

Table des matières

| | |
|---|----|
| Avant-propos | 17 |
| Remerciements | 21 |
| Structure générale du livre | 23 |
| Sigles principaux | 27 |
| | |
| Partie 1 Historique des découvertes sur les atomes et l'énergie nucléaire | 31 |
| | |
| Chapitre 1 • Le long chemin vers la connaissance des atomes | 33 |
| 1.1 Introduction générale | 33 |
| 1.1.1 « Des atomes et des hommes » | 33 |
| 1.1.2 Une histoire qui commence il y a deux milliards d'années..... | 34 |
| 1.2 De la philosophie à la physique..... | 37 |
| 1.2.1 La naissance de la théorie « atomiste »..... | 37 |
| 1.2.2 Ceux qui croyaient aux atomes et ceux qui n'y croyaient pas..... | 38 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 1.3 | Enfin, les atomes s'expriment..... | 42 |
| 1.3.1 | Des rayons inconnus mais célèbres..... | 42 |
| 1.3.2 | La radioactivité et l'entrée en scène de l'uranium | 42 |
| 1.3.3 | L'ambre et la lumière..... | 46 |
| 1.4 | Les explorateurs de l'atome..... | 50 |
| 1.4.1 | Les théoriciens balayent les idées des derniers récalcitrants | 50 |
| 1.4.2 | L'atome atomisé : il n'est plus « insécable » | 52 |
| Chapitre 2 • La fission nucléaire et la réaction en chaîne | | 59 |
| 2.1 | La grande découverte..... | 59 |
| 2.1.1 | L'abstraction au service de l'atome | 59 |
| 2.1.2 | Le gros œuvre s'achève..... | 61 |
| | Une particule bien étrange, issue de l'imagination..... | 61 |
| | La pièce manquante..... | 63 |
| 2.1.3 | Entre les deux guerres, on bombarde... les noyaux atomiques... Au-delà des éléments radioactifs naturels | 65 |
| | Le mystère s'épaissit..... | 66 |
| 2.1.4 | Quand l'atome s'éclate..... | 71 |
| 2.2 | Le « sprint » vers la réaction en chaîne | 75 |
| 2.2.1 | Les promesses d'une énergie colossale | 75 |
| 2.2.2 | Les brevets et les travaux français | 82 |
| 2.2.3 | La « bataille de l'eau lourde » | 85 |
| 2.2.4 | Le spectre de l'arme absolue..... | 87 |
| 2.3 | Et Pandore s'anima | 90 |
| 2.3.1 | Sous les gradins d'un stade de football | 90 |
| 2.3.2 | Le nouveau monde | 93 |
| 2.4 | Principaux repères chronologiques sur l'histoire technique du nucléaire (jusqu'à la première réaction en chaîne) | 98 |

Partie 2 Bases de physique nucléaire et de neutronique..... 101

Chapitre 3 • Éléments de physique nucléaire..... 103

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.1 | Les noyaux atomiques..... | 104 |
| 3.1.1 | Neutrons, protons et noyaux atomiques..... | 104 |
| 3.1.2 | Isotopes et éléments chimiques | 106 |
| 3.1.3 | Isobares et isomères..... | 109 |
| 3.2 | La radioactivité..... | 110 |
| 3.2.1 | Les différentes formes de radioactivité..... | 110 |
| 3.2.2 | Périodes de décroissance radioactive..... | 112 |

