

COMMUNAUTE EUROPEENNE
DE L'ENERGIE ATOMIQUE

Bruxelles, le 8 avril 1959

E U R A T O M

La Commission

—
Direction Générale
Recherche et Enseignement

ENQUETE ARTICLE 5 (x)

Première tentative de bilan
des recherches nucléaires en cours dans la Communauté
à la date du 1er janvier 1958.

(x) Article 5 du Traité Euratom, 1957.

EUR/C/229/59/1

110. 11
110. 11
110. 11

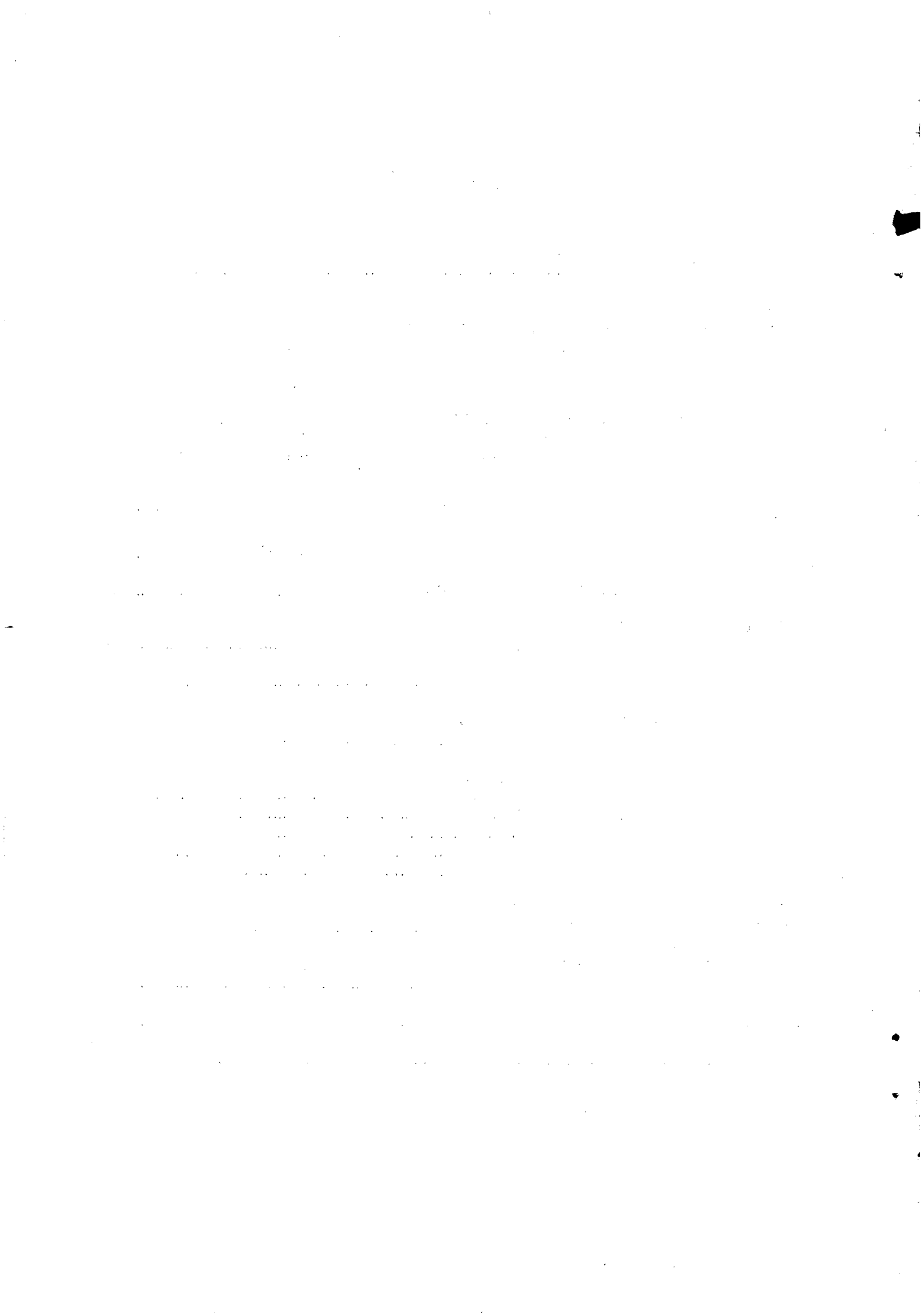
110. 11

TABLE DES MATIERES

AVANT PROPOS	A
CONSIDERATIONS GENERALES	
Comparaison de la Communauté avec les grandes puissances nucléaires	B
CHAPITRE I - MATIERES PREMIERES ET OUVREES	C
CHAPITRE II - PHYSIQUE APPLIQUEE A L'ENERGIE NUCLEAIRE	
§ 1 - Physique théorique appliquée	}
§ 2 - Physique expérimentale appliquée	
CHAPITRE II § 3	} THEORIE ET TECHNOLOGIE DES REACTEURS
CHAPITRE III	
CHAPITRE IV - TRAITEMENT DES MATIERES RADIOACTIVES	F
CHAPITRE V - APPLICATIONS DES RADIOELEMENTS	G
CHAPITRE VI - ETUDE DES EFFETS NOCIFS DES RADIATIONS SUR LES ETRES VIVANTS	H
CHAPITRE VII- EQUIPEMENTS	I
CHAPITRE IX - L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES NUCLEAIRES DANS LES PAYS DE LA COMMUNAUTE	J
ORGANISATION DE LA RECHERCHE NUCLEAIRE	
EN ALLEMAGNE	K
EN BELGIQUE	L
EN FRANCE	M
EN ITALIE	N
AUX PAYS-BAS	O
LES REACTEURS DE RECHERCHE ET LES GRANDS EQUIPEMENTS DONT DISPOSE LA COMMUNAUTE	P
LES REACTEURS DE PUISSANCE A EAU LOURDE DANS LA COMMUNAUTE	Q
LA PRODUCTION D'EAU LOURDE	R
FUSION	S

*

* *



AVANT - PROPOS

- I -

Le bon sens et le Traité instituant la Communauté Européenne de l'Energie Atomique se rejoignent, dans l'article 5 de ce dernier, en chargeant la Commission d'Euratom de faire le point des recherches nucléaires des 6 pays avant de commenter la situation, d'établir son programme propre, et de signaler les domaines dans lesquels la recherche fait défaut ou se trouve superfétatoire.

Cependant, s'il est aisé de déclarer le besoin et de formuler l'objet d'une telle enquête, il est moins facile de l'effectuer. Cette constatation banale demande quelques commentaires, que nous représenterons (§ III) après avoir décrit le document qui suit et les conditions dans lesquelles il a été préparé.

Il faut proclamer en premier lieu, qu'il s'agit d'un mauvais rapport; en second lieu qu'il ne pouvait être bon. Et c'est bien la seule raison pour le publier bien que le Traité ne stipule en la matière, ni obligation, ni échéance. Publication d'ailleurs restreinte, la distribution étant limitée aux personnes - physiques ou morales - dont la Commission espère qu'elles voudront bien aider à préparer des éditions ultérieures améliorées, ne serait-ce que parce que le présent document les aura irritées par ses erreurs et ses insuffisances (particulièrement en ce qui les concerne) sans cependant trop les indisposer (nous l'espérons du moins) contre l'organisme et les hommes qui en sont finalement responsables.

- II -

Les chapitres qui suivent tentent un portrait au 1.1.1958 des recherches nucléaires des pays de l'Euratom. Trois poses complémentaires présentent, si l'on peut dire, le sujet sous divers angles : - des monographies nationales; - des synoptiques par sujets, classés suivant les têtes de chapitre énumérées dans l'Annexe I du Traité d'Euratom (et non dans la table des matières du Traité "de omni re scibili, et quibusdam aliis"); - des monographies sur quelques sujets essentiels.

Un groupe de travail, créé par la Commission sous la présidence du signataire de ces lignes a été installé le 29/4/58 par M. le Vice-Président Medi. Ce groupe comprenait, outre des fonctionnaires d'Euratom, des experts généralement désignés sur proposition des organisations nationales, à savoir :

Allemagne	Dr. Hocker
Belgique	Prof. de Hemptinne M. Hubert
France	M. Héliot
Italie	M. Villani *
Luxembourg	M. Thill **
Pays-Bas	M. de Bruijn ***

Ces experts sont, chacun pour son pays, les auteurs des monographies nationales. Nous devons regretter que, contrairement aux engagements pris, l'expert allemand ne nous ait pas remis le texte décrivant la situation de la recherche nucléaire dans son pays.

Le personnel d'Euratom est responsable du reste du document, M. Krays ayant assumé avec efficacité et dévouement les fonctions essentielles de secrétaire du groupe de travail.

Les renseignements proviennent des sources diverses :

- publications scientifiques,
- publication d'information générale,
- visites d'établissements de recherches,
- conversations,
- rapports préparés à l'intention du groupe,
- fiches spécialisées.

Au stade actuel, préliminaire, d'une enquête permanente par nature, les quatre premiers moyens sont de loin les plus fructueux. Les deux autres, le dernier surtout, devraient prendre plus d'importance dans l'avenir.

* assistait d'abord, puis a remplacé, M. Palumbo devenu fonctionnaire d'Euratom depuis juillet 1958.

** remplaçant M. Graf décédé en juin 1958.

*** remplaçant M. Houwink devenu fonctionnaire d'Euratom depuis août 1958.

- III -

III A) La date de référence du 1.1.1958 a été choisie pour les raisons suivantes:

- 1) c'est celle d'entrée en vigueur de la Communauté;
- 2) il semblerait prudent de se borner à une date à laquelle tous les éléments pouvaient être supposés exactement connus des autorités locales.

Cependant, même excellent, un portrait datant du 1.1.1958 ne pourrait être très satisfaisant, car nous sommes en évolution rapide, et très inégalement rapide, d'un pays à l'autre de la Communauté.

Nous avons tenté d'indiquer, non seulement l'état des choses, mais aussi les tendances, sans toutefois prétendre le moins du monde à être, à ce dernier égard, complet, ni même très exact.

III B) La diversité des structures, des degrés d'avancement dans la science et l'industrie nucléaires, des habitudes de travail, etc... rend très difficile l'obtention de renseignements comparables dans les divers pays, même lorsqu'ils sont sollicités au moyen d'une fiche d'enquête uniforme.

Devant cette première enquête, l'ignorance de ceux qu'on interroge (nous y reviendrons), le désir compréhensible de ne pas sous-estimer son oeuvre, la crainte non moins légitime de révéler prématurément ses secrets, ou simplement de dévoiler trop tôt ses batteries; - tout cela se compose de façon éminemment variable en réponses ou en silences qu'il faut enregistrer tels quels (ce que nous avons fait dans les synoptiques) ou tenter d'équilibrer (ce que nous avons osé dans les monographies par sujets essentiels).

III C) Enfin, si même les obstacles précédents n'existaient pas, il est notoire que le planning et la comptabilité prévisionnelle des recherches, (même appliquées) constituent des opérations difficiles, pour lesquelles il n'existe pas de méthode universelle.

S'il est simple de dénombrer le personnel d'un établissement de recherche et de connaître son budget total, la difficulté apparaît lorsqu'on cherche à décomposer. Les grosses masses, relativement aisées à définir, renseignent peu sur le détail des travaux. La recherche poussée

de ce détail induit en erreur. La démarcation entre recherche, application et fabrication n'est pas souvent parfaitement tranchée; il est rare qu'un travail soit sans répercussion sur un autre; ou qu'un homme de valeur ayant quelque ancienneté consacre son temps entier, pendant une année entière, à une seule tâche comptabilisable, etc... C'est pourquoi nous pouvions, un peu plus haut, mentionner, sans être désobligeants, l'ignorance où ceux à qui s'adressaient nos questions pouvaient être de leurs propres affaires.

*

* *

Telles sont les raisons essentielles pour lesquelles une première enquête ne pouvait être satisfaisante mais devait néanmoins être produite.

Après discussion, les membres du groupe de travail ont été d'accord * pour préconiser de continuer l'étude en utilisant une fiche susceptible de fournir la base d'une description uniforme (physique et, globalement, comptable) des programmes de recherches de la Communauté.

Prenant comme base le modèle ci-contre, nous allons tenter, en 1959, d'avancer dans cette voie. Un sérieux effort sera nécessaire, à tous les échelons, auprès des divers intéressés.

* Certains se sont bornés à ne pas émettre d'objection.

Modèle de fiche (verso)

Personnel	Cadre :	Technique
Durée prévue		
Appareillage		
Budget		
ETAT D'AVANCEMENT		
Dates		Références

Les obstacles que rencontre la description homogène et détaillée des recherches en cours n'empêchent heureusement pas d'obtenir de la situation un tableau général permettant de dégager de grandes lignes d'action.

IV A) Compte tenu du retard avec lequel l'Europe s'est lancée dans le domaine de l'énergie atomique, l'effort global qu'elle consacre au sujet est honorable vis-à-vis de celui des grandes puissances.

Les comparaisons précises sont difficiles ou fallacieuses pour les raisons essentielles ci-dessous:

- 1) le partage exact entre programmes militaire et civil est impossible à cause de l'influence mutuelle technique des deux programmes, même si les données budgétaires complètes sont disponibles, ce qui n'est pas le cas;
- 2) la distinction entre recherche et fabrication, toujours assez floue lorsque cette dernière reste artisanale n'est, de plus, pas uniforme d'un pays à l'autre;
- 3) les publications et les échanges techniques, même limités, avantagent les derniers partants;
- 4) inversement ceux qui ont commencé tôt ont le bénéfice d'établissements "rodés" et de personnel entraîné;
- 5) les 6 pays sont à des stades très différents, l'Allemagne et l'Italie, en particulier, ayant pris, pour des raisons très différentes un départ tardif.

Sans jamais perdre de vue ces réserves, il est instructif d'examiner les tableaux XI et XII (*) comparant, globalement par pays, par million d'U.E.P. du produit national brut et par million d'habitants, les moyens (financiers et humains) consacrés à la recherche atomique dans la Communauté, aux Etats-Unis, et au Royaume-Uni. Dans ce domaine, comme dans tant d'autres, il est regrettable que nous manquions de tout détail sur la Russie.

IV B) Juger les résultats en fonction de l'effort est extrêmement dangereux, particulièrement du fait qu'une partie sensible de l'effort de la Communauté se situe encore dans la période de latence, où les résultats ne peuvent qu'être espérés ou escomptés.

Cependant il est incontestable que la dispersion caractérise nos 6 pays, et que cette tendance n'a pas été renversée

(*) voir Considérations Générales, pages - B-17 et 18 -

par la conclusion, la signature, la ratification et la mise en oeuvre du Traité instituant la Communauté.

IV C) La comparaison (Tableau XIV⁽¹⁾) des centres de recherches essentiels des Etats-Unis, du Royaume-Uni, et des 6 pays, est édifiante. Elle impose la crainte - pour certaines la certitude - que beaucoup des centres européens les plus jeunes resteront longtemps "sous-critiques" (au sens nucléaire du terme) (*). Il s'ensuit que, sous l'impulsion de la Commission, une révision des programmes nationaux doit être entreprise et d'abord au niveau des centres de recherches, sans entrer dans un plus grand détail.

Il convient d'examiner si des mesures assez radicales ne doivent pas être recommandées pour éviter de gaspiller de l'argent et surtout de gâcher des hommes (**). Un échelonnement de la mise en service des centres, allant jusqu'à la mise en sommeil de certains des chantiers actuels pour concentrer les moyens; - la conversion en stations spécialisées de centres actuellement prévus comme polyvalents; - la transformation d'établissements nationaux en institutions communautaires; - tels sont, à titre d'exemple, les questions dont l'étude s'impose d'urgence et de sang-froid, entre la Commission d'Euratome et les institutions nationales.

Cette proposition ne méconnaît les désirs légitimes ni des nations, ni des régions, ni des industries; elle permet de tenir compte des structures, ici centralisées, très distribuées ailleurs; elle s'accommode du dirigisme des uns comme du libéralisme des autres.

(*) Cette notion de "criticalité" (ou de viabilité) d'un centre soulève bien des problèmes. Elle varie avec les sujets d'étude et les habitudes locales. Il serait aisé de retrouver de doc-tes discussions, publiées avant 1943, sur la chute catastrophique d'efficacité d'un groupe dépassant 15 ou 30 chercheurs. Mais du Canada à l'U.R.S.S., les centres nucléaires vigoureux sont importants et, le plus souvent, polyvalents. Une discussion détaillée nous entraînerait au-delà de cette introduction. Elle devra prendre place dans le cadre des révisions préconisées plus loin, et ne pas négliger l'examen des conditions dans lesquelles risque de s'instaurer un gigantisme nocif. Ce dernier danger ne menace pas encore nos Centres, à l'exception peut-être d'un, ou deux au plus.

(**) Même la grande presse s'est parfois rendu compte du danger: on peut citer, à titre d'exemple, l'analyse de la situation allemande publiée par le journal "Die Welt" (Essen, indépendant) des 27 et 28 octobre 1958.

(1) voir Considérations Générales pages - B 21 -

Elle présuppose toutefois que la Communauté, inscrite dans les textes, est fondamentalement acceptée par tous ceux qui y ont souscrit, qu'il s'agisse des gouvernements, ou des gouvernés qu'ils engagent; - elle présuppose également que le souci d'une bonne gestion prime le besoin de prestige.

IV D) Entrant plus avant dans le détail, et à titre d'exemple, une demi douzaine de réacteurs à haut flux (*) existent dans la Communauté, ou pourraient y être en pleine marche avant deux ans. Mais leurs auxiliaires - sans lesquels ils sont inutiles, et qui exigent de très appréciables délais de conception, de construction, et d'essai - ne sont le plus souvent pas définis.

Certes, l'utilisation de tels instruments conditionne leur équipement et, à l'aube d'un programme, on ne peut éviter de prévoir des moyens divers adaptables à des tâches encore inconnues. Compte tenu de ces faits, et de l'imprécision qui continue à régner sur bien des programmes, un groupe de travail tente maintenant de proposer, dans un esprit communautaire, impliquant la formation d'équipes internationales, une spécialisation des réacteurs d'une part, et, d'autre part, une certaine uniformisation des équipements annexes.

Il examinera également le ou les nouveaux réacteurs d'essais qui pourraient s'avérer nécessaires.

IV E) L'oxyde d'uranium - dont nul ne conteste d'ailleurs l'importance comme combustible nucléaire à usages divers - fait l'objet, dans nos 6 pays, d'au moins 8 études distinctes.

IV F) L'étude des phénomènes thermonucléaires contrôlés donne lieu à des constatations similaires. Un groupe d'étude réuni au C.E.R.N., auquel participent des fonctionnaires d'Euratom s'est rendu compte qu'en Europe (Euratom, Suisse, Scandinavie, Royaume Uni) les recherches de ce genre emploient autant de diplômés qu'aux Etats-Unis, dont moitié environ en Angleterre. Par contre, la dépense moyenne par spécialiste est quatre fois inférieure.

Cette estimation est grossière; elle est basée sur une simple correspondance monétaire, sans égard au pouvoir d'achat, aux différences locales de rendement et d'organisation. Il faut également tenir compte de ce que le programme américain, plus ancien et très varié, possède une "capacité de dépense utile" pas encore atteinte en Europe, surtout si l'on se borne aux pays d'Euratom (environ 1 % du personnel et 6 % du budget américain à fin 1958).

(*) ou "réacteurs d'essais de matériaux"

Cependant, le besoin de concentration est clair. Dès maintenant il guide la politique de contrats de la Commission.

IV G) Nous laisserons au lecteur assidu le soin de relever dans la suite de ce rapport d'autres exemples du même genre.

Notons simplement que, en marge des recherches proprement dites, la fabrication des auxiliaires et instruments scientifiques nucléaires courants se présente trop souvent comme un artisanat plutôt que comme une industrie déjà dotée de son marché commun.

IV H) En insistant ainsi sur la concentration des moyens exigée par les sciences appliquées et les machines importantes, nous restons pleinement conscients de deux conditions nécessaires d'équilibre:

- 1) le maintien de laboratoires universitaires entièrement libres, dotés de moyens suffisants pour retenir des hommes de valeur, et liés aux centres de recherches d'énergie atomique par des liens administratifs ténus, mais des relations techniques étroites; -
- 2) la création d'une atmosphère intellectuelle vivace dans les centres d'énergie atomique.

Des contrats de recherches souples avec les universités; l'offre de stages dans les grands centres de recherches atomiques pour les universitaires de tous grades; une politique de recrutement clairvoyante, et généreuse quant aux possibilités de thèses de doctorat; - l'institution de l'année sabbatique (par statut ou de facto); - telles sont les mesures que la Commission doit pratiquer en ce qui la concerne, et recommander aux institutions nationales.

Dans cet ordre d'idées l'éventuelle fondation d'une Université Européenne doit ménager les moyens matériels et humains des Centres de Recherches, en particulier de celui (ou de ceux) qui relèveront directement de la Commission. Une solution évidente consiste à loger au Centre Commun de Recherches une partie au moins de la Faculté des Sciences de l'Université Européenne.

IV I) Il est remarquable, mais compréhensible, que la situation semble plus saine dans le domaine de la physique nucléaire que dans celui de l'énergie atomique.

La relative pauvreté des institutions nationales de recherche pure, l'absence, dans la recherche fondamentale, de préoccupations politiques et industrielles à court terme, ont permis que le C.E.R.N. fût créé bien avant Euratom. Sa seule présence renforce les programmes nationaux - contrairement à des craintes autrefois largement colportées et exploitées politiquement - mais la logique des choses est reconnue, et empêche les duplications criantes et non concertées que nous devons constater en matière d'énergie atomique.

Le bon sens (et l'aptitude scientifique) étant la chose du monde la mieux partagée, les 6 pays de la Communauté possèdent tout le talent nécessaire. Leur système d'enseignement permet d'en déceler et d'en développer une proportion respectable - bien que sans doute inférieure à celle que savent mobiliser les Etats-Unis, et, surtout, l'U.R.S.S.

La masse totale des moyens consacrés à l'énergie atomique semble adéquate, étant donné la jeunesse du sujet dans les deux pays qui groupent plus de la moitié de la population de la Communauté.

La répartition de ces moyens, par contre, n'est pas optima: la Communauté est née de ce fait.

Sa naissance, activant les projets nationaux, a déjà sensiblement accru un effort global un peu mince jusqu'en 1956. Mais elle n'a pas, d'emblée, orienté l'accroissement d'activité dans le sens coopératif. Au contraire, on a plutôt assisté à une cristallisation de positions locales.

J. GUERON.

*
* *



CONSIDERATIONS GÉNÉRALES

COMPARAISON DE LA COMMUNAUTÉ

AVEC LES GRANDES PUISSANCES NUCLÉAIRES

I. Pour apprécier l'état de la recherche nucléaire dans la Communauté, il faut le comparer à celui atteint par les autres grandes puissances : les Etats-Unis, l'URSS et la Grande Bretagne.

Certes, il ne peut être question, ici, d'établir un bilan comparatif détaillé du patrimoine acquis par ces pays dans un domaine aussi vaste que celui de la science nucléaire. Par contre, nous avons tenté de mettre en évidence l'importance relative de l'effort de recherche réalisé, depuis 1955, soit un an avant la fin de la rédaction du Traité instituant la Communauté Européenne de l'Energie Atomique, dans les pays "nucléairement développés" et dans la Communauté. A cette fin, nous avons effectué, à partir de cette date, une comparaison entre l'évolution des budgets et du personnel affectés aux recherches nucléaires dans les pays cités ci-dessus, à l'exclusion de l'URSS au sujet de laquelle nous ne disposons pas des renseignements nécessaires.

