

Table des matières

Introduction	1
1 Historique de la filière à eau pressurisée	3
1.1 Comment produire de la vapeur ?	3
1.1.1 Les chaudières	3
1.1.2 Les accidents de chaudières	12
1.2 Les débuts de l'utilisation de l'eau dans le nucléaire	14
1.3 Les premiers réacteurs navals	16
1.3.1 Les réacteurs navals aux États-Unis	16
1.3.2 Les réacteurs navals ou transportables en URSS	30
1.3.3 Les réacteurs navals en France	40
1.4 Shippingport (USA)	51
1.5 Indian Point : premier réacteur au thorium	64
1.6 Le réacteur Yankee Rowe Atomic Electric Company (États-Unis)	71
1.7 Le Mobile High Power 1A (États-Unis)	78
1.8 Le réacteur BR3 de Mol (Belgique)	82
1.9 Le réacteur Enrico Fermi de Trino-Vercellese (Italie)	84
1.10 Tihange (Belgique)	92
1.11 Sizewell B (Angleterre)	101
1.12 La filière VVER soviétique	107
1.12.1 Généralités	107
1.12.2 Le VVER-440	114
1.12.3 Le VVER-1000	119
1.12.4 Le VVER-1200	121
1.13 Le parc français de REPs	130
1.13.1 Chooz A / SENA (France)	136
1.13.2 Le palier CP0	150
1.13.3 Les paliers CPY	154
1.13.4 Les paliers P4 et P'4	158
1.13.5 Le palier N4	159
1.13.6 Principales différences entre les paliers	163
1.14 Le recyclage du plutonium	164
1.14.1 Historique du recyclage du plutonium en REP	164
1.14.2 Les différences entre MOX et UOX	168
1.14.3 Le projet REP2000	172
1.14.4 Vers l'EPR	176

1.15	L'European Pressurized Reactor	176
1.15.1	L'îlot nucléaire	177
1.15.2	Les systèmes de sauvegarde	178
1.15.3	Le cœur du réacteur	180
1.15.4	Le réflecteur lourd	181
1.15.5	L'instrumentation	182
1.15.6	Le principe des 4 trains	182
1.15.7	Suppression des turbo-pompes alimentaires	183
1.15.8	Le récupérateur de corium	184
2	Le bâtiment réacteur et les bâtiments connexes	187
2.1	Généralités sur les paliers français	187
2.2	L'îlot nucléaire	191
2.3	Le bâtiment réacteur	194
2.3.1	Les grands composants du BR	195
2.3.2	Les puisards	199
2.3.3	Conception de l'enceinte de confinement	203
2.3.4	Technologie des enceintes de confinement françaises	216
2.3.5	Les modes de rupture de l'enceinte	238
2.3.6	Protection de l'enceinte	239
2.3.7	Le vieillissement des enceintes	240
2.3.8	Le pont polaire	242
2.3.9	La piscine BR	244
2.3.10	La machine de chargement du combustible	244
2.3.11	La manutention des internes de cuve	245
2.4	Le bâtiment combustible BK	250
2.4.1	Fonction du BK	250
2.4.2	Évacuation des combustibles usés	251
2.4.3	Constitution de la piscine BK et connexion à la piscine BR	253
2.5	La chaîne de manutention du combustible	253
2.5.1	Généralités	253
2.5.2	Constitution du PMC	257
2.5.3	La réparation des assemblages abîmés	264
2.6	Contamination de la tranche par points chauds	267
2.7	Le bâtiment des auxiliaires nucléaires (BAN)	277
2.8	La salle de commande	277
3	Le circuit primaire	283
3.1	Généralités	283
3.2	Constitution du primaire	287
3.2.1	Les composants principaux du circuit primaire	287
3.2.2	Supports et butées du circuit primaire	292
3.2.3	Dispositifs anti-débattements ou auto-bloquants du circuit primaire	295
3.3	Chauffage du secondaire	296
3.4	Température du primaire	298
3.5	Pression du primaire	300
3.6	Débit du primaire	300