| | | |
|--|---|-----|
| 3.2.3 | Activité d'un noyau radioactif..... | 113 |
| 3.2.4 | Les lois d'évolution d'un noyau radioactif issu d'un autre noyau radioactif et les familles radioactives..... | 114 |
| 3.2.5 | La « vallée de stabilité »..... | 116 |
| 3.2.6 | Quelques exemples de noyaux atomiques radioactifs..... | 119 |
| 3.3 | Les réactions nucléaires..... | 120 |
| 3.3.1 | Généralités..... | 120 |
| 3.3.2 | Les interactions entre un neutron et un noyau..... | 121 |
| 3.4 | Les sections efficaces..... | 125 |
| 3.4.1 | Définitions..... | 125 |
| 3.4.1.1 | Section efficace microscopique..... | 125 |
| 3.4.1.2 | Section efficace macroscopique..... | 126 |
| 3.4.2 | Unité et variation globale des sections efficaces..... | 127 |
| 3.4.2.1 | Unité de section efficace microscopique..... | 127 |
| 3.4.2.2 | Ordres de grandeur des sections efficaces microscopiques..... | 128 |
| 3.4.3 | Les résonances..... | 130 |
| 3.4.4 | Conclusion sur les sections efficaces..... | 136 |
| 3.5 | La fission nucléaire..... | 136 |
| 3.5.1 | Le phénomène de fission..... | 136 |
| 3.5.2 | La fission de certains noyaux : pourquoi ?..... | 138 |
| 3.5.3 | Les noyaux fissiles..... | 140 |
| 3.5.4 | Les fragments et produits de fissions..... | 142 |
| 3.5.5 | Énergie libérée par la fission..... | 146 |
| 3.5.6 | Nombre de neutrons émis par fission et énergie de ces neutrons..... | 148 |
| 3.5.7 | La fission en résumé..... | 151 |
| Chapitre 4 • Principes du fonctionnement des réacteurs nucléaires et grandeurs utilisées..... 153 | | |
| 4.1 | La réaction en chaîne..... | 154 |
| 4.1.1 | Principe de base et formulation : le facteur de reproduction des neutrons..... | 154 |
| 4.1.2 | Le coefficient de multiplication et la réactivité..... | 155 |
| | Naissance des neutrons..... | 155 |
| | Disparition des neutrons..... | 155 |
| | Coefficient de multiplication..... | 156 |
| | Réactivité..... | 156 |
| 4.1.3 | La criticité d'un milieu « multiplicateur »..... | 157 |
| 4.2 | Taux de réaction des neutrons avec la matière..... | 158 |

| | | |
|---|--|------------|
| 4.3 | Le flux neutronique | 159 |
| 4.3.1 | Définition..... | 159 |
| 4.3.2 | Interprétation du flux | 160 |
| 4.3.3 | Expression classique du flux neutronique..... | 160 |
| 4.3.4 | Ordres de grandeur..... | 163 |
| 4.3.5 | Principes généraux du calcul du flux neutronique | 163 |
| 4.3.6 | Équation de la diffusion et solution pour un groupe de neutrons..... | 166 |
| 4.4 | Paramètres caractéristiques de la migration et du coefficient de multiplication des neutrons. Taille critique et masse critique | 169 |
| 4.4.1 | Condition de criticité d'un milieu multiplicateur de neutrons .. | 169 |
| 4.4.2 | Exemple pratique d'utilisation des relations liant la géométrie et la composition d'un milieu multiplicateur | 172 |
| 4.5 | Le ralentissement puis la thermalisation des neutrons | 173 |
| 4.5.1 | Ralentir les neutrons : pourquoi ? | 173 |
| 4.5.2 | Ralentir les neutrons : comment ? | 176 |
| 4.5.3 | Les lois élémentaires du ralentissement des neutrons..... | 176 |
| 4.5.4 | La capture des neutrons au cours de leur ralentissement..... | 178 |
| 4.5.5 | Thermalisation des neutrons..... | 181 |
| 4.6 | Bilan des neutrons dans un cœur de réacteur | 184 |
| 4.6.1 | Formule des quatre facteurs | 184 |
| 4.6.2 | Optimum du rapport de modération | 186 |
| 4.6.3 | Bilan des neutrons dans un réacteur à eau pressurisée..... | 188 |
| 4.7 | Réflecteur de neutrons et répartition de puissance dans un cœur de réacteur..... | 190 |
| 4.7.1 | Rôle et nature d'un réflecteur de neutrons | 190 |
| 4.7.2 | Répartition de puissance dans un cœur de réacteur | 191 |
| Chapitre 5 • Comportement cinétique des réacteurs..... | | 193 |
| 5.1 | La vitesse de multiplication des neutrons de la réaction en chaîne..... | 193 |
| 5.1.1 | Temps de vie des neutrons dans un réacteur..... | 193 |
| 5.1.2 | Rythme de croissance de la population neutronique dans un réacteur surcritique..... | 194 |
| 5.2 | Les neutrons prompts et les neutrons retardés | 195 |
| 5.2.1 | Généralités..... | 195 |
| 5.2.2 | Les précurseurs de neutrons retardés | 196 |
| 5.3 | L'effet des neutrons retardés sur la cinétique des réacteurs | 198 |
| 5.3.1 | Approche simplifiée | 198 |
| 5.3.2 | Approche explicite à UN groupe de neutrons retardés..... | 199 |
| 5.3.3 | Approche explicite à six groupes de neutrons retardés | 203 |

