

COLLECTION
**GÉNIE
ATOMIQUE**

L'économie de l'énergie nucléaire



Evelyne BERTEL et Gilbert NAUDET

instn

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES
ET TECHNIQUES NUCLEAIRES

Extrait de la publication

The logo for EDP Sciences, featuring a stylized, blue, swirling symbol above the text "EDP SCIENCES" in a blue, sans-serif font, all enclosed within a thin blue square border.

EDP
SCIENCES

GÉNIE ATOMIQUE

L'économie de l'énergie nucléaire

Evelyne Bertel et Gilbert Naudet

Avec la collaboration de Marc Vielle



17, avenue du Hoggar
Parc d'Activité de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Illustration de couverture :
La médiathèque EDF - Jean Claude Raoul

ISBN : 2-86883- 691-7

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 1er 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 2004

Extrait de la publication

Introduction à la collection « Génie Atomique »

Au sein du Commissariat à l'énergie atomique (CEA), l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN) est un établissement d'enseignement supérieur sous la tutelle du ministère de l'Éducation nationale et du ministère de l'Industrie. La mission de l'INSTN est de contribuer à la diffusion des savoir-faire du CEA au travers d'enseignements spécialisés et de formations continues, tant à l'échelon national, qu'aux plans européen et international.

Cette mission reste centrée sur le nucléaire, avec notamment l'organisation d'une formation d'ingénieur en « Génie Atomique ». Fort de l'intérêt que porte le CEA au développement de ses collaborations avec les universités et les écoles d'ingénieurs, l'INSTN a développé des liens avec des établissements d'enseignement supérieur aboutissant à l'organisation, en co-habilitation, de trente-huit enseignements de 3^e cycle (DEA et DESS). À ces formations s'ajoutent les enseignements des disciplines de santé : les spécialisations en médecine nucléaire et en radiopharmacie, ainsi qu'une formation destinée aux physiciens d'hôpitaux.

La formation continue constitue un autre volet important des activités de l'INSTN, lequel s'appuie aussi sur les compétences développées au sein du CEA et chez ses partenaires industriels.

Dispensé dès 1956 au CEA Saclay, où ont été bâties les premières piles expérimentales, la formation en « Génie Atomique » (GA) l'est également depuis 1976 à Cadarache où a été développée la filière des réacteurs à neutrons rapides. Depuis 1958, le GA est enseigné à l'École des applications militaires de l'énergie atomique (EAMEA) sous la responsabilité de l'INSTN.

Depuis sa création, l'INSTN a diplômé plus de 4 000 ingénieurs que l'on retrouve aujourd'hui dans les grands groupes ou organismes du secteur nucléaire français : CEA, EDF, Framatome, Technicatome, Cogema, Marine nationale. De très nombreux étudiants étrangers provenant de différents pays ont également suivi cette formation.

Cette spécialisation s'adresse à deux catégories d'étudiants : civils et militaires. Les étudiants civils occuperont des postes d'ingénieurs d'études ou d'exploitation dans les réacteurs nucléaires, électrogènes ou de recherches, ainsi que dans les installations du cycle du combustible. Ils pourront évoluer vers des postes d'experts dans l'analyse du risque nucléaire et de l'évaluation de son impact environnemental. La formation de certains officiers des sous-marins et porte-avions nucléaires français est dispensée par l'EAMEA.

Le corps enseignant est formé par des chercheurs du CEA, des experts de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), des ingénieurs de l'industrie (EDF, AREVA, ...) Les principales matières sont : la physique nucléaire et la neutronique, la thermohydraulique, les matériaux nucléaires, la mécanique, la protection radiologique, l'instrumentation nucléaire, le fonctionnement et la sûreté des réacteurs à eau sous pression (REP), les filières et le cycle du combustible nucléaire. Ces enseignements dispensés sur une durée de six mois sont suivis d'un projet de fin d'étude, véritable prolongement de la formation réalisé à partir d'un cas industriel concret, se déroulent dans les centres de recherches du CEA, des groupes industriels (EDF, Framatome, Technicatome, etc.) ou à l'étranger (États-Unis, Canada, Royaume-Uni, ...) La spécificité de cette formation repose sur la large place consacrée aux enseignements pratiques réalisés sur les installations de l'INSTN (réacteur Ulysse, simulateurs de REP, laboratoires de radiochimie, etc.)

