

**COMMUNAUTE EUROPEENNE
DE L'ENERGIE ATOMIQUE**

E U R A T O M

LA COMMISSION

**RAPPORT SUR LA SITUATION
DES INDUSTRIES NUCLEAIRES
DANS LA COMMUNAUTE**

Bruxelles - le 30 juin 1958 - Luxembourg



Le Président
et les
Membres de la Commission
à
Monsieur le Président de l'Assemblée Parlementaire

Monsieur le Président,

Le Traité instituant la Communauté Européenne de l'Energie Atomique prévoit dans son article 213 que la Commission, dans un délai de six mois après son entrée en fonction, adresse un rapport à l'Assemblée sur la situation des industries nucléaires dans la Communauté.

En exécution dudit article nous avons l'honneur de vous remettre ce rapport.

Veillez agréer, Monsieur le Président, les assurances de notre haute considération.

le 30 juin 1958.

Louis ARMAND
Président

Enrico MEDI
Vice-Président

P. DE GROOTE

H. KREKELER

E.M.J.A. SASSEN

COMMUNAUTE EUROPEENNE
DE L'ENERGIE ATOMIQUE

E U R A T O M

LA COMMISSION

RAPPORT SUR LA SITUATION
DES INDUSTRIES NUCLÉAIRES
DANS LA COMMUNAUTÉ

Bruxelles - le 30 juin 1958 - Luxembourg

TABLE DES MATIERES

| | Pages |
|--|-------|
| INTRODUCTION | 9 |
| <i>Chapitre 1</i> : ORGANISATIONS NATIONALES ET INTERNATIONALES . . . | 13 |
| 1.1. : Introduction | 13 |
| 1.2. : Les organisations nationales | 14 |
| 1.3. : L'enseignement | 30 |
| 1.4. : Organisation de la protection sanitaire contre les radiations ionisantes | 32 |
| 1.5. : Les initiatives internationales | 33 |
| <i>Chapitre 2</i> : LA PRODUCTION D'URANIUM ET DE THORIUM . . . | 49 |
| 2.1. : Introduction | 49 |
| 2.2. : Les ressources en minerais — La prospection . . . | 50 |
| 2.3. : Les mines et les usines de concentration des minerais | 54 |
| 2.4. : La préparation du combustible nucléaire . . . | 59 |
| 2.5. : Remarques finales | 63 |
| <i>Chapitre 3</i> : LE CYCLE DE COMBUSTIBLE | 67 |
| 3.1. : Introduction | 67 |
| 3.2. : La séparation isotopique de l'uranium 235 . . . | 67 |
| 3.3. : La fabrication des éléments de combustible . . . | 69 |
| 3.4. : Le traitement des combustibles irradiés | 72 |
| 3.5. : Rejet d'effluents | 75 |
| 3.6. : Remarques finales | 75 |
| <i>Chapitre 4</i> : MODÉRATEURS ET MATIÈRES DIVERSES | 77 |
| 4.1. : Modérateurs | 77 |
| 4.2. : Matériaux de structure | 84 |
| 4.3. : Absorbants de neutrons | 86 |
| 4.4. : Agents de refroidissement | 86 |
| 4.5. : Matériaux divers | 87 |
| 4.6. : Remarques finales | 88 |

| | Pages |
|--|---------|
| <i>Chapitre 5</i> : RÉACTEURS DE RECHERCHE | 89 |
| 5.1. : Introduction | 89 |
| 5.2. : Réalisations — Tableau | 91 |
| 5.3. : Remarques finales | 100 |
| <i>Chapitre 6</i> : RÉACTEURS DE PUISSANCE | 101 |
| 6.1. : Introduction | 101 |
| 6.2. : Types de réacteurs nucléaires | 102 |
| 6.3. : La situation dans divers pays d'Euratom — Tableau | 103 |
| 6.4. : Remarques finales | 116 |
| <i>Chapitre 7</i> : RADIO-ISOTOPES : PRODUCTION ET APPLICATIONS | 119 |
| 7.1. : Introduction | 119 |
| 7.2. : La situation dans divers pays d'Euratom | 122 |
| 7.3. : Remarques finales | 127 |
| <i>Chapitre 8</i> : L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE ET L'INDUSTRIE | 129 |
| 8.1. : Introduction | 129 |
| 8.2. : La situation dans divers pays d'Euratom | 131 |
| 8.3. : Remarques finales | 140 |
| <i>Chapitre 9</i> : L'ÉCONOMIE ÉNERGÉTIQUE DE L'EURATOM | 143 |
| 9.1. : Introduction | 143 |
| 9.2. : Les besoins énergétiques et l'énergie nucléaire | 143 |
| 9.3. : Le coût de l'électricité nucléaire et de l'électricité classique | 148 |
| 9.4. : Les programmes d'électricité nucléaire | 150 |
| 9.5. : Remarques finales | 152 |
| CONCLUSIONS | 153 |
| <i>Annexes</i> : | |
| 1. Euratom — Implantation des principales installations | |
| 2. Notions de base | 158 |
| 3. Unités et symboles utilisés | 169 |

INTRODUCTION

Aux termes de l'article 213 du Traité instituant la Communauté européenne de l'Energie Atomique, la Commission adresse à l'Assemblée, dans un délai de six mois à dater de son entrée en fonction, un exposé sur la situation des industries nucléaires dans la Communauté.

Le présent rapport répond aux dispositions de cet article dans les délais prescrits et la Commission espère qu'il donnera une première satisfaction au besoin d'information de l'Assemblée.

Il s'agit d'un inventaire de départ, dont il convient moins de cacher les imperfections que de les expliquer. Faire une synthèse précise et objective des multiples réalisations dès à présent amorcées en matière nucléaire dans les pays de la Communauté eût demandé à la fois un temps notablement plus considérable qu'un semestre, une administration plus complète que celle dont dispose une institution au début de son organisation, et aussi des bases documentaires et statistiques mieux coordonnées qu'elles ne le sont en ce moment. Il n'en est pas moins vrai que l'effort imposé à la Commission par l'article 213 a eu l'avantage réel, malgré les défauts manifestes du résultat obtenu, de faire produire rapidement un travail que le souci de perfection eût longtemps retardé. Les enquêtes effectuées ont permis de prendre de premiers contacts avec les industries nucléaires d'Europe et de façon plus générale avec tous ceux que les activités nucléaires concernent ; elles établissent un point de départ dans les activités documentaires que l'Euratom a pour devoir d'accomplir. Elles ont pu être réalisées, comme le souhaitait la Commission, en imposant un minimum de formalités, de correspondance et de questionnaires à remplir aux institutions et entreprises agissant dans le domaine nucléaire. L'Euratom veut avoir pour politique constante de ne

pas exposer les membres de la Communauté aux risques d'enlèvement dans le formalisme, la procédure et le papier, tout en puisant cependant les informations indispensables aux sources les plus appropriées. La collaboration dès à présent obtenue de divers côtés est des plus encourageantes et la Commission désire exprimer ici ses remerciements à tous ceux qui la lui ont accordée. Ce libre concours de toutes les forces intéressées permet de bien augurer de l'avenir.

Ce premier rapport sera, en temps opportun, complété, systématisé et développé à la mesure des nécessités d'information d'une grande collectivité nucléaire, visant à coordonner ses efforts pour en renforcer l'efficacité, libre dans ses initiatives mais en même temps avertie des faiblesses d'une action dispersée ou incohérente.

L'aspect comparatif des réalisations et des perspectives nucléaires dans les pays de la Communauté, d'une part, et les pays tiers, d'autre part, n'a pu être que brièvement évoqué, faute de temps pour contrôler les sources et apprécier les évaluations. Il y sera porté une attention toute particulière dans les synthèses que la Commission publiera dans l'avenir.

Les subdivisions adoptées dans le présent rapport résultent des conditions mêmes dans lesquelles s'est opéré le recensement des informations. Elles seront modifiées ultérieurement au fur et à mesure que sera perfectionné l'accès à des renseignements plus précis et plus homogènes. Enfin, dans le futur, il sera veillé à mieux situer la place actuelle et les perspectives de l'énergie nucléaire dans le contexte de l'économie énergétique générale, grâce à l'étroite collaboration que l'Euratom entend poursuivre avec la Communauté européenne Charbon-Acier ainsi qu'avec la Communauté économique européenne.

Les défauts et les déficiences du présent travail ayant été dûment signalés, la Commission croit pouvoir le soumettre à la critique mais aussi à la très sérieuse attention de l'Assemblée.

Il a été jugé utile, pour éviter toutes difficultés éventuelles dans la lecture du présent rapport, de donner en annexe quelques indications très sommaires sur les notions de base et la terminologie relatives à l'énergie nucléaire.

CHAPITRE PREMIER

ORGANISATIONS NATIONALES ET INTERNATIONALES

1.1. INTRODUCTION

La nouveauté et l'ampleur des problèmes que pose l'utilisation de l'énergie nucléaire ont amené les Etats ainsi que les entreprises privées et publiques à créer des organismes nettement spécialisés.

La plupart des Etats se sont écartés des structures administratives traditionnelles et ont créé des « Commissariats » à l'énergie atomique. La République fédérale d'Allemagne dispose d'un département ministériel spécialisé.

Les entreprises forment des « syndicats » ou « groupements » au sein desquels elles organisent diverses formes de collaboration allant, dans les cas les plus étendus, jusqu'à mettre en commun hommes, moyens techniques et moyens financiers. Elles créent aussi des groupements professionnels qui visent à organiser les rapports avec les pouvoirs publics nationaux et même avec les organisations internationales.

La disposition de personnel qualifié tant pour la recherche que pour la mise en pratique des techniques nouvelles nécessite, dans l'immédiat, le développement et l'adaptation de l'enseignement au niveau universitaire aussi bien qu'aux niveaux technique et professionnel.

Les applications de l'énergie nucléaire peuvent comporter certains dangers pour le personnel des installations ainsi que pour l'ensemble de la population. Il convient, en conséquence, d'organiser la protection contre de tels risques.

Les utilisations pacifiques de l'énergie atomique ont suscité un grand nombre d'initiatives internationales, d'origine gouvernementale ou privée. Des organisations nouvelles ont été créées : Organisation européenne pour la Recherche nucléaire (C.E.R.N.), Agence internationale de l'Energie atomique, Agence européenne pour l'Energie nucléaire. En même temps, d'autres organisations existantes, de compétence plus générale, ont orienté une partie de leurs activités vers les mêmes problèmes : l'Union européenne occidentale (U.E.O.), l'Organi-

sation internationale du Travail (O.I.T.), l'Organisation mondiale de la Santé (O.M.S.), l'Organisation des Nations-Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (F.A.O.).

1.2. LES ORGANISATIONS NATIONALES

1.2.1. Belgique

1. *Secteur public*

Dans le secteur public il existe quatre organes :

- le Commissariat à l'Énergie atomique,
- le Ministère des Affaires économiques,
- la Commission nationale pour l'étude de l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire,
- l'Institut interuniversitaire des sciences nucléaires.

L'organe le plus spécialisé est le *Commissariat à l'Énergie atomique*. Il a été créé en 1951.

Le Commissariat est chargé de :

- suivre les recherches et les réalisations en matière nucléaire, en Belgique et à l'étranger, et d'aviser aux moyens propres à faire participer la Belgique à tous les progrès en ce domaine ;
- assurer la coordination de toutes les activités relatives à l'énergie nucléaire ;
- promouvoir les initiatives propres à favoriser les intérêts de la Belgique, notamment en ce qui concerne la recherche et l'exploitation des minerais radioactifs ainsi que l'utilisation des connaissances nucléaires et leur application.

Au *Ministère des Affaires économiques*, il existe, au sein de l'Administration de l'Industrie, un service des « applications nucléaires ».

La « *Commission nationale pour l'étude de l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire* » a pour mission de donner des avis au Gouvernement sur :

- l'organisation de la recherche scientifique appliquée en matière d'énergie nucléaire ;
- la promotion de l'utilisation industrielle de l'énergie nucléaire ;

— la collaboration internationale dans le domaine de l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire.

Elle est composée de représentants des divers milieux intéressés : industries nucléaires, production d'électricité, milieux universitaires, administrations publiques. Elle est présidée par le Ministre des Affaires économiques.

L'Institut interuniversitaire des sciences nucléaires a été créé en 1947, sous forme d'organisme autonome au sein du Fonds National de la Recherche Scientifique. Il a pour objet de susciter, de promouvoir et de coordonner, en Belgique et au Congo belge, au sein des établissements belges de haut enseignement et de recherche, les études et travaux scientifiques relevant des sciences nucléaires, sauf en matière de sciences appliquées.

2. Secteur mixte

Le secteur mixte, associant pouvoirs publics et intérêts privés, occupe une place très importante dans l'organisation nucléaire belge. On y relève le Centre d'étude de l'énergie nucléaire et l'Association belge pour le développement pacifique de l'énergie atomique.

Le « Centre d'étude de l'énergie nucléaire » (C.E.N.), dont le statut actuel date de 1957, est un établissement reconnu d'utilité publique. Il est présidé par le Commissaire général à l'énergie atomique. Son conseil d'administration est composé de représentants des milieux industriels, des milieux scientifiques et des administrations publiques.

Le Centre a pour mission d'entreprendre toutes recherches relatives aux applications de l'énergie nucléaire ainsi que de promouvoir et d'encourager l'étude scientifique et technique de ces applications.

Le C.E.N. a créé le Centre de Mol. Un réacteur de recherche y fonctionne depuis 1956. S'y ajouteront et sont dès à présent en construction : un réacteur à haut flux pour essais des matériaux et une centrale nucléaire pilote de 11.500 kW_e ⁽¹⁾. Le Centre dispose de laboratoires de chimie, de métallurgie, de physique et d'électronique qui seront complétés

(1) En annexe 3 sont rassemblés les unités et symboles utilisés dans le rapport.

par des laboratoires médicaux, agronomiques et biologiques, Il a organisé un vaste Centre de documentation en matière nucléaire.

Lorsque le programme actuellement en cours de réalisation sera terminé, en 1960, les investissements totaux réalisés à Mol atteindront le montant de 50 millions d'unités UEP. Les dépenses de fonctionnement du Centre sont de l'ordre de 4 millions d'unités UEP par an.

L'« Association belge pour le développement pacifique de l'énergie atomique » est une association sans but lucratif dont l'objet est d'étudier et de promouvoir les utilisations pacifiques de l'énergie atomique.

Elle peut participer à l'activité d'organismes internationaux, constituer des comités d'étude et de propagande, ainsi qu'un centre de documentation. Sa mission d'information concerne tout spécialement la jeunesse ; elle organise des visites d'installations, des conférences et des expositions, et fournit des bourses pour la recherche.

3. Secteur privé

Il existe, d'une part, un groupement professionnel, d'autre part, des associations d'entreprises dans un but d'étude ou d'exploitation.

Un « Groupement professionnel de l'industrie nucléaire » a été créé en 1957. Il tend à grouper les intérêts du secteur privé, afin d'en assurer la représentation, la défense et la promotion auprès des autorités nationales et internationales. Il réunit quelque soixante-dix entreprises dès à présent actives dans divers secteurs des industries nucléaires ⁽¹⁾.

D'autre part, le Groupement a provoqué la constitution d'une « Fondation nucléaire » dont l'objet est de concourir au développement de la recherche, notamment en créant et en subventionnant des organismes voués à cette tâche. La Fondation, qui est gérée par le Groupement, assure globalement la participation financière du secteur privé au budget du Centre d'étude de l'énergie nucléaire (C.E.N.).

De nombreuses entreprises appartenant à divers secteurs industriels ont développé des services spéciaux pour la mise

(1) En annexe à ce chapitre sont repris les groupements et entreprises actifs dans divers secteurs des industries nucléaires.

en pratique des techniques particulières adaptées aux besoins de l'énergie nucléaire. En outre, des bureaux d'études et des entreprises nettement spécialisées ont été créés.

Le « *Syndicat d'étude de l'Énergie nucléaire* » (S.E.E.N.) qui compte vingt-deux entreprises, a pour objet la formation de spécialistes, l'étude des problèmes relevant des techniques nucléaires et leur application à l'industrie. Il peut également constituer des sociétés commerciales aux fins de reprendre ou d'exploiter les résultats des travaux du syndicat.

Le « *Syndicat d'étude des Centrales atomiques* » (S.Y.C.A.) qui comprend huit entreprises, a pour objet :

- les études relatives à l'installation et à l'exploitation de tout moyen de production d'énergie électrique à partir de l'énergie nucléaire ;
- toute activité en rapport direct ou indirect avec le but ci-dessus ;
- la constitution éventuelle de sociétés commerciales aux fins de reprendre tout ou partie de l'activité du syndicat ou d'exploiter le résultat de ses travaux.

D'autre part, cinq sociétés exerçant une activité de bureaux d'études pour les installations de production, de transport et de distribution d'énergie électrique ont créé une société commerciale qui remplit les fonctions d'ingénieur-conseil pour la construction de centrales et autres installations nucléaires.

Des entreprises plus particulièrement intéressées à la fabrication des réacteurs et des éléments de combustibles, au retraitement chimique des combustibles nucléaires irradiés, à la production, à la distribution et la mise en œuvre des radio-isotopes ont constitué une société, étant d'ailleurs entendu qu'elles ne lui conféraient aucun monopole et qu'elles se réservaient toute liberté d'action en ces domaines. En fait, de nombreuses entreprises poursuivent, isolément ou en association, des objectifs plus ou moins parallèles à ceux de cette société.

4. *Entreprises publiques d'exploitation*

Les Régies d'électricité de Liège et de Gand, la Société coopérative liégeoise d'électricité, l'Association liégeoise d'électricité, ont créé, sous forme d'association de fait, le « *Syndicat des entreprises publiques pour l'étude et la construction des centrales nucléaires* ».

1.2.2. République fédérale d'Allemagne

1. Secteur public

A la fin de 1955, il a été créé à l'échelon parlementaire une Commission de l'Energie atomique du Bundestag, chargée de s'occuper de toutes les questions en rapport avec la recherche et l'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques.

A l'échelon gouvernemental, un arrêté en date du 6 octobre 1955 a créé un Ministère fédéral pour les Affaires atomiques. En octobre 1957, les problèmes des eaux ont été placés sous la compétence de ce Ministère et on a adopté la désignation : « *Bundesministerium für Atomkernenergie und Wasserwirtschaft* » (Ministère fédéral de l'Energie nucléaire et des Eaux).

Pour les questions nucléaires, ce Ministère comprend deux directions :

Direction I : Droit et économie, administration, coopération internationale;

Direction II : Recherches, technique, protection contre les radiations.

Le Ministère de l'Energie nucléaire et des Eaux est assisté par la « *Deutsche Atomkommission* » (Commission allemande de l'Energie atomique), organe consultatif créé par arrêté gouvernemental du 21 décembre 1955. Elle est placée sous la direction du Ministre fédéral de l'Energie nucléaire et des Eaux et se compose de personnalités éminentes de la science, de l'économie et de la vie publique.

Cinq commissions d'experts, s'occupant de la législation en matière d'énergie nucléaire, de la recherche et de la formation de nouveau personnel, de questions techniques et économiques concernant les réacteurs ainsi que de problèmes économiques, financiers et sociaux, sont rattachées à cette Commission allemande de l'Energie atomique. Deux cents personnes environ sont employées à titre consultatif dans ces commissions ainsi que dans les groupes de travail qui y sont rattachés et qui traitent de certaines questions spéciales.

Selon la conception du Gouvernement fédéral, l'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques dans la République fédérale d'Allemagne doit être laissée aux soins de l'industrie privée. L'Etat a pour tâche essentielle de promouvoir la recherche et la formation d'un personnel scientifique adéquat. Il ne

se propose d'agir directement que dans la mesure nécessaire à la protection du personnel employé dans les installations atomiques, à la protection de la population et à la sécurité publique. Les entreprises industrielles dans le domaine nucléaire ne reçoivent une aide de l'Etat qu'au premier stade de leur développement.

Cette conception se retrouve dans les projets d'une loi fédérale atomique qui sont actuellement à l'étude. En l'absence d'une législation fédérale atomique, les bases indispensables pour la période initiale avaient été établies par les lois des différents Länder. L'opinion du Gouvernement fédéral, selon laquelle la législation atomique à l'échelle fédérale s'impose avec urgence, est partagée par les Gouvernements des Länder.

Dans son action d'aide et de soutien, le Ministère fédéral de l'Energie nucléaire et des Eaux s'efforce de promouvoir constamment la recherche et le développement des techniques nucléaires tout en préservant la complète liberté de la recherche et de l'enseignement, ainsi que d'encourager l'initiative des entreprises privées dans le domaine de l'économie nucléaire. Ce Ministère s'efforce en outre de mettre en œuvre une coopération internationale, dans le cadre d'accords bilatéraux et multilatéraux, conclus sur base de réciprocité et sans discriminations.

Le budget du Ministère pour l'exercice 1957 prévoit un montant de dépenses de 20 millions d'unités UEP. Le projet de budget fédéral pour 1958 réserve au Ministère de l'Energie nucléaire et des Eaux un montant de dépenses de 34 millions d'unités UEP, auquel s'ajoutent 11 millions d'unités UEP figurant dans d'autres sections du budget fédéral. Une grande partie de ces fonds est destinée à soutenir la recherche et à encourager la formation du personnel nouveau.

Les travaux de recherches et de développement en matière d'énergie nucléaire sont également soutenus par des fonds inscrits au budget des différents Länder, ainsi que par l'industrie.

Il faut enfin signaler parmi les institutions créées par l'Etat, les Commissions de l'Energie atomique des Länder, qui conseillent les Gouvernements de certains d'entre eux. Des personnalités qui font partie de ces commissions sont en même temps membres de la Commission allemande de l'Energie atomique déjà citée.

2. Secteur mixte

La collaboration entre l'Etat et l'industrie privée peut être illustrée par la société à responsabilité limitée « *Kernreaktor Bau- und Betriebs-Gesellschaft mbH.* ». Elle a été fondée en 1956 à Karlsruhe. L'industrie détient la moitié du capital social. L'autre moitié provient, pour 60 pour-cent du budget de la République fédérale et pour 40 pour-cent du budget du Land Baden-Württemberg. La participation de l'industrie est assurée par l'intermédiaire de la « *Kernreaktor-Finanzierungs-Gesellschaft GmbH.* » (Société à responsabilité limitée pour le financement des réacteurs nucléaires) ⁽¹⁾.

3. Secteur privé

Parmi les *organisations de l'industrie* ayant constitué des Comités spéciaux en rapport avec l'utilisation pacifique de l'énergie atomique, mentionnons le Bundesverband der deutschen Industrie e.V. (B.D.I.) à Cologne et la Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke (V.D.E.W.) à Francfort-sur-le-Main.

D'autre part, des groupements industriels comportant en majorité des producteurs d'électricité ont été constitués en vue de construire des centrales nucléaires. Il s'agit en l'occurrence de :

- « *Studiengesellschaft für Kernkraftwerke GmbH (SKW)* » — Société d'étude des Centrales nucléaires S.A.R.L.) de Hanovre. Elle groupe quatre entreprises.
- « *Arbeitsgemeinschaft deutscher Energieversorgungsunternehmen zur Vorbereitung der Errichtung eines Leistungs-Versuchs-Reaktors e.V. (AVR)* » — (Communauté de travail des entreprises allemandes de production et de distribution d'électricité pour la préparation de la construction d'un réacteur d'essai et de puissance) à Dusseldorf. Elle comprend neuf entreprises.
- « *Arbeitsgemeinschaft Baden-Württemberg zum Studium der Errichtung eines Kernkraftwerkes (Arbeitsgemeinschaft Kernkraftwerke)* » (Communauté de travail Bade-Wurtemberg pour l'étude de la construction d'une centrale nucléaire) à Stuttgart. Elle comprend six entreprises.

(1) Voir annexe à ce chapitre.

- « Gesellschaft für die Entwicklung der Kernkraft in Bayern, mbH. » (Société pour le développement de l'énergie nucléaire en Bavière S.A.R.L.) à Munich. Bien que cette société, qui groupe cinq entreprises, ait en outre parmi ses membres le Gouvernement de Bavière, son activité est cependant semblable à celle des autres organisations mentionnées ci-dessus, c'est-à-dire de caractère privé.

1.2.3. France

1. Secteur public

Au centre de l'activité nucléaire en France se situe le « Commissariat à l'Énergie atomique » (C.E.A.) qui a été créé par ordonnance du 18 octobre 1945, après une interruption quasi totale de plus de cinq années de l'effort français dans le domaine de l'énergie atomique. Le texte organique donne mission au C.E.A. de préparer le pays à l'utilisation de cette forme d'énergie dans les divers domaines de la science, de l'industrie et de la défense nationale.

Placé sous l'autorité et le contrôle du Président du Conseil des Ministres, le C.E.A. bénéficie d'un statut original, unique en France; c'est en effet un établissement public, doté de l'autonomie administrative et financière, à vocation tout à la fois scientifique, technique et industrielle.

Un « Comité de l'Énergie atomique » composé de dix membres choisis parmi les plus hauts fonctionnaires et les personnalités scientifiques et industrielles administre le C.E.A. Ce Comité est présidé par le Président du Conseil ou par son représentant. En leur absence, la présidence du Comité est assurée par l'Administrateur général, délégué du Gouvernement. Ce dernier est également chargé de la direction administrative et financière du Commissariat, tandis que le Haut-Commissaire assume la direction scientifique et technique.

Des organismes consultatifs de liaison entre les services publics, les grands établissements de l'Etat, l'Université, complètent les organes de direction. Ce sont le Conseil scientifique, le Comité des Mines, le Comité de l'équipement industriel.

Le C.E.A. a lancé deux plans quinquennaux, 1952-1956 et 1957-1961, qui tendent à doter le pays de l'infrastructure indispensable à l'utilisation industrielle de l'énergie atomique. Le second plan quinquennal met en jeu d'autres administrations, de grandes entreprises publiques (en premier lieu Electricité

de France) et une large fraction de l'industrie nationale. Les objectifs fondamentaux concernent trois domaines :

- la production d'énergie sous forme de chaleur et d'électricité ;
- la propulsion au moyen de moteurs atomiques ;
- l'utilisation et la commercialisation de radio-isotopes artificiels en médecine, en agriculture, dans l'industrie, dans la recherche.

Le C.E.A. possède trois centres d'études nucléaires : Fontenay-aux-Roses, Saclay et Grenoble.

C'est à une entreprise publique, Electricité de France (E.D.F.) qu'incombe la mise en œuvre de l'énergie nucléaire en vue de produire de l'électricité pour la distribution publique.

2. Secteur privé

Sous le patronage du Commissariat à l'Énergie atomique et de l'Electricité de France, une association dont l'objet est de favoriser le développement des techniques intéressant la production et l'utilisation de l'énergie nucléaire a été créée. Il s'agit de l'*Association technique pour la production et l'utilisation de l'énergie nucléaire* (A.T.E.N.) qui répond particulièrement au souci de développer les débouchés ouverts par la nouvelle forme d'énergie aussi bien sur le marché intérieur français qu'à l'étranger ⁽¹⁾.

D'autres groupements existent qui réunissent des entreprises dans le but de mettre en commun des activités diversement spécialisées pour des études et des réalisations d'installations industrielles se rapportant à la libération et à l'utilisation de l'énergie nucléaire.

C'est ainsi que l'un de ces groupements comprend des spécialistes des glaces et produits chimiques, de l'aluminium, du graphite, du béryllium, des aciers inoxydables et de la mécanique, des pièces de forges, des réservoirs et tubes sous pression, des turbines hydrauliques, de la construction électrique, des câbles et de l'électronique.

D'autres groupements, plus étroitement spécialisés, se consacrent soit à des fournitures, soit à l'étude des auxiliaires de

(1) Voir liste des membres en annexe à ce chapitre.

l'énergie atomique, soit encore à l'étude de parties d'installations industrielles.

3. *Collaboration des pouvoirs publics avec des entreprises d'exploitation*

Les pouvoirs publics en France, comme dans la plupart des autres pays, se sont reconnu une double mission :

- effectuer directement une part importante des efforts initiaux les plus coûteux pour créer une infrastructure nucléaire ;
- coordonner l'activité des firmes privées et faciliter leur conversion à la technologie atomique.

Nous avons déjà vu le rôle fondamental joué par le C.E.A. Il faut ajouter que l'Etat dispose de la presque totalité des commandes nucléaires, puisque ce qui n'est pas réalisé pour le compte du C.E.A. l'est pour le compte d'Electricité de France, entreprise nationalisée, ou d'autres départements ministériels.

Des collaborations efficaces ont pu être établies — notamment entre le C.E.A. et les industriels — que ce soit dans des échanges d'études, des accords de production ou dans des contrats pour la construction d'usines. Le Commissariat se consacre aux études de base et aux recherches de laboratoire ; l'industrie cependant, pour le relayer et passer aux réalisations pratiques, collabore déjà avec lui à ce stade ; leurs rapports sont analogues à ceux qui existent, au sein d'une même société, entre le laboratoire et le bureau d'études.

Très rapidement l'industrie fut ainsi associée à ce que nous appellerons les tâches propres du Commissariat, par une participation active à la construction d'usines comme l'usine d'élaboration de l'uranium du Bouchet, la deuxième usine de raffinage d'uranium qui sera édiflée à Narbonne, la nouvelle usine d'uranothorianite du Bouchet et les deux usines de concentration chimique de Vendée et du Limousin. Pour le Centre de Marcoule, la coopération avec l'industrie est spécialement importante. Dans chaque cas, l'entreprise générale est confiée à une seule société.

Jusqu'ici, après avoir établi les avant-projets correspondants, le C.E.A. demeurait le maître de l'œuvre et contrôlait les différentes étapes des travaux ultérieurs de l'industrie.

Dans l'avenir, le Commissariat cessera d'être le « maître de l'œuvre » de la plupart des réalisations nucléaires, tout en conservant bien entendu un rôle essentiel dans les recherches générales, dans l'étude, la construction et l'exploitation des prototypes, dans le traitement des combustibles nucléaires et en agissant en tant que conseil pour les réalisations industrielles.

C'est ainsi qu'il apportera sa collaboration dans les programmes dits « associés » et notamment dans la construction de centrales productrices d'électricité nucléaire, dont la réalisation et l'exploitation seront sous la responsabilité d'Electricité de France.

Dans l'ensemble, la politique pratiquée en France est voisine de celle adoptée depuis l'origine aux Etats-Unis, où l'entreprise générale des réalisations pour l'utilisation pacifique de l'énergie atomique est confiée à des groupes industriels dont les travaux s'effectuent sous l'autorité d'une commission gouvernementale. Cependant, en France, le C.E.A. a dû procéder seul à la mise en exploitation de plusieurs mines d'uranium.

1.2.4. Italie

L'étude de l'énergie nucléaire et des problèmes relatifs à son utilisation, est menée principalement par trois organismes, dont deux appartiennent au secteur public et un au secteur mixte. En outre, des entreprises privées se sont groupées en vue d'atteindre certains objectifs en matière d'utilisation de l'énergie nucléaire.

1. Secteur public

Le principal organisme public qui s'occupe en Italie du développement de l'énergie nucléaire, est le « *Comitato Nazionale per le Ricerche Nucleari* » (C.N.R.N.) (Comité national pour les recherches nucléaires).

Le C.N.R.N. fut constitué par Décret du Président du Conseil, en juin 1952.

Depuis lors, plusieurs initiatives gouvernementales et parlementaires se sont manifestées en faveur d'une législation nucléaire : la proposition législative la plus récente, initiative du Ministre de l'Industrie et du Commerce, a été présentée au Sénat le 12 décembre 1957. Ce projet prévoit un budget pour les recherches nucléaires au cours des cinq prochaines années

et dispose que l'activité scientifique du C.N.R.N. est de la compétence du Ministère de l'Instruction publique tandis que son activité plus particulièrement industrielle est sous le contrôle du Ministère de l'Industrie et du Commerce.

La direction du C.N.R.N. est assurée par un président, deux vice-présidents, sept membres experts et un secrétaire général.

La mission du C.N.R.N. comporte essentiellement quatre points :

- 1) effectuer études, recherches et expériences, soit dans le domaine fondamental, soit dans le domaine appliqué ;
- 2) organiser et encourager le développement des applications de l'énergie nucléaire ;
- 3) organiser les cadres et coordonner les programmes s'étendant sur plusieurs années, soit dans le cadre national soit dans le cadre international ;
- 4) participer à la coopération atomique internationale.

En six ans d'activité, le C.N.R.N. s'est essentiellement acquitté de la tâche de former une base technique appropriée aux recherches nucléaires en Italie, par deux réalisations fondamentales :

- *le Centre de recherches nucléaires appliquées d'Ispra*, où un réacteur nucléaire de recherche du type CP-5 est aujourd'hui en construction (2 millions d'unités UEP pour le réacteur, plus 7 millions supplémentaires pour l'ensemble des laboratoires connexes).
- *le Centre pour la recherche fondamentale de physique de Frascati*, doté d'un synchrotron de 1.000 MeV.

Les autres buts poursuivis par le Comité sont :

- le développement systématique de la *recherche géo-minière*, en vue de déterminer les possibilités d'extraction d'uranium sur le territoire national, et d'évaluer ainsi les possibilités d'approvisionnement autonome en combustibles nucléaires ;
- des *études technologiques* relatives à la production de matériaux nucléaires spéciaux. Parmi les résultats les plus remarquables de cette activité, il faut mentionner la réalisation d'une installation pilote, destinée à produire de l'uranium métallique ;

- *l'étude technique des prototypes de réacteurs de puissance, afin de déterminer l'orientation nationale dans ce domaine;*
- *l'étude des applications de l'énergie nucléaire à l'agriculture et à la médecine ;*
- *l'étude d'appareillages électroniques utilisables dans les installations nucléaires et, en premier lieu, pour les expériences avec le synchrotron de Frascati, pour les réacteurs de recherche et pour les prototypes ;*
- *l'étude des propriétés des gaz ionisés.*

Le budget du C.N.R.N. fixé par la « loi transitoire » du 12 décembre 1957 est fixé à 80 millions d'unités UEP pour les cinq prochaines années. De ce chiffre, un total de 29 millions est prévu pour les années budgétaires 1958 et 1959.

Un organisme qui dépend maintenant du C.N.R.N. (depuis le début de 1957) est l'« *Istituto Nazionale di Fisica Nucleare* » (I.N.F.N. — Institut national de physique nucléaire). Cet organisme est actuellement financé soit par le C.N.R.N., soit pour certains projets spéciaux, par d'autres sources publiques ou privées.

L'I.N.F.N. s'occupe des problèmes concernant la recherche fondamentale. Il devra gérer le laboratoire national de Frascati pour compte du C.N.R.N.

L'I.N.F.N. compte actuellement six sections dans les Universités de Rome, Milan, Padoue, Turin, Pise et Bologne et des sous-sections dans les Universités de Florence, Gênes, Trieste, ainsi qu'à l'Institut supérieur de santé de Rome, à l'Institut polytechnique de Milan et à l'Institut de physique théorique de Naples.

Le « *Centro Applicazioni Militari Energia Nucleare* » (C.A.M.E.N. — Centre d'applications militaires de l'énergie nucléaire) a été fondé à l'initiative de l'Université de Pise et de l'Académie navale de Livourne. Il projette la construction d'un laboratoire nucléaire dont le coût dépassera 3 millions d'unités UEP et qui comprendra diverses sections (bureaux d'ingénieurs, physique, chimie, biologie) et un réacteur du type « *swimming pool* ».

Le siège actuel et provisoire du C.A.M.E.N. se trouve auprès de l'Académie navale de Livourne en attendant l'édification d'un centre approprié à proximité de cette dernière ville.

2. Secteur mixte

Le *Centro Informazioni Studi Esperienze* (C.I.S.E. — Centre d'informations, d'études et d'expériences) représente la première tentative effectuée à la fin de la dernière guerre, de regrouper toutes les activités nucléaires italiennes. Constitué par un groupe d'industries privées à la fin de 1945, le C.I.S.E. ⁽¹⁾ a fourni jusqu'à présent une grande partie des techniciens et des chercheurs qui travaillent actuellement en Italie dans le domaine nucléaire. Récemment, des industries publiques sont entrées dans le C.I.S.E. Son activité ne s'est cependant pas sensiblement modifiée et il conserve son caractère d'organisme de recherches pures et appliquées, ainsi que de consultation en faveur de tiers.

Parmi les nombreuses réalisations du C.I.S.E., les suivantes méritent une mention spéciale :

- étude d'un réacteur de recherche (le CP-5 du C.N.R.N.) ;
- projet et réalisation d'une installation pilote de production d'uranium métallique ;
- projet et réalisation d'une installation pilote de production d'eau lourde.

3. Secteur privé

Un grand nombre d'entreprises italiennes produisent des matières et des équipements pour l'industrie nucléaire.

D'autres entreprises s'occupent de la construction de réacteurs nucléaires de puissance et ont des programmes nucléaires. Elles ont formé entre elles divers groupements, dont l'Etat ou des entreprises publiques font parfois partie, mais qui ont cependant un caractère privé. Parmi ces groupements constitués pour la production d'énergie électrique, il faut citer :

- le groupe AGIP Nucleare, dont dépendent SOMIREN et SIMEA,
- la SELNI — Società Elettronucleare Italiana — qui groupe huit entreprises,
- la SORIN — Società Ricerche Impianti Nucleari — qui groupe deux sociétés,

(1) Voir liste des sociétés participantes en annexe à ce chapitre.

— la SENN — Società Elettronucleare Nazionale — qui groupe treize sociétés.

1.2.5. Luxembourg

Secteur mixte

Le *Conseil national de l'Énergie nucléaire*, placé sous la présidence du Ministre de l'Énergie, groupe les représentants qualifiés de l'industrie et du commerce.

Cet organisme a pour but :

- 1° l'étude des aspects économiques, juridiques, financiers et techniques de l'utilisation de l'énergie nucléaire, notamment de ses applications industrielles ;
- 2° la participation aux études et travaux d'organismes similaires étrangers, internationaux ou supranationaux.

1.2.6. Pays-Bas

1. *Secteur public*

C'est à la « *Commissie voor Atoomenergie* » (Commission pour l'Énergie atomique) qu'incombe la tâche de conseiller le gouvernement néerlandais dans le domaine de l'énergie nucléaire.

