

# La chaudière des réacteurs à eau sous pression



**Pierre COPPOLANI,  
Nathalie HASSENBOEHLER,  
Jacques JOSEPH,  
Jean-François PETETROT,  
Jean-Pierre PY,  
Jean-Sébastien ZAMPA**







# La chaudière des réacteurs à eau sous pression



GÉNIE ATOMIQUE

# **La chaudière des réacteurs à eau sous pression**

**Pierre Coppolani, Nathalie Hassenboehler,  
Jacques Joseph, Jean-François Petetrot,  
Jean-Pierre Py, Jean-Sébastien Zampa**



17, avenue du Hoggar  
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112  
91944 Les Ulis Cedex A, France

Illustration de couverture : Photo de gauche : départ d'un générateur de vapeur de 900 Mwe de l'usine Framatome ANP de Chalon. © Quatrain René, Framatome ANP. Photo de droite : représentation du réacteur EPR. © Image et process pour Framatome ANP.

ISBN : 2-86883- 741-7

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.

© EDP Sciences 2004



# Introduction à la collection « Génie Atomique »

---

Au sein du Commissariat à l'énergie atomique (CEA), l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN) est un établissement d'enseignement supérieur sous la tutelle du ministère de l'Éducation nationale et du ministère de l'Industrie. La mission de l'INSTN est de contribuer à la diffusion des savoir-faire du CEA au travers d'enseignements spécialisés et de formations continues, tant à l'échelon national, qu'aux plans européen et international.

Cette mission reste centrée sur le nucléaire, avec notamment l'organisation d'une formation d'ingénieur en « Génie Atomique ». Fort de l'intérêt que porte le CEA au développement de ses collaborations avec les universités et les écoles d'ingénieurs, l'INSTN a développé des liens avec des établissements d'enseignement supérieur aboutissant à l'organisation, en co-habilitation, de trente-huit enseignements de 3<sup>e</sup> cycle (DEA et DESS). À ces formations s'ajoutent les enseignements des disciplines de santé : les spécialisations en médecine nucléaire et en radiopharmacie, ainsi qu'une formation destinée aux physiciens d'hôpitaux.

La formation continue constitue un autre volet important des activités de l'INSTN, lequel s'appuie aussi sur les compétences développées au sein du CEA et chez ses partenaires industriels.

Dispensé dès 1956 au CEA Saclay, où ont été bâties les premières piles expérimentales, la formation en « Génie Atomique » (GA) l'est également depuis 1976 à Cadarache où a été développée la filière des réacteurs à neutrons rapides. Depuis 1958, le GA est enseigné à l'École des applications militaires de l'énergie atomique (EAMEA) sous la responsabilité de l'INSTN.

Depuis sa création, l'INSTN a diplômé plus de 4 000 ingénieurs que l'on retrouve aujourd'hui dans les grands groupes ou organismes du secteur nucléaire français : CEA, EDF, Framatome, Technicatome, Cogema, Marine nationale. De très nombreux étudiants étrangers provenant de différents pays ont également suivi cette formation.

Cette spécialisation s'adresse à deux catégories d'étudiants : civils et militaires. Les étudiants civils occuperont des postes d'ingénieurs d'études ou d'exploitation dans les réacteurs nucléaires, électrogènes ou de recherches, ainsi que dans les installations du cycle du combustible. Ils pourront évoluer vers des postes d'experts dans l'analyse du risque nucléaire et de l'évaluation de son impact environnemental. La formation de certains officiers des sous-marins et porte-avions nucléaires français est dispensée par l'EAMEA.