Aujourd'hui, en pleine maturité de l'industrie nucléaire, le diplôme d'ingénieur en « Génie Atomique » reste sans équivalent dans le système éducatif français et affirme sa vocation : former des ingénieurs qui auront une vision globale et approfondie des sciences et techniques mises en œuvre dans chaque phase de la vie des installations nucléaires, depuis leur conception et leur construction jusqu'à leur exploitation puis leur démantèlement.

L'INSTN s'est engagé à publier l'ensemble des supports de cours dans une collection d'ouvrages destinés à devenir des outils de travail pour les étudiants en formation et à faire connaître le contenu de cet enseignement dans les établissements d'enseignement supérieur français et européens. Édités par EDP Sciences, acteur particulièrement actif et compétent dans la diffusion du savoir scientifique, ces ouvrages sont également destinés à dépasser le cadre de l'enseignement pour constituer des outils indispensables aux ingénieurs et techniciens du secteur industriel.

Joseph Safieh
Responsable général
du cours de Génie Atomique

Table des matières

Avant Propos	13
Auteurs	17
Chapitre 1 : Énergie nucléaire et systèmes énergétiques	19
1.1 Caractéristiques spécifiques de l'énergie nucléaire	19
1.1.1 Aspects technologiques et économiques	19
1.1.2 Aspects environnementaux	21
1.1.3 Aspects stratégiques et sociaux	23
1.1.4 Aspects institutionnels et politiques	24
1.2 Place de l'énergie nucléaire dans les bilans énergétiques mondiaux	25
Chapitre 2 : Énergie nucléaire et systèmes électriques	27
2.1. Définition d'un système électrique	27
2.1.1. Caractéristiques de la demande d'électricité	28
2.1.2. Complémentarité des moyens de production	32
2.1.3. Contraintes et avantages du réseau	34
2.2. Prévion de la demande d'électricité	35
2.2.1. Prévion de la consommation d'électricité	36
2.2.2. Prévion de la production totale d'électricité	38
2.2.3. Prévion des courbes monotones de charge	39
2.3. Ajustement de la puissance à la demande	40
2.3.1. Puissance installée, puissance garantie	40
2.3.2. Contrainte sur la taille des unités	42
Chapitre 3 : Développement de l'énergie nucléaire	45
3.1. Programmes électronucléaires dans le monde	45
3.1.1. Évolution historique du point de vue économique	45
3.1.2. Puissance installée actuelle	48
3.1.3. Répartition par filières et types de réacteurs	51
3.2. Production d'électricité d'origine nucléaire	52
3.2.1. Contribution électronucléaire à la production d'électricité	52
3.2.2. Contribution par filières et types de réacteurs	55

3.3.	Indicateurs de fonctionnement des centrales nucléaires	55
3.3.1.	Définitions et utilisation	55
3.3.2.	Évolution des coefficients de production par types de réacteurs	58
3.3.3.	Facteurs influant sur les indicateurs	60
3.4.	Évolutions technologiques et économie	61
3.4.1.	Choix de l'uranium naturel	62
3.4.2.	Choix de l'uranium enrichi	63
3.4.3.	Autres critères de choix : performance, maturité et coût	64
3.5.	Programme électronucléaire français	64
3.5.1.	Motivations	64
3.5.2.	Réalisation du programme	65
3.5.3.	Organisation industrielle	66
3.5.4.	Production et disponibilité	67
3.5.5.	Avantages économiques et environnementaux	69
3.6.	Industrie et marché des chaudières nucléaires	70
3.6.1.	Constructeurs de chaudières	70
3.6.2.	État actuel de l'industrie des chaudières nucléaires	71

Chapitre 4 : Calcul économique :

le coût de la production d'électricité

75

4.1.	Finalité du calcul économique pour les compagnies d'électricité	75
4.2.	Analyse économique des projets : caractéristiques générales	75
4.3.	Méthode de l'actualisation	76
4.3.1.	Principe de l'actualisation	76
4.3.2.	Bilan actualisé	78
4.3.3.	Taux d'actualisation	80
4.4.	Calculs d'actualisation	84
4.4.1.	Valeurs de la fonction d'actualisation	84
4.4.2.	Valeur actuelle d'une distribution uniforme	84
4.4.3.	Valeur actuelle d'un flux constant sur la durée de vie	87
4.4.4.	Valeur actuelle d'une distribution à dérive constante sur une période donnée	88
4.4.5.	Valeur des annuités constantes	88
4.5.	Coût moyen actualisé du kWh	89
4.5.1.	Définition	89
4.5.2.	Valeur actuelle de l'énergie électrique produite	90
4.5.3.	Expression générale des dépenses actualisées	92
4.5.4.	Structure du coût moyen actualisé du kWh	95
4.6.	Autres calculs économiques prévisionnels	96