Elle comprend des représentants des différents Ministères.

2. *Secteur mixte*

Tout comme dans les autres pays, le développement de l'énergie nucléaire aux Pays-Bas fait l'objet d'une étroite coopération entre le gouvernement, les producteurs d'électricité et l'industrie. L'organisation nationale qui s'occupe dudit développement est le « *Reactor Centrum Nederland* » (R.C.N.) — Centre néerlandais pour réacteurs) qui a pour tâche d'acquérir les connaissances et l'expérience scientifiques et techniques, en vue des applications pacifiques de l'énergie nucléaire et de leur mise à la disposition de la population.

Le capital de cette fondation, créée en 1955, s'élève jusqu'à présent à 6,2 millions d'unités UEP. Il a été fourni pour moitié par le gouvernement, pour un quart par les sociétés productrices d'électricité et pour un quart par l'industrie.

Les centrales électriques qui financent le R.C.N., dont la plupart ont la forme de sociétés anonymes, appartiennent aux

organes administratifs des provinces et des municipalités. Elles ont créé une société anonyme, la « Samenwerkende Electriciteitsproducenten » (S.E.P. — Producteurs d'électricité associés) qui s'occupe des échanges de puissance. Elles ont aussi un institut de recherche commun, la N.V. tot Keuring van Electro-technische Materialen (K.E.M.A. — Société pour le contrôle des matériaux électrotechniques) à Arnhem, qui les représente au sein des organes d'administration du R.C.N.

La plus grande partie du capital du R.C.N. est utilisée pour la construction d'un réacteur de haut flux, tandis qu'une autre partie (environ un million d'unités UEP) est utilisée pour les recherches concernant les réacteurs homogènes aqueux à suspension, dont le R.C.N. a chargé la K.E.M.A. ; le R.C.N. subventionne diverses autres recherches telles qu'un projet d'ultracentrifuge pour la séparation des isotopes d'uranium.

Les liens qui existent entre l'industrie et le R.C.N. ne sont pas seulement d'ordre financier. Quelques quarante-cinq grandes et moyennes entreprises, ayant contribué ensemble pour 25 % du capital, ont de ce fait obtenu certains droits. Elles ont confié leurs intérêts à une *Commission Industrielle*.

En ce qui concerne la construction de centrales nucléaires, la S.E.P. a demandé à la K.E.M.A. de créer une commission dans le but d'étudier les offres demandées à des entreprises de divers pays pour la construction de centrales nucléaires.

Dans le secteur de la navigation, les intéressés se sont groupés au sein de la « Stichting Kernvoortstuwing Koopvaardij-schepen » (S.K.K. — Fondation pour la propulsion nucléaire des navires marchands) qui a été créée par les armateurs et les chantiers navals. Le R.C.N., la Stichting voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek (T.N.O. — Fondation pour la recherche scientifique appliquée) et l'Université polytechnique de Delft ont des représentants au Conseil du S.K.K. Le S.K.K. assure la coordination des recherches nucléaires effectuées dans ce domaine au profit de la construction navale et mécanique, ainsi que de la navigation.

Les autres initiatives et activités industrielles se limitent à la conclusion de contrats concernant la fourniture de pièces et l'exécution d'ordres de développement nucléaire à l'échelle technique.

Les activités en vue d'appliquer l'énergie nucléaire dans l'agriculture sont concentrées à Wageningen où se trouve

l'Ecole des hautes études agronomiques. L'« Instituut voor toe-passing van atoomenergie in de landbouw » (I.T.A.L. — Institut pour l'application de l'énergie atomique dans l'agriculture) y sera établi et disposera d'un réacteur de recherche, probablement de dessin néerlandais.

Quant à la documentation, un institut central est en voie de préparation ; sa fondation est due à l'initiative commune d'un grand nombre d'institutions intéressées dans le développement de l'énergie nucléaire. Ce « Documentatie Centrum voor Atoome-nergie » (D.C.A. — Centre de documentation pour l'énergie atomique) sera organisé par la section de documentation du R.C.N. et par le « Nederlands Instituut voor Documentatie en Registratuur (N.I.D.E.R. — Institut néerlandais pour la docu-mentation et la classification).

1.3. L'enseignement

Un des problèmes principaux posés par le développement de l'industrie nucléaire est celui des hommes. C'est la raison pour laquelle tous les pays s'efforcent de développer un réseau d'enseignement universitaire et technique qui soit en mesure de satisfaire aux nécessités nouvelles. L'importance de la question est mise en lumière par le fait que les rédacteurs du Traité ont jugé indispensable de confier une mission précise à l'Euratom dans cette matière. Dans le cadre du centre commun de recherches, des écoles pour la formation de spécialistes pourront être créées par la Commission. Il sera en outre créé une institution de niveau universitaire. Cette action de l'Euratom complétera les efforts nationaux qui, dès à présent, se traduisent par des réalisations concrètes ⁽¹⁾.

Les matières particulières suivantes, relatives aux applica-tions de l'énergie nucléaire, sont enseignées dans les universités, écoles techniques supérieures et centres de recherches :

- Physique nucléaire appliquée à l'énergie nucléaire dans quarante-sept institutions de Belgique, Allemagne, France, Italie et des Pays-Bas, ainsi que dans un établissement com-mun hollando-norvégien.
- Théorie et construction des réacteurs dans vingt-sept insti-tutions des mêmes pays et dans l'établissement commun hollando-norvégien.

(1) Les précisions qui sont données sont basées sur une étude de l'O.E.C.E. « 1957-1958 — Catalogue des cours sur l'Energie nucléaire dans les pays de l'O.E.C.E. ».

- Technique de la chaleur et thermo-dynamique appliquée aux réacteurs nucléaires dans sept institutions de Belgique, France et Italie, ainsi que dans l'établissement commun hollando-norvégien.
- Construction et équipement électronique intéressant l'énergie nucléaire dans vingt institutions de Belgique, Allemagne, France, Italie, et dans l'établissement commun hollando-norvégien.
- Préparation et traitement des matières nucléaires brutes et des matières fissiles dans seize établissements de Belgique, Allemagne, France, Italie et des Pays-Bas, ainsi que dans l'établissement commun hollando-norvégien.
- Métallurgie des métaux utilisés dans le domaine de l'énergie nucléaire dans treize institutions de Belgique, Allemagne, France, Italie et des Pays-Bas, ainsi que dans l'établissement commun hollando-norvégien.
- Prospection et extraction des minerais d'uranium et de thorium dans quatre institutions de France et d'Italie.
- Production et utilisation des isotopes radio-actifs dans dix-sept institutions de Belgique, Allemagne, France, Italie et des Pays-Bas, ainsi que dans l'établissement commun hollando-norvégien.
- Actions biologiques et chimiques des radiations dans vingt institutions de Belgique, Allemagne, France, Italie et des Pays-Bas.
- Aspects économiques de l'énergie nucléaire dans deux institutions (Belgique et Italie).
- Météorologie dans ses liaisons avec l'énergie nucléaire dans deux institutions italiennes.

Des efforts analogues sont poursuivis dans le domaine de l'enseignement professionnel.

Certaines entreprises s'attachent également à former des spécialistes par des cours et des stages.

Cette question primordiale sera reprise, plus en détail, dans un prochain rapport. Etant donné que des renseignements ou des précisions homogènes pour les six pays ne sont pas accessibles, dans une forme appropriée, pour le moment, on se limitera à des généralités.

1.4. Organisation de la protection sanitaire contre les radiations ionisantes.

Tout en accueillant les bienfaits que les applications pacifiques de l'énergie nucléaire peuvent apporter à l'humanité, il faut néanmoins se préoccuper très sérieusement des dangers immédiats et à long terme qui pourraient résulter de l'usage de cette source d'énergie. C'est pourquoi il s'impose de consacrer une attention particulière au problème de la protection sanitaire et aussi à celui de l'assurance contre les risques nucléaires.

Le problème de cette protection se pose aussi bien du point de vue opérationnel actif, c'est-à-dire concernant les travailleurs occupés dans les industries nucléaires, que du point de vue passif, à l'égard de la population civile tout entière.

Ce chapitre aurait paru incomplet si l'on n'avait pas évoqué ici les obligations qu'implique l'organisation de cette protection sanitaire ; dans ses rapports ultérieurs, la Commission ne manquera pas d'exposer et de commenter dans son détail l'état d'avancement des travaux effectués dans ce domaine.

Conformément aux dispositions du Traité, un système complet de protection est actuellement en voie d'élaboration par la Commission d'Euratom. Ce système comprendra notamment :

1. La fixation des doses maxima admissibles, dites normes fondamentales.
2. La fixation des maxima admissibles en matière d'expositions (externes) et de contaminations (internes), dites normes pratiques.
3. La définition des principes fondamentaux de surveillance médicale des travailleurs.
4. Les dispositions légales et réglementaires propres à assurer le respect des prescriptions ci-dessus.
5. La surveillance permanente du taux de radio-activité de l'air, des eaux et du sol, étendue à tous les territoires envisagés.
6. Des dispositions particulières, par exemple, contrôle des effluents radio-actifs rejetés par les installations nucléaires (waste disposal).

Les normes de base, couvrant les trois premiers points, sont élaborées par la Commission qui, en vertu du Traité, a demandé l'avis d'un groupe de personnalités, désignées par le Comité scientifique et technique parmi les experts scientifiques des

Etats membres, notamment parmi les experts en matière de santé publique. Sur les normes de base ainsi élaborées, la Commission demandera l'avis du Comité économique et social.

Les dispositions de protection — législatives, réglementaires ou administratives — doivent être complétées dans chaque pays par des mesures adéquates en ce qui concerne l'enseignement, l'éducation et la formation professionnelle.

En vue de tenir compte des habitudes et des traditions propres à chaque pays, le Traité consacre la liberté des dispositions législatives, réglementaires et administratives sur le plan national, à condition que ces dispositions assurent le respect des normes de base. Les six Etats devront donc, avant de donner une forme définitive à leur réglementation interne, prendre connaissance des normes que la Commission doit arrêter dans l'année de l'entrée en vigueur du Traité.

Concernant le taux de radio-activité, des installations spécialisées permettront un contrôle précis sur toute l'étendue du territoire des six pays membres. Les Etats membres devront fournir les données générales de tout projet relatif au rejet des effluents radio-actifs. Il appartient à la Commission de déterminer si la mise en œuvre d'un tel projet est susceptible ou non d'entraîner une contamination radio-active des eaux, du sol ou de l'espace aérien d'un autre Etat membre.

Les renseignements ci-dessus en matière de protection sanitaire ont uniquement pour but de montrer le souci de la Commission de toujours considérer les efforts nationaux ou internationaux de promotion des industries nucléaires en stricte liaison avec le respect absolu de la santé des populations.

1.5. Les initiatives internationales

Les problèmes posés par les utilisations pacifiques de l'énergie atomique ont suscité depuis quelques années un grand nombre d'initiatives gouvernementales et privées. Des accords bilatéraux ont été conclus par les pays membres avec les pays tiers. Les pays de l'Euratom participent à diverses organisations internationales spécialement créées dans le domaine nucléaire. D'autres organisations internationales, existant de longue date et assumant des fonctions de compétence plus générale, consacrent une partie de leurs activités à ces problèmes particuliers.

1.5.1. Accords bilatéraux

Avant l'entrée en vigueur du Traité, la Belgique, la République fédérale d'Allemagne, la France, l'Italie et les Pays-Bas avaient conclu des accords bilatéraux de coopération avec les Etats-Unis. Il s'agit d'accords-cadre, qui ont tous pour objet principal l'échange de connaissances et la fourniture aux pays européens de réacteurs de puissance ou de recherche, ainsi que de certaines quantités de matières fissiles spéciales.

Il existe entre la République fédérale d'Allemagne, la Belgique, la France, les Pays-Bas et la Grande-Bretagne, des accords de coopération dans le domaine de la recherche et entre l'Italie et la Grande-Bretagne un accord permettant également la livraison de réacteurs de puissance.

A côté des accords conclus entre Gouvernements, il convient aussi de signaler ceux qui ont été passés par des organismes publics des Etats membres ; c'est ainsi qu'en France le Commissariat à l'Energie atomique a conclu des accords avec les organismes publics correspondants de l'Inde, d'Israël, du Royaume-Uni et de Yougoslavie, de même qu'avec l'« Aktiebolaget Atomenergi » suédoise ; en Italie le C.N.R.N. entretient des relations suivies avec l'U.K. Atomic Energy Authority. Aux Pays-Bas enfin, le R.C.N. a conclu des accords avec l'U.K. Atomic Energy Authority ainsi qu'avec l'Institut for Atomenergi (Norvège).

1.5.2. Organisations multilatérales nouvelles spécialisées en matière nucléaire

- l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (C.E.R.N.) ;
- l'Agence internationale de l'Energie atomique ;
- l'Agence européenne pour l'Energie nucléaire ;
- l'Institut unifié de recherche nucléaire de Dubno.

1. Le C.E.R.N.

C'est le 29 septembre 1954 qu'est entrée en vigueur la Convention pour l'établissement de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (C.E.R.N.). Sont membres du C.E.R.N. : la Belgique, le Danemark, la France, la République fédérale d'Allemagne, la Grèce, l'Italie, les Pays-Bas, la Norvège, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Yougoslavie.

Le but de l'Organisation est de promouvoir la coopération entre Etats européens dans le domaine de recherche nucléaire de caractère purement scientifique et fondamental ; les résultats de ces travaux expérimentaux et théoriques sont intégralement publiés.

Le programme de base de l'Organisation comprend :

- la construction et l'exploitation (sur le territoire du Canton de Genève) d'un laboratoire international, composé essentiellement de deux accélérateurs pour des recherches sur les particules de haute énergie (synchro-cyclotron de 600 MeV et synchrotron à protons de 25 GeV), représentant un investissement d'environ 50 millions d'unités UEP ;
- l'organisation de la coopération internationale en matière de recherche nucléaire (études théoriques, échange de chercheurs, recherches dans le domaine des rayons cosmiques, organisation de congrès) ⁽¹⁾.

L'Organisation peut entreprendre tout programme supplémentaire approuvé préalablement par les deux tiers au moins des Etats membres.

Depuis 1955, l'activité du C.E.R.N. a été presque uniquement concentrée sur la construction des deux accélérateurs prévus au programme. Le synchro-cyclotron fonctionne depuis août 1957 ; le synchrotron à protons devrait être terminé en 1960.

En même temps, des études théoriques étaient menées par du personnel scientifique dépendant du C.E.R.N. à Copenhague, Liverpool et Upsala, tandis qu'à Genève et au Jungfrauoch des chercheurs poursuivaient des études sur les rayons cosmiques.

2. *International Atomic Energy Agency* (I.A.E.A. — Agence internationale de l'Energie atomique)

L'Agence internationale, dont le siège a été fixé à Vienne, est un organisme autonome placé sous l'égide de l'O.N.U.

Son rôle principal consiste à favoriser les échanges d'informations scientifiques entre Etats membres et à redistribuer les

(1) Il convient de noter à ce sujet que les contributions budgétaires des pays de l'Euratom représentent 60,30 % du budget total du C.E.R.N. : Belgique 4,88 % ; France 23,84 % ; Italie 10,20 % ; Pays-Bas 3,68 % ; République fédérale d'Allemagne 17,70 %.

matières fissiles et installations mises à sa disposition par certains Etats membres. Elle fournit, d'autre part, son assistance technique pour les projets qui lui sont soumis et qui reçoivent son agrément. Elle peut aider l'Etat ou le groupe d'Etats membres qui désirent réaliser un de ces projets, à obtenir, en dehors d'elle, les moyens financiers nécessaires.

La mise en place d'un dispositif de contrôle doit mettre l'Agence internationale à même de s'assurer que les matières, installations et informations fournies par elle ne sont pas utilisées à des fins militaires.

Chaque année se réunit une Conférence, composée de représentants de tous les pays participants, qui élit les membres du Conseil des Gouverneurs, organe exécutif de l'Agence. Son Directeur général est nommé par le Conseil des Gouverneurs, avec l'approbation de la Conférence. Une répartition géographique a été adoptée pour la composition du premier Conseil des Gouverneurs ; ce dernier comprend parmi ses membres les représentants de deux des pays d'Euratom.

Le budget de l'Agence a été fixé, pour sa première année de fonctionnement, à 4 millions d'unités UEP. Les matières fissiles, mises jusqu'à présent à la disposition de l'Agence, notamment par les U.S.A., l'U.R.S.S. et la Grande-Bretagne, représentent une valeur d'environ 100 millions d'unités UEP.

D'autre part, lors de la première Conférence générale de l'Agence, en octobre 1957, le délégué de la France a annoncé la possibilité que les pays d'Euratom mettent eux aussi certaines quantités de combustibles nucléaires à la disposition de l'Agence internationale. Il précisa que, dès que possible après l'entrée en vigueur du Traité d'Euratom, il ferait connaître à l'Agence, en accord avec les autres pays membres d'Euratom, la nature de la contribution que la Communauté pourrait apporter par prélèvement sur les ressources en combustibles nucléaires des six pays.

3. *L'Agence européenne pour l'Energie nucléaire*

Les dix-sept pays membres de l'Organisation européenne de Coopération économique (O.E.C.E.) ont signé, le 20 décembre 1957, les « Statuts de l'Agence européenne pour l'Energie nucléaire ».

L'Agence a notamment pour objet :

— de promouvoir la confrontation et l'harmonisation des pro-

grammes et des projets des pays participants, tant dans le domaine de la recherche que dans celui des applications industrielles ;

- de promouvoir la création d'entreprises communes dans le domaine de la production et des utilisations de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques, ainsi que l'approvisionnement de ces entreprises et des pays membres en matières premières ;
- d'étudier toutes mesures tendant à libérer aussi complètement que possible les échanges internationaux de produits nucléaires ;
- d'établir un contrôle de sécurité dont l'organisation devra faire l'objet d'une convention spéciale ;
- de promouvoir dans les pays participants l'enseignement des matières intéressant l'énergie nucléaire ;
- de promouvoir l'élaboration et l'harmonisation des législations dans les pays participants, en ce qui concerne notamment la protection de la santé publique, la prévention des accidents dans l'industrie nucléaire et le régime de la responsabilité civile et de l'assurance des risques atomiques.

L'Agence doit établir des relations avec les autres organisations internationales intéressées. Une liaison particulièrement étroite est prévue avec Euratom. C'est ainsi notamment que la Commission d'Euratom et l'Agence européenne pour l'Energie nucléaire maintiennent une liaison étroite en vue d'arriver à l'adoption de normes de base dans le domaine de la protection sanitaire pour l'ensemble du territoire de l'Europe occidentale.

L'organe essentiel de l'Agence est le Comité de direction de l'Energie nucléaire, aux travaux duquel participent des représentants de tous les pays membres et de la Commission d'Euratom, ainsi que des pays associés, Canada et Etats-Unis.

Une convention annexe, soumise à ratification, organise par ailleurs un contrôle de sécurité sur les activités de l'Agence.

Les travaux entrepris à l'O.E.C.E. en vue de constituer une « Société européenne pour le traitement chimique des combustibles irradiés (Eurochemic) » ont été menés à terme en décembre 1957 et la Convention relative à la création de la première entreprise commune de l'Agence a été signée en même temps que les statuts de celle-ci.

La Convention implique ratification par les pays suivants : Allemagne (République fédérale), Autriche, Belgique, Dane-

mark, France, Italie, Norvège, Pays-Bas, Portugal, Suède, Suisse, Turquie. Cinq des pays membres d'Euratom ont signé cette Convention. Tout pays membre ou associé à l'O.E.C.E. pourra y adhérer ultérieurement.

La société est constituée pour une durée de 15 ans. Elle a pour mission de construire, avant 1961, et d'exploiter une usine et un laboratoire destinés au traitement des combustibles irradiés.

Elle a un capital social de 20 millions d'unités UEP, divisé en 400 actions de 50.000 unités chacune ; les pays d'Euratom en ont, à eux seuls, souscrit 254.

Les statuts d'Eurochemic prévoient, d'autre part, qu'un représentant d'Euratom participe, à titre consultatif, aux travaux du Conseil d'administration et de l'Assemblée générale de la société.

4. Dans le cadre des organisations internationales, existe également l'*Institut unifié de recherche nucléaire de Dubno*.

Cet Institut est essentiellement spécialisé dans la construction d'accélérateurs de particules. L'un d'eux, parmi les plus puissants du monde, a été mis en marche en avril 1957.

Sa direction administrative comprend un présidium exécutif de trois personnes. La direction scientifique est assurée par un collège formé de trois représentants pour chaque pays membre de l'Institut.

1.5.3. **Activités nouvelles exercées en matière nucléaire par des organisations de compétence générale existantes**

D'autres organisations internationales s'occupent, à titre accessoire, de questions relatives à l'énergie nucléaire. Elles sont nombreuses et variées. Il convient notamment de souligner l'importance de la contribution apportée par l'Union européenne occidentale (U.E.O.) à l'étude des problèmes relatifs à la protection contre les radiations. Sous les auspices des Nations-Unies, l'Organisation internationale du Travail (O.I.T.) et l'Organisation mondiale de la Santé (O.M.S.) se préoccupent, elles aussi, de ces problèmes, tandis que l'Organisation pour l'Alimentation et Agriculture (F.A.O.) s'intéresse plus particulièrement à l'utilisation des radio-isotopes dans le secteur agricole. L'Organisation météorologique mondiale (O.M.M.) se charge plus spécialement du contrôle des retombées radio-actives, tandis que le Comité Scientifique des Nations-Unies pour l'étude des effets des radiations ionisantes englobe dans son programme la protection sanitaire.

ANNEXE AU CHAPITRE I

Il eût été intéressant de pouvoir présenter une liste complète des entreprises qui adhèrent aux différents groupements nationaux à caractère général. Cela n'est pas possible étant donné que l'organisation professionnelle n'est pas la même dans chaque pays et que cela eût conduit à des listes trop longues. C'est la raison pour laquelle, dans chaque cas, on a retenu le ou les groupements qui ont paru particulièrement représentatifs. Il faut noter qu'il ne s'agit pas nécessairement d'associations en vue de la défense d'intérêts professionnels.

BELGIQUE

« Groupement professionnel de l'industrie nucléaire »

(groupement professionnel tendant à rassembler l'ensemble des intérêts du secteur privé, afin d'en assurer la représentation, la défense et la promotion vis-à-vis des autorités nationales et internationales).

Ce groupement comprend environ 70 entreprises :

Ateliers de Constructions Electriques de Charleroi
Compagnie Auxiliaire d'Electricité
Belgonucléaire
Bell Telephone Manufacturing Company
Usines Gustave Boël
Société de Bruxelles pour la Finance et l'Industrie « Brufina »
Société Carbochimique
Cimenteries et Briqueteries Réunies
Compagnie Belge de Chemins de Fer et d'Entreprises
Forges de Clabecq
Cockerill Ougrée
Usines à Cuivre et à Zinc
Sociétés Réunies d'Energie du Bassin de l'Escaut
S.A. Eau, Gaz, Electricité et Applications
Compagnie Générale d'Entreprises Electriques et Industrielles
« Electrobél »
Compagnies Réunies d'Electricité et de Transports « Electrorail »
Ateliers de Constructions d'Ensival
Centrales Electriques de l'Entre-Sambre-et-Meuse et de la Région
de Malmédy
Evence Coppée & Cie

S.A. pour le Commerce et les Fabrications industrielles
« Fabricom »
Fabrique de Fer de Charleroi
Fabrique Nationale d'Armes de Guerre
Compagnie Générale de Gaz et d'Electricité « Gazelec »
Société de Gaz et d'Electricité Hainaut-Liège
Société Métallurgique Hainaut-Sambre
Société Générale Métallurgique de Hoboken
Union Intercommunale des Centrales Electriques du Brabant
« Interbrabant »
Société Intercommunale Belge d'Electricité
Union des Centrales Electriques de Liège-Namur-Luxembourg
« Linalux »
Compagnie Maritime Belge
Compagnie Maritime Congolaise
Société Belge de l'Azote et des Produits Chimiques du Marly
Manufacture Belge de Lampes et de Matériel Electronique
Mercantile Marine Engineering and Graving Docks Company
Compagnie des Métaux d'Overpelt-Lommel et de Corphalie
Papeteries de Belgique
Phenix Works
Poudreries réunies de Belgique
S.A. Métallurgique de Prayon
S.A. Laminoirs, Hauts-Fourneaux, Forges et Usines de la Providence
S.A. Minière et Métallurgique de Rodange
Aciéries et Miniers de la Sambre
Société d'Etudes, de Recherches et d'Applications à l'Industrie
Société d'Electricité et de Mécanique
Société Générale de Belgique
Société Financière de Transports et d'Entreprises Industrielles
« Sofina »
Hauts-Fourneaux, Forges et Aciéries de Thy-le-Château et
Marcinelle
Société de Traction et d'Electricité
Usines à Tubes de la Meuse
Union des Centrales Electriques du Hainaut
Union Minière du Haut-Katanga
Union des Verreries Mécaniques Belges
Mines et Fonderies de Zinc de la Vieille-Montagne
Visseries et Tréfileries de Haren
S.A. Babcock Smuders
S.A. Bureau d'Etudes Nucléaires B.E.N.
N.V. Gevaert Photo-Nucléaire
S.A. Ateliers Lebrun

S.A. Physique Industrielle
Cie. Générale d'Eau
Société Hamon
S.A. Sobelco
S.A. Phillips
Société Sovetreaux
Usines Gilson
Tôleries Delloye-Mathieu
Tôleries Gantoises.

REPUBLIQUE FEDERALE D'ALLEMAGNE

On peut citer, à titre d'exemple d'une organisation mixte, la « Kernreaktor Bau- und Betriebs-Gesellschaft mbH. », Karlsruhe, au sein de laquelle l'industrie est représentée par la « Kernreaktor-Finanzierungs GmbH. » (Société pour le financement des réacteurs nucléaires, S.A.R.L.), Frankfurt/Main.

Les membres de cette dernière sont :

Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft
Allianz-Versicherungs-AG.
Aluminium-Hütte Rheinfelden GmbH.
Badenwerk AG.
Badische Anilin- & Soda-Fabrik
Badische Bank
Bayernwerk AG.
Berliner Kraft- und Licht (Bewag)-AG.
Bopp & Reuther GmbH.
Robert Bosch GmbH.
Brown, Boveri & Cie. AG.
Chemische Werke Hüls AG.
Colonia Kölnische Versicherungs-AG.
Commerzbank-Bankverein AG.
Daimler-Benz AG.
DEMAG AG.
Deutsche Continental-Gas-Gesellschaft
Deutsche Edelstahlwerke AG.
Deutsche Gold- und Silber-Scheideanstalt vormals Roessler
Deutsche Shell AG.
Didier-Werke AG.
Dynamit-Actien-Gesellschaft vormals Alfred Nobel & Co.
Energie-Versorgung Schwaben AG.
Eisenwerk-Gesellschaft Maximilianshütte AG.
Farbenfabriken Bayer AG.
Farbwerke Hoechst AG. vormals Meister Lucius & Brüning
Gebrüder Giuliani GmbH.

Gelsenkirchener Bergwerks-AG.
Gerling-Konzern Allgemeine Versicherungs-AG.
Gerling-Konzern Rückversicherungs-AG.
Gesellschaft für Linde's Eismaschinen AG.
Goetzerwerke Friedrich Goetze AG.
Gutehoffnungshütte Aktienverein
Hackethal Draht- und Kabel-Werke AG.
Philipp Holzmann AG.
Ilseder Hütte
Kabel- und Metallwerke Neumeyer AG.
Karlsruher Lebensversicherung AG.
Klein, Schanzlin & Becker AG.
Fried. Krupp
Kugelfischer, Georg Schäfer & Co.
Lonza-Werke Elektrochemische Fabriken GmbH.
Lonzona GmbH.
Mannesmann AG.
Maschinenfabrik Augsburg- Nürnberg AG.
Maschinenfabrik Esslingen
E. Merck AG.
Metallgesellschaft AG.
Neckarwerke Elektrizitätsversorgungs-AG.
Niederrheinische Hütte AG.
Norddeutsche Affinerie
Nordstern Allgemeine Versicherungs-AG.
Osnabrücker Kupfer- und Drahtwerk
Physikalische Studiengesellschaft Düsseldorf mbH.
Pintsch Bamag AG.
Preussische Elektrizitäts-AG.
Rhein-Main-Bank AG.
Röchling'sche Eisen- und Stahlwerke GmbH.
Salzdetfurth AG.
Schering AG.
Schlesische Feuerversicherungs-Gesellschaft
Siemens-Schuckertwerke AG.
Stadtwerke Karlsruhe
Steinkohlenbergwerke Mathias Stinnes
Steinkohlen-Elektrizität-AG.
L. & C. Steinmüller GmbH.
Stolberger Zink Aktiengesellschaft für Bergbau und Hütten-
betrieb
Süddeutsche Bank AG.
Studiengesellschaft für Verbrauchsnaher Stromerzeugung e.V.
Technische Werke der Stadt Stuttgart
August Thyssen-Hütte AG.

C.G. Trinkaus
Vereinigte Industrie-Unternehmungen AG.
J.M. Volth
Volkswagenwerk GmbH.
Wacker-Chemie GmbH.
Wasag Chemie AG.

Dans le secteur de l'activité privée, les groupements suivants ont été constitués, dont les membres sont en majorité des producteurs d'énergie électrique :

- 1) « *Studiengesellschaft für Kernkraftwerke GmbH. (SKW)* » (Société d'étude des centrales nucléaires S.A.R.L.) de Hanovre. Elle groupe quatre entreprises :
 - Preussische Elektrizitäts A.G.
 - Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen AG.
 - Hamburgische Elektrizitätswerke AG.
 - Nordwestdeutsche Kraftwerke AG.

- 2) « *Arbeitsgemeinschaft deutscher Energieversorgungsunternehmen zur Vorbereitung der Errichtung eines Leistungs-Versuchs-Reaktors e.V. (AVR)* » (Communauté de travail des entreprises allemandes de production et de distribution d'électricité pour la préparation de la construction d'un réacteur d'essai et de puissance) à Dusseldorf. Elle comprend neuf entreprises :
 - Stadtwerke Düsseldorf
 - Stadtwerke Hannover
 - Stadtwerke Bremen
 - Stadtwerke Duisburg
 - Stadtwerke Kiel
 - Stadtwerke WuppertalKommunales Elektrizitätswerk Mark AG.
Elektrizitätswerk Minden-Ravensberg, GmbH.
Elektrizitätswerk Wesertal GmbH.

- 3) « *Arbeitsgemeinschaft Baden-Württemberg zum Studium der Errichtung eines Kernkraftwerkes (Arbeitsgemeinschaft Kernkraftwerke)* » (Communauté de travail Wurtemberg-

Bade pour l'étude de la construction d'une centrale nucléaire) à Stuttgart. Elle comprend six entreprises :

Badenwerk AG.

Energieversorgung Schwaben AG.

Neckarwerke Elektrizitätsversorgung AG.

Grosskraftwerk Mannheim AG.

Technische Werke der Stadt

Stadtwerke Karlsruhe.

- 4) « *Gesellschaft für die Entwicklung der Kernkraft in Bayern, mbH.* » (Société pour le développement de l'énergie nucléaire en Bavière S.A.R.L.) à Munich.

Elle comprend les membres suivants :

Freistaat Bayern

Farbwerke Hoechst AG.

Bayernwerke AG.

Grosskraftwerk Franken AG.

Innwerk AG.

Isar-Amperwerk AG.

FRANCE

L'Association technique pour la production et l'utilisation de l'énergie nucléaire (A.T.E.N.) a pour objet de favoriser le développement des techniques intéressant la production et l'utilisation de l'énergie nucléaire.

Les sociétés participantes sont les suivantes :

Commissariat à l'Energie Atomique

Electricité de France

Air-Equipement

Air-Liquide

Aldocatom (Société Algérienne de Documentation Atomique)

Société Alsacienne de Constructions Mécaniques

Société Générale de Constructions Electriques et Mécaniques

Alsthom

Société Anonyme des Ateliers et Chantiers de la Seine-Maritime

Compagnie des Ateliers et Forges de la Loire

Anciens Etablissements Aubert et Duval

Auxi-Atome

Société Française des Constructions Babcock et Wilcox

B.A.C.C.I. (Les Entreprises Le Bomin, Caminade et Cie et Béton

Armé, Constructions Civiles et Industrielles Réunion)

Banque Française du Commerce Extérieur

Banque de l'Indochine
Banque de Paris et des Pays-Bas
Société Française Bitumastic
Etablissements Bouchayer et Viallet-Grenoble.
Société Industrielle de Produits Chimiques Bozel-Maetra
Bureau Véritas
Société Le Carbone-Lorraine
Chantiers Navals de La Ciotat
Centre d'Etude de Prévention
Compagnie pour la Fabrication des Compteurs et Matériel
d'Usines à Gaz
Compagnie Générale de Construction de Fours
Crédit Lyonnais
Crédit National
De Dietrich et Cie
Etablissements Delattre et Frouard Réunis
Compagnie Générale d'Electricité
Electricité et Gaz d'Algérie
Compagnie Electro-Mécanique
Société Esso Standard
Compagnie de Fives-Lille
Société des Forges et Ateliers du Creusot
Compagnie des Forges d'Audincourt et Dépendances
Compagnie des Forges de Châtillon, Commentry et Neuves-
Maisons
France-Atome
Gaz de France
Etablissements Geosyl
Société d'Exploitation des Matériels Hispano-Suiza
Société Métallurgique d'Imphy
Indatom
Forges et Ateliers de Constructions Electriques de Jeumont
Laboratoires d'Electronique et de Physique Appliquées
Etablissements Kuhlmann
Société des Chantiers Réunis Loire-Normandie
Société Lorraine-Escaut
Etablissements Merlin et Gérin
Société Mesco
Compagnie Française des Métaux
Compagnie Française des Minerais d'Uranium
Société d'Electricité Mors
Etablissements Neyrpic
O.C.C.R. (Office Central de Chauffe Rationnelle)
Omnium Technique de l'Habitation

Compagnie des Produits Chimiques et Electrométallurgiques
Péchiney
Chantiers de l'Atlantique Penhoët-Loire
Société Anonyme des Automobiles Peugeot
Société des Aciéries de Pompey
Société des Fonderies de Pont-à-Mousson
Potasse et Engrais Chimiques
Société Rateau
Manufacture des Glaces et Produits Chimiques de Saint-Gobain,
Chauny et Cirey
S.A.M.M. (Société d'Applications des Machines Motrices)
S.A.T.N.U.C. (Société pour les Applications Techniques dans le
domaine de l'Energie Nucléaire)
Compagnie de Raffinage Shell-Berre
S.N.E.C.M.A. (Société Nationale d'Etude et de Construction de
Moteurs d'Aviation)
Rhône-Poulenc
Ateliers & Chantiers de Bretagne
Appareils Gachot
G. Massiot et Cie
M.E.C.I. (Matériel Electrique de Contrôle et Industriel)
Manufacture Française de Vide-Touries Automatiques
La Métallurgie Française des Poudres
S.O.G.E.I. (Société Générale d'Exploitations Industrielles)
S.O.R.V.A.L. (Sociedad de Representações Vasconcelos, Lda.)
S.R.T.I. (Société de Recherches Techniques et Industrielles)
Société Stein et Roubaix
S.T.R. (Société de Produits Chimiques des Terres Rares)
Compagnie de Construction Mécanique, procédés Sulzer
Le Matériel Electrique, S.-W.
Compagnie Générale de Télégraphie Sans Fil
Compagnie Française Thomson-Houston
Tréfileries et Laminoirs du Havre
Etablissements Tunzini
U.C.L.A.F. (Usines Chimiques des Laboratoires Français)
Société d'Electrochimie, d'Electrométallurgie et des Aciéries
Electriques d'Ugine
Union Européenne Industrielle et Financière
Société Centrale de l'Uranium et des Minerais et Métaux Radio-
actifs (S.C.U.M.R.A.)
Société Vallourec
Société Française des Techniques Lummus
S.O.C.E.T.E.C. (Société d'Etudes Techniques)
Techniques Nucléaires
Société Lyonnaise de Plomberie Industrielle

Saunier Duval
Gamma-Industrie
Nucléa
S.O.D.E.R.N. (Société Anonyme d'Etudes et Réalisations
Nucléaires)

ITALIE

En Italie, les sociétés participantes aux activités du C.I.S.E. (Centro Informazioni Studi Esperienze — Centre d'informations, d'études et d'expériences) sont les suivantes :

Società Edison
Società Cogne
Società Fiat
Società Montecatini
Società Adriatica di Elettricità
Società Pirelli
Acciaierie e Ferriere Lombarde Falck
Società Terni
Azienda Elettrica Municipale di Milano
Ente Nazionale Idrocarburi
Istituto per la Ricostruzione Industriale.

PAYS-BAS

Le « Reactor Centrum Nederland — R.C.N. » comprend, parmi ses affiliés, les entreprises suivantes :

N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken
N.V. De Bataafsche Petroleum Maatschappij
Staatsmijnen in Limburg
Kon. Machinefabriek Gebr. Stork en Co. N.V.
Werkspoor N.V.
N.V. Koninklijke Maatschappij « De Schelde »
Rotterdamsche Droogdok Maatschappij N.V.
Dok- en Werf Mij. Wilton Fijenoord N.V.
Nederlandse Dok- en Scheepsbouw Maatschappij
N.V. Dijkers en Co.
N.V. Bronswerk
Kon. Ned. Stoomboot Mij. N.V.
N.V. Verenigde Ned. Scheepvaart Mij.
N.V. Holland-Amerika Lijn
Kon. Rotterdamsche Lloyd N.V.
Van Nievelt Goudriaan en Co. 's Stoomvaart Mij. N.V.
Phs. van Ommeren N.V.

