées par la procédure utilisée par l'équipe de conduite. Dans certains cas de défaillances multiples, elle demandait aux opérateurs de réaliser des actions complémentaires limitées comme l'isolement d'un générateur de vapeur, sans pour autant abandonner la procédure en cours.

L'ensemble {SPI, U1, SPU} a constitué un complément très important aux procédures I, A et H.

33.4. Généralisation de l'approche par états

Les études sur l'approche par états et les moyens nécessaires pour l'utiliser de manière précise et graduée lors d'incidents fréquents ont été poursuivies. C'est ainsi que les premières tranches des centrales nucléaires de Penly et de Golfech (réacteurs de 1 300 MWe du palier P'4) ont pu disposer, dès leur démarrage en 1990, de certaines procédures déclinant l'approche par états de façon élargie.

Un tel jeu de procédures traitait de tous les accidents « thermohydrauliques » mais ne s'appliquait pas aux situations où le réacteur est connecté au circuit de refroidissement à l'arrêt (RRA). Ce jeu de procédures couvrait donc, de manière progressive (et hors situations à l'arrêt), toutes les situations incidentelles et accidentelles du circuit primaire, de la situation d'arrêt d'urgence aux situations les plus dégradées, la conduite du circuit secondaire, la surveillance de l'enceinte de confinement et la disponibilité de certains systèmes. Il n'y avait donc plus de solutions de continuité entre les procédures I, A et H et la procédure U1.

D'autres procédures à caractère événementiel complétaient cet ensemble, à titre transitoire.

L'articulation des responsabilités entre l'équipe de conduite et l'ingénieur de sûreté était analogue à celle qui existait pour le jeu traditionnel de documents de conduite (« événementiels »).

L'approche par états a ensuite été « généralisée » et appliquée aux tranches du palier N4 dès leur démarrage pour la conduite du réacteur depuis la salle de commande principale, en couvrant toutes les situations du circuit primaire tant qu'il est fermé (RRA connecté ou non), ainsi que la perte de l'ensemble des systèmes importants pour la sûreté ; elle a ensuite été étendue aux états dans lesquels le circuit primaire n'est pas fermé.

Son application a également été progressivement étendue aux différentes tranches de 1 300 MWe, qui étaient toutes équipées d'une mesure du niveau d'eau dans la cuve, après, notamment, reprise de la formation des opérateurs en tenant compte de l'expérience acquise sur les premières tranches (N4) ayant utilisé l'approche par états « généralisée ».

L'application de cette approche « généralisée » aux tranches de 900 MWe a été ensuite réalisée, à partir de la fin des années 1990, quand les travaux de mise en place d'une mesure du niveau d'eau dans la cuve eurent été réalisés.

33.5. L'approche par états « stabilisée »

Après diverses « générations » de l'approche par états, la conduite incidentelle et accidentelle s'est stabilisée selon le schéma décrit ci-après.

1. Un document, appelé document d'orientation et de stabilisation (**DOS**), permet de guider les opérateurs en salle de commande sur les actions à entreprendre en fonction des informations et alarmes qu'ils reçoivent.
2. À l'interface entre le fonctionnement normal et les procédures APE, l'équipe de conduite dispose de quelques règles, procédures (dont une procédure dite de surveillance permanente par états [SPE], qui se substitue à la procédure SPI) et consignes incidentelles (de type **I-système**) que les opérateurs peuvent être amenés à utiliser dans quelques cas précis de situations « dégradées » :
 - en cas de perte du réseau électrique principal, la consigne d'ilotage,
 - en cas d'apparition de fuites primaires ou de dysfonctionnement des fonctions de charge et de décharge du circuit primaire, la consigne I-RCV,
 - en cas de dysfonctionnement des barres de contrôle, la consigne I-RGL,
 - en cas de dysfonctionnement des groupes motopompes primaires, la consigne I-RCP (problèmes spécifiques aux joints des pompes par exemple),
 - en cas de problèmes concernant le refroidissement ou la manutention des assemblages combustibles, les consignes I-PTR et I-PMC.
3. Les procédures I, A et H sont intégrées et couvertes par l'APE, qui propose différentes stratégies selon l'état de l'installation, regroupées dans quatre ensembles :
 - ECP (de gravité croissante 1 à 4) : conduite du circuit primaire et des circuits associés dans les états du réacteur où le RRA n'est pas connecté,
 - ECPR (de gravité croissante 1 à 2) : conduite du circuit primaire et des circuits associés dans les états du réacteur où le RRA est connecté, circuit primaire fermé,
 - ECPRO : conduite du circuit primaire et des circuits associés dans les états du réacteur où le RRA est connecté, circuit primaire ouvert ou non éventé,
 - ECS : conduite de la partie secondaire du réacteur.

Dans chacun de ces ensembles, plusieurs stratégies de conduite sont possibles : par exemple, dans les ECP⁸⁸², les stratégies sont :

- « *stabilisation* » (rejoindre les conditions normales d'exploitation ou attente en repli),

882. Voir le mémento EDF déjà cité et le paragraphe 8.2.1 de l'ouvrage « Physique, fonctionnement et sûreté des REP », B. Tarride, INSTN/EDP Sciences, 2013.