Chapitre 5 : Coût d'investissement	99
5.1. Coût de construction	99
5.1.1. Définition et composition	99
5.1.2. Coût de base	101
5.2. Facteurs de variation des coûts de base	102
5.2.1. Variabilité des coûts de base	102
5.2.2. Effet de taille	103
5.2.3. Effet de duplication sur un site	105
5.2.4. Effet de série	108
5.2.5. Effets relatifs aux conditions de site	110
5.2.6. Effet des modalités contractuelles de la construction	111
5.3. Possibilités de réduction du coût de construction	112
5.3.1. Cas des centrales nucléaires de grande taille	112
5.3.2. Cas des petites centrales nucléaires	114
5.4. Investissement	114
5.4.1. Intérêts intercalaires	115
5.4.2. Aléas sur calendrier de construction	116
5.4.3. Coût de démantèlement	117
5.4.4. Coût complet d'investissement	118
5.5. Valeurs de coûts de base de construction et de coûts d'investissement	119
5.5.1. En France	119
5.5.2. Dans le monde	120
5.5.3. Cas des centrales nucléaires de petite et de moyenne puissance	122
Chapitre 6 : Coûts d'exploitation et d'entretien	125
6.1. Composition des coûts d'exploitation	125
6.1.1. Composantes communes à toute unité électrogène	125
6.1.2. Composantes propres aux centrales nucléaires	126
6.2. Coûts d'exploitation des centrales nucléaires	127
6.2.1. Structure des coûts d'exploitation	127
6.2.2. Personnel des centrales nucléaires	127
6.2.3. Facteurs influençant les coûts d'exploitation	129
6.2.4. Calcul du coût d'exploitation	130
6.3. Valeurs des coûts d'exploitation des centrales électrogènes	131
6.3.1. En France	131
6.3.2. Dans le monde	132
6.3.3. Évolution des coûts d'exploitation des centrales nucléaires aux États-Unis	133
6.4. Coûts de rénovation des centrales nucléaires	134

Chapitre 7 : Coût du combustible	137
7.1. Coût du combustible nucléaire	137
7.1.1. Spécificité du coût du cycle du combustible nucléaire	137
7.1.2. Mode de calcul du coût de cycle du combustible nucléaire	138
7.1.3. Quantités de matières et services du cycle du combustible	141
7.1.4. Coûts unitaires et délais du cycle du combustible	143
7.1.5. Coût d'une recharge à l'équilibre	148
7.1.6. Sensibilité du coût actualisé du combustible nucléaire	151
7.1.7. Partie fixe et partie proportionnelle du coût du combustible	153
7.2. Coûts des combustibles fossiles	156
7.2.1. Prix du charbon	157
7.2.2. Prix du gaz naturel	159
7.3. Valeurs des coûts actualisés des combustibles nucléaire et fossiles	161
7.3.1. En France	162
7.3.2. Dans le monde	163
7.3.3. Aux États-Unis	165
Chapitre 8 : Compétitivité	167
8.1. Limites du concept de compétitivité	167
8.2. Compétitivité des équipements thermiques	168
8.2.1. En France : étude DIGEC de 1997	168
8.2.2. En France : nouvelle évaluation (juin 2003)	173
8.2.3. Dans le monde	175
8.2.4. Compétitivité comparée entre la France et les États-Unis	177
8.2.5. Compétitivité des centrales nucléaires de petite et moyenne puissance	178
8.3. Historique des coûts actualisés du kWh en France	181
8.3.1. Évolution des coûts d'investissement des centrales nucléaires	181
8.3.2. Évolution des coûts d'exploitation nucléaire	184
8.3.3. Évolution des coûts du cycle du combustible	184
8.3.4. Évolution de la compétitivité de l'électronucléaire	185
8.4. Aperçu du coût du kWh des énergies renouvelables	185
8.4.1. Coût du kWh des éoliennes	186
8.4.2. Coût du kWh photovoltaïque	187
Chapitre 9 : Calcul économique et gestion du système électrique	189
9.1. Optimisation du parc de production	189
9.1.1. Principes de l'optimisation	189
9.1.2. Programme optimal de développement	191
9.1.3. Sensibilité des coûts économiques à la durée d'appel	193
9.1.4. Sensibilité de la durée limite d'appel au taux d'actualisation	197