N.V. Stoomvaart Mij. « Nederland »
Kon. Java-China-Pakketvaart Lijnen N.V.
Wm. H. Muller en Co. N.V.
N.V. Kon. Pakketvaart Mij.
Kon. Zwavelzuurfabrieken v/h Ketjen N.V.
N.V. Kon. Ned. Zoutindustrie
N.V. Chemische Fabriek « Naarden »
Kon. Ned. Gist- en Spiritusfabriek N.V.
W. A. Scholten's Chemische Fabriek N.V.
Albatros Superfosfaatfabriek N.V.
N.V. Electro Zuur- en Waterstoffabriek
N.V. Electrotechn. Ind. v/h Willem Smit en Co.
N.V. Fabriek van Electr. App. v/h F. Hazemeyer en Co.
N.V. Electrotechn. Mechanische Industrie
Willem Smit en Co's Transformatorenfabriek N.V.
N.V. Ned. Instr. en Electr. App. Fabriek « Nieaf »
Heemaf N.V.
N.V. Nederlandsche Kabelfabriek
N.V. Coq
N.V. Hollandse Draad- en Kabelfabriek
N.V. Electromotorenfabriek « Dordt »
Van der Heem N.V.
Kon. Demka Staalabrieken N.V.
N.V. Nederlandsche Kabelfabriek
Kon. Ned. Hoogovens en Staalabrieken N.V.
N.V. Kunstzijdespinnerij NIJMA
Algemene Kunstzijde Unie N.V.
Unilever N.V.
Koninklijke Luchtvaart Maatschappij N.V.
Nederlandsche Spoorwegen
Ir. Escher's Constructie werkplaatsen en Machinefabriek N.V.
N.V. Billiton Mij.

CHAPITRE 2

LA PRODUCTION D'URANIUM ET DE THORIUM

2.1. INTRODUCTION

Ce chapitre donne, pour les six pays de l'Euratom, un aperçu des ressources en minerais d'uranium et de thorium, ainsi que la description des moyens industriels mis en œuvre pour exploiter ces minerais, les concentrer et en extraire de l'uranium et du thorium de grande pureté, sous forme métallique ou sous forme de composé.

La fabrication finale des éléments de combustible (façonnage et gainage) fait l'objet du chapitre suivant.

L'uranium et le thorium sont les deux matières premières de base de l'énergie nucléaire.

Le plus important est sans conteste l'uranium, qui contient le seul élément fissile existant dans la nature en quantité appréciable, à savoir l'uranium 235. La composition de l'uranium naturel est la suivante : 99,3 % d'uranium 238
0,7 % d'uranium 235 (1).

L'uranium 238 est fertile, c'est-à-dire que sous un bombardement de neutrons semblable à celui qui règne au sein du réacteur, il peut se transformer en plutonium 239 qui est lui-même un élément fissile.

Quant au thorium 232, c'est un élément fertile comme l'uranium 238 et il est susceptible de se transformer par bombardement neutronique en un élément fissile, l'uranium 233.

L'essentiel des réalisations nucléaires est actuellement basé sur l'uranium. Cependant, plusieurs types de réacteurs à l'étude ou en construction sont fondés sur le cycle thorium-uranium 233. Si ces réalisations rencontrent le succès, le thorium jouera un rôle appréciable dans les ressources énergétiques mondiales.

(1) Les notions scientifiques et techniques évoquées dans ce rapport sont reprises dans l'annexe 2, intitulée « Notions de base ».

2.2. Les ressources en minerais — La prospection

Avant la dernière guerre, la production de minerai d'uranium était très faible ; il s'agissait essentiellement d'extraire le radium, radio-élément naturel de grande valeur, et l'uranium lui-même n'était utilisé qu'en très faibles quantités, par exemple comme colorant dans les verres ou céramiques. Les régions productrices étaient alors : le Congo belge (Shinkolobwe), le Canada (Grand Lac de l'Ours) et, à moindre titre, la Bohême (Joachimstal), le Portugal et le Turkestan.

L'avènement de l'énergie nucléaire, son utilisation d'abord à des fins militaires, puis le développement des usages pacifiques, provoquèrent un essor considérable des exploitations d'uranium existantes et un vaste effort de prospection minière dans de multiples pays. Cet effort fut naturellement plus rapidement engagé dans les pays qui avaient pris la tête de la course à l'énergie nucléaire : Etats-Unis, U.R.S.S., Grande-Bretagne et Canada.

Il fut très vite évident que les gisements d'uranium présentent une très grande diversité et qu'ils peuvent être trouvés aussi bien dans les formations sédimentaires de tous âges, dans les gîtes pegmatitiques, que dans les massifs cristallins ou cristallophylliens. Le domaine de la prospection se trouvait ainsi étendu de façon considérable.

En 1945, aucune quantité notable d'uranium n'était connue dans le territoire métropolitain des six pays ni même dans leurs territoires d'outre-mer (à l'exception du Congo belge déjà cité). C'est à cette date que la prospection systématique fut entreprise en France, sous l'impulsion du Commissariat à l'Energie atomique (C.E.A.), Direction des recherches et exploitations minières (D.R.E.M.). Le succès de cette prospection amena les autres pays européens à se lancer à leur tour dans la recherche du minerai nucléaire.

La situation dans divers pays d'Euratom

2.2.1. Belgique

Les riches gisements d'uranium du Congo belge furent parmi les premiers à faire l'objet d'une exploitation intensive. La production était et est encore essentiellement destinée aux Etats-Unis et au Royaume-Uni à la suite d'accords passés avec ces pays.

Les réserves connues (réserves prouvées ou réserves certaines) représentent environ 6.000 tonnes d'uranium contenu. Bien qu'il soit impossible de donner actuellement une évaluation des réserves probables, tout laisse à penser que celles-ci sont très importantes. Outre, les prospections régulières de la mine de Shinkolobwe nécessitées par l'exploitation minière, il a été procédé à des prospections d'ensemble des régions de Shinkolobwe et avoisinantes.

Actuellement, quatre géologues et environ soixante agents sont affectés à ces travaux, dont le budget annuel est de 0,12 million d'unités UEP.

2.2.2. République fédérale d'Allemagne

La prospection de l'uranium n'a pu commencer en Allemagne que dans le courant de l'année 1955 ; prospection et exploitation n'en sont donc qu'à un stade préliminaire de développement.

Les gisements actuellement découverts sont les suivants :

| | <i>Uranium contenu</i> | |
|--|------------------------|---------------|
| | <i>tonnage certain</i> | <i>teneur</i> |
| | t | ‰ |
| filon de spath fluor contenant de l'uranite (Pechblende) Wölsendorf (Bavière) | 25 | 2 - 4 |
| porphyre Ellweiler (Rhénanie-Palatinat) | 100 | 1 - 1,2 |
| granit à urane micacé Weissenstadt (Bavière) | 50 | 0,8 |
| Flossenbürg (Bavière) | 25 | 0,5 |
| uranium adsorbé par du lignite Wackersdorf (Bavière) | 50 | 0,4 |

Les réserves prouvées ne représentent donc que 250 tonnes d'uranium. Mais les prospections en cours laissent supposer l'existence d'autres gisements d'uranium en Basse-Saxe, Sarre, Rhénanie-Palatinat, Haut-Palatinat et Forêt-Noire.

Initialement, les prospections furent menées exclusivement par des entreprises privées. Depuis 1956 néanmoins, le Ministère fédéral de l'Energie atomique a accordé une aide importante à ces activités : cette aide a représenté en 1956 une somme totale de 0,6 million d'unités UEP mise à la disposition des instituts géologiques et des entreprises effectuant des prospections.

2.2.3. France et Union française

Des « missions volantes de prospection » furent mises en place dès 1946 dans toute l'Union française. Deux ans plus tard, dans le courant de 1948, des quantités massives de pechblende étaient découvertes pour la première fois sur le territoire métropolitain. Le premier puits d'extraction devait être inauguré en juillet 1950 à la Crouzille dans le Limousin.

Depuis, de nombreux autres puits d'extraction ont été ouverts à la production dans chacune des quatre divisions minières actuellement en activité : à Grury (Saône et Loire), à la Crouzille (Haute-Vienne), à Mortagne (Vendée) et dans le Forez à Saint-Priest-la-Prugne (Loire). Des indices ont été découverts en divers endroits dans les Pyrénées, en Bretagne et dans les Vosges notamment.

Au 1^{er} janvier 1958, des prospections étaient en cours dans les départements suivants : Pyrénées, Hérault, Alpes-Maritimes et Var.

Rappelons que les ressources métropolitaines en minerai d'uranium sont estimées à 50.000 ou 100.000 tonnes d'uranium contenu ; les réserves prouvées s'élèvent à environ 15.000 tonnes d'uranium. Les teneurs s'échelonnent entre un et quelques ‰ d'uranium contenu et sont comparables à celles des gisements mondiaux.

Des travaux de prospection de grande ampleur ont été entrepris dans l'Union française.

A Madagascar, où une mission du Commissariat à l'Energie atomique s'est installée (à Tananarive), d'importants gisements d'urano-thorianite ont été découverts et mis en exploitation dans le sud-est de l'île. Ces réserves connues sont estimées à 2.500 tonnes d'urano-thorianite contenant 10 à 20 % d'uranium et 60 à 70 % de thorium.

Le Groupement des Recherches en Afrique, installé à Alger, gérait au 1^{er} janvier 1958 les missions de prospection suivantes :

- Mission du Hoggar (Organisation commune des régions sahariennes) Tamanrasset ;
- Mission de Kayes (Sénégal — Soudan) ;
- Mission de l'Afrique Centrale (Gabon — Oubangui — Cameroun) à Brazzaville.

Les recherches faites au Gabon ont abouti à la découverte d'un gisement de minerai d'uranium dans la région de Franceville. Une société, filiale du C.E.A. et de diverses sociétés privées, est en cours de formation pour entreprendre l'exploitation de ce gisement.

En Guyane française, enfin, existe une mission de prospection des minerais radio-actifs, en syndicat avec le Bureau Minier Guyanais à Cayenne.

2.2.4. Italie

Bien que récemment engagée, la prospection des gisements d'uranium est déjà très active en Italie ; elle permet d'espérer que les réserves de minerai sont importantes. En janvier 1957, une estimation ⁽¹⁾ les chiffrait approximativement à 3 millions de tonnes de minerai à 2 ‰, soit 6.000 tonnes d'uranium métallique.

Une part essentielle des recherches est conduite par le C.N.R.N., par l'intermédiaire de sa division géominière. Celle-ci comporte actuellement quatre groupes de prospection ; trois opèrent dans le Nord de l'Italie, deux ayant leur siège à Cuneo, l'autre à Trente : la Division a aménagé un laboratoire pétrographique dans chacune de ces deux villes. Le quatrième groupe opère en Italie du Sud, en collaboration avec l'Institut de géologie appliquée de l'Université de Naples.

Les investissements prévus à ce titre pour l'année 1958 par le C.N.R.N. s'élèvent à 1,1 million d'unités UEP.

Des sociétés privées ont entrepris des recherches en diverses régions de l'Italie et plus particulièrement en Italie du Nord :

- l'une d'entre elles a installé son secteur principal d'activité à Bric Colmé et a équipé un petit laboratoire d'étude des minerais à Mondovi. Cette société envisage d'entreprendre une exploitation à brève échéance ;
- une autre s'est établie à Peveragno (Cuneo) au pied du Monte Besimareda, où elle procède à l'étude des gisements de la région, dans le but d'en assurer rapidement la mise en exploitation ;

(1) Rapport du « Groupe ad hoc sur l'approvisionnement » (Rapport Kramer) — Conférence intergouvernementale pour le Marché Commun et l'Euratom, Bruxelles, le 4 janvier 1958.

- une société, dont le siège est à Milan, a entrepris des recherches de grande envergure et projette la mise en exploitation de certains gîtes. L'ensemble des investissements prévus pour l'année 1958 par cette entreprise s'élève à 1,6 million d'unités UEP ;
- une société de Milan a commencé également des recherches dans la zone riche en gisements du Canale S. Bovo et les a étendues à toutes les chaînes de Lagorai (Trentino) ;
- d'autres entreprises effectuent des prospections près de Lurisia, au Val Maira et en Sardaigne.

2.2.5. Luxembourg et Pays-Bas

Le Luxembourg et les Pays-Bas semblent dépourvus de ressources en minerais d'uranium. Par contre, les Pays-Bas ont entrepris des prospections dans le Surinam (Guyane) et la Nouvelle-Guinée, sans que leurs recherches aient abouti jusqu'ici.

2.3. Les mines et les usines de concentration des minerais

Par suite de sa très faible teneur en uranium, il n'est pas économique de transporter le minerai d'uranium à l'état brut sur de longues distances. Généralement, le minerai subit donc une première transformation sur les lieux d'extraction, soit par voie physique, soit par voie chimique, jusqu'à une teneur telle que le concentré obtenu puisse être transporté dans des conditions plus économiques vers l'usine centrale d'élaboration de l'uranium métallique pur. Ce concentré consiste le plus souvent en uranate de soude contenant 30 à 60 % d'uranium.

La situation dans divers pays d'Euratom

2.3.1. Belgique

La capacité de production des mines du Congo belge représentée au 1^{er} janvier 1958, 300.000 tonnes par an de minerai à environ 3 % d'uranium contenu, soit 850 tonnes par an d'uranium pur. Les installations de concentration chimique sont situées auprès des mines de Shinkolobwe et peuvent traiter annuellement les 300.000 tonnes de minerai provenant des mines. Les investissements mis en œuvre pour la production et la concentration atteignent, au 1^{er} janvier 1958, 38 millions d'unités UEP.

D'après l'accord conclu entre les Etats-Unis et la Belgique, 75 % de cette production de minerais et de concentrés fait l'objet d'une option d'achat de la Combined Development Agency de 1958 à 1960.

Après cette période, les réserves encore disponibles représenteront environ 4.000 tonnes d'uranium métal, sauf nouvelle découverte.

Il n'existe pas, pour le moment, de projet particulier en ce qui concerne la production et la concentration de minerai. Il faut par ailleurs s'attendre, dans les prochaines années, à une diminution sensible de la productivité de la mine de Shinkolobwe due à la baisse de la teneur des minerais traités.

2.3.2. République fédérale d'Allemagne

La production des mines d'uranium allemandes va commencer prochainement. La construction d'usines de concentration de minerais est déjà prévue, à l'initiative de diverses sociétés privées ; deux projets sont en cours de réalisation :

- une installation expérimentale, près d'Ellweiler, (Rhénanie-Palatinat) pour le traitement d'environ 50 tonnes de minerai d'uranium par jour ;
- une installation pilote pour la production de concentrés et d'oxyde d'uranium, à partir du spathfluor de la région de Wölsendorf (Bavière).

D'autre part, une importante société de Francfort-sur-le-Main poursuit des recherches en particulier dans le domaine de la transformation des minerais d'uranium et de thorium en concentrés et ultérieurement en composés nucléairement purs. Ses filiales mettent au point, dans le même domaine, des procédés de production industrielle et projettent la fabrication d'installations pour le traitement des minerais d'uranium ou de thorium.

Dans l'ensemble, le Ministère fédéral de l'Energie atomique a prévu pour l'année 1958 — comme pour l'année 1957 — une dépense de 0,85 million d'unités UEP pour promouvoir la prospection et l'exploitation des gisements nationaux de minerais d'uranium, ainsi que pour la concentration de ces derniers.

2.3.3. France

En France, on trouve une usine de concentration des minerais auprès de chacune des divisions minières, c'est-à-dire :

- *Geugnon* (Saône-et-Loire) : cette usine appartient au C.E.A. et fait partie de la division de Grury ; elle produit de l'uranate de soude à partir de minerais à teneurs supérieures à 5 ‰ en uranium.
- *Ecarpière 1 à Getigne* (Loire-Inférieure) : cette usine appartient à une société privée, filiale du C.E.A. et d'une des grandes entreprises chimiques françaises ; elle produit de l'uranate de magnésie à partir de minerais à teneur voisine de 1 ‰ en uranium.
- *Bessines 1* (Haute-Vienne) : cette usine appartient également à une société privée et fonctionne depuis mai 1958 ⁽¹⁾ ; elle produit de l'uranate de magnésie à partir de minerais à teneur voisine de 1,5 ‰ en uranium.
- Dans le *Forez*, on installe un atelier de triage électronique des minerais et une laverie de préconcentration physique des minerais à basse teneur. L'atelier et la laverie entreront en fonctionnement dans le courant de l'année 1958.

Au 1^{er} janvier 1958, deux de ces usines seulement étaient en fonctionnement et traitaient des minerais provenant des divers sièges miniers ; la capacité moyenne actuelle de traitement de celle d'Ecarpière 1 est de 150.000 tonnes par an de minerais bruts ; celle de Geugnon est de 30.000 tonnes par an de minerais bruts, soit un total de 180.000 tonnes par an de minerais bruts.

Compte tenu des teneurs des minerais traités et des rendements, la capacité totale de production est de 350 tonnes par an d'uranium à la sortie des usines sous forme d'uranates.

Dans l'Union française, la principale production actuelle est celle de l'urano-thorianite de Madagascar, qui fait de la France l'un des premiers producteurs mondiaux de thorium.

Une Division du C.E.A. est installée à Ambatomika (région de Fort-Dauphin) pour superviser la production du minerai et gérer la station d'achat de l'urano-thorianite produite par des exploitants privés.

Signalons aussi la formation d'une nouvelle société, filiale du C.E.A., dont les installations produiront de la monazite thorifère, du zircon et de l'ilménite. La monazite sera traitée dans la métropole par des entreprises qui rétrocéderont le thorium au C.E.A. sur sa demande.

(1) Ce rapport s'arrête à la situation telle qu'elle se présentait à la date du 1^{er} janvier 1958. Des renseignements ultérieurs ont cependant été insérés dans la mesure du possible.

Madagascar fournit une production totale annuelle de près de 500 tonnes d'urano-thorianite, contenant 280 tonnes de thorium. La production doit rester à ce niveau jusqu'à l'épuisement, vers 1963, des ressources actuellement connues.

Ces 500 tonnes d'urano-thorianite fournissent 55 tonnes d'uranium environ, qui viennent s'ajouter à la production métropolitaine ; celle-ci a représenté au total 350 tonnes d'uranium en 1957.

Les moyens mis en œuvre

Il n'a pas été possible de distinguer les moyens mis en œuvre pour la seule prospection et de les faire apparaître séparément au chapitre précédent ; ils ont donc été repris ici avec les moyens mis en œuvre pour l'équipement des sièges miniers et des usines de concentration.

Pour la *métropole*, à la date du 1/1/1958, plus de 35 millions d'unités UEP ont été dépensés pour la prospection minière, la reconnaissance des gisements et l'équipement des sièges miniers et des usines. Ces investissements n'ont évidemment pas eu pour seul but d'atteindre la capacité actuelle de production. Ils ont permis aussi de préparer le développement ultérieur de cette capacité.

Le personnel affecté à la prospection, à l'exploitation et à la marche des usines de traitement représente 2.750 personnes dont 250 ingénieurs et prospecteurs.

Pour *l'Union française*, les moyens mis en œuvre sont également très importants.

Le C.E.A. a investi près de 3,5 millions d'unités UEP dans ses exploitations d'urano-thorianite de Madagascar.

Pour préparer l'exploitation du gisement de Franceville au Gabon et pour la prospection générale en Afrique (Sahara — Afrique-Occidentale Française — Afrique-Equatoriale Française, etc.) les investissements s'élèvent à plus de 11,5 millions d'unités UEP.

Quant au personnel actuellement employé, il compte 1.375 personnes, dont 70 ingénieurs et prospecteurs.

Les possibilités de développement

Pour la *métropole*, on prévoit, d'ici janvier 1959, la mise en service de deux nouvelles usines.

La capacité moyenne de traitement de celle de Bessines 1 est de 200.000 tonnes par an de minerais bruts ; celle d'Ecarpière 2 sera de 150.000 tonnes par an de minerais bruts, soit un total de 350.000 tonnes par an de minerais bruts.

La capacité totale de traitement sera ainsi portée à 530.000 tonnes par an, correspondant à une production de 800 tonnes par an d'uranium sous forme d'uranates.

Les 26 millions d'unités UEP d'investissements nécessaires à la réalisation de cet objectif sont déjà engagés.

Pour *janvier 1961*, on estime que deux nouvelles usines seront mises en route :

La capacité moyenne de traitement de Bessines 2 sera de 400.000 tonnes par an de minerais bruts, celle de Forez sera de 250.000 tonnes par an de minerais bruts, soit au total 650.000 tonnes par an de minerais bruts.

La capacité totale de traitement atteindra alors 1.180.000 tonnes par an à l'entrée des usines, correspondant, compte tenu de la teneur moyenne des minerais traités, à une production de 1.500 tonnes par an d'uranium à la sortie des usines, sous forme de concentrés chimiques.

Cette nouvelle augmentation de capacité exigerait des investissements de l'ordre de 24 millions d'unités UEP environ.

Le personnel en service serait en 1959 de 3.100 personnes, dont 260 ingénieurs et prospecteurs ; en 1961, ces nombres passeraient respectivement à 3.600 et à 270.

Il ne faudrait pas passer sous silence le rôle joué par les prospecteurs privés de minerai : peu important jusqu'ici, ce rôle est appelé à s'accroître à l'avenir.

A l'instigation du Commissariat, en effet, des sociétés privées et des particuliers en assez grand nombre ont entrepris, depuis 1954, la prospection de l'uranium sur le territoire métropolitain. Un certain nombre de recherches préliminaires ont abouti à la découverte d'indices justifiant la demande de titres miniers (permis de recherches) dont quelques-uns ont déjà été accordés, les autres étant en cours d'instruction.

A la date du 1^{er} janvier 1958, ces travaux de recherche ont fourni, de côté et d'autre, de petites quantités de minerais superficiels que le Commissariat a achetées et dirigées sur l'alimentation de ses usines. Le total de cette production se chiffre à 6.000 tonnes environ de minerai à teneurs variées.

On prévoit, pour l'année 1958, un certain développement de ces productions : 50.000 tonnes environ de minerais à divers teneurs seront probablement achetées par le Commissariat ; mais, à l'heure actuelle, il est encore impossible de fixer un programme précis de production et de développement pour cette industrie privée. Il en est de même pour les investissements.

De plus, il n'existe aucun projet d'usine de traitement dû à l'initiative privée ; par conséquent, les productions d'uranates ou concentrés divers qui pourront être obtenues, dans les prochaines années, à partir des minerais provenant des mines privées, sont intégrées dans les programmes, mentionnés ci-dessus, des usines gérées directement par le Commissariat et ses filiales. On estime que, jusqu'au 1^{er} janvier 1958, l'industrie privée a dépensé environ 2,4 millions d'unités UEP en prospection et travaux de recherche dans la métropole.

2.3.4. Italie

Nous avons vu que plusieurs sociétés envisageaient, à brève échéance, la mise en route de certaines exploitations de minerai d'uranium en divers endroits de l'Italie. La production actuelle est encore très peu importante.

Néanmoins, des études sur l'enrichissement des minerais d'uranium et de thorium sont en cours depuis plus d'un an, pour le compte du C.N.R.N., auprès du « Centre de préparation des minerais » de Rome.

Diverses sociétés ont étudié également la concentration des minerais et la fabrication de l'uranate d'ammonium ; une installation-pilote fonctionne à Spinetta Marengo (Alexandrie) ; une autre usine-pilote de concentration est en cours de construction à S. Donato Milanese (Milan).

2.4. La préparation du combustible nucléaire

Nous avons vu que les minerais d'uranium et de thorium, de teneur généralement assez faible, sont le plus souvent concentrés dans des usines situées près des mines, de façon à éviter les transports de masse. C'est donc un concentré pouvant titrer 30 à 60 % d'uranium (uranate ou urano-thorianite) qui est acheminé vers les usines d'élaboration du combustible nucléaire, où s'effectuent les diverses opérations physiques et surtout chimiques qui permettront, d'abord, d'éliminer les impuretés des

uranates jusqu'à une teneur inférieure à des fractions de millièmes, puis, d'obtenir le métal ou l'oxyde nucléairement pur.

Seules la Belgique, l'Allemagne, la France et l'Italie se sont engagées dans la préparation du combustible nucléaire.

La situation dans divers pays d'Euratom

2.4.1. Belgique

La fabrication des oxydes purs ou de l'uranium métal pur s'effectue à l'usine d'Hoboken en Belgique. La capacité annuelle de production est de 425 tonnes d'oxyde UO_3 et de 50 tonnes d'uranium métal, l'usine d'élaboration du métal étant alimentée par l'usine à oxyde.

Les investissements totaux relatifs à cette usine représentent environ 1,1 million d'unités UEP. Le personnel est de 8 ingénieurs et 67 exécutants.

2.4.2. République fédérale d'Allemagne

En Allemagne, la préparation de l'uranium nucléairement pur a surtout été étudiée par une importante société de Francfort-sur-Main, bénéficiaire d'une expérience de plus de quinze années pendant lesquelles elle a préparé environ 15 tonnes d'uranium métal raffiné. Elle a mis en service depuis peu une installation expérimentale qui prépare, à partir de concentrés, quelques tonnes d'uranium métallique pur pour le réacteur de recherche de Karlsruhe. Cette commande ne mobilise cependant pas la pleine capacité de l'installation.

Cette même société a mis au point des procédés de fabrication industrielle d'oxyde d'uranium (UO_2) à hautes qualités d'agglomération ; elle a entrepris également des recherches pour la production industrielle du monocarbure d'uranium (UC).

Après avoir mis au point divers procédés de production de thorium métal ductile et nucléairement pur, elle construit actuellement une installation qui pourra, entre autres, préparer environ 1.000 Kg de thorium métal pour le réacteur de recherche de Karlsruhe.

Enfin, en collaboration avec une autre entreprise privée, cette même firme a élaboré le projet de construction d'une usine qui entrera vraisemblablement en activité dès le début de 1960

et assurera la production annuelle de quelque 100 tonnes d'uranium nucléairement pur (métal, oxyde et carbure) et de quelque 10 tonnes de thorium nucléairement pur. Une partie des concentrés ainsi traités sera importée de l'étranger.

Dans le cadre d'un programme de production d'électricité nucléaire de 500 MWe pour la période 1958-1965, l'ensemble des dépenses afférentes aux prospections, à l'équipement des mines, aux installations de concentration des minerais et à la construction d'une usine d'élaboration d'uranium, représente environ 24,4 millions d'unités UEP. Ces moyens financiers devront être fournis conjointement par l'Etat et par l'industrie privée.

2.4.3. France

En France, les concentrés produits près des mines sont expédiés sur l'usine du Bouchet située en Seine-et-Oise, près de Paris.

L'usine a été installée en décembre 1946 dans une enclave de la Poudrerie du Bouchet, près de Corbeil, à une cinquantaine de kilomètres de Paris, pour le compte du C.E.A. avec le concours de diverses grandes sociétés chimiques. Moins de deux ans plus tard, en janvier 1948, la production de l'oxyde utilisé pour la pile de Fontenay commençait, en attendant que fût obtenue une production régulière de lingots de métal, ce qui intervint dans le courant de 1950.

Le traitement chimique permettant d'extraire l'uranium des minerais — sous forme d'uranates de sodium et d'ammonium — a été effectué au Bouchet jusqu'à la fin de 1956. Mais le développement des installations de concentration chimique, près des gisements de minerais pauvres, a permis progressivement à l'usine de recevoir de l'uranium sous forme d'uranate. L'activité actuelle de l'usine du Bouchet consiste donc surtout dans la purification et l'élaboration de l'uranium métallique. Toutefois, l'usine peut toujours traiter des minerais, soit pour accroître éventuellement son ravitaillement en uranate, soit dans le but d'assurer la mise au point d'un nouveau procédé.

La purification proprement dite s'opère par une extraction sélective dans des solvants organiques, puis l'uranium à son plus haut degré de pureté subit une suite de transformations, la dernière étape conduisant à l'élaboration du métal (violente réaction en présence de calcium de pureté nucléaire dans des creusets en fluorure de calcium fritté).

Une nouvelle usine de traitement a été construite au Bouchet et est entrée en fonctionnement au début de 1957. Les minerais d'urano-thorianite, très riches en thorium et provenant de Madagascar, y sont traités depuis cette date, ce qui permet d'obtenir des nitrates de thorium nucléairement purs. La transformation du nitrate en métal pur, actuellement à l'étude, passera prochainement au stade de la fabrication semi-industrielle (usine du Petit Quevilly).

L'usine du Bouchet assure donc aujourd'hui une production industrielle de combustible nucléaire qui suffit à l'alimentation des réacteurs fonctionnant, avec de l'uranium naturel, à Fontenay, Saclay et Marcoule. Un plan d'agrandissement et de modernisation de l'usine du Bouchet a été prévu en attendant que d'autres usines de raffinage d'uranium soient mises en exploitation.

La capacité actuelle de production de l'usine du Bouchet est de 500 tonnes par an d'uranium métal et de 300 tonnes par an de sels de thorium nucléairement purs. Les investissements totaux s'élèvent à 6,4 millions d'unités UEP.

Le personnel de l'usine du Bouchet est de 415 personnes.

Une nouvelle usine d'élaboration de combustibles nucléaires est actuellement en construction à Malvézy près de Narbonne. Sa production devrait atteindre en première étape 1.000 tonnes d'uranium métal, dont 700 tonnes provenant directement des minerais et 300 tonnes récupérées à partir des barreaux d'uranium irradiés à Marcoule. En deuxième étape, la capacité de production de cette usine sera portée à 2.000 tonnes.

Rappelons enfin l'échelonnement approximatif de la production d'uranium prévu actuellement par les autorités françaises :

500 tonnes en 1958
1.000 tonnes en 1961
2.500 tonnes en 1970
3.000 tonnes en 1975

2.4.4. Italie

Une certaine quantité d'uranium métallique de pureté nucléaire a été fabriquée au C.I.S.E. de Milan, dans une installation-pilote financée par le C.N.R.N.

Le C.N.R.N. dispose actuellement d'une installation qui fonctionne en ce moment à Milan et qui a coûté 29.000 unités

UEP. Cette installation doit être transférée au Centre de recherches nucléaires appliquées d'Ispra (Varèse) où elle produira 40 Kg d'uranium métallique par jour.

2.5. Remarques finales

La prospection des minerais d'uranium a démarré trop récemment dans les six pays pour que l'on puisse tracer un tableau d'ensemble précis des ressources et des possibilités d'avenir dans ces pays. Seules les ressources françaises et celles du Congo belge, peuvent faire l'objet d'estimations valables, car la prospection et l'exploitation y ont été mises en route avec plus de dix ans d'avance sur les réalisations dans d'autres pays membres.

Le présent rapport se trouve donc limité pratiquement à l'évaluation des ressources françaises et de celles du Congo belge qui pourront être mises à la disposition de l'Agence d'Approvisionnement d'Euratom. En raison de l'accord existant entre les Etats-Unis et la Belgique, c'est seulement à partir de 1960 que l'Agence pourra disposer de plus du quart de la production congolaise de minerais et de concentrés.

En ce qui concerne le thorium, la France, grâce à la production en provenance de Madagascar, est actuellement l'un des premiers producteurs mondiaux. Cette production de thorium est certainement suffisante pour faire face, dans les années à venir, aux besoins européens et pour permettre en outre une certaine exportation.

Nous avons vu que les réserves probables de minerai d'uranium pouvaient représenter en France 50.000 à 100.000 tonnes d'uranium contenu. On mesurera l'importance de ce chiffre en le comparant aux réserves probables des Etats-Unis ⁽¹⁾ : 75 millions de tonnes de minerai, soit environ 170.000 tonnes

(1) *Note* : Les chiffres repris dans ce rapport concernant les Etats-Unis et le Royaume-Uni ont été publiés dans les documents suivants :

- Forum Memo — mars 1958
- A growth survey of the Atomic Industry — 1958-1968
- Atomic Energy Facts prepared under Contract N° At (30-1) 1782 for the U.S.A.E.C.
- United Kingdom Atomic Energy Authority Third Annual Report 1956-1957
- A programme of Nuclear Power — February 1955
Her Majesty Stationery Office
- Capital Investment in the Coal, Gas and Electricity Industries. April 1958 — Her Majesty's Stationery Office.

d'uranium. Pour le Canada, les réserves sont probablement plus importantes et peuvent atteindre le million de tonnes d'uranium contenu.

Il est certain que les prospections sont loin d'être achevées aux Etats-Unis et qu'elles permettront, dans l'avenir, de découvrir de nouvelles ressources qui viendront accroître le volume des réserves citées ci-dessus. Mais il en est de même pour les six pays de l'Europe occidentale, et l'on peut espérer que de nouvelles découvertes, notamment en Allemagne et en Italie, viendront s'ajouter aux gisements connus.

Il est déjà permis d'affirmer que les ressources en uranium des six pays sont importantes à l'échelle mondiale. Si la production actuelle en uranium métallique disponible pour les six pays est inférieure à 700 tonnes par an, alors qu'elle est de l'ordre de 8.000 tonnes aux Etats-Unis et qu'elle atteindra 10.000 à 15.000 tonnes au Canada vers 1960, on peut envisager — surtout en France — un accroissement important de cette production, sans être limité par la perspective d'un épuisement trop rapide des ressources. L'apport belge après 1960 pourra également s'accroître notablement.

Pour essayer de situer les ressources en uranium par rapport aux besoins futurs, nous pouvons nous référer au rapport « Un objectif pour Euratom », qui chiffrait à 24.000 tonnes la quantité d'uranium naturel nécessaire pour la mise en route et le fonctionnement d'un ensemble de réacteurs du type britannique, représentant une puissance électrique de 7.500 MWe en 1967. La consommation annuelle d'uranium en 1967 était estimée à 2.500 tonnes d'uranium pour la seule alimentation des centrales existantes. Le même rapport prévoyait que la production d'uranium en France et en Belgique monterait de 1.200 à 2.500 tonnes par an entre 1958 et 1967 et que cette production cumulée ne dépasserait pas 15.000 tonnes à cette dernière date.

La comparaison de ces diverses données chiffrées laisse entrevoir, malgré l'importance des gisements d'uranium dont disposent les nations européennes, la possibilité d'un déficit assez rapide des ressources autochtones, surtout si, sous l'impulsion d'Euratom, les six pays étaient amenés à accroître de façon notable leurs prévisions actuelles de production d'électricité nucléaire.

Diverses circonstances cependant peuvent nous amener à corriger cette première constatation défavorable. Tout d'abord, l'estimation des besoins en uranium naturel que nous avons

prise pour référence ne tient pas compte de la possibilité de réutiliser le plutonium produit dans les réacteurs ni de la récupération de l'uranium appauvri dans les cartouches irradiées. Elle est, en outre, basée sur un programme ne comportant que des réacteurs à uranium naturel ; or, nous savons dès aujourd'hui qu'un certain nombre de centrales seront équipées de réacteurs à uranium enrichi nécessitant une quantité moins importante de combustible nucléaire. Enfin, si les programmes de production minière, en France notamment, ont été établis jusqu'ici de façon à satisfaire aux besoins des programmes nationaux d'installation de centrales nucléaires, la création d'Euratom et l'accélération de l'équipement nucléaire qui devrait en résulter, devraient donner un nouvel élan à la prospection et à la production minière dans les divers pays membres.

On peut donc espérer que les résultats définitifs en matière de production d'uranium dépasseront en fait les prévisions actuelles.

Si l'on en juge d'ailleurs par la crise qui se dessine aux Etats-Unis, où l'on craint une certaine surproduction de minerai d'uranium, il paraîtrait assez peu raisonnable de redouter une pénurie éventuelle dans ce domaine, et l'approvisionnement en combustibles nucléaires ne devrait pas poser de problème grave pour les six pays.

Précisons, enfin, que le présent rapport n'a pas pour objectif de définir un programme de production de combustibles nucléaires. Il était essentiel néanmoins de faire apparaître que, malgré l'importance des ressources en minerais d'uranium dont disposent les six pays, tout programme de développement de l'équipement nucléaire devra comporter une étude approfondie de l'approvisionnement en combustibles nucléaires, que ceux-ci proviennent d'une production accrue des minerais autochtones ou d'importations.

Dans les conditions actuelles, on peut donc penser que, quand elle commencera à fonctionner, l'Agence d'Approvisionnement d'Euratom n'aura probablement pas à prendre de position spéculative ni à constituer des stocks importants d'uranium.

CHAPITRE 3

LE CYCLE DE COMBUSTIBLE

3.1. Introduction

Le chapitre précédent fait le point de la situation actuelle des activités des six pays en matière de production d'uranium métal et décrit l'ensemble des opérations, depuis les recherches et l'exploitation minière jusqu'à la préparation du combustible nucléaire. Le présent chapitre sera consacré au cycle du combustible nucléaire, depuis sa mise en œuvre jusqu'à son retraitement après irradiation, et au rejet des effluents inutilisables.

Suivant les types de réacteurs, on utilise soit de l'uranium à sa concentration naturelle, soit de l'uranium enrichi en uranium 235. La première partie sera donc consacrée aux activités concernant la séparation de ces isotopes en vue de l'enrichissement ; la deuxième à la fabrication des éléments de combustible et à la mise en œuvre des matières nucléaires ; la troisième au retraitement des combustibles irradiés, pour récupérer les matières fissiles et fertiles non consommées et celles produites au cours de l'irradiation dans le réacteur, ainsi que pour éliminer les produits de fission, nuisibles à la réaction en chaîne et en même temps particulièrement radio-actifs. Enfin, un court paragraphe sera relatif au traitement et au rejet des effluents.

3.2. La séparation isotopique de l'uranium 235

3.2.1. La situation d'ensemble

Il peut être intéressant, pour certaines applications de l'énergie nucléaire, de séparer les deux isotopes de l'uranium ou tout au moins d'augmenter la proportion d'uranium 235.

La séparation de ces deux isotopes peut être obtenue par différents procédés ; le plus utilisé aux Etats-Unis consiste à faire diffuser de l'hexafluorure d'uranium à l'état gazeux à travers des membranes poreuses. D'autres procédés ont fait

l'objet de recherches expérimentales plus ou moins approfondies (séparation électromagnétique, ultracentrifugation, séparation cinétique par tuyères). Tous ces procédés sont extrêmement onéreux et on ne peut espérer en réduire les prix de revient qu'en traitant des quantités considérables. Aussi l'opportunité de réaliser une usine de séparation isotopique de l'uranium, qui alimenterait les pays de l'O.E.C.E. ou d'Euratom, est-elle encore controversée.