Le corps enseignant est formé par des chercheurs du CEA, des experts de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), des ingénieurs de l'industrie (EDF, AREVA, ...) Les principales matières sont : la physique nucléaire et la neutronique, la thermohydraulique, les matériaux nucléaires, la mécanique, la protection radiologique, l'instrumentation nucléaire, le fonctionnement et la sûreté des réacteurs à eau sous pression (REP), les filières et le cycle du combustible nucléaire. Ces enseignements dispensés sur une durée de six mois sont suivis d'un projet de fin d'étude, véritable prolongement de la formation réalisé à partir d'un cas industriel concret, se déroulent dans les centres de recherches du CEA, des groupes industriels (EDF, Framatome, Technicatome, etc.) ou à l'étranger (États-Unis, Canada, Royaume-Uni, ...) La spécificité de cette formation repose sur la large place consacrée aux enseignements pratiques réalisés sur les installations de l'INSTN (réacteur Ulysse, simulateurs de REP, laboratoires de radiochimie, etc.)

Aujourd'hui, en pleine maturité de l'industrie nucléaire, le diplôme d'ingénieur en « Génie Atomique » reste sans équivalent dans le système éducatif français et affirme sa vocation : former des ingénieurs qui auront une vision globale et approfondie des sciences et techniques mises en œuvre dans chaque phase de la vie des installations nucléaires, depuis leur conception et leur construction jusqu'à leur exploitation puis leur démantèlement.

L'INSTN s'est engagé à publier l'ensemble des supports de cours dans une collection d'ouvrages destinés à devenir des outils de travail pour les étudiants en formation et à faire connaître le contenu de cet enseignement dans les établissements d'enseignement supérieur français et européens. Édités par EDP Sciences, acteur particulièrement actif et compétent dans la diffusion du savoir scientifique, ces ouvrages sont également destinés à dépasser le cadre de l'enseignement pour constituer des outils indispensables aux ingénieurs et techniciens du secteur industriel.

Joseph Safieh  
Responsable général  
du cours de Génie Atomique

# Table des matières

---

## Partie I La production d'électricité nucléaire

### *Chapitre 1 : La centrale nucléaire*

|  |    |
|--|----|
| 1.1. Principe simplifié de fonctionnement .....                      | 15 |
| 1.1.1. Fonctionnement de la chaudière en puissance .....             | 15 |
| 1.1.2. Fonctionnement à puissance réduite .....                      | 17 |
| 1.1.3. États d'arrêts .....  | 17 |
| 1.1.4. Démarrage de l'installation .....                             | 19 |
| 1.2. Circuit secondaire eau/vapeur et production d'électricité ..... | 19 |
| 1.2.1. Circuit vapeur .....  | 21 |
| 1.2.2. Condenseur .....  | 22 |
| 1.2.3. Circuit d'eau alimentaire .....                               | 22 |
| 1.2.4. Évacuation d'énergie .....                                    | 23 |
| 1.2.5. Circuit de réfrigération .....                                | 23 |
| 1.3. Architecture générale d'une centrale .....                      | 24 |
| 1.3.1. Bâtiments de l'îlot nucléaire .....                           | 24 |
| 1.3.2. Architecture générale des îlots nucléaires .....              | 27 |
| 1.3.3. Bâtiments de l'îlot conventionnel .....                       | 27 |
| 1.3.4. Évolution de conception de l'enceinte de confinement .....    | 27 |

### *Chapitre 2 : Contraintes de conception et d'exploitation des centrales*

|  |    |
|--|----|
| 2.1. Latitude de choix des principaux paramètres .....   | 29 |
| 2.1.1. Longueur du cycle de combustible .....            | 29 |
| 2.1.2. Rendement du cycle eau/vapeur .....               | 30 |
| 2.1.3. Taille du cœur .....                              | 30 |
| 2.1.4. Pression primaire .....                           | 31 |
| 2.2. Conception générale du cœur .....                   | 35 |
| 2.2.1. Limites physiques du cœur .....                   | 35 |
| 2.2.2. Modes de pilotage .....                           | 37 |
| 2.3. Exigences d'exploitation venant du réseau .....     | 39 |
| 2.3.1. Exigences du réseau .....                         | 39 |
| 2.3.2. Exigences au niveau des tranches nucléaires ..... | 40 |