9.2.	Structure tarifaire	201
9.2.1.	Principes de la tarification	201
9.2.2.	Coût marginal et structure tarifaire	202
9.3.	Coûts comptables	205
9.4.	Prix de l'électricité	206
 Chapitre 10 : Coûts externes		211
10.1.	Externalités	211
10.2.	Coûts intégrés de protection de l'environnement	212
10.2.1.	Cas des industries extractives	212
10.2.2.	Cas général des centrales thermiques et en particulier des centrales thermiques à flamme	213
10.2.3.	Cas particulier des centrales nucléaires	215
10.2.4.	Ordre de grandeur du coût de protection de l'environnement dans la production d'électricité	216
10.3.	Coûts externes environnementaux	217
10.3.1.	Méthode d'évaluation	217
10.3.2.	Coûts externes de l'électricité d'origine nucléaire	219
10.3.3.	Comparaison des coûts externes de la production d'électricité	224
10.4.	Coûts externes non environnementaux	230
10.4.1.	Coûts externes de nature économique	230
10.4.2.	Coûts externes de nature politique	232
 Chapitre 11 : Analyse macro-économique d'une politique énergétique		235
11.1.	Évaluation macro-économique de projet micro-économique	235
11.1.1.	Modalité de l'articulation entre micro-économie et macro-économie	236
11.1.2.	Intégration d'un module spécifique au sein d'un modèle macro-économique	238
11.2.	Modélisation macro-économique appliquée à l'énergie nucléaire en France	238
11.2.1.	Contexte	239
11.2.2.	Le modèle <i>GEMINI-E3</i>	240
11.2.3.	Utilisation d'un module technologique décrivant le système électrique français	244
11.2.4.	Établissement du compte de référence	248
11.2.5.	Calcul des réductions d'émissions résultant des engagements de Kyoto	251
11.2.6.	Utilisation des recettes provenant de la fiscalité sur le carbone	252

11.3. Simulations de la mise en œuvre du protocole de Kyoto	
et d'un moratoire éventuel du nucléaire	252
11.3.1. Instauration de taxes sur le carbone	253
11.3.2. Instauration d'un marché de permis d'émissions	
au sein des pays visés à l'annexe I	255
11.3.3. Instauration de taxes sur le carbone et moratoire nucléaire français	257
11.3.4. Instauration d'un marché de permis d'émissions au sein	
des pays visés à l'annexe I et moratoire nucléaire français	259
11.3.5. Éléments de comparaison entre les scénarios	260

Chapitre 12 : Économie de l'amont du cycle du combustible **263**

12.1. Présentation technique et économique de l'amont du cycle	263
12.2. Ressources d'uranium	264
12.2.1. Classification des ressources	264
12.2.2. Estimations des ressources d'uranium	266
12.2.3. Répartition des réserves d'uranium	267
12.3. Économie de l'uranium naturel	268
12.3.1. Spécificité de la production d'uranium naturel	268
12.3.2. Coût de production de l'uranium naturel	269
12.3.3. Marché de l'uranium	271
12.3.4. Production d'uranium	275
12.4. Économie de la conversion	276
12.5. Économie de l'enrichissement	278
12.5.1. Travail de séparation isotopique	278
12.5.2. Coût de l'enrichissement	280
12.5.3. Comparaison technique et économique des procédés	
d'enrichissement	281
12.5.4. Coût de l'uranium enrichi	283
12.5.5. Industrie de l'enrichissement	284
12.5.6. Marché de l'enrichissement	285
12.6. Économie de la fabrication	288
12.6.1. Coût de la fabrication	288
12.6.2. Industrie de la fabrication	289
12.6.3. Marché de la fabrication	291

Chapitre 13 : Économie de l'aval du cycle du combustible ***et du recyclage des matières nucléaires*** **293**

13.1. Considérations économiques générales sur l'aval du cycle	293
13.2. Économie du retraitement	294
13.2.1. Coût du transport des combustibles usés	294
13.2.2. Coût de retraitement	295
13.2.3. Industrie et marché du retraitement	296