| | | |
|-------------------|--|-----|
| Chapitre 6 | • Évolution du combustible dans les réacteurs nucléaires | 205 |
| 6.1 | Position du problème de l'évolution du combustible sous irradiation..... | 205 |
| 6.1.1 | L'usure du combustible sous irradiation | 205 |
| 6.1.2 | La modélisation de l'évolution des concentrations des noyaux atomiques dans un réacteur | 207 |
| 6.1.2.1 | Apparition | 207 |
| 6.1.2.2 | Disparition | 207 |
| 6.1.3 | Le taux de combustion | 209 |
| 6.2 | Évolution des noyaux lourds..... | 213 |
| 6.2.1 | Le facteur de conversion | 213 |
| 6.2.2 | L'uranium..... | 215 |
| 6.2.3 | Le plutonium..... | 216 |
| 6.2.4 | Les actinides mineurs..... | 218 |
| 6.3 | Évolution des produits de fission | 220 |
| 6.3.1 | Aspects neutroniques généraux liés aux produits de fission..... | 220 |
| 6.3.2 | Cas particulier du xénon 135..... | 224 |
| | Empoisonnement à l'équilibre | 226 |
| | Surcroît d'empoisonnement lors d'une réduction de puissance du réacteur | 229 |
| | Instabilités spatiales liées au xénon | 230 |
| 6.3.3 | Cas particulier du samarium 149..... | 231 |
| 6.4 | Évolution des paramètres du cœur..... | 233 |
| 6.4.1 | Évolution du coefficient de multiplication infini des neutrons.. | 233 |
| 6.4.2 | Évolution du facteur de conversion FC..... | 233 |
| Chapitre 7 | • Effets neutroniques liés à la température..... | 237 |
| 7.1 | Position du problème..... | 237 |
| 7.2 | Effet Doppler | 240 |
| 7.2.1 | Explication physique du phénomène | 240 |
| 7.2.2 | Aperçu sur le calcul de l'effet Doppler..... | 245 |
| 7.3 | Effet de densité (ou de dilatation) | 246 |
| 7.3.1 | Aspects généraux..... | 246 |
| 7.3.2 | Cas des réacteurs à eau pressurisée (REP)..... | 247 |
| 7.4 | Effet de spectre | 248 |
| Chapitre 8 | • La gestion du combustible en réacteur et le pilotage des cœurs | 251 |
| 8.1 | Éléments généraux..... | 251 |
| 8.1.1 | Principes de base de la gestion du combustible en réacteur..... | 251 |
| 8.1.2 | Le contrôle de la réaction en chaîne | 252 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 8.2 | La gestion du combustible en réacteur | 254 |
| 8.2.1 | Les paramètres de base | 254 |
| 8.2.2 | Optimisation de la gestion du combustible dans le cas des REP (cas des combustibles à uranium enrichi, UO_2) | 257 |
| 8.2.3 | Les spécificités du combustible au plutonium dans les REP (combustible Mox) | 258 |
| 8.3 | Utilisation de l'uranium naturel..... | 259 |
| 8.3.1 | La consommation d'uranium naturel dans les réacteurs | 259 |
| 8.3.2 | Analyse détaillée de la consommation d'uranium naturel dans un REP..... | 262 |
| 8.3.3 | Comparaison entre différentes filières de réacteurs | 264 |
| 8.3.4 | La surgénération | 267 |
| 8.4 | Le bilan des matières nucléaires dans les réacteurs actuels (à neutrons thermiques)..... | 271 |
| 8.4.1 | Les paramètres influents..... | 271 |
| 8.4.2 | Exemple des réacteurs à eau pressurisée (REP) | 271 |
| 8.4.3 | Bilan des matières dans d'autres types de réacteurs..... | 273 |
| | Réacteurs à eau bouillante (REB)..... | 273 |
| | Réacteurs à eau lourde | 275 |
| | Réacteurs à haute température (HTR) | 276 |