L'examen de ces chiffres montre, d'une part, l'ampleur des efforts consentis par les pays de la Communauté pour rattraper leur retard, et permet, d'autre part, d'évaluer certaines caractéristiques intéressantes telles que les quotients "dépenses par chercheur" et "budget/nombre de centres de recherche". La comparaison de ces nombres pour les Etats-Unis, la Grande Bretagne et la Communauté illustre particulièrement bien l'insuffisance des moyens mis en oeuvre dans plusieurs pays de la Communauté pour exploiter au mieux les institutions de recherche qu'ils ont créées.

D'autre part, nous avons établi ces comparaisons à partir de 1955 afin de mettre en évidence la manière dont les différents pays de la Communauté ont orienté leur politique nucléaire pendant la mise sur pied d'Euratom.

Avant de présenter les résultats de ces comparaisons, il nous a paru opportun de rappeler brièvement la nature et les buts des programmes de recherche actuellement en cours de réalisation aux Etats-Unis, en URSS et en Grande Bretagne.

Les Etats-Unis, pour des raisons bien connues, ont axé leur programme sur le développement de nombreux types de réacteurs utilisant, très généralement, de l'uranium plus ou moins enrichi. Ce programme a comme but de démontrer, d'une part, la possibilité de produire de l'énergie nucléaire à un prix compétitif, vers 1965, dans les régions où le charbon est cher, au moyen de réacteurs de types simples, et à partir de 1970 là où le charbon est bon marché.

Le tableau I résume le programme de développement des types de réacteurs de puissance étudiés aux Etats-Unis.

Tableau I (*)

Développement des types de réacteurs de puissance
aux Etats-Unis

Projets à court terme (avant 1966)	Projets à long terme (en 1970 et au-delà)
réacteurs à eau pressurisée	réacteurs homogènes
réacteurs à eau bouillante	réacteurs thermiques surrégénérateurs
réacteurs refroidis par liquides organiques	réacteurs rapides surrégénérateurs
réacteurs refroidis par gaz sous pression	

Les connaissances ainsi accumulées leur permettront dans quelques années d'apprécier, à la fois sous l'angle technique et économique, les mérites relatifs de différents types de réacteurs hétérogènes, homogènes, lents et rapides.

Il convient de souligner le fait que l'effort américain porte largement sur les domaines autres que la construction proprement dite des réacteurs et qui ont une incidence capitale sur le prix de revient du kWh nucléaire. Qu'il nous suffise de rappeler l'ampleur des programmes d'études sur l'amélioration du

(*) voir Nuclear Power, vol.4, page 94 (janvier 1959).

cycle de combustible et sur la mise au point de procédés, industriellement rentables, de traitement chimique des combustibles irradiés.

Quant aux réactions thermonucléaires contrôlées, la récente conférence de Genève et l'admirable pavillon américain de l'exposition scientifique furent une révélation. Le nombre de techniques essayées et l'ampleur des programmes de recherche sur chacune d'elles ont étonné le monde scientifique. Dans ce domaine également, les Etats-Unis semblent en tête, bien qu'aucune des reconnaissances n'ait découvert de route facile, ni même certaine.

En URSS, le programme des réacteurs de puissance, dans son développement actuel, est extrêmement ambitieux puisqu'il prévoit, pour 1960, l'installation d'une puissance totale de 2000-2500 MWe, dont jusqu'à présent, 105 MW seulement sont en service. Même s'il porte sur des types moins nombreux qu'aux Etats-Unis, ce programme important implique un programme de recherche très développé et très bien intégré. C'est d'ailleurs ce que confirment le nombre et la valeur des publications russes. De plus, l'intérêt et les efforts que les Russes consacrent à la mise au point des réacteurs rapides montrent qu'ils ont atteint un degré de "technicité" très élevé dans le domaine de la construction et du contrôle des piles atomiques.

A notre connaissance, l'URSS n'a pas publié un programme planifié dans le temps des types de réacteurs qu'elle étudie. D'une manière générale, les travaux les plus importants se rapportent au développement des réacteurs suivants :

- réacteurs à eau sous pression,
- réacteurs à uranium enrichi, modérés au graphite, refroidis par l'eau,
- réacteurs à eau bouillante,
- réacteurs homogènes eau lourde-oxyde d'uranium,
- réacteurs du type sodium-graphite,
- réacteurs rapides.

Quant à la Grande Bretagne, en dépit de ses moindres ressources elle a réussi à développer un programme nucléaire qui la place, au moins aujourd'hui, en tête des nations exploitant l'énergie nucléaire à des fins commerciales. Pour arriver à cette fin, à une époque où il était très difficile de faire un choix, les savants anglais ont osé axer le programme national sur les seuls réacteurs à uranium naturel, modérés au graphite et refroidis par gaz comprimé. Ainsi, grâce au jugement et à l'audace d'un groupe de personnalités scientifiques, la Grande Bretagne a pu mettre au point un type de réacteur simple, mais susceptible d'être considérablement amélioré (notamment le rendement thermique). Calder Hall, première centrale nucléaire

importante du monde symbolise cette réussite. Actuellement, la Grande Bretagne poursuit l'étude d'un type avancé de réacteur refroidi au gaz, d'un réacteur fonctionnant à haute température (le projet Dragon), d'un réacteur rapide (Dounreay). De plus, certains problèmes liés aux réacteurs à eau et à ceux utilisant les substances organiques font l'objet de recherches au moins préliminaires.

Enfin, la Grande Bretagne possède une usine d'enrichissement isotopique produisant de l'uranium-235 très fortement enrichi et une usine de traitement des combustibles irradiés pour l'extraction du plutonium formé dans les piles de Windscale et de Calder Hall. Nous rappelons, pour mémoire, que les Etats-Unis et l'URSS possèdent plusieurs usines de diffusion gazeuse et de traitement des combustibles, mais la capacité de production de ces usines, essentiellement militaires, est tenue secrète.

Les controverses auxquelles ont donné lieu les résultats obtenus par les savants anglais au moyen de la machine ZETA suffisent à montrer qu'en Grande Bretagne l'étude expérimentale de la fusion contrôlée a atteint, dans au moins un domaine, un stade de développement comparable à celui des Américains et des Russes.

En résumé, la fission et la fusion nucléaires font l'objet de programmes de recherche fortement intégrés aux Etats-Unis, en URSS et en Grande Bretagne. Les gouvernements de ces pays ont compris la nécessité absolue de financer puissamment et de coordonner de telles recherches en vue d'obtenir des résultats significatifs.

Comme il a été dit plus haut "compte tenu du retard avec lequel la Communauté s'est lancée dans le domaine de l'énergie atomique, l'effort global qu'elle consacre au sujet est honorable vis-à-vis de celui des grandes puissances". Toutefois, ce sont, pour l'instant, les efforts français et, toutes proportions gardées, belges, qui permettent de formuler un tel avis. Pourquoi en est-il ainsi?

Pourquoi les trois pays les plus importants de la Communauté, l'Allemagne Fédérale, la France et l'Italie, ont-ils atteint des niveaux nucléaires si inégaux, alors qu'avant la seconde guerre mondiale, ces pays étaient le foyer des découvertes majeures en sciences nucléaires?

La fission de l'uranium par bombardement neutronique a été découverte, en Allemagne par HAHN et STRASSMAN. Les travaux effectués en France durant la période 1939-1940, ont permis au CNRS de déposer trois brevets fondamentaux sur les piles atomiques. A la même époque, s'épanouit la prestigieuse école italienne de physique nucléaire.

Parmi les conséquences sociales des événements politiques survenus de 1933 à 1945, et de la guerre, l'opinion publique néglige souvent l'importance du démembrement des centres scientifiques les plus brillants d'Allemagne et d'Italie (ce phénomène quoique général est particulièrement important en physique nucléaire). Le départ d'hommes comme Einstein, Fermi, Segré, Rossi et bien d'autres non seulement désintègre plusieurs écoles, mais a pour conséquence de provoquer aux Etats-Unis un rassemblement sans précédent de savants européens. En collaboration avec leurs collègues américains, et par suite des circonstances spéciales créées par la guerre, ils prendront une part décisive à la mise sur pied et à la réalisation du formidable programme nucléaire qu'on connaît. Il est capital de se rendre compte du fait que l'actuel effort américain d'exploitation industrielle de l'énergie nucléaire, si important qu'il soit, bénéficie encore de l'impulsion première imprimée par le programme militaire et la nécessité d'exploiter au maximum les investissements énormes consentis au départ pour la réalisation de ce dernier.

Sans négliger les destructions physiques de la guerre, et la profonde désorganisation du système universitaire scientifique (en pleine renaissance maintenant) l'émigration définitive des chefs et d'une bonne partie des troupes de la pensée scientifique en physique nucléaire a favorisé la dispersion de la recherche et a considérablement retardé le développement d'un programme nucléaire coordonné, en Italie principalement et, dans une certaine mesure, en Allemagne. De plus, cette dernière a dû attendre 1955 pour que soient levées les restrictions qui lui avaient été imposées en matière d'études et de développement de l'énergie nucléaire.

La Grande Bretagne et la France offrent à ce tableau un contraste frappant.

La Grande Bretagne au sortir de la guerre, a pu maintenir intacte la tradition de la recherche dans les laboratoires universitaires; elle a eu de plus la bonne fortune de trouver plusieurs savants éminents qui fussent en même temps de brillants organisateurs, hommes dont Sir John Cockcroft est le plus célèbre.

La France a bénéficié de circonstances exceptionnelles. Durant la guerre, quelques hommes de l'équipe du Collège de France (ou liés à celle-ci) ont pu continuer leurs travaux, dans les équipes anglaises, puis anglo-canadiennes. Un noyau de chercheurs a ainsi pu garder contact avec les développements du temps de guerre. En 1946, ils reviennent presque tous en France, où un gouvernement clairvoyant a créé le Commissariat à l'Energie Atomique en octobre 1945, malgré le chaos de la période initiale de reconstruction. Si, sur le plan matériel, il faut partir de zéro, sur le plan de la pensée technique, la continuité est assurée.

D'autre part, l'audace initiale est confirmée, à partir de 1951, par les plans quinquennaux successifs qui permettent d'avoir des programmes à moyen terme. Chacun sait la réussite de l'effort nucléaire qui a permis à la France d'occuper la quatrième place du monde nucléaire.

Nous avons beaucoup insisté sur les aspects sociaux et historiques liés au développement de l'énergie nucléaire dans les trois pays principaux de la Communauté. C'est qu'il nous semble que plusieurs anomalies mises en évidence par les comparaisons chiffrées qui vont suivre, en découlent.

Avant de les présenter, il convient d'évoquer la situation de la Belgique et de la Hollande avant 1955.

Par suite, d'une part, de ses ressources limitées en charbon et, d'autre part, des importantes réserves en uranium dont elle dispose au Congo (*), la Belgique s'est très rapidement intéressée aux développements industriels de l'énergie nucléaire. La création, dès 1952, du Centre d'Energie Nucléaire à Mol, le troisième centre, en importance, de la Communauté, et l'activité de l'Institut Interuniversitaire des Sciences Nucléaires, sont des manifestations concrètes de cet intérêt.

La Hollande qui, comme la Belgique, ne disposait pas de centres traditionnels de recherche en physique nucléaire, a hésité beaucoup plus longtemps avant d'établir une politique de développement de l'énergie nucléaire. La création récente (1955) du Reactor Centrum Nederland et la construction du centre de recherche de Petten, marquent le tournant.

II. Une comparaison chiffrée des efforts consentis aux Etats-Unis, en Grande Bretagne et dans la Communauté en matière de recherche nucléaire est fort délicate pour diverses raisons. Celles-ci peuvent être mises en évidence par l'analyse du dernier budget annuel (1957) publié par la Commission à l'Energie Atomique américaine.

(*) Ces réserves ont pris, pendant la guerre, une grande importance, qui a donné depuis, à la Belgique une situation relativement privilégiée dans les rapports techniques avec les Etats-Unis.

Le budget d'exploitation de l'AEC pour l'année fiscale 1957 (juillet 1956-juin 1957) s'élève à deux milliards de dollars répartis de la façon suivante (tableaux II)

Tableau II

Budget d'exploitation de l'AEC
année fiscale 1957 (juillet 1956-juin 1957)

	\$ millions	% du total
Production de matériaux nucléaires spéciaux	788	40
Matériaux de base	402	20,4
Développement et fabrication d'armes nucléaires	337	17,3
Développement des réacteurs	276	14
Recherches en chimie, métallurgie et physique	59	3
Recherches dans les domaines médical, biologique et du cancer	33	1,6
Recherches diverses	73	3,7
	1.968	100

On constate que 60,4 % de ce budget sont consacrés à la production de matériaux spéciaux (uranium enrichi, plutonium, eau lourde, etc...). Il est évident que la plus grosse partie de ces dépenses est absorbée par l'exploitation des réacteurs plutonigènes, des diverses usines de diffusion gazeuse. Il est non moins certain que ce poste du budget d'exploitation - plus d'un milliard de dollars - alimente essentiellement le programme de défense nationale en matières ouvrées. Par ailleurs, il est pratiquement impossible de définir la limite entre les recherches de caractère militaire et celles visant à l'utilisation pacifique de l'énergie atomique. En fait, ces deux domaines interfèrent et s'appuient l'un sur l'autre : telle investigation aujourd'hui menée à des fins militaires aura demain des applications civiles.

Il est évident qu'en ne retenant, dans le budget total de l'AEC que les postes du tableau II, en relation directe avec la recherche à l'exclusion totale des dépenses "militaires" et de celles consacrées à la production des matières spéciales et de base on fait une estimation par défaut du budget consacré au développement industriel de l'énergie nucléaire.

De plus, on ne peut estimer exactement l'effort national sans tenir compte du budget de recherches nucléaires de l'industrie privée. Il est impossible d'évaluer celui-ci; toutefois, on peut dire que, quoiqu'il ne soit pas négligeable en valeur absolue, il est faible vis-à-vis du budget de l'AEC.

Ces imprécisions mises en évidence par l'examen du budget américain, apparaissent, pour les mêmes raisons, dans l'estimation des budgets de recherches nucléaires de la Grande Bretagne et des pays de la Communauté. Il convient de ne pas exagérer l'importance de ces imprécisions et en particulier celle due à l'ignorance des budgets de recherche industriels: sauf pour l'Allemagne, les Etats-Unis et, dans une certaine mesure, la Grande Bretagne, on peut dire qu'ils sont nuls par rapport aux crédits accordés par les états. C'est pourquoi nous avons estimé qu'il était rationnel d'établir la comparaison des efforts consentis par les états de la Communauté, la Grande Bretagne et les Etats-Unis pour promouvoir le développement des usages pacifiques de l'énergie nucléaire en ne considérant que les budgets consacrés par les différents organismes nationaux officiels à des fins de recherches et développement. Dès lors, dans le budget total d'exploitation de l'AEC pour l'année 1957, seuls les postes suivants du tableau II sont à retenir :

	<u>\$ millions</u>
- développement des réacteurs	276
- recherches en chimie, métallurgie et physique	59
- recherches dans les domaines médical, biologie et du cancer	33
- recherches diverses	73
	<hr style="width: 10%; margin-left: auto; margin-right: 0;"/>
	441

soit 22,3 % du budget total.

Il est intéressant de comparer ces données au bilan des investissements (amortissements compris) pour les usines et équipements, à la date du 30 juin 1957. On constate que les pourcen-

tages respectifs pour les investissements et l'exploitation des usines de production des matériaux nucléaires et d'armement sont approximativement équivalents (tableau III) et représentent 80 % des dépenses.

Tableau III

Budget d'investissement de l'AEC depuis sa création
(amortissements compris)

	\$ millions	% du total
<u>Usines de production</u>		
- matières brutes	7.428	0,1
- matières chimiques consommables	255.796	3,7
- usines de diffusion gazeuse	2.326.651	33,7
- production de matériaux dans les réacteurs et séparation	1.628.758	23,6
- production d'armes et stockage	748.889	10,8
- production d'eau lourde	264.017	3,8
- autres usines de production	354.769	5,2
	<hr/>	<hr/>
	5.586.308	80,9
<u>Installations pour la recherche</u>		
- laboratoires	565.632	8,2
- réacteurs	178.857	2,6
- accélérateurs	73.596	1,1
- divers	77.973	1,1
	<hr/>	<hr/>
	896.058	13,0
Habitations et services attenants aux centres nucléaires de l'AEC	271.353	3,9
Divers	154.167	2,2
	<hr/>	<hr/>
TOTAL	6.907.896	100,0

Sur la base définie plus haut, les budgets d'exploitation des centres nucléaires appartenant à l'AEC et des nombreux contrats que la Commission américaine passe tant avec les universités qu'avec l'industrie privée font l'objet du tableau IV.

Nous rappelons qu'aux Etats-Unis l'année fiscale va du 1er juillet au 30 juin suivant.

Tableau IV

Budget d'exploitation de l'AEC
pour les postes repris dans ce tableau
(millions de dollars)

	1955	1956	1957	1958
Développement des réacteurs	119,4	169,9	276	-
Recherches en chimie, métallurgie et physique	43,9	51,3	59	71
Recherches en médecine, biologie et cancérologie	29,1	30,1	33	-
Frais administratifs, recherches diverses	55,4	66	73	-
	247,8	317,3	441	

D'autre part, le tableau V rend compte de l'évolution du nombre d'employés, chercheurs et techniciens travaillant pour le compte de l'AEC depuis 1955.

Tableau V

Evolution de l'effectif du personnel employé par l'AEC.

	1955	1956	1957	1958
Employés administratifs	6.013	6.583	6.823	-
Personnel permanent des centres industriels, miniers et de recherche	82.936	90.238	98.176	-
Personnel temporaire pour la construction de laboratoires, réacteurs, usines, etc. de la Commission	23.606	13.322	14.369	-
	112.555	110.143	119.368	-

Ces effectifs comprennent notamment les techniciens affectés à la recherche et ceux chargés de l'exploitation des centres de production des matières nucléaires spéciales appartenant à l'AEC. Nous n'avons pas pu obtenir le premier nombre seul.

Dans les tableaux VI et VII, nous avons rassemblé respectivement les budgets de recherche et les effectifs de l'Atomic Energy Authority (Grande Bretagne) ainsi que ceux des pays de la Communauté depuis 1955. Ces tableaux appellent quelques commentaires.

Tableau VI

Budget (millions de dollars) de la UK-AEA et de la Communauté pour la recherche nucléaire

	1955	1956	1957	1958
Grande Bretagne	151,5	201,5	304,5	-
Allemagne Fédérale	-	9	17,7	32,5
Belgique	5,6	9,4	11,6	17,5
France	20,5	32	80	96
Hollande	1,8	4,7	6	3,6
Italie	3	5,9	6,4	21,1
Total pour la Communauté	30,9	61,0	121,7	170,7

Tableau VII

Evolution des effectifs du personnel employé par la UK.AEA et les centres nucléaires des pays de la Communauté depuis 1955.

Pays	1955	1956	1957	1958
Grande Bretagne	24.000	27.000	30.000	-
Allemagne Fédérale	-	-	-	1.000
Belgique	400	700	916	1.100
France	2.720	3.580	5.070	6.000
Hollande	270	349	418	530
Italie	-	-	1.390	1.500
Total pour la Communauté	3.390	4.629	7.794	10.130

Le budget de la Grande Bretagne mentionné dans le tableau VI constitue le budget total de la UK-AEA. Faute de renseignements nous n'avons pas pu faire sortir le budget "militaire", les dépenses d'investissement et d'exploitation relatives aux installations industrielles, aux réacteurs "plutonigènes", ainsi que les subsides accordés par le gouvernement anglais aux pays du Commonwealth pour la prospection minière. Il en est de même pour les effectifs du personnel. De ce fait, il est extrêmement difficile de faire la part des choses et de connaître exactement le budget annuel anglais alloué pour le développement de la recherche nucléaire à des fins pacifiques et le nombre de techniciens affectés à cette dernière.

Quant aux chiffres mentionnés pour la Communauté, ils constituent, au contraire, une estimation par défaut du fait du manque de renseignements concernant l'Allemagne Fédérale et l'Italie. En particulier, les budgets mentionnés dans le tableau VI pour l'Allemagne correspondent uniquement à la part prise par l'Etat dans le financement de la recherche nucléaire et la création des différents centres. Ils ne comprennent ni les budgets nucléaires des Länder ni l'effort financier consenti par l'industrie allemande. Or, ceux-ci étant relativement importants, l'estimation de l'ordre de grandeur des investissements pour la recherche

nucléaire est particulièrement faible pour l'Allemagne (les investissements dans les centres de Jülich, Francfort, Hambourg, Karlsruhe et Munich pour les années 1957-1958 sont estimés à 40 millions de dollars). Un rappel du mode de financement des centres nucléaires allemands permet d'apprécier la part relative prise à leur édification par l'Etat, les Länder et l'industrie (tableau VIII).

Tableau VIII

Participation (en %) de l'Etat, des Länder et de l'industrie au financement des centres nucléaires de l'Allemagne Fédérale

Centres nucléaires	Financement
Münich (comprend notamment un réacteur piscine de 1 MW en fonctionnement)	50 % Etat 50 % Bavière
Hambourg (comprend notamment un réacteur piscine de 5 MW en construction)	33,3 % Etat 33,3 % Hambourg Brème Schleswig-Holstein Niedersachsen 33,3 % industrie
Francfort (réacteur homogène de 50 kW en fonctionnement)	réacteur : industrie bâtiments : ville de Francfort équipements : Etat
Berlin (réacteur homogène de 50 kW en fonctionnement)	50 % Etat 50 % Berlin
Jülich (comprend notamment les réacteurs DIDO et MERLIN)	50 % Etat 50 % Nordrhein-Westfalen
Karlsruhe (un réacteur de 10-12 MW en construction)	30 % Etat 20 % Baden-Württemberg 50 % industrie

La plupart des centres mentionnés ci-dessus ont vu le jour dans les années 1956-1957, au moment où le Traité d'Euratom était déjà rédigé, et sont encore, à l'heure actuelle, des chantiers. Nous analyserons plus loin l'incidence de la multiplication du nombre des centres allemands, sur les possibilités de coordination de la recherche nucléaire dans la Communauté, sur la rentabilité et l'efficacité de celle-ci. Constatons ici que le recensement des techniciens nucléaires allemands est difficile du fait que nombre d'entr'eux travaillent soit dans les instituts académiques soit dans l'industrie privée.

Pour l'Italie, les budgets comprennent uniquement ceux du C.N.R.N., du CAMEN (partiellement) et du C.I.S.E.; quant aux effectifs, connus de nous uniquement pour 1958, ils représentent le personnel des trois organismes sus-mentionnés et celui de l'Agip Nucleare.

Les budgets relatifs à la Hollande, d'une part, représentent la somme des dépenses d'exploitation pour les recherches nucléaires effectuées dans les universités (à l'exception de celle de Delft), au F.O.M., au T.N.O., par le R.C.N. et l'industrie privée (à l'exclusion de la KEMA) et les investissements correspondant à la construction du centre de Petten. Quant au personnel scientifique, les chiffres mentionnés dans le tableau VII sont complets.

Enfin, les renseignements obtenus pour la Belgique et la France aussi bien en matière de budget que pour les effectifs sont les plus complets. La structure fortement centralisée de la recherche autour du C.E.N. et du C.E.A. facilite l'obtention de tels renseignements.