13.3. Économie du recyclage des matières nucléaires	298
13.3.1. Valorisation de l'uranium de retraitement	299
13.3.2. Valorisation du plutonium	300
13.3.3. Économie du combustible MOX	302
13.3.4. Bilan des matières fissiles économisées	305
13.4. Économie du stockage direct des assemblages usés	306
13.4.1. Coût du stockage direct des combustibles de réacteurs à eau ordinaire	306
13.4.2. Coût du stockage direct des combustibles des réacteurs à eau lourde	308
13.5. Considérations générales sur l'économie du stockage définitif des déchets nucléaires	308
13.5.1. Coût de stockage des déchets de faible activité	308
13.5.2. Facteurs techniques influençant le coût de stockage des déchets de haute activité	309
13.5.3. Sensibilité du coût de stockage des déchets de haute activité à l'importance du programme nucléaire	310
13.6. Comparaison économique des deux options de l'aval du cycle	314
13.6.1. Comparaison des coûts de cycle	314
13.6.2. Comparaison des externalités	316
13.7. Financement et garantie des charges futures de l'aval du cycle	317
13.7.1. Charges futures	317
13.7.2. Prise en compte des charges futures	318
13.7.3. Constitution des provisions	319
13.7.4. Moyens de garantie des fonds	319
13.7.5. Évolution dans le temps du montant des provisions	320

Chapitre 14 : Énergie nucléaire et libéralisation du secteur électrique

323

14.1. Libéralisation du secteur électrique	323
14.1.1. Monopoles naturels	323
14.1.2. Le libéralisme et le secteur électrique	324
14.1.3. Problèmes posés par la libéralisation du marché de l'électricité	324
14.2. Compétitivité des centrales nucléaires existantes	326
14.2.1. Effet de l'ouverture des marchés sur les performances de l'électronucléaire	326
14.2.2. Critères de compétitivité des centrales existantes	326
14.2.3. Positionnement des centrales nucléaires existantes sur les marchés concurrentiels	327
14.3. Sûreté nucléaire et concurrence	328
14.4. Allongement de la durée de vie des centrales nucléaires	329

14.5. Risques financiers propres aux futurs investissements nucléaires	330
14.5.1. Nature des risques financiers dans l'électronucléaire	330
14.5.2. Prise en compte de risques financiers dans le calcul économique	331
14.5.3. Financement nucléaire dans les pays émergents	333
14.5.4. Assurance nucléaire	335
14.6. Avenir de l'énergie nucléaire dans les marchés concurrentiels de l'électricité	336
14.6.1. Obstacles à l'investissement dans des centrales nucléaires	337
14.6.2. Démarche économique adaptée au nouveau contexte du marché de l'électricité	338
14.6.3. Avantages de l'investissement nucléaire du point de vue de l'intérêt collectif	340

Chapitre 15 : Énergie nucléaire et développement durable : potentialités et approvisionnement énergétiques **343**

15.1. Développement durable	343
15.1.1. Concept de développement durable	343
15.1.2. Critères de développement durable propres au système énergétique	344
15.2. Contexte énergétique et environnemental sur le long terme	346
15.2.1. Besoins énergétiques	346
15.2.2. Risques de changement climatique	348
15.2.3. Ressources énergétiques fossiles	350
15.2.4. Tendances de la demande en combustibles fossiles	352
15.2.5. Bouclage énergétique à long terme	352
15.2.6. Contribution potentielle des énergies renouvelables	353
15.2.7. Opportunité de bouclage par l'énergie nucléaire	355
15.3. Potentialités techniques de l'énergie nucléaire	355
15.3.1. Technologies nucléaires en réponse à la demande d'énergie	355
15.3.2. Potentialité d'insertion dans les systèmes électriques	357
15.3.3. Application à la production de chaleur à usages résidentiels	357
15.3.4. Potentialités de cogénération dans la chimie	358
15.3.5. Perspectives dans la production d'hydrogène	360
15.3.6. Perspectives dans le dessalement d'eau de mer	361
15.3.7. Perspectives dans les transports maritimes	362
15.4. Pérennité de l'approvisionnement en matières nucléaires	362
15.4.1. Production d'énergie nucléaire et approvisionnement d'uranium	362
15.4.2. Évolution structurelle du parc mondial des réacteurs	363
15.4.3. Comparaison des ressources d'énergies fossiles et des ressources d'uranium	367