**Partie 3 Les filières de réacteurs nucléaires :
approche technico-historique** 279

Chapitre 9 • Architecture générale des réacteurs nucléaires 281

| | | |
|-------|--|-----|
| 9.1 | Introduction | 281 |
| 9.2 | Les grandes catégories et l'architecture générale des réacteurs nucléaires. | 282 |
| 9.2.1 | Classification des réacteurs nucléaires selon les usages | 282 |
| 9.2.2 | Les différents moyens de récupération de l'énergie nucléaire | 284 |
| | Pour toutes les puissances significatives | 285 |
| | Pour les petites puissances seulement (moteurs d'engins spatiaux par exemple) | 285 |
| | Pour des applications très spécifiques, des systèmes très « exotiques » | 285 |
| 9.2.3 | Les constituants de base d'un réacteur nucléaire de puissance.... | 287 |
| 9.3 | Les combustibles nucléaires | 289 |
| 9.3.1 | Généralités..... | 289 |
| 9.3.2 | Les différentes matières nucléaires utilisables..... | 290 |
| | Les combustibles à base d'uranium seul | 290 |

| | | |
|--------------------|--|-----|
| | Les combustibles à base de plutonium | 291 |
| | Les combustibles à base de thorium | 292 |
| 9.3.3 | Les différentes formes physico-chimiques de matières nucléaires (constituant la matrice de combustible) | 293 |
| 9.3.4 | Les différents gainages..... | 300 |
| 9.3.5 | Les différentes géométries et structures | 305 |
| 9.3.6 | Comportement du combustible sous irradiation..... | 312 |
| | 9.3.6.1 La matrice de combustible..... | 312 |
| | 9.3.6.2 La gaine de combustible | 313 |
| | 9.3.6.3 Exemples illustrés de comportement du combustible sous irradiation | 315 |
| 9.3.7 | Conclusion sur les combustibles | 317 |
| 9.4 | Les fluides caloporteurs..... | 318 |
| | 9.4.1 Les qualités recherchées pour un fluide caloporteur | 318 |
| | 9.4.2 La sélection des fluides caloporteurs..... | 323 |
| 9.5 | Les différents modérateurs | 331 |
| | 9.5.1 Les matériaux utilisables comme modérateurs..... | 331 |
| | 9.5.2 Un matériau très particulier : le graphite..... | 333 |
| | 9.5.3 Comparaison des modérateurs | 335 |
| Chapitre 10 | • Zoologie et genèse des différentes filières | 339 |
| 10.1 | Zoologie des différents types de réacteurs..... | 339 |
| | 10.1.1 Estimation théorique du nombre de types de réacteurs nucléaires possibles | 339 |
| | 10.1.2 La « sélection naturelle » des types de réacteurs techniquement viables..... | 340 |
| | 10.1.3 Les « filières » de réacteurs nucléaires | 343 |
| | 10.1.4 Les révélations de la première conférence mondiale sur l'énergie nucléaire | 344 |
| 10.2 | La genèse des filières de réacteurs nucléaires aux États-Unis : perspective historique | 344 |
| | 10.2.1 Le point de départ | 345 |
| | 10.2.2 Les pionniers du Met-Lab de Chicago | 347 |
| | 10.2.3 Les premières réflexions et réalisations sur les « filières de réacteurs nucléaires » | 350 |
| | A. L'équipe de Chicago : berceau des idées sur les concepts de réacteurs de puissance | 350 |
| | B. Les premiers réacteurs de grande puissance au monde | 353 |
| | C. Le véritable fondement des « filières » : le New pile Committee | 356 |