Au demeurant, dans la plupart des pays d'Euratom (Belgique, Allemagne, Italie, Pays-Bas) cette question n'a généralement pas dépassé le stade de la recherche. En France, une chaîne expérimentale a été mise en marche à Saclay.

3.2.2. La situation dans divers pays d'Euratom

Belgique

La Belgique suit de très près les négociations se rapportant à ce projet, car le Congo belge dispose de très importantes réserves hydrauliques qui permettraient de produire l'électricité à bas prix de revient indispensable pour l'exploitation économique d'une usine de séparation isotopique.

République fédérale d'Allemagne

Une firme allemande a mis au point, à l'échelle du laboratoire, un procédé d'enrichissement par tuyères, et a commencé la construction d'une installation industrielle expérimentale. En outre, elle a construit, en association avec une autre société, une machine ultracentrifugeuse.

France

Le C.E.A. a poursuivi des recherches de laboratoire et des mises au point semi-industrielles en vue de la production d'uranium 235.

Une chaîne industrielle expérimentale a été mise en marche à Saclay. Cette chaîne est limitée au procédé de séparation proprement dit par diffusion d'hexafluorure, à l'exclusion de toutes les installations annexes. Celles-ci sont nécessaires au fonctionnement d'une grande usine, mais elles font appel à des procédés plus classiques (fabrication et distillation de l'hexafluorure d'uranium par exemple) et sont étudiées séparément.

Les matériaux et appareils nécessaires à cette chaîne sont fabriqués en grande partie par des firmes françaises. La construction et le fonctionnement ont été confiés à une société française. La capacité actuelle de production d'hexafluorure d'uranium est de 70 tonnes par an.

Signalons, en outre, qu'une société a mis au point, parmi d'autres réalisations, un prototype de séparateurs électromagnétiques (spectrographe de masse).

Italie

En ce qui concerne la production d'hexafluorure d'uranium, la situation n'a pas dépassé le stade de l'étude. Cependant, en prévision de la construction en Europe d'une installation de séparation isotopique de l'uranium, le C.N.R.N. a confié au C.I.S.E. l'application d'un programme comprenant les trois points suivants :

- a) étude des membranes séparatrices en matière polymérisée ;
- b) réalisation d'une installation de production d'hexafluorure d'uranium ;
- c) projet et expérimentation d'une cascade séparatrice.

En exécution de ce programme, on a construit une petite installation de production d'hexafluorure d'uranium et on a étudié quelques types de membranes poreuses de teflon, zinc, alumine, fluorite.

Pays-Bas

Pour la fourniture des matières fissiles, les Pays-Bas dépendent de l'étranger. Cependant, on peut noter une activité de recherche dans les problèmes de l'enrichissement. On envisage de construire une usine d'essai pour l'enrichissement par la méthode ultracentrifuge.

3.3. Fabrication des éléments de combustible

3.3.1. La situation d'ensemble

Un élément de combustible pour réacteur nucléaire comprend en général une âme de combustible (uranium ou thorium métallique pur ou allié, oxyde ou carbure d'uranium en poudre ou fritté, etc...) entourée d'une gaine étanche destinée notam-

ment à retenir les produits de fission et à éviter aux combustibles le contact du fluide de refroidissement.

La forme de l'élément de combustible est en général un compromis entre des considérations de mécanique, de thermodynamique et de neutronique. La neutronique exige des matériaux peu absorbants et en aussi faible quantité que possible. La thermodynamique exige des matériaux et des formes qui permettent le maximum d'échanges de chaleur entre le combustible et le fluide de refroidissement. La mécanique exige des matériaux résistant bien aux conditions pénibles de température et de haut flux neutronique, tout en résistant aux pressions internes, afin d'éviter que ne s'échappent les produits de fission particulièrement dangereux.

Ces impératifs, souvent contradictoires, limitent les solutions possibles et exigent d'importantes recherches technologiques. Il faut surtout veiller à rendre l'élément de combustible le plus résistant possible, afin de limiter la fréquence des ruptures de gaines, toujours fâcheuses par la contamination qu'elles provoquent en général dans le circuit de refroidissement et par la nécessité d'arrêter temporairement le réacteur pour remplacer l'élément défectueux.

Parmi les formes et compositions des éléments de combustible déjà utilisées, on peut citer, par exemple, des cylindres creux d'uranium métallique dans un cylindre d'alliage de magnésium ou d'aluminium, muni d'ailettes et parfois supporté par des chemises de graphite, des pastilles d'oxyde d'uranium enrichi fritté empilées dans des tubes d'acier inoxydable ou de zirconium, des plaques laminées comprenant une âme d'uranium enrichi entre deux plaques d'aluminium, etc...

3.3.2. La situation dans divers pays d'Euratom

Belgique

Diverses sociétés belges ont mis à l'étude, depuis plusieurs années, avec la collaboration du C.E.N., des problèmes tels que : le laminage de l'uranium, la fabrication d'éléments de combustible mettant en œuvre l'oxyde d'uranium, l'uranium métal, leurs alliages et leurs combinaisons avec des métaux tels que l'aluminium, le magnésium et le zirconium.

Des essais très poussés ont été effectués et sont encore en cours pour la fabrication des pastilles en oxyde d'uranium UO₂.

Enfin, une de ces sociétés a mis à son programme et a commencé, en collaboration avec le C.E.N., l'étude systématique, tant théorique que pratique, de l'emploi du plutonium comme combustible dans les réacteurs de puissance.

République fédérale d'Allemagne

Une société allemande exploite une installation qui transforme, après fusion sous haut vide, l'uranium métal — éventuellement allié — en barres et ensuite en éléments combustibles. La capacité de production de cette installation, qui fournit maintenant des éléments pour le réacteur de recherche de Karlsruhe, dépasse les besoins actuels de la République fédérale d'Allemagne. Un procédé spécial a été élaboré et il est appliqué dans les cas où il est indispensable d'avoir un excellent échange de chaleur entre les combustibles et les matériaux de gainage. Cette même société a mis au point et améliore constamment des méthodes de production et d'essai des éléments de combustible. On procède actuellement à des expériences sur des éléments de combustible en utilisant comme combustibles l'oxyde et le monocarbure d'uranium. Ces recherches s'inspirent notamment des exigences du programme allemand visant l'installation de réacteurs de puissance d'une capacité globale de 500 MWe.

France

Le Commissariat à l'Energie atomique a effectué des études très poussées relatives à la métallurgie des barreaux d'uranium et à leur gainage par des métaux tels que l'aluminium, le magnésium, le zirconium ou le béryllium.

Les réacteurs construits à Marcoule et ceux du programme de production d'énergie fonctionnent à l'uranium naturel, sous forme métallique. Cet uranium métallique est actuellement gainé dans l'usine construite à Annecy par une société privée. La capacité de cette usine va être prochainement triplée, permettant de couvrir les besoins français tels qu'ils sont actuellement prévus.

Par ailleurs, un autre groupe d'industriels français se préoccupe de la fabrication d'éléments de combustible, en liaison, le cas échéant, avec la technique américaine ; il s'intéresserait non seulement aux éléments du type à l'uranium naturel métallique actuellement prévu pour ces réacteurs de puissance fran-

çais, mais aussi aux types beaucoup plus évolués, à l'oxyde d'uranium (UO₂), céramiques, etc... et aux gaines de métaux spéciaux, permettant, avec ou sans enrichissement, d'atteindre les températures élevées indispensables pour la rentabilité de l'énergie nucléaire.

L'uranium 233, isotope fissile de l'uranium, est obtenu par transmutation du thorium dans un réacteur. Nous avons vu, dans le chapitre II, que la France dispose d'importantes ressources en thorium.

Les bases d'une industrie française du thorium métallique ont été jetées par le C.E.A., avec trois grandes sociétés françaises, pour l'obtention du thorium métallique en poudre, à partir de la thorine, pour la fourniture des barreaux de thorium obtenus par frittage-filage et pour le frittage de la poudre de thorium.

Italie

Au centre d'Ispra du C.N.R.N., le groupe de métallurgie projette de s'équiper pour la production expérimentale des éléments de combustible, particulièrement en ce qui concerne les éléments en plaque utilisés dans les réacteurs destinés à l'étude du comportement de matériaux (material testing reactors).

3.4. Traitement des combustibles irradiés

3.4.1. La situation d'ensemble

Lorsqu'un combustible nucléaire est soumis au rayonnement neutronique et qu'il se produit un certain nombre de fissions, la matière se trouve transformée. La matière fissile donne des produits de fission, dont la plupart sont des absorbants de neutrons qui réduisent l'économie des neutrons dans le réacteur. En outre, ils sont particulièrement dangereux du point de vue sanitaire, comme par exemple, le strontium 90. La matière fertile s'est transformée, d'une part, en matière fissile : l'uranium 238 devenant du plutonium 239 et le thorium 232 de l'uranium 233; d'autre part, dans une plus faible mesure, en isotopes lourds qui absorbent également fortement les neutrons, par exemple, le plutonium 240, le plutonium 242. Comme les produits de fission, ces isotopes vont empoisonner

les réacteurs : ceux-ci auront tendance à voir leur puissance réduite.

Si l'on veut récupérer la matière fissile et fertile restant dans le combustible, ainsi que la nouvelle matière fissile produite, on devra éliminer les produits de fission et donc procéder au retraitement des combustibles irradiés.

Le procédé le plus couramment employé pour le traitement des combustibles irradiés est le suivant : il consiste, après dégainage, à dissoudre par de l'acide nitrique les barreaux d'uranium irradiés, puis à séparer en trois parties, plutonium, uranium et produits de fission, en utilisant un solvant dont les affinités sont différentes vis-à-vis de chacun de ces éléments (plutonium, uranium, ou groupe d'éléments, produits de fission). Là encore, ce n'est que par l'importance de l'installation que l'on peut espérer atteindre des prix de revient raisonnables.

Deux usines sont actuellement en construction pour le traitement des combustibles irradiés. La plus importante est située en France à Marcoule ; l'autre doit être construite en Belgique, à Mol, sur initiative internationale qui a résulté en la création de la Société européenne pour le traitement chimique des combustibles irradiés (Eurochemic).

Conformément à ses statuts, la société exercera toute activité de recherche de caractère industriel en vue de procéder, dans des conditions économiques, au traitement de récupération des combustibles utilisés pour la production d'énergie nucléaire.

La société envisage de mettre en marche, avant 1961, une usine de traitement des éléments de combustible à uranium naturel ou légèrement enrichi, ainsi qu'un laboratoire. Elle assurera la mise au point d'une technique appropriée et elle contribuera à la formation de spécialistes dans ce domaine. L'emplacement choisi pour cette première usine, dont la capacité annuelle serait d'environ 100 tonnes, est situé à Mol, Belgique, au voisinage immédiat des installations du Centre d'études nucléaires (C.E.N.).

Le capital social a été fixé à 20 millions d'unités UEP (400 actions de 50.000 unités UEP chacune). Les investissements nécessaires à la construction et à l'équipement complets de l'usine sont évalués à 12 millions d'unités UEP. Les effectifs prévus sont de 240 personnes pour l'exploitation de l'usine et 200 à 250 personnes pour les travaux de recherche.

3.4.2. La situation dans divers pays d'Euratom

Belgique

La décision du Conseil de l'O.E.C.E. d'implanter à Mol l'usine de retraitement chimique des combustibles nucléaires irradiés a été approuvée par le Gouvernement belge. La Belgique a souscrit 44 actions de 50.000 unités UEP, soit 2,2 millions d'unités UEP, dont 1,35 million pour l'industrie belge.

Une société vient d'être constituée, dont l'objet est de s'occuper de toutes activités à caractère chimique ou métallurgique concernant la mise en œuvre de l'énergie nucléaire ou de ses applications, ainsi que de toutes activités consistant à utiliser l'énergie nucléaire, ou l'un de ses produits ou effets dérivés, dans la réalisation d'opérations chimiques ou métallurgiques. Elle peut notamment s'occuper du retraitement des combustibles nucléaires irradiés.

République fédérale d'Allemagne

La participation de la République fédérale d'Allemagne s'est traduite par la souscription de 68 actions de la société Eurochemic, soit 3,4 millions d'unités UEP.

En outre, une société allemande a équipé un laboratoire de radiochimie qui permettra de poursuivre des recherches sur le retraitement des éléments de combustible irradiés.

France

Le C.E.A. a assuré les recherches qui permirent l'obtention de plutonium en France, dès 1949. Ce service a ensuite construit une usine-pilote, dont les renseignements ont permis l'étude et la mise en service de l'usine de Marcoule pour le traitement des barreaux d'uranium irradiés.

Notons ici que le centre de Marcoule, avec ses réacteurs (G1, G2 et G3) et son usine d'extraction, est essentiellement axé sur la production du plutonium.

C'est une société chimique française qui, après avoir construit à Fontenay-aux-Roses l'unité semi-industrielle d'extraction et d'isolement du plutonium suivant le procédé mis au point au C.E.A., a été chargée de la réalisation de l'usine de Marcoule.

La production de l'usine atteindrait 100 kg de plutonium par an en 1959. L'uranium appauvri qui sort de l'usine peut être recyclé dans les usines d'élaboration du métal.

Une installation-pilote, montée à Saclay pour le traitement du thorium irradié dans la pile EL 2, a été mise en route et la séparation de l'uranium 233 a commencé.

Le Commissariat à l'Energie atomique a souscrit, en outre, au capital de la Société Eurochemic, 68 actions, soit 3,4 millions d'unités UEP.

Italie

L'Italie a prévu d'investir dans les installations d'Eurochemic à Mol, par l'intermédiaire de la souscription du C.N.R.N. au capital de cette société, la somme de 2,2 millions d'unités UEP.

Pays-Bas

Le Gouvernement des Pays-Bas a décidé de souscrire aux installations d'Eurochemic pour une somme qui s'élève à 1,5 million d'unités UEP.

3.5. Rejet d'effluents

Les effluents radio-actifs des installations nucléaires doivent, pour éviter d'être dangereux, faire l'objet d'un traitement particulier. Il n'y a pas actuellement en Europe d'installations industrielles de ce type, à l'exception de celle de Marcoule en France. Généralement, il s'agit d'installations de faible importance liées à des laboratoires.

En Belgique, on étudie le problème à l'échelle semi-industrielle en vue des installations de retraitement d'Eurochemic.

A Marcoule, les eaux industrielles peu actives passent, avant leur rejet dans le Rhône, dans une station de traitement des effluents qui élimine tous les éléments dangereux. Ces éléments, séparés et réduits à l'état de boue, sont ensuite enfermés dans des fûts en acier disposés sous béton.

3.6. Remarques finales

Les renseignements donnés dans ce chapitre montrent que le problème du cycle de combustible en est encore, dans

la Communauté, au stade des recherches et des projets, sauf en France où une usine de fabrication d'éléments de combustible est en service à Annecy et où une usine de traitement des combustibles irradiés va entrer en exploitation industrielle à Marcoule.

En 1956 les six pays de la Communauté ont créé un Syndicat d'étude afin d'envisager les possibilités de l'installation d'une usine de séparation isotopique de l'uranium.

Le problème de la création de pareille usine reste encore controversé, car une telle installation ne peut être exploitée dans de bonnes conditions de prix de revient que si elle est à une échelle assez considérable. Les trois usines édifiées par la Commission de l'Energie atomique américaine (Oak-Ridge, Paducah, Portsmouth), ont exigé environ trois milliards de dollars d'investissements. La puissance électrique exigée par l'ensemble de ces trois installations dépasse 5 millions de kWe. Elles avaient été initialement conçues dans un but de défense nationale.

L'observation concernant l'importance des installations est aussi valable pour les usines de traitement des combustibles irradiés. En Amérique, la Commission de l'Energie atomique a construit cinq usines pour l'ensemble de son activité.

Ceci montre qu'un effort important doit être entrepris en Europe si l'on veut assurer l'autonomie totale en ce qui concerne le cycle de combustible.

CHAPITRE 4

MODERATEURS ET MATIERES DIVERSES

Dans les chapitres précédents, l'uranium et le thorium ont été étudiés en tant que produits de base pour la production d'énergie nucléaire. Le présent chapitre fournit un aperçu de la situation, dans les six pays membres d'Euratom, quant à la production d'autres matières indispensables pour la construction et le fonctionnement de types déterminés de réacteurs.

4.1. Modérateurs

4.1.1. Introduction

Ces matières se caractérisent par leur propriété de « modérer », c'est-à-dire de réduire la vitesse des neutrons qui les traversent. Ce qui détermine essentiellement le pouvoir ralentisseur de certains matériaux, c'est la perte d'énergie que subit le neutron à chaque collision avec un noyau, le nombre d'atomes par unité de volume (la densité atomique), la probabilité d'avoir une collision élastique du neutron avec le noyau plutôt qu'une absorption du neutron. La perte d'énergie est d'autant plus grande que le noyau est léger. Les « modérateurs » sont indispensables pour les types de réacteurs utilisant des combustibles nucléaires dont la réaction en chaîne ne peut être entretenue que par des neutrons thermiques. La fission nucléaire produit, en effet, des neutrons rapides qui doivent être freinés pour produire de nouvelles fissions et entretenir la réaction en chaîne. On peut se représenter l'action freinante des modérateurs en s'imaginant que les neutrons rapides sont repoussés plus ou moins élastiquement lors de leurs chocs avec les noyaux des matières du modérateur. La plupart des réacteurs actuellement en fonctionnement ou en construction utilisent des modérateurs tels que l'eau lourde, l'eau légère, le graphite ou le béryllium.

Une partie du modérateur est utilisée comme « réflecteur », c'est-à-dire placée autour du cœur du réacteur de telle façon que la plupart des neutrons sont renvoyés dans ce cœur.

4.1.2. Eau lourde et eau légère

1) Introduction

L'eau lourde est un composé chimique d'hydrogène lourd (deutérium) et d'oxygène. Le noyau atomique de l'hydrogène lourd n'est pas composé seulement d'un proton, comme le noyau de l'hydrogène léger, mais également d'un neutron. Le poids spécifique de l'hydrogène lourd est environ le double de celui de l'hydrogène ordinaire. Lorsqu'elle est traversée par des neutrons, l'eau lourde se distingue de l'eau ordinaire par le fait que, d'une part, elle freine moins la vitesse des neutrons lors de chocs élastiques et que, d'autre part, elle absorbe moins de neutrons. L'eau légère qui, par absorption, réduit davantage le nombre de neutrons disponibles, n'est donc pas indiquée pour les types de réacteurs utilisant des combustibles comportant peu de matières fissiles (par exemple l'uranium naturel ou très faiblement enrichi). Pour ces réacteurs, l'avantage d'un approvisionnement relativement bon marché en combustible est compensé par le coût élevé de l'eau lourde qui peut seule servir de modérateur.

L'eau ordinaire ne contient de l'eau lourde qu'en très petite quantité (environ 1/7000 en moyenne). Les principales méthodes pour enrichir l'eau ordinaire en eau lourde (jusqu'à un taux de 99,75 %) sont les suivantes. Ces méthodes sont souvent couplées l'une à l'autre pour rendre l'ensemble des opérations aussi économique que possible.

1° *Electrolyse de l'eau*

Principe : Sous l'effet d'un courant électrique, l'eau légère se décompose plus rapidement que l'eau lourde en ses éléments constitutifs, hydrogène et oxygène. Ainsi, le liquide électrolytique résiduel s'enrichit de plus en plus en eau lourde au cours de ce processus.

On notera, à titre d'exemple, que cette méthode est pratiquée à l'échelle industrielle en Norvège (Rjukan), où l'on produit 25 tonnes par an. Elle est également appliquée, combinée à l'échange isotopique du deutérium entre la vapeur d'eau et l'hydrogène, à l'usine de Trail au Canada. Les coûts

de production sont évalués à environ 120.000 unités UEP par tonne.

2° *Distillation de l'eau ou de l'hydrogène liquide*

Principe : L'eau naturelle se vaporise à plus basse température que l'eau lourde. A l'état liquide, l'hydrogène léger est plus volatil que l'hydrogène lourd ou deutérium.

3° *Echange isotopique du deutérium entre l'eau et l'hydrogène sulfuré, à double température*

Principe : A basse température, l'hydrogène sulfuré cède du deutérium à l'eau, tandis qu'il lui en retire à des températures plus élevées. Par un processus continu, le deutérium est retiré à l'eau d'alimentation et dirigé vers l'eau enrichie en deutérium, jusqu'à l'obtention du degré de concentration voulu.

4° *Echange isotopique du deutérium entre l'eau et l'hydrogène, à double température*

Principe : A basse température, l'hydrogène naturel cède du deutérium à l'eau, tandis qu'il lui en retire à des températures plus élevées. Par un processus continu, le deutérium est retiré à l'eau d'alimentation et dirigé vers l'eau enrichie en deutérium, jusqu'à l'obtention du degré de concentration voulu.

2) *La situation dans divers pays d'Euratom*

République fédérale d'Allemagne

En Allemagne, depuis 1954, l'industrie étudie théoriquement et expérimentalement les bases des divers procédés de fabrication d'eau lourde.

A Griesheim, près de Francfort-sur-le-Main, deux firmes ont construit une installation expérimentale pour l'obtention du deutérium par rectification de l'hydrogène liquide. L'installation utilise un mélange d'azote et d'hydrogène (gaz de synthèse), provenant d'une usine d'ammoniac, et produira 6 tonnes d'eau lourde par an. Sa construction, commencée vers le milieu de 1955, est presque entièrement achevée. En ce moment, on procède à des essais de fonctionnement avant la mise en marche prochaine.

L'échange du deutérium entre l'eau naturelle et l'hydrogène, par un procédé à deux températures, a été mis au point

à l'échelle de laboratoire. La construction d'une installation industrielle d'essai, où ce procédé sera expérimenté, a été entamée.

En outre, des recherches sur le procédé d'échange isotopique du deutérium entre l'eau et l'hydrogène sulfuré sont en cours. L'installation qui sert à ces recherches a été construite en 1957, avec l'aide financière du Ministère fédéral de l'Energie atomique et des Eaux, pour servir de base à une future installation industrielle.

France

La France a effectué des achats d'eau lourde aux Etats-Unis et en Norvège, tout en poursuivant les études en vue d'une production propre.

Une usine-pilote a été construite près de Toulouse. Sa production devrait atteindre environ 2 tonnes par an, par le procédé de liquéfaction et distillation de l'hydrogène.

Une société d'étude a été formée pour appliquer au gaz de Lacq, particulièrement riche en hydrogène sulfuré, le procédé d'échange isotopique entre l'eau et d'hydrogène sulfuré. Une première installation-pilote, pouvant traiter jusqu'à 1000 m³ d'hydrogène sulfuré à l'heure, a été ainsi construite à Lacq et a pu fonctionner dans d'excellentes conditions.

Signalons, enfin, que dans les Pyrénées se trouvent d'importantes installations d'électrolyse de l'eau qui permettent d'obtenir des concentrés d'eau lourde comme sous-produit, mais en assez faible quantité.

Italie

En Italie, on a effectué, pour le compte du C.N.R.N., des études relatives à la production d'eau lourde par diverses méthodes. Deux de celles-ci sont appliquées dans de petites installations de laboratoire. Par concentration électrolytique, une petite installation produit de l'eau lourde à 99,8% en partant d'un mélange qui ne contient que 2%. On a examiné la possibilité de traiter par cette méthode les préconcentrés provenant de l'installation électrolytique de Nera-Montero. D'autre part, on projette de créer à Larderello (Toscane) une installation pour la distillation fractionnée de l'eau naturelle utilisant l'énergie endogène des fumerolles boracifères locales.

Une installation à Merano a été modifiée en vue de son éventuelle utilisation pour la production d'eau lourde, comme sous-produit de la production d'hydrogène. En outre, on a examiné la possibilité d'utiliser l'installation d'Apuania pour la production d'eau lourde en tant que sous-produit de l'ammoniac.

En outre, on a étudié la possibilité d'installer, dans un établissement de Ravenne, une section qui obtiendrait de l'eau lourde en tant que sous-produit dérivant du cycle de production de produits azotés.

4.1.3. Graphite

1) Introduction

Bien que les qualités modératrices du graphite soient de loin inférieures à celles de l'eau lourde, cette forme du carbone est actuellement le modérateur le plus utilisé. Il ne convient cependant à cette fin que lorsqu'il est d'une densité et d'une pureté très élevées. La présence d'autres matières, même en quantité minime, augmente sensiblement l'absorption de neutrons, et il faut donc, lors de la fabrication et du façonnage des blocs de graphite, éviter avec un soin particulier toutes les impuretés.

D'autre part, en vue de permettre l'empilement du graphite dans le cœur des réacteurs, les blocs doivent être taillés avec une extrême précision aux formes et dimensions requises. En dépit des coûts qui en résultent, le graphite est bien moins coûteux que l'eau lourde ; c'est ainsi qu'en France son coût est de 1,2 - 1,4 unités UEP par kg, alors que le coût de l'eau lourde est de quatre à dix fois supérieur.

2) La situation dans divers pays d'Euratom

République fédérale d'Allemagne

En Allemagne, on produit du graphite de pureté nucléaire à partir de graphite artificiel et de graphite naturel.

Une usine chimique à Meitingen, près d'Augsbourg, dispose d'une expérience qui remonte à 1896 dans la production de *graphite artificiel* provenant des produits de la carbo- et petrochimie (coke de houille, de pétrole et de bitume). Les travaux préparatoires à la production de graphite nucléaire permettent

d'envisager la fourniture des qualités utilisées en France, aux U.S.A. et en Grande-Bretagne.

Dans la région du « Bayerische Wald », on a mis au point, après plusieurs années de recherches, la transformation du *graphite naturel* en graphite pressé nucléairement pur. En 1956, avec l'aide du Ministère fédéral de l'Énergie atomique et des Eaux, une grande installation d'essai est entrée en service ; des échantillons de sa production sont actuellement à l'examen dans divers pays étrangers, en vue de leur utilisation dans les réacteurs.

France

Le graphite de qualité nucléaire est produit, à partir d'un mélange de coke de pétrole et de brai, dans une usine située à Chedde ; celle-ci peut produire de 3.000 à 6.000 tonnes de graphite par an, dont la moitié environ est vendue à des utilisateurs nucléaires ; elle pourrait facilement accroître sa production si le marché le justifiait.

Rappelons que les réacteurs de Marcoule (G1, G2 et G3) utilisent chacun plus de 1.000 tonnes de graphite. Le C.E.A. a passé un contrat de fourniture qui s'élève à plus de 4,76 millions d'unités UEP. On estime que le chiffre d'affaires de la production de graphite pourrait atteindre sous peu près de 2,38 millions d'unités UEP par an.

Le graphite livré à Marcoule est usiné sur place dans un atelier qui fonctionne depuis fin 1954. Cet atelier, sévèrement climatisé et doté d'un système de dépoussiérage spécial, pourra satisfaire non seulement aux besoins d'usinage de graphite nucléaire du centre de Marcoule, mais encore à d'autres besoins.

Italie

On n'a pas encore examiné en détail l'adaptation de la production actuelle de graphite ordinaire aux exigences nucléaires. Plusieurs groupes sont cependant intéressés à ce problème et cherchent à le résoudre. Il existe aussi un projet visant à créer une installation de production de graphite nucléaire. Ce projet et les possibilités d'adapter la production existante indiquent qu'il n'y aura, semble-t-il, pas de difficultés à produire des quantités importantes de graphite.

4.1.4. Béryllium

1) Introduction

Le béryllium est un métal très cher, valant environ 80 unités UEP le kg, mais qui présente des qualités remarquables, du point de vue nucléaire, car il peut servir de modérateur, de réflecteur, de matériau de structure et de matériau de gainage.

On peut avoir une idée de l'importance de la demande dont il est aujourd'hui l'objet, en notant qu'aux Etats-Unis un contrat vient d'être passé, prévoyant, seulement à l'intérieur de ce pays, la fourniture, pendant 5 ans, de 50 tonnes tous les ans, contrat portant sur une somme d'environ 41,7 millions d'unités UEP.

2) La situation dans divers pays d'Euratom

France

Un effort a été fait par diverses industries, en collaboration avec le C.E.A., en vue de produire du béryllium qui n'était jusqu'ici utilisé qu'en petites quantités dans les alliages avec le cuivre.

En France, début 1957, environ 1.500 kg de pièces de glucine (oxyde de béryllium) étaient frittés et usinés, pour le réacteur « Proserpine » notamment ; divers perfectionnements ont été apportés au procédé de frittage, avec le concours du C.E.A. Celui-ci a aussi poursuivi des recherches sur l'obtention de produits bérylliques spéciaux, sur le comportement de la glucine sous radiation, sur sa corrosion par l'eau sous pression et par le sodium liquide. En outre, des appareillages d'étude des propriétés thermiques de la glucine ont été montés.

Italie

L'oxyde de béryllium purifié peut être fourni en quantités modestes par le « Centre ceramico » de l'Institut de Chimie appliquée de l'Université de Bologne ; il est nécessaire cependant de soumettre encore ce produit à des purifications ultérieures pour pouvoir l'utiliser dans le domaine nucléaire.

4.1.5. Substances organiques

En Italie on a effectué des études sur des modérateurs organiques (diphényl et terphényl).

En France, le C.E.A. a également effectué quelques études sur l'utilisation des substances organiques dans les réacteurs.

Il est évident que l'industrie chimique s'intéressera à ces problèmes dans la mesure où l'on envisagera la construction de réacteurs utilisant des modérateurs organiques.

4.2. Matériaux de structure

4.2.1. Aciers et Aciers Spéciaux

L'acier intervient dans la construction des installations nucléaires et des laboratoires annexes. Il peut être utilisé comme blindage mais aussi comme matériau de structure. Les aciers inoxydables et réfractaires sont très largement utilisés, en raison de leur composition, caractérisée par l'absence d'éléments capables de devenir radio-actifs sous rayonnement, ainsi que de leur résistance à la corrosion.

La production de ce type d'acier s'élève, pour l'année 1957 dans l'ensemble de la Communauté, à environ 250.000 tonnes métriques.

4.2.2. Les alliages spéciaux d'aluminium et de magnésium

L'élaboration de qualités nucléaires d'aluminium et de magnésium ne pose pas de grands problèmes à l'industrie des métaux non-ferreux, qui pourra vraisemblablement, dans l'avenir, fournir les qualités nécessaires aux réalisations envisagées. On n'a cependant pas encore résolu tous les problèmes technologiques que pose l'élaboration d'alliages spéciaux avec l'aluminium et le magnésium.

4.2.3. Zirconium

1) Introduction

Le zirconium, très peu employé jusqu'ici, présente des qualités mécaniques acceptables et une grande perméabilité aux neutrons. Il peut être utilisé, soit seul comme matériau de gainage ou de structure, soit en alliage, notamment pour les éléments de combustible.

Bien qu'il ait considérablement baissé depuis quelque temps, son prix reste encore très élevé (aux Etats-Unis environ 70

unités UEP le kg). Sa préparation est délicate et exige en particulier l'élimination du hafnium (déahfnisation), élément fortement avide de neutrons et qui est toujours présent dans le minerai de zirconium.

2) *La situation dans divers pays d'Euratom*

République fédérale d'Allemagne

Une installation d'essai produit, à partir du chlorure de zirconium et après séparation du hafnium, du tétrachlorure de zirconium pur contenant moins de 100 ppm (parties par million-moins de 1/100 de %) de hafnium. L'éponge de zirconium obtenue peut être fondue en métal complet à l'arc électrique. La marche de cette installation d'essai fournit des renseignements précieux pour la construction d'une installation industrielle qui fournira plusieurs tonnes par mois.

Plusieurs entreprises s'efforcent de développer la production de zirconium et d'alliages de zirconium.

France

Un contrat de fourniture de 75 tonnes de zircone (oxyde de zirconium) a été conclu avec une société à laquelle a été également confié la déahfnisation, entièrement mise au point au stade pilote en collaboration avec le C.E.A. Une autre société sera chargée de la chloruration de la zircone.

Divers procédés de fabrication de zirconium nucléairement pur ont été mis au point et doivent passer au stade industriel. La production actuelle est de 50 tonnes par an.

Jusqu'à présent, l'industrie n'a encore obtenu que des résultats partiels dans l'étude de la mise en forme du zirconium. Ces travaux sur les propriétés et les possibilités de transformation du zirconium ont été poursuivis. On étudie actuellement un procédé par électrodéposition du zirconium.

Une fabrique au Havre a été chargée du laminage du zirconium et des alliages destinés au réacteur Proserpine.

Des études sur les propriétés mécaniques, physiques et chimiques du zirconium sont également poursuivies sur base de multiples contrats universitaires.

Italie

Le C.N.R.N. a conclu, en 1954, un contrat avec une firme allemande qui étudie la production de zirconium exempt d'hafnium, sa transformation en tubes et le revêtement des barres d'uranium par ces tubes. La méthode de production consiste à traiter le tétrachlorure de zirconium, afin que sa teneur en hafnium passe de 1 % à moins de 0,01 %, à sublimer le tétrachlorure et à réduire ses vapeurs par le magnésium liquide. L'éponge de zirconium métal ainsi obtenue, dont on enlève le magnésium en excès et le chlorure de magnésium qui s'est formé, est fondue en pains qui se laminent jusqu'à une épaisseur de 3 à 5 mm. Ces lames peuvent être ensuite travaillées sous diverses formes.

4.3. Absorbants de neutrons

Pour diminuer la réactivité d'un réacteur, il suffit de retirer des neutrons à la réaction en chaîne. Certains métaux ont précisément la propriété d'absorber des neutrons ; c'est le cas, par exemple, du cadmium, du bore, du hafnium, etc... Ces métaux servent à la fabrication des barres de contrôle que l'on enfonce plus ou moins profondément dans le réacteur, suivant la réactivité désirée. Lors de la préparation de ces barres, on fait largement appel à la métallurgie des poudres, notamment pour réaliser des alliages de métaux ayant des points de fusion très différents l'un de l'autre.

Ces barres de réglage, de contrôle et d'arrêt sont fabriquées à une échelle réduite en France et aussi en Allemagne.

4.4. Agents de refroidissement

La préparation de certains fluides de refroidissement des réacteurs, tels que l'eau ordinaire, l'air, le gaz carbonique, ne présente aucun problème industriel.

Les réacteurs utilisant du combustible enrichi et les réacteurs surgénérateurs peuvent être refroidis par des métaux liquides, le potassium, le bismuth et surtout le sodium. Ces métaux bénéficient d'un coefficient de transmission de chaleur élevé et permettent de récupérer la chaleur sous des pressions faibles. Cette propriété élimine l'une des difficultés majeures que l'on rencontre dans la construction de réacteurs. En outre, le pompage des métaux liquides dans les circuits est aisé ; il

peut être effectué par des pompes électromagnétiques, de type nouveau.

Mais ces métaux ont un pouvoir élevé de corrosion pour des matériaux traditionnels. Une nouvelle technologie doit donc être élaborée.

Pour l'instant, les métaux liquides font seulement l'objet d'études de laboratoire, conduites dans la *République fédérale d'Allemagne* par plusieurs entreprises, notamment en vue du développement d'une méthode industrielle pour la fabrication de lithium pur.

En *France*, de telles études sont également effectuées par le C.E.A.

En *Belgique*, une usine-pilote produit du lithium à partir de spodumène.

4.5. Matériaux divers

4.5.1. Le calcium

Le calcium est important dans l'industrie nucléaire, car il est utilisé dans la conversion en uranium métal, par réduction de l'oxyde d'uranium (UO₂) ou du tétrafluorure d'uranium (UF₄). Dans la *République fédérale d'Allemagne*, on produit, à l'échelle industrielle, du calcium dont la pureté et la forme sont appropriées à la production d'uranium métal. Le calcium est obtenu par réduction aluminothermique, puis sublimation sous vide et enfin concassage.

En *France*, l'industrie produit le calcium pour le compte du C.E.A. Le contrat porte sur un montant de 1,2 million d'unités UEP. La capacité de production actuelle est de 450 tonnes par an.

4.5.2. Dans les six pays d'Euratom il y a une industrie du fluor et de l'acide fluorhydrique, ainsi que des sels fluorés qui interviennent dans la préparation des fluorures d'uranium (UF₄ et UF₆), l'un (UF₄) destiné à la production de l'uranium métal, l'autre (UF₆) utilisé pour l'enrichissement isotopique de l'uranium.

4.5.3. Matériaux de protection

Certains matériaux de structure, qui serviront en même temps à la protection auprès du réacteur et dans les ateliers et

laboratoires annexes, tels que les bétons, les bétons spéciaux, le boral, les aciers ordinaires et spéciaux, le plomb, sont actuellement produits en quantités importantes dans les six pays.

4.5.4. D'autres matériaux particuliers, utilisés dans les réacteurs et ateliers annexes, comme le bromure de zinc, le titanium, le germanium, etc... sont également produits par les industries de la Communauté.

4.6. Remarques finales

Ce qui précède montre que l'industrie des pays d'Euratom produit, d'ores et déjà, la plupart des matériaux spéciaux utilisés dans la structure et la construction des réacteurs. Lorsque des travaux préparatoires à la fabrication industrielle sont encore en cours, ils sont déjà assez avancés. Les besoins futurs de ces matériaux spéciaux ne sont que partiellement prévisibles, car ils dépendent essentiellement des types de réacteurs qui seront choisis.

L'industrie des Etats-Unis et celle du Royaume-Uni, ont développé la production des matériaux spéciaux nucléaires au point de suffire aux besoins de leurs programmes nucléaires. Pour l'eau lourde cependant, le Royaume-Uni est essentiellement tributaire d'importations (originaires notamment du Canada), ce qui est d'ailleurs un des éléments du choix par l'Angleterre des réacteurs modérés au graphite.

CHAPITRE 5

REACTEURS DE RECHERCHE

5.1. Introduction

Les réalisations industrielles se fondent, dans leur initiative et dans leur expansion, sur les résultats de la recherche fondamentale et de la recherche appliquée. Les moyens d'investigation que l'une et l'autre mettent en œuvre accomplissent la triple fonction de susciter la découverte, de permettre le perfectionnement des techniques et de former le personnel spécialisé.