En résumé, les données budgétaires et celles concernant les effectifs du personnel scientifique de la Communauté Européenne sont très incomplètes. Ces lacunes nous interdisent de porter, sur le plan quantitatif, la comparaison de l'effort de recherche entre la Communauté et les puissances nucléaires. Toutefois, en raison même des écarts existant entre les budgets de recherche de l'A.E.C., de la UK.AEA, et l'ensemble de la Communauté, une comparaison qualitative basée sur les ordres de grandeur garde son sens. C'est pourquoi les chiffres officiels mentionnés dans les tableaux IV, V, VI et VII sont "arrondis" et repris dans le tableau IX. De plus, il convient de remarquer que les effectifs pour le personnel de l'A.E.C. étant connus uniquement de manière globale, nous avons estimé que 30 % sont affectés à la recherche (pour 1955, on a ramené à 25 % le pourcentage du personnel travaillant comme chercheur (*) parce qu'à cette époque pratiquement toutes les installations industrielles étaient déjà en place et que l'accroissement du personnel, dans les années suivantes, correspond davantage au développement de la recherche).

(*) Par effectif de recherche, on entend l'ensemble du personnel scientifique, les techniciens, laborants et ouvriers attachés, à un degré quelconque, à la réalisation du programme de recherche.

Le budget 1958 de recherche et développement de la Grande Bretagne est de l'ordre de 140 millions de dollars et 2.500 diplômés environ travaillent dans ce domaine. Si on admet que pour chaque ingénieur il y a trois techniciens, les effectifs totaux s'élèveraient à \pm 10.000.

Tableau IX

Evolution, depuis 1955, de l'ordre de grandeur des budgets de recherches et des effectifs dans la Communauté, les Etats-Unis et la Grande Bretagne

	1955	1956	1957	1958
Budgets (millions de \$)				
Communauté	35	65	125	175
Etats-Unis	250	320	440	-
Grande Bretagne	-	-	-	140
Effectifs				
Communauté	3.500	5.000	8.000	10.000
Etats-Unis	20.000	27.000	30.000	-
Grande Bretagne	-	-	-	10.000

Les données complémentaires nécessaires pour établir les comparaisons suivantes :

1. Investissements des gouvernements pour la recherche nucléaire en fonction du revenu national brut au prix de revient,
2. Nombre de techniciens nucléaires, (à l'exclusion de ceux appartenant à l'industrie privée) par million d'habitants,

sont rassemblés dans le tableau X.

(*) Communication personnelle de Sir J. Cockcroft.

Tableau X

	1955	1956	1957
Population (millions)			
Communauté	161,2	162,5	164,1
Etats-Unis	166,8	169,8	172,8
Grande Bretagne	51,3	51,5	51,7
Revenus nationaux bruts au prix de revient (milliards \$)			
Communauté	116,0	126,4	137,2
Etats-Unis	403,2	425,1	446,8
Grande Bretagne	53,5	58	61,3

La plupart des renseignements (population, revenus nationaux, budgets, etc...) pour 1958 n'étant pas encore connus, les comparaisons citées plus haut porteront essentiellement sur les années 1955, 1956 et 1957.

Le pourcentage du revenu national brut consacré à la recherche nucléaire n'est pas négligeable. Ces valeurs rassemblées dans le tableau XI montrent que :

- a) la Grande Bretagne fait l'effort le plus important,
- b) les dépenses dans la Communauté doublent presque chaque année depuis 1955,
- c) la comparaison entre les Etats-Unis et la Communauté ne met pas en évidence le retard réel de l'Europe dans le domaine nucléaire. Ceci est dû essentiellement au fait que le budget américain est réellement consacré à la recherche effectuée dans les centres nucléaires et laboratoires complètement équipés, ainsi qu'aux investissements nouveaux, alors que dans la Communauté, une part importante du budget est actuellement investie dans la construction de plusieurs nouveaux centres (Petten, Karlsruhe, Ispra, Jülich, Grenoble, etc...)

Tableau XI

Fraction (exprimée en °/°°) du revenu national brut consacré à la recherche en énergie atomique

	1955	1956	1957
Communauté	0,3	0,5	0,9
Etats-Unis	0,6	0,8	1
Grande Bretagne	-	-	2

De plus, il convient de rappeler que notre évaluation des budgets de recherche de l'AEC est nettement sous-estimée.

Le caractère trompeur de ces chiffres est mis en évidence par le fait que, sur la base du tableau IX, le budget par chercheur diplômé serait légèrement plus élevé dans la Communauté (16.000 \$/an) qu'aux Etats-Unis (15.000 \$/an)!

En réalité, les dépenses d'exploitation (gros équipements non compris) par chercheur diplômé s'élèvent en 1958, à 8.000 \$ dans la Communauté, à 30.000 \$ aux Etats-Unis et à 20.000 \$ en Grande Bretagne.

Les différences entre les salaires américains et ceux de la Communauté ne constituent pas, loin s'en faut, une raison suffisante pour expliquer l'importance des écarts entre les différents budgets par chercheur. De plus, la comparaison avec le coût actuel du "scientist" en Grande Bretagne montre que la cause se trouve ailleurs : les moyens mis à la disposition du chercheur anglais et américain sont très supérieurs à ceux de leurs collègues de la Communauté.

Ainsi, ces chiffres et la remarque sous c) mettent en évidence la nature de l'action à entreprendre dans la Communauté : équilibrer la multiplication et le développement des centres nucléaires avec la formation d'hommes et la constitution d'équipements de manière à créer les conditions optima d'exploitation des laboratoires existants.

Il est important de rappeler ici que la fraction des revenus nationaux consacrée au développement de l'énergie nucléaire n'est pas tellement inférieure à celle des Etats-Unis, compte tenu du retard avec lequel l'Europe a démarré ses travaux dans ce domaine. C'est la relative faiblesse du revenu national

qui risque d'empêcher la Communauté de consacrer à ses nombreux centres nucléaires des dépenses annuelles par chercheur du même ordre de grandeur que celles faites aux Etats-Unis et en Grande Bretagne. Le souci de rendement et la nécessité de concentration des efforts en découlent.

Le nombre de techniciens nucléaires par million d'habitants est considérablement plus faible dans la Communauté qu'aux Etats-Unis et en Grande Bretagne. Ces chiffres, mentionnés dans le tableau XII, sont éloquentes. Rapprochés de ceux du tableau XI ils illustrent le développement progressif des efforts dispersés entrepris par les pays de la Communauté afin de promouvoir la recherche nucléaire au moment même où se terminait la rédaction du Traité de Rome.

Tableau XII

Nombre de techniciens nucléaires par million d'habitants

	1955	1956	1957
Communauté	24	30	50
Etats-Unis	150	160	175
Grande Bretagne	175	195	210

Pour s'en convaincre, remarquons qu'en 1955 le quotient "budget de recherche/revenu national brut" de l'AEC était double de celui de la Communauté, alors qu'en 1957, la différence devient nettement plus faible (0,9 contre 1). Par contre, le nombre de techniciens par million d'habitants, six fois plus grand aux Etats-Unis en 1955, est resté trois fois plus élevé aux Etats-Unis en 1957.

Il n'y a donc aucun parallélisme entre l'accroissement des dépenses et des effectifs dans les pays de la Communauté. Ceci contribue à donner une fausse impression de satisfaction quant à l'effort accompli si l'on se borne à l'examen des budgets.

Un exemple particulièrement frappant de cette situation nous est fourni par l'analyse des moyens et des effectifs dont disposent les différents groupes européens et américains étudiant la fusion nucléaire. Cette analyse a été effectuée par le groupe de travail C.E.R.N. dont nous reproduisons les résultats et les conclusions.

Le tableau XIII relève le budget et les effectifs respectifs des principaux centres américains, anglais et européens.

Tableau XIII

Budget et effectifs des laboratoires étudiant la fusion
aux Etats-Unis, en Grande Bretagne et dans la Communauté.

	1958		1959	
	Budget millions	Effectifs	Budget millions	Effectifs
<u>Etats-Unis</u>				
Los Alamos	3,3	38	4,6	40
Oak Ridge	4,9	70	6,7	99
Princeton	12,0	97	16,8	115
Livermore	6,7	83	7,4	93
Autres	1,8	-	2,5	-
Total	28,7	288	38,0	347
<u>Grande Bretagne</u>				
AERE	3	120	6	150
AWRE				
AEI				
Londres	0,07	11	-	-
Autres	0,1	20	-	-
Total	3,17	151	6	150
<u>Communauté</u>				
Allemagne	1,2	65	2	110
Munich				
Aix-la-Chapelle				
Belgique	-	-	0,07	6
Université de Brux.				
France	0,8	25	2,5	50
C.E.A.				
Hollande	0,25	18	0,5	30
Italie	0,15	6	0,35	12
Rome				
Total	40	114	5,42	208

En 1959, chaque chercheur diplômé américain pourra dépenser 110.000 \$ pour ses travaux, alors que son collègue de la Communauté disposera de 26.000 \$ soit moins du quart. La situation de ce dernier est encore aggravée par la répartition du budget entre six laboratoires alors qu'aux Etats-Unis celui-ci est consacré à l'équipement de quatre centres appelés de ce fait à devenir de grands centres de recherche.

Dans ce domaine encore jeune, l'effort de concentration sera peut-être plus aisé. La politique de la Commission d'Euratom est axée sur ce principe : le rassemblement en deux ou trois centres d'envergure de l'éventail des études de fusion.

Les moyens dans les six pays sont insuffisants pour entreprendre simultanément et avec fruit l'investigation expérimentale à grande échelle de toutes les techniques de production et de confinement des plasmas ionisés actuellement étudiés aux Etats-Unis et en Grande Bretagne. L'établissement du programme de recherche de la Communauté doit, dès lors, être l'objet d'une étude particulièrement fouillée. La participation des spécialistes de la Direction Générale Recherches et Enseignement au groupe de travail du CERN s'inscrit dans le cadre des moyens mis en oeuvre par la Commission pour aboutir à la définition d'un programme commun intégré.

Comme déjà signalé dans l'Avant-propos (voir page) le même besoin de concentration et de spécialisation apparaît comme la condition essentielle à l'exploitation rationnelle de plusieurs centres nucléaires de la Communauté.

Le tableau XIV donne la liste des principaux centres des grands pays ou groupements atomiques pour lesquels on possède des données. Ils sont répartis en trois colonnes, suivant que leur financement est essentiellement à la charge des gouvernements, de l'industrie ou est constitué par une contribution mixte de l'état et du capital privé. Les stations de production, les chantiers de réacteurs et les centres d'études militaires n'y sont mentionnés que lorsqu'ils exercent, en outre, une activité de recherche générale. Les petits centres, ou bureaux d'études n'y figurent pas, ou sont portés entre parenthèses.

Légende du tableau XIV :

- (a) essentiellement militaire
- (b) très spécialisé
- (c) essentiellement chantier ou production
- (d) en construction
- (e) en projet
- (f) essentiellement consacré au programme naval
- (g) réacteur de recherche payé par l'industrie.

Tableau XIII

Budget et effectifs des laboratoires étudiant la fusion
aux Etats-Unis, en Grande Bretagne et dans la Communauté.

	1958		1959	
	Budget millions \$	Effectifs	Budget millions \$	Effectifs
<u>Etats-Unis</u>				
Los Alamos	3,3	38	4,6	40
Oak Ridge	4,9	70	6,7	99
Princeton	12,0	97	16,8	115
Livermore	6,7	83	7,4	93
Autres	1,8	-	2,5	-
Total	28,7	288	38,0	347
<u>Grande Bretagne</u>				
AERE)	3	120	6	150
AWRE)				
AEI)				
Londres	0,07	11	-	-
Autres	0,1	20	-	-
Total	3,17	151	6	150
<u>Communauté</u>				
Allemagne Münich)	1,2	65	2	110
Aix-la-Chapelle)				
Belgique Université de Brux.	-	-	0,07	6
France C.E.A.	0,8	25	2,5	50
Hollande	0,25	18	0,5	30
Italie Rome	0,15	6	0,35	12
Total	40	114	5,42	208

En 1959, chaque chercheur diplômé américain pourra dépenser 110.000 \$ pour ses travaux, alors que son collègue de la Communauté disposera de 26.000 \$ soit moins du quart. La situation de ce dernier est encore aggravée par la répartition du budget entre six laboratoires alors qu'aux Etats-Unis celui-ci est consacré à l'équipement de quatre centres appelés de ce fait à devenir de grands centres de recherche.

Dans ce domaine encore jeune, l'effort de concentration sera peut-être plus aisé. La politique de la Commission d'Euratom est axée sur ce principe : le rassemblement en deux ou trois centres d'envergure de l'éventail des études de fusion.

Les moyens dans les six pays sont insuffisants pour entreprendre simultanément et avec fruit l'investigation expérimentale à grande échelle de toutes les techniques de production et de confinement des plasmas ionisés actuellement étudiés aux Etats-Unis et en Grande Bretagne. L'établissement du programme de recherche de la Communauté doit, dès lors, être l'objet d'une étude particulièrement fouillée. La participation des spécialistes de la Direction Générale Recherches et Enseignement au groupe de travail du CERN s'inscrit dans le cadre des moyens mis en oeuvre par la Commission pour aboutir à la définition d'un programme commun intégré.

Comme déjà signalé dans l'Avant-propos (voir page) le même besoin de concentration et de spécialisation apparaît comme la condition essentielle à l'exploitation rationnelle de plusieurs centres nucléaires de la Communauté.

Le tableau XIV donne la liste des principaux centres des grands pays ou groupements atomiques pour lesquels on possède des données. Ils sont répartis en trois colonnes, suivant que leur financement est essentiellement à la charge des gouvernements, de l'industrie ou est constitué par une contribution mixte de l'état et du capital privé. Les stations de production, les chantiers de réacteurs et les centres d'études militaires n'y sont mentionnés que lorsqu'ils exercent, en outre, une activité de recherche générale. Les petits centres, ou bureaux d'études n'y figurent pas, ou sont portés entre parenthèses.

Légende du tableau XIV :

- (a) essentiellement militaire
- (b) très spécialisé
- (c) essentiellement chantier ou production
- (d) en construction
- (e) en projet
- (f) essentiellement consacré au programme naval
- (g) réacteur de recherche payé par l'industrie.

Tableau XIV

Liste des principaux centres nucléaires
des Etats-Unis, Grande Bretagne et de la Communauté

	Gouvernement	Industrie	Mixtes
Etats-Unis	Ames Arco Argonne Berkeley (b) Brookhaven Bettis (a) (b) Hanford Livermore (a) Los Alamos (a) Oak Ridge Princeton (b)	Vallecitos Santa Susanna Lynchburg San Diego	Knolls (f)
Grande Bretagne	Aldermaston (a) Dounreay (c) Harwell Windscale (c) Winfrith Heath (d)		
Communauté	/Berlin/ Jülich (d) /Francfort (g)/ Karlsruhe II (e) /Münich/ Mol Fontenay-aux-Roses Grenoble Saclay Station de proto- types (e) Ispra (d) /Rome (b) (d)/ /Frascati (b) (d)/	/Kema/ Saluggia (d) /Agip Nucleare/	/Hambourg (b)/ Karlsruhe I (d) /Petten (d)/ /Etablissement du CISE (a)/

Tenant compte du retard important de la Communauté sur les Etats-Unis et la Grande Bretagne, de ses ressources actuellement limitées en techniciens spécialisés, le tableau XIV met en évidence la différence de conception des anglo-saxons et des européens sur la politique de concentration des moyens. Schématiquement, on peut dire qu'en Grande Bretagne la concentration est poussée au maximum (la construction du centre de recherche de Winfrith Heath a été entreprise pour éviter qu'une nouvelle extension d'Harwell frappe ce centre de gigantisme; les effectifs d'Harwell sont de 7.000 personnes) alors que dans la Communauté la dispersion est considérable. Rappelons que sur un effectif de 10.000 personnes travaillant dans les nombreux centres de la Communauté, plus de 5.000 sont attachés aux trois centres les mieux développés : Saclay, Fontenay-aux-Roses, Mol. En d'autres termes, moins de 5.000 techniciens sont répartis en douze centres nucléaires, soit un effectif moyen de 400 personnes par centre. Sans aller aussi loin que les Anglais, on peut considérer comme raisonnable d'admettre qu'un centre nucléaire développé doit avoir un effectif de 1.000 à 2.500 personnes.

En conséquence, pour atteindre, dans tous les centres existants, ce niveau (appelé "critique" dans l'avant-propos) la Communauté devrait "trouver" au moins 15.000 techniciens nucléaires. Il est certain que cette tâche prendra plusieurs années et que par suite de leur structure économique, certains pays n'arriveront jamais, sinon avant longtemps, à supporter les charges financières afférentes à l'exploitation de centres nucléaires vraiment développés.

Il faut ajouter que cette situation pourrait s'aggraver encore si les deux projets mentionnés dans le tableau XIV (Karlsruhe II et station de prototypes) étaient réalisés. Seule, une action énergique et rapide de coordination, de la part de la Commission peut améliorer la situation actuelle et réfréner cette politique de "naissance non contrôlée" de centres nucléaires.

On peut discuter la validité du concept de criticalité d'un centre en affirmant qu'un petit noyau fortement spécialisé peut être très efficace.

La nécessité et l'efficacité de petits laboratoires hautement qualifiés dans un domaine scientifique non nucléaire sont prouvées par les faits.

L'impossibilité d'exploiter économiquement des laboratoires nucléaires sur ce module tient aux causes suivantes :

- a) Dans un laboratoire de recherche classique, les investissements pour les services et les frais généraux fixes varient en fonction de son importance à partir de dimensions minimum faibles. Dans un laboratoire nucléaire, il en va tout autre-

ment. L'exploitation d'un réacteur impose la mise en place d'une série de services et d'installations annexes fort onéreux : traitement et stockage des résidus en fonction de leur activité, équipes pour le contrôle de la radioactivité, cellules blindées, etc...

- b) Le domaine de l'énergie nucléaire est constitué de plusieurs disciplines scientifiques (chimie, engineering dans son sens le plus large, électronique, mathématiques, métallurgie, physique, etc...) exigeant des laboratoires spécialisés "gravitant" plus ou moins autour du noyau central, le réacteur nucléaire. Une forte spécialisation de celui-ci peut abaisser quelque peu le niveau "critique" de la rentabilité de son exploitation.

C'est pourquoi, en raison même de la pléthore de centres nucléaires dans la Communauté et des difficultés énormes que celle-ci aura à surmonter pour trouver, dans un futur immédiat, les ressources financières convenables et un nombre suffisant de techniciens, il faut recommander la concentration des moyens et une spécialisation des centres.

III.

Les renseignements obtenus sur les sujets de recherche en cours d'étude à la date du 1-1-1958 dans la Communauté sont rassemblés dans les chapitres suivants. Ceux-ci correspondent à la nomenclature proposée dans l'Annexe I du Traité. Nous nous sommes écartés de la classification de cette annexe dans les deux cas suivants :

- a) le chapitre VIII "Aspects économiques de la production d'énergie" n'a pas été traité ici. La Communauté ne possédant pas à l'heure actuelle un seul réacteur de puissance en fonctionnement, nous ne pouvions pas obtenir des renseignements valables sur des études économiques des réacteurs. Certes, certains aspects de l'exploitation de centrales nucléaires font déjà l'objet d'estimations économiques basées sur des hypothèses plus ou moins spéculatives (coût du cycle de combustible en fonction de l'enrichissement sur la base d'un burn-up non vérifié expérimentalement par exemple). De tels travaux sont trop fragmentaires pour être repris dans ce rapport.

- b) Un chapitre IX relatif à l'enseignement des sciences nucléaires dans les pays de la Communauté a été ajouté. L'importance même du sujet méritait une étude complémentaire à celle publiée en 1958 par l'OECE.

P. KRUYIS.

CHAPITRE I

MATIERES PREMIERES ET OUVREES

1. Méthodes de prospection minière et d'exploitation des mines, particulières aux matières de base (uranium, thorium et autres produits d'un intérêt particulier pour l'énergie nucléaire).

L'effort de la Communauté dans ce domaine s'exprime par les chiffres suivants:

Budget : 17.000.000 UEP
Personnel total: 2.200

la France s'inscrivant pour plus de 90 % dans ce bilan (*).

Il y a quelques années, les équipes de prospecteurs, équipées d'appareils relativement lourds pour la détection du rayonnement γ , parcouraient à pied les zones jugées intéressantes par les géologues et traçaient la carte de radioactivité des terrains. Cette méthode ne permettait qu'une prospection lente.

Actuellement, certains pays et la France en particulier, ont mis au point des détecteurs enregistreurs autoportés et aéroportés. Ces appareils ont été conçus pour éliminer l'effet gênant de certains corps radioactifs tel le potassium 40. Le tracé de cartes radioactives à grande échelle est ainsi rapide, et délimite avec précision les lieux nécessitant une prospection plus détaillée.

Les progrès réalisés dans le traitement des minerais permettent maintenant l'exploitation de minerais pauvres considérés jusqu'alors comme non rentables.

L'amélioration de la sensibilité des détecteurs a conduit à l'étude et à la réalisation de trieurs automatiques permettant de séparer de sa gangue le matériau de teneur convenable.

2. Méthodes de concentration de ces matières et de transformation en composés de pureté technique.

L'effort de la Communauté correspond là à 1.200.000 UEP et un personnel au travail d'environ 140.

(*) L'importance du chiffre provient du fait que les données fournies pour la France ne permettent pas de distinguer la recherche de l'exploitation.

Dans ce domaine, on peut considérer que certaines séries de méthodes sont au point. Des recherches actives sont cependant menées pour adapter les procédés connus aux différents types de minerais (en particulier les minerais pauvres) et améliorer les prix de revient en même temps que la qualité des produits demi-finis (cf. fluoruration directe des minerais).

3. Méthodes de transformation de ces composés de pureté technique en composés et métaux de qualité nucléaire.

Il est difficile de donner ici une estimation de l'effort total, la plupart des firmes n'ayant communiqué aucun chiffre. Cependant, par extrapolation on peut donner, sous toutes réserves, les chiffres suivants:

Budget : 3.000.000. UEP
Personnel : 200

- 1) Aucune fiche ne fait état d'études concernant la préparation directe d'alliages d'uranium par coélaboration (procédé "Dingot", exploité par la Mallinckrodt Co.)

A signaler cependant une communication belge faite à Genève au sujet de la préparation de zircalloy par coélaboration.

En outre, il est possible que le souci d'abaisser la teneur en H_2 des lingots élaborés évoqué dans quelques fiches (amélioration de la production: HOBOKEN et CEA) soit déjà un premier pas vers la préparation d'alliages par coélaboration. En effet, le gros intérêt de cette méthode est d'éviter la refusion sous vide (et la contamination en carbone qui en résulte), ce qui est impossible si la teneur en H_2 du métal élaboré est trop forte (en effet, il faut alors éliminer UH_3 indésirable pour la suite de la fabrication).

- 2) Deux fiches (France et Italie) font état du passage par un fluorure double, lequel est préparé par précipitation d'une solution aqueuse -préparation probablement plus économique que le procédé de voie sèche- et généralement aisément réduit par le magnésium. Une étude comparative sur le plan économique des divers procédés montrerait l'intérêt de cette préparation trop peu étudiée semble-t-il.
- 3) Un gros effort est généralement fait pour la préparation d' UO_2 apte au frittage. Dans ce domaine, une coopération des spécialistes serait certainement fructueuse: elle devrait surtout tendre à définir clairement les critères qui permettent de juger l'aptitude au frittage de l' UO_2 (surface spécifique de la poudre, mode de préparation, forme du grain, écart à la stoechiométrie, etc...)