| | | |
|--------------------|---|------------|
| 10.2.4 | L'éclosion des réacteurs à eau sous pression | 359 |
| | A. L'acte de naissance..... | 359 |
| | B. L'aventure de la propulsion nucléaire sous-marine | 361 |
| 10.2.5 | Les réacteurs à eau bouillante..... | 363 |
| | A. L'origine des réacteurs à eau bouillante (REB) | 363 |
| | B. Le développement industriel des réacteurs à eau bouillante | 364 |
| 10.2.6 | Le développement des efforts et le cheminement des idées sur les réacteurs nucléaires pour les applications civiles..... | 365 |
| 10.3 | Les développements réalisés dans les autres pays précurseurs | 371 |
| | 10.3.1 Canada | 371 |
| | 10.3.2 Russie (ex-URSS) | 376 |
| | 10.3.3 Grande-Bretagne | 389 |
| | 10.3.4 France..... | 397 |
| 10.4 | Conclusion sur les filières de réacteurs | 412 |
| | | |
| Chapitre 11 | • Les réacteurs modérés au graphite | 415 |
| 11.1 | Quelques mots d'histoire | 415 |
| 11.2 | Magnox..... | 418 |
| | 11.2.1 Généralités..... | 418 |
| | 11.2.2 Combustible..... | 420 |
| | 11.2.3 Ensemble du cœur..... | 420 |
| | 11.2.4 Architecture générale | 422 |
| | 11.2.5 Principales évolutions du concept Magnox | 422 |
| 11.3 | AGR..... | 425 |
| | 11.3.1 Généralités..... | 425 |
| | 11.3.2 Combustible..... | 428 |
| | 11.3.3 Ensemble du cœur..... | 428 |
| | 11.3.4 Architecture générale | 429 |
| | 11.3.5 Principales évolutions du concept AGR et retour d'expérience de fonctionnement | 430 |
| 11.4 | UNGG..... | 431 |
| | 11.4.1 Généralités..... | 431 |
| | 11.4.2 Combustible..... | 434 |
| | 11.4.3 Ensemble du cœur..... | 436 |
| | 11.4.4 L'architecture générale | 436 |
| 11.5 | RBMK | 438 |
| | 11.5.1 Généralités..... | 438 |
| | 11.5.2 Combustible..... | 441 |
| | 11.5.3 Ensemble du cœur..... | 443 |
| | 11.5.4 Architecture générale | 444 |

| | | |
|---|--|-----|
| 11.6 | HTR | 445 |
| 11.6.1 | Les origines du concept..... | 445 |
| 11.6.2 | Le secret des HTR | 447 |
| 11.6.3 | Les éléments combustibles et le cœur..... | 450 |
| 11.6.4 | Les spécificités des HTR..... | 452 |
| 11.6.5 | Le développement des HTR et les réalisations | 456 |
| 11.6.6 | Description et évolution des concepts..... | 462 |
| | Le réacteur de Fort Saint-Vrain à blocs prismatique (BP) | 462 |
| | Le réacteur THTR-300 à boulets..... | 463 |
| | Évolution des HTR vers de petits réacteurs..... | 464 |
| | Autres concepts avancés de HTR..... | 465 |
| 11.7 | Conclusion sur les réacteurs à graphite..... | 466 |
| Chapitre 12 • Les réacteurs modérés à l'eau lourde | | |
| 12.1 | Éléments structurants et développement général de la filière..... | 469 |
| 12.1.1 | Éléments structurants de la filière | 469 |
| 12.1.2 | Le développement industriel des réacteurs de type Candu au Canada | 473 |
| 12.2 | Les bases de conception des réacteurs de type Candu..... | 475 |
| 12.2.1 | Combustible..... | 476 |
| 12.2.2 | Tubes de force et tubes de calandre | 477 |
| 12.2.3 | Modérateur..... | 478 |
| 12.2.4 | Fluide caloporteur | 478 |
| 12.2.5 | Ensemble du cœur | 479 |
| 12.2.6 | Architecture générale | 483 |
| 12.3 | Les réacteurs Candu « avancés » | 486 |
| 12.4 | Les autres réacteurs à eau lourde | 487 |
| 12.4.1 | Les REL refroidis à l'eau légère pressurisée | 488 |
| 12.4.2 | Les REL refroidis à l'eau légère bouillante (BHWCR : <i>Boiling water cooled Heavy Water Reactors</i>) | 489 |
| 12.4.3 | Les REL refroidis au gaz (HWGCR : <i>Heavy Water Gas Cooled Reactors</i>)..... | 490 |
| 12.4.4 | Les REL refroidis au liquide organique | 492 |
| 12.4.5 | Les réacteurs « atypiques » à cuve..... | 493 |
| 12.5 | Conclusion sur les réacteurs à eau lourde | 497 |
| Chapitre 13 • Les réacteurs modérés à l'eau légère : analyse comparative des REP et des REB | | |
| 13.1 | Quelques mots d'introduction | 499 |