Les pays de l'Euratom, placés devant les problèmes relatifs à l'énergie nucléaire, ont dû se procurer les outils de travail et former les hommes capables de les résoudre ; à des degrés divers, ils disposent des moyens nécessaires pour entreprendre et poursuivre les recherches, notamment dans le domaine des réacteurs.

Un certain nombre de réacteurs expérimentaux ont été construits et sont utilisés, notamment :

- pour l'éducation et la formation des ingénieurs et physiciens, des techniciens et opérateurs nécessaires à la conduite des réacteurs de puissance ;
- pour étudier le comportement même des réacteurs, le choix et l'adaptation des combustibles nucléaires et des modérateurs ;
- pour fournir des faisceaux neutroniques nécessaires à l'étude des matières et matériaux ainsi qu'à l'analyse des phénomènes radio-biologiques ;
- pour étudier éventuellement de manière accélérée le comportement des matériaux spéciaux utilisés dans les réacteurs sous des flux neutroniques élevés ;
- pour produire les isotopes nécessaires, tant à l'industrie et à l'agriculture qu'aux recherches scientifiques et aux applications médicales ou biologiques.

Pour les diverses utilisations ci-dessus, des flux neutroniques ⁽¹⁾ de valeur différente sont nécessaires :

- des flux neutroniques de 0 à 10^6 n/cm² sec. sont nécessaires pour les réacteurs d'enseignement ou de formation pour techniciens ;
- des flux neutroniques de 10^9 à 10^{12} n/cm² sec. conviennent particulièrement pour les recherches de caractère général ;
- des flux neutroniques de 10^{12} n/cm² sec. et supérieurs sont nécessaires pour l'essai des matériaux et la majorité des études biologiques ;
- enfin, des flux de l'ordre de 10^{14} n/cm² sec. et supérieurs sont nécessaires pour les essais accélérés de résistance des matériaux.

Les flux neutroniques considérés ci-dessus se rapportent aux neutrons thermiques. Dans certains cas, et particulièrement pour les essais de matériaux, il convient aussi de tenir compte de la valeur du flux de neutrons rapides.

En dehors du critère de flux neutronique, les réacteurs de recherche se différencient par d'autres caractéristiques, et notamment par :

- la capacité des réacteurs en espaces utilisables pour l'exposition des échantillons dans les conditions de flux neutronique précisées ci-dessus ;
- la puissance du réacteur exprimée par la quantité de chaleur produite à l'intérieur de son noyau et évacuée dans les circuits de refroidissement.

Il est superflu d'évoquer tout l'intérêt scientifique, technologique et pédagogique que présente un réacteur de recherche. On peut faire observer qu'en matière de rayonnement un réacteur moyen peut produire un rayonnement comparable à une masse de 100 tonnes de radium, masse toute hypothétique puisque, jusqu'à ce jour, la production mondiale de radium a été de 1 kilo et demi.

Les principaux matériaux constitutifs de tout réacteur expérimental ou de puissance sont, en dehors des éléments de

⁽¹⁾ Le flux neutronique considéré est le flux moyen des neutrons thermiques, exprimé en neutrons par seconde et cm².

structure et de protection : le combustible, le modérateur et le fluide de refroidissement. Du choix qui est fait de ces matériaux découlent plusieurs modes de classement de réacteurs. Le combustible peut être de l'uranium naturel ou enrichi à des degrés divers ; le modérateur choisi peut être du graphite, du béryllium, un liquide organique, de l'eau lourde ou de l'eau légère ; le fluide de refroidissement peut être de l'air, du gaz carbonique, de l'eau lourde, de l'eau légère, des métaux liquides, etc...

Les combinaisons des matériaux cités ci-dessus sont multiples et engendrent différents types de réacteurs, qui possèdent des qualités diverses en matière de maniement, d'usage aux fins de recherche et de formation de techniciens.

En règle générale, on peut dire que :

- un réacteur de très haut flux neutronique postule l'utilisation d'un combustible enrichi ;
- un réacteur utilisant de l'uranium naturel ne permet pas d'employer comme modérateur l'eau légère, mais exige pour cette fonction le graphite, le béryllium ou l'eau lourde ;
- un réacteur homogène à l'uranium naturel ne peut recourir au graphite comme modérateur ;
- des réacteurs de forte capacité thermique exigent un circuit forcé de refroidissement et, par conséquent, excluent la formule des réacteurs à simple refroidissement par convection, comme par exemple, les réacteurs du type piscine.

5.2. Réalisations

Le tableau qui suit donne les caractéristiques principales des réacteurs réalisés ou en construction dans les pays de l'Euratom. Sous l'appellation « type de réacteur » est indiquée soit l'appellation traditionnelle du type envisagé, soit la référence à un réacteur universellement connu.

On remarquera que, en règle générale, les réacteurs de recherche sont la propriété d'organismes nationaux, d'universités ou de groupements industriels ; leur utilisation répond soit à la fonction d'un instrument de recherche pure, soit à celle d'un outil de perfectionnement industriel.

REACTEURS DE RECHERCHE

**dont la construction a été commencée ou terminée ou dont la
réalisation a été décidée**

| | | |
|---|--|---|
| Désignation | BR-1 | BR-2 |
| Emplacement | Mol | Mol |
| Pays | Belgique | Belgique |
| Type | uranium naturel - graphite | uranium-béryllium-eau légère (U-Be-H ₂ O) - modèle « M.T.R. » |
| Puissance thermique | actuellement 4 MW | 50 MW (25 MW au 1 ^{er} stade) |
| Flux de neutrons thermiques maximum | 2×10^{12} n/cm ² sec. | $8,6 \times 10^{14}$ n/cm ² sec. |
| Combustible en U 235 | 24 t d'uranium métal | 4 kg d'uranium métal |
| Enrichissement du combustible | uranium naturel | supérieur à 90 % |
| Modérateur | graphite | béryllium + eau |
| Fluide de refroidissement | air | eau |
| Utilisation principale | recherches physiques - radio-isotopes | essai de matériaux |
| Date de criticalité ou situation fin 1957 | 11 mai 1956 | prévue début 1960 |
| Propriétaire | Centre d'étude de l'énergie nucléaire (C.E.N.) | Centre d'étude de l'énergie nucléaire (C.E.N.) |
| Fournisseur principal | de nationalité belge | Nuclear Development Associates (N.D.A.) - (U.S.A.) |

| | | | |
|---|--|--|---|
| Désignation | — | — | — |
| Emplacement | Munich | Hambourg | Francfort |
| Pays | Allemagne | Allemagne | Allemagne |
| Type | piscine | piscine | homogène et à eau bouillante |
| Puissance thermique | 1 MW | 1 MW, plus tard 5 MW | 50 kW |
| Flux de neutrons thermiques maximum | $6,6 \times 10^{12}$ n/cm ² s | 2×10^{13} n/cm ² s | 10^{12} n/cm ² sec. |
| Combustible | uranium enrichi | uranium enrichi | sulfate d'uranyl en solution aqueuse |
| Enrichissement du combustible en U 235 | 20 % | 20 % | 20 % |
| Modérateur | eau légère | eau légère | eau légère |
| Fluide de refroidissement | eau légère | eau légère | eau légère |
| Utilisation principale | recherche | recherche | recherche |
| Date de criticalité ou situation fin 1957 | en fonctionnement | en construction | entrera prochainement en fonctionnement |
| Propriétaire | Bavière | Société pour l'utilisation de l'énergie nucléaire dans la construction navale et la navigation à r.l. Hambourg | Hesse |
| Fournisseur principal | American Machine & Foundry (U.S.A.) | Babcock & Wilcox (U.S.A.) | North American Aviation Inc. (U.S.A.) |

| | | | |
|---|---|---|--|
| Berlin | Stetternich près de Jülich | Stetternich près de Jülich | Carlsruhe |
| Allemagne | Allemagne | Allemagne | Allemagne |
| homogène et à eau bouillante | « Merlin » | « Dido » | construction alle- mande FR2 (hé- téroène) |
| 50 kW | 2 MW, plus tard 5 MW | 10 MW | 10-12 MW |
| 10^{12} n/cm ² sec. | 5×10^{13} n/cm ² s | 10^{14} n/cm ² sec. | 3×10^{13} n/cm ² s |
| sulfate d'uranyl en solution aqueuse | uranium enrichi | uranium enrichi | uranium naturel |
| 20 % | 20 % | environ 90 % | uranium naturel |
| eau légère | eau légère | eau lourde | eau lourde |
| eau légère | eau légère | eau lourde | eau lourde |
| recherche | recherche | recherche | recherche |
| entrera prochaine- ment en fonction- nement | sera prochainement mis en construc- tion | projeté | en construction |
| Berlin | Rhénanie du Nord Westphalie | — | Kernreaktor Bau- und Betriebs GmbH. Carls- ruhe |
| North American Aviation Inc. (U.S.A.) | A.E.I. John Thomp- son Nuclear Energy Co (Royaume-Uni) | Head Wrightson Proc. Ltd. (Royaume-Uni) | Kernreaktor Bau- und Betriebs GmbH. Carls- ruhe (République fédé- rurale) |

| Désignation | ZOE | EL 2 | EL 3 | Aquilon |
|---|--|-------------------------------------|--|-------------------------------------|
| Emplacement | Fontenay-aux-Roses | Saclay | Saclay | Saclay |
| Pays | France | France | France | France |
| Type | à eau lourde | à eau lourde | à eau lourde | — |
| Puissance thermique | 150 kW | 2.500 kW | 15 kW | zéro |
| Flux de neutrons thermiques maximum | 10^{12} n/cm ² s | 10^{13} n/cm ² s | 10^{14} n/cm ² s | 10^7 n/cm ² sec. |
| Combustible | uranium naturel | uranium naturel | uranium légèrement enrichi | uranium naturel |
| Enrichissement du combustible en U 235 | — | — | — | — |
| Modérateur | eau lourde - réflecteur en graphite | eau lourde - réflecteur en graphite | eau lourde - réflecteur en graphite | eau lourde - réflecteur en graphite |
| Fluide de refroidissement | eau lourde | eau lourde | eau lourde | eau lourde |
| Utilisation principale | recherches de base | recherches et essais de matériaux | recherches et essais de matériaux | étude de réseaux |
| Date de criticalité ou situation fin 1957 | 15.12.1948 | 21.10.1952 | 4.7.1957 | 11.8.1956 |
| Propriétaire | Commissariat à l'Energie atomique (C.E.A.) | C.E.A. | C.E.A. | C.E.A. |
| Fournisseur principal | de nationalité française | de nationalité française | Chantiers de l'Atlantique, avec concours de France-Atome | de nationalité française |

| | | | | |
|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|---|-------------------------------------|
| Melusine | Triton | Minerve | Proserpine | Alizé |
| Grenoble | Fontenay-aux-Roses | Fontenay-aux-Roses | Saclay | Saclay |
| France | France | France | France | France |
| piscine | piscine | piscine | homogène | — |
| 1.000 kW | 1.000 kW | très faible | faible (1W env.) | très faible |
| 10^{13} n/cm ² sec | 10^{13} n/cm ² s | 10^{11} n/cm ² s | 5×10^7 n/cm ² s | 5×10^7 n/cm ² s |
| uranium enrichi | uranium enrichi | uranium enrichi | plutonium en solution dans l'eau légère | variable |
| — | — | — | — | — |
| eau légère (H ₂ O) | eau légère (H ₂ O) | eau légère (H ₂ O) | glucine (BeO) et graphite | eau légère |
| eau légère | eau légère | eau légère | néant | eau légère |
| étude de réseaux | étude sur la protection | contrôle de pureté des matériaux | étude de l'utilisation du plutonium | étude de réseaux |
| prévue en juillet 1958 | prévue en janvier 1959 | prévue en avril 1959 | 17.3.58 | février 1959 |
| C.E.A. | C.E.A. | C.E.A. | C.E.A. | C.E.A. |
| Indatom | Indatom | Seratom et Indatom | de nationalité française | C.A.R.A. |

| | | | | |
|---|---|--|----------------------------------|---|
| Désignation | Ispra 1 | R.S 1 - Avogadro | — | — |
| Emplacement | Ispra | Saluggia (Vercelli) | dans les environs de Livourne | Milan |
| Pays | Italie | Italie | Italie | Italie |
| Type | CP-5 | piscine | piscine | homogène à solution |
| Puissance thermique | 5 MW | initialement 1 MW, à porter plus tard à 5 MW | 1 MW | 50 kW |
| Flux de neutrons thermiques maximum | 10^{14} n/cm ² sec. | 10^{13} n/cm ² sec. | 10^{12} n/cm ² sec. | 10^{12} n/cm ² sec. |
| Combustible | environ 8 kg U 235 sous forme d'alliage U-Al | alliage U-Al (gainé à l'Al) - environ 3,5 kg | alliage d'U-Al | solution de sulfate d'uranyl |
| Enrichissement du combustible en U 235 | 20 % | 20 % | 20 % | 20 % |
| Modérateur | eau lourde (D2O) | eau légère (H2O) | eau lég. (H2O) | eau légère (H2O) |
| Fluide de refroidissement | eau lourde (D2O) | eau légère (H2O) | eau lég. (H2O) | eau légère (H2O) |
| Utilisation principale | recherches | recherches | recherches | formation spécialistes et recherches |
| Date de criticalité ou situation fin 1957 | vers février/mars 1959 | fin février 1959 | — | mars 1959 |
| Propriétaire | C.N.R.N. | SORIN | CAMEN | Centre d'étude E. Fermi de l'école polytechnique de Milan |
| Fournisseur principal | American Car & Foundry (A.C.F. Industries) (U.S.A.) | American Machine & Foundry (A.M.F. Atomics) (U.S.A.) | — (U.S.A.) | Atomics International (North American Aviation) (U.S.A.) |

| | | | |
|--|---|--|--|
| Désignation | H.F.R. | H.O.R. | à suspension |
| Emplacement | Petten (N.H.) | Delft | Arnhem |
| Pays | Pays-Bas | Pays-Bas | Pays-Bas |
| Type | réacteur de haut flux modèle « M.T.R. » | piscine | homogène à suspension aqueuse |
| Puissance thermique | 20 MW | 100 kW | zéro |
| Flux de neutrons thermiques maximum | 4×10^{14} n/cm ² sec. | $1,1 \times 10^{12}$ n/cm ² sec. | — |
| Combustible | 4,2 kg d'uranium métal- lique | 3,5 kg d'uranium enrichi métallique | 1 kg d'uranium 235 sous forme de UO ₂ enrichi en suspension dans l'eau lé- gère (H ₂ O) |
| Enrichissement du combus- tible en U 235 | 90 % | 20 % | — |
| Modérateur | eau légère (H ₂ O) | eau légère (H ₂ O) | eau légère (H ₂ O) |
| Fluide de refroidissement | eau légère (H ₂ O) | eau légère (H ₂ O) | suspension d'oxyde d'ura- nium (UO ₂) dans l'eau légère |
| Utilisation principale | recherches nucléaires et essai des matériaux | éducation et recherche | recherches pour production de puissance |
| Date de criticalité ou situa- tion fin 1957 | 1959 | — | — |
| Propriétaire | Reactor Centrum Neder- land (R.C.N.) | Gouvernement des Pays- Bas | Reactor Centrum Neder- land (R.C.N.) et KEMA |
| Fournisseur principal | American Car & Found- ry (U.S.A.) | American Machine & Foundry (A.M.F. Ato- mics) (U.S.A.) | — |

5.3. Remarques finales

Le présent chapitre ayant uniquement pour but de faire ressortir les liens qui existent entre la recherche et les applications industrielles, on réservera un examen plus approfondi de la recherche et des réacteurs de recherche pour le Rapport que la Commission d'Euratom publiera ultérieurement sur ce sujet.

On remarquera cependant, pour mettre davantage encore en relief l'importance de la recherche, que cette liaison apparaît très nettement dans les pays les plus avancés au point de vue des applications nucléaires, particulièrement aux Etats-Unis et en Grande-Bretagne.

Les besoins militaires, ainsi que l'engouement de l'industrie américaine pour l'énergie nucléaire, ont suscité aux Etats-Unis la construction de très nombreux réacteurs de recherche de tous types. Leur nombre se monte à une centaine pour les unités déjà construites, en construction ou en projet.

En Grande-Bretagne, le nombre de réacteurs de recherche construits peut paraître faible en rapport avec l'effort poursuivi par ce pays dans la voie de la production d'électricité d'origine nucléaire. La diversité des études en Grande-Bretagne ne couvre pas un champ aussi large que celui des recherches nucléaires aux Etats-Unis. Il est cependant indiscutable qu'en ce qui concerne les recherches de base, le travail du United Kingdom Atomic Energy Authority (U.K.A.E.A.) est remarquable. La grande diversité des types de réacteurs dont l'Atomic Energy Commission (A.E.C.) a suscité la construction aux Etats-Unis est à la base de nombreuses recherches théoriques et pratiques. En Grande-Bretagne, comme les réacteurs de puissance procèdent pratiquement de deux modèles seulement, le champ des investigations s'en trouve nécessairement plus restreint.

Une des conséquences de l'engouement industriel américain pour l'énergie nucléaire s'est aussi traduite par la construction de nombreux réacteurs destinés à la formation de spécialistes (training). Diverses universités possèdent leur réacteur propre. Il en est de même dans l'industrie, où des sociétés possèdent leur propre réacteur, alors qu'il n'existe pas de réacteurs de recherche privés en Angleterre. Peut-être s'agit-il ici d'un des aspects traditionnels de la psychologie industrielle américaine, et l'on doit constater en tout cas que cela vaut aux sciences et aux techniques nucléaires une diversité sans égale des champs d'expérience.

CHAPITRE 6

REACTEURS DE PUISSANCE

6.1. Introduction

Comme il est exposé au chapitre 9, l'énergie nucléaire pourra apporter à la production d'énergie de l'Europe occidentale une contribution importante, tout particulièrement dans le domaine de la production d'électricité.

Les réacteurs de puissance sont basés sur la libération d'énergie thermique qui accompagne les phénomènes de fission, sur la transformation de cette énergie calorifique en énergie mécanique et sur l'utilisation de cette dernière dans des générateurs d'électricité. La transformation directe d'énergie de fission en énergie électrique n'est jamais réalisée dans les réacteurs.

Le fluide transporteur de chaleur peut être conduit directement à la turbine, mais dans la plupart des centrales nucléaires on effectue un échange de chaleur préalable. Ainsi, le fluide de refroidissement du réacteur circule en circuit fermé. Limitée par les températures du fluide transporteur de chaleur à l'entrée et à la sortie du réacteur, l'énergie thermique n'engendre de l'énergie électrique que dans une proportion relativement faible. Il est impossible de détailler ici tous les facteurs qui interviennent dans l'extraction efficace de la chaleur produite dans un réacteur, mais il suffit de remarquer que le rendement, exprimé sous forme de rapport entre l'énergie électrique obtenue et l'énergie thermique de départ, se situe, pour les centrales nucléaires projetées, entre 20 et 30 pour-cent. Ce chiffre est inférieur à celui des centrales conventionnelles les plus modernes.

Il est, en outre, possible d'employer l'énergie thermique directement, soit pour le chauffage de locaux ou d'appareils, soit de recourir à des réacteurs pour s'approvisionner en vapeur, à de multiples usages.

Enfin, l'utilisation des réacteurs pour la propulsion navale offre un grand intérêt. Cinq des six pays membres sont des

nations maritimes ; pour elles, les réacteurs de propulsion navale constituent donc un objet de recherche et de mise au point qui présente une grande signification.

Pour chacune de ces formes de production d'énergie à l'aide de réacteurs nucléaires, le stade actuel de développement se présente comme suit :

6.2. Types de réacteurs nucléaires

Les centrales nucléaires destinées à la production d'énergie électrique peuvent être divisées d'après les types de réacteurs utilisés.

1. les réacteurs à gaz et à graphite, tels que ceux installés à Calder Hall en Grande-Bretagne ;
2. les réacteurs à l'eau légère ou lourde sous pression, bien connus sous l'abréviation de « PWR » (pressurized water reactor) ; un réacteur de ce type fonctionne actuellement à Shippingport dans la première centrale nucléaire américaine de puissance ;
3. les réacteurs à l'eau légère ou lourde bouillante, dénommés « BWR » (boiling water reactor) ; ces réacteurs sont largement expérimentés dans les grands laboratoires américains ;
4. les réacteurs modérés au graphite, avec le sodium comme échangeur de chaleur ; ils sont désignés par l'abréviation « SGR » (sodium graphite reactor) ;
5. les réacteurs à modérateur organique, par exemple le di-phényl ou terphényl, connus sous l'abréviation de « OMRE » (organic moderator reactor experiment) ; un réacteur de ce type a été construit en Amérique ;
6. les réacteurs-surgénérateurs (type breeder) ; l'un d'eux, à l'échelle industrielle, est en construction à Dounreay (Ecosse).

Les différents types présentent chacun leurs avantages et répondent plus spécifiquement à certains buts. Le réacteur à graphite, par exemple, est lourd et volumineux, eu égard à sa capacité énergétique, mais il fonctionne dans de bonnes conditions économiques et techniques à l'uranium naturel, ce qui n'est pas possible pour les autres types, sauf recours à l'eau lourde.

Pour l'exploitation des PWR, on doit recourir à l'uranium enrichi, mais le réacteur est moins volumineux et plus léger. Ce réacteur se prête, semble-t-il, mieux que ceux du premier type à l'application dans la navigation.

L'emploi d'eau à haute température, comme dans le PWR, implique des pressions relativement grandes et donc des techniques appropriées de construction du matériel. Si l'on construit un réacteur à eau bouillante, tel le BWR, la construction sera plus simple, précisément par suite de la réduction des pressions : l'on évite, par exemple, le recours à des récipients résistant à des pressions de 100 atmosphères ou plus. Ce type convient notamment à des applications dans lesquelles l'énergie thermique est directement utilisée.

En ce qui concerne le modérateur, dans les types BWR et PWR on peut choisir de l'eau lourde ou de l'eau légère. L'eau lourde est un excellent modérateur, mais son prix élevé et la difficulté d'en obtenir les quantités nécessaires n'en permettent pas toujours l'usage. C'est pourquoi l'eau lourde a été, jusqu'à présent, utilisée en premier lieu dans les réacteurs de recherche de dimension modérée. On effectue actuellement des études sur l'utilisation de l'eau lourde dans des réacteurs de puissance. L'utilisation d'un modérateur organique dans un réacteur OMRE permet de combiner une température élevée avec une pression basse. Les modérateurs étudiés en Amérique, diphényl et terphényl, sont solides à la température et à la pression normales. Dans les conditions d'utilisation, ils sont liquides et ont des qualités acceptables à la fois en tant que modérateur et pour le transport de chaleur. A l'échelle des applications industrielles, le OMRE n'est pas aussi avancé que les autres types mentionnés ci-dessus.

6.3. La situation dans divers pays d'Euratom

6.3.1. Belgique

Une centrale nucléaire expérimentale est en construction pour le Centre d'étude de l'énergie nucléaire à Mol, qui est le maître de l'œuvre.

Ce réacteur, dénommé BR-3, est du type PWR à forte pression (140 kg/cm²). Sa puissance électrique brute atteindra 11.500 kWe, soit une puissance nette de 10.500 kWe. Le combustible utilisé sera de l'uranium enrichi à 4,5 %, réparti dans

32 éléments et sous forme de pastilles d'oxyde d'uranium. Les barres de contrôle seront cruciformes et au nombre de 12. Le flux de neutrons thermiques maximum régnant à l'intérieur du noyau s'élèvera à $8,57 \cdot 10^{13}$ n/cm² sec. et le flux moyen à $1,83 \cdot 10^{13}$ n/cm² sec. Parmi les autres caractéristiques, citons la pression d'admission à la turbine de 36,6 kg/cm², une température de 244°C et un rendement brut atteignant 26,7 %. Le réacteur, y compris le cycle primaire, sera placé dans un container en tôle d'acier d'une épaisseur de 28 mm, dont le diamètre est de 16,50 m et la hauteur de 32 m. Cette centrale de puissance sera reliée à l'ensemble du réseau belge de distribution d'électricité. Sa mise en service est prévue pour le début de 1960.

Pour les installations de puissance ultérieures, l'industrie belge de l'électricité n'a pas encore définitivement arrêté le choix des types de réacteurs qui seront mis en œuvre.

Un projet de réacteur, avec une puissance d'environ 150 MWe, est étudié. Il s'agit du projet dénommé CNI (Centrale nucléaire Interescaut). Sa mise en service est prévue pour 1962-1963.

Une autre centrale, de même puissance, est également prévue pour 1962-1963.

Pour 1967, on envisage la construction de deux centrales nucléaires d'une puissance unitaire de 120 à 150 MWe, soit au total 240 à 300 MWe. A ce moment, la puissance électrique nucléaire installée totale serait de quelque 550 à 600 MWe.

Au surplus, une société belge, agissant de concert avec un bureau d'étude des Etats-Unis, a mis au point un projet de centrale BWR, prévoyant l'utilisation de vapeur à haute température obtenue par surchauffe au mazout.

6.3.2. République fédérale d'Allemagne

D'ici 1965, 4 ou 5 centrales nucléaires, d'une puissance électrique globale d'environ 500 MWe, seront vraisemblablement construites et mises en service sur le territoire de la République fédérale d'Allemagne.

La préparation des commandes afférentes à la construction de ces centrales qui seront, en ordre principal, passées à l'industrie nationale, est assurée par quatre groupes d'entreprises de production et de distribution d'électricité, constitués avec

siège à Hanovre, Düsseldorf, Stuttgart et Munich ⁽¹⁾, ainsi que par une seule entreprise, la Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk AG (RWE), à Essen.

L'industrie nucléaire allemande, notamment les grandes firmes d'électrotechnique et de construction de machines et chaudières à vapeur, qui ont créé des services internes spécialement consacrés aux activités nucléaires, élabore actuellement des projets de centrales nucléaires équipées des types de réacteurs suivants :

| N° | Combustibles | Modérateur | Agent de refroidissement |
|----|-----------------------------------|--|----------------------------|
| 1 | uranium naturel | eau lourde | gaz sous haute pression |
| 2 | uranium naturel | eau lourde (sous pression) | eau lourde (sous pression) |
| 3 | uranium naturel | eau lourde | substance organique |
| 4 | uranium naturel | graphite | gaz |
| 5 | uranium naturel | graphite | sodium liquide |
| 6 | uranium légèrement enrichi | eau légère (bouillante) | eau légère (bouillante) |
| 7 | uranium légèrement enrichi | graphite | gaz sous haute pression |
| 8 | uranium légèrement enrichi | substance organique | substance organique |
| 9 | uranium enrichi à 20 % et thorium | réacteur surgénérateur à haute température | gaz |

Le dernier type (n° 9), dans lequel les éléments de combustible ont une forme sphérique, est une nouvelle création de deux sociétés allemandes. Celles-ci ont soumis récemment une offre définitive, pour la construction d'une centrale nucléaire d'essai recourant à ce type de réacteur d'une puissance électrique de 15 MWe, au groupement des entreprises de production d'élec-

(1) Les noms des membres de ces quatre groupes figurent en annexe du chapitre I.

tricité à Düsseldorf (voir chapitre I). Les entreprises intéressées insistent pour que la construction débute à la fin de 1958.

En ce qui concerne les autres types ci-dessus, ce sont ceux indiqués sous les numéros 1, 2 et 6 dont les travaux préparatoires sont les plus avancés.

Pour le type n° 4, on étudie surtout, en collaboration avec des firmes anglaises, le perfectionnement du réacteur du type « Calder Hall ».

La construction des réacteurs de puissance qui font l'objet des négociations poursuivies entre les entreprises de production et de distribution d'électricité, d'une part, et de l'industrie nucléaire, d'autre part, construction qui porte sur une puissance installée de quelque 500 MWe, implique des investissements pour un montant de 150 à 190 millions d'unités UEP.

D'après une estimation globale, les besoins en matières premières nucléaires atteindraient les ordres de grandeur suivants :

400 t d'uranium naturel
 40 t d'uranium faiblement enrichi (de 1 à 1,5 %)
 300 kg d'uranium enrichi à 20 %
 2.000 t de graphite
 150 t d'eau lourde
 50-60 t de zirconium
 environ 50 t de thorium

Cette énumération ne comprend pas les matières nécessaires pour le réacteur à refroidissement organique.

Les investissements prévus pour fournir ces matières premières à l'industrie nucléaire, si elles ne sont pas importées de l'étranger, sont de l'ordre de 70 millions d'unités UEP. Ce montant s'ajoute à celui, déjà mentionné, des frais de construction des centrales nucléaires et de mise en place du dispositif de sécurité et de protection contre les radiations. Si l'on tient compte, en outre, des dépenses relatives à l'analyse des matières, aux études concernant le choix des emplacements et à divers préparatifs techniques et chimiques, ainsi que des cotisations à diverses organisations internationales (Euratom, C.E.R.N., O.E.C.E., etc...), les dépenses jusqu'à 1965 atteindraient un total de quelque 500 à 600 millions d'unités UEP, dont une partie serait fournie par l'Etat.

Réacteurs de propulsion

La « Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schiff-fahrt » (société pour l'exploitation de l'énergie

nucléaire dans la construction navale et les transports maritimes, s.a.r.l.) à Hambourg, s'est chargée d'examiner les divers types de réacteurs convenant particulièrement à la propulsion des navires et de construire ensuite, avec l'aide de l'industrie, un réacteur approprié à cette utilisation.

Pour préparer et faciliter son travail, la Société a construit à Geesthacht-Tesperhude, près de Hambourg, un réacteur d'essai d'une puissance thermique de 5 MW Babcock & Wilcox, type « swimming pool », qui pourra fonctionner au cours des prochains mois. Il n'a pas encore été décidé pour quelle date et de quelle manière le premier réacteur de puissance pour la propulsion navale sera construit.

6.3.3. France

Dès 1953, sous l'impulsion du Commissariat à l'Énergie atomique, la France a entrepris un programme de réacteurs de puissance dont les réalisations sont actuellement achevées ou en cours d'achèvement.

Le type de réacteur adopté tient compte du fait que la France dispose d'importantes ressources en uranium, mais qu'une usine de séparation isotopique n'a pas encore été créée.

Le Commissariat désire, en effet, développer une voie adaptée aux possibilités de l'industrie française, compte tenu des connaissances actuelles en matière d'énergie nucléaire. Cette voie est celle des réacteurs à uranium naturel, modérés au graphite et refroidis au gaz.

Les pouvoirs publics ont décidé d'engager un programme de production d'électricité utilisant la chaleur dégagée par de tels réacteurs du type à gaz : la puissance électrique de ces centrales nucléaires, à mettre en service avant 1965, doit s'élever à 850 MWe.

Le programme d'ensemble français vient d'être porté à 1.200 MWe ; le complément doit être réalisé avec des réacteurs d'autres types, à terminer avant la même date.

La France est, pour l'instant, le seul des six pays de la Communauté où fonctionne déjà une centrale nucléaire de puissance, qui garde néanmoins un caractère expérimental. Il s'agit du réacteur G1. Celui-ci fait partie d'une série de trois réacteurs, les G1, G2 et G3, du centre de Marcoule, dans le département du Gard à proximité du Rhône. Bien que ces réacteurs, con-

struits par le Commissariat à l'Énergie atomique, aient pour but principal la production de plutonium, ceux-ci réalisent aussi un programme de production d'énergie électrique, sous la responsabilité d'Electricité de France.

Le réacteur G1, qui est devenu critique le 7 janvier 1956, avait vu ses travaux débiter en mai 1954. Les premiers kWh de la centrale électrique associée ont été produits en septembre 1956.

Ce réacteur a été calculé pour une puissance thermique de 40 MW. Il contient environ 1.200 tonnes de graphite de pureté nucléaire. La charge totale des éléments de combustible s'élève à 100 tonnes approximativement. Le débit d'air de refroidissement, qui sort du réacteur à une température voisine de 200°C, a été fixé à 250 kg par seconde dans les conditions normales de fonctionnement.

Le cœur de G1 est un prisme de graphite d'axe horizontal, s'inscrivant dans un cylindre de 8 mètres de long et de 8 mètres de diamètre. Il est percé de 1.338 canaux horizontaux dans lesquels sont introduites les cartouches d'uranium. L'arrivée d'air de refroidissement est constituée par une fente de 80 mm qui coupe ce prisme perpendiculairement à son axe. Les barres de contrôle et de sécurité peuvent se déplacer dans des trous verticaux ménagés dans l'empilement, afin de régler la puissance du réacteur et d'en assurer la sécurité.

Les cartouches d'uranium utilisées dans G1 sont des éléments longs de 3,80 mètres, renfermant des barreaux d'uranium naturel gainés par une enveloppe de magnésium munie d'ailettes longitudinales. La centrale de récupération d'énergie associée à la pile G1 a été conçue en tenant compte des caractéristiques particulières du fluide de refroidissement.

La puissance nette prévue à la marche normale continue est de 5,1 MWe. Les accumulateurs d'eau chaude permettent d'atteindre en surcharge la puissance nette de 7,2 MWe.

C'est pour ces caractéristiques, marche normale et surcharge, que les installations ont été calculées.

Il faut cependant noter que la puissance des auxiliaires du réacteur G1 est de l'ordre de 8 MWe, dépassant assez sensiblement la capacité de l'usine de récupération.

Les réacteurs G2 et G3

Ces deux réacteurs, qui sont identiques, sont d'une conception analogue à celle de G1, à l'exception cependant du système de

refroidissement qui est, dans ce cas, assuré en circuit fermé par du gaz carbonique à 15 kg de pression par cm^2 , alors que dans G1 il s'agit d'air en circuit ouvert à la pression atmosphérique. Cette disposition a permis d'augmenter considérablement la puissance des réacteurs.

La puissance thermique de la pile est de 150 MW. Le cœur est un prisme qui vient s'inscrire dans un cylindre de 8,45 mètres de long et de 7,85 mètres de diamètre, l'épaisseur du réflecteur périphérique étant de 1 mètre. Le nombre de canaux est de 1.200. Le poids total du graphite s'élève à 1.000 tonnes environ. La charge d'uranium est de 100 tonnes. Elle est constituée par des éléments de combustible de 30 centimètres de long. Ces éléments de combustible sont gainés avec un alliage de magnésium et comportent, comme pour G1, des ailettes améliorant les conditions d'échange de chaleur entre l'uranium et le fluide de refroidissement. Le débit du fluide de refroidissement se répartit en deux zones et est au total de 997 kg par seconde. La température maximum de sortie est de 254°C. Un ensemble de quatre échangeurs de chaleur permet d'alimenter la centrale de récupération, dont la puissance nominale est de 45.000 kVA. Elle alimente également des turbo-soufflantes assurant le refroidissement du réacteur. La puissance de ces turbo-soufflantes est de 9.600 chevaux. Finalement, la puissance nette aux bornes de l'installation, compte tenu de la puissance nette électrique absorbée par les auxiliaires, est de 25 MWe. On peut espérer, dans une hypothèse plus favorable, que cette puissance nette pourrait s'élever à 35 MWe.

Les travaux du réacteur G2 ont débuté à la fin de 1956. La criticabilité de G2 est prévue pour la deuxième partie de l'année 1958 ; celle de G3 interviendra environ six mois plus tard.

L'ensemble des installations de Marcoule représente une puissance électrique nette d'environ 65 MWe. Cette puissance est à prendre en compte sur le programme de 850 MWe de réacteurs à gaz décidé par le Gouvernement français, programme à réaliser avant 1965 comme indiqué ci-dessus. Pour remplir ce programme, Electricité de France a décidé, en principe, d'engager tous les dix-huit mois une nouvelle centrale, en essayant d'en doubler à chaque fois la puissance. La première installation engagée par Electricité de France est la centrale nucléaire d'EDF1, en cours de construction à Chinon sur les bords de la Loire à proximité du confluent de la Loire et de la Vienne.

La centrale nucléaire EDF1

La conception d'ensemble de cette installation est analogue à celle des installations G2 et G3. En bénéficiant de l'expérience des précédentes réalisations, on s'est attaché à réduire le prix de revient de l'installation. Mais cependant, la possibilité de mettre en œuvre des conceptions nouvelles n'a pas été exclue. C'est ainsi que le réacteur est à canaux verticaux, alors que G2 et G3 comportent des canaux horizontaux. Le cœur du réacteur est contenu dans un caisson en acier, alors que dans G2 et G3 il est contenu dans des caissons en béton précontraint. La puissance de cette installation nouvelle a été portée à 300 MW thermiques. Elle correspond à une puissance électrique nette de 70 MWe. Le cœur du réacteur est compris dans un cylindre de 9 mètres de long et de 8,30 mètres de diamètre.

Le réacteur est refroidi par un débit de 1.300 kg par seconde de gaz carbonique à 25 kg/cm² de pression entrant à 140°C et sortant à 345°C. Un ensemble de 120 échangeurs de chaleur permet d'alimenter la station de production d'énergie, dont la puissance électrique nominale est de 102,5 MVA. Le système de refroidissement est actionné par une soufflante unique, qui exige une puissance maximum de 8.000 kW.

Les travaux de EDF1 ont été entrepris au début de 1957 et l'installation devrait entrer en service industriel à la fin de 1959.

La centrale nucléaire EDF2

Dans le cadre du programme d'ensemble, l'Electricité de France a décidé de construire, à proximité de EDF1, une nouvelle installation nucléaire tenant compte de l'expérience acquise. La conception d'ensemble se rapproche de celle de EDF1. On s'est attaché à accroître la puissance disponible. Les caractéristiques générales de cette installation ne sont pas encore arrêtées définitivement. Cependant, la puissance thermique devrait être de l'ordre de 700 MW, permettant une puissance électrique nette de 170 MWe. Le tonnage d'uranium devrait être de l'ordre de 250 tonnes. Les premières commandes de matériel ont déjà été passées. On envisage la mise en service de ces installations pour le courant de l'année 1961.

Autres projets industriels

Plusieurs sociétés françaises se sont groupées pour répondre à des appels d'offres lancés par des industriels hollandais et

italiens en vue de la fourniture de centrales nucléaires d'une puissance électrique nette de 150 MWe. Ces sociétés ont étudié en détail un projet de réacteur à gaz, à uranium naturel modéré au graphite, et ont remis dans les délais prévus leurs propositions de prix pour la fourniture de l'ensemble.