- 4) Par contre, il est peu fait état de la préparation d' UO_2 à faible surface pour suspensions ou dispersions.

4. Méthodes de transformation et de façonnage de ces composés et métaux ainsi que de plutonium, d'uranium 235 ou 233 purs ou associés à ces composés ou métaux - par l'industrie chimique, céramique ou métallurgique, en éléments de combustible.

En faisant les mêmes réserves qu'en 3), les chiffres sont:

Budget : 4 à 5.000.000 UEP
Personnel : 500

- 1) Les éléments combustibles à base d'uranium ou d'alliage d'uranium, d' UO_2 et même d'UC, sont étudiés dans tous les pays et parfois par plusieurs firmes dans un même pays. Des échanges seraient fructueux dans ce domaine, particulièrement en ce qui concerne les ateliers de fabrication semi-industrielle. En effet, ces ateliers sont amenés à fabriquer de petites séries et à modifier souvent les taux d'enrichissement ce qui grève fortement le prix de revient (à cause de la nécessité de nettoyer complètement l'installation chaque fois qu'on change de taux d'enrichissement).
- 2) Les éléments combustibles du type cermets ou éléments dispersés sont par contre rarement envisagés. Ceci s'explique par le fait que les pays européens ne disposent pas d'uranium enrichi.
- 3) D'autre part, et peut-être pour la même raison qu'en 2), les fuels liquides (métaux ou sels fondus) en solution ou en suspension, ne sont pratiquement pas évoqués (deux exceptions: le programme hollandais et la pile Proserpine de Saclay).
- 4) D'une manière générale, l'U 233 reste une perspective lointaine. Cependant, il n'est peut-être pas trop tôt pour étudier les éléments combustibles dans lesquels U et Th sont intimement mélangés.
- 5) Les éléments combustibles permettant une réponse immédiate du coefficient de température par mélange intime du fuel et du ralentisseur ne sont pas évoqués (exemple: éléments combustibles U-Zr H, présentés par les américains à Genève). Bien que ce type d'élément combustible paraisse sans grand avenir dans le domaine des piles de puissance, il présente un grand intérêt pour le montage de piles utilisées pour la formation de spécialistes.

6) On peut noter aussi que les études sur le Pu sont peu avancées (sauf en France). Le manque de matières premières en est la cause. L'accord Euratom/USA peut remédier à cette pénurie.

5. Méthodes de protection de ces éléments de combustible contre les agents de corrosion ou d'érosion extérieurs.

Le budget total consacré à ce domaine dans la Communauté est de l'ordre de 3.000.000 UEP pour un personnel de 250 environ.

Il y a peu de remarques à formuler sur les doubles emplois ou les "trous". La plupart des méthodes ont été évoquées.

Cependant, il est peu question du gainage à l'acier inox d'une part, d'études concernant des alliages ou des composés d'uranium peu corrodables d'autre part.

6. Méthodes de production, de purification, de façonnage et de conservation des autres matériaux spéciaux du domaine de l'énergie nucléaire.

Les effectifs totaux sont d'environ 1000 personnes pour un budget de l'ordre de 5.000.000 UEP.

- 1) Il n'apparaît pas de domaine qui ne soit pas exploré par au moins une firme ou un groupe d'un des six pays.
- 2) Il semble qu'une collaboration fructueuse pourrait s'établir sur les sujets suivants:
 - graphite
 - beryllium
 - zirconium et zircalloy
 - niobium
 - sodium et alliages sodium-potassium.
- 3) L'un des "trous" les plus importants semble concerner les thermofluides organiques qui pourraient être cependant d'un grand intérêt pour l'accord USA/Euratom si un réacteur du type ONRE était sélectionné.
- 4) Quant au bismuth et au plomb, le manque relatif d'intérêt manifesté pour ces deux métaux se rattache au "trou" constaté plus haut pour les "liquid fuels".

7. Méthodes de séparation isotopiques.

L'effort total de la Communauté s'exprime par les chiffres suivants:

Budget : 3.000.000 UEP
Personnel : 400

Il apparaît que dans le domaine de l'enrichissement de l'uranium l'Europe est en retard sur les grands pays.

Des méthodes originales sont cependant étudiées et les auteurs de ces études espèrent la mise au point d'un procédé industriel plus économique que la diffusion.

S'agissant des autres matériaux, il est difficile de porter un jugement. L'intérêt du lithium dépend beaucoup des espoirs qu'on peut placer dans l'utilisation de l'énergie thermonucléaire. Quant aux différents isotopes stables, si leur séparation fait l'objet d'études assez complètes, les besoins sont à l'heure actuelle satisfaits par l'importation.

*
* *

Chapitre II

PHYSIQUE APPLIQUEE A L'ENERGIE NUCLEAIRE

- § 1 - Physique théorique appliquée
- § 2 - Physique expérimentale appliquée.

a) Réactions nucléaires à basse énergie, en particulier réactions provoquées par neutrons.

Des études sur ces problèmes sont en cours dans tous les pays de la Communauté, tant dans les centres nationaux ou organismes spécialisés que dans les laboratoires universitaires.

On étudie, au point de vue théorique et expérimental, la spectroscopie nucléaire en général et les modèles nucléaires, les désintégrations α , β , les moments magnétiques et quadrupolaires. Au point de vue expérimental, les recherches sont basées sur l'étude de la radiation γ , de la photoproduction, de la diffusion inélastique, de l'excitation coulombienne, etc... On étudie également les réactions de stripping, réactions (p, α) , $(n, 2n)$, etc..., réactions avec noyaux polarisés (surtout aux Pays-Bas). Dans deux laboratoires au moins (Saclay, CISE), on étudie activement l'important problème de l'interaction directe.

Les problèmes de résonance sont étudiés en France et en Italie.

Dans presque tous les pays on étudie, théoriquement et expérimentalement, les sections efficaces pour neutrons, et certaines organisations se chargent de rassembler et tenir à jour toutes les données à ce sujet.

La détection des neutrons, dans tous les domaines d'énergie intéressant les applications, notamment des neutrons rapides, s'effectue par diverses techniques, en particulier au moyen des émulsions nucléaires (Saclay, Belgique), qui sont également utilisées pour l'étude de la tripartition.

Pour la production des réactions à basse énergie, on dispose, entr'autres, d'une cinquantaine d'accélérateurs électrostatiques (Van de Graaff, Cockcroft-Walton ou assimilés). On utilise notamment la photoproduction, la radiation de "bremsstrahlung" produite par les quelques accélérateurs linéaires et cer-

tains bétatrons (rappelons que les centres de recherche aux Etats-Unis possèdent plus d'une centaine d'accélérateurs électrostatiques.

Il faut noter aussi que dans les centres et dans certains laboratoires, on travaille activement au perfectionnement des accélérateurs, en particulier des sources ioniques, notamment des sources d'ions moyens plurichargés (Saclay).

On étudie également le perfectionnement et le développement de tous les types de sélecteurs, de l'appareillage électronique et des détections en général.

Le nombre des chercheurs de niveau universitaire affectés à ces recherches s'élève à une centaine (Allemagne non comprise).

b) Fission.

Les recherches dans ce domaine ne sont pas nombreuses. A Mol (Belgique) seulement on fait des recherches systématiques sur l'ensemble des phénomènes qui se réfèrent à la fission en fonction de l'énergie neutronique.

Le nombre de neutrons émis par fission est étudié à Saclay ainsi que certains aspects particuliers du phénomène (fission ternaire). A Saclay aussi, et aux Pays-Bas, on travaille sur les fragments de fission.

c) Interaction des rayonnements ionisants et photons avec la matière.

Les travaux dans ce domaine sont nombreux dans la Communauté. L'intérêt pour l'étude théorique et expérimentale de la radiation cosmique et des phénomènes de haute énergie est de tradition, et comme on le sait, la contribution scientifique a toujours été remarquable et parfois brillante. Des recherches théoriques se font notamment en Allemagne, en France, en Italie, aux Pays-Bas. Tous les pays étudient et développent l'équipement expérimental de détection (notamment des chambres à hydrogène et à propane). En ce qui concerne les grosses machines, outre celles (achevées ou en construction) du CERN -dont les pays de la Communauté font partie- il y a un synchrotron à électrons de 0,5 GeV en Allemagne, un synchrotron à électrons de 1 GeV qui vient d'être achevé en Italie, un synchrotron à protons de 1 GeV aux Pays-Bas et le synchrotron à protons, Saturne, de 3 GeV en France. La construction de ces machines, dont certaines présentent des perfectionnements intéressants, est une réalisation remarquable.

Dans le domaine des basses énergies, on peut citer des études théoriques et expérimentales de caractère fondamental sur la polarisation de la radiation γ et sur la photoproduction (France, Italie). Sur la diffusion, des expériences avec des protons polarisés et la fabrication d'une source de protons polarisés pour le cyclotron sont en cours ou en projet à Saclay.

La technique des émulsions nucléaires est partout très utilisée et développée.

Les effets des radiations sur les matières organiques sont étudiés en Belgique et en France.

A signaler des études pour l'utilisation directe de l'énergie des fragments de fission pour la synthèse chimique et la construction (Grenoble) d'une source de radiation -utilisant un réacteur- destinée à des buts industriels.

Les études et la construction des appareillages de détection (compteurs de différents types, chambres, équipements électroniques) se poursuivent en Belgique, en France, en Italie, aux Pays-Bas.

d) Théorie de l'état solide.

Dans tous les pays de la Communauté, on fait des recherches sur la physique de l'état solide, sur les points qui ont des relations avec la physique nucléaire et ses applications.

Un des problèmes les plus importants est l'étude de l'effet des radiations sur les solides. Cette étude s'effectue soit par des méthodes basées sur l'observation des propriétés macroscopiques, par exemple : propriétés mécaniques, électriques, optiques, dilatation, énergie emmagasinée, etc..., soit en essayant d'éclaircir la nature de ces phénomènes au moyen de l'étude des défauts dans les solides, étude que l'on peut faire notamment par les propriétés optiques et magnétiques des défauts eux-mêmes. Des recherches dans les deux voies se font en Belgique (frottements intérieurs, étude de dislocation), en France (constante élastique, défauts dans les cristaux ioniques), en Italie (propriétés physiques des défauts, mécanisme de leur production), ainsi qu'en Allemagne et aux Pays-Bas.

Parmi les centres bien équipés, tant en personnel scientifique qu'en moyens, il faut compter Mol, Saclay, Grenoble et le CISE. Au centre d'Ispra également, on compte faire une large part à ces recherches. Les Pays-Bas aussi disposent de laboratoires parfaitement équipés.

Certains laboratoires s'occupent de l'étude de l'état solide au moyen de l'absorption électronique ou nucléaire (magnétique et quadrupolaire). Ces études qui ont, en quelque sorte, débuté aux Pays-Bas, sont très utiles pour la physique nucléaire comme pour la physique de l'état solide, et elles ont trouvé récemment des applications importantes (polarisation et alignement des noyaux, parité, etc...). Il faut noter qu'elles pourront avoir des applications intéressantes, étant donné que plusieurs éléments d'intérêt dans la technologie nucléaire (terres rares, uranium et transuraniens), forment des composés paramagnétiques.

En ce qui concerne les services que la neutronique peut rendre à l'étude de l'état solide, il faut signaler les applications à l'antiferromagnétisme (et phénomènes connexes) (Grenoble) et l'étude des niveaux d'énergie dans les cristaux au moyen de la diffusion inélastique.

L'important problème de la diffusion entre solides a donné lieu à peu de recherches (Italie).

- e) Etude de la fusion notamment sur le comportement d'un plasma ionisé sous l'action de forces électromagnétiques et sur la thermodynamique des températures extrêmement élevées.

Une étude détaillée de ce sujet est reprise dans le chapitre "FUSION", pages 45.

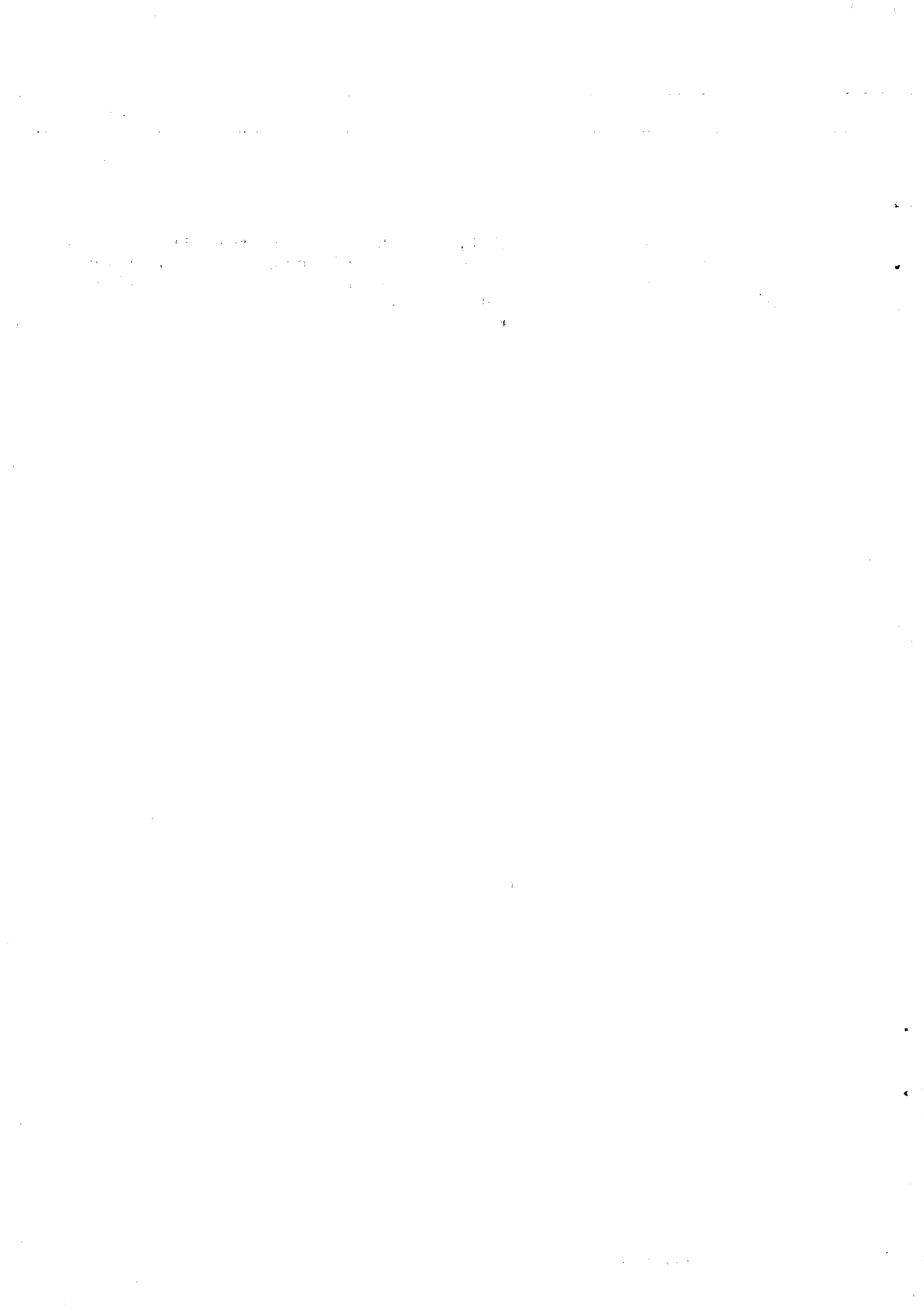
Considérations générales.

L'état de la recherche dans le domaine de la physique, tant théorique qu'expérimentale, dans la Communauté peut être considérée comme satisfaisant, sauf pour la fission. Les études sur la fusion sont en général au stade initial. L'organisation de la recherche est plutôt différente dans les divers pays.

En Belgique, en France et aux Pays-Bas, les organisations centrales ont une fonction de planification et de coordination effective. En France notamment une grande partie de la recherche est centralisée dans un petit nombre d'établissements. En Allemagne et en Italie, où la plupart des recherches se font dans les universités, la coordination est moins poussée. Il semble que cela n'entraîne pas de conséquences graves.

On trouvera, ci-joint, un tableau récapitulatif des budgets et personnel (techniciens compris) engagés en 1958 pour les recherches dans le domaine de la physique visées au chapitre II de l'Article 5 du Traité.

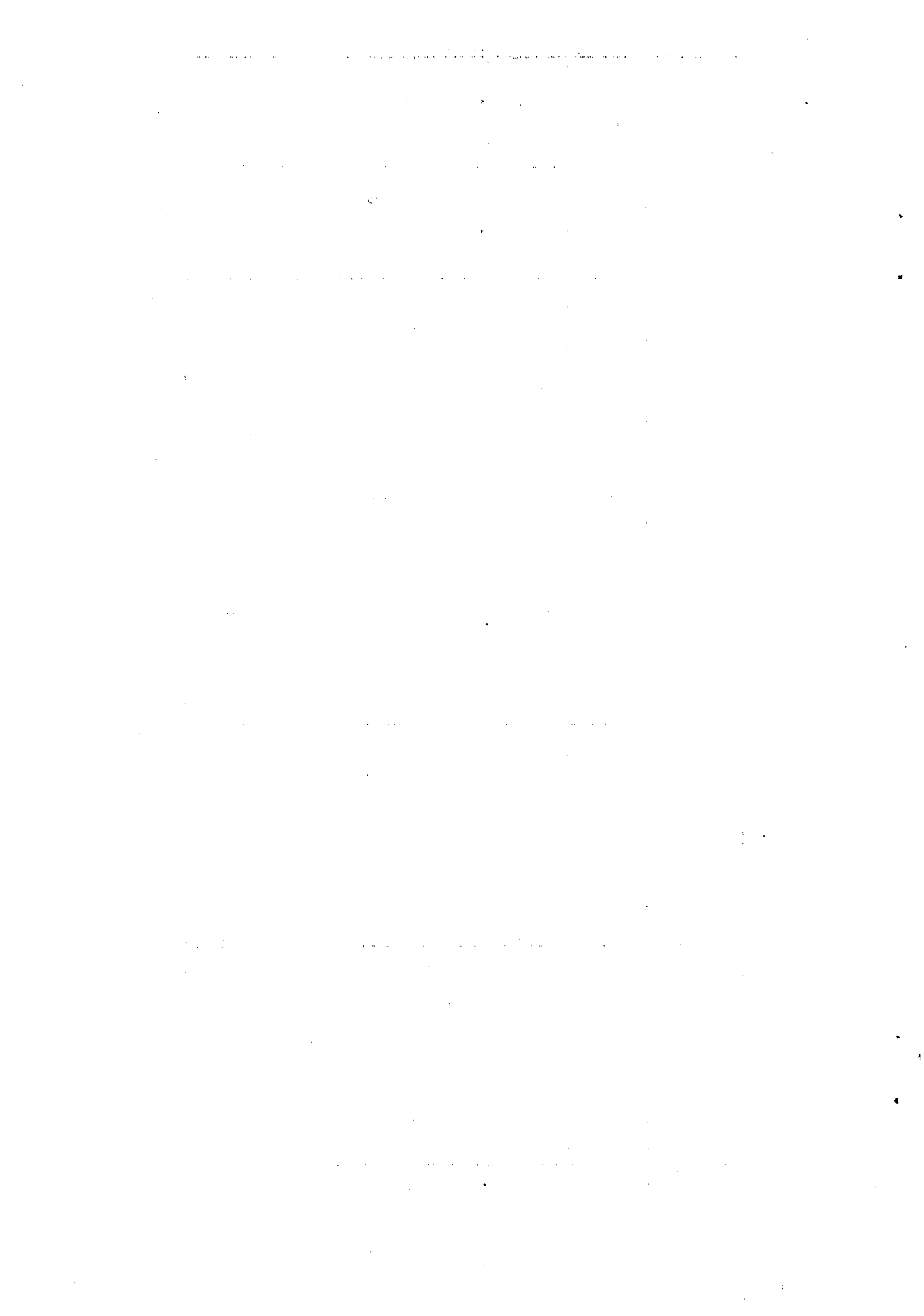
*
* * *



Budgets et personnel (techniciens compris) engagés en 1958 pour les recherches dans le domaine de la physique (Chap. II).

	Réactions nucléaires à basse énergie (a)		Fission (b)		Interaction des rayonnements ionisants et photons avec la matière (c)		Théorie de l'état solide (d)		Fusion (e)	
	Budget	Personnel	Budget	Personnel	Budget	Personnel	Budget	Personnel	Budget	Personnel (*)
Belgique	31	26	700	-	151	21	80	46	-	-
Allemagne	-	-	-	-	-	-	-	-	1.250	70
France	14	61	-	-	23.193(**)	190	179	55	1.000	40
Italie	185	45	-	-	58	48	289	54	150	6
Pays-Bas	300	56	-	-	80	56	115	33	250	18
(*) Universitaires seulement										
(**) Saturne compris										

Le personnel a été partagé pour les Pays-Bas entre a) et c) d'une façon plutôt arbitraire. Dans les universités surtout, il est difficile de savoir dans quel cas le personnel est compté deux fois a) et c). Le budget et le personnel de l'Allemagne ne sont pas compris dans ces chiffres, sauf pour le point e).



THEORIE ET TECHNOLOGIE DES REACTEURS

Chap. II § 3 Physique des réacteurs
Chap. III Physico-Chimie des réacteurs

Introduction

Le découpage des domaines de recherche proposé par l'annexe 1 du Traité instituant l'Euratom, n'est guère satisfaisant car, entre autres, il réunit dans le chapitre II des domaines qui n'ont pas grande chose en commun. Il a semblé intéressant de réunir Chap. II § 3 et Chap. III. Les recherches ainsi rassemblées n'ont pas de parenté naturelle: elles ont une parenté de destination car elles conditionnent l'évolution des programmes de réalisation des réacteurs de différents types. Il est cependant nécessaire de noter qu'il est difficile de classer ici certaines activités comme par exemple celle des bureaux d'études chargés de l'établissement de projets de réacteurs. D'autres activités cependant qui pourraient entrer dans le cadre du présent chapitre sont répertoriées ailleurs: fabrication des éléments combustibles, mise au point des équipes auxiliaires etc...

Orientation des recherches et des réalisations

D'après ce qui précède on peut juger qu'avant de se livrer à des commentaires sur le résultat de l'enquête qui a été menée il est intéressant de voir quelle est l'importance des réalisations de réacteurs de toutes natures effectuées, en cours ou projetées dans les différents pays de la Communauté.

Il serait encore plus intéressant de pouvoir comparer le budget total de chacune de ces réalisations depuis les études préliminaires jusqu'au moment (le cas échéant) de leur achèvement: ce budget n'est malheureusement qu'exceptionnellement connu.

On se contentera de caractériser les différents projets par les lettres:

- a: étude préliminaire
- b: travaux de mise au point
- c: développement et construction
- d: fonctionnement
- r: recherche
- p: puissance.

Sont indiqués successivement l'utilisation, l'état d'avancement, la nature, le lieu (propriétaire), l'auteur de chaque réalisation.