| | | |
|--|--|------------|
| 13.2 | Comparaison des caractéristiques techniques des concepts..... | 500 |
| 13.2.1 | Architecture générale..... | 500 |
| 13.2.2 | Le cœur et le combustible..... | 503 |
| 13.2.3 | Le contrôle de la réactivité..... | 505 |
| 13.2.4 | La cuve principale..... | 507 |
| 13.2.5 | Les circuits du fluide caloporteur (ou « circuit primaire » pour les REP) et de production de vapeur..... | 508 |
| 13.2.6 | Le confinement..... | 509 |
| 13.3 | Exploitation..... | 511 |
| 13.3.1 | Pilotage du réacteur et prolongation de cycle..... | 511 |
| 13.3.2 | Gestion des matières et du combustible..... | 512 |
| 13.3.3 | Maintenance et inspection..... | 514 |
| 13.3.4 | Radioprotection..... | 515 |
| 13.3.5 | Rejets radioactifs liquides et gazeux et déchets solides (issus de l'exploitation)..... | 516 |
| 13.3.6 | Disponibilité..... | 517 |
| 13.4 | Quelques éléments de sûreté comparée..... | 517 |
| 13.5 | La place des REP et des REB aujourd'hui..... | 519 |
| 13.6 | Bilan global de comparaison entre REP et REB..... | 520 |
| 13.7 | Conclusion sur les réacteurs à eau légère..... | 521 |
| Chapitre 14 • Les réacteurs à neutrons rapides..... | | 523 |
| 14.1 | Les RNR : pourquoi ?..... | 523 |
| 14.1.1 | Utilisation de l'Unat dans les réacteurs à neutrons lents..... | 523 |
| 14.1.2 | Utilisation de l'Unat dans les réacteurs à neutrons rapides..... | 524 |
| 14.2 | Les RNR : comment ?..... | 529 |
| 14.2.1 | Bases neutroniques..... | 529 |
| 14.2.2 | Conséquences neutroniques de l'utilisation de neutrons rapides..... | 532 |
| 14.3 | La genèse des RNR..... | 534 |
| 14.4 | Vers la maturité industrielle des RNR..... | 538 |
| 14.4.1 | États-Unis..... | 538 |
| 14.4.2 | Russie (ex-Union soviétique)..... | 540 |
| 14.4.3 | Grande-Bretagne..... | 543 |
| 14.4.4 | France..... | 544 |
| 14.4.5 | Autres pays..... | 548 |
| 14.5 | Principales caractéristiques des RNR au sodium (RNR-Na)..... | 551 |
| 14.5.1 | Les particularités du cœur des RNR-Na par rapport aux REP... .. | 551 |
| 14.5.2 | Le combustible des RNR-Na..... | 556 |
| 14.5.3 | Le cœur..... | 560 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 14.5.4 | Grandes options et architecture générale..... | 562 |
| 14.5.5 | Caractéristiques générales des RNR électrogènes passés et présents..... | 566 |
| 14.5.6 | Exemple du réacteur Superphénix..... | 567 |
| 14.6 | Les RNR du futur..... | 569 |
| 14.7 | Conclusion sur les RNR..... | 573 |