## Partie II Le combustible des REP

### *Chapitre 3 : Conception et fabrication du combustible*

|  |    |
|--|----|
| 3.1. Organisation industrielle de la fabrication .....   | 45 |
| 3.1.1. Conception du combustible .....   | 45 |
| 3.1.2. Lignes de fabrication du combustible .....  | 46 |
| 3.1.3. Assemblage final .....  | 47 |
| 3.1.4. Sûreté des opérations .....   | 48 |
| 3.1.5. Contrôles de fabrication .....  | 48 |
| 3.2. L'assemblage et ses composants .....  | 48 |
| 3.2.1. Géométrie de l'assemblage .....   | 48 |
| 3.2.2. Caractéristiques de l'assemblage .....  | 49 |
| 3.2.3. Squelette de l'assemblage .....   | 51 |
| 3.2.4. Sollicitations et critères .....  | 55 |
| 3.2.5. Caractéristiques des matériaux .....  | 57 |
| 3.3. Contraintes de conception des crayons .....   | 58 |
| 3.3.1. Comportement du crayon sous irradiation .....   | 58 |
| 3.3.2. Critères de conception .....  | 65 |
| 3.3.3. Modèles de comportement, outils de calcul et méthodes .....   | 65 |
| 3.3.4. Études de conception .....  | 66 |
| 3.3.5. Exemples d'impact du comportement du combustible en réacteur<br>sur le fonctionnement de la chaudière ..... | 69 |

### *Chapitre 4 : Retour d'expérience et évolution du combustible*

|  |    |
|--|----|
| 4.1. Irradiation et retour d'expérience .....  | 71 |
| 4.2. Bénéfices du retour d'expérience : évolution des produits<br>et améliorations des performances du combustible ..... | 72 |
| 4.2.1. Exemple des tubes-guides .....  | 73 |
| 4.2.2. Exemple des grilles .....   | 74 |
| 4.3. Perspectives d'évolution du combustible des REP .....   | 75 |

## Partie III Le circuit primaire

### *Chapitre 5 : La boucle primaire, la cuve et ses composants*

|   |    |
|---|----|
| 5.1. Boucle primaire .....                                  | 79 |
| 5.2. Cuve du réacteur .....                                 | 80 |
| 5.2.1. Éléments de la cuve .....                            | 82 |
| 5.2.2. Matériau de la cuve .....                            | 82 |
| 5.2.3. Contraintes de conception .....                      | 83 |
| 5.2.4. Situations de fonctionnement .....                   | 84 |
| 5.2.5. Dommages susceptibles d'affecter la cuve .....       | 84 |
| 5.2.6. Surveillance de la cuve .....                        | 90 |
| 5.3. Structures internes .....                              | 91 |
| 5.3.1. Structure des internes .....                         | 91 |
| 5.3.2. Interfaces internes – Assemblages combustibles ..... | 93 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.3.3. Interfaces internes supérieurs – Grappes de commande ..... | 97  |
| 5.3.4. Instrumentation du cœur .....                              | 97  |
| 5.3.5. Circulation de l'eau dans la cuve .....                    | 100 |
| 5.4. Mécanismes de commande des grappes (MCG) .....               | 101 |
| 5.4.1. Principe de fonctionnement .....                           | 101 |
| 5.4.2. Enceinte sous pression .....                               | 103 |
| 5.4.3. Mécanisme de levée .....                                   | 103 |
| 5.4.4. Tige de commande .....                                     | 105 |
| 5.4.5. Ensemble électromagnétique .....                           | 106 |
| 5.4.6. Système de surveillance de la position de la grappe .....  | 106 |

## **Chapitre 6 : Le pressuriseur**

|  |     |
|--|-----|
| 6.1. Architecture du pressuriseur .....        | 107 |
| 6.2. Principe de fonctionnement .....          | 107 |
| 6.2.1. Régime stationnaire .....               | 107 |
| 6.2.2. Régime transitoire .....                | 109 |
| 6.2.3. Effet piston .....                      | 110 |
| 6.2.4. Soupapes de décharge et de sûreté ..... | 111 |