Allemagne

Un caractère des recherches dans ce pays est la prépondérance des travaux effectués par les entreprises privées. Il s'ensuit que les études de réacteurs ont un caractère d'avant-projets industriels et ne sont pas étayées par un acquis expérimental important. Cette insuffisance est palliée par le recours aux industries U.S. et U.K. auxquelles on a fait largement appel pour les premières réalisations:

Utili- sation	état d'avan- cement	désignation (nature)	lieu (proprié- taire)	auteur des études et recherches
				<u>1. Réalisations Etrangères</u>
r	d	FRM	Munich	industries U.S.
r	c-d	FRH	Hamburg	
r	d	FRF	Frankfurt	
r	d	FRB	Berlin	
r		DIDO	Jülich	industries U.K.
r	c	MERLIN	Jülich	
				<u>2. Réalisations Nationales</u>
r	c	FR2	Karlsruhe	Kernreaktorbau- und Betriebs-G.m.b.H.
p	b	SNDR (étude eau lourde)		Siemens
p	b	"Schulten" (étude pebble bed)		BBC
p	a-b	propulsion navale (dis- pose du FRH)		Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schiffahrt

Il faut encore signaler que les firmes suivantes travaillent à des avant-projets de réacteurs:

AEG	(réacteur à eau légère 100 MWe; p,a)
Interatom	(réacteur D ₂ O - organique: p,a)
Metallgesellschaft	(p, a)
Lurgi	(p, a).

Belgique

La plus grande part des recherches revient ici au C.E.N. Cependant, l'industrie privée fait preuve d'initiative dans le domaine nucléaire. Ceci se traduit par les mêmes phénomènes qu'en Allemagne.

Utili- sation	état d'avan- cement	désignation (nature)	lieu (proprié- taire)	auteur des études et recherches
				<u>1. Réalisations Etrangères</u>
r	c	BR2	Mol	} études U.S.
p	c	BR3 (type PWR)	Mol	
				<u>2. Réalisations Nationales</u>
r	d	BR1	Mol	C.E.N.
p	a-b	(type PWR)		A.C.E.C.
p	a-b	(type rapide)		BELGONUCLEAIRE (avec APDA)
p	a	appel d'off- res pour 150 MWe		EDF + Consortium Centre-Sud + BEN

France

Les recherches entreprises ou menées à bien forment un tout déjà imposant. Cependant, au stade des réalisations industrielles l'effort s'est porté presque exclusivement sur le réacteur modéré au graphite et refroidi au gaz avec l'uranium métallique pour combustible. Dans le domaine qui nous concerne ici l'initiative des recherches entreprises revient exclusivement au C.E.A. quoique la collaboration des laboratoires d'universités ou autres soit notable, de même que le rôle d'exécution de l'industrie privée est prépondérant dans les réalisations.

Les moyens expérimentaux sont cependant même ici notablement insuffisants surtout si l'on doit entreprendre une diversification de l'effort entrepris. Les réalisations sont exclusivement nationales:

Utili- sation	état d'avan- cement	désignation (nature)	lieu (proprié- taire)	auteur des études et recherches
r	d	Zoe	CENF	CEA
r	d	EL2	CENS	CEA
r	d	EL3	CENS	CEA (+ ATL)
r	d	Aquilon Rubéole Proserpine	CENS	CEA
r	c	Alizé	CENS	CEA (+ CARA)
r	d	Triton- Melusine	CENF et CENG	Indatom
r	c	Minerve	CENF	Indatom+Seratom
r	a-b	Rapsodie (rapide)	CEA	CEA
r	a-b	Homogène	CEA	CEA
p	b	pile chaude (gaz chaud)	CEA	CEA (+SNECMA)
p	c	Prop.navale militaire		CEA + Marine Nati.
p	a-b	Prop.navale civile		CEA + Marine March.
p	c-d	projets "G" (gaz et graphite)	Marcoule	CEA + SFAC et SACM
p	c	projets "EDF" (gaz et graphite)	Chinon	CEA + EDF
p	a-b	BWR (centrale terrestre de faible capa- cité)		CEA + Indatom et Alsthom

Italie

Les recherches sont extrêmement disséminées; chacune des équipes de faible importance ayant théoriquement un programme disproportionné avec ses moyens. Cette disproportion, au moins en ce qui concerne l'équipement, sera sans doute moins sensible au CNRN d'Ispra.

Les réalisations en cours ou envisagées font appel aux industries étrangères.

Utili- sation	état d'avan- cement	désignation (nature)	lieu (proprié- taire)	auteur des études et recherches
r	c	Livourne	Livourne	réacteurs - techniques américaines
r	c	Homogène	Milan, Inst. Polytechn. de Milan	
r	c	Saluggia	Saluggia	
r	c	Ispira I (type CP5)	Ispira, CNRN	
p	b	Latina (graphite + gaz 200 MWe)	SIMEA	Ind. UK + AGIP
p	b	BWR(150MWe)	SENN	Ind. US
p	b	PWR(135MWe)	SELNI	Ind. US
p	b	BWR (D20, vapeur)		CISE + ANSALDO

Le dernier projet est le seul de conception purement italienne.

Pays-Bas

L'initiative des recherches effectuées ici a été le fait du R.C.N.. Les premières réalisations ont fait appel aux industries américaines. Cependant, on s'est orienté dans deux domaines bien définis: le réacteur de puissance à eau lourde en collaboration avec la Norvège (IFA) et le réacteur homogène à suspension en collaboration avec KEMA, Philips et d'autres firmes qui ont constitué le groupe Insustor.

Utili- sation	état d'avan- cement	désignation (nature)	lieu (proprié- taire)	auteur des études et recherches
r	d	HOR	RCN, Petten	Ind. US
r	c	HFR	RCN, Petten	Ind. US
p	c-d	Halden	IFA, Halden	RCN + IFA
p	b	SUSPOP (homogène à suspension)	RCN	RCN - KEMA
p	a	150 MWe (Appel d'offres des compagnies d'électricité néerlandaises)		

De l'examen qui précède on peut tirer la conclusion que les voies abordées sont nombreuses: on peut distinguer:

- Réacteurs de Recherche
- Réacteurs Graphite-Uranium naturel métallique
- Réacteurs Eau lourde - Uranium naturel
- Réacteurs Eau légère (liquides organiques) - Uranium enrichi

- Réacteurs à gaz chaud
- Réacteurs rapides
- Réacteurs homogènes.

On peut même penser qu'il n'y a guère de lacune dans l'échantillonnage des types de réacteurs dont la construction a été effectuée ou projetée. Il est tout aussi évident que les moyens mis au service de ces projets n'ont pas la même importance suivant les cas et il importe de se demander dans chaque cas à quelle distance du but on se trouve, et si les moyens employés permettent ou non d'acquérir le know-how nécessaire aux réalisations futures. Signalons tout de suite que les 3 dernières voies en sont à un stade très préliminaire.

Progrès dans les différentes voies

Réacteurs de Recherche

Quoique ces réacteurs soient très divers par leurs types, leurs buts, leurs performances ils ont en commun le caractère suivant: l'effort de conception et d'engineering est porté vers la souplesse d'utilisation de la source de rayonnement constitué par le réacteur. Les autres problèmes techniques: tenue à haute température et à haute pression en particulier sont éludés.

On trouvera au chapitre "Les réacteurs de recherche et les grands équipements de la Communauté" (pages P-) de ce rapport une description détaillée des réacteurs de recherche de la Communauté. On doit constater que le plus grand nombre d'entre eux ont été achetés ou au moins étudiés aux Etats-Unis. Cependant, les entreprises européennes en ont assuré la construction pour la plus grande part et certaines des réalisations les plus importantes ont été menées à bien en France sans aucun apport étranger. Quoique les combustibles nécessaires aient dû fréquemment être fabriqués aux USA, les résultats obtenus dans ce domaine en France (CEA) (avec les combustibles métalliques de la pile EL3 qui ont atteint 3 000/MWJ/tonne sans détérioration et continuent à servir) permettent de penser que même dans ce domaine les mises au point ont été couronnées de succès. On peut admettre que le recours massif à la technique étrangère ne sera plus à l'avenir une nécessité dans ce domaine. Seules des raisons économiques

fixeront donc le choix du fournisseur. Il est cependant certain que le know how acquis dans ce domaine n'apporte généralement qu'une aide limitée dans la mise au point de réacteurs de puissance.

Réacteurs Graphite - Uranium Naturel métallique

L'essentiel du programme de recherche français leur a été consacré. Dans la plupart des domaines il ne subsiste plus d'incertitudes telles que la réussite des réalisations en cours soit douteuse. Il convient de noter que l'emploi d'un réfrigérant gazeux, ici nécessaire pour des raisons de réactivité, a fait faire à la technique du refroidissement au gaz sous pression des progrès considérables qui resteront susceptibles d'autres applications dans les réacteurs nucléaires (eau lourde, réacteurs à gaz très chaud, peut-être réacteurs rapides).

Cependant, le domaine du chapitre II § 2 (radiation damage) comporte encore de grandes inconnues qui pourraient affecter notablement le bon fonctionnement des réacteurs en construction. Le fait que les solutions retenues ne sont pas fondamentalement différentes de celles adoptées en Angleterre autorise la confiance. Il n'est pas impossible que cette technique, encore susceptible de bien de perfectionnements, ait un large emploi dans la Communauté, soit comme source d'énergie soit comme source de plutonium.

D'ores et déjà une centrale de ce type a été adoptée par l'Italie. Il faut cependant noter que là la décision avait été prise dès avant l'existence d'Euratom d'avoir recours aux Industries Anglaises. AGIP se réservait de travailler à certaines mises au point. Il faut regretter qu'aucun contact n'ait été établi entre AGIP et le CEA: on peut penser que le rôle d'Euratom pourrait être d'assurer dans la Communauté des contacts entre le CEA et les entreprises ou pays qui pourraient souhaiter consacrer une partie de leur activité au domaine graphite-uranium naturel.

Réacteurs Eau lourde - Uranium naturel

Au contraire de la filière précédente on ne trouve ici aucune réalisation en cours et ce sont les domaines convenablement défrichés qui sont ici l'exception: seuls ont été explorés d'une façon systématique la neutronique macroscopique, théorique et expérimentale (Chap. II § 3 a) et b)). Encore est-ce l'avis général qu'il reste là aussi beaucoup à faire si l'on veut aller sans aléas vers une réalisation: l'outil expérimental nécessaire ("Super-Aquilon", une installation critique pouvant entre autres reproduire les différents réseaux possibles) devrait donc être créé.

Dans tous les autres domaines les recherches effectuées sont restées très fragmentaires: Chap. III § 2 (radiation damage) est resté une lacune totale. On trouvera à part un examen plus détaillé des efforts consacrés aux réacteurs à eau lourde de puissance. Ici encore la contribution du CEA est de loin la plus importante.

Réacteurs Eau légère (liquides organiques) - Uranium enrichi

Cette filière au contraire des précédentes n'a fait en Europe l'objet d'aucune recherche expérimentale (si l'on consent à ne pas considérer ici des recherches d'intérêt général sans lien direct avec la préoccupation de réaliser un réacteur à eau légère). Il n'en est pas moins vrai que ces réacteurs (PWR, BWR, OMR) ont fait aux USA l'objet d'un travail de recherche considérable dans tous les domaines. De nombreuses réalisations (EBWR, Shippingport, OMRE) démontrent que ces réacteurs peuvent avoir un fonctionnement très satisfaisant et qu'un know-how très étendu a été acquis par l'industrie U.S. dans ce domaine. D'autre part un grand nombre de données expérimentales sur tous les chapitres ont été publiées.

Il ne paraît donc pas souhaitable en Europe d'engager dans ce domaine des recherches indépendantes.

Cependant, certains perfectionnements comme la surchauffe nucléaire ou la suppression des échangeurs intermédiaires sont susceptibles d'améliorer notablement les perspectives de rentabilité de ces réacteurs: il est donc certain qu'un effort devrait être fait sur ces points en liaison avec les USA.

Ceci se justifie d'autant mieux que l'utilisation de la vapeur, des mélanges eau-vapeur et des liquides organiques comme fluides réfrigérants peut s'appliquer à d'autres types de réacteur, notamment aux réacteurs à eau lourde.

Réacteurs à gaz chaud

Les recherches consacrées à ce genre de réacteurs ont été assez limitées. Les problèmes les plus graves, nature physico-chimique, tiennent à l'accélération rapide des phénomènes de diffusion et de corrosion à haute température et aux modifications subies sous rayonnement par les modérateurs solides. On peut citer dans ce domaine particulier les recherches de la SNECMA pour le CEA et celles de Degussa sur les boulets du projet de réacteur de BBC-Krupp. Ces dernières particulièrement ont déjà un développement notable. Ici encore, cependant, le domaine du Chap. III § 2 (radiation damage) est complètement

inexploré. Quoiqu'il soit difficile de se faire une idée de l'intérêt de ce genre de réacteurs il serait sans doute injustifié de s'en désintéresser et Euratom qui participe au projet Dragon devrait pouvoir encourager un effort accru dans ce domaine.

Réacteurs Rapides

Il s'agit là encore d'un domaine presque complètement inexploré sauf sur le plan théorique dans les pays d'Euratom. Aux USA et en Angleterre au contraire des progrès importants ont été réalisés. En fait, le combustible nucléaire très enrichi (U^{235} ou Pu) n'ayant pas été disponible en quantités notables jusqu'ici, les recherches consacrées aux réacteurs rapides sont restées très limitées dans la Communauté. La Belgique a amorcé une coopération avec APDA dans ce domaine. En dehors de l'étude de la métallurgie du Pu et de ses alliages et composés (qui n'entre pas dans les domaines envisagés dans ce chapitre, voir Chap. I § 4), la France a consacré quelques moyens à l'étude expérimentale du refroidissement par métal liquide. L'un des problèmes les plus épineux de ce type de réacteurs reste l'étude de la cinétique et du contrôle qui n'a pu être abordée jusqu'ici.

Il est manifeste qu'il s'agit là d'un domaine où Euratom dispose de nombreux moyens de faciliter l'expansion des recherches:

- Obtention de matières fissiles pures aux USA,
- Accès aux résultats des recherches américaines et aux laboratoires spécialisés (détachement de personnel aux USA),
- Action propre en Europe.

Réacteurs Homogènes

Il s'agit là d'une des idées les plus séduisantes en matière de réacteurs. Cependant, les deux problèmes majeurs: corrosion et contamination radioactive n'ont pas reçu de solution satisfaisante malgré des recherches prolongées aux USA. Dans la Communauté ce type de réacteurs n'a pas bénéficié de recherches très importantes. L'idée française de la centrifugation du coeur pourrait permettre une élévation de la puissance spécifique. L'idée hollandaise de la suspension de particules très fines pourrait apporter une solution au problème de la corrosion sinon à celui de l'érosion. Le programme hollandais qui implique le concours de certaines des industries les plus importantes du pays a déjà une importance notable.

Conclusion

Notons d'abord l'absence de toute recherche dans la voie des combustibles fondus (sels ou métaux) qui pourrait être celle de certains réacteurs rapides.

Ceci dit il est apparu que dans les différentes voies conduisant aux réalisations il était généralement plus facile d'énumérer ce qui était fait que ce qui ne l'était pas: ceci veut dire que la plupart des domaines sont presque complètement inexplorés. L'insuffisance de l'enquête ne saurait infirmer cette constatation.

On a pu remarquer également que l'un des domaines les plus sacrifiés était certainement Chap. III § 2 (dégradation par irradiation). L'absence de moyens d'irradiation suffisante en a été la cause. Un autre domaine reste très négligé: Chap. II § 3 e) Cinétique des réacteurs.

Si l'on renonce à suivre l'exemple américain (construction d'un grand nombre de "Reactor experiments") et si l'on veut être à même de construire du premier coup des prototypes avec un minimum de risques d'échec il faudra sans nul doute procéder d'une façon analytique.

Cela conduira par exemple à construire des réacteurs destinés aux irradiations expérimentales. Il n'est pas interdit de penser que ces réacteurs loin d'être d'un type unique devront être adaptés au type de réacteur que l'on veut mettre au point. Cela devrait conduire également à étudier les phénomènes nucléaires et thermodynamiques d'une façon beaucoup plus poussée encore qu'on ne l'a fait jusqu'ici sinon il serait illusoire de tabler sur la simulation électronique du comportement cinétique des réacteurs.

Signalons enfin que la Division Recherche d'Euratom a entrepris, par l'intermédiaire de groupes de travail, la consultation d'experts de la Communauté sur le sujet des réacteurs de recherche à haut flux, des réacteurs de puissance à eau lourde, du Plutonium (propriétés et mise en oeuvre).

*

* *

CHAPITRE IV

TRAITEMENT DES MATIERES RADIOACTIVES

1.- Méthodes d'extraction du Pu et du U-233 des combustibles irradiés, récupération éventuelle d'Uranium et de Thorium.

2.- Chimie et métallurgie du Pu.

Nous n'avons reçu aucun renseignement officiel sur les programmes concernant la chimie, la métallurgie du Pu. Toutefois, des contacts personnels entre les services spécialisés et les Centres belges et français nous ont permis de nous faire une opinion sur l'évolution de leur programme.

3.- Méthodes d'extraction et chimie des autres transuraniens.

Environ une dizaine de personnes se consacrent aux recherches visées sous ce dernier point dans les pays de la Communauté, avec un budget total, pour 1958, d'environ 45 à 50.000 UEP.

Dans la quasi totalité des cas, on prépare les transplutoniens par irradiation de Pu. Leur séparation en quantités relativement importantes nécessite des équipements du type $\alpha - \beta - \gamma$. Ces équipements, pratiquement inexistant à l'heure actuelle, font, en France, l'objet d'études poussées (Saclay, Service REA, Marcoule).

Des études à l'échelle traceurs, sont poursuivies en Hollande sur la séparation du Am-238, Cm-248, à partir du PuO₂ irradié au cyclotron. La séparation du Cm et du Cf fait l'objet d'études en Belgique (extraction par solvants, résines échangeuses d'ions).

Le programme français, axé initialement sur la séparation du Np, devrait se développer considérablement en 1959. Il porterait principalement sur l'étude de la formation des transplutoniens et des isotopes 240 et 241, 242 du Pu en fonction du taux d'irradiation de divers combustibles à base de Pu.

Le manque de matière première et l'absence de réacteur à haut flux en fonctionnement empêchent, pour l'instant, la réalisation d'un programme important de production et de séparation de ces éléments.

4.- Méthodes d'extraction et chimie des radioisotopes utiles.

La production des radioéléments artificiels dans les pays de la Communauté, comparés à la production américaine, peut se résumer dans les tableaux ci-dessous.

La production de Radium (Hoboken en Belgique) ne nous est pas connue, pas plus que les effectifs et le budget utilisés dans ces travaux. Le caractère fragmentaire des

renseignements reçus ne nous a pas permis de remplir toutes les cases du tableau. Les données inconnues sont signalées par la lettre X.

	Budget 1958 Milliers UEP	Personnel 1958	Production 1er semestre 58 Livraisons curies		Importations 1er semestre 58 nombre curies		Expor- tations
Allemagne	X	X	0	0		4560 (⁶⁰ Co 4000C)	0
Belgique	140	20	631	135	240	1016 (⁶⁰ Co 900C)	X
France	2550	~160	3133		536		328
Italie	X	13 (?)	0	0	X		0
Pays-Bas	X	23	X	X	X	X	X
USA (1957)	X	X	91000	366409	X		2143

a) Produits de fission

Seule la France prévoit dans un avenir proche (mars 1959) le démarrage d'une installation pilote de séparation du Cs-137 au niveau de 100 curies et les mises au point correspondantes à la fabrication des sources scellées (Genève P.1179). Cette installation doit occuper une des cellules du Laboratoire de Haute Activité de Saclay. Une installation télécommandée de chimie analytique, en fonctionnement depuis plus d'un an dans le même bâtiment, permet d'effectuer un certain nombre de contrôles sur des produits radioactifs pouvant atteindre 1 curie γ (Congrès de Chimie Industrielle, Liège, septembre 1958). Cet ensemble est complété par des batteries de boîtes à gants et à pinces.

Diverses études, la plupart du temps à l'échelle traceurs, sont en cours dans la plupart des pays de la Communauté (Université de Liège, CEN Mol, CNRN Ispra, CEN Saclay).

Le service des Radioéléments Artificiels fabrique régulièrement à Saclay des sources de ⁹⁰Sr allant jusqu'à 500 mC. La solution de départ est, à l'heure actuelle, importée d'Angleterre.

En fait, les études sur la séparation de produits de fission importants pour l'industrie (^{85}Kr , ^{99}Tc , ^{147}Pm , ^{133}Xe , ^{144}Ce , ^{155}Eu) et la recherche ($^{132-133}\text{I}$, terres rares) sont très peu poussées. Leur récupération partielle est possible à partir des installations d'extraction du ^{137}Cs .

Le ^{85}Kr semble avoir un avenir particulièrement prometteur dans l'élimination des charges électrostatiques et la fabrication des peintures luminescentes. Sa séparation est à étudier en collaboration avec les techniciens des usines de "reprocessing". De tels travaux sont déjà effectués aux USA et en Angleterre (Genève P/309).

b) Obtenus par irradiation

Le centre de Saclay est pourvu d'importants laboratoires destinés aux études et à la fabrication des radioéléments artificiels:

- laboratoires de faible activité, permettant des recherches à l'échelle traceurs,
- laboratoire de haute activité, pourvu d'un certain nombre d'appareils de production de divers radioéléments au niveau maximum de 10 curies γ ,
- cellule à ^{60}Co (Corinne I) permettant diverses opérations mécaniques sur cet isotope au niveau de 1 000 curies.

Une extension importante est prévue pour 1960 tant en surfaces qu'en niveaux d'activité manipulables (par exemple 10 000 curies de ^{60}Co dans Corinne II).

Le centre de Mol possède à l'heure actuelle des laboratoires trop petits (niveau max. 1 curie) et doit être doté d'un nouveau laboratoire de 3 000 m² fin 1959. Ce bâtiment comportera des enceintes β - γ au niveau de 10 curies et vraisemblablement 2 cellules bétonnées équipées de télémanipulateurs.

Les laboratoires de Philips-Roxane assurent une production régulière ou un conditionnement d'éléments radioactifs produits dans le cyclotron d'Amsterdam et au réacteur de Kjeller.

En Allemagne diverses firmes privées (Farbwerke HOECHST AG, Kernreaktor) répartissent et enflaonnent les produits bruts importés d'Angleterre, des USA ou du Canada (Die Atomwirtschaft, juin 1958).

En Italie divers centres vont être pourvus de laboratoires radioactifs (Ispra, Enrico Fermi, Saluggia).

Bien qu'inégalement développée dans les pays de la Communauté, la production des radioisotopes d'usage courant (^{32}P , ^{35}S , ^{131}I , ^{198}Au , ^{24}Na , ^3H , etc...) est suffisante pour les besoins de ces six pays. Si certains, comme l'Allemagne, sont encore tributaires d'importations anglaises ou américaines, cela semble être surtout le fait d'une habitude acquise et de leur prix de revient plus économique. Les pays producteurs pourraient assez facilement augmenter leur capacité de production si des demandes accrues se manifestaient.

