

# Sommaire

---

<b>Avant-propos</b> .....	v
<b>Chapitre 1. L'histoire du parc de production nucléaire : une aventure technique, politique et industrielle</b>	
1.1. Le CEA, la dissuasion et les origines de la filière graphite-gaz .....	1
1.2. Les débuts d'EDF dans le nucléaire .....	2
1.3. La commission PEON .....	3
1.4. La construction du parc de réacteurs à eau pressurisée : les origines .....	3
1.4.1. L'appel d'offre de la SENA .....	3
1.4.2. Framatome et la licence Westinghouse .....	4
1.4.3. La construction et la mise en service de la SENA.....	4
1.4.4. La période d'incertitude jusqu'à la commande de Tihange .....	6
1.5. Le tournant des années 1967–1969.....	7
1.5.1. L'abandon des UNGG et le choix de la filière à eau légère .....	7
1.5.2. PWR versus BWR.....	9
1.6. Le lancement du programme à eau légère.....	11
1.6.1. Les premières commandes : les tranches REP du Bugey et la seconde tranche de Fessenheim .....	11
1.6.2. Le marché des BWR de Saint-Laurent-des-Eaux .....	11
1.6.3. L'accélération du programme – la mise en place de l'outil industriel français .....	12
1.6.4. La fermeture de la parenthèse BWR .....	13
1.6.5. Une alternative française à la licence Westinghouse ? .....	13
1.6.6. La nuit du 4 août 1975 et ses conséquences .....	13
1.6.7. Résumé des commandes et constructions de centrales.....	14
1.6.8. Les hommes du REP.....	16
1.6.9. La sûreté nucléaire au lancement du programme.....	16
1.7. La francisation .....	16
1.8. Les paliers et la standardisation .....	18
1.8.1. La recherche de l'effet de série .....	18
1.8.2. Les effets de série et leur impact sur la compétitivité économique .....	18
1.8.3. Standardisation et évolutions .....	18

1.9.	Le pilotage des réacteurs du palier CP0 .....	19
1.10.	Le passage du mode A au mode G .....	20
1.11.	Le palier N4.....	23
1.12.	Le réacteur de nouvelle génération « EPR » ou « European Pressurizer Reactor » .....	23

## Chapter 2. Éléments de physique et de neutronique pour le fonctionnement normal des REP

2.1.	Évolution du combustible et réactivité .....	25
2.1.1.	Évolution du combustible.....	25
2.1.2.	Dilution et réactivité .....	27
2.1.3.	Poisons consommables et réactivité .....	29
2.1.4.	Évolution de l'efficacité différentielle du bore soluble au cours d'un cycle complet d'exploitation.....	32
2.1.5.	Taux de combustion, JEPP et longueur de cycle .....	33
2.2.	Effets de température du modérateur .....	33
2.2.1.	Généralités sur les effets de température du modérateur.....	33
2.2.2.	Exercice : la répartition du CTM en deux effets séparés bore et eau .....	37
2.2.3.	Exercice : reconstitution de l'abaque du CTM en fonction de la température et paramétré suivant la concentration en bore.....	39
2.2.4.	Valeur du CTM en début de vie .....	42
2.2.5.	CTM en prolongation de cycle.....	43
2.2.6.	Effet de température du modérateur et sûreté .....	46
2.3.	Effet de température du modérateur et effet de redistribution.....	47
2.4.	Effet Doppler : influence de la température du combustible sur la réactivité .....	48
2.4.1.	Effet d'une augmentation de la température du combustible .....	48
2.4.2.	Évolution du coefficient Doppler en fonction de la température.....	50
2.4.3.	Notion de température effective .....	50
2.4.4.	Détermination du coefficient Doppler-puissance .....	51
2.4.5.	Importance de l'effet Doppler dans les études d'accident .....	55
2.5.	Notion de défaut de puissance.....	56
2.6.	Aspects dynamiques de l'empoisonnement xénon.....	58
2.6.1.	Propriétés nucléaires du xénon-135 .....	59
2.6.2.	Calcul analytique de l'empoisonnement xénon .....	59
2.6.3.	Établissement d'un modèle simplifié de pilotage.....	62
2.6.4.	Pic xénon .....	63
2.6.5.	Évolution du xénon lors de transitoires de variation de charge .....	67
2.6.6.	Les oscillations axiales xénon .....	68
2.6.7.	Les oscillations radiales azimutales et radiales.....	81