## **Chapitre 7 : Les groupes motopompes primaires**

|  |     |
|--|-----|
| 7.1. Principe de fonctionnement .....              | 115 |
| 7.1.1. Courbe caractéristique .....                | 115 |
| 7.1.2. Fonctionnement normal .....                 | 118 |
| 7.1.3. Fonctionnement anormal des GMPP .....       | 118 |
| 7.2. Architecture des GMPP .....                   | 121 |
| 7.2.1. Éléments du GMPP .....                      | 121 |
| 7.2.2. Partie hydraulique .....                    | 123 |
| 7.2.3. Barrière thermique .....                    | 123 |
| 7.3. Étanchéité du groupe motopompe primaire ..... | 124 |
| 7.3.1. Étanchéité statique .....                   | 124 |
| 7.3.2. Système d'étanchéité d'arbre .....          | 124 |
| 7.4. Ligne d'arbre .....                           | 126 |
| 7.4.1. Liaison pompe moteur .....                  | 126 |
| 7.4.2. Guidage de la ligne d'arbre .....           | 126 |
| 7.5. Domaine de fonctionnement .....               | 127 |

## **Chapitre 8 : Le générateur de vapeur**

|   |     |
|---|-----|
| 8.1. Architecture des GV .....                            | 129 |
| 8.2. Thermohydraulique des générateurs de vapeur .....    | 132 |
| 8.2.1. Hydraulique .....                                  | 132 |
| 8.2.2. Thermique .....                                    | 133 |
| 8.2.3. Conséquences sur la conception des GV .....        | 134 |
| 8.2.4. Phénomènes de gonflement – Tassement .....         | 134 |
| 8.3. Conception mécanique des générateurs de vapeur ..... | 136 |
| 8.3.1. Faisceau tubulaire .....                           | 136 |
| 8.3.2. Enceinte sous pression secondaire .....            | 137 |

|   |     |
|---|-----|
| 8.4. Soupapes des générateurs de vapeur ..... | 137 |
| 8.4.1. Principe de fonctionnement .....       | 137 |
| 8.4.2. Fonctionnement en eau .....            | 140 |

## Partie IV Les principaux systèmes fluides

### **Chapitre 9 : Les systèmes auxiliaires**

|   |     |
|---|-----|
| 9.1. Système de contrôle volumétrique et chimique (RCV) / Système d'appoint en eau et en bore (REA) ..... | 143 |
| 9.1.1. Éléments du système de contrôle volumétrique et chimique RCV .....                                 | 144 |
| 9.1.2. Éléments du système d'appoint en eau et en bore (REA) .....  | 151 |
| 9.1.3. Fonctionnement des circuits RCV/REA .....  | 151 |
| 9.2. Système de refroidissement du réacteur à l'arrêt (RRA) .....   | 158 |
| 9.2.1. Éléments du circuit RRA .....  | 158 |
| 9.2.2. Protection contre les surpressions à froid .....   | 160 |
| 9.2.3. Bilan thermique et dimensionnement .....   | 161 |
| 9.2.4. Fonctionnement du RRA .....  | 161 |
| 9.2.5. Transitoire de refroidissement de 180 °C à 60 °C .....   | 164 |

### **Chapitre 10 : Les systèmes de sauvegarde**

|   |     |
|---|-----|
| 10.1. Système d'injection de sécurité (RIS) .....                             | 167 |
| 10.1.1. Principes de conception du circuit .....                              | 167 |
| 10.1.2. Éléments du RIS .....   | 168 |
| 10.1.3. Fonctionnement du RIS .....   | 170 |
| 10.1.4. Secours mutuel RIS/EAS .....  | 175 |
| 10.1.5. Système RIS des tranches de 900 MWe .....                             | 177 |
| 10.2. Système d'alimentation en secours des générateurs de vapeur (ASG) ..... | 180 |
| 10.2.1. Éléments du système ASG .....   | 181 |
| 10.2.2. Fonctionnement .....  | 182 |
| 10.3. Système d'aspersion de l'enceinte (EAS) .....                           | 182 |
| 10.3.1. Éléments du circuit EAS .....   | 183 |
| 10.3.2. Fonctionnement .....  | 184 |