Par contre, la production des sources intenses de rayonnement γ (^{60}Co , ^{152}Eu , ^{192}Ir , etc...) est encore très insuffisante et ne peut même satisfaire les besoins intérieurs des pays producteurs. La quasi totalité des fortes sources est importée du Canada, des Etats-Unis et d'Angleterre. Le manque de place dans les réacteurs à flux moyen (10^{12} à 10^{13} n/cm²/s.) et l'absence de réacteur à haut flux utilisable (10^{14} n/cm²/s. pour les sources de forte activité spécifique) en sont en grande partie responsables. Le programme de la France, basé sur l'utilisation de G2 et EL3, permettrait à ce pays de satisfaire assez largement sa demande intérieure à partir de 1960, sauf peut-être en ce qui concerne les sources de ^{60}Co de haute activité spécifique (40 c./g.). La mise en route de BR2 comblerait cette lacune. On pourrait également envisager la fabrication de quantités très importantes de ^{60}Co de haute activité spécifique dans G2; toutefois, la durée d'irradiation serait de l'ordre de 3 ans, ce qui retarderait la mise sur le marché de ce produit.

La synthèse des molécules organiques marquées est particulièrement développée en France. Le centre de Mol s'attache à fabriquer des molécules ne figurant pas aux catalogues français et anglais et tend à se spécialiser dans la production de composés tritiés de forte activité spécifique (*).

La production du composé de départ $^{14}\text{CO}_3\text{Ba}$, bien que faisant l'objet d'études poussées en Belgique et en France, n'est pas encore passée au stade de fabrication régulière et l'Europe est encore totalement tributaire de l'Angleterre et des Etats-Unis.

Certains éléments, d'un grand intérêt industriel et scientifique, ne font pas encore l'objet d'études systématiques (^{18}F , ^{28}Mg , ^{26}Al , ^{33}P).

D'autres isotopes, tels que le ^{22}Na , ne sont fabriqués qu'en Hollande, au cyclotron d'Amsterdam, mais en quantités insuffisantes.

Une certaine normalisation des emballages, des moyens et des normes de transport est souhaitable.

(*) La MONTECATINI projette la construction d'un laboratoire de fabrication de molécules organiques marquées.

5.- Concentration et conservation des déchets radioactifs inutiles.

Le caractère fragmentaire des renseignements reçus sur les budgets et les effectifs, la difficulté d'établir une séparation nette entre le personnel et les crédits affectés à la surveillance, à la recherche et au fonctionnement des installations d'épuration nous empêchent d'établir un tableau d'ensemble sur la situation dans les pays de la Communauté.

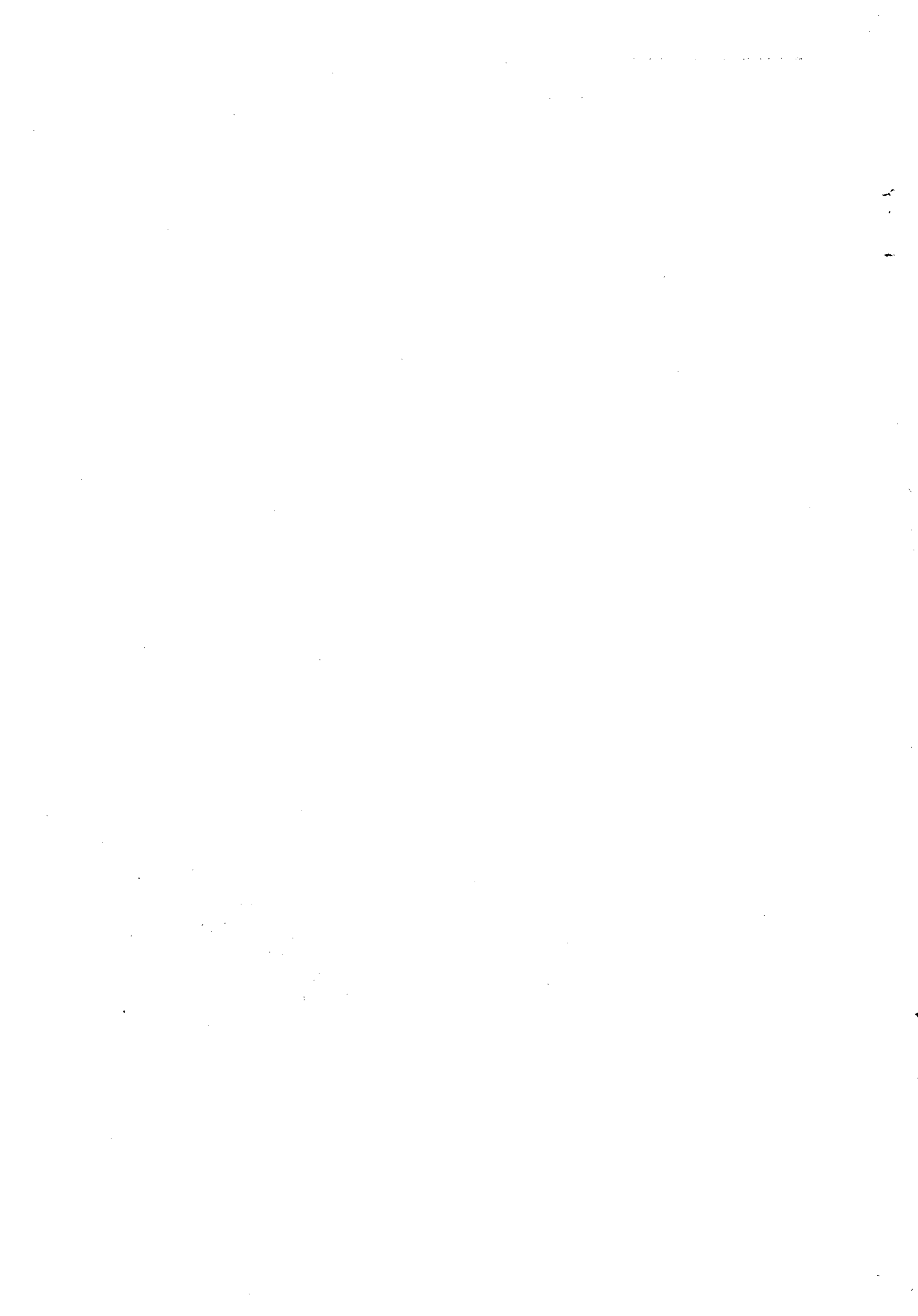
Des études nombreuses et variées sur le traitement des eaux radioactives sont à signaler dans les pays de la Communauté. Les efforts sont principalement axés sur le problème de décontamination des eaux en faisant appel, la plupart du temps, à des méthodes chimiques ou physico-chimiques (entraînement par précipitation et absorption, échange d'ions). Dans certains cas (Marcoule, le Bouchet, Saclay, Mol), ces études sont sorties du domaine laboratoire et ont conduit à des réalisations industrielles assez importantes.

Par contre, les solutions au problème du rejet définitif sont à envisager dans un avenir plus lointain. Même au stade laboratoire, ce domaine est assez peu exploré. Le dépouillement des textes publiés à la dernière conférence de Genève n'est pas particulièrement encourageant.

Une récupération même partielle du ^{137}Cs et du ^{90}Sr simplifierait les problèmes de rejet définitif en réduisant la période de stockage. La récupération de produits stables précieux, notamment le Ru, formés en quantités relativement abondantes, couvrirait une partie des frais de traitement des résidus radioactifs.

Aucune indication ne nous est donnée sur le traitement des déchets combustibles et il ne semble pas que les divers centres possèdent des incinérateurs destinés à cet usage.

Dans le domaine de l'épuration des gaz, on signale peu de travaux. Les filtres papier sont d'un emploi universel, mais n'ont fait l'objet que de très peu d'études systématiques. Si l'on est assez bien armé contre les poussières solides, il n'en est pas de même lorsqu'il s'agit de gaz radioactifs ($^{14}\text{CO}_2$, ^3H , gaz rares, ^{131}I élémentaire) ou de brouillards. De nombreuses études sont en cours sur ce sujet dans les pays Anglo-Saxons, deux seulement en Europe (Belgique et France).



APPLICATION DES RADIOELEMENTS.

L'importance des applications des radioéléments dans les pays de la Communauté peut se mesurer au nombre d'organismes utilisant ces techniques.

En juin 1958, la situation peut se chiffrer de la manière suivante :

	Recherche scientifique	Industries	Médecine	Agriculture
Allemagne	153	683 (I)	236	24
Belgique	?	?	90 à 95	?
France	223	432	223	9
Italie (2)	6	2	12	?
Pays-Bas	inconnu	inconnu	inconnu	inconnu

(I) avec mesures épaisseurs et niveau

(2) Les chiffres concernant l'Italie sont certainement en dessous de la réalité.

Le caractère très fragmentaire des renseignements reçus ne nous permet pas d'établir un tableau comparatif du budget et du personnel engagé dans ces recherches.

Toutefois, il est possible de dégager quelques tendances générales sur l'utilisation des radioisotopes dans les domaines industriels et scientifiques, thérapeutiques et biologiques, agricoles.

Comme remarque préliminaire et de caractère général, il faut dire qu'il y a trop peu de sources d'irradiation de forte intensité (plusieurs kilo-curies) installées dans la Communauté. Elles sont, pourtant, indispensables pour l'étude des applications des radiations dans de nombreux secteurs industriels.

La production de sources importantes ne peut se faire, économiquement, que dans des réacteurs à haut flux. Une des tâches du groupe de travail "Réacteurs à haut flux" créé par la Commission, consiste à définir un planning satisfaisant pour la production des radioisotopes du type ^{60}Co .

a) Applications industrielles et scientifiques

Les applications industrielles et scientifiques des radioéléments sont aussi nombreuses que variées. De nombreux problèmes théoriques, jusqu'ici insolubles, ont pu recevoir des réponses élégantes, notamment en chimie fondamentale.

L'utilisation des radioéléments comme traceurs et comme moyen de contrôle non destructif est d'un emploi universel. A titre indicatif, nous signalons que l'Allemagne Fédérale avait en service en 1957, 600 jauges d'épaisseur. Nous ne possédons encore que peu d'éléments sur les économies réalisées dans l'industrie par ces méthodes. Le professeur LIBBY aux USA et le professeur TOPCHIEV en URSS ont procédé à une telle tentative d'enquête, mais restent muets sur leur méthode de travail. La connaissance, même imparfaite de ces économies, appuyée par un effort important de propagande et d'enseignement, contribuerait à l'élargissement de l'emploi des techniques radioactives.

La stérilisation, le greffage et la réticulation des matières plastiques, la chimie sous radiation à l'échelle industrielle, ne sont pour ainsi dire pas étudiés faute de sources très intenses et d'installations appropriées. On compte en France une vingtaine de sources de ^{60}Co allant de 300 à 3000 curies réparties entre le CEA et diverses industries. A cela, on doit ajouter quelques "trous de chimiste" dans EL2 où les neutrons thermiques sont arrêtés par du cadmium et le puits de désactivation des éléments de combustible de cette même pile. Divers projets prévoient l'installation d'une boucle à Indium à Grenoble, le montage d'une cellule d'irradiation (~ 5000 C. de ^{60}Co) et d'un accélérateur linéaire à Saclay.

Une société privée étudie actuellement un projet de pilote de greffage de matières plastiques (production de 500 t./an) pouvant contenir 30.000 curies de ^{60}Co .

Une chambre d'irradiation est prévue par la SORIN dans le troisième bassin du réacteur Avogadro à Saluggia.

Plusieurs milliers de curies de ^{60}Co se répartissent entre les autres pays de la Communauté. A noter, en particulier, la récente installation, à Mol, d'une source de ^{60}Co de 3500 c.

Des centres d'irradiation analogues à ceux des Etats-Unis ou d'Angleterre et pouvant contenir jusqu'à 3.000.000 curies de ^{60}Co n'existent pas en Europe continentale.

b) Applications thérapeutiques et biologiques

L'introduction des méthodes radioactives a considérablement accéléré les progrès de la biologie. Le nombre considérable de travaux publiés, le manque de précision sur les effectifs et les sommes engagées et l'absence totale de renseigne-

ments sur l'Allemagne ne nous permettent pas de nous faire une idée exacte de la situation d'ensemble. En France, ces recherches sont principalement effectuées par le Service de Biologie à Saclay. Dans les autres pays, elles sont surtout du ressort des Universités et des Instituts spécialisés, avec toutefois, pour la Hollande, une concentration des efforts au sein de l'Institut Radiobiologique du TNO à Rijswijk.

L'utilisation des radioisotopes dans le diagnostic est devenue d'un usage courant. Parmi les radioéléments les plus employés, nous citerons : ^{131}I qui aurait une certaine tendance à être supplanté par ^{133}I , de période plus courte, dans les études sur la thyroïde, ^{32}P pour la recherche de certaines formes de cancers osseux, ^{76}As utilisé dans le cancer de la peau.

Les applications thérapeutiques des radioéléments sont également très répandues. Elles font appel à des quantités de radioactivité extrêmement importantes, puisqu'une installation de téléthérapie peut contenir jusqu'à plusieurs milliers de curies de ^{60}Co . On compte dans les pays de la Communauté une vingtaine d'installations de téléthérapie équipées de sources de ^{60}Co .

Il convient d'ajouter à ces sources de rayonnement un certain nombre de bétatrons tels que ceux de l'Institut de Radiologie Médicale de l'Université de Rome, du Centre Tumori de Palerme, de l'hôpital de Villejuif.

Dans certains pays comme la France et l'Italie, la législation ne permet qu'à un nombre limité d'organismes d'utiliser les radioéléments dans le diagnostic médical et en thérapeutique. Ces mesures ont pour effet de restreindre le nombre d'utilisateurs.

c) Applications agricoles

Peu de travaux sont signalés dans les pays de la Communauté, sauf en Belgique où divers organismes publics et privés se montrent très actifs.

En France, peu de choses à signaler.

En Italie, le CNRN envisage la création d'un "Centre de recherches pour les applications des radioisotopes et des radiations en biologie et en agriculture", à proximité de Rome. On ajouterait à ce projet un "champ gamma" d'une superficie d'un hectare doté de divers laboratoires.

En Hollande, un centre spécialisé dans le domaine des applications agricoles est en cours de construction à Wageningen; ce centre sera doté d'un réacteur spécial.

ETUDES DES EFFETS NOCIFS DES RADIATIONS

SUR LES ETRES VIVANTS.

Etant donné que nous n'avons pu obtenir suffisamment de renseignements concernant le budget et le personnel affectés à différents domaines de la recherche, il s'est avéré impossible de dresser un bilan complet de ces chiffres pour les § 1, 2 et 3.

Seul le total des effectifs pour les études renseignées en point 3) peut être évalué avec plus ou moins d'exactitude; ce total représente, compte non tenu de l'Allemagne, environ 70 personnes comprenant des physiciens, des chimistes, des biologistes et des médecins.

En rapport avec la nomenclature de l'annexe I du Traité, ce commentaire comprend les trois paragraphes ci-dessous :

- I) Etude de la détection et de la mesure des radiations nocives
- 2) Etude des préventions et protections adéquates ainsi que des normes de sécurité correspondantes
- 3) Etude de la thérapeutique contre les effets des radiations.

Remarquons immédiatement que la République Fédérale d'Allemagne n'a fait parvenir jusqu'à présent aucun renseignement au sujet des études entreprises au titre du Chapitre VI du Traité.

I) Etude de la détection et de la mesure des radiations nocives

A l'exception de la Belgique, aucun pays ne nous a fait parvenir d'informations explicites sur la mise au point des méthodes pour la mesure absolue de l'activité des radio-isotopes et pour la création de standards.

Nonobstant cette réserve, la division "Electronique" de Saclay dispose d'une section "Mesures" qui s'occupe de la standardisation des sources radio-isotopes. En particulier, on vient d'y mettre au point un compteur 4π pour mesure en "continu".

L'Institut Max Planck, à Göttingen, dispose également d'une division pour la standardisation des radioisotopes.

Dans le cadre d'une comparaison internationale des résultats de la mensuration de ses propres standards, le "National Physical Laboratory" de Teddington (Angleterre) communique chaque année un certain nombre de ces standards à Saclay et à l'Institut Max Planck.

Etant donné l'importance d'une coopération internationale et d'une centralisation éventuelle en matière de standardisation de certains radio-nuclides, il est nécessaire de disposer des informations les plus complètes possible.

Sur la seule base des renseignements obtenus, il apparaît que la mise au point de méthodes pour la mesure absolue de l'intensité du rayonnement (des chambres standards) et l'étalonnage de dosimètres fait l'objet d'études isolées.

Ainsi, la section "Mesures" de la division "Electronique" de Saclay a construit une chambre d'ionisation dans le domaine des hautes énergies. Toutefois, cette chambre de graphite est utilisée non pour la dosimétrie mais pour la standardisation des isotopes.

Récemment, une "chambre d'ionisation à l'air libre" a été installée à l'Institut Thérapeutique de Rotterdam (Hollande).

D'une manière générale, on ignore quels sont les laboratoires de la Communauté où l'on peut se procurer des standards dérivés.

La mise au point des appareillages pour la mesure des rayonnements (contrôle sanitaire), comme des dosimètres, pour le contrôle de la radio-activité du milieu (de l'air) et pour le contrôle de la contamination (du personnel, des parois, etc.) s'est développée avec celle des réacteurs nucléaires et l'emploi des radioisotopes.

On peut dire qu'à cet égard les activités menées dans le cadre de la Communauté sont satisfaisantes et que, à certains points de vue, d'excellents résultats ont été atteints.

Dans l'ensemble, la collaboration entre Centres nucléaires nationaux et industries est très étroite.

En ce qui concerne la mesure des retombées radioactives et de l'activité des poussières atmosphériques, des mesures sont effectuées dans tous les pays en vue de

déterminer d'une manière permanente l'intensité de la radioactivité et la concentration de certains radio-nucléides auxquels l'ensemble de la population est exposé.

D'une manière générale, un certain nombre de stations sont disséminées dans chaque pays. Leur répartition selon un bilan provisoire s'établit comme suit :

Belgique	:	5
Allemagne	:	32
France	:	17
Italie	:	16
Pays-Bas	:	32
Luxembourg	:	0
		—

102

L'activité concernant le contrôle de la radio-activité dans les environs immédiats des réacteurs nucléaires est satisfaisante.

Des études ont été faites en Belgique, en France et aux Pays-Bas concernant le dosage du strontium, du caesium et d'autres isotopes dans l'eau et le sol et dans du matériel biologique tel que l'herbe, le lait et les produits agricoles.

2) Etude des préventions et protections adéquates ainsi que des normes de sécurité correspondantes.

Ce paragraphe est constitué par un certain nombre de sujets de différentes natures.

On peut admettre qu'une activité satisfaisante est développée dans les domaines suivants :

- Calcul et projet d'installations conçues pour la protection contre les radiations ionisantes et en particulier les neutrons.
- Calcul et projet de protection des installations nucléaires comme des réacteurs, des circuits de réfrigération, des circuits de purification, le chargement du combustible, etc.
- Projet d'installations spéciales telles que pour la manipulation des éléments émetteurs de radiations γ de haute activité (plutonium).

En Belgique et en France, les Centres nucléaires nationaux et l'industrie coopèrent.

En Italie, plusieurs Centres s'occupent de la mise au point de méthodes de protection contre les rayonnements de haute énergie.

En ce qui concerne les dispositions générales de sécurité, des mesures collectives et individuelles, des normes de sécurité et des minima exigés pour la formation du personnel chargé de la manipulation des matières radioactives, une des premières tâches d'Euratom a consisté à fixer les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant de radiations ionisantes. Ce règlement définit les doses de rayonnements et la concentration en certains radio-nuclides maximum admissibles, ainsi que les modalités relatives au contrôle médical des personnes exposées aux radiations. (1)

Aucun projet n'a été communiqué sur l'étude générale de la sécurité des réacteurs et de la protection. Nous entendons par ceci des points tels que le choix de l'emplacement d'un réacteur du point de vue de la sécurité, le calcul et les expériences concernant la cinétique des réacteurs.

3) Etude de la thérapeutique contre les effets des radiations.

Les différentes études entreprises dans ce domaine peuvent être groupées comme suit :

- a) Effets biologiques du rayonnement. Physiopathologie et thérapeutique du mal des rayons chez les mammifères.
- b) Protection chimique contre les rayonnements et protection physique d'une partie du corps.
- c) Processus de restauration après irradiation et action thérapeutique des injections d'homogénats de rate et de moelle osseuse effectuées après irradiation.
- d) Recherches fondamentales comme, par exemple, recherches sur les lésions biochimiques fondamentales.

Cette répartition laisse dans l'ombre certains aspects de la radiobiologie tels que les effets d'irradiations sur les macro-molécules et les effets génétiques.

(1) Voir le rapport d'Euratom : "Projet de directives fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des radiations ionisantes."

On peut évaluer qu'à ces projets de travail, compte non tenu de l'Allemagne, un personnel scientifique et technique d'environ 70 membres, comprenant des physiciens, des chimistes, des biologistes et des médecins. De ce chiffre, environ 15 travaillent à des projets désignés sous a), environ 30 à des projets désignés sous b), environ 10 à des projets désignés sous c), et une quinzaine à des projets désignés sous d).

Ainsi donc, ce sont les projets concernant la protection chimique contre les rayonnements qui occupent le plus de personnel.

C'est surtout la Belgique qui déploie ici une grande activité, sous l'influence de l'École de Liège, où l'action protectrice de la cystéamine et de la cystamine a été découverte.

L'exécution de projets de cet ordre intéresse l'armée et les troupes de la sécurité civile.

Suivant les informations que nous avons reçues, l'activité concernant les processus de restauration est très réduite, encore que la connaissance de ces processus constitue la base scientifique de la thérapeutique des irradiés.

Mais nous attirons l'attention sur le travail du laboratoire radiobiologique de T.N.O. à Rijswijk (Hollande) ainsi que des laboratoires de Paris, où récemment 5 techniciens yougoslaves ont pu être sauvés grâce à des injections de moelle osseuse.

Des travaux concernant les effets biologiques du rayonnement sont poursuivis en France; toutefois, le seul projet où il soit question de neutrons rapides se localise aux Pays-Bas.

Aucune mention n'est faite de l'emploi de méthodes physiques telles que la mesure des radicaux libres au moyen de la résonance paramagnétique.

On ne trouve pas davantage, dans ce paragraphe, de projets concernant les effets de radiations sur les macromolécules, nonobstant le fait que de tels projets apporteraient des éléments pour la compréhension de l'action directe du rayonnement.

Des recherches sont menées à une échelle modeste en Allemagne et en France, sur les effets génétiques d'une irradiation d'intensité modérée. Et ceci vaut autant pour l'irradiation externe que pour les radio-nuclides absorbés par l'organisme.

*

* *



E Q U I P E M E N T S

La variété considérable des équipements utilisés dans les réacteurs et surtout dans les centres de recherches nucléaires, nous a obligé à adopter un classement large pour ces matériels. C'est ainsi que, dans ce qui suit, les nombreux types d'appareils de comptage utilisés pour le contrôle sanitaire, pour la recherche, pour la prospection minière, pour la spectrométrie des rayonnements radioactifs, figurent sous la dénomination "Appareils pour mesures de radioactivité". De même la catégorie "Appareils d'échanges thermiques pour réacteurs" comprend les échangeurs proprement dits et aussi les pompes de circulation, les soufflantes, les vannes, les épurateurs, et d'une façon générale, tous les accessoires entrant dans la constitution des ensembles permettant l'extraction de la chaleur dans les réacteurs. Nous nous interdirons donc, dans les commentaires qui suivent, d'exposer dans le détail l'état actuel des études dans les pays de la Communauté; cet exposé n'aurait d'ailleurs de sens qu'à condition de présenter les précédentes études ou réalisations et nos renseignements sont encore trop incomplets pour nous permettre de mener ce travail à bonne fin.