3.7	Puissance thermique du cœur	300
3.8	Chimie du primaire	301
3.8.1	Généralités	301
3.8.2	L'acide borique	302
3.8.3	La lithine	302
3.8.4	L'hydrazine	304
3.8.5	L'hydrogène	304
3.8.6	Contrôle chimique de l'eau primaire	305
3.9	Activité du primaire	305
3.10	Les pompes primaires	310
3.10.1	Petit historique des pompes	310
3.10.2	Généralités sur les pompes primaires	311
3.10.3	Tenue des bâtis de pompes	313
3.10.4	Description des pompes primaires	314
3.10.5	Étanchéité des pompes primaires	324
3.10.6	Aspects théoriques	330
3.10.7	Cavitation des pompes primaires	334
3.10.8	Risque d'incendie des pompes primaires	341
3.10.9	Surveillance des pompes primaires	342
3.10.10	Protection contre le bas débit primaire	342
3.10.11	Caractéristiques détaillées d'une pompe primaire	343
3.11	Le pressuriseur	345
3.11.1	Positionnement d'un pressuriseur	347
3.11.2	Fonctionnement d'un pressuriseur	348
3.11.3	Le réservoir de décharge du pressuriseur (RDP)	359
3.11.4	Les soupapes de protection du pressuriseur	364
3.11.5	L'aspersion pressuriseur	376
3.11.6	Le niveau d'eau dans le pressuriseur	380
3.11.7	Mesure de température du pressuriseur	383
3.11.8	Régulation du pressuriseur	384
3.11.9	La ligne d'expansion du pressuriseur	387
3.11.10	Éléments simplifiés de thermohydraulique du pressuriseur	388
3.11.11	Aspects sûreté du pressuriseur	390
3.11.12	Décontamination du pressuriseur	392
3.12	Les générateurs de vapeur (côté primaire)	392
3.12.1	Généralités	392
3.12.2	Positionnement des générateurs de vapeur	394
3.12.3	Constitution d'un générateur de vapeur	397
3.12.4	Corrosion sous contrainte de l'Inconel	411
3.12.5	Généralités sur la régulation du niveau des générateurs de vapeur	414
3.12.6	Caractéristiques des générateurs de vapeur du parc français	416
3.12.7	Fuite primaire-secondaire	417
3.12.8	Le contrôle des tubes de générateur de vapeur	420
3.12.9	Le remplacement d'un générateur de vapeur	427
3.13	Piquages et manchettes thermiques	439
3.14	Les régulations du primaire	443

4	La cuve et ses internes	445
4.1	Description générale de la cuve	445
4.2	Les tubulures	451
4.3	Taille des cuves	455
4.4	Supportage de la cuve	455
4.5	Caractéristiques principales	456
4.6	La dalle anti-missile	456
4.7	Le dôme de cuve	458
4.7.1	Le couvercle de cuve	458
4.7.2	Aspects thermohydrauliques du dôme	469
4.7.3	Les pénétrations du couvercle de cuve	474
4.8	Les internes inférieurs et latéraux de cuve	486
4.9	Les internes supérieurs	494
4.9.1	Description	494
4.9.2	Les guides de grappe	496
4.9.3	Les broches de tube-guide	499
4.9.4	Les broches de la plaque supérieure de cœur	503
4.10	Les équipements divers de cuve	504
4.11	Le maintien des internes de cuve	505
4.12	Le bipasse ou by-pass	508
4.13	Le cloisonnement	510
4.14	L'écran thermique	513
4.15	Les pénétrations de fond de cuve	517
4.16	Le programme de surveillance des cuves	522
4.17	Niveau d'eau dans la cuve	528
4.18	Ouverture de la cuve pour déchargement	530
4.19	L'inspection de la cuve	532
5	Le cœur et le combustible du réacteur	535
5.1	Le chargement/déchargement du réacteur	535
5.2	Le cœur actif	537
5.3	Le combustible nucléaire	537
5.3.1	Un survol de l'histoire du combustible REP en France	537
5.3.2	Technologie du crayon combustible	545
5.3.3	Technologie des assemblages	554
5.3.4	Le combustible MOX	562
5.3.5	Les poisons fixes	565
5.3.6	Les poisons au gadolinium	567
5.3.7	La perte d'étanchéité des crayons combustibles	568
5.4	Le système de contrôle des barres de commandes (RGL)	573
5.4.1	Principe de fonctionnement des barres de contrôle	573
5.4.2	Mécanisme de commande de grappes	575
5.4.3	Constitution des grappes de commande	593
5.4.4	Système de comptage des pas de groupe	600
5.4.5	Implantation des groupes de barres	607
5.4.6	Les grappes partielles	608
5.4.7	Usure des barres de contrôle	614
5.4.8	L'arrêt automatique réacteur	616