Chapitre 15 • Autres réacteurs nucléaires et réacteurs du futur 577

| | | |
|----------|--|-----|
| 15.1 | Les réacteurs atypiques..... | 577 |
| 15.1.1 | Les réacteurs homogènes à combustible liquide..... | 577 |
| 15.1.2 | Les réacteurs hybrides..... | 582 |
| 15.2 | Les réacteurs de propulsion navale..... | 585 |
| 15.2.1 | Historique du développement et contraintes de la propulsion navale nucléaire..... | 585 |
| 15.2.2 | Technologie des réacteurs embarqués (eau pressurisée)..... | 589 |
| 15.3 | Les réacteurs pour les applications aériennes et spatiales..... | 593 |
| 15.3.1 | Réacteurs pour moteurs d'avions..... | 593 |
| 15.3.2 | Réacteurs de propulsion de missiles..... | 595 |
| 15.3.3 | Réacteurs pour les applications spatiales..... | 597 |
| 15.3.3.1 | Propulsion de fusées envoyées dans l'espace..... | 597 |
| 15.3.3.2 | Réacteurs générateurs d'énergie pour les engins spatiaux..... | 598 |
| 15.4 | Les réacteurs du futur..... | 603 |
| 15.4.1 | La niche des réacteurs de petite taille..... | 603 |
| 15.4.2 | Les réacteurs de quatrième génération..... | 607 |

Partie 4 Le cycle du combustible nucléaire..... 613

Chapitre 16 • Le cycle du combustible standard à base d'uranium..... 615

| | | |
|--------|---|-----|
| 16.1 | Généralités sur le cycle du combustible..... | 615 |
| 16.1.1 | Notions de base relatives au cycle du combustible..... | 615 |
| 16.1.2 | Le combustible des différents réacteurs nucléaires..... | 616 |
| 16.1.3 | Les flux de matières nucléaires..... | 617 |
| 16.1.4 | Quelques fondamentaux sur la chimie de l'uranium et des actinides..... | 617 |
| 16.1.5 | Aperçu général du cycle du combustible en France..... | 619 |
| 16.2 | L'uranium naturel et son extraction..... | 620 |
| 16.2.1 | Prospection..... | 620 |

