

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. Sécurité 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 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 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 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. Chauffelettes du pressuriseur	225
14.3.5. Aspersion 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 et le condenseur (tranches CP2 et postérieures)	261
14.4.9. Chaîne de régulation de la pression de la bêche alimentaire (tranches CP2 et postérieures)	262
14.5. Fonctionnement d'une tranche en « grand transitoire » : l'îlotage	264
14.5.1. Le transitoire et ses enjeux	264
14.5.2. Commentaires sur l'intervention des systèmes et l'évolution 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 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 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 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
Annexe	287