### **Chapitre 11 : Les systèmes secondaires**

|  |     |
|--|-----|
| 11.1. Circuit eau-vapeur (VVP/ARE) .....                 | 185 |
| 11.1.1. Groupe turboalternateur .....                    | 185 |
| 11.1.2. Poste d'eau .....                                | 187 |
| 11.2. Système de contournement de la turbine (GCT) ..... | 190 |
| 11.2.1. Éléments du système de contournement .....       | 190 |
| 11.2.2. Fonctionnement .....                             | 194 |

### **Chapitre 12 : Les systèmes fluides support**

|  |     |
|--|-----|
| 12.1. Système de réfrigération intermédiaire (RRI) ..... | 195 |
| 12.1.1. Éléments du RRI .....                            | 195 |
| 12.1.2. Fonctionnement .....                             | 198 |

|  |     |
|--|-----|
| 12.2. Système d'eau brute secourue (SEC) ..... | 198 |
| 12.2.1. Éléments du circuit SEC .....          | 199 |
| 12.2.2. Fonctionnement .....                   | 199 |

## **Partie V Les alimentations électriques et le contrôle-commande**

### ***Chapitre 13 : Les alimentations électriques***

|  |     |
|--|-----|
| 13.1. Liaisons externes .....                            | 203 |
| 13.1.1. Réseau principal .....                           | 203 |
| 13.1.2. Réseau auxiliaire .....                          | 203 |
| 13.2. Réseau interne de la tranche .....                 | 203 |
| 13.2.1. Sources externes .....                           | 204 |
| 13.2.2. Sources internes .....                           | 204 |
| 13.2.3. Auxiliaires .....                                | 204 |
| 13.3. Fonctionnement des alimentations électriques ..... | 205 |
| 13.3.1. Fonctionnement normal .....                      | 205 |
| 13.3.2. Défaillance du réseau principal .....            | 205 |

### ***Chapitre 14 : Les systèmes de régulation***

|  |     |
|--|-----|
| 14.1. Moyens de régulation des besoins .....   | 211 |
| 14.1.1. Besoins d'un exploitant .....  | 211 |
| 14.1.2. Régulation turbine .....   | 216 |
| 14.2. Grandeurs réglées dans un réacteur REP et capteurs associés .....                        | 218 |
| 14.2.1. Température moyenne primaire .....   | 219 |
| 14.2.2. Pression primaire .....  | 221 |
| 14.2.3. Niveau pressuriseur .....  | 221 |
| 14.2.4. Niveau dans les générateurs de vapeur .....  | 221 |
| 14.2.5. Autres grandeurs principales mesurées pour la régulation<br>et capteurs associés ..... | 222 |
| 14.3. Principaux organes réglants .....  | 223 |
| 14.3.1. Grappes de contrôle .....  | 224 |
| 14.3.2. Vannes de contournement vapeur au condenseur .....                                     | 225 |
| 14.3.3. Vannes de décharge à l'atmosphère .....  | 225 |
| 14.3.4. Chauffeuses du pressuriseur .....  | 225 |
| 14.3.5. Aspersions pressuriseur .....  | 226 |
| 14.3.6. Vanne de charge (circuit de contrôle volumétrique et chimique) .....                   | 226 |
| 14.3.7. Vannes réglantes du circuit d'eau alimentaire normale .....                            | 227 |
| 14.3.8. Vannes réglantes des turbopompes alimentaires .....                                    | 227 |
| 14.4. Chaînes de régulation .....  | 227 |
| 14.4.1. Chaîne de régulation de température moyenne par les grappes .....                      | 227 |
| 14.4.2. Chaîne de contrôle du contournement vapeur au condenseur .....                         | 239 |
| 14.4.3. Chaîne de régulation des vannes de décharge à l'atmosphère .....                       | 244 |
| 14.4.4. Chaîne de régulation de la pression dans le pressuriseur .....                         | 245 |
| 14.4.5. Chaîne de régulation du niveau dans le pressuriseur .....                              | 247 |
| 14.4.6. Chaîne de régulation du niveau dans les générateurs de vapeur .....                    | 252 |