## Chapter 3. Introduction au fonctionnement et au pilotage des REP

3.1.	Étude de la dynamique libre d'un réacteur à eau pressurisée .....	84
3.1.1.	Introduction .....	84
3.1.2.	Modélisation de la dynamique libre : puissance extraite aux GV et puissance thermique primaire .....	86
3.1.3.	Mise en évidence des difficultés posées par la dynamique libre.....	88
3.1.4.	Prise en compte de la partie secondaire de la tranche .....	90
3.1.5.	Réponse en dynamique libre à une variation de réactivité .....	91
3.2.	La nécessité d'un réglage de la température moyenne primaire .....	93
3.2.1.	Choix de la température de consigne .....	93
3.2.2.	Réglage de la température moyenne primaire .....	95
3.3.	Cas particulier du secondaire commandé en pression.....	97
3.3.1.	Contrôle en pression du secondaire et conséquences pour la température moyenne primaire .....	97
3.3.2.	Fonctionnement en attente à chaud .....	97
3.3.3.	Montée en puissance par extraction de grappes.....	99
3.3.4.	Montée en puissance par dilution – correction de la température moyenne par action au GCT-c .....	100
3.4.	Synthèse sur les comportements dynamiques étudiés.....	101
3.5.	Que se passerait-il si la température était exclusivement réglée avec un unique groupe de grappes de commande ?.....	101
3.6.	Le pilotage en mode A .....	103
3.6.1.	Modèle utilisé dans cette section et les suivantes.....	103
3.6.2.	Le pilotage en mode A avant les critères ECCS 1973 .....	103
3.6.3.	La mitigation des effets sur la distribution axiale de puissance pour maintenir l'axial offset constant.....	104
3.6.4.	Le pilotage en mode A à axial offset constant .....	104
3.6.5.	Trajectoire dans le diagramme de pilotage en mode A assoupli.....	107
3.6.6.	Exercice : calcul du débit maximal de dilution sur le premier palier bas.....	109
3.6.7.	Mode A et réglage de fréquence.....	109
3.7.	Introduction au concept de mode de pilotage .....	109
3.8.	Le mode A : des performances dynamiques limitées.....	110
3.9.	Introduction au pilotage mode G.....	111
3.9.1.	Généralités.....	111
3.9.2.	Principes de conception des GCP .....	113
3.9.3.	Le groupe de régulation de température.....	115
3.9.4.	Commande des groupes de compensation de puissance.....	116
3.9.5.	Calibrage des GCP : actualisation périodique de la courbe G3 .....	119
3.9.6.	Réalisation d'un transitoire en mode G .....	121
3.9.7.	Les limites des performances du mode G .....	122

3.9.8.	Exigences des STE .....	127
3.9.9.	Contrôles des instabilités xénon dans un réacteur exploité en mode G .....	128
3.10.	Effets du réglage de fréquence sur le cœur d'un REP .....	128
3.10.1.	Intérêt de la question .....	128
3.10.2.	Réglage primaire en dynamique libre .....	129
3.10.3.	Mouvements de R pour le réglage de température .....	130
3.10.4.	Que se passe-t-il en stretch, lorsque la tranche fait du réglage primaire ?.....	130
3.11.	Passage en manuel du groupe de régulation de température (groupe R).....	130
3.12.	Schéma d'organisation générale des REP 1 300 MWe.....	131

