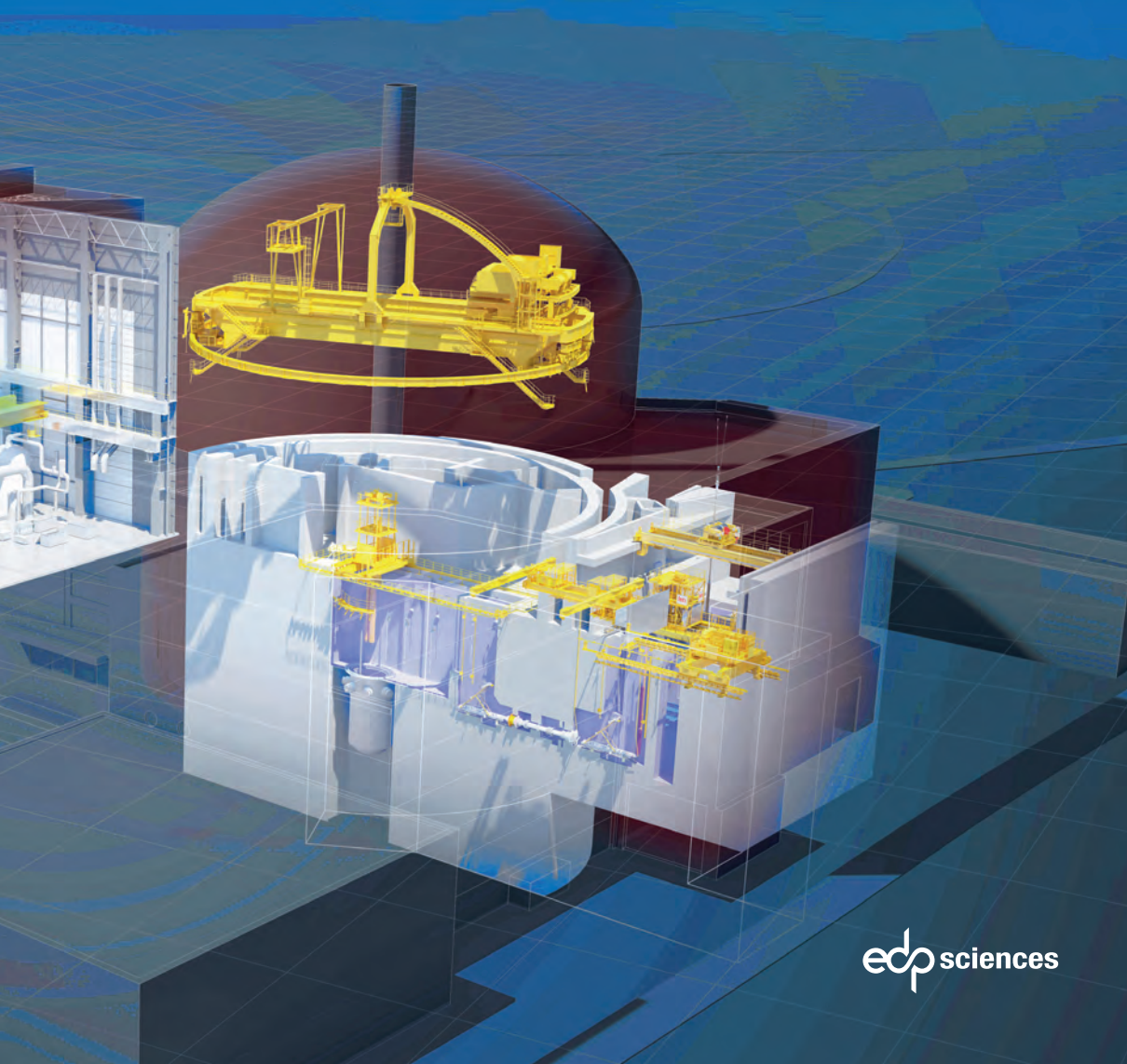




# LA TECHNOLOGIE DES RÉACTEURS À EAU PRESSURISÉE

Serge Marguet





# La technologie des réacteurs à eau pressurisée

Serge Marguet

**Du même auteur :**

*Les accidents de réacteurs nucléaires*, Lavoisier Tec et Doc, Paris  
ISBN 978-2-7430-1429-2, 2012. 136 pages.