| | | |
|--|---|------------|
| 16.2.2 | Ressources | 620 |
| 16.2.3 | Extraction du minerai..... | 621 |
| 16.2.4 | Traitement du minerai | 621 |
| 16.2.5 | Impact et réhabilitation des sites..... | 623 |
| 16.3 | La conversion de l'uranium..... | 623 |
| 16.4 | L'enrichissement de l'uranium | 624 |
| 16.4.1 | La genèse des procédés et les technologies utilisées..... | 624 |
| 16.4.2 | Comparaison des procédés utilisés majoritairement aujourd'hui : la centrifugation et la diffusion gazeuse..... | 628 |
| 16.4.3 | La gestion de l'uranium appauvri..... | 629 |
| 16.5 | La fabrication du combustible | 630 |
| 16.6 | Le refroidissement initial des combustibles usés | 632 |
| 16.7 | L'option d'entreposage de longue durée puis du stockage définitif des combustibles usés..... | 633 |
| 16.8 | L'option de traitement des combustibles usés..... | 634 |
| 16.8.1 | Historique et panorama mondial du traitement des combustibles usés..... | 634 |
| 16.8.2 | Les procédés utilisés..... | 640 |
| 16.8.3 | Le procédé Purex mis en œuvre à l'usine de La Hague | 642 |
| 16.9 | Le recyclage des matières valorisables | 646 |
| 16.9.1 | Le plutonium..... | 646 |
| 16.9.2 | Matières autres que le plutonium..... | 649 |
| 16.10 | Les questions génériques liées au cycle du combustible nucléaire..... | 651 |
| 16.10.1 | Le transport des matières nucléaires | 651 |
| 16.10.2 | Autres sujets génériques | 653 |
| 16.11 | Conclusion..... | 653 |
| Chapitre 17 • Le cycle du combustible au thorium..... | | 655 |
| 17.1 | Le thorium et ses éléments lourds associés..... | 655 |
| 17.1.1 | Le thorium et ses descendants naturels..... | 655 |
| 17.1.2 | Les caractéristiques nucléaires du thorium | 657 |
| 17.1.3 | Propriétés physiques du thorium..... | 658 |
| 17.1.4 | Abondance et réserves terrestres du thorium | 659 |
| 17.1.5 | L'uranium 233..... | 660 |
| 17.2 | Rétrospective historique..... | 662 |
| 17.2.1 | L'acquisition des connaissances de base | 662 |
| 17.2.2 | L'expérience accumulée sur le cycle au thorium..... | 665 |
| 17.2.3 | Les stimulants et les freins au cours du développement historique du cycle au thorium | 668 |
| 17.2.4 | État actuel du développement du cycle au thorium..... | 670 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 17.3 | Caractéristiques techniques du cycle du combustible au thorium et défis industriels | 671 |
| 17.3.1 | L'amont du cycle..... | 671 |
| | A. Mines : extraction et concentration | 671 |
| | B. Fabrication des combustibles au thorium | 672 |
| 17.3.2 | Caractéristiques et comportement en réacteur des combustibles à base de thorium | 673 |
| | A. Propriétés neutroniques générales..... | 673 |
| | B. Comportement du combustible sous irradiation..... | 675 |
| | C. Gestion des matières nucléaires à partir de combustibles au thorium..... | 675 |
| | D. La consommation de plutonium avec des combustibles au thorium..... | 677 |
| 17.3.3 | L'aval du cycle..... | 678 |
| | A. Le traitement..... | 678 |
| | B. Le recyclage de l'U233 | 679 |
| | C. L'entreposage et le stockage des déchets | 680 |
| 17.4 | Conclusion | 682 |
| | Conclusion générale | 685 |
| | Annexes | 695 |
| | Annexe I. Lucrèce. <i>De la nature des choses</i> – Livres I et II (extraits)..... | 697 |
| | Annexe II. La découverte du neutron. Lettre de James Chadwick à la revue <i>Nature</i> : « <i>Possible existence of a neutron</i> », 17 février 1932 (p. 312) | 700 |
| | Annexe III. Traduction en anglais de l'article de Hahn et Strassmann envoyé à la revue allemande <i>Nature</i> le 6 janvier 1939..... | 702 |
| | Annexe IV. Traduction en anglais de la lettre de Meitner et Frisch envoyée à la revue allemande <i>Nature</i> , le 16 janvier 1939 | 710 |
| | Annexe V. Les 5 brevets d'invention déposés par l'équipe française en mai 1939 puis en avril et mai 1940 (copie de la première page) | 713 |
| | Annexe VI. Lettre d'Einstein du 2 août 1939 au Président des États-Unis Franklin Roosevelt (traduite de l'anglais) | 718 |
| | Annexe VII. Liste des prix Nobel dans les domaines de la connaissance de la matière et de la physique nucléaire (depuis la création du prix en 1901 jusqu'à celui qui fut obtenu par Otto Hahn en 1944, pour sa découverte de la fission) | 720 |
| | Annexe VIII. Liste de quelques corps radioactifs importants avec leurs caractéristiques..... | 721 |

| | |
|---|-----|
| Annexe IX. Notes du meeting du 26 avril 1944 où E. Fermi présenta pour la première fois le concept de réacteur à neutrons rapides surgénérateur | 722 |
| Annexe X. Brevet fondateur de la théorie et de la conception des réacteurs nucléaires (19/12/1944) – Première page..... | 728 |
| Annexe XI. Liste de tous les réacteurs du centre d'Idaho (INEEL)..... | 730 |
| Annexe XII. Liste de tous les réacteurs du centre ORNL | 732 |
| Annexe XIII. Liste des réacteurs électrogènes mondiaux (au 1/1/2016) | 733 |
| Références | 735 |
| Index | 761 |