A) Appareils pour mesures de radioactivité

L'étude et la réalisation des appareils qui entrent dans cette catégorie nécessitent en général des investissements relativement faibles, aussi, plus de cinquante laboratoires industriels, environ 25 en France, 15 en Allemagne, auxquels s'ajoutent les laboratoires de facultés et les services d'électronique nucléaire tels ceux de Saclay, Mol, Grenoble, se sont attaqués aux problèmes variés de détection, de comptage et d'analyse.

Actuellement de nouveaux problèmes de mesures se posent tous les jours, mais l'essentiel de l'appareillage existe dans les pays de la Communauté et la solution de ces problèmes consiste le plus souvent dans l'adaptation des matériels existants. Nous noterons néanmoins que des études sont en cours concernant l'électronique rapide pour les physiciens, la réalisation d'ensembles électroniques complexes tels que les analyseurs multicanaux, la transistorisation des montages électroniques et en particulier celle des appareils portatifs, la détection des neutrons appliquée au contrôle sanitaire, la construction de chambres à bulle, la mesure des faibles activités des effluents, la détection des aérosols radioactifs.

En résumé, l'avancement actuel des recherches et les possibilités d'études et de réalisations se présentent très favorablement en Europe, par contre pour atténuer la dispersion des efforts, cause de doubles emplois et de fabrications en trop faibles séries, cause de différences de conceptions dans les réalisations, EURATOM devra s'efforcer de sélectionner et de standardiser les meilleurs types d'appareils. On peut suppo-

ser que les laboratoires du Centre Commun, où se trouveront réunis des chercheurs des 6 pays de la Communauté, se transformeront rapidement en musées d'appareillage scientifique si, à bref délai, une équipe chargée de la sélection n'est pas constituée.

B) Appareils de contrôle et de pilotage des réacteurs

Ces appareils comprennent entre autres les appareils de mesures de puissance et de réactivité, les barres de contrôle et leurs servomécanismes, les détecteurs de ruptures de gaines, etc. Ces matériels ont fait l'objet d'études de la part d'organismes nationaux et de la grosse industrie. Les problèmes sont bien connus et les réalisations européennes prouvent, par la stabilité et la sécurité des quelques réacteurs en service, que les solutions adoptées sont assez satisfaisantes. Néanmoins des améliorations sont encore souhaitables concernant les détecteurs de puissance, améliorations qui devraient tendre à augmenter considérablement la puissance de sortie des détecteurs de flux de neutrons. Ces améliorations faciliteraient d'une part le démarrage automatique des réacteurs et, d'autre part, aux fortes puissances il serait possible de court-circuiter les chaînes d'amplification dont la stabilité n'est pas encore parfaite.

Signalons encore des études de détecteurs de fuites d'eau lourde, de détecteurs de ruptures de gaines, de servomécanismes des barres de contrôle, d'appareils de mesures de niveaux et de débits et des études plus générales sur les principes de mesures des puissances.

L'enregistrement des résultats est aussi l'objet d'études qui ont pour but le remplacement, dans les salles de contrôle, des enregistreurs graphiques par des enregistreurs à mémoires magnétiques dans les cas nombreux où les indications fournies par les détecteurs ne sont pas indispensables à tout moment.

C) Appareils d'échanges thermiques pour réacteurs et boucles d'irradiation

Les grosses industries européennes s'intéressent sérieusement à la réalisation de ces appareillages, l'étude et la fabrication des éléments étant confiées à des maisons spécialisées.

Ces appareils pour lesquels l'étanchéité parfaite est une condition majeure, sont déjà réalisés correctement dans les types "basse pression", par contre, pour les matériels "haute pression" et "métaux liquides" les études sont assez peu avancées.

S'agissant des boucles d'irradiation on constate qu'un marché important va s'ouvrir avec la mise en service des divers réacteurs d'essais actuellement en construction. Il semble que l'industrie européenne soit mal préparée tant en ce qui concerne la connaissance des matériaux de construction (nuances d'aciers nécessaires, soudures, etc.) que celle des impératifs à satis-

faire : étanchéité absolue, résistance à la corrosion par les fluides de refroidissement sous irradiation, simplicité maximum des mécanismes, etc. Si l'on veut assurer une exploitation sûre et optimum des réacteurs d'essais dans la Communauté, il est nécessaire de faire dans ce domaine un effort considérable.

D) Appareils de ventilation et filtration des gaz pour réacteurs, usines de traitements chimiques et laboratoires

Ces appareils sont principalement les systèmes de filtration de l'air dans les halls et annexes des réacteurs, dans les laboratoires et les usines de traitements de matériaux irradiés. Les difficultés résidaient dans la fabrication des filtres et le remplacement de ceux-ci après usage. Ces problèmes ont été résolus et des exportations vers les Etats-Unis prouvent la qualité des filtres fabriqués en Europe.

E) Appareils pour manipulations protégées

Les différents pays de la Communauté possèdent un équipement leur permettant de travailler sur des activités faibles (pinces à distance de divers modèles, briques de plomb, fenêtres d'observation, boîtes à gants, ..) Dans ce domaine la dispersion des fabrications est économiquement nuisible, on peut en effet constater que plusieurs organismes étudient la construction de boîtes à gants alors que dans les pays voisins il existe du matériel de bonne qualité.

Quant aux télémanipulateurs dotés de 6 à 8 degrés de liberté, il faut noter les efforts faits dans plusieurs pays et les manipulateurs magnétiques de faible puissance, les manipulateurs hydrauliques et pneumatiques de forte puissance rivaliseront bientôt avec les matériels américains.

Il n'en est pas de même pour les manipulateurs mécaniques de faible puissance où l'Europe reste tributaire des fabrications anglaises et américaines.

Les systèmes optiques, fenêtres en verre au plomb et fenêtres "composites", périscopes, utilisés dans les installations fortement radioactives, deviennent de fabrication courante et rivalisent techniquement avec le matériel étranger.

F) Appareils spéciaux pour usines de traitement de produits radioactifs

Cette rubrique comprend aussi bien les appareils de prises d'échantillons que les matériels de dégainage de barreaux irradiés, les appareils de contrôle continu des réactions chimiques ou les appareillages de traitement des effluents.

Des problèmes sérieux et souvent difficiles à résoudre se posent dès que l'on veut traiter des solutions radioactives

en toute sécurité. Le nombre restreint d'installations construites en Europe n'a pas permis de mettre au point toutes les techniques appropriées. Néanmoins, les nouvelles réalisations européennes d'usines de traitement quasi automatiques ont eu l'intérêt de poser les problèmes et ont permis d'en résoudre un certain nombre. Quelques importantes industries chimiques et quelques laboratoires nationaux s'intéressent vivement à l'étude et à la fabrication d'appareils qui devraient faciliter le fonctionnement automatique des usines futures.

G) Appareils pour conditionnement et transport de sources radioactives

Des organismes nationaux ont sacrifié des crédits importants à la réalisation de récipients et véhicules devant transporter des sources fortement radioactives. Il existe actuellement quelques exemplaires de matériels qui devraient répondre aux conditions de sécurité exigées, quels que soient les incidents pouvant survenir au cours des manipulations ou des transports.

H) Appareils d'analyses chimiques et physico-chimiques de laboratoires.
Appareils pour essais et mesures technologiques

Cette catégorie d'appareils de laboratoires groupe un nombre important d'instruments de types très différents, par exemple, les conductimètres, les diffractomètres à rayons X, les doseurs de mélanges divers, les densimètres, les appareils de cyclage thermique, les thermobalances. De même que pour le matériel électronique ce sont des petits laboratoires industriels qui s'intéressent à leur fabrication. Les principes de fonctionnement sont en général bien établis mais les réalisations doivent tenir compte de la nature radioactive des matériaux à analyser ou à tester.

L'étude d'appareils nouveaux, par collaboration entre les chercheurs et les industriels spécialisés, ne doit pas présenter de difficultés.

I) Appareils pour le dosage des combustibles nucléaires

Ces appareils devraient permettre aux techniciens de mesurer la composition, non-destructive, des combustibles nucléaires; ils devraient surtout permettre aux contrôleurs d'EURATOM chargés de tenir la comptabilité des matériaux fissiles dans les pays de la Communauté de procéder aux mesures de vérifications. Une seule réalisation de laboratoire, dont le principe est excellent, est signalée en Europe, mais il y a lieu de noter que l'Agence Internationale de l'Energie Atomique négocie des contrats d'étude à ce sujet dans au moins deux pays d'EURATOM.

J) Appareils divers utilisés dans les centres nucléaires

I. Appareils de calculs arithmétiques et analogiques

Ces appareils, qui sont devenus indispensables aux physiciens, ont fait défaut en Europe pendant de nombreuses années; actuellement des machines arithmétiques, souvent de fabrication étrangère, se vendent sur le marché à des prix très abordables, d'autre part des industriels européens, possédant des machines importantes dont ils n'ont pas l'utilisation à temps complet, accepteraient volontiers la location de leurs appareils aux physiciens d'EURATOM.

En ce qui concerne les calculateurs analogiques, les quelques modèles que l'on trouvait sur le marché européen, n'avaient pas toujours les qualités requises, actuellement ces matériels s'améliorent et les études nouvelles entreprises par plusieurs laboratoires devraient redresser la situation.

2. Synchrosopes

Par synchrosopes nous entendons les oscillographes à très larges bandes passantes dont le déclenchement du spot est synchronisé par le phénomène à observer. Jusqu'à ce jour, ces appareils dans 95% des cas provenaient des Etats-Unis. Des progrès très récents permettront dorénavant l'achat de matériel européen de grande classe.

3. Appareillages divers - (générateurs d'impulsions, enregistreurs graphiques et à mémoire, appareils spéciaux de télévision, etc.)

En général la situation se présente favorablement; les petites et moyennes industries, très dynamiques, ont des réalisations valables à leur actif et de nombreuses études sont en cours. La difficulté principale semble être d'ordre économique, le grand nombre des fabricants n'étant pas en rapport avec les besoins et permettant rarement le travail en série.

K) Matériels pour l'utilisation industrielle des radioisotopes

Quoique l'utilisation des radioisotopes dans l'industrie, l'agriculture, la médecine, ne soit pas à l'échelle de ce qui se pratique aux Etats-Unis, nous devons signaler qu'une dizaine de maisons européennes se sont spécialisées dans la fabrication d'appareils tels que les jauges d'épaisseurs α, β, γ , tels que les détecteurs de niveaux utilisant le rayonnement γ , tels que les doseurs d'humidité contenant une source de neutrons rapides et un détecteur de neutrons thermiques. Des vérifications de

soudure par rayonnement γ commencent à être d'emploi courant et des études et réalisations d'appareils de diagnostics et de traitements médicaux nous sont signalées.

La physique des radiations est bien connue dans plusieurs laboratoires industriels et nous pouvons penser que les grandes quantités de radioisotopes artificiels qui seront bientôt fabriqués dans la Communauté, en abaissant le prix d'achat des sources de rayonnement, donneront une forte impulsion à l'utilisation de ces produits radioactifs aussi bien en médecine que dans l'industrie et dans l'agriculture.

* *

CHAPITRE IX

L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES NUCLÉAIRES DANS LES PAYS DE LA COMMUNAUTÉ

§ I. Aperçu général de la situation dans les six pays

Les pages qui suivent donnent, pour les six pays, une analyse de l'enseignement des sciences nucléaires appliquées fondée sur le "Catalogue des cours de l'O.E.C.E. (1958)" et sur un complément d'informations que nous ont ultérieurement fourni les experts nationaux du groupe de travail "Article 5".(I)

L'application des sciences nucléaires est très récente et se développe à un rythme accéléré. L'enseignement que dispensent actuellement les universités, écoles techniques et instituts divers est fréquemment insuffisant pour assurer la formation d'un nombre satisfaisant de scientifiques, d'ingénieurs et de techniciens. Aussi cette formation occupe-t-elle souvent une place spéciale et des mesures forcées sont-elles parfois appliquées pour accroître le nombre des ingénieurs. On estime que la Communauté a besoin chaque année de 1500 employés (ingénieurs + scientifiques) travaillant dans le domaine des sciences nucléaires pures et appliquées. Ceci signifie en général 10 à 15 % des diplômés qui, chaque année (ingénieurs et scientifiques) terminent leurs études dans les disciplines adéquates. En France, c'est 25 %. Dans le domaine de la physique, ceci peut s'élever à 35 % pour certains pays de la Communauté. En France on évalue à 20.000 le nombre de techniciens qui seront requis au cours des 10 années à venir, ce qui représente plus de la moitié des effectifs qui seront formés pendant cette même période.

Si le rythme d'accroissement actuel des ingénieurs et techniciens ne varie pas, l'industrie nucléaire ne peut se développer qu'aux dépens d'autres industries tout aussi vitales pour la Communauté.

On est donc conduit à accroître quantitativement la production des ingénieurs et des scientifiques, aussi bien que des réformes qualitatives dans la formation scientifique sont nécessaires.

(I) Catalogue des cours sur l'énergie nucléaire dans les pays de l'O.E.C.E. Organisation européenne de Coopération Economique - 1958

Lorsqu'ils sont de caractère essentiel, les addenda et modifications au catalogue de l'O.E.C.E. sont résumés dans les tableaux 10 (Enseignement supérieur) et 11 (Enseignement technique).

Veut-on déterminer si l'enseignement des différentes disciplines des sciences nucléaires appliquées est suffisant, il faut savoir ce que sont non seulement en quantité mais aussi en niveau et en importance, les différentes formations.

Au surplus, le personnel enseignant, l'organisation de l'institution et l'existence de laboratoires bien équipés détermineront aussi largement la qualité de la formation.

Les renseignements dont nous disposons ne nous permettent pas encore de comparer entre eux les divers enseignements, exception faite, peut-être, pour quelques cas précis. Une étude approfondie serait nécessaire à cette fin. Une estimation de l'ensemble des possibilités d'acquérir une formation nucléaire a néanmoins été tentée, parce que les renseignements disponibles l'autorisent et que, de la sorte se trouve confirmée la conclusion de la non-conformité de l'enseignement des sciences nucléaires dans les pays de la Communauté.

§ 2. Détail des enseignements actuels

a) Introduction : L'application des sciences nucléaires nécessite du personnel de recherche pure ainsi que des ingénieurs des diverses disciplines et des techniciens de divers niveaux: nous ne nous arrêterons pas ici aux techniciens des grades inférieurs. Le présent paragraphe a donc été divisé en :

- b) enseignement supérieur
- c) enseignement technique

La section "Enseignement supérieur" est subdivisée en :

- b-1. Physique nucléaire
- b-2. Génie atomique
- b-3. Technique radio-isotopique
- b-4. Physique sanitaire ("Health-Physics")
- b-5. Physique des plasmas et fusion nucléaire
- b-6. Radiobiologie
- b-7. Action chimique des radiations
- b-8. Séparation des isotopes
- b-9. Conclusions de cette analyse.

On trouvera également au tableau 9 un relevé de tous les cours, quelle qu'en soit la nature, destinés aux diplômés.

On a relevé à ce tableau une colonne indiquant le nombre de participants et une colonne indiquant le nombre de cours par année, afin de pouvoir déterminer le nombre des spécialistes qui achèvent chaque année leur formation.

Ces informations sont très incomplètes et il est urgent de les compléter dans la mesure du possible. Ceci s'applique également au nombre de spécialistes qui quittent chaque année les universités et les écoles polytechniques, pour autant que ceux-ci ne figurent pas au tableau IO.

Il est souhaitable de définir clairement les termes de "génie atomique" et "spécialiste" pour une bonne compréhension du texte qui suit.

Les physiciens, chimistes et ingénieurs travaillent en collaboration dans le domaine du génie atomique.

Un ingénieur en génie atomique peut être un physicien spécialisé dans les aspects physiques, un chimiste spécialisé dans les aspects chimiques ou un ingénieur spécialisé dans les aspects technologiques du génie atomique.

Afin de définir nettement la notion de spécialiste, nous concevons une formation spécialisée, par exemple dans le domaine de la physique nucléaire et du génie atomique, de la manière suivante :

Physique nucléaire

- (1) Enseignement normal de physique, couronné par un examen après 3 à 4 années (équivalent au degré de B.Sc.)
- (2) Enseignement des principes fondamentaux de la physique nucléaire, couronné par un examen après 2 à 3 années (équivalent au degré de M.Sc.)
- (3) Spécialisation pendant 1 à 2 années, par exemple en spectrographie nucléaire ou physique neutronique.

Génie atomique

- (1) Enseignement normal de la physique, de la chimie ou des sciences appliquées (art de l'ingénieur) couronné par un examen après 3 à 4 années (équivalent au degré de B.Sc.)
- (2) Enseignement des principes fondamentaux du génie atomique dans les différentes disciplines pendant 2 à 3 années et couronné par un examen (équivalent au degré de M.Sc.)
- (3) Spécialisation pendant 1 à 2 années, par exemple dans le calcul, la construction ou la chimie des réacteurs, etc.

Il est également nécessaire de définir clairement la notion de cours. Un cours peut faire partie d'un enseignement universitaire normal, par exemple de l'enseignement de la physique nucléaire. Cela signifie qu'il est destiné à un candidat qui a déjà atteint le niveau de B.Sc. et qui désire acquérir le diplôme de M.Sc.

Un cours peut toutefois aussi constituer un enseignement complet d'une durée de quelques semaines jusqu'à un an, qui peut être donné, tant à l'Université que dans un des Instituts faisant partie d'un Centre nucléaire.

Les cours de ce dernier type sont, en règle générale, destinés aux diplômés en vue de leur spécialisation supplémentaire. C'est du type de spécialisation que dépend la question de savoir si le cours est destiné aux personnes du niveau de B.Sc. ou de M.Sc.

b) Enseignement supérieur

b-1 Physique nucléaire

Eu égard à la place tout à fait spéciale qu'occupe la physique des neutrons vis-à-vis de l'énergie nucléaire, on a établi une différence entre la physique nucléaire et la physique des neutrons.

La physique nucléaire fondamentale qui, jusqu'à une date récente, s'enseignait exclusivement dans les universités, est plus ancienne que l'application de ses résultats.

La formation de physiciens nucléaires, qui relève de l'enseignement universitaire est, de ce fait, plus stabilisée que celle des ingénieurs et du personnel scientifique du génie atomique.

Après avoir fait une étude des possibilités de formation existant dans le domaine des principes fondamentaux de la physique nucléaire et de ses aspects plus spécialisés, on aboutit à la conclusion que ces possibilités existent en nombre suffisant. Presque toutes les universités de la Communauté offrent de telles possibilités de formation.

Toutefois, l'équipement de ces universités qui, lorsqu'il s'agit des grands appareils, est insuffisant, impose une sévère restriction dans bien des cas.

La physique des neutrons (théorie des réacteurs)

Si, au contraire, on examine le nombre des possibilités de formation existant sur le terrain de la physique des neutrons, formation basée sur la physique nucléaire et la théorie de transport, on constate que ces possibilités n'existent pour ainsi dire pas, à condition, toutefois, que cette formation ne soit pas une section de la formation en génie atomique.

b-2. Le génie atomique

Dans presque chaque université, école polytechnique ou institut, quelques leçons sont consacrées à l'un des aspects du Génie atomique. Comme elles ne représentent toutefois aucune formation orientée de quelque importance, nous les ignorerons.

Le tableau I résume le nombre des possibilités de formation en Génie atomique, dans les six pays. Ce tableau est exclusivement basé sur les informations relevées dans le catalogue de l'O.E.C.E. déjà cité, et sur les renseignements complémentaires tirés du tableau IO.

Le tableau donne, en réalité, le nombre des universités, écoles polytechniques ou instituts où s'enseigne le Génie atomique.

Tableau I

Possibilités de formation en génie atomique

	Allemagne	Belgique	France	Italie	Pays-bas	total
Génie Atomique	5	5	2	8	I	2I

Ces chiffres ne sont pas négligeables. Mais, ici, intervient le problème de la qualité.

Les caractéristiques les plus marquantes des formations selon chacun des six pays sont reprises ci-après :

Allemagne : La formation dans les universités allemandes relève uniquement du domaine de la physique nucléaire. Les écoles polytechniques dispensent un enseignement plus ou moins poussé dans le domaine du génie atomique.

L'enseignement fait partie du programme ordinaire. La spécialisation commence après la troisième ou la quatrième année d'études. Aucun diplôme ou certificat spécial en génie atomique n'est délivré.

Belgique : L'enseignement en matière de génie atomique ne se donne que dans les Universités, soit sous forme de cours post-universitaires, soit qu'il fasse partie du programme ordinaire. Il s'adresse soit aux ingénieurs et aux licenciés en sciences, soit à des étudiants de dernière année.

Toutes ces formations sont complétées par des stages de trois semaines au centre de Mol. Dans tous les cas, un certificat est délivré.

France : L'enseignement dans les universités françaises relève uniquement du domaine de la physique nucléaire.

La formation en génie atomique est donnée à :

- 1) Saclay, à l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires ;
- 2) à Grenoble, à l'Institut Polytechnique.

Ces cours durent une année scolaire et, après examen, un diplôme d'ingénieur en génie atomique est délivré.

Italie : L'enseignement du génie atomique est dispensé dans les universités et les écoles polytechniques, souvent sous forme de cours pour diplômés; parfois, la spécialisation commence après la troisième ou la quatrième année d'études. Dans la plupart des cas, un certificat est délivré.

Pays-Bas : L'enseignement dans les universités néerlandaises relève uniquement du domaine de la physique nucléaire.

L'enseignement de l'énergie nucléaire est donné à l'Ecole Polytechnique de Delft dans le cadre du programme normal.

Ces brèves considérations illustrent la diversité des modes d'enseignement dans chaque pays.

La France a déjà fait les premiers pas dans la voie de l'uniformisation (+).

Ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer, l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires donne un cours d'un an en génie atomique. L'Institut Polytechnique de Grenoble a organisé un enseignement analogue; il délivre le même diplôme dans les mêmes conditions, mais avec des spécialisations différentes.

Des Commissions, mettant certains de leurs membres en commun, arrêteront les listes d'inscription et les programmes d'enseignement. Tous les élèves, quelle que soit l'école qui les forme, passeront au moins six semaines dans un Centre du Commissariat à l'Energie Atomique. Les jurys des deux écoles échangeront un certain nombre de leurs membres pour assurer l'unité des jugements.

b-3. Techniques radio-isotopiques

Une différence doit être établie d'une part entre un cours complet sur l'emploi des radio-isotopes, destiné à des licenciés déjà activement occupés dans la vie industrielle ou scientifique, et d'autre part des leçons sur l'emploi des radio-isotopes, qui sont partie intégrante de cours d'énergie nucléaire, de physique nucléaire, de radiochimie, de médecine ou de biologie.

(+) "L'enseignement du génie atomique de l'Institut national des sciences et techniques nucléaires au Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay", par Henri Baissas A/Conf.15/PII4I-Mai 1958.

Le tableau 3 donne un relevé des cours sur l'utilisation et l'application des isotopes radioactifs, tandis que le tableau 2 en donne un aperçu statistique.

Les cours sont ouverts aux chimistes, physiciens, ingénieurs, médecins et biologistes qui désirent se perfectionner dans l'utilisation des radio-isotopes.

La durée de ces cours varie de quelques semaines à quelques mois.

Dans presque tous les cas un certificat est délivré.