*The physics of nuclear reactors*, Springer, Heidelberg  
ISBN 978-3-319-59559-7, 2017. 1 445 pages. En langue anglaise, 2 volumes.

*La physique des réacteurs nucléaires*, 3<sup>e</sup> édition, Lavoisier Tec et Doc, Paris  
ISBN 978-2-7430-2309-6, 2018. 1 368 pages.

**Illustration de couverture :** un écorché de centrale nucléaire (courtesy REEL France).

Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-2360-4 – ISBN (ebook) : 978-2-7598-2417-5

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 2019

*À mes parents, Josette† et Daniel, dont les efforts ne semblent pas  
avoir été (totalement) vains !*

*À ma femme Agnès qui me supporte... toujours !*

*À mes enfants, Hélène et Vincent, que je supporte... encore !*

*Et pourquoi pas à ma chatte Noisette... qui adore se mettre sur mon clavier  
quand je travaille !*



# Remerciements

Ce livre n'aurait pu voir le jour sans l'aide du comité de pilotage de l'édition scientifique d'EDF/R&D, en particulier Jean-Paul Chabard, Hervé Boll et Sandrine Dyèvre, qui ont rapidement soutenu ce projet. Le transfert de connaissance est clairement au cœur des préoccupations de ce comité.

Je tiens à remercier chaleureusement ici Nordine Kerkar, expert reconnu à EDF/UNIE et co-auteur d'un important livre sur l'exploitation des réacteurs à eau pressurisée [*Kerkar et Paulin, 2008*] très novateur sur le sujet. En effet, il a accepté de prendre le temps (considérable!) de relire et d'amender cet ouvrage. Tous les auteurs savent qu'au-delà de 1 000 pages, les potentiels relecteurs se font discrets, effrayés par le montant de l'effort! Mais Nordine n'est pas homme à ployer sous la tâche, malgré ses nombreuses responsabilités et un emploi du temps chargé.

Je veux aussi remercier Jean-Pierre Gualtieri, grand spécialiste de l'aide au pilotage à EDF/UFPI/Cattenom après avoir passé des années en salle de commande, pour son aide pratique à la réalisation de certains chapitres. Jean-Pierre, par sa très grande connaissance du « terrain », a permis d'améliorer la présentation de certains systèmes et composants.

J'ai toujours une pensée pour Paul Reuss, dont les nombreux livres sur la neutronique et la physique des réacteurs m'ont certainement donné le goût d'écrire des ouvrages de référence. J'admire intensément la rigueur de ses travaux dans le domaine nucléaire, et j'espère sincèrement que les lecteurs trouveront dans mes livres une certaine parenté.

Il serait injuste de ne pas remercier aussi Sophie Hosotte d'EDP Sciences qui a coordonné avec un grand professionnalisme la réalisation de ce livre, ainsi que Scientific Publishing Services pour la mise en page efficace de ce volumineux ouvrage.





# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Historique de la filière à eau pressurisée</b>	<b>3</b>
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
<b>2</b>	<b>Le bâtiment réacteur et les bâtiments connexes</b>	<b>187</b>
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
<b>3</b>	<b>Le circuit primaire</b>	<b>283</b>
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

<b>4</b>	<b>La cuve et ses internes</b>	<b>445</b>
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
<b>5</b>	<b>Le cœur et le combustible du réacteur</b>	<b>535</b>
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
<b>6</b>	<b>Le circuit secondaire</b> . . . . .	<b>691</b>
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
<b>7</b>	<b>Les principaux circuits</b>	<b>843</b>
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
<b>8</b>	<b>Le groupe turbo-alternateur et la production d'électricité</b>	<b>979</b>
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