Chapitre 16 : Énergie nucléaire et développement durable :	
<i>environnement, économie et société</i>	369
16.1. Développement de l'énergie nucléaire et changement climatique	370
16.1.1. Réduction des émissions de CO ₂	370
16.1.2. Données économiques relatives à la réduction des émissions de CO ₂	372
16.2. Développement de l'énergie nucléaire et évolution de la radiotoxicité	374
16.2.1. Diminution spécifique des sources radiotoxiques	374
16.2.2. Incidence sur les externalités nucléaires	376
16.2.3. Aperçu économique sur la séparation et la transmutation des actinides mineurs	377
16.3. Économie de l'électricité nucléaire à long terme	379
16.3.1. Stabilité des coûts de production des réacteurs à l'uranium	380
16.3.2. Économie des réacteurs du futur	381
16.4. Économie des applications non électrogènes de l'énergie nucléaire	383
16.4.1. Considérations générales sur la cogénération nucléaire	383
16.4.2. Dessalement d'eau de mer	384
16.4.3. Production d'hydrogène	385
16.4.4. Applications dans les transports maritimes	387
16.5. Compétitivité de l'énergie nucléaire à long terme	387
16.5.1. Tendances à long terme de la compétitivité de l'énergie nucléaire	387
16.5.2. Comparaison des besoins en capitaux	390
16.6. Énergie nucléaire et société	391
16.6.1. Avantages macro-économiques durables	392
16.6.2. Avantages du point de vue de la société et l'environnement	393
16.6.3. Recherche et développement	393
16.6.4. Communication avec les différents acteurs sociaux	394
16.6.5. Équité et géopolitique	394
16.7. Énergie nucléaire : une contribution majeure au développement durable	396
Annexe A : Travail de séparation isotopique de l'uranium	401
Annexe B : Économie comparée des réacteurs à neutrons rapides et des réacteurs à eau sous pression	411
Annexe C : Économie du dessalement de l'eau de mer	419
Annexe D : Aperçus méthodologiques de l'évaluation d'une stratégie nucléaire	421
Bibliographie	425
Index	435

Cette page est laissée intentionnellement en blanc.

Avant-propos

Cet ouvrage traitant de l'économie de l'énergie nucléaire prend place dans la collection des cours publiés du Génie Atomique. Toutefois, à la demande du directeur de cette collection lancée par l'Institut des Sciences et Techniques Nucléaires, le sujet a été élargi et déborde le cours dispensé aux étudiants. Ce souhait est bien naturel lorsque l'on mesure l'importance des questions économiques dans le choix des investissements énergétiques, et aussi lorsque l'on connaît chez nos futurs ingénieurs – mais ils ne sont pas les seuls dans ce cas – certaines lacunes concernant le contexte énergétique général dans lequel s'inscrit l'énergie nucléaire et plus particulièrement les contraintes techniques et économiques inhérentes aux réseaux électriques.

Le calcul économique propre à l'énergie nucléaire a été magistralement traité par Jacques Baunier auquel les auteurs de ce livre sont grandement redevables, mais les faits économiques, même les concepts, ayant l'inconvénient de ne pas jouir de la belle longévité des résultats acquis en physique nucléaire et en neutronique, un renouvellement du sujet est apparu nécessaire plus de quinze ans après la parution de son ouvrage portant le même titre que celui-ci. Le contexte général a fortement évolué. Les aspects environnementaux liés à l'économie de production ont pris une importance considérable. La libéralisation des marchés énergétiques, la privatisation effective ou potentielle des compagnies d'électricité posent des problèmes nouveaux au développement de l'énergie nucléaire et à son économie. L'interrogation sur l'équité entre générations soulève la difficile question de la valeur adéquate du taux d'actualisation applicable aux dépenses de long terme. Les conséquences macro-économiques d'une politique énergétique sont l'objet d'une attention croissante. Les difficultés d'approvisionnement en énergie et en eau douce, susceptibles d'apparaître au milieu du siècle, et les perspectives technologiques capables d'y faire face ont une dimension économique à laquelle il convient de réfléchir dès aujourd'hui. Nous avons conscience de n'apporter qu'un modeste éclairage sur ces questions nouvelles qu'il appartiendra aux jeunes générations de résoudre.