## Chapter 4. Distribution de puissance dans les cœurs de REP

4.1.	Définitions de l'axial offset et du déséquilibre axial de puissance. Introduction au diagramme de pilotage des REP 1 300 MWe.....	133
4.1.1.	Définitions de l'AO et du DPAX.....	133
4.1.2.	Le diagramme de pilotage des REP 1 300 MWe .....	134
4.2.	Détermination du profil axial de la température du fluide primaire .....	135
4.3.	Distribution axiale et radiale de puissance en début de vie avec un cœur totalement neuf.....	137
4.3.1.	Distribution axiale de puissance avec un cœur totalement neuf, à une puissance inférieure au seuil Doppler .....	137
4.3.2.	Distribution axiale de puissance avec un cœur totalement neuf, en début de vie à 100 % de puissance.....	139
4.4.	Influence de la puissance totale du réacteur sur la distribution axiale de puissance.....	140
4.5.	Évolution de la distribution axiale tout au long du cycle .....	141
4.6.	Sensibilité du DPAX à différents paramètres.....	143
4.6.1.	Sensibilité à la position du groupe R .....	143
4.6.2.	Sensibilité à la température moyenne : pilotage chaud/pilotage froid .....	145
4.7.	Évolution du flux neutronique dans les extrémités haute et basse du cœur .....	145
4.8.	Influence sur le RFTC de l'avancement dans le cycle .....	147
4.9.	Évolution de la forme axiale de puissance assemblage par assemblage ....	148
4.10.	Évolution radiale de la distribution de puissance au long du cycle d'exploitation .....	151
4.11.	Principes de la maîtrise de l'axial offset dans les transitoires de variation de puissance en mode G .....	154
4.11.1.	Effet d'un groupe de grappes sur la distribution axiale .....	154
4.11.2.	Effet de l'insertion des GCP .....	154
4.11.3.	Mise en œuvre d'un contrôle de l'axial offset dans les modes de pilotage avancés .....	156
4.12.	Analyse d'un transitoire de variation de puissance .....	157

4.12.1.	Observation des effets axiaux .....	158
4.12.2.	Effet radial et effet axial de l'insertion de G1 et G2.....	160
4.12.3.	Corrélation entre la position de G2 et le DPRAD.....	162
4.12.4.	Gestion du palier bas par l'opérateur .....	163
4.13.	Étude d'une oscillation xénon en cours de stretch : détermination d'un coefficient de réactivité en pcm/%AO .....	164
4.14.	Évolution des pics radiaux de puissance en fonction de l'avancement dans le cycle .....	166
4.15.	Aspects azimutaux.....	168

## **Chapter 5. Démarrage d'un REP après rechargement : à partir de l'arrêt à chaud, montée en puissance**

5.1.	Aspects neutroniques d'une montée en puissance .....	171
5.1.1.	Illustration : montée en puissance d'un réacteur du palier CPO .....	171
5.1.2.	Bilan de réactivité de la montée en puissance d'un REP 1 300 MWe après rechargement .....	176
5.2.	Déroulement de la montée en puissance d'un REP 1 300 .....	177
5.2.1.	Préparation de la partie conventionnelle .....	178
5.2.2.	Évolution de la concentration en bore pendant le redémarrage du réacteur .....	178
5.2.3.	État initial : réacteur en AN/GV et recherche de divergence autorisée .....	178
5.2.4.	Approche sous-critique, divergence .....	180
5.2.5.	Essais physiques à puissance nulle .....	181
5.2.6.	Montée à une puissance thermique coeur de 1 %Pn .....	182
5.2.7.	Couplage des circuits primaire et secondaire .....	183
5.2.8.	Basculement GCT-a/GCT-c .....	183
5.2.9.	Mise en service d'une TPA .....	184
5.2.10.	Basculement ASG/ARE .....	184
5.2.11.	Passage en mode automatique du niveau d'eau du condenseur .....	185
5.2.12.	Basculement sur vapeur vive ADG .....	185
5.2.13.	Montée à 8 %Pn, lancement de la turbine et couplage .....	185
5.2.14.	Montée à 15 %Pn .....	188
5.2.15.	Montée entre 45 % et 50 %Pn sur limiteur et palier de puissance .....	189
5.2.16.	Montée en puissance entre 75 % et 80 %Pn .....	191
5.2.17.	Montée jusqu'à un palier entre 99 et 100 %Pn et mise à disposition de la tranche au réseau .....	192
5.3.	Tableaux de synthèse .....	192
5.4.	Complément : l'approche sous-critique .....	197