5.4.9	Défaillances des mécanismes de barres de commandes	617
5.4.10	Les déformées d'assemblages et la chute de barre	618
5.4.11	Dalle anti-missile	620
5.5	Les sources de démarrage	620
5.5.1	Sources primaires	622
5.5.2	Sources secondaires	624
5.5.3	Les sources de fission spontanées	627
5.6	Surveillance du réacteur	627
5.6.1	Le système RIC	628
5.6.2	Les campagnes d'essai avec collectrons	645
5.6.3	L'instrumentation interne de l'EPR	650
5.6.4	Les chambres externes de mesure de flux	659
5.6.5	Les thermocouples	676
5.6.6	Le calculateur KIT	679
5.7	Les gestions combustibles	680
5.8	La recherche du plan de chargement	684
5.8.1	Historique	684
5.8.2	Méthodologie	685
5.8.3	La recherche automatique de plans de chargement	688
6	Le circuit secondaire	691
6.1	Généralités	691
6.2	Description fonctionnelle	691
6.3	Conditionnement chimique de l'eau du secondaire	696
6.4	Le générateur de vapeur côté secondaire	702
6.4.1	Généralités	702
6.4.2	Le niveau d'eau dans le générateur de vapeur	711
6.4.3	Les soupapes de sûreté du générateur de vapeur et vannes de décharge	719
6.4.4	Le circuit APG de purge des générateurs de vapeur	722
6.4.5	Éléments de thermohydraulique d'un générateur de vapeur	723
6.4.6	Corrosion des tubes GV côté secondaire	727
6.4.7	Fuite primaire-secondaire	733
6.5	Le groupe turbo-alternateur (aspects vapeur)	733
6.5.1	Généralités	733
6.5.2	Régulation de la turbine	736
6.5.3	Régulation de la température moyenne par le contournement de la turbine	737
6.6	Les groupes sécheurs-surchauffeurs	739
6.6.1	Principe des sécheurs-surchauffeurs	739
6.6.2	Régulation des surchauffeurs	740
6.6.3	Protection des sécheurs-surchauffeurs	744
6.7	La robinetterie	745
6.7.1	Généralités	745
6.7.2	Les différents types de robinetterie	746
6.8	Le condenseur	757
6.8.1	Fonctions du condenseur	757
6.8.2	Technologie du condenseur	760

6.8.3	Le vide au condenseur	761
6.8.4	L'intérieur du condenseur	770
6.8.5	Contournement turbine vers le condenseur	773
6.8.6	Principe physique du condenseur	777
6.8.7	Les pompes d'extraction du condenseur	782
6.8.8	Réglage du niveau du condenseur	782
6.8.9	L'entrée d'eau brute au condenseur	786
6.8.10	Les incendies de condenseur	786
6.9	Les postes de réchauffage d'eau alimentaire	786
6.9.1	Description	786
6.9.2	Le poste basse pression	788
6.9.3	Le poste haute pression	789
6.9.4	Dimensionnement des échangeurs-réchauffeurs	792
6.9.5	Fonctionnement et régulation	792
6.10	La bache TPA et le dégazeur	795
6.11	Le contournement de la turbine	796
6.11.1	Généralités	796
6.11.2	Lignage	798
6.11.3	Décharge à l'atmosphère GCTa	800
6.11.4	Le contournement de la turbine en îlotage	800
6.12	Les turbo-pompes alimentaires	805
6.12.1	Généralités sur les TPAs	805
6.12.2	Éléments de physique des TPAs	810
6.12.3	Réglage de la vitesse des TPAs	810
6.13	La corrosion-érosion dans le secondaire	811
6.14	La source froide	815
6.14.1	Généralités	815
6.14.2	Définition des systèmes de la source froide	819
6.14.3	Les aéroréfrigérants	827
6.14.4	Perte de la source froide	836
7	Les principaux circuits	843
7.1	Généralités	843
7.2	Le circuit de contrôle volumétrique et chimique (RCV)	843
7.2.1	Généralités	844
7.2.2	Fonctionnement normal	855
7.2.3	Fonctionnement incidentel	867
7.2.4	Système de protection du RCV	868
7.3	Le circuit d'appoint d'eau et de bore (REA)	869
7.4	Le refroidissement du réacteur à l'arrêt (RRA)	872
7.4.1	Principe	872
7.4.2	Secours du RRA	875
7.4.3	Constitution du RRA	876
7.4.4	Liaison du RRA avec le PTR	879
7.4.5	Utilisation du RRA lors d'un arrêt à froid	879
7.4.6	La plage de travail basse du RRA	879
7.4.7	Cyclage thermique du RRA	883