La substance de ce livre est d'abord le fruit d'une longue expérience vécue dans divers organismes français et internationaux où ont été élaborées de nombreuses études techniques et économiques sur les centrales nucléaires et leur combustible en concurrence avec d'autres sources énergétiques. C'est donc tout naturellement que nous avons tenté de donner un aperçu aussi large que possible de l'économie nucléaire dans

le monde, dans les pays industrialisés comme dans les pays en développement, même si le programme nucléaire français illustre souvent notre propos. Dans cet ordre d'idées, nous avons tenu à donner quelques clés ou plus modestement, quelques mises en garde, à des fins de comparaison entre filières ou entre pays. Nous nous sommes efforcés aussi de situer les performances économiques actuelles de l'énergie nucléaire dans une perspective historique. Grâce à la collaboration de Marc Vielle du laboratoire d'économie, d'énergie, d'environnement et des ressources naturelles (LEEERNA) au Commissariat à l'énergie atomique, nous avons mis en relief les implications macro-économiques d'un programme nucléaire.

En outre, cet ouvrage met à profit les cours donnés par les auteurs à différents niveaux à l'Institut des sciences et techniques nucléaires du CEA, à l'École nationale supérieure du pétrole et des moteurs de l'Institut français du pétrole, dans les cours interrégionaux d'économie et de planification énergétique organisés par l'AIEA, et enfin au Département énergie de l'*Asian Institute of Technology* près de Bangkok.

C'est d'abord aux étudiants du Génie Atomique que ce livre est destiné ou encore à de jeunes ingénieurs soucieux de ne pas négliger la composante économique de leurs études de projet ou de faisabilité. Pour cette raison, nous avons introduit les quelques notions économiques indispensables à qui elles ne seraient pas familières et nous avons signalé les références où l'on pourra approfondir ces questions.

Par ailleurs, dans le souci d'offrir à un public plus large les informations réunies dans cet ouvrage, nous nous sommes heurtés à une difficulté inhérente à l'économie nucléaire : elle repose sur une base scientifique et technique relativement complexe pour un non-spécialiste de cette forme d'énergie. Pour y remédier, nous avons cru bon d'indiquer à l'endroit opportun quelques données techniques, parfois de façon répétitive, qui sous-tendent le raisonnement et le calcul économiques, mais que les techniciens trouveront superflues. En raison d'un lectorat potentiel hétérogène, plusieurs lectures sont donc possibles, notre espoir étant que cette option n'aura pas trop alourdi cet ouvrage.

L'esprit et la conception générale du livre ainsi présentée, voici son contenu suivant les chapitres qui le composent. Le premier chapitre est une introduction qui met en relief les spécificités techniques, économiques, environnementales, sociales et politiques qui, dans leur imbrication, ont une incidence sur les coûts de production de l'énergie nucléaire et la contribution de celle-ci à l'approvisionnement énergétique mondial. Le chapitre 2 présente les caractéristiques et les contraintes des systèmes électriques que les planificateurs doivent prendre en considération dans leurs prévisions d'investissements, notamment en ce qui concerne les centrales nucléaires. Le chapitre 3 après un bref historique décrit la situation du parc électronucléaire dans le monde et en France, ses performances selon les filières, et enfin l'état de l'industrie de la construction des chaudières nucléaires. L'ensemble des chapitres 4 à 7 est consacré au calcul du coût de production du kWh d'origine thermique, aussi bien nucléaire que classique, le chapitre 4 traitant des principes et de la méthode, le chapitre 5 de l'investissement, le chapitre 6 du fonctionnement et de l'entretien, le chapitre 7 du combustible. Des valeurs illustratives

des coûts de ces trois composantes sont données pour les principaux pays nucléaires dans le monde. Le chapitre 8 présente d'après les données les plus récentes en France et dans le monde la compétitivité de l'électronucléaire avec le gaz naturel et le charbon ainsi que certaines énergies renouvelables. Le chapitre 9 traite brièvement, dans la conception d'une production centralisée, de l'utilisation du calcul économique du kWh pour l'optimisation des systèmes électriques et la tarification de l'électricité. Il souligne les différences de principe entre coûts économiques et coûts comptables avant de présenter succinctement les prix de l'électricité en Europe. Le chapitre 10 expose la définition, les méthodes d'estimation et les valeurs des coûts externes relatifs à la production d'électricité en fonction des sources d'énergie, et propose une méthode d'estimation des coûts externes résultant d'une politique énergétique donnée. Le chapitre 11 est consacré à la démarche macro-économique et à la conception de modèles pertinents pour évaluer les interactions entre économie, énergie et environnement, en particulier dans le cas de la production d'électricité. Il est illustré par différents scénarios chiffrés d'un moratoire nucléaire en France au XXI^e siècle, assorti de mesures de lutte contre le réchauffement planétaire. Deux chapitres décrivent l'économie, les marchés et l'industrie de chacune des étapes du cycle du combustible nucléaire. Le chapitre 12 concerne la préparation du combustible. Le chapitre 13 présente l'économie des deux options que sont le retraitement et le stockage en l'état des combustibles usés, ainsi que le financement et la garantie des charges financières futures relatives aux déchets. Le chapitre 14 donne un aperçu des problèmes posés au développement de l'électronucléaire par la libéralisation du marché de l'électricité et la privatisation des compagnies d'électricité, qui entraînent de nouvelles conceptions de l'évaluation prévisionnelle de la compétitivité et de prise en compte des risques financiers. Il présente en regard les avantages de cette énergie face aux incertitudes de court et moyen terme.