Un groupe de travail a été créé par le C.E.A. et le Secrétariat d'Etat à la marine marchande pour l'étude et l'expérimentation à terre d'un réacteur pour pétroliers. Des industriels français coopèrent avec ce groupe.

Plus récemment, un groupement de constructeurs, comprenant des sociétés de chantiers navals, s'est constitué en vue de coordonner les efforts des constructeurs dans le domaine de la propulsion marine au sein de ces diverses associations. Plusieurs projets de réacteurs de pétroliers sont actuellement à l'étude.

6.3.4. Italie

Il n'existe pas encore de réacteurs de puissance en Italie. Diverses industries ont cependant déjà mis au point des programmes dans ce domaine. Actuellement, on peut indiquer deux projets dont la réalisation a été décidée.

AGIP-Nucleare réalisera, par l'intermédiaire de la Società Italiana Meridionale Energia Atomica (SIMEA), une centrale nucléaire du type Calder Hall de 200 MWe, contenant 245 tonnes d'uranium naturel.

La Società Elettronucleare Italiana (SELNI) construira une centrale nucléaire de 135 MWe avec des réacteurs du type à eau sous pression (type PWR). Ce réacteur utilisera comme combustible de l'oxyde d'uranium (UO₂) enrichi à 2,6 %.

La Società Elettronucleare Nazionale (SENN) doit construire une centrale nucléaire de 130 à 150 MWe (projet ENSI). Une large consultation de constructeurs étrangers, auxquels il a été demandé de s'assurer le concours de constructeurs italiens, doit permettre de fixer sous peu le type de réacteur.

En même temps, les deux projets suivants sont étudiés :

— par la Società Ricerche Impianti Nucleari (SORIN) : un

réacteur de 150 MWe, dont le type n'a pas encore été déterminé ;

- par l'AGIP-Nucleare : une centrale de 130-180 MWe avec des réacteurs du type à eau sous pression.

En outre, le Comité national pour les recherches nucléaires (C.N.R.N.) a effectué une étude préliminaire sur quelques types de réacteurs prototypes ;

avec FIAT, participant du SORIN :

- un réacteur à combustible métallique liquide ;

avec MONTECATINI, participant du SORIN :

- un réacteur à modérateur organique ;

avec AGIP-Nucleare :

- un réacteur refroidi au gaz, de type avancé.

En même temps, dans le domaine des réacteurs de puissance, le C.N.R.N. a procédé à un examen comparatif entre le réacteur refroidi au gaz du type Calder Hall et le réacteur à eau sous pression.

6.3.5. Pays-Bas

Le Ministère des Affaires économiques des Pays-Bas prévoit la réalisation, pour 1965, de centrales nucléaires avec une puissance électrique totale de 400 MWe, pour atteindre en 1970 1.200 MWe.

Les consultations avec des groupes étrangers sont en cours pour la construction d'une première centrale nucléaire aux Pays-Bas de 150 MWe. A construire au risque commun de l'ensemble des producteurs d'électricité, cette centrale pourrait être achevée en 1962.

Quelques entreprises industrielles de constructeurs de chaudières pour des centrales électriques ont exprimé l'intention de fonder une société anonyme en vue de stimuler le développement du réacteur homogène aqueux à suspension, mentionné dans le chapitre 5 (KEMA-R.C.N.), pour la production d'électricité. En premier lieu, on s'appliquera à réaliser un projet de construction d'une centrale expérimentale de 10 MWe.

REACTEURS DE PUISSANCE

**dont la construction a été commencée ou terminée
ou dont la réalisation a été décidée**

| Désignation | BR-3 | G1 | G2 |
|---|--|-----------------------------------|---|
| Emplacement | Mol | Marcoule (Gard) | Marcoule (Gard) |
| Pays | Belgique | France | France |
| Type du réacteur | PWR | gaz-graphite | gaz-graphite |
| Puissance thermique en MW | 43 MW | 40 MW | 150 MW |
| Puissance électrique en MW | 10,5 MWe | 5,1 MWe | 30 MWe |
| Charge en combustibles | 2,8 tonnes d'UO ₂ | 100 t d'uranium naturel | 100 t d'uranium naturel |
| Enrichissement en U 235 | 4,5 % | naturel | naturel |
| Modérateur | eau légère | graphite | graphite |
| Fluide de refroidissement | eau légère | air | gaz carbonique |
| Température (en °C) à la sortie du réacteur | 271 | 200 | 255 |
| Pression dans le réacteur en kg/cm ² | 140 | pression atmosphérique | 15 |
| Vapeur | à l'échangeur et à pleine charge : 36 kg/cm ² absol. vap. sèche et saturée ; à ch. nulle 50 kg/cm ² absol. | — | — |
| Criticalité à la fin de 1957 | pas critique ; prévue pour 1960 | critique depuis septembre 1956 | pas critique ; prévue pr 2 ^e semestre 1958 |
| Coût total de l'installation (1) | 10 millions UEP | 23 millions UEP | 30 millions UEP |
| Coût par kW | 1.000 UEP | 4.500 UEP | 1.000 UEP |
| Propriétaire | Centre d'étude de l'énergie nucléaire | Commissariat à l'Énergie atomique | C.E.A. |
| Fournisseur principal | Westinghouse | — | — |
| Ingénieur de conseil principal | Bureau d'études nucl. av. la coll. de Belgo Nucléaire | S.F.A.C. | Alsacienne |

(1) Sans tenir compte des recherches et des études, de la fabrication

| G3 | EDF1 | EDF2 | SIMEA | SELNI |
|--|-----------------------------------|-------------------------------------|--|-----------------------------------|
| Marcoule (Gard) | Chinon (Indre & Loire) | Chinon (Indre & Loire) | au sud de Rome | — |
| France | France | France | Italie | Italie |
| gaz-graphite | gaz-graphite | gaz-graphite | gaz-graphite | PWR |
| 150 MW | 300 MW | 700 MW | 711 MW | 482 MW |
| 30 MWe | 70 MWe | 170 MWe | 200 MWe | 134 MWe |
| 100 t d'uranium naturel | 140 t d'uranium naturel | 250 t d'uranium naturel | 245 t d'uranium naturel | 27,5 t d'UO2 |
| naturel | naturel | naturel | naturel | 2,6 % |
| graphite | graphite | graphite | graphite | eau légère |
| gaz carbonique | gaz carbonique | gaz carbonique | gaz carbonique | eau légère |
| 255 | 345 | 345 | 390 | 274 |
| 15 | 25 | 25 | 13,8 | 140 |
| — | — | — | 52,3 kg/cm ² 13,7 kg/cm ² (371° C) | 35 kg/cm ² (241° C) |
| pas critique ; prévue pr 1 ^{er} semestre 1959 | pas critique ; prévue pr fin 1959 | pas critique ; prévue pr cour. 1961 | pas critique ; prévue pr 1962 | pas critique ; prévue pour 1961 |
| 30 millions UEP | 33 millions UEP | 60 millions UEP | 80 millions UEP | 25 millions UEP |
| 1.000 UEP | 500 UEP | 350 UEP | 400 UEP | 186 UEP |
| C.E.A. | Electricité de France | E.D.F. | SIMEA | SELNI |
| — | — | — | NPPC | Westinghouse |
| Alsacienne | — | — | — | — |

et du renoncement aux redevances pour l'utilisation du combustible.

6.4. Remarques finales

La description sommaire, donnée dans ce chapitre, des réacteurs de puissance actuellement en construction ou projetés dans chacun des pays de la Communauté, montre que l'industrie européenne est, d'ores et déjà, en mesure de participer plus ou moins activement à leur réalisation. Cette participation s'étend depuis l'étude de tout ou partie d'un projet jusqu'à l'exécution de pièces détachées ou de l'ensemble d'un réacteur, suivant l'état des connaissances et des possibilités de fabrication.

Les programmes qui ont été annoncés ou arrêtés dépendent, dans une très large mesure, de la politique générale de chacun des pays en matière d'énergie nucléaire. Les uns ont décidé de mettre en œuvre leurs propres ressources nationales. Les autres envisagent l'approvisionnement en combustibles nucléaires par l'étranger. Ils envisagent également une collaboration plus ou moins étroite avec l'industrie des pays ayant déjà fortement développé les applications de l'énergie nucléaire. Ceci a donc une incidence directe sur le choix des réacteurs et des moyens nécessaires pour assurer leur construction et leur exploitation.

Les efforts des six pays de la Communauté se concentrent sur des centrales de grande puissance, afin d'obtenir une production économique d'électricité. On a également construit ou on construit actuellement des centrales de faible puissance (p. ex. le BR-3 et les G1, G2 et G3), mais elles doivent être considérées comme des prototypes pour les réacteurs économiques, c'est-à-dire pour des centrales ayant une puissance de 100 MWe et plus. Parmi les réacteurs de cette puissance, dont la construction a été commencée ou dont la réalisation a été décidée, figurent le type gaz-graphite aussi bien que le type PWR. Le type BWR n'apparaît actuellement que comme centrale expérimentale, d'une puissance électrique d'environ 10 MWe.

Comme l'Angleterre, la France a concentré ses efforts sur le réacteur gaz-graphite. Les Etats-Unis, par contre, ont divisé leurs efforts entre divers types : le PWR et le BWR en sont les types les plus avancés.

Cette différence de conception dans les programmes de réalisation immédiate et de développement d'avenir en matière d'énergie nucléaire résulte d'une différence fondamentale dans les données économiques qui ont prévalu jusqu'ici en Europe, d'une part, et en U.S.A., d'autre part.

Aux Etats-Unis, les réserves actuelles de charbon, de pétrole et de gaz permettent au pays de ne pas se pencher, dès à présent, sur une production massive d'énergie électrique d'origine nucléaire. Le programme de l'Atomic Energy Commission (A.E.C.) est plutôt dirigé vers le perfectionnement des modèles de réacteurs spécialement étudiés aux U.S.A. ne présentent pas, contingences immédiates, en vue de se ménager ultérieurement les meilleures chances d'obtenir un prix de revient du kWe nucléaire le plus bas. Ceci ne signifie d'ailleurs pas que les types de réacteurs spécialement étudiés aux U.S.A. ne présentent pas dès à présent, un intérêt considérable pour une application immédiate en Europe dans des conditions économiques acceptables. En conséquence, les divers programmes américains prévoient de nombreux réacteurs de types très diversifiés, dont la puissance unitaire, au niveau de prototype, ne dépasse pas 40 MWe.

Ces réacteurs ne sont pas nécessairement conçus pour produire de l'électricité à bon compte dans l'immédiat, mais sont, au contraire, étudiés et réalisés dans l'unique but de poursuivre des recherches permettant de réaliser, au moment voulu dans l'avenir, des réacteurs de puissance dans les meilleures conditions possibles de prix de revient.

Pour l'Europe des Six, la situation énergétique est semblable à celle du Royaume-Uni. Néanmoins, les perspectives décrites dans ce chapitre montrent que les recherches concernant les réacteurs de puissance sont dirigées vers un grand nombre de types différents.

En dehors des installations de grande puissance, uniquement les Etats-Unis ont étudié de façon très approfondie la construction de petits réacteurs (environ 5 MWe) à utiliser pour les besoins militaires ou comme source de puissance dans des endroits peu peuplés. Ceci mérite de retenir l'attention des pays de l'Euratom pour les besoins d'outre-mer.

Signalons, enfin, une autre différence marquante entre les programmes de recherche anglais et américain en matière de réacteurs de puissance : celle de l'utilisation quasi générale aux Etats-Unis d'uranium enrichi, alors que l'industrie européenne reste attachée de préférence à une solution basée sur l'utilisation d'uranium naturel.

Dans le domaine de la propulsion navale, les pays de la Communauté, tout comme d'ailleurs le Royaume-Uni, étudient les possibilités offertes par l'énergie nucléaire. Ces possibilités

ont été mises clairement en lumière par certaines des réalisations navales des U.S.A. et aussi par les projets d'équipement d'unités de la marine marchande américaine de moyens de propulsion à base d'énergie nucléaire. Pour la propulsion nucléaire des avions et des fusées, il n'y a pas encore d'activité dans nos pays, contrairement à ce qui se passe aux Etats-Unis et en Grande-Bretagne.

CHAPITRE 7

RADIO-ISOTOPES : PRODUCTION ET APPLICATIONS

7.1. Introduction

L'emploi pacifique de la fission nucléaire a pratiquement porté, dès le début, sur la production énergétique et aussi sur l'utilisation des isotopes radio-actifs.

L'usage d'isotopes n'est pas une nouveauté. Mais le progrès technique, qui en a élargi les possibilités de production, devrait évidemment étendre leur utilisation dans de multiples domaines, ceux de la médecine et de la science en général, de l'industrie et de l'agriculture.

Comme on le sait, les divers isotopes d'un même élément présentent les mêmes caractéristiques chimiques, mais différent entre eux sous le rapport de leurs propriétés physiques, par exemple sous celui du nombre de masse. Les uns sont stables, les autres ne le sont pas. Ces derniers sont appelés isotopes (radio)actifs ou radio-isotopes. En fonction de leur instabilité, ils se transforment, à l'issue de périodes de longueur déterminée, en d'autres isotopes qui, à leur tour, peuvent être stables ou non.

En cours de transformation, il se produit une émission de radiations (alpha, bêta ou gamma) qui peuvent être mises à profit dans toute une série d'applications pratiques. Certains des radio-isotopes connus se trouvent dans la nature (une cinquantaine environ) alors que d'autres (700 environ) sont produits artificiellement.

Les radio-isotopes se caractérisent par leur « période », c'est-à-dire par le temps nécessaire à la décroissance radio-active de la moitié des noyaux présents ; ils se distinguent aussi par la nature et l'énergie du rayonnement émis.

Les échantillons représentent, au surplus, une certaine activité spécifique, c'est-à-dire une radio-activité (en désintégrations par seconde ou en curies) plus ou moins élevée par unité de poids de l'échantillon.

Production des radio-isotopes

Il y a trois méthodes d'obtention de radio-isotopes. La première consiste à soumettre des substances à une irradiation dans des réacteurs. Les réactions nucléaires ainsi provoquées, suivies éventuellement d'une ou de plusieurs décroissances radio-actives, fournissent des isotopes radio-actifs de l'élément initial ou d'un autre élément. La seconde méthode consiste à retraiter le combustible nucléaire après utilisation dans un réacteur et à en séparer les composants : ce système s'applique aux radio-isotopes produits par fission nucléaire. Enfin, la troisième méthode consiste à soumettre certains éléments à des irradiations en utilisant des accélérateurs de particules.

Les trois procédés présentent des avantages et des inconvénients. La première méthode est la plus largement utilisée actuellement, mais on peut envisager, pour l'avenir, de recourir plus fréquemment à la deuxième méthode. La gamme totale des radio-isotopes est considérable, mais en réalité le nombre de ceux qui sont communément disponibles dans le commerce est d'environ une centaine.

Application des radio-isotopes

Les applications des radio-isotopes s'accroissent continuellement et il est difficile de les énumérer toutes. La classification suivante, assez représentative bien qu'incomplète, s'inspire des développements récents.

1. *Recherche*

Il s'agit essentiellement de l'utilisation des radio-isotopes pour les recherches fondamentales et appliquées ; leurs applications sont en augmentation continue. Les études sur la diffusion à l'état solide, sur l'adsorption ionique par les surfaces, les déterminations d'épaisseur de dépôts et la mesure de la pression exercée par des vapeurs métalliques, représentent certaines des applications les plus communes.

2. *Médecine*

A. Etude des phénomènes biologiques ou biochimiques chez les êtres vivants : grâce au fait que les isotopes d'un même élément se comportent d'une manière identique au point de vue chimique, mais que les isotopes actifs émettent des radiations, il est possible, en y mélangeant une certaine quantité de radio-isotopes, de suivre le parcours d'un produit

donné dans un corps humain ou animal. En particulier, on se sert des isotopes qui présentent les caractéristiques suivantes :

- a) absorption sélective par l'organe ou les systèmes d'organes à l'étude :
- b) période suffisamment brève ;
- c) rapide élimination par l'organisme.

A l'aide des radio-isotopes, on étudie, par exemple, le comportement de certains médicaments dans les organismes vivants.

- B. Applications diagnostiques : elles sont possibles, dans certains cas, grâce aux caractéristiques sélectives que présentent certains éléments vis-à-vis de certains organes. Citons, comme d'un usage désormais courant dans le diagnostic médical, les radiographies, l'examen des fonctions de la thyroïde, la localisation des tumeurs du cerveau, l'examen du métabolisme du fer dans l'organisme humain, l'étude de la circulation sanguine à différents points de vue, la radiocardiographie et le fonctionnement du cœur, etc.
- C. Applications thérapeutiques : celles-ci sont bien connues et les premières expériences remontent à l'époque où les isotopes radio-actifs furent découverts, c'est-à-dire bien avant l'apparition des réacteurs nucléaires. Actuellement, les applications se font de diverses façons : par contact externe direct d'un radio-isotope avec la partie malade, si celle-ci est externe ; par irradiation interne dans le cas contraire, par ingestion ou injection selon les circonstances.
- D. Etudes génétiques : certains résultats ont été acquis dans ce domaine.

3. *Agriculture et industries alimentaires*

Dans l'agriculture, il s'agit d'études relatives aux phénomènes biologiques ou biochimiques des organismes végétaux et l'on utilise les méthodes décrites ci-avant à ce propos. Il est ainsi possible d'étudier la circulation de la lymphe dans les plantes et les processus d'assimilation de substances déterminées. Les études effectuées sur la photosynthèse de la chlorophylle présentent une importance particulière.

En matière d'alimentation on étudie la conservation des denrées par une irradiation intense par des sources radio-actives.

4. Industrie

Les applications y sont innombrables. Les plus importantes sont :

- A. Mesure industrielle de densité, d'épaisseur, du niveau des liquides, grâce à la mesure des radiations émises par des sources déterminées et dont l'intensité est influencée par la matière en examen.
- B. Radiographie industrielle (pour remplacer les machines à rayons X encombrantes et coûteuses), applications à l'industrie du pétrole (puits d'extraction et raffineries du pétrole), contrôle de la portée des fluides.
- C. Contrôle de corrosion dans les parties enterrées, éloignées ou d'accès difficile, d'installations ou de machines.
- D. Irradiations diverses, dans les industries chimiques, pour obtenir des modifications dans l'état moléculaire des matières.

7.2. La situation dans divers pays d'Euratom

Si on examine la situation dans les divers pays, on note que les orientations sont plus ou moins les mêmes et que l'usage des radio-isotopes est partout en augmentation.

7.2.1. Belgique

On produit, dans les installations du C.E.N. (réacteur BR-1) quelques isotopes radio-actifs qui sont essentiellement utilisés dans la recherche scientifique, en Belgique, au Congo belge et à l'étranger. Certains d'entre eux ont également des applications médicales.

La mise en service du réacteur d'essai des matériaux (BR-2) permettra de produire les isotopes à haute activité spécifique, qui devront encore jusque là être importés de Grande-Bretagne, de France ou des Etats-Unis.

La mise en œuvre des radio-isotopes pourra donc constituer prochainement une activité spécifique et des sociétés sont, dès à présent, organisées pour construire les appareillages nécessaires au conditionnement de ces produits. Ces activités bénéficieront des connaissances relatives à la manipulation et au traitement des produits radio-actifs qu'une longue expérience a données à l'industrie belge.

Les radio-isotopes les plus importants produits en Belgique sont : l'or 198 (Au 198), le cobalt 60 (Co 60), le tritium 3 (H 3), l'iode 131 (I 131), l'iridium 192 (Ir 192) et le phosphore 32 (P 32).

Le tableau suivant donne une idée de l'importance croissante de l'application des radio-isotopes en Belgique.

Tableau : Utilisation des isotopes en Belgique

(en unités UEP)

| Année | Utilisations industrielles & agricoles | Utilisations médicales | Utilisations diverses y inclus les scientifiques | Totaux annuels |
|-------|--|------------------------|--|----------------|
| 1955 | 3.300 | 10.300 | 8.700 | 22.300 |
| 1956 | 2.900 | 17.200 | 10.500 | 30.600 |
| 1957 | 5.700 | 19.300 | 12.600 | 37.600 |

7.2.2. République fédérale d'Allemagne

Les radio-isotopes sont actuellement produits en quantités assez limitées, par le réacteur de recherche de Munich.

Les importations se sont élevées de 130.000 unités U.E.P. en 1956 à 162.000 unités U.E.P. en 1957, mais étant donné la baisse des prix elles représentaient 4.444 curies en 1957 contre seulement la moitié, soit 2.214 curies, en 1956.

Au cours des mêmes années, le nombre des utilisateurs a augmenté dans la proportion suivante :

| | 1956 | 1957 |
|-----------------------------|------|------|
| Médecine et recherche | 306 | 385 |
| Industrie | 136 | 160 |
| Nombre total d'utilisations | 442 | 545 |

Au total, on utilise quelque 65 radio-isotopes différents, dont les plus importants sont : l'or 198 (Au 198), le cobalt 60 (Co 60), l'iridium 192 (Ir 192), l'iode 131 (I 131) et le phosphore 32 (P 32). Des sources de rayonnement d'une activité de une curie et plus ont été importées de l'étranger.

En médecine, l'utilisation des radio-isotopes est devenue plus importante pour le diagnostic et la recherche que pour la thérapeutique. En ce qui concerne la thérapeutique, il convient de signaler que plusieurs appareils au cobalt de forte intensité sont désormais disponibles et que, dans le traitement du cancer du poumon, l'or 198 radio-actif colloïdal a vu son utilisation augmenter.

Dans l'industrie, les mesures d'épaisseur de feuille de toutes catégories (plastique, papier et tôle) se sont fortement développées. Au total, on emploie déjà pour les mesures d'épaisseur, environ 200 appareils utilisant des préparations gainées. L'emploi dans l'industrie, aux fins d'essais de matériaux sans destruction et de mesure du niveau de remplissage de récipients, a pris un développement particulier.

L'emploi de radio-isotopes dans l'industrie des corps lumineux est nouveau dans certains secteurs, en extension dans d'autres. On fait agir des radiations de krypton 85 (Kr 85) sur un phosphore lumineux recouvrant la partie intérieure du corps lumineux. L'entretien des installations de signalisations lumineuses sur les bouées de haute mer est extrêmement coûteux. Par l'utilisation de radio-isotopes, on espère pouvoir abaisser considérablement ces dépenses en réduisant fortement la fréquence des contrôles.

Par suite de la baisse récente des prix du cobalt 60 (Co 60), l'usage industriel de ce produit est devenu plus accessible et se répandra largement. Des développements sont en cours dans différents secteurs, notamment dans la production des matières plastiques. L'industrie alimentaire a, elle aussi, commencé des essais en ce qui concerne la conservation des denrées.

7.2.3. France

C'est le « Service des Radio-éléments » (Département de Chimie) du C.E.A. qui reçoit les commandes des utilisateurs et fait effectuer dans les réacteurs de Fontenay-aux-Roses, Saclay et Marcoule, les irradiations de produits à maintenir en stock (soufre, cobalt, etc...). Les produits, devenus radio-actifs, subissent parfois avant leur distribution un traitement chimique qui peut comporter des opérations assez complexes et délicates. La plus grande partie de ces opérations s'effectue dans le laboratoire de haute activité, spécialement équipé à cet effet (gaines d'aération, pinces de manipulation à distance, etc.). Le Service des Radio-éléments artificiels satisfait 80 % des besoins français.

Les utilisateurs sont des hôpitaux (10 %) des laboratoires universitaires (30 %) enfin des établissements industriels (60 %).

Le phosphore 32 (P 32), l'iode 131 (I 131), l'or 198 (Au 198) et le sodium 24 (Na 24) restent les plus demandés, en raison de leur emploi médical. Une partie des radio-isotopes consommés en France (presque 20 %) est encore importée de l'étranger.

Le nombre total des livraisons faites à des utilisateurs français est en accroissement constant : en effet, on est passé de 3.300 livraisons en 1954 (dont 65 % sont fournis par le C.E.A.) à 6.000 livraisons en 1957 (dont 80 % sont fournis par le C.E.A.). Les radio-isotopes importés proviennent de Grande-Bretagne, pour les sources dont les activités spécifiques ne sont pas très élevées, comme le cobalt 60 (Co 60) et l'iridium 192 (Ir 192), et en particulier du Canada et des Etats-Unis pour les sources d'activité spécifique élevée.

Le nombre total des utilisateurs est également en accroissement constant, comme on peut le constater en comparant la situation existante à la fin de 1954 et celle de fin 1957.

| | <i>fin 1954</i> | <i>fin 1957</i> |
|---------------------------|-----------------|-----------------|
| Médecine | 27 | 35 |
| Recherche | 60 | 120 |
| Industrie | 57 | 365 |
| Totalité des utilisateurs | 144 | 520 |

La répartition entre les principaux usages industriels est la suivante (fin 1957) :

| | |
|--|-----|
| Radiographie | 109 |
| Mesure des épaisseurs | 109 |
| Traceurs | 48 |
| Contrôle d'appareils | 33 |
| Utilisation ou étude des effets du rayonnement | 16 |
| Ionisation | 15 |
| Biologie animale | 13 |
| Repérage d'objets | 13 |
| Peinture luminescente | 6 |
| Biologie végétale | 3 |
| Totalité des usages industriels | 365 |

La valeur globale des radio-isotopes vendus en France atteignait, en 1957, 95.000 unités U.E.P.

7.2.4. Italie

Etant donné l'absence de réacteurs de recherche et de puissance, il n'existe pour le moment aucune production locale de radio-isotopes. En revanche, leurs applications, rendues possibles par des achats à l'étranger, sont très nombreuses.

Plusieurs industries utilisent des sources de cobalt 60 (Co 60) dans divers buts, mais principalement pour le contrôle des soudures ou des pièces moulées. De plus, les applications de radio-isotopes comme source d'irradiation et comme traceur sont déjà assez fréquentes. On peut dire que tous ou presque tous les Instituts universitaires de chimie, pharmacologie, biologie, etc... en font un usage courant, même pour l'étude de problèmes aussi délicats que les équilibres des membranes dans la biologie animale.

Les applications thérapeutiques dans des centres appropriés ou auprès de cliniques et d'hôpitaux sont extrêmement fréquentes et beaucoup de ces instituts possèdent des bombes au cobalt.

On doit encore citer les applications pharmaceutiques et les applications à la microbiologie, à la pharmacologie, à la parasitologie et au domaine des vitamines.

A tout ceci s'ajoutera bientôt, à l'initiative du C.N.R.N., l'activité de recherche et d'étude du « Centre de recherches pour les applications des radio-isotopes en biologie et en agriculture. » Le projet comprend l'installation de cultures sous irradiations gamma et d'un complexe de laboratoires destiné aux divers secteurs de l'agriculture et de l'élevage. Il vise à compléter les initiatives déjà prises par des entreprises privées et par une division spécialisée du Ministère de l'Agriculture.

7.2.5. Luxembourg

Le seul radio-isotope utilisé pour la gammagraphie dans l'industrie métallurgique, une source de cobalt 60 (Co 60), a été importé.

Dans l'avenir, on prévoit l'utilisation de radio-isotopes en médecine.

7.2.6. Pays-Bas

Aux Pays-Bas, les radio-isotopes sont appliqués dans divers domaines de la recherche scientifique, de la médecine et de l'industrie. De plus, des produits radio-actifs sont, depuis quelques années déjà, fabriqués par l'industrie pharmaceutique néerlandaise en utilisant partiellement des produits irradiés provenant du synchrocyclotron de l'Institut voor Kernonderzoek (IKO — Institut pour les recherches nucléaires) à Amsterdam. La plupart des produits de réacteur sont achetés actuellement à Saclay (France) et, en moindres quantités, à Harwell (Angleterre), à Kjeller (Norvège) et au Canada.

Les produits qu'on fabrique régulièrement sont, entre autres : des composés de phosphore 32 (P 32), de soufre 35 (S 35), d'antimoine 124 (Sb 124), iode 131 (I 131), ainsi que de cobalt 60 (Co 60) sous forme d'aiguillettes, de perles, de fils et de sources radiographiques ou dans des récipients en aluminium, l'or 198 (Au 198) en solution colloïdale et sous forme de « seeds », l'iridium 192 (Ir 192) et le caesium 137 (Cs 137), comme source radiographique. En outre, on s'est spécialisé dans des produits pour la recherche biochimique et médicale et la thérapeutique, comme par exemple la Vitamine B12 marquée de cobalt 58 (Co 58) et l'insuline contenant de l'iode 131 (I 131).

7.3. Remarques finales

La situation actuelle semble indiquer que les applications de radio-isotopes s'accroîtront sans doute encore dans les prochaines années. Cette conviction repose sur les considérations suivantes :

En premier lieu, la production de radio-isotopes (total en curies par an) est en accroissement du fait que l'on commence à les extraire en quantités toujours plus considérables à partir des produits de fission. En second lieu, et pour la même raison, le nombre des radio-isotopes disponibles va en augmentant. En outre, les études et les découvertes que l'on continue à faire dans tous les domaines scientifiques et industriels ont pour conséquence d'accroître l'importance des radio-isotopes.

L'accroissement en valeur de la production, des importations ou des utilisations des radio-isotopes, donne une idée trop faible de l'évolution, car les prix des radio-isotopes ont baissé au cours des dernières années et continuent à le faire.

Ces conclusions ne sont pas seulement vraies pour les pays de la Communauté, mais aussi pour les Etats-Unis et le Royaume-Uni. La situation dans ces deux pays est extrêmement favorable, vu le nombre de réacteurs nucléaires qu'ils possèdent. En conséquence, ils produisent, utilisent et exportent en quantités considérables. Il faut noter, à ce sujet, qu'aux Etats-Unis, en dehors de l'Atomic Energy Commission, il y a des sociétés privées qui vendent des radio-isotopes ou qui préparent des composés chimiques dans lesquels se trouvent des radio-isotopes.

En Grande-Bretagne, ces activités sont de la compétence de l'Atomic Energy Authority.

CHAPITRE 8

L'ENERGIE NUCLEAIRE ET L'INDUSTRIE

8.1. Introduction

Pour connaître la situation d'un secteur industriel et pour en apprécier l'importance dans une économie nationale, il convient de recueillir une série d'indications convergentes, généralement issues d'enquêtes statistiques. Celles-ci ne sont pas encore disponibles pour l'industrie nucléaire des six pays d'Euratom. Pour cette raison, il est difficile de chiffrer la valeur de la production nucléaire de la Communauté et de fournir des données sur les effectifs occupés, les chiffres d'affaires et les investissements.

Les activités industrielles nucléaires se caractérisent, à la fois, par l'utilisation de techniques spécifiques entièrement nouvelles et par la possibilité d'utiliser, en les adaptant, certaines possibilités des industries existantes. Pour pouvoir établir une vue d'ensemble de la situation actuelle, il faut tout d'abord distinguer les principales catégories d'utilisation et de production industrielles.

8.1.1. Principales catégories d'utilisation industrielle de l'énergie nucléaire

1. *L'utilisation directe de la chaleur dégagée par les réactions nucléaires*

La chaleur libérée dans un réacteur peut être utilisée directement pour des besoins de chauffage ou à des fins industrielles.

Cette utilisation n'en est encore qu'à ses débuts. Elle recèle cependant de larges possibilités de développement et peut acquérir à l'avenir une importance économique considérable.

2. *L'utilisation indirecte de la chaleur dégagée par les réactions nucléaires*

Cette chaleur peut être transformée en force motrice et utilisée ainsi, soit pour propulser des moyens de transport, soit pour actionner des alternateurs et produire de l'électricité.

Ce sont ces deux utilisations, et particulièrement la seconde, qui présentent actuellement le plus grand intérêt. Elles ont d'ailleurs déjà fait l'objet de réalisations concrètes.

3. *L'utilisation du rayonnement*

Cette utilisation dans certaines techniques de l'industrie chimique (en vue d'influencer des réactions chimiques par le rayonnement nucléaire) est susceptible de prendre une importance économique considérable à l'avenir. D'une part, elle permet d'améliorer les caractéristiques de certaines matières déjà connues (par exemple, la résistance à la chaleur) et de produire de nouveaux matériaux avec des caractéristiques nouvelles, d'autre part, les travaux de recherche entrepris par l'industrie chimique démontrent qu'à l'avenir on pourrait vraisemblablement réduire les prix de revient des procédés chimiques qui nécessitaient, jusqu'ici, des températures ou des pressions très élevées, ou encore la présence de catalyseurs coûteux. En utilisant des sources radio-actives, ces mêmes procédés semblent pouvoir être réalisés à la pression atmosphérique, à des températures réduites et sans charges exorbitantes de catalyseurs.

L'utilisation du rayonnement pour effectuer des contrôles et des mesures permet une réduction des coûts de production, ainsi qu'une amélioration de la qualité des fabricats. On produit déjà, dans la Communauté, des isotopes, sources de rayonnement, ainsi que des instruments de mesure et des appareils de réglage pour les applications les plus diverses. L'industrie intéressée peut se les procurer et les utiliser sans trop de difficultés.

8.1.2. **Possibilités industrielles offertes par l'avènement de l'énergie nucléaire**

Les principales de ces possibilités sont énumérées ci-après.

1. *Projet et entreprise générale d'une installation nucléaire*

La tâche d'« architecte nucléaire » est exécutée par des bureaux d'études et d'ingénieurs-conseils. Cette activité peut être exercée soit par des bureaux indépendants, soit par des sociétés productrices. Elle comporte :

- l'établissement des plans d'ensemble et de détail,
- la passation des commandes à l'industrie,
- la surveillance de la construction et du montage.

2. *Fourniture de matériaux*

Ici, on peut distinguer :

- la prospection et la production de minerais et de concentrés nucléaires,
- la production et le retraitement des combustibles nucléaires,
- la production de modérateurs, de matériaux de structure et de matériaux divers.

3. *Fourniture de produits finis, d'appareils et de services*

On peut citer en particulier :

- les constructions mécaniques et métalliques,
- les appareils électromécaniques,
- la construction d'installations chimiques et métallurgiques,
- l'appareillage électronique,
- les appareils mécaniques de précision,
- le génie civil.

4. *Fournitures diverses*

On peut donner les exemples suivants : vêtements de protection, emballage et moyens de transport des substances radio-actives, etc...

On peut conclure de l'exposé qui précède, que, d'une part, tous les secteurs de l'industrie sont à même d'utiliser l'énergie nucléaire sous ses diverses formes, d'autre part, la plupart des secteurs industriels sont susceptibles de fournir des produits ou des services en relation avec l'énergie nucléaire.

Il en résulte qu'il est difficile de formuler des définitions précises qui permettent d'effectuer des enquêtes statistiques sur la situation de l'industrie nucléaire dans la Communauté. Si l'on veut suivre son évolution, il faudra cependant établir, dans des délais rapprochés, les bases de telles statistiques.

8.2. **La situation dans divers pays d'Euratom**

8.2.1. **Belgique**

On peut considérer que l'industrie nucléaire belge avait pris son départ bien avant la guerre, en sa qualité de plus ancien

et de plus important producteur de radium. Ceci a permis à la Belgique de se placer dans une situation particulière favorable, non seulement dans toutes les industries impliquant le travail sous protection des matières radio-actives, mais aussi dans la production et le traitement de l'uranium.

Après la guerre, le besoin le plus pressant de l'industrie belge a été la formation des cadres, ingénieurs et physiciens, capables d'étudier les problèmes nouveaux posés par l'énergie nucléaire.

On peut estimer aujourd'hui à 150 ou 200 les spécialistes universitaires en physique ou en génie nucléaire. Il est actuellement impossible d'évaluer le nombre des ingénieurs et des scientifiques qui effectuent des travaux se rapportant à l'énergie nucléaire dans les nombreuses entreprises qui ne s'en occupent pas exclusivement.

L'énergie nucléaire présente en Belgique trois aspects fondamentaux.

1) Comme l'ensemble de la Communauté, la Belgique devra très prochainement faire face à un déficit en énergie classique. Afin d'éviter l'importation massive de combustibles étrangers, les sociétés d'électricité ont, dès à présent, préparé un programme important de construction de centrales nucléaires.

2) La Belgique est un pays de longue tradition industrielle. La fermeture de certains marchés traditionnels oblige l'industrie à s'adapter aux nécessités économiques du moment et à réaliser ces reconversions qui s'imposent aux nations largement dépendantes de l'exportation.

Actuellement, certaines industries belges fournissent des produits utilisés dans les applications de l'énergie nucléaire. Les industries étudient, en fonction du marché international aussi bien que du marché intérieur, les possibilités d'expansion de leurs fabrications nucléaires.

3) Enfin, la mise en valeur du potentiel industriel congolais ne peut être passée sous silence : au Congo belge se trouvent réunies des conditions de gisements miniers et de ressources hydrauliques qui peuvent rendre fort intéressant l'établissement, sur place, d'une industrie métallurgique et nucléaire.

Comme le chapitre 2 l'a déjà fait ressortir, des gisements sont actuellement exploités à une grande échelle, tandis que les réserves évaluées assurent l'avenir.

Le groupe de l'exploitation minière, de la production et de la transformation primaire en uranium métal, connaît également un grand développement. Ce même groupe s'occupe aussi de la production et du conditionnement du radium.

Un nombre important d'industries sont intéressées à des degrés divers au domaine nucléaire.

Des sociétés de participation, d'étude et d'exploitation de centrales électriques étudient actuellement les possibilités d'installer et d'exploiter des centrales nucléaires. Elles sont bien équipées pour effectuer d'importantes recherches. Elles ont aussi formé un Bureau d'études dans lequel un noyau de spécialistes étudie les problèmes pratiques relatifs à la production d'énergie électrique d'origine nucléaire.

Dans la sidérurgie, l'étude des aciers spéciaux est poursuivie systématiquement. Il en va de même de celle des nouvelles utilisations des isotopes radio-actifs. Les industries des fabrications métalliques et des métaux non-ferreux se préparent à fournir des éléments indispensables à l'équipement des centrales nucléaires.

Certaines sociétés ont étudié la mise en œuvre de bétons spéciaux et de bétons ordinaires, tant comme éléments de construction que comme matériau de protection dans des réacteurs nucléaires et des installations de traitement des déchets radio-actifs. Ces bétons sont également utilisés dans les ateliers et laboratoires où l'on traite des matériaux de radio-activité élevée.