7.5	L'injection de sécurité (RIS)	887
7.5.1	Principe et généralités	887
7.5.2	Constitution du RIS	887
7.5.3	L'injection de sécurité haute pression (paliers CP0 et CPY)	889
7.5.4	Les accumulateurs (tous paliers)	891
7.5.5	L'injection de sécurité moyenne pression (palier P4 et ultérieurs)	892
7.5.6	L'injection de sécurité basse pression (tous paliers)	893
7.5.7	La cartouche RIB (CPY)	895
7.5.8	Engagement du RIS	896
7.5.9	Fuite du RIS	898
7.6	Le circuit de réfrigération intermédiaire (RRI)	899
7.6.1	Généralités	899
7.6.2	Constitution et usages	901
7.7	Le circuit d'échantillonnage nucléaire (REN)	903
7.8	Le circuit des purges et événements (RPE)	903
7.9	Le circuit vapeur principal (VVP)	904
7.9.1	Principe	904
7.9.2	Description du VVP	905
7.9.3	Le supportage des tuyauteries vapeur	906
7.9.4	Les tronçons protégés	910
7.9.5	L'isolement des lignes vapeur	911
7.9.6	Soupapes de sûreté des générateurs de vapeur	914
7.10	Décharge à l'atmosphère (GCTa)	918
7.10.1	Généralités	918
7.10.2	Les vannes de décharge à l'atmosphère	919
7.11	Le circuit d'alimentation en eau du générateur de vapeur (ARE)	920
7.11.1	Principe	920
7.11.2	Description de l'ARE	920
7.11.3	Le supportage des tuyauteries d'eau alimentaire	921
7.12	Le circuit d'alimentation de secours des générateurs de vapeur (ASG)	921
7.12.1	Principe	921
7.12.2	Constitution de l'ASG	925
7.12.3	Engagement de l'ASG	930
7.12.4	Fonction de sûreté de l'ASG	932
7.13	Le circuit d'aspersion de l'enceinte (EAS)	933
7.13.1	Principe	933
7.13.2	Refroidissement et injection de soude	935
7.13.3	Fonctionnement	936
7.13.4	Essais périodiques des lignes EAS	939
7.13.5	Efficacité de l'aspersion	939
7.14	Le circuit de réfrigération et de purification des piscines (PTR)	941
7.15	Le traitement des effluents	945
7.15.1	Généralités	945
7.15.2	Le traitement des effluents liquides (TEP)	947
7.15.3	Le traitement des effluents gazeux (TEG)	953
7.15.4	Le traitement des effluents usés (TEU)	957
7.15.5	Le traitement des effluents solides (TES)	959

7.16	La ventilation (EVF, EVC, EBA, ETY)	960
7.16.1	Fonction	960
7.16.2	Description du circuit EVF	961
7.16.3	Description du circuit EVC	962
7.16.4	Description du circuit ETY	963
7.17	La mise en dépression inter-enceinte (EDE)	963
7.18	La production d'eau déminéralisée (SDP)	964
7.19	Le circuit d'eau glacée (DEG)	965
7.20	L'air comprimé (SAP, SAT, SAR)	965
7.21	Le système informatique de conduite (KIC)	965
7.21.1	Généralités sur le contrôle commande informatisé	965
7.21.2	Objectifs du KIC	968
7.22	Trigrammes des circuits	968
8	Le groupe turbo-alternateur et la production d'électricité	979
8.1	Généralités sur la production d'électricité par le parc nucléaire	979
8.1.1	Petit historique du réseau français pré-nucléaire	979
8.1.2	Le réseau français moderne et les risques encourus	981
8.1.3	La fourniture d'énergie nucléaire	984
8.2	La salle des machines	987
8.3	La turbine	989
8.3.1	Petit historique des turbines de puissance de la turbine	989
8.3.2	Description de la turbine	992
8.3.3	Performance de la turbine	1007
8.3.4	Détente du fluide dans la turbine	1015
8.3.5	Érosion dans la turbine	1015
8.3.6	Ouverture du débit d'une turbine	1017
8.3.7	Régulation de la turbine	1017
8.3.8	Rupture d'une ailette de turbine	1022
8.3.9	Rupture d'un arbre de turbine	1024
8.4	L'alternateur	1024
8.5	Les transformateurs de puissance	1030
8.5.1	Généralités	1030
8.5.2	Le transformateur principal	1034
8.5.3	Le transformateur de soutirage	1034
8.5.4	Le transformateur auxiliaire	1034
8.6	L'alimentation des auxiliaires	1036
8.6.1	Généralités	1036
8.6.2	Alimentation des tableaux 6,6 kV	1038
8.6.3	Alimentation des tableaux de courant alternatif 380 V	1039
8.6.4	Alimentation des tableaux de courant continu 125 V	1039
8.6.5	Alimentation des tableaux de courant continu 48 V	1040
8.6.6	Alimentation des tableaux de courant alternatif 220 V	1040
8.6.7	Alimentation des tableaux de courant continu 30 V	1042
8.7	Les groupes électrogènes de secours	1043
8.7.1	La conception de base	1043
8.7.2	Le diesel d'ultime secours (DUS)	1047
8.8	Un exemple de perte d'alimentation électrique : Dampierre (2007)	1048

Conclusion	1051
Annexe 1 : Dictionnaire, sigles et abréviations	1053
Annexe 2 : Performance des tranches nucléaires du Parc Français	1070
Annexe 3 : Les aspects réglementaires des appareils de pression	1083
Références	1095
Index	1117