- « *repli doux* » (rejoindre l'état de repli pour réparation, en se rapprochant de la conduite normale : refroidissement à - 14 °C/h ou - 28 °C/h),
- « *repli dur* » (passage rapide en état de repli avec un gradient de refroidissement « dur » à - 56 °C/h),
- « *stabilisation/contrôle de la puissance nucléaire* » (envoi de bore pour ramener le cœur à un état sous-critique puis passer à la concentration de bore nécessaire pour le passage en état d'arrêt à froid),
- « *réduction du ΔT_{sat}* » (stabiliser la température et dépressuriser le circuit primaire pour éviter un choc froid sur la cuve et revenir dans le domaine de pressions et températures des états standards),
- « *restauration de l'évacuation de la puissance résiduelle* » (évacuation de la puissance résiduelle par passage en mode gavé-ouvert),
- « *restauration de l'inventaire en eau du circuit primaire* » (rétablir au moins un niveau d'eau dans les branches chaudes, pour passer ensuite dans la stratégie de « repli dur »),
- « *sauvegarde ultime du cœur* » (éviter ou retarder la fusion du cœur, par tous les moyens possibles d'apport d'eau).

À ces stratégies sont associées des procédures et des fiches de manœuvre.

Dans la conduite selon l'approche par états, l'équipe de conduite suit l'évolution de la situation et rectifie, si nécessaire, la stratégie de conduite, selon le schéma cyclique représenté sur la figure 33.2.

4. Enfin, pour compléter cet ensemble, au-delà de la conduite incidentelle et accidentelle proprement dite, et couvrir des états plus dégradés, l'exploitant continue de disposer des quatre procédures ultimes U déjà présentées au paragraphe 17.8, appelées par le guide d'action des équipes de crise (GAEC) ou le guide d'intervention en accident grave (GIAG):
 - U2: localisation et isolement des fuites de l'enclume de confinement et réinjection de l'eau contaminée dans l'enclume,
 - U3: mise en place de moyens mobiles de secours des systèmes EAS et ISBP,
 - U4: limitation des rejets gazeux directs (spécifiquement pour la centrale nucléaire de Cruas⁸⁸³),
 - U5: éventage-filtration de l'enclume de confinement à travers le filtre à sable.

883. Voir le paragraphe 17.5.8.

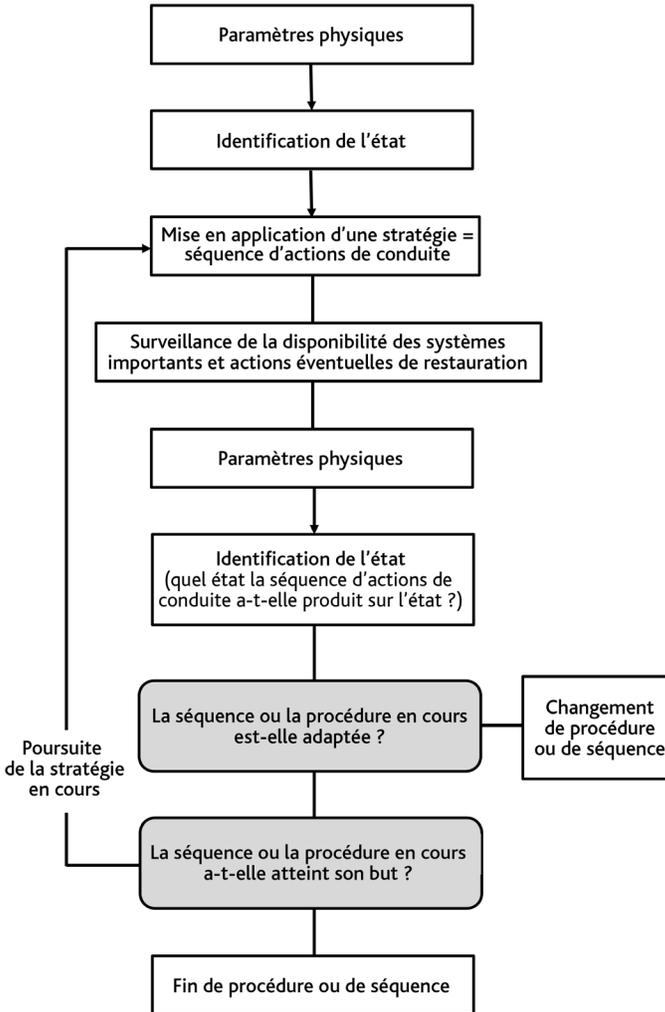


Figure 33.2. Schéma cyclique dans l'approche par état. IRSN (source EDF).

33.6. L'approche par états pour le réacteur EPR

Pour le réacteur EPR Flamanville 3, l'approche par états a été retenue dès la conception des procédures de conduite incidentelle et accidentelle. Le guidage des opérateurs (« orientation et stabilisation », voir plus haut) est toutefois automatisé.