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



# Introduction

Un réacteur à eau pressurisée est l'un des objets technologiques les plus complexes que l'Homme ait jamais réalisés. L'effort de développement porte sur des dizaines d'années, des dizaines de milliers d'ingénieurs dans tous les domaines de la physique : neutronique, thermique, thermohydraulique, mécanique, chimie, matériaux, électronique, automatique, informatique, génie civil, études probabilistes... Il y a peu de domaines qui ne trouvent pas leur application dans la réalisation d'un réacteur nucléaire de puissance. À titre d'illustration, un réacteur 900 MWe comporte environ 12 000 robinets, dont 400 concernent le circuit primaire et 6 000 l'ensemble des circuits de sécurité. Un réacteur 1 300 MWe comporte<sup>1</sup> 300 pompes et ventilateurs, 100 échangeurs thermiques, 160 réservoirs de toute nature, 48 tableaux électriques de 6 600 Volts ou 380 Volts, 42 transformateurs de puissance, 1 300 récepteurs électriques, dont 43 moteurs à 6 600 Volts, près de 60 km de tuyauterie bout à bout (hors lignes d'instrumentation), 16 000 robinets tant motorisés que manuels et 1 400 km de câbles électriques, soient plus de 2 millions de points de raccordement électrique. Le cœur du réacteur est un ensemble subtil de composants où la précision requise est parfois de l'ordre du millimètre, mais où certains composants pèsent plusieurs centaines de tonnes. Ces chiffres à eux seuls montrent toute la difficulté à appréhender dans son ensemble la technologie des réacteurs à eau. Cette technologie est de plus complexe à maintenir du fait de la radioactivité qui apparaît dès le fonctionnement du réacteur.

S'il existe de très nombreux ouvrages de physique des réacteurs en langue anglaise parfois très prestigieux [Ash, 1979], [Bell et Glasstone, 1970], [Bennet, 1981], [Bonilla et al., 1957], [Cameron, 1982], [Duderstadt et Hamilton, 1976], [El-Wakil, 1962], [El-Wakil, 1962], [Glasstone et Edlund, 1972], [Glasstone et Sesonske, 1994], [Harrer, 1963], [Lamarsh et Barrata, 2001], [Lewins, 1978], [Littler et Raffle, 1957], [Marguet, 2017], [Mayo, 1991], [Meghreblian et Holmes, 1960], [Murray, 1954], [Ott et Bezella, 1989], [Ott et Neuhold, 1989], [Pollard et Davidson, 1956], [Reuss, 2008], [Salmon et al., 1961], [Stephenson, 1954], [Stephenson, 1954], [Weaver, 1963], [Weinberg et Wigner, 1958], [Weisman, 1977], [Zweifel, 1973], et même en langue française [Barjon, 1993], [Blanc, 1986], [Blaquière, 1962], [Bussac et Reuss, 1985], [Cahen et Treille, 1963], [Gauthron, 1986], [Ligou, 1982], [Ligou, 1997], [Marguet, 2018], [Raievski, 1960], [Reuss, 1983], [Reuss, 2003], [Rozon, 1992], [Salmon et al., 1961], [Soutif, 1962], tous ces livres montrent bien peu de réalisations concrètes, l'aspect technologique étant souvent relégué à un seul chapitre en fin de livre, et donnant des informations trop générales (un plan de circuit primaire, une image de cœur...)

---

<sup>1</sup> D'après M. Quemeneur : *But et organisation des essais de démarrage du palier 1 300*, Journée SFEN « Enseignements tirés de la mise en service des tranches nucléaires du palier 1 300 MWe à eau sous pression », Paris, 11 décembre 1985, Recueil des communications.

pour être vraiment utiles. Il faut bien constater que les livres avancés de technologie sont rarissimes, sans doute parce que la technologie évolue beaucoup plus vite que la physique, ou bien que les ingénieurs ne pratiquent guère la plume contrairement aux chercheurs !

C'est l'objectif de ce livre d'essayer de combler cette lacune et de donner au lecteur autant que faire se peut une vue d'ensemble de cette technologie des réacteurs à eau pressurisée, en incluant des repères historiques qui sont indispensables pour comprendre l'évolution du concept. Car bien sûr, les ingénieurs n'ont pas mis au point directement le concept le plus fiable, le plus efficient. La maturation qui a conduit aux réacteurs à eau pressurisée modernes tels que l'*European Pressurized Reactor* (EPR), a été longue et parfois douloureuse, comme lors d'accidents tels que Three Mile Island. Cela a appris aux ingénieurs à se méfier de la facilité, des jugements trop hâtifs et des raccourcis trop simples.

Il est impossible d'aborder cette technologie complexe uniquement avec des mots, c'est pourquoi ce livre regorge d'illustrations et de schémas techniques fonctionnels, selon le vieil adage qu'un bon dessin vaut mieux que mille mots. Nous ne sommes pas rentrés trop en détail dans le fonctionnement du réacteur, nous limitant à la fonction des composants. Le fonctionnement d'une tranche nécessite un volume de taille équivalente à lui tout seul, et qui verra, je l'espère, le jour bientôt.