Une branche de l'industrie belge, dans les dernières années, s'est spécialement intéressée aux applications de l'énergie nucléaire, sous l'aspect particulier du matériel électrique et électronique.

Enfin, l'industrie chimique, déjà productrice de produits dérivés du fluor, de tributylphosphate et de divers autres produits intéressant l'industrie nucléaire, effectue des recherches approfondies sur la fabrication de solvants et de produits chimiques intervenant dans le traitement du combustible irradié.

8.2.2. République fédérale d'Allemagne

Dans la République fédérale d'Allemagne, l'industrie n'est autorisée que depuis mai 1954 à exercer des activités dans le domaine de l'énergie atomique. L'industrie allemande n'a disposé, par rapport aux autres pays, que d'un délai relativement court

pour entreprendre des travaux de recherche scientifique et technique dans ce domaine et pour mettre en œuvre les moyens nécessaires.

C'est pour cette raison que l'on a effectué d'abord des travaux de recherche et de développement et entrepris la construction de réacteurs de recherche, dont certains ne sont pas encore achevés. La construction de réacteurs de puissance en est encore au stade des projets.

Une loi réglant les questions atomiques n'a pas encore été adoptée par le Bundestag. Quant aux lois déjà en vigueur dans certains « Länder », leur application a été limitée aux réacteurs de recherche.

Du point de vue énergétique, il convient de signaler qu'il a été possible de couvrir d'abord les besoins en énergie par la reconstruction et l'extension des installations conventionnelles, afin d'utiliser les importantes ressources énergétiques nationales. Aussi, au cours de ces dernières années, les projets de réacteurs de puissance n'ont-ils pas suscité un intérêt aussi pressant que dans les autres pays industrialisés de l'Europe. Les grandes entreprises ont, avant tout, effectué des études approfondies sur les possibilités qu'offre l'énergie nucléaire avant d'entreprendre la construction de réacteurs de puissance.

En dépit des difficultés qui viennent d'être signalées, l'industrie allemande est tout à fait à même d'apporter sa contribution dans le domaine nucléaire, notamment en ce qui concerne les secteurs de l'électrotechnique, de la chimie, de la métallurgie et de la construction mécanique. Les installations nécessaires existent ou sont en voie de construction.

Leur importance ressort des renseignements donnés dans d'autres chapitres de ce rapport. Si l'on considère qu'à la base de ce développement se trouvent de grandes entreprises disposant de moyens techniques très perfectionnés et d'une importante capacité de production, on arrive à la conclusion que, dès à présent, l'industrie allemande serait capable de réaliser la construction de centrales nucléaires et de leurs installations connexes. Il a été dit, au chapitre relatif aux réacteurs de puissance, que les entreprises de production d'énergie électrique en seront les maîtres d'œuvre. C'est d'elles que viendront les premières commandes importantes.

Jusqu'à présent, ce sont surtout les entreprises fournissant les installations de recherche nucléaire et les fabricants

d'appareillages de contrôle et de mesure, utilisant des sources radio-actives, qui ont eu l'occasion de développer leur production.

8.2.3. France

En ce qui concerne la situation de l'industrie française, il convient de souligner que celle-ci bénéficie d'une avance assez importante par rapport aux autres pays de la Communauté. Ceci tient au fait que la France a entrepris son effort en matière d'énergie nucléaire dès la fin de la guerre.

La part prise par les organismes publics est essentielle. C'est ce qui permet de donner un bilan global net des réalisations nucléaires en France, car la plupart des commandes sont passées pour le compte du Commissariat à l'Energie atomique, de l'Electricité de France et de plusieurs départements ministériels dont les budgets sont publiés.

C'est ainsi que le C.E.A. assure la presque totalité de la prospection et de la production du minerai, une part importante de la concentration de ce minerai, l'élaboration de l'uranium métal au Bouchet, la presque totalité des recherches à Châtillon, Saclay et Grenoble, et enfin la gestion du centre plutonigène de Marcoule.

Parallèlement, l'Electricité de France a la responsabilité du programme d'équipement des nouvelles centrales nucléaires de puissance.

Ces deux organismes sont pratiquement les deux grands chefs de file en matière d'industrie nucléaire.

L'ensemble de leurs dépenses, autres que les frais de fonctionnement, atteint 230 millions d'unités UEP pour l'année 1957. Sur ces 230 millions, 7 à 8 % seraient représentés par des études.

1. Le C.E.A.

En dépit d'une augmentation continue des crédits mis à sa disposition, ce n'est qu'à partir de 1955 que le C.E.A. reçut des moyens financiers plus importants qui lui ont permis d'accélérer sa croissance.

Le montant des autorisations d'engagement qui ont été consenties au C.E.A. pendant sa première période d'activité est de l'ordre de 35 millions d'unités UEP. Dans le cadre du premier

plan quinquennal de développement de l'énergie atomique 1952-1957, le Commissariat a disposé de crédits d'investissements s'élevant au total à 340 millions d'unités UEP. Le deuxième plan quinquennal de développement 1957-1961 est limité par une enveloppe financière de 1.200 millions d'unités UEP. En effet, le programme propre au C.E.A., pour les cinq années à venir, se subdivise en trois parties : un programme central concernant la production d'uranium, la poursuite des recherches et des expériences ainsi que la réalisation et l'exploitation des machines expérimentales et des prototypes ; des programmes commandés par différents départements ministériels ; des programmes dits « annexes » et concernant des investissements de nature industrielle inscrits au plan de modernisation.

L'ensemble des moyens financiers dont disposera le Commissariat à l'Energie atomique pour l'année 1958 est de l'ordre de 240 millions d'unités UEP, y compris les frais de fonctionnement.

Au point de vue du personnel, cet organisme comptait, en France, un effectif global de près de 10.000 personnes, au 31 décembre 1957. L'augmentation de l'effectif a d'ailleurs été continue depuis la première année d'existence du C.E.A. Encore à l'état embryonnaire, les services du C.E.A. employaient au total 236 personnes, le 31 décembre 1946.

Au 31 décembre 1957, sur 9.096 agents du C.E.A., on en trouve 5.225 au siège et aux centres de recherche et 3.871 aux centres d'exploitation (mines, usines du Bouchet, centre de Marcoule). Sur ce total, environ 20 % sont des ingénieurs, du personnel scientifique et des cadres.

2. *Electricité de France*

Le chapitre consacré aux réacteurs de puissance fait apparaître l'importance du programme français de réacteurs à gaz, dont l'objectif est de mettre en service pour 1965 une puissance électrique totale de 850 MWe. Il est envisagé de porter ce programme à 1.200 MWe, le complément étant constitué par des réacteurs d'autres types.

Au point de vue des effectifs, on peut estimer qu'environ 300 agents, dont environ 100 ingénieurs et cadres, sont affectés aux activités nucléaires à l'Electricité de France.

en millions d'unités UEP

| | 1956 | 1957 | 1958 | 1959 | 1960 | 1961 | Total |
|--|------|------|------|------|------|------|-------|
| Opérations déjà engagées | 3 | 10 | 17 | 23 | 24 | 23 | 100 |
| Opérations non engagées (Estimation pour le solde du programme de 850 MWe) | | | | 2 | 12 | 38 | 52 |
| | 3 | 10 | 17 | 25 | 36 | 61 | 152 |

3. Industries privées

Le programme du Commissariat et celui qui lui est lié de l'Electricité de France prévoient la réalisation par l'industrie française de l'ensemble des installations, depuis l'extraction minière jusqu'au traitement des combustibles irradiés, en passant par les réacteurs. Cette industrie est donc, d'ores et déjà, en mesure de produire l'ensemble des biens et produits nécessaires. Toutes les activités énumérées en tête de ce chapitre sont pratiquées à une échelle importante, ainsi que le montrent les précédents chapitres de ce rapport.

Compte tenu des autres organismes affectant des crédits à des études, des recherches et des réalisations nucléaires, le chiffre d'affaires de l'industrie nucléaire française peut actuellement être évalué, pour les trois années à venir, à 250 millions d'unités UEP par an.

En particulier, une enquête faite auprès des entreprises privées s'intéressant plus directement aux activités nucléaires, a montré que le chiffre d'affaires, pour 1957, de quinze sociétés spécialisées parmi les quelque soixante-quinze interrogées, s'élevait à environ 20 millions d'unités UEP.

Au cours de l'année 1957, les investissements effectués par 17 sociétés dépasseraient 20 millions d'unités UEP.

Au point de vue du personnel, 28 sociétés ayant répondu à l'enquête ont environ 5.000 agents, dont 600 ingénieurs et cadres, travaillant dans l'industrie nucléaire.

Ceci montre que l'industrie française a fourni un effort considérable d'adaptation et peut satisfaire aux demandes des

différents maîtres d'œuvre. Compte tenu des résultats, elle est en mesure d'intensifier son activité et de répondre à un accroissement important des programmes en cours.

8.2.4. Italie

Le problème énergétique se pose en Italie avec une acuité toute particulière. Aussi, les pouvoirs publics et les industriels italiens ont-ils décidé d'entreprendre un important programme de construction de centrales nucléaires, qui sera réalisé dans les prochaines années. L'industrie italienne envisage, certes, d'y associer des industriels étrangers bénéficiant d'une expérience avancée en matière nucléaire, mais elle doit aussi participer à la construction et à la fabrication d'une part importante de ces installations.

La production actuelle de l'industrie italienne dans les divers secteurs permet, en effet, de prévoir avec suffisamment de certitude qu'il sera en grande partie possible de faire face aux besoins spéciaux en matériel et en machines pour le développement du programme.

En se référant aux principaux secteurs d'activité nucléaire énumérés ci-dessus, on constate qu'en Italie, c'est surtout la production de produits finis et d'appareils qui s'est développée, les autres activités étant diversement représentées.

Des entreprises fabriquant des matériaux traditionnels et spéciaux, relatifs à l'industrie mécanique et électrique, n'attendent que la construction de réacteurs de recherche et de centrales nucléaires pour développer davantage leurs départements nucléaires.

L'effort initial le plus important a été fait, soit par des sociétés directement intéressées à la production d'électricité, soit par des sociétés intéressées aux problèmes généraux de la production d'énergie. C'est ainsi que les sociétés citées dans le présent rapport et celles dont on mentionne seulement les travaux déjà effectués ou en train de l'être, ont constitué des départements spécialisés avec un effectif total dépassant 700 agents, dont environ 250 ingénieurs, physiciens, chimistes et cadres.

8.2.5. Pays-Bas

L'industrie des Pays-Bas s'est plus spécialement orientée vers l'adaptation de ses productions nationales actuelles. Les produits qu'elle peut fournir dès maintenant pour la construc-

tion des réacteurs sont en premier lieu des appareils électroniques de réglage et de contrôle. En outre, une entreprise a mis au point des soupapes d'arrêt et des garnitures pour applications nucléaires. Ces valves sont déjà utilisées non seulement aux Pays-Bas, mais aussi en Suède où elles sont exportées.

Parmi les autres produits utilisés dans le domaine de l'énergie nucléaire, il faut citer les revêtements en polyvinyle contre la contamination, les verres de sécurité et les containers pour le transport des déchets radio-actifs.

En outre, une entreprise néerlandaise construit et exporte des cyclotrons.

Quant aux instruments, on fabrique, pour un grand nombre de travaux, des appareils de mesure des radiations.

Quelques entreprises ont entamé les études nécessaires pour adapter la plupart des pièces conventionnelles de centrales à l'usage dans les centrales nucléaires.

Investissements

On peut distinguer les investissements effectués dans les entreprises elles-mêmes et les contributions aux investissements dans les projets de recherche commune.

Le tableau suivant donne un aperçu des contributions au R.C.N.

| | |
|---------------------------------|---------------------------|
| Entreprises affiliées au R.C.N. | 1,8 millions d'unités UEP |
| Centrales électriques | 1,8 » » |
| Gouvernement | 3,6 » » |

Il semble que la plus grande partie des investissements des cinquante entreprises mentionnées soit représentée par leur contribution au R.C.N.

Parmi les exceptions, il faut tenir compte du secteur des appareillages de mesure électronique. Mais il est très difficile, sinon impossible, d'estimer le volume des investissements spécialement offerts à cette fin, car la production d'appareillages de mesure nucléaire est étroitement associée à la production des autres appareils électroniques. L'industrie de la construction mécanique fait, elle aussi, exception. D'après une estimation, elle aurait investi jusqu'à présent de six à huit millions d'unités UEP pour les applications nucléaires.

Personnel

Pour le personnel, tout comme pour les investissements, il est difficile, voire impossible, de séparer les activités nucléaires de l'ensemble des activités. Dans le secteur de la construction mécanique, il y aurait, d'après une estimation, 30-40 universitaires et ingénieurs occupés aux activités nucléaires. Les centres de recherche aux Pays-Bas — le R.C.N. a déjà été mentionné comme collaborateur scientifique de l'industrie — employent ensemble à peu près 100 ingénieurs ou universitaires.

8.3. Remarques finales

L'industrie des Etats membres de l'Euratom a déjà fait de grands efforts pour développer son activité dans le domaine nucléaire. Les prévisions montrent clairement que cette expansion va se poursuivre.

En effet, le potentiel économique de la Communauté est le plus important du monde libre, après celui des U.S.A. Si les activités nucléaires n'y ont encore qu'une part relativement restreinte, cela tient à des contingences diverses.

Dans certains pays, ces industries ont bénéficié initialement d'une aide gouvernementale considérable, due à l'intérêt que présentaient tout d'abord les applications militaires de l'énergie nucléaire. D'autre part, au Royaume-Uni, on a jugé nécessaire d'entreprendre un vaste programme de centrales nucléaires pour faire face à l'accroissement des besoins énergétiques.

Le retard que l'industrie européenne doit combler se concrétise dans les faits suivants.

Il est indispensable et urgent de former du personnel spécialisé : en Amérique, 100.000 personnes, dont 10.000 ingénieurs et scientifiques, travaillent dans l'industrie nucléaire privée ; au Royaume-Uni, le total du personnel de l'U.K.A.E.A. atteint le chiffre de 27.000.

Il faut acquérir, tant au point de vue scientifique qu'aux points de vue technologique et industriel, les connaissances et l'expérience qui font encore défaut en Europe.

L'ensemble des commandes passées ne constitue pas encore un marché suffisamment important pour les biens et produits de l'industrie nucléaire. Dans cet ordre d'idées, on peut signaler que, depuis sa création, la Commission américaine de l'Energie atomique a dépensé plus de 15 milliards de dollars, alors que,

par exemple, le Commissariat français n'a engagé, depuis son origine, qu'environ 450 millions d'unités UEP.

Cela n'a pas empêché l'industrie des six pays de la Communauté d'accroître continuellement, au cours des dernières années, ses activités dans le domaine de l'énergie nucléaire.

Il s'agit, dans un avenir rapproché, de mettre en œuvre les résultats des recherches et des travaux préparatoires déjà acquis et de donner de nouvelles impulsions au développement des installations de recherche et de fabrication. Ceci entraînera, sans doute, la collaboration d'une série d'entreprises, grandes et petites, qui apporteront à l'expansion de l'énergie nucléaire une série de concours appréciables. Il ne fait pas de doute que ceci implique nombre d'adaptations et de transformations de l'industrie classique. Le développement à prévoir doit avoir un caractère propre, intermédiaire entre celui de l'industrie américaine et celui de l'industrie anglaise. En effet, aux Etats-Unis, la recherche et la mise au point de nombreuses voies ont été facilitées par l'abondance des moyens disponibles. Il semble, cependant, que les efforts entrepris dans ce pays aient subi quelque découragement parmi tous ceux qui, il y a quelques années, croyaient à un démarrage foudroyant de l'énergie nucléaire. Par contre, au Royaume-Uni, les efforts se sont concentrés au maximum sur un programme pratiquement unique : un seul type de réacteur, gaz-graphite, a été retenu. Dans les six pays de la Communauté, la mise à disposition de larges possibilités industrielles et la coordination des efforts, facilitées par la création d'Euratom, sont susceptibles de donner plus d'efficacité à l'effort d'équipement nucléaire ; en particulier, les recherches sur les réacteurs pourront être concentrées sur un nombre de types judicieusement choisis.

Dans ces conditions, l'industrie européenne, renforcée par les perspectives de collaboration avec les industries américaines, anglaises et celles d'autres pays encore, est certainement en mesure, grâce à son potentiel et à sa technicité, de réaliser un vaste programme.



CHAPITRE 9

L'ECONOMIE ENERGETIQUE DE LA COMMUNAUTE

9.1. Introduction

Il convient, au terme de ce Rapport, d'examiner brièvement la contribution que peut apporter l'énergie nucléaire, sous forme de production d'électricité, à la couverture des besoins énergétiques de la Communauté.

Ce chapitre s'efforce donc de donner quelques indications sur l'évolution probable des besoins en énergie, sur les coûts de production de l'électricité classique et nucléaire, ainsi que sur les projets actuels en matière d'installation de centrales nucléaires.

9.2. Les besoins énergétiques et l'énergie nucléaire

L'évolution des besoins et de la production d'énergie dans la Communauté a été étudiée, d'une manière approfondie, au sein du Comité Mixte « Conseil des Ministres - Haute Autorité de la Communauté Européenne Charbon-Acier ». Les premiers résultats de ces études avaient d'ailleurs été utilisés dans le rapport élaboré au début de 1957 par MM. Armand, Etzel et Giordani sous le titre « Un objectif pour Euratom ». Par la suite, les travaux du Comité Mixte ont abouti à la publication, en novembre 1957, d'une première et très intéressante « Etude sur la structure et les tendances de l'économie énergétique dans les pays de la Communauté ». Ils ont, depuis lors, été poursuivis aux fins de mise à jour et d'approfondissement. Les nouvelles données prévisionnelles, d'ailleurs assez peu différentes, semble-t-il, des anciennes, n'ont cependant pas encore été publiées.

Aussi peut-on se borner ici à résumer très succinctement les indications relatives à la prévision des besoins et de la production.

9.2.1. Les besoins et la production d'énergie

Le Comité Mixte a estimé l'évolution des besoins énergétiques en la rattachant à l'évolution probable du produit na-

tional brut. Celle-ci a été établie à partir de 1955 et l'on prévoit, pour l'ensemble des six pays de la Communauté, un accroissement d'environ 50 % pour la période 1955-1965, 35 % pour la période 1965-1975, soit quelque 100 % ou un doublement pour l'ensemble des deux éléments.

L'accroissement des besoins en énergie est légèrement moindre. Compte tenu de la relation considérée comme probable entre l'évolution du produit national brut et celle des besoins en énergie, ceux-ci augmentent d'environ 40 % entre 1955 et 1965, 30 % entre 1965 et 1975, soit de quelque 80 % en vingt ans.

En dépit de la marge d'incertitude que présentent fatalement des prévisions à long terme, ces estimations peuvent cependant être retenues comme indications de tendance et, dans une certaine mesure, comme objectif à atteindre en fonction de l'élévation recherchée du niveau de vie.

L'évaluation de la production future est peut-être encore moins certaine, vu l'impossibilité de supputer avec précision l'évolution de certains facteurs importants tels que les conditions de travail, la politique des gouvernements et des entreprises, l'apparition d'éventuels goulots d'étranglement.

Des prévisions ont néanmoins été établies dans les documents précités en ce qui concerne la production globale d'énergie classique dans la Communauté. Elles permettent, par comparaison avec les estimations des besoins, de déterminer l'ordre de grandeur de la marge déficitaire. Ce déficit qui se limitait à quelque 5 % des besoins à la veille de la seconde guerre mondiale, en atteignait environ 20 % en 1955 et il atteindra quelque 30 % en 1965, pour se situer entre 35 et 40 % en 1975. Jusqu'à présent, le déficit a été couvert par des importations nettes, notamment de pétrole et de charbon. Pour l'avenir et tout en développant au maximum la production interne d'énergie classique, l'intervention de l'énergie nucléaire s'avère indispensable pour éviter un gonflement exagéré des importations nettes.

9.2.2. L'intervention de l'énergie nucléaire

On a décrit, dans d'autres chapitres de ce rapport, les diverses applications que peut avoir l'énergie nucléaire.

Pour la période envisagée, cependant, son intervention se fera en ordre tout à fait principal par la fourniture d'électricité, forme d'énergie dont la production augmente d'ailleurs très

rapidement, atteignant, dans les pays de la Communauté et depuis la seconde guerre mondiale, des taux de croissance qui assurent un doublement en dix ou douze ans.

Même en admettant un léger fléchissement de ce rythme, on peut, en conséquence, prévoir presque un doublement entre 1955 et 1965 et plus d'un triplement jusqu'en 1975. Une partie de la production d'électricité est cependant assurée par des sources d'énergie qui, par leur nature même, sont entièrement ou tout à fait principalement affectées à cette production : énergie hydraulique et géothermique, lignite, certaines qualités de houille et même, dans certains endroits, le gaz de haut fourneau, le gaz naturel et le gaz de cokerie.

Dans l'accroissement de production nécessaire pour répondre au développement des besoins spécifiques d'électricité, c'est uniquement la partie provenant des autres sources qui peut être assurée par l'énergie nucléaire.

Les documents dont on dispose ne permettent pas de faire clairement cette distinction. On trouve cependant dans le rapport « Un objectif pour Euratom » une évaluation relative à la production d'électricité en provenance des sources thermiques, à l'exception du lignite et du gaz de haut fourneau. Il s'agit donc essentiellement du pétrole et du charbon, mais y compris le charbon de qualité inférieure. Ce ne sont cependant pas ces chiffres eux-mêmes qu'il faut considérer, mais plutôt leur évolution à partir de 1960, puisque c'est seulement après cette date que l'on peut escompter une intervention appréciable de l'énergie nucléaire. Ces indications sont brièvement reprises dans le tableau suivant.

Tableau : Augmentation de la production d'électricité thermique
(en provenance des sources autres que le lignite et le gaz de hauts fourneaux).

en milliards de kWh

| | Production nette | Augmentation par rapport à 1960 |
|------|------------------|------------------------------------|
| 1955 | 90 | — |
| 1960 | 141 | — |
| 1965 | 208 | + 67 |
| 1970 | 302 | + 161 |
| 1975 | 410 | + 269 |

En partant de ces données, on peut tenter de déterminer la puissance qui devrait être installée en centrales nucléaires si celles-ci devaient assumer toute l'augmentation de production, mais sans toutefois tenir compte des renouvellements d'installation.

La puissance installée nécessaire pour couvrir l'augmentation diffère selon la durée d'utilisation annuelle envisagée, c'est-à-dire, en d'autres termes, selon le « facteur de charge » adopté.

La détermination du facteur de charge des centrales nucléaires est, à défaut d'expérience, assez aléatoire.

Du point de vue économique on considère, dans les conditions actuelles et au moins pour l'avenir immédiat, que les centrales nucléaires doivent avoir une durée élevée d'utilisation annuelle. En raison du coût des installations, les frais fixes représentent une part très importante dans le prix de revient de l'électricité nucléaire ; il faut donc pouvoir les étaler sur une production aussi élevée que possible.

Un facteur de charge de 7.000 heures par an semble économiquement souhaitable. Dans ce cas, la puissance nucléaire installée qui serait nécessaire, en 1965, pour couvrir toute l'augmentation de production à partir de 1960, serait de 10 millions de kWe.

Mais les facteurs de charge normaux sont en relation avec les coûts de production et l'on peut sans doute admettre, au fur et à mesure de la diminution du coût, une réduction du facteur de charge des centrales nucléaires, à, par exemple, 6.500 h/an en 1970 et 6.000 h/an en 1975.

Dans cette hypothèse, on aurait les puissances installées suivantes :

- 1965 - 10 millions de kWe
- 1970 - 25 millions de kWe
- 1975 - 44 millions de kWe

Cependant, considérer que toute l'augmentation puisse provenir de centrales nucléaires ne correspond nullement aux possibilités réelles d'ordre technique ou financier.

La part que les centrales nucléaires pourront assumer dans l'augmentation prévue dépend d'ailleurs, non seulement du niveau des besoins, mais aussi de leur nature, principalement

en fonction de la distinction entre besoins de pointe et charge de base. ⁽¹⁾

Les centrales nucléaires, devant avoir une utilisation annuelle élevée, seront essentiellement destinées à assurer la charge de base. Leur insertion dans l'ensemble des installations de production d'électricité devra, par conséquent, tenir compte de la proportion que cette charge de base représente dans la production journalière. Il conviendra aussi de maintenir, pour les autres sources d'électricité, une durée d'utilisation annuelle qui leur assure un fonctionnement techniquement et économiquement satisfaisant.

Ainsi n'est-il pas possible de produire, en 1975, toute l'augmentation depuis 1960, soit 269 milliards de kWh, ou environ 65 % de la production totale, dans des centrales ayant un facteur de charge de 7.000 heures. Il n'est même pas certain qu'avec un facteur de charge moyen, qui serait à ce moment de 4.250 h/an pour l'ensemble des centrales thermiques, on puisse atteindre 6.000 h/an pour les centrales nucléaires, si elles représentent une part aussi importante du total.

Bien entendu, ces diverses restrictions n'entreront en ligne de compte qu'à partir du moment où la production d'électricité nucléaire atteindra un pourcentage important, par exemple un cinquième ou un quart du total. L'élément des heures d'utilisation ne jouera donc pas un rôle essentiel au départ. Mais ce problème devra être examiné en temps opportun et des études devront préparer l'avenir.

Dans le proche avenir, le développement de l'énergie nucléaire en tant que source d'électricité n'est donc pas limité par les besoins prévisibles. Ceux-ci tendent, en effet, à s'accroître selon un rythme qui nécessite une extension considérable des installations.

Les centrales nucléaires devraient couvrir une partie progressivement croissante de cette extension, mais il est peu vraisemblable qu'elles puissent d'ici 1975 en assumer la totalité.

Plutôt que le niveau ou l'orientation des besoins, ce sont les possibilités de réalisation, à la fois sous l'aspect technique et sous l'aspect financier, qui pourront constituer la véritable limite supérieure du développement de l'énergie nucléaire.

(1) Par charge de base, on entend l'électricité produite, sans interruption, 24 heures par jour.

9.3. Le coût de l'électricité nucléaire et de l'électricité classique.

Les éléments d'appréciation dont on dispose pour comparer les coûts respectifs de l'électricité nucléaire et de l'électricité classique ne se sont pas fondamentalement modifiés depuis la publication du Rapport « Un objectif pour Euratom ».

Cependant, les premières étapes parcourues depuis lors dans la réalisation de certains projets, à l'étranger et dans les six pays, ainsi que les offres et garanties que les sociétés d'électricité peuvent actuellement obtenir, apportent des éléments concrets qui confirment dans leurs grandes lignes les estimations contenues dans le Rapport précité. Autrement dit, ce qui, il y a un an, n'était que prévisions semble se vérifier aujourd'hui dans les faits économiques.

Le Rapport rappelé ci-dessus se base pour l'électricité classique sur le prix de revient probable des centrales modernes utilisant du combustible importé, charbon ou fuel-oil, car c'est à ces installations que se substitueront, vraisemblablement et en tout cas au début, les centrales nucléaires.

Si l'on se fonde sur les prix actuels des charbons, pour des contrats d'importation à long terme, on serait tenté de réduire quelque peu les prix de 10 à 12 mills (1) par kWh envisagés dans le rapport susmentionné. On pourrait les ramener, par exemple, aux environs de 9 à 11 mills le kWh, selon les conditions de coût d'installation et de financement. Le premier de ces chiffres ne vaut toutefois que pour des centrales assurant la charge de base dans des conditions d'approvisionnement très favorables. Il ne faut d'ailleurs pas perdre de vue à cet égard que les données actuelles en matière de prix des charbons sont influencées par la situation conjoncturelle.

Quant au coût de l'électricité nucléaire, l'accord négocié avec les Etats-Unis pour l'installation d'une capacité d'un million de kW, permet de croire que les charges relatives au combustible (fuel-cycle) s'élèveront à quelque 4 ou 5 mills par kWh, tandis que les charges fixes seraient légèrement inférieures aux prévisions formulées dans le Rapport « Un objectif pour Euratom », qui les situaient entre 11 et 14 mills. Le coût du kWh serait ainsi ramené à un niveau situé entre 10 et 14 mills.

(1) 1 mill = 1/1000 de dollar, soit 1/1000 d'unité UEP.

Les considérations dudit Rapport quant à l'abaissement progressif du coût de l'électricité nucléaire semblent également se confirmer. En ce qui concerne tout d'abord les centrales nucléaires actuellement en voie de réalisation, les frais d'exploitation seront inférieurs au niveau envisagé il y a quelques mois et, grâce aux améliorations dans la technique de fabrication et d'utilisation des combustibles, ce développement se poursuivra à l'avenir. Contrairement, en effet, à ce qui se passe pour les centrales thermiques classiques, dont le cycle de combustion ne peut être que très modestement amélioré une fois la centrale construite, les progrès réalisés dans le cycle du combustible nucléaire pourront être très rapidement appliqués dans les centrales nucléaires en fonctionnement. De plus, et ceci vaut également pour les centrales actuellement projetées et pour celles qui seront installées dans un avenir plus lointain, le cycle du combustible nucléaire présente de très grandes possibilités d'amélioration tandis que les progrès encore réalisables dans le cycle de combustion classique semblent de moins en moins grands. Enfin, les renseignements recueillis ces derniers mois en matière de coût de construction des centrales nucléaires montrent que celles de l'avenir coûteront moins cher pour un meilleur rendement.

Il est probable, par contre, que sous réserve des fluctuations conjoncturelles, le prix des combustibles classiques poursuivra son évolution séculaire et s'élèvera lentement mais régulièrement par rapport au niveau général des prix, élevant ainsi progressivement le prix de revient de l'électricité classique.

Les indications les plus récentes montrent qu'il y a, dès maintenant, un certain recouvrement des zones dans lesquelles se situent les prix de revient de l'énergie classique et de l'énergie nucléaire. Cela signifie que, dans certaines parties du monde et dans certaines conditions particulières, l'électricité produite par des réacteurs nucléaires peut entrer dès aujourd'hui en concurrence avec l'électricité des centrales de type conventionnel. L'évolution des prix de revient dans les prochaines années, même pour les centrales actuellement envisagées, ne fera qu'améliorer la position concurrentielle de l'énergie nucléaire. Cette comparaison de prix vient donc confirmer l'espoir de voir la nouvelle source énergétique jouer rapidement un rôle important dans le développement économique européen.

9.4. Les programmes d'électricité nucléaire

La plupart des pays membres de l'Euratom ont actuellement des projets quant à l'installation de centrales nucléaires. Ces intentions ne vont généralement pas au-delà de l'année 1965. Certains pays ont toutefois formulé un programme indicatif à plus long terme.

Belgique

On envisage actuellement la mise en service des installations suivantes :

| | | |
|-----------|---------------------------------|-------------|
| 1960 | BR-3 | 10 MWe |
| 1962-1963 | 2 centrales de 150 MWe soit | 300 MWe |
| 1967 | 2 centrales de 120-150 MWe soit | 240-300 MWe |

En 1967, on disposerait donc d'une puissance nucléaire installée de quelque 550 à 600 MWe.

On peut estimer que le rythme d'une centrale de 150 à 200 MWe tous les deux ans sera maintenu après 1967, portant ainsi le total installé à un ordre de grandeur d'au moins 1.200 MWe en 1975.

République fédérale d'Allemagne

Les projets portent actuellement sur la construction pour 1965 de quatre ou cinq centrales nucléaires, avec une puissance globale d'environ 500 MWe.

De plus, selon les dernières prévisions de puissance installée, publiées par l'O.E.C.E. avec l'autorisation du Gouvernement fédéral, la puissance nucléaire installée en 1975 s'élèverait à 6.000 MWe.

France

Les projets actuels peuvent être résumés comme suit :

| | | |
|---------------------|------------------------------|---------|
| fin 1958-début 1959 | — trois réacteurs à Marcoule | 60 MWe |
| fin 1959 | — EDF1 | 70 MWe |
| fin 1961 | — EDF2 | 170 MWe |

soit au total environ 300 MWe pour 1961.

Ces projets s'incorporent dans un programme de production d'électricité nucléaire adopté par le Gouvernement français et portant sur l'installation pour 1965 d'une puissance globale de 850 MWe, obtenue par des réacteurs refroidis au gaz,

puissance à laquelle on peut ajouter environ 350 MWe obtenus par des réacteurs d'autre type, dont le choix n'a pas encore été fixé, soit au total environ 1.200 MWe.

Italie

Les projets dont la réalisation a été décidée portent sur deux centrales d'une puissance totale d'environ 320 MWe dont la mise en service est prévue pour 1962.

De plus, on étudie des projets qui représentent une puissance installée d'environ 650 MWe et dont la mise en service interviendrait vers 1963. Il semble difficile de prévoir le rythme qui sera ultérieurement adopté pour la mise en service des centrales nucléaires. Il sera vraisemblablement assez rapide, étant donné la situation énergétique italienne, et pourrait porter la puissance nucléaire installée en 1965 à environ 1.500 MWe.

Pays-Bas

Un projet est actuellement à l'étude pour la construction d'une centrale nucléaire de 150 MWe qui serait achevée vers 1962. Le Ministère des Affaires économiques a publié un programme d'électricité nucléaire jusqu'en 1975, qui vise uniquement à indiquer ce qui pourrait être réalisé par les producteurs d'électricité.

Selon ce programme, les puissances nucléaires suivantes seraient installées :

en 1965 : 400 MWe
1970 : 1.200 MWe
1975 : 3.000 MWe

La situation d'ensemble

Il est assez difficile de totaliser ces données pour dégager les projets globaux de la Communauté.

Tout au plus peut-on évaluer à quelque 3.500 - 4.000 MWe la puissance nucléaire qui sera probablement installée en 1965.

Ceci représente environ les deux tiers du programme britannique (5.000 à 6.000 MWe) pour cette même date.

9.5. Remarques finales

Le développement de la production d'énergie nucléaire dans la Communauté est lié à l'expansion des besoins d'énergie, ainsi qu'à la nécessité reconnue de couvrir par une production interne une partie du déficit énergétique croissant des six pays.

La part que peut couvrir l'électricité nucléaire dans la production électrique de la Communauté n'est nullement limitée dans l'immédiat par l'aspect quantitatif ou qualitatif des besoins prévisibles. La capacité d'absorption dépasse, en toute hypothèse, le nombre de kWh que l'on peut attendre des centrales nucléaires dans un avenir rapproché.

En matière de coût de production, on a vu que, dans certaines conditions, l'électricité nucléaire est dès à présent compétitive avec l'électricité classique et qu'elle le deviendra de plus en plus. De ce point de vue encore, rien ne s'oppose donc dans l'immédiat à la mise en œuvre d'un important programme nucléaire de la Communauté.

Les projets existants représentent un premier pas dans ce sens. Ils restent cependant encore modestes au regard des possibilités qui s'ouvrent et de certains programmes étrangers.

Ces projets ne permettront d'ailleurs pas, selon toute vraisemblance, d'atteindre en 1967 les 15 millions de kWe qui avaient été préconisés dans le rapport « Un objectif pour Euratom » en vue de stabiliser, à partir de 1963, les importations nettes d'énergie dans la Communauté.

Cette stabilisation reste cependant un impératif majeur et il faut y tendre sans relâche. Il appartient à Euratom de susciter les initiatives et de créer les conditions propres à en assurer la réalisation, sinon pour 1967, du moins dans les plus brefs délais possibles.

CONCLUSIONS

Comme il a déjà été souligné dans l'introduction, la Commission ne voit dans ce rapport qu'une première tentative d'apprécier la situation actuelle de l'industrie nucléaire dans la Communauté et de mesurer son importance pour l'économie des six pays.

En dépit des limites et des imperfections de ce premier rapport, on peut néanmoins tenter d'en dégager quelques conclusions générales, de caractère encore tout provisoire.

Dans l'avenir immédiat, l'application pacifique de l'énergie nucléaire prend une importance particulière dans le domaine de la production d'électricité. Il est évident, à cet égard, que les six pays d'Euratom ne peuvent laisser échapper une opportunité aussi favorable de combler les déficits énergétiques qui s'annoncent, de réduire des importations de combustibles classiques qui tendent à peser de façon démesurée sur les balances des comptes et qui sont, en outre, vulnérables à des sursauts politiques. De plus, les perspectives offertes par l'énergie nucléaire de développer des industries nouvelles et de créer ainsi de nouvelles possibilités d'emploi s'imposent tout spécialement à des territoires à forte densité de population.

Cependant, et ce sera là une première conclusion, les possibilités de la fission nucléaire ne se limitent nullement à la seule production d'électricité. La propulsion des moyens de transport, ainsi que le chauffage urbain ou industriel sont, eux aussi, des secteurs d'utilisation intéressants. D'autre part, les radio-isotopes présentent déjà une large gamme d'applications, allant de la science médicale et de la recherche à l'industrie et à l'agriculture. Dès lors, il n'est guère de secteurs d'activité qui, soit comme producteurs, soit comme utilisateurs d'énergie ou de radio-isotopes, ne soient intéressés au développement de l'énergie nucléaire.

Dans une seconde conclusion, nous croyons pouvoir remarquer que les activités nucléaires de caractère énergétique ou liées aux radio-isotopes s'étendront progressivement à un nombre croissant d'entreprises. Certes, la conception, l'installation et le fonctionnement des réacteurs exigent des moyens scientifiques, techniques et financiers, dont disposent surtout

les très grandes entreprises. Mais la diversité même des éléments qui interviennent dans les réalisations nucléaires offre des possibilités de spécialisation qui peuvent être mises à profit par des entreprises de plus petite dimension. Il faut donc en déduire — et ceci doit être mis clairement en évidence — que l'exploitation de l'énergie nucléaire sous toutes ses formes ne sera pas nécessairement l'apanage de quelques grands consortiums. Les entreprises moyennes, voire les petites entreprises, pourront, elles aussi, y participer pour autant qu'elles puissent saisir les occasions qui se présentent.