## Chapter 6. Le transitoire d'îlotage

6.1.	Généralités : îlotage automatique et îlotage manuel .....	201
6.2.	Quelques principes sur l'îlotage .....	202
6.3.	Déroulement chronologique d'un îlotage manuel .....	203
6.4.	Ce qui doit être évité lors de l'îlotage.....	214
6.5.	Réflexions sur le déroulement du transitoire et l'atteinte de l'état final de la tranche .....	215
6.6.	Quelques calculs simples pour l'îlotage .....	216
6.6.1.	Gradient de baisse de puissance nucléaire en fonction de l'insertion des grappes de commande.....	216
6.6.2.	Amplitude du pic de température en début d'îlotage et durée d'obtention du pic de température .....	218
6.6.3.	Calcul théorique de l'état final tranche REP 1 300 MWe (P'4) après îlotage.....	220
6.7.	Un incident intéressant à analyser : l'îlotage sans mouvement de grappes .....	222
6.7.1.	L'îlotage sans grappes de Chooz.....	222
6.7.2.	Exercice : détermination analytique de l'état d'équilibre d'un REP 1 300 MW (P'4) à l'issue d'un îlotage sans grappes .....	223
6.8.	Élaboration de la grandeur image de la charge totale : pourquoi la consigne d'ouverture et non pas l'ouverture effective ? .....	224
6.9.	Conduite de la tranche après les premières minutes d'îlotage.....	226

<b>Principales sources utilisées.....</b>	<b>229</b>
---	------------

## Annexe 1. Les protections du réacteur (REP 1 300 MWe) – l'instrumentation nucléaire

A1.1.	Introduction au système de protection du réacteur .....	234
A1.2.	L'arrêt automatique du réacteur.....	235
A1.3.	Protections globales et protections locales.....	236
A1.4.	Les protections spécifiques relatives au flux et à la puissance thermique .....	237
A1.5.	Le système de protection et la fonction de sûreté « surveillance ».....	238
A1.6.	Les protections génériques : paramètres d'entrée des calculs.....	238
A1.7.	Calculs pour les protections génériques : puissances thermiques et puissances neutroniques, distribution de puissance axiale $P(z)$ .....	239
A1.7.1.	Puissances thermiques.....	239
A1.7.2.	Puissances neutroniques .....	240
A1.7.3.	Distribution axiale de puissance .....	240
A1.8.	Calculs des facteurs de pic radiaux.....	242
A1.9.	Calculs de la puissance linéique maximale à la cote $z$ et du facteur d'élévation d'enthalpie .....	243
A1.9.1.	Puissance linéique maximale à la cote $z$ .....	243

A1.9.2. Définitions du $Q(z)$ et du facteur de point chaud $F_Q$ .....	245
A1.9.3. Facteur d'élévation d'enthalpie .....	245
A1.10. Calcul du RFTC .....	245
A1.11. Calcul des paramètres de pilotage DPAX et DPRAD.....	248
A1.12. Calcul du DPazn.....	249
A1.13. Les essais périodiques cœur .....	250
A1.14. Annexe : calcul de la puissance linéique moyenne et du flux thermique surfacique moyen.....	250
A1.14.1. Puissance linéique moyenne à puissance nominale.....	250
A1.14.2. Flux thermique surfacique moyen.....	250
A1.15. À propos des seuils en puissance linéique.....	251
A1.16. Les permissifs et verrouillages .....	251
A1.16.1. Les verrouillages .....	251
A1.16.2. Les permissifs .....	251
A1.17. Complément : la prise en compte de l'IPG dans le SPIN et les STE .....	252
A1.17.1. Phénomènes.....	252
A1.17.2. Le risque IPG en situation de classe 2 : système de protection et limites du domaine de fonctionnement.....	255
A1.17.3. Prise en compte du FPPI par les STE .....	256
A1.17.4. La remontée en puissance après arrêt pour rechargement.....	256
A1.17.5. Autres prescriptions des STE relatives à l'IPG .....	257
A1.18. Complément : l'instrumentation nucléaire .....	257
A1.18.1. Emplacements des détecteurs.....	257
A1.18.2. Chaînes niveau source (CNS).....	258
A1.18.3. Chaînes niveau intermédiaire (CNI).....	260
A1.18.4. Chaînes niveau puissance (CNP) .....	260