|   |     |
|---|-----|
| 14.4.7. Chaîne de régulation de vitesse des turbopompes d'eau alimentaire .....   | 260 |
| 14.4.8. Chaîne de régulation de niveau dans la bêche alimentaire<br>et le condenseur (tranches CP2 et postérieures) ..... | 261 |
| 14.4.9. Chaîne de régulation de la pression de la bêche alimentaire<br>(tranches CP2 et postérieures) .....               | 262 |
| 14.5. Fonctionnement d'une tranche en « grand transitoire » : l'ilotage .....   | 264 |
| 14.5.1. Le transitoire et ses enjeux .....  | 264 |
| 14.5.2. Commentaires sur l'intervention des systèmes et l'évolution<br>des principaux paramètres .....                    | 265 |
| 14.5.3. Xénon et dilution .....   | 267 |
| 14.5.4. Recouplage de l'alternateur et remontée en puissance .....  | 269 |

## **Chapitre 15 : Le système de protection**

|  |     |
|--|-----|
| 15.1. Protections spécifiques et protections génériques .....                                  | 273 |
| 15.2. Arrêt automatique du réacteur et systèmes de sauvegarde .....                            | 274 |
| 15.2.1. Système d'arrêt automatique du réacteur (AAR) .....                                    | 274 |
| 15.2.2. Système d'injection de sécurité (RIS ou IS) .....                                      | 274 |
| 15.2.3. Aspersion enceinte (EAS) .....   | 275 |
| 15.2.4. Alimentation de secours des générateurs de vapeur (ASG) .....                          | 275 |
| 15.2.5. Autres actions commandées par le système de protection .....                           | 275 |
| 15.3. Protections génériques .....   | 275 |
| 15.3.1. Capteurs associés aux protections génériques .....                                     | 276 |
| 15.3.2. Dimensionnement des seuils de surpuissance linéique .....                              | 276 |
| 15.3.3. Dimensionnement des chaînes de Rapport de Flux<br>Thermique Critique .....             | 276 |
| 15.3.4. Effets dynamiques .....  | 276 |
| 15.3.5. Alarmes et arrêt automatique du réacteur .....   | 277 |
| 15.3.6. Limites des protections génériques .....   | 277 |
| 15.4. Protections spécifiques du cœur : chaînes de protection nucléaire .....                  | 277 |
| 15.4.1. Instrumentation .....  | 278 |
| 15.4.2. Recouvrement des gammes d'instrumentation .....  | 278 |
| 15.4.3. Seuils .....   | 278 |
| 15.5. Protections spécifiques du réacteur en cas de brèche primaire .....                      | 278 |
| 15.5.1. Signaux primaires déclenchant l'arrêt automatique du réacteur .....                    | 279 |
| 15.5.2. Signaux primaires déclenchant la mise en service<br>de l'injection de sécurité .....   | 279 |
| 15.5.3. Cas des signaux issus des conditions dans l'enceinte .....                             | 280 |
| 15.6. Protections spécifiques du réacteur en cas de brèche secondaire .....                    | 281 |
| 15.6.1. Transitoires de RTV et risques pour le primaire .....                                  | 281 |
| 15.6.2. Actions requises .....   | 281 |
| 15.6.3. Signal d'injection de sécurité par basse pression vapeur .....                         | 282 |
| 15.6.4. Nécessité d'autres signaux pour couvrir tout le spectre<br>des tailles de brèche ..... | 283 |
| 15.6.5. Dimensionnement des seuils, brèches interfaces et spectre de brèche .....              | 284 |
| 15.7. Conclusion sur le système de protection .....  | 285 |
| <b>Annexe</b> .....  | 287 |