Tableau 2

Nombre des cours des techniques radio-isotopiques

	Allemagne	Belgique	France	Italie	Pays-Bas
industrielle et scientifique	2		I	3	I
médicale et biologique	I	2			
agricole					

Tableau 3Cours sur l'utilisation et l'application des isotopes radioactifs

Centre	Cours	Durée des Cours	Observations
<u>ALLEMAGNE</u>			
Fribourg	Application clinique des isotopes	2 semaines	médecins
Karlsruhe	Technique des réacteurs et applications des isotopes	3 semaines	personnel des services techniques de contrôle
Berlin	Cours de radio-éléments	3 semaines	
<u>BELGIQUE</u>			
Liège	Techniques utilisées en vue des applications biologiques et médicales des radio-isotopes	4 semaines	
Louvain	Emploi des radio-isotopes en médecine et en biologie	2 semaines	
<u>FRANCE</u>			
Saclay	Cours de radio-éléments	6 semaines	
<u>ITALIE</u>			
Milan	Techniques radio-isotopiques	6 semaines	
Rome	Techniques des radio-éléments	6 semaines	
Turin	Techniques des radio-éléments	3 mois	
<u>PAYS-BAS</u>			
Amsterdam	Utilisation et application des isotopes radioactifs	2 semaines	

b-4. Physique sanitaire

L'emploi à grande échelle des radiations nucléaires et des matières radioactives dans les centres atomiques, dans l'industrie et dans les hôpitaux a engendré un urgent besoin de personnes ayant reçu une formation spécialisée dans le domaine de la protection contre les radiations. L'exploitation de réacteurs nucléaires et l'emploi de matières radioactives s'accompagnent du recours aux services du "physicien sanitaire". Selon la tâche qui lui incombe, la compétence de celui-ci doit répondre aux exigences du niveau décrit ci-dessous :

- a) Contrôleur des radiations. Le contrôleur des radiations a pour fonction de détecter et de mesurer la radioactivité totale, d'évaluer les risques d'irradiation et de superviser la manipulation des isotopes radioactifs. C'est lui qui effectue le travail de routine dans les hôpitaux, entreprises industrielles, laboratoires et services de la santé publique.

Cette formation relève de l'enseignement technique.

- b) Physicien sanitaire subalterne. Le travailleur de cette catégorie assure le contrôle des radiations à un stade dépassant le travail de routine. Il doit acquérir la compétence voulue en matière de risques de radiation, principes de la mesure des radiations ionisantes, l'emploi des instruments, méthodes de protection, contrôle des personnes, contrôle des zones, inspection des bâtiments, décontamination, etc.
- c) Physicien sanitaire supérieur. Le travailleur de cette catégorie a dans ce domaine des responsabilités plus étendues, y compris les fonctions consultatives en matière de conception des services.

La responsabilité de la protection de la population incombe aux organismes de santé publique, c'est-à-dire à l'officier de santé publique et à l'ingénieur de santé publique. Ces fonctionnaires doivent recevoir une formation spécialisée dans une école de santé publique.

Enfin, mentionnons que tout programme de formation de personnel scientifique et d'ingénieurs doit comporter des leçons sur les effets biologiques des radiations et sur la protection.

Si l'on admet que le catalogue de l'O.E.C.D. est complet sur ce point, il faut conclure que les possibilités de formation en physique sanitaire sont très restreintes, à moins que les intéressés ne la reçoivent sur place.

Le tableau ci-dessous donne un aperçu des possibilités actuelles.

Tableau 4
Cours de protection sanitaire

Pays	Cours	Durée des cours	Remarques
Allemagne			
Belgique			
France			
Italie	Formation de médecins d'entreprises et d'inspecteurs du travail		
Pays-Bas	Cours pour médecins travaillant dans le domaine de la physique sanitaire		

b-5. Physique des plasmas et fusion nucléaire

Le tableau suivant donne un aperçu du nombre de cours sur la physique des plasmas et la fusion nucléaire.

Tableau 5
Cours sur la physique des plasmas et la fusion nucléaire

Centre	Leçons ou cours	Observations
Aix-la-Chapelle	Décharges de courant élevé et fusion nucléaire	leçons
Hanovre	Physique des plasmas	seminaire
Munich	Théorie de physique des plasmas; fusion contrôlée	leçons
Saclay	Physique des plasmas	<u>cours</u> (janv. - juin 1959)
Bruxelles	Plasma et magnétohydrodynamique	

b-6. Radiobiologie

Une distinction est à établir entre d'une part les cours de radiobiologie ouverts aux biologistes et aux médecins et où la radiobiologie est traitée comme telle et d'autre part

les leçons sur l'effet biologique des radiations données à des physiciens nucléaires, ingénieurs, etc. dans le cadre d'un cours de génie atomique. Le tableau 6 donne un aperçu statistique du nombre des leçons ou des cours. Les chiffres soulignés désignent des cours complets.

Tableau 6

Nombre des leçons ou cours en radiobiologie

	Allemagne	Belgique	France	Italie	Pays-Bas	Total
radiobiologie pour biologistes, médecins, etc.	2	I	<u>I</u>	<u>I</u>	I	5
effets biologiques des radiations (part de cours en génie atomique)	2	I	2	6		II

I France-Saclay - Cours de radiobiologie - 2 ans

I Italie-Pavie - Cours de perfectionnement sur l'action biologique des radiations et sur leur utilisation dans l'agriculture et l'industrie - 6 mois.

b-7. Action chimique des radiations

Ci-dessous sont citées les écoles où sont données des leçons sur l'action chimique des radiations, tandis que le tableau 7 en donne un aperçu statistique.

Ces informations ont été uniquement empruntées au Catalogue de l'O.E.C.E. et à ses addenda, mais elles donnent l'impression d'être très incomplètes.

D'autre part, on constate, par ex. en étudiant le budget du Gouvernement des Pays-Bas, destiné à l'Instruction, aux Arts et aux Sciences, qu'aux Pays-Bas, il n'existe pour ainsi dire pas de dispositions pour la chimie des radiations.

Allemagne :

Université de Cologne - travaux de recherche sur la chimie des radiations.

France :

Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires de Saclay. Action chimique des radiations - leçon (partie du cours de génie atomique).

Institut du Radium.

Italie :

Université de Pavie.

Physique des radiations et leur action chimique - leçons (partie du cours de perfectionnement sur l'action biologique des radiations et sur leur utilisation dans l'agriculture et l'industrie).

Tableau 7

Nombre des leçons des radiations sur l'action chimique

Allemagne	Belgique	France	Italie	Pays-Bas	Total
I		2	I		4

b-8. Séparation des isotopes

Le tableau 8 donne un relevé des leçons sur la séparation des isotopes

Tableau 8

Leçons sur la séparation des isotopes

<u>ALLEMAGNE</u> Aix-la-Chapelle	Technique de la séparation des isotopes	
<u>BELGIQUE</u> Bruxelles	Séparation des isotopes	partie du cours de physique nucléaire

Tableau 8 (suite)

<u>FRANCE</u>		
Grenoble	Séparation des isotopes	partie du cours de génie atomique
Saclay	Séparation des isotopes	partie du cours de génie atomique
<u>ITALIE</u>		
Milan	Séparation des isotopes	partie du cours de génie atomique
Rome	Séparation des isotopes stables	
Turin	Séparation des isotopes stables	
<u>PAYS-BAS</u>		
Leyde	Spectrométrie de masse	

b-9. Conclusions des points b-I à b-C

Un examen de ce qui précède montre clairement que l'organisation de l'enseignement spécialisé des différentes branches des sciences nucléaires appliquées varie largement selon chacun des pays de la Communauté.

Ceci est une conséquence du système national d'enseignement, du rythme que suit le développement des sciences nucléaires, imposant dans certains cas la recherche d'une solution appropriée, et enfin de l'initiative tant privée que publique.

Un pays donne un cycle complet de cours sur le génie atomique, un autre n'en donne pour ainsi dire pas. Certains pays délivrent des diplômes, d'autres pas. La nature des cours est, elle aussi, très divergente, selon la structure industrielle du pays en question. De plus, l'enseignement spécialisé est actuellement en voie de développement; aussi l'image que nous nous en formons est-elle susceptible de profondes modifications.

Eu égard à la promptitude avec laquelle les sciences nucléaires sont mises en application, il importe de s'attacher à l'étude des problèmes fondamentaux posés par la création de l'enseignement spécialisé, d'autant plus que la réorganisation des systèmes d'enseignement ne portera ses fruits qu'après plusieurs années. Les organisations responsables dans chacun des six pays donnent toutefois l'impression d'être parfaitement conscientes de la portée d'un bon enseignement spécialisé.

Partout des mesures sont prises pour pallier, avec le maximum d'efficacité, à la pénurie de spécialistes.

Cependant des différences considérables se laissent déceler dans la durée de la formation, la combinaison des matières selon leur nombre, les installations des institutions et l'état de la recherche.

De l'analyse qui précède on peut tirer la conclusion que les pays de la Communauté disposent de possibilités suffisantes dans le domaine de l'enseignement des différentes disciplines du génie atomique, du moins dans la mesure où celui-ci couvre les principes fondamentaux.

Il est toutefois évident que la Communauté n'offre pas des possibilités suffisantes pour la formation de spécialistes.

Dans certains cas il est possible de suivre l'enseignement en question dans l'un des pays de la Communauté et au contraire pas dans un autre.

Cette lacune perd toutefois de son importance dans un contexte européen s'il est possible d'envoyer le personnel dans tel ou tel pays où il pourra recevoir la formation voulue.

L'accord EURATOM/USA offre d'autre part provisoirement une issue. Il faut à cet égard cependant tenir compte du fait que les enseignements prévus présupposent une connaissance des principes fondamentaux.

D'autres lacunes sont également à signaler, par exemple quant à la formation de physiciens des réacteurs, physiciens sanitaires et d'opérateurs de centrales. Sans doute la cause en réside-t-elle dans le fait que l'Europe ne construit ou n'exploite pas encore de réacteurs nucléaires de puissance. Tel sera cependant le cas dans un proche avenir.

A se pencher sur la présente analyse, on ne peut se soustraire à l'impression que l'enseignement de la physique des plasmas et de la fusion nucléaire aussi bien que celui de l'action chimique des radiations sont fort limités.

Compte tenu de la grande différence entre les formations dans les différents pays il est important d'examiner le résultat d'une "européanisation" éventuelle de diplômes déterminés.

Il faudrait à cet égard avoir la possibilité de fixer au préalable le niveau de l'enseignement; ainsi on faciliterait les échanges de scientifiques et d'ingénieurs entre les pays de la Communauté.

c) Enseignement technique

L'enseignement actuel des sciences nucléaires pour techniciens fait l'objet d'un résumé à la page 30 (Belgique) du catalogue de l'O.E.C.E. et est repris au tableau II de ce rapport. La formation de techniciens en nombre suffisant est de la plus haute importance pour les centrales atomiques et les divers instituts de recherche nucléaire.

En France on évalue à 20.000 le nombre de techniciens qui seront requis au cours des 10 années à venir, ce qui représente plus de la moitié des effectifs qui seront formés pendant cette même période. Une intensification de cette formation doit donc retenir toute l'attention voulue, d'autant plus que ledit enseignement n'est pas encore fortement développé.

L'état de cet enseignement dans les six pays est résumé ci-après.

Allemagne

L'enseignement de la physique nucléaire et du génie atomique vient à peine d'être introduit à la "Ingenieurschule" allemande.

Belgique

L'Institut Technique Supérieur de l'Etat pour les industries nucléaires, à Bruxelles, donne des cours complémentaires ouverts aux titulaires d'un diplôme d'ingénieur technicien, électromécanicien, électronicien, ingénieur technicien chimiste.

France

Le Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay donne des cours en liaison avec le Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris. Ces cours, destinés aux techniciens, visent toutefois à une formation accélérée d'ingénieurs.

Cette formation comprend :

- 2 ans de cours de soir à Saclay
- I année à temps plein au Conservatoire National des Arts et Métiers
- I année de thèse dans les laboratoires du Commissariat à l'Energie Atomique.

Grâce à cet enseignement, la formation d'un ingénieur ne dure que 4 ans au lieu de 7.

De plus, les spécialistes du Commissariat à l'Energie Atomique donnent des cours et des conférences à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs des Arts et Métiers de Paris, à l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures et le C.E.A. a créé au Conserva-

toire National des Arts et Métiers une chaire de Physique Nucléaire en vue des Applications, une chaire de Radioactivité Appliquée et un Cours de chimie sous ses rapports avec la Science et l'Industrie Nucléaires.

Pour la formation des prospecteurs, il existe un Centre de Perfectionnement des Prospecteurs de C.E.A.-D.R.E.M. à RAZES (Haute Vienne).

Italie

Cours de perfectionnement sur l'énergie nucléaire à l'intention d'électrotechniciens et radiotechniciens.

Pays-Bas

Une commission d'étude a été instituée à cet effet.

Conclusion

Il ne faut pas s'attendre à ce que cet enseignement se développe d'une manière uniforme dans les six pays. Etant donné que l'introduction de l'enseignement de la physique nucléaire et du génie atomique est de date très récente, la création d'un diplôme Euratom pourrait stimuler, amener au niveau désiré et normaliser cet enseignement, facilitant ainsi les échanges de techniciens entre pays. Le moment paraît particulièrement propice puisque pratiquement rien n'a encore été "inscrit dans l'histoire" de cet enseignement.

Tableau 9

I. Cours de sciences nucléaires appliquées pour diplômés

- J 17 -

Centre	Cours	Durée du cours	Nombre de participants	Nombres de cours par an	Observations
<u>ALLEMAGNE</u> Aix-la-Chapelle (Haus der Technik)	Physique, chimie et technique des réacteurs	-			Séminaire
Düsseldorf	Cours de radiochimie sur les isotopes	-			Ingénieurs, chimistes, physiciens
Fribourg	Application clinique des isotopes	2 sem.			Médecine
Karlsruhe (Réacteur)	Cours sur les fondements de la technique des réacteurs	2 sem.			Industriels
Mayence	Technique des réacteurs et applications des isotopes	3 sem.			Personnel des services techniques de contrôle
Berlin	Cours de radiochimie	6 sem.			Ingénieurs, chimistes, physiciens, biologistes
Geesthacht	Cours de radio-éléments Cours de réacteurs Physique et technique des réacteurs	3 sem. 3 sem.			tous les 4 semestres
<u>BELGIQUE</u> Bruxelles	Physique théorique, atomique et nucléaire	I an			
Gand	Physique et technique des réacteurs	I an			Licenciés
Liège	Physique, chimie et technique des réacteurs. Techniques utilisées en vue des applications biologiques et médicales des radio-isotopes	4 sem.			Ingénieurs

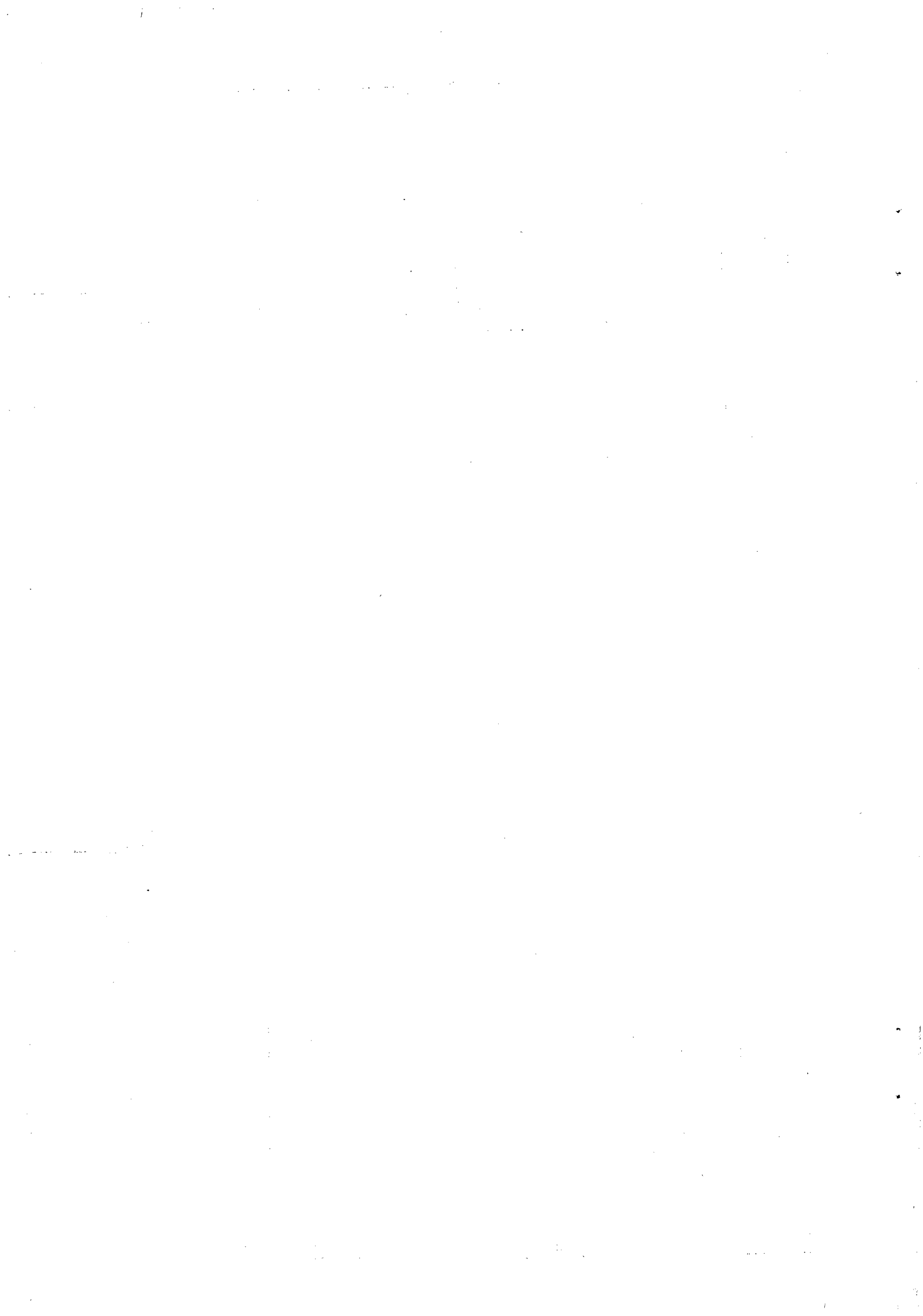
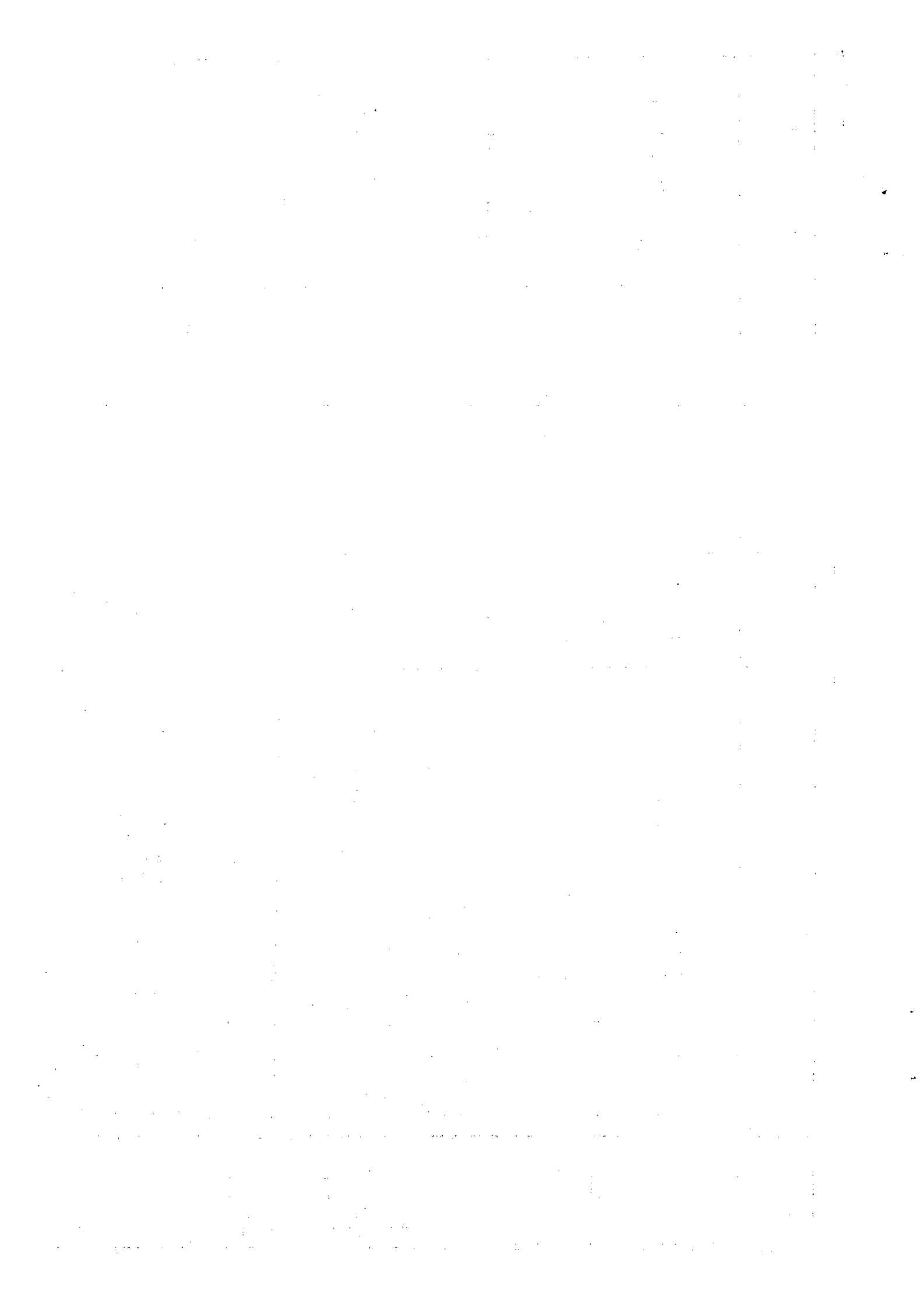


Tableau 9 (suite)

Centre	Cours	Durée du cours	Nombre de participants	Nombres de cours par an	Observations
Louvain	Emploi des radio-isotopes en médecine et en biologie	2 sem.			
Mol Mons	Stages collectifs Physique, chimie et technique des réacteurs	3 sem. 18 mois			licenciés, ingénieurs
<u>FRANCE</u>					
Grenoble	Physique, chimie et technique des réacteurs	1 an	limité	I	
Saclay	Cours de génie atomique Cours de radiobiologie Cours de métallurgie spéciale Cours de radio-éléments Cours de théorie et techn. des accélérateurs	1 an 2 ans 2 ans 6 sem. 2 ans	élèv. reg. 40 audit. lib. 60	I	Dr en médecine 2 sem. au moins/an
Marcoule/ Saclay/ Chinon	Thermique et mécanique des fluides dans les réacteurs Enseignement de physique théorique Cours du centre de préparation pratique aux applications indust. de l'énergie nucléaire Ecole de pilotage de réacteurs	1 an 2 ans 6 mois 4 sem.			Ing. ou licenc. ayant une expérience pratique Ing. ou cadres de l'industrie
<u>ITALIE</u>					
Bologne	Physique, chimie et technique des réacteurs	2 ans	20	I	
Milan	Physique, chimie et techn. des réacteurs Technique des radio-isotopes Préparation de médecins d'entreprise et d'inspecteurs du travail	6 mois 6 sem.	30 12	I 2	
Padoue	Physique, chimie et technique des réacteurs	-			
Pise	Physique, chimie et technique des réacteurs Médecine nucléaire	6 mois -	