A titre de troisième conclusion, on peut souligner que les activités nucléaires ne seront pas uniquement réservées à des entreprises entièrement nouvelles. Aussi révolutionnaires que puissent apparaître les techniques mises en œuvre par l'énergie nucléaire, celles-ci entraîneront, en premier lieu, une transformation de l'industrie existante et son orientation dans des voies nouvelles. En d'autres termes, l'avènement de l'énergie nucléaire se réalisera tout autant, sinon plus, par le développement et l'extension des établissements industriels existants que par la création de nouvelles industries de toutes pièces.

Ces premières conclusions nous paraissent montrer que les impératifs technologiques des activités nucléaires sont susceptibles de créer un climat nouveau dont bénéficiera l'ensemble de l'industrie de la Communauté, autant dans une extension de ses fonctions que dans une rénovation de ses moyens.

Ce premier rapport devrait, semble-t-il, avoir pour effet d'encourager tous ceux qui se consacrent déjà à ce domaine nouveau. Mais il révèle aussi combien sont vastes les possibilités qui s'ouvrent, et ceci devrait rallier les hésitants et amener de nouveaux venus à l'effort nucléaire qui s'impose aux pays de l'Euratom.

Toutefois, s'il est logique de placer de grands espoirs dans le développement de l'énergie nucléaire et d'en attendre maintes conséquences favorables pour l'avenir, notamment sous l'angle de l'élévation du niveau de vie des populations, il ne faut pas se dissimuler que, pour y arriver, il faudra consentir à de grands efforts de formation intellectuelle, faire appel à de nombreux talents scientifiques et techniques et mettre en œuvre des moyens financiers considérables.

De telles exigences entrent dans le cadre des possibilités qu'offre la Communauté. Elles pourront être satisfaites d'autant mieux que de multiples éléments naturellement favo-

rables existent, qui se prêteront à faciliter un développement relativement rapide et, en tout cas, efficace des activités nucléaires. Il n'est sans doute pas superflu d'évoquer quelques-uns de ces éléments.

Dès à présent, l'Europe continentale subit le poids de ses déficits en combustibles classiques. Elle bénéficiera nécessairement du remplacement partiel de ceux-ci par des combustibles nucléaires, même s'il fallait importer ces derniers. Mais on peut croire que la Communauté dispose d'importantes réserves d'uranium qui, une fois mises à fruit, réduiront les nécessités d'importation.

En matière d'isotopes, de métaux et d'alliages spéciaux, d'appareils de mesure et de contrôle, les sujétions d'importation seront des plus limitées et des plus temporaires. Il n'est même pas ambitieux de croire qu'il sera possible dans ces secteurs d'envisager, à échéance rapprochée, des possibilités d'exportation pour la Communauté.

Tout ceci relève, dans une certaine mesure, de l'anticipation et, pour revenir à la réalité des choses, on peut raisonnablement se demander où l'on en est en ce moment en matière nucléaire, en comparaison avec les réalisations dans ce domaine à l'échelon mondial.

Une première remarque s'impose : notre industrie nucléaire en est encore à ses débuts et, de plus, son degré de développement varie d'un pays à l'autre au sein même de la Communauté. Si l'on peut dire que, d'une manière générale, la France est le pays le plus avancé dans la voie des réalisations, on doit remarquer que cette position n'a pu être acquise qu'au prix d'efforts financiers considérables.

Dans le Royaume-Uni, les activités nucléaires sont essentiellement orientées vers la production économique d'énergie électrique. Une première centrale, poursuivant cet objectif, a été inaugurée en 1956. Une industrie annexe, bien organisée, se développe continuellement. Les dépenses de l'« Atomic Energy Authority », qui s'élèvent pour l'année 1956-57 à quelque 200 millions d'unités UEP, peuvent donner une idée de l'effort consenti pour développer l'industrie et la recherche nucléaires.

Aux Etats-Unis aussi, la recherche et les industries nucléaires ont connu, depuis 1945, un développement considérable. Bien que les besoins d'énergie électrique d'origine nucléaire s'y avèrent moins urgents, grâce aux sources abondantes et peu

coûteuses d'énergie classique, les dépenses consacrées annuellement au seul développement des réacteurs de puissance à usage civil s'élèvent à quelque 160 millions d'unités UEP. Mais il s'agit, contrairement au chiffre cité pour le Royaume-Uni, de dépenses spécifiques pour les réacteurs de puissance, en dehors du large budget consacré aux autres domaines des applications pacifiques de l'énergie nucléaire.

Il est souvent fait état du retard de l'ensemble de la Communauté à l'égard de ces pays en matière d'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire, retard qui existe également à l'égard de l'U.R.S.S. Il s'agit là d'un fait non contestable. Des esprits peu avertis pourraient en tirer la conclusion erronée que peu de choses ont été accomplies et que tout reste donc à faire pour entrer dans la voie des grandes réalisations nucléaires. Il faut espérer que le présent rapport réduira à néant un tel jugement et qu'il permettra une plus juste appréciation du travail déjà réalisé, ainsi que des perspectives qui sont, dès à présent, envisagées tant dans le domaine des recherches que dans celui de l'industrie. Il donnera aussi l'occasion de comprendre toute l'importance que présente pour l'expansion nucléaire européenne le contexte industriel général existant dans la Communauté et l'intérêt qui se manifeste dans des secteurs extrêmement étendus et puissants à l'égard de cette nouvelle forme d'énergie.

La Commission a reçu la charge de mettre tout en œuvre pour renforcer ces éléments favorables. Elle n'a nullement l'intention de poursuivre une action d'intervention systématique, qui risquerait d'émousser les bonnes volontés spontanées ou qui engagerait la politique des six pays dans la voie de l'isolement et de l'autarcie. C'est, au contraire, dans un climat de contacts, de collaboration entraînant une saine et franche concurrence, que l'industrie nucléaire doit recevoir les meilleures chances de se développer. Suivant les dispositions du Traité et des accords internationaux en vigueur, cette concurrence ne se limitera pas aux industries des six pays ; elle doit s'étendre également aux industries des autres pays, notamment des Etats-Unis et du Royaume-Uni. Les contacts avec ces deux pays offrent d'ailleurs un intérêt considérable et la Commission se félicite de ce que ces nations aient précisément été les premières à établir organiquement des relations avec elle.

Ajoutons, enfin, que le présent rapport souligne, une fois de plus, que les besoins d'énergie, et particulièrement ceux sous forme électrique, ne constituent pratiquement pas de limite

au développement de l'industrie nucléaire. Ce développement risque bien plus, dans les toutes prochaines années, d'être limité par les possibilités techniques et technologiques des industries de la Communauté, ainsi que par les possibilités financières.

Encore qu'il faille se garder d'un optimisme excessif, la Commission croit pouvoir, dans le mesure où le présent rapport permet de passer à conclusion, affirmer sa confiance dans l'avenir de l'industrie nucléaire européenne. En dépit de tous les efforts qui restent à accomplir, on peut se réjouir de l'ampleur des réalisations dès à présent acquises et de la volonté qui se manifeste de les poursuivre sans désespérer ; l'inventaire auquel il a été procédé révèle des résultats substantiels qui, certes, doivent démentir les appréhensions des sceptiques et qui doivent apporter un réconfort certain à ceux qui espèrent étendre l'emploi, relever le niveau de vie et fonder de nouvelles sources de prospérité grâce à l'énergie nucléaire.

Si la moisson est loin d'être mûre, du moins le blé a-t-il germé.

ANNEXE 1

IMPLANTATION DES PRINCIPALES INSTALLATIONS

(voir en fin du volume)

ANNEXE 2

NOTIONS DE BASE

Le but de cet exposé n'est pas de présenter un tableau d'ensemble, même très résumé, des connaissances actuelles dans le domaine nucléaire, mais uniquement d'expliquer, le plus simplement possible, certains termes scientifiques et techniques utilisés dans ce rapport.

La matière est discontinue, c'est-à-dire que toute substance est constituée d'un nombre fini, généralement énorme, de *molécules* de corps chimiques du même genre ou de genres différents. La molécule est la plus petite parcelle existante d'un corps chimique ayant les propriétés chimiques de ce corps. Il y a donc autant de types de molécules qu'il existe de corps chimiquement distincts. Ces divers types de molécules sont des combinaisons différentes de parcelles plus petites encore: les *atomes*.

Il existe une centaine de types d'atomes distincts, correspondant chacun à un *élément*: hydrogène, carbone, cuivre, plomb, uranium, etc...

Une molécule peut être constituée par des atomes du même type: dans ce cas, il s'agit d'un *corps simple*.

Une molécule peut aussi être un assemblage d'atomes de types différents: dans ce cas, il s'agit d'un *corps composé* (eau, acide acétique, polystyrène, etc...).

Constitution de l'atome

L'atome — longtemps considéré comme insécable, ainsi que son nom l'indique — se compose en fait d'un *noyau*, autour duquel gravitent des *électrons*.

La façon la plus intuitive d'imaginer la structure atomique est de la comparer à un petit système solaire, formé d'un noyau-soleil et d'électrons-planètes qui gravitent autour de l'astre central. Cette comparaison, qualitativement exacte, met en

évidence le fait que le noyau est le centre de gravité de l'édifice atomique et qu'il est séparé des électrons par un vide énorme, comparable à l'espace intersidéral. Ces électrons, circulant à très grandes vitesses autour du noyau, sont responsables de l'activité chimique des atomes, c'est-à-dire qu'ils sont responsables de la « facilité » avec laquelle un élément (par exemple le fer) se combine avec un autre (par exemple le soufre) pour former le sulfure de fer. Ces électrons n'intervenant pas directement dans les réactions nucléaires, il suffira de savoir que l'existence de ce « brouillard » de charges électriques négatives (les électrons) autour du noyau rend l'approche, au niveau de celui-ci, de particules chargées électriquement très difficile par suite de l'interaction des forces répulsives et attractives entre charges identiques ou de signe contraire.

Le noyau lui-même est constitué par l'agglomération d'un certain nombre de particules, appelées *nucléons*. Ceux-ci sont de deux espèces: les *neutrons*, environ 1.800 fois plus lourds que les électrons et dépourvus de charge électrique, et les *protons*, à peu près de même masse que les neutrons et portant une charge électrique positive. Les électrons portent une charge électrique égale à celle des protons, mais négative. Le nombre des électrons étant égal au nombre de protons, leurs charges électriques s'annulent et l'atome est électriquement neutre.

La masse d'un atome (poids atomique) est pratiquement égale à la masse du noyau. En première approximation, la masse du noyau est égale à la somme des masses des nucléons qui le constituent.

Caractéristiques de l'atome

La *nature chimique* d'un atome est déterminée par le nombre de protons de son noyau et donc aussi par le nombre identique des électrons qu'il possède, à l'état neutre.

Un atome n'est cependant pas toujours neutre. Sous l'effet de certaines influences extérieures, il peut perdre ou s'adjoindre un ou plusieurs électrons. On dit alors qu'il est *ionisé*. Le nombre d'électrons n'étant plus égal à celui des protons, l'atome possède une charge électrique positive ou négative.

Tous les atomes, neutres ou ionisés, qui ont dans leur noyau le même nombre de protons appartiennent au même élément.

Certaines différences peuvent cependant être observées dans les propriétés des atomes d'un même élément, selon le nombre d'électrons ou de neutrons, ainsi que selon la répartition des électrons.

Caractéristiques du noyau

Dans le noyau, le nombre de neutrons est approximativement égal ou quelque peu supérieur au nombre de protons. Mais des atomes qui possèdent le même nombre de protons, et appartiennent donc au même élément, peuvent différer entre eux par le nombre de neutrons. Il existe donc, pour chaque élément, plusieurs types d'atomes qui ont un nombre de neutrons et, par conséquent, un poids différent.

Chaque élément possède plusieurs *isotopes* ou *nuclides* ayant la même nature chimique, essentiellement les mêmes propriétés chimiques, mais pas nécessairement les mêmes propriétés physiques. Pour distinguer les isotopes d'un même élément, on associe au nom (ou au symbole) de cet élément le nombre total des nucléons de son noyau. Ainsi, par exemple, l'hydrogène est caractérisé par la présence d'un seul proton dans son noyau, mais on connaît trois isotopes : l'hydrogène 1 (symbole H 1, le plus répandu dans la nature : 1 proton et 0 neutrons), l'hydrogène 2 ou deutérium (symbole H 2 ou D; 1 proton et 1 neutron) et l'hydrogène 3 ou tritium (symbole H 3 ou T; 1 proton et 2 neutrons).

Un autre exemple est celui de l'élément uranium, dont on connaît actuellement quatorze isotopes, bien qu'on n'en trouve pratiquement que deux dans la nature :

l'uranium 238 (symbole U 238 : 92 protons, 146 neutrons),

l'uranium 235 (symbole U 235 : 92 protons, 143 neutrons).

Dans un noyau, malgré les forces répulsives dues à la présence d'un nombre plus ou moins grand de particules ayant la même charge positive (les protons), les nucléons sont solidement agglomérés par la présence de forces de liaison supérieures aux forces répulsives. C'est la libération d'une fraction des forces contenues dans ce noyau (énergie nucléaire) qui, comme nous allons le voir ultérieurement, trouve diverses applications pacifiques.

Si le nombre respectif de neutrons et de protons est tel que l'ensemble de ces particules forme, dans l'espace très restreint du noyau d'un atome, un système stable, on dit que le noyau est stable. Ceci implique que sa constitution et son état énergétique ne peuvent être modifiés que sous l'effet d'une action extérieure assez efficace pour affecter plus ou moins fortement le noyau. Ces noyaux donnent lieu à l'existence d'*isotopes stables*.

Mais, pour certains isotopes, dits *radio-actifs* (radio-isotopes) l'énergie de liaison est moindre, de sorte que le noyau est

instable. Pour l'ensemble des éléments, on connaît actuellement environ un millier d'isotopes, dont un peu plus d'un quart sont stables. A l'état naturel, les éléments sont constitués d'un mélange d'isotopes en proportion quasi constante. Ces isotopes, quoique ayant les mêmes propriétés chimiques, peuvent avoir des propriétés physiques différentes. Ces différences de propriétés physiques ressortent surtout quand il s'agit de phénomènes physiques à l'échelle nucléaire (phénomènes ayant lieu dans le noyau) : ainsi l'élément uranium, dont le noyau est caractérisé par la présence de 92 protons, se présente à l'état naturel sous forme d'un mélange de 99,3 % d'uranium 238 et de 0,7 % d'uranium 235 ; de ces deux isotopes, seul le second peut être le siège du phénomène de fission dont il sera question plus loin. Lorsqu'il s'agit de phénomènes physiques à l'échelle atomique (phénomènes dans lesquels l'entièreté de l'atome, neutre ou ionisé, intervient) les différences de propriétés physiques entre les isotopes ressortent moins, mais sont cependant assez nettes pour pouvoir être utilisées, notamment en vue de la *séparation isotopique*. En effet, à chaque isotope d'un même élément correspond, par suite du nombre distinct de neutrons, un nombre distinct de nucléons dans le noyau, donc également une masse distincte, résultant en une inertie distincte. C'est sur cette différence d'inertie que sont basés les divers procédés utilisés pour séparer l'un de l'autre les isotopes d'un même élément, se trouvant, soit sous la forme de corps simple (séparation de l'hydrogène léger H 1 de l'hydrogène lourd D), soit sous la forme de corps composé (séparation de l'eau légère, H₂O, de l'eau lourde D₂O).

C'est également sur ce principe que fonctionnent les usines d'*enrichissement* de l'uranium qui, par la séparation isotopique de l'uranium 238 de l'uranium 235, produisent un uranium contenant une plus forte proportion d'uranium 235, isotope fissile par des neutrons libres thermiques.

Radio-activité

Le noyau d'un isotope instable peut modifier spontanément sa construction interne ou son état énergétique. Un tel isotope peut se transformer, soit en le même isotope dans un état énergétique inférieur, soit en un isotope d'un autre élément : il se produit une désintégration du noyau initial. Ce phénomène est accompagné par l'*émission primaire* d'un ou de plusieurs rayonnement parmi les suivants :

- 1) les rayons alpha, rayonnement corpusculaire constitué de noyaux d'un des isotopes de l'élément helium et possédant 2 protons et 2 neutrons, donc chargés positivement ;
- 2) les rayons bêta, rayonnement corpusculaire également, mais constitué de particules beaucoup plus légères : des électrons, chargés positivement ou négativement ;
- 3) les rayons gamma, rayonnement électromagnétique, très énergétique de courte longueur d'onde.

Ce rayonnement primaire originaire du noyau peut engendrer, dans les couches électroniques des atomes environnants, des phénomènes, accompagnés par l'émission secondaire d'électrons, de rayonnement gamma et de rayonnement X. En se désintégrant, le noyau tend à devenir stable. Ceci peut se faire en une ou plusieurs étapes et donner lieu à des séries plus ou moins longues d'isotopes radio-actifs, dont le dernier sera stable.

D'autre part, ces désintégrations peuvent se faire rapidement ou lentement. Le nombre d'atomes radio-actifs dans un échantillon tend donc à diminuer plus ou moins rapidement. Le taux de décroissance radio-active est généralement exprimé par le temps de *demi-vie* ou *période*. Cette notion indique le temps nécessaire pour que le nombre des noyaux actifs se réduise de moitié.

Le *curie* est l'unité généralement utilisée pour exprimer la radio-activité : c'est la quantité d'isotope radio-actif qui donne $3,7.10^{10}$ désintégrations par seconde.

On appelle également l'ensemble de ces divers rayonnements *radiations ionisantes* parce qu'un de leurs effets est d'ioniser, directement ou indirectement, les atomes qu'ils rencontrent sur leur parcours. C'est essentiellement à cause de cette interaction avec la matière que se pose le problème de la protection contre toute radiation ionisante.

Radio-activité naturelle

Certains isotopes ont une instabilité naturelle et tendent spontanément vers la stabilité par les émissions citées ci-dessus.

Réactions nucléaires — Radio-activité artificielle

En dehors des rayonnements alpha, bêta et gamma, il est possible de provoquer artificiellement certains autres rayonnements corpusculaires, formés de neutrons, de protons ou d'autres particules.

Tous ces rayonnements peuvent, s'ils ont suffisamment d'énergie, affecter la constitution ou l'état énergétique des noyaux stables « bombardés ». De ce bombardement résulte, en premier lieu, un noyau différent, généralement instable, qui fait ensuite un premier pas vers la stabilité par l'émission d'un des rayonnements mentionnés ci-dessus. L'ensemble de ces phénomènes constitue une *réaction nucléaire*.

Comme le noyau résultant de cette réaction nucléaire n'est toujours pas stable, il essaiera d'atteindre la stabilité par l'émission beaucoup plus lente cette fois-ci, des rayonnements cités: le noyau présente une certaine radio-activité de période plus ou moins longue.

De cette façon, on a pu créer des isotopes artificiels, c'est-à-dire qui n'existent pas dans la nature.

Parmi toutes les particules avec lesquelles on peut bombarder les atomes, le neutron est le plus efficace parce que — étant dépourvu de charge électrique — il n'est pas dévié par les charges, portées par les électrons et le noyau de l'atome bombardé, et peut donc atteindre plus facilement ce noyau.

L'énergie d'un neutron peut varier : un neutron de grande énergie et donc de grande vitesse est appelé *neutron rapide* ; un neutron de très faible énergie et de vitesse réduite (qui est cependant encore de 2.200 mètres par seconde) est appelé *neutron thermique*. Entre ces deux extrêmes s'étalent d'autres énergies et vitesses ; on parle de *neutrons intermédiaires*.

Lorsqu'un neutron rencontre un noyau trois phénomènes peuvent se produire : la *collision*, l'*absorption* ou la *fission*.

La *collision* entre un neutron et un noyau peut être illustrée par le choc d'une bille de billard lancée sur une bille au repos. Au cours du choc, celle-ci prend une certaine énergie aux dépens de la bille incidente. C'est ce qui se passe lorsqu'un neutron rencontre les noyaux des atomes. Après un certain nombre de chocs, le neutron est ralenti au point de devenir un neutron thermique. Le ralentissement des neutrons sera d'autant plus rapide que ces chocs se font avec des noyaux d'atomes d'un poids semblable au sien. C'est pourquoi dans les réacteurs nucléaires on utilise des substances appelées *modérateurs*, de poids atomiques faible, comme le *carbone*, l'*eau légère* et l'*eau lourde*, le *béryllium*.

Le neutron peut également pénétrer dans le noyau et être *absorbé* par celui-ci. On obtient ainsi un isotope radio-actif. Dans

le cas de certains noyaux lourds, l'isotope ainsi obtenu est tellement instable qu'il se rompt spontanément : c'est le phénomène de *fission*.

Fission

Dans certains cas, la rencontre d'un neutron et d'un noyau donne lieu à un phénomène particulier : *la fission*, caractérisée par la rupture du noyau en deux fragments importants.

Cette fission, qui est généralement plus facile à réaliser avec des noyaux lourds, peut être provoquée par des neutrons de toute énergie. Cependant, la fission est le plus facilement réalisable en soumettant des noyaux ayant un nombre impair de nucléons, tels que ceux de l'uranium 235, du plutonium 239, de l'uranium 233, à l'action de neutrons thermiques. Ceci n'exclut pas la possibilité de fission à l'aide de neutrons rapides pour des noyaux ayant un nombre pair de nucléons, tels que ceux de l'uranium 238, du plutonium 240, etc., mais elle a cependant lieu dans une mesure beaucoup moindre.

Les trois effets résultant de cette fission sont :

- 1) La rupture des noyaux en deux morceaux importants, fragments de fission, qui constituent les noyaux de deux nouveaux atomes. Les isotopes ainsi formés, appelés « produits de fission », sont toujours radio-actifs, car les noyaux nouvellement créés sont instables. De plus, ces noyaux sont généralement très avides de neutrons.
- 2) La libération d'un certain nombre de neutrons (de un à trois neutrons). Ces neutrons peuvent, dans certaines conditions, provoquer de nouvelles fissions et engendrer ainsi une réaction en chaîne.
- 3) La libération d'une certaine quantité d'énergie. La loi devenue populaire d'Einstein reliant toute masse à l'énergie : l'énergie est égale à la masse considérée, multipliée par le carré de la vitesse de la lumière ($E = mc^2$) rend très bien compte de l'énergie considérable libérée lors de la fission. En effet, la somme de la masse des fragments de fission avec la masse des neutrons libérés est inférieure à la masse du noyau lourd original qui a absorbé un neutron. Cette différence de masse est transformée en énergie. Cette énergie est libérée sous forme de rayonnement et d'énergie cinétique, imprimée aux fragments de fission et aux neutrons libérés, qui se transforme secondairement en énergie thermique (chaleur).

Le fait que la fission de 1 gramme d'uranium 235 libère à peu près 20 millions de kilocalories peut donner une idée de l'importance de cette énergie : ceci correspond à l'énergie libérée par la combustion complète de 3 tonnes de charbon.

Matières fissiles et matières fertiles

On appelle généralement *matière fissile* toute matière dont les noyaux peuvent être « *fissionnés* » et qui permet en même temps d'entretenir une réaction nucléaire en chaîne à l'aide des neutrons libérés par ces fissions.

On appelle généralement *matière fertile* celle qui est susceptible de former par l'absorption de neutrons thermiques une nouvelle matière qui, elle, sera fissile. Ces matières sont parfois fissiles par des neutrons rapides, mais dans une mesure insuffisante pour permettre la réaction en chaîne.

L'uranium 235 est le seul isotope naturel qui soit fissile. Mais l'uranium 238 et le thorium 232, qui sont également des isotopes naturels sans être eux-mêmes fissiles, se transforment partiellement, lorsqu'on les soumet à l'action de neutrons thermiques en les plaçant dans un réacteur, en deux isotopes artificiels : le plutonium 239 et l'uranium 233 qui, eux, sont fissiles. Pour cette raison l'uranium 238 et le thorium 232 sont appelés des matières fertiles.

Principe des réacteurs

On appelle *réacteur nucléaire* un appareil contenant une certaine quantité de matière fissile et fertile, ou une certaine quantité de matière fissile seule (combustible nucléaire) et conçu de telle façon que la réaction de fission, une fois amorcée dans un certain nombre de noyaux, s'entretient d'elle-même à l'aide d'une partie des neutrons libérés lors de la fission, tout en restant parfaitement contrôlée. Ce combustible nucléaire peut se trouver dans le réacteur sous une forme *homogène* (en solution ou en suspension), ou sous une forme *hétérogène*, divisé en ce qu'on appelle communément des *éléments de combustible*.

On appelle *flux neutronique* le nombre de neutrons qui traversent à un endroit quelconque du réacteur une surface fictive, perpendiculaire à la direction d'incidence de 1 cm² en une seconde. La grandeur du flux neutronique est proportionnelle au nombre de fissions par seconde.

Du nombre moyen de neutrons libérés par fission (environ 2,5), une grande fraction sera absorbée par le combustible même, par le modérateur et le réflecteur pendant le ralentissement des neutrons, par les produits de fission, par les substances structurales, tandis qu'une fraction sera perdue par fuite hors du réacteur. Malgré ces pertes dans l'économie des neutrons, on doit finalement garder en moyenne au moins un neutron par fission pour maintenir la réaction en chaîne. Lorsque cette condition est réalisée, le réacteur est devenu *critique*. Un réacteur ne peut devenir critique que s'il est muni d'une quantité de combustible nucléaire dépassant un certain minimum, appelé masse critique ⁽¹⁾. En dessous de celle-ci, en effet, la proportion de neutrons perdus par fuite hors du réacteur est telle que l'état critique ne peut être atteint. Pour rendre cette masse critique aussi faible que possible, ce qui présente un intérêt économique évident, il faut calculer une disposition géométrique appropriée au combustible et il faut réduire la fraction de neutrons absorbés par des substances ne donnant pas lieu à la fission. De cette dernière considération découle la nécessité absolue d'éviter d'introduire dans le réacteur des substances avides de neutrons et en particulier celles qui, comme le bore et le cadmium, en sont particulièrement friands. On est ainsi amené à exiger des matériaux constitutifs des réacteurs une grande pureté, dite *pureté nucléaire*, qui dépasse de loin celle définie par l'expression classique de « chimiquement pur ». Des substances avides de neutrons sont cependant utilisées intentionnellement pour contrôler le réacteur en limitant la multiplication des neutrons.

Types de réacteurs

On appelle *réacteur de recherche* un réacteur destiné principalement à la mesure de certaines grandeurs physiques, ou un réacteur dont on désire tester les possibilités (aussi appelé réacteur prototype), ou encore un réacteur caractérisé par un flux neutronique très élevé, dans lequel on étudie le comportement de certains matériaux (réacteurs d'essai de matériaux).

On appelle *réacteur de puissance* un réacteur fournissant de l'énergie utilisée industriellement pour actionner une centrale électrique, pour propulser un navire (ou autre véhicule) ou encore pour le chauffage industriel par exemple.

Signalons enfin que le terme de *réacteur-surgénérateur* (en anglais « breeder ») désigne les réacteurs où l'on produit dans

(1) Cette masse critique dépend du type de réacteur envisagé.

le combustible nucléaire plus de matière fissile, en partant des matières fertiles, que l'on ne détruit de matières fissiles.

L'étude et la conception de tous ces types de réacteurs relève du génie atomique, qui est donc l'analogie dans le domaine nucléaire du génie maritime en matière de construction navale.

Traitement des combustibles irradiés

Au fur et à mesure que la réaction de fission se poursuit dans un réacteur, la quantité de produits de fission augmente.

Comme ces produits de fission et aussi certains éléments transuraniens (certains isotopes du plutonium) sont très avides de neutrons, leur formation provoquera une diminution du flux neutronique (empoisonnement du réacteur).

D'autre part, sous l'effet de la chaleur et du flux élevé de neutrons, les éléments de combustible (dans le cas d'un réacteur hétérogène) se déforment dans un laps de temps plus ou moins long, ce qui modifie la géométrie structurelle du réacteur et peut mener à la rupture des éléments avec toutes les suites néfastes que cela implique du point de vue de la sécurité et du point de vue économique.

Cette modification de la géométrie et l'existence des isotopes absorbant les neutrons va entraîner dans le réacteur une modification de la répartition du flux neutronique qui a, d'autre part, tendance à diminuer. Pour ces raisons, l'économie des neutrons deviendra à un certain moment déficiente, en ce sens qu'il ne restera en moyenne plus le neutron nécessaire pour la propagation de la réaction en chaîne; le réacteur cessera d'être critique.

Pour ces raisons, on est donc obligé de retirer le combustible (appelé alors combustible irradié) bien avant que toute la matière fissile qu'il contient ne soit fissionnée.

Par traitement physico-chimique ou métallurgique de ce combustible irradié, on peut le séparer en trois parties qui, si le combustible est par exemple de l'uranium, seront :

- 1) ce qui reste d'uranium appauvri en uranium 235;
- 2) le plutonium produit par transformation de l'uranium 238;
- 3) les produits de fission.

Le plutonium et l'uranium restants peuvent être, après enrichissement éventuel de ce dernier, réutilisés dans un réacteur, après conversion du combustible dans la forme désirée selon le type de réacteur.

Les produits de fission, tous radio-actifs, sont jusqu'à présent pour la plus grande partie considérés comme des déchets. Se débarrasser de ces déchets radio-actifs, sans compromettre tôt ou tard la santé des populations, constitue un des problèmes qui se posent à l'industrie du retraitement des combustibles nucléaires.

Dans l'avenir et suivant les nécessités des applications des radio-isotopes, la récupération d'autres produits de fission connaîtra peut-être un développement accru. Il est vraisemblable que ce mode de préparation remplace en partie la production des isotopes actifs par irradiation d'isotopes stables dans le flux élevé de neutrons du réacteur, méthode qui, jusqu'ici, produit la quasi-totalité des *radio-isotopes* artificiels utilisés en médecine et biologie, en industrie et technologie, en agriculture et élevage et dans la recherche pure.

Fusion

La fission — rupture d'un noyau lourd, c'est-à-dire comportant un grand nombre de nucléons, pour former deux noyaux de taille intermédiaire — n'est pas la seule réaction nucléaire capable de libérer des quantités importantes d'énergie. En effet, la fusion — agglomération de deux noyaux très légers, pour produire un noyau plus lourd — s'effectue également avec un dégagement considérable d'énergie.

La masse du noyau plus lourd formé par la fusion de deux noyaux plus légers est inférieure à la somme des masses de ces deux noyaux. Suivant la loi d'Einstein ($E = mc^2$), déjà citée lors de la fission, cette différence de masse est transformée en énergie thermique.

Tout semble indiquer que c'est d'une réaction de ce genre que le soleil tire son énergie.

Mais l'exploitation industrielle d'une telle réaction constitue un problème qui n'est pas encore résolu. Les recherches effectuées à ce jour, dans ce domaine, donnent l'espoir de pouvoir arriver à une solution pratique dans l'avenir.

ANNEXE 3

*Unités de mesure et symboles d'usage plus commun
dans le cours du rapport*

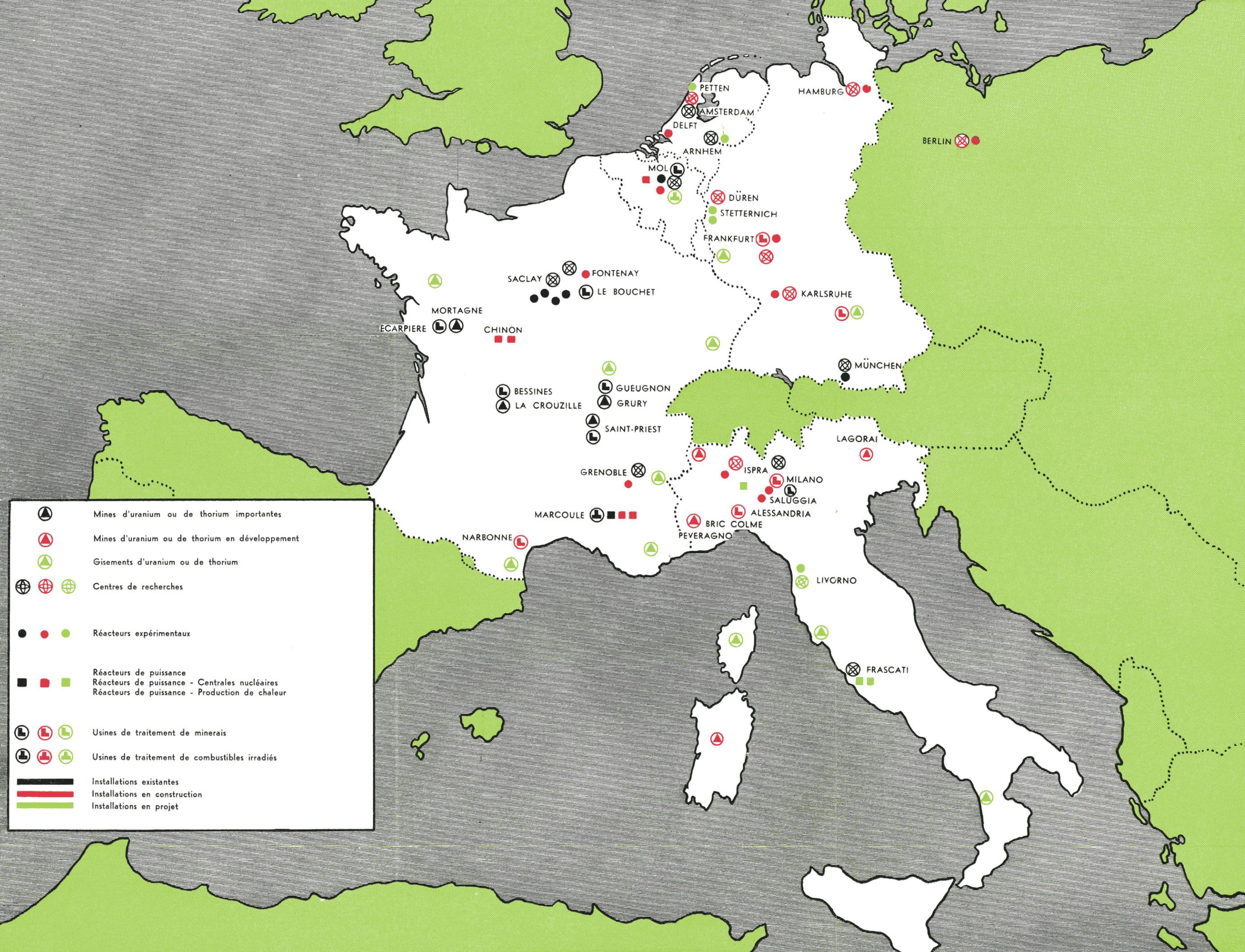
| | | | |
|---|--------------------|--|-----|
| <i>Longueur</i> | | <i>Température</i> | |
| centimètre | cm | degré centigrade | °C |
| mètre (= 10 ² cm) | m | | |
| kilomètre (= 10 ⁵ cm) | km | <i>Intensité de courant électrique</i> | |
| <i>Surface</i> | | ampère | A |
| centimètre carré | cm ² | <i>Energie</i> | |
| mètre carré (= 10 ⁴ cm ²) | m ² | erg | erg |
| kilomètre carré (= 10 ¹⁰ cm ²) | km ² | joule (= 10 ⁷ erg) | j |
| | | wattseconde (= 10 ⁷ erg) | Ws |
| <i>Volume</i> | | wattheure (= 3,6 × 10 ¹⁰ erg) | Wh |
| centimètre cube | cm ³ | kilowattheure | |
| mètre cube (= 10 ⁶ cm ³) | m ³ | (3,6 × 10 ¹³ erg) | kWh |
| | | mégawattheure (3,6 × 10 ¹⁶ erg) | MWh |
| <i>Masse</i> | | électronvolt (= 1,6 × 10 ⁻¹² erg) | eV |
| gramme | g | mégaélectronvolt (= 1,6 × 10 ⁻⁶ erg) | MeV |
| kilogramme (= 10 ³ g) | kg | gigaélectronvolt (= 1,6 × 10 ⁻³ erg) | GeV |
| tonne (= 10 ⁶ g) | t | | |
| <i>Temps</i> | | | |
| seconde | s | <i>Puissances (*)</i> | |
| minute (= 60 s) | m | watt (joule par seconde) | W |
| heure (= 3.600 s) | h | kilowatt (= 10 ³ W) | kW |
| jour (= 86.400 s) | d | mégawatt (= 10 ⁶ W) | MW |
| <i>Pression</i> | | | |
| kilogramme-force par centimètre carré | kg/cm ² | <i>Puissance électrique apparente</i> | |
| kilogramme-force par mètre carré (= 10 ⁻⁴ kg/cm ²) | kg/m ² | voltampère | VA |
| | | kilovoltampère | kVA |
| | | mégavoltampère | MVA |

| | | | |
|--------------------------------------|------|---------------------------------|---------------|
| <i>Chaleur</i> | | microcurie (= $3,7 \times 10^4$ | |
| calorie | cal | désintégrations par se- | |
| kilocalorie (= 10^3 cal) | kcal | conde) | μC |
| <i>Radio-activité</i> | | <i>Unité monétaire</i> | |
| curie (= $3,7 \times 10^{10}$ désin- | | Unité de compte de | |
| tégrations par seconde) | c | l'Union européenne | |
| millicurie (= $3,7 \times 10^7$ | | des paiements | unité UEP |
| désintégrations par se- | | 1/1000 d'unité UEP | 1 mill |
| conde) | mc | | |

(*) Lorsqu'il s'agit de puissance dans un sens général, on emploie W, kW, etc. ; par contre, lorsqu'on veut indiquer plus spécialement la puissance électrique (opposé, par exemple, à la puissance thermique d'un réacteur nucléaire) on fait suivre un petit e : We, kWe, etc.

EURATOM

IMPLANTATION DES PRINCIPALES INSTALLATIONS



-  Mines d'uranium ou de thorium importantes
-  Mines d'uranium ou de thorium en développement
-  Gisements d'uranium ou de thorium
-  Centres de recherches
-  Réacteurs expérimentaux
-  Réacteurs de puissance
 Réacteurs de puissance - Centrales nucléaires
 Réacteurs de puissance - Production de chaleur
-  Usines de traitement de minerais
-  Usines de traitement de combustibles irradiés
-  Installations existantes
-  Installations en construction
-  Installations en projet