# Auteurs

---

*Pierre COPPOLANI, Docteur Ingénieur, diplômé de l'École centrale des arts et manufactures, a commencé sa carrière à Framatome à concevoir les systèmes de régulation et de protection des réacteurs. Affecté depuis à la division Equipements, il supervise les études relatives à la robinetterie des nouvelles centrales EPR.*

*Nathalie HASSENBOEHLER, ingénieur diplômée de l'École nationale supérieure de chimie de Paris, travaille à Framatome-ANP dans le domaine de la conception des circuits des tranches REP, en France et à l'Export, dont celles de Ling Ao (Chine). Elle participe aujourd'hui au projet EPR.*

*Jacques JOSEPH, physicien de formation, a participé comme expert pour Framatome ANP à la R&D de la physique du combustible. Il participe dans ce domaine à la capitalisation des connaissances et à la formation.*

*Jean-François PETETROT, ingénieur diplômé de l'École supérieure d'électricité, travaille à Framatome-ANP dans le domaine des études pour le fonctionnement normal des tranches REP.*

*Jean-Pierre PY, ingénieur diplômé de l'École supérieure d'électricité, a participé au démarrage du premier REP Français (Chooz A, 300 MWe) ainsi qu'à ceux des premiers REP Américains de 800 MWe (Surry units 1&2). Il est chargé du développement de produits nouveaux dans le secteur Réacteurs.*

*Jean-Sébastien ZAMPA, ingénieur diplômé de l'École Polytechnique a débuté sa carrière à Framatome-ANP dans le domaine des études du fonctionnement accidentel des tranches REP. Il occupe aujourd'hui la fonction de chef de projet et d'ingénieur d'affaire pour des études et des travaux d'améliorations de la sûreté et des performances de centrales en Chine et en Afrique du Sud.*

# Remerciements

Les auteurs remercient toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de cet ouvrage. Ils remercient également les auteurs de certains dessins et photographies pour leur autorisation de publication pour illustrer cet ouvrage, notamment l'EPRI pour l'aimable autorisation de publier la figure 2.9.

Les auteurs remercient enfin leurs collègues de Framatome-ANP des Directions Ingénierie et Services et Conception et Ventes du Combustible qui ont accepté de relire le document et de faire toutes les suggestions utiles à sa bonne qualité technique.

Nota :

Sauf exception, les données et illustrations figurant dans ce livre sont celles des chaudières équipant les centrales REP de 1300MWe



Le critère de dimensionnement est déterminé par ce découplage : quelle que soit la pression secondaire initiale, le signal de basse pression vapeur avancée doit intervenir avant 3 secondes.

Le dimensionnement de ce module a amené au même choix de paramètres sur l'ensemble des paliers 900, 1 300 et 1 450.

On retient  $\tau_1 = 50$  s et  $\tau_2 = 5$  s.

On peut considérer qu'à court terme (si  $t < \tau_1$  et  $t < \tau_2$ ), ce module équivaut à la multiplication par 10 ( $= \tau_1 / \tau_2$ ) de la pente de la dépressurisation.

En fait, pour la rupture d'une ligne vapeur principale, le signal est atteint en moins de 1 s au lieu des 3 s requises.

La prise en compte des conservatismes et règles d'études du rapport de sûreté permet de garantir l'isolement vapeur effectif à 10 s et un plein débit d'IS à 20 s.

## **15.6.4. Nécessité d'autres signaux pour couvrir tout le spectre des tailles de brèche**

### **15.6.4.1. Détection des petites brèches secondaires**

Les brèches de plus petites tailles conduisent à des dépressurisations moins rapides. Si cela représente un avantage du point de vue de la sévérité de la thermohydraulique de l'accident, une plus petite brèche a pour inconvénient de retarder l'arrivée du signal de basse pression vapeur avancée.

Au-dessous d'une certaine taille de brèche, le signal de basse pression vapeur n'est plus atteint dans un délais raisonnable.