Mon ambition est de proposer aux ingénieurs, aux techniciens et aux étudiants en sciences nucléaires, un corpus solide et le plus complet possible de connaissances utiles et pratiques, d'autant plus qu'il devient difficile de rentrer dans un bâtiment réacteur pour se faire sa propre idée, avec le durcissement constant des conditions d'accès lié aux problèmes sécuritaires de ce siècle. J'espère avoir pu proposer en quelque sorte une version « Assimil » du « parlé nucléaire », si hermétique aux néophytes. Les données numériques qu'on trouve dans ce livre concernent, sauf avis contraire, les réacteurs du palier CPY (900 MWe), le plus courant en France à ce jour. Ce livre n'est néanmoins pas un annuaire de données techniques où on trouverait toutes les cotes, masses et autres informations de l'ensemble des réacteurs, car on comprend aisément l'aspect rébarbatif d'un tel document, sans parler des aspects confidentiels de certaines données. Parce qu'il fallait forcément se limiter dans la description d'une tranche, on a choisi d'insister davantage sur les composants nucléaires à proprement parler (cuve, cœur, combustible, primaire, secondaire...), en décrivant plus succinctement les dispositifs annexes (génie civil, turbine, alternateur, composants électroniques...), qui mériteraient un traitement plus abondant dans un autre ouvrage. Quelques choix personnels, voire partisans, pourront sans doute m'être reprochés, mais comme chacun sait : « *L'art est difficile* ».

**Z**

zinc, 814

    GV, 731

Zinn

    Walter, 15

Zircaloy, 109, 154, 302, 541, 548

Zircaloy 2, 56

Zircaloy 4, 310

Zircaloy-2, 58, 549

Zircaloy-4, 551

    grille, 558

Zircon, 549

zircone, 812, 185

zirconium, 15, 19, 47, 541, 548

Zircotube, 540

Zirlo, 564

Zodiac

    Téléflex, 629

Zorita, 482

# LA TECHNOLOGIE DES RÉACTEURS À EAU PRESSURISÉE

*La technologie des réacteurs à eau pressurisée* est un ouvrage conçu pour les professionnels du domaine nucléaire, mais qui peut aussi être abordé par des ingénieurs néophytes désirant s'initier. Il propose un panorama très complet de cette filière de réacteurs depuis son origine aux USA à partir des réalisations de moteurs atomiques pour la propulsion navale jusqu'à ses derniers développements dans le domaine de la production civile d'énergie, particulièrement en France avec les 58 réacteurs d'EDF.

Les principaux composants d'une tranche nucléaire sont présentés, à savoir les bâtiments de l'îlot nucléaire, le circuit primaire principal, le pressuriseur, les pompes primaires, la cuve et ses internes, le cœur du réacteur et ses barres de contrôle, l'instrumentation, les générateurs de vapeur, le circuit secondaire de vapeur, la turbine et le condenseur, l'alternateur, les transformateurs et l'alimentation électrique, et les aéroréfrigérants. Un chapitre spécifique détaille les circuits les plus importants de la tranche : RCV, RRA, RRI, ARE, ASG, EAS, CVX, CEX, CRF, GCT...

L'ouvrage comporte une très riche iconographie en couleurs, ainsi qu'un index et une bibliographie très détaillée qui permettent au lecteur d'approfondir sa compréhension de ce domaine très complexe.

L'auteur, **Serge Marguet**, est un spécialiste reconnu des réacteurs nucléaires. Il a déjà publié de nombreux livres sur la question (prix SFEN 2018 pour son ouvrage sur *La physique des réacteurs nucléaires*). Il enseigne la physique des réacteurs à l'INSA-Centre-Val de Loire à Bourges ainsi qu'à l'Institut de transfert de technologie d'EDF/R&D et l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN). Il est également expert industriel de l'Institut international de l'énergie nucléaire (I2EN), organisme chargé de promouvoir le nucléaire français à l'international par la formation. Il travaille depuis plus de 30 ans à la R&D d'EDF au développement des grands codes de calcul de physique des réacteurs, et a contribué à l'élaboration des simulateurs et des outils d'aide au pilotage du dernier réacteur mis en service en France : l'EPR.

ISBN : 978-2-7598-2360-4



9 782759 823604

Prix : 395 €

**edp sciences**  
www.edpsciences.org

Collection : R&D EDF