## **Annexe 2. Les circuits eau et vapeur d'une tranche P'4**

A2.1. Les circuits de vapeur principale VVP et VPU .....	263
A2.1.1. Le système VVP .....	263
A2.1.2. Le système VPU .....	264
A2.2. Le système de contournement de la turbine principale.....	265
A2.2.1. GCT-c.....	265
A2.2.2. GCT-a.....	266
A2.3. Le circuit vapeur à partir de l'admission turbine .....	266
A2.3.1. Quelques rappels .....	266
A2.3.2. La turbine .....	267
A2.3.3. Les soutirages .....	269
A2.3.4. GSS .....	270
A2.3.5. Calcul de la puissance mécanique du groupe turbo-alternateur .....	271
A2.3.6. Le condenseur .....	272
A2.3.7. Le choix d'une turbine à mi-vitesse (half speed turbine) .....	272
A2.4. Le circuit d'eau alimentaire : poste d'eau basse pression.....	273

A2.4.1.	L'extraction d'eau au condenseur .....	273
A2.4.2.	Le poste ABP .....	274
A2.5.	La bache ADG.....	274
A2.5.1.	Les fonctions de la bache dégazante .....	274
A2.5.2.	Niveau et pression dans la bache .....	274
A2.5.3.	L'alimentation en vapeur de la bache.....	275
A2.5.4.	La fonction de contournement vapeur .....	276
A2.6.	Le circuit d'eau alimentaire : les turbopompes alimentaires .....	276
A2.6.1.	Description du système APP et fonctions.....	276
A2.6.2.	La régulation de vitesse des TPA .....	277
A2.7.	Le circuit d'eau alimentaire : le poste d'eau haute pression .....	277
A2.8.	L'alimentation en eau des GV : le système ARE.....	278
A2.8.1.	Fonction et description du système .....	278
A2.8.2.	Les vannes réglantes de niveau .....	278
A2.8.3.	Le $\Delta P$ eau-vapeur .....	279
A2.8.4.	Principes de la chaîne de réglage du $\Delta P$ eau-vapeur.....	279
A2.9.	Représentation dans un diagramme thermodynamique – les schemas eau et vapeur .....	280

### Annexe 3. Régulation du groupe turbo-alternateur

A3.1.1.	Structure générale.....	283
A3.1.2.	Module vitesse/fréquence.....	284
A3.1.3.	Module puissance .....	284
A3.1.4.	Commutateur en position automatique .....	286
A3.1.5.	Basculement en asservissement de l'ouverture.....	286
A3.1.6.	Fonctionnement en asservissement de l'ouverture .....	287
A3.1.7.	Fonctionnement sur limiteur. Limitation de la pression « première roue turbine » P1RT .....	287
A3.1.8.	Signaux logiques de réduction de charge .....	288
A3.1.9.	Chaîne de commande des soupapes.....	288
A3.1.10.	Limiteur de vitesse et d'accélération.....	288
A3.1.11.	Aspects « exploitation ».....	288
A3.1.12.	Points de consigne et réseau électrique – définitions .....	289

### Annexe 4. Les flux d'énergie dans un REP

A4.1.	Puissance primaire et puissance échangée aux GV.....	291
A4.2.	Passage de la puissance mécanique à la puissance électrique nette.....	291
A4.3.	Sensibilité de la puissance mécanique aux performances thermodynamiques du cycle eau-vapeur .....	293
A4.4.	Diagramme des flux.....	295

<b>Index.....</b>		<b>297</b>
-------------------	--	------------