À noter : sur le palier 900, l'IS est provoqué par le signal de basse pression vapeur avancée coïncidant avec un haut débit dans une ligne vapeur. Au-dessous d'une certaine taille de brèche, ce second signal n'est jamais atteint. Sur le palier 1 300, l'anticipation du signal qu'apporte le module d'avance retard décroît jusqu'à rendre ce signal peu opérant pour des faibles tailles de brèche.

Il convient donc de trouver d'autres signaux aptes à effectuer les actions nécessaires à la gestion de transitoire. C'est sur des signaux issus du primaire que s'effectuent les actions automatiques de protection du réacteur listées ci-dessus.

### **15.6.4.2. Pression au pressuriseur**

Le signal d'AAR par basse pression au pressuriseur assure donc la chute des grappes et la limitation du débit d'eau alimentaire normale (ARE) en cas de RTV de faible taille de brèche.

Au-dessous de 121 bar, le signal d'injection de sécurité par très basse pression au pressuriseur est obtenu. Il déclenche :

- la mise en service de l'IS (l'injection d'eau borée dans le primaire) ;
- l'isolement de l'eau alimentaire normale ;
- le démarrage de l'eau alimentaire de secours (ASG).

### **15.6.4.3. Isolement des lignes vapeur**

Pour de très petites tailles de brèche, la régulation de la pression au pressuriseur est en mesure de compenser au moins partiellement la dépressurisation. Il faut donc qu'un autre système soit en mesure de traiter ces toutes petites brèches. De plus, un autre signal doit être dimensionné pour assurer l'isolement des lignes vapeur pour les cas où intervient le signal de basse pression au pressuriseur.

Sur les paliers français à 4 boucles de 1 300 MWe et 1 450 MWe, on a défini un signal de très basse température sur une branche froide (TBTBF). Ce signal, caractéristique des transitoires de RTV, provoque l'isolement des lignes vapeur. Il provoque en outre le démarrage différé de la FBA, système destiné à assurer le retour en sous-criticité du réacteur à long terme. Les études des transitoires de RTV montrent que ce signal intervient toujours après les signaux de basse et très basse pression au pressuriseur. Initialement fixé à 281 °C, le seuil de TBTBF a été abaissé à 267 °C pour éviter les intempéstifs.

Sur le palier 900, c'est sur un signal de très basse pression vapeur qu'a lieu l'isolement des lignes vapeur.

À noter : le signal de basse pression vapeur avancée concomitant à un haut débit vapeur n'est jamais atteint au-dessous d'une certaine taille de brèche car le débit vapeur est insuffisant pour obtenir un signal de haut débit vapeur.

### **15.6.5. Dimensionnement des seuils, brèches interfaces et spectre de brèche**

Pour vérifier le bon dimensionnement du système de sécurité, on détermine pour chaque taille de brèche quel signal est susceptible d'intervenir en premier pour protéger le réacteur. Classiquement on reconstitue les courbes des temps d'intervention des signaux en fonction des tailles de brèche.

En supposant que les évolutions de RFTC sont monotones entre deux brèches interfaces, c'est-à-dire deux brèches où deux signaux différents arrivent de façon concomitante, on peut se contenter de vérifier que les brèches interfaces sont plus favorables que la brèche guillotine.

Enfin, en raison d'une fréquence d'occurrence plus forte, l'ouverture d'une soupape est classée comme transitoire de seconde catégorie et doit respecter des critères plus sévères que la brèche guillotine (quatrième catégorie) ou les autres tailles de brèches (troisième catégorie).

En fait, lors de la mise en place de nouvelles gestions de combustible, l'étude de l'accident de RTV constitue une limite pour les performances du combustible (longueur des cycles, teneur en MOX...). Mais on tend à limiter autant que possible les modifications des valeurs des seuils de protection pour ne pas modifier les contraintes d'exploitation et éviter les risques d'AAR ou d'IS par des signaux intempéstifs.

On préfère modifier la concentration en bore du PTR (et du RIB sur 900), la sous-criticité requise dans les états d'arrêt (et donc la concentration en bore requise au primaire) ou même installer des grappes supplémentaires plutôt que de changer les valeurs des seuils des protections.