En conclusion, les deux derniers chapitres tentent d'évaluer le rôle et la contribution de l'énergie nucléaire dans une perspective de développement durable. Le chapitre 15 présente les potentialités techniques de cette énergie pour répondre aux besoins d'électricité, de chaleur et d'eau douce. Le chapitre 16 fait valoir l'efficacité environnementale, la viabilité économique et les avantages pour la société que les technologies nucléaires sont susceptibles de présenter dans la poursuite d'une politique énergétique visant un développement durable.

Remerciements : *il est impossible de citer tous ceux qui ont aidé à la réalisation de cet ouvrage et l'ont enrichi par leurs multiples apports. Cependant les auteurs souhaitent remercier tout particulièrement Jacques Planté, Jean-Guy Devezeaux et Leonard Bennett pour leurs précieuses contributions, Paul Reuss et Jérôme Gosset pour leur relecture attentive du manuscrit et leurs intéressantes suggestions, ainsi que Frédérique Joyeux et Sylvia Anglade sans qui le texte n'aurait jamais pris forme. Toutes les erreurs et omissions restent de la seule responsabilité des auteurs.*

Cette page est laissée intentionnellement en blanc.

Coût de l'– enrichi : 283, 408
 De retraitement : **299**, 305, 306
 Marché de l'– : 271–274
 Marché spot de l'– : 273, 274
 Prix de l'– naturel : 273, 274
 Production d'– : 268, 269, 272, 275–277
 Réserves d'– : **265**, 266, 268, 276
 Ressources classiques connues d'– : **265**, 366
 Ressources possibles d'– : **265**, 266
 Ressources probables d'– : **265**, 266
 Ressources prouvées d'– : **265**, 266
 Ressources spéculatives d'– : **265**, 266, 366
 Teneur de coupure d'un gisement d'– : **265**
 Teneur de l'– enrichi : 142, 279, 280
 Valorisation de l'– de retraitement : 299, 300

– V –

Valeur :
 De la vie humaine : 220
 D'opportunité du plutonium : **301**, 303
 Du carbone : 253, 256, 258, 260, **350**, 388, 389
 Réelle : **76**
 Vie
 Analyse du cycle de – : **212**
 Durée de – des centrales nucléaires : 173, 174, 329, 330
 Durée de – économique : **78**
 Durée de – actualisée : **87**, 88
 Valeur de la – humaine : 220

– Y –

Yellowcake : **268**

SIGLES

Chaque sigle référencé ci-dessous renvoie à la page où il est défini ou explicité par le texte.

ABB	73	EACL	71
AECL	71	EDF	66
AEG	71	ELECNUC	56
AEN	76	ENERGY	133
AGR	51	EPR	173
AIE	76	EPRI	122
AIEA	76	ERA	275
ALMR 378		Eurodif	285
AM 378			
ANDRA 311		FOB	158
AP600	122		
APA 375		GE	70
AREVA	73	GES	349
ASEA	71	GIEC	124
ATR	55	GLWR	358
		GNL	160
BNFL	73	GRD	28
B&W	70	GRT	325
		GT. MHR	129
CANDU	100		
CAS 358		IIASA	347
CCM	243	IPCC	224
CE	70		
CEA	67	KHIC	71
CEI 272		KWU	71
CES	241		
CGE	65	MGUNGG	62
CIF	158	Minatom	285
CLAB 307		MNF	291
CMA	243	MOX	300
CME	25	MSI	91
CNNC	71		
CORAIL	375	N4	66
CP0 , CP1, CP2	66	NEI	329
CRE	325	NFI	291
		NNC	71
DIDEME	173	NRC	133
DIGEC	119	NUEXCO	274
DOE	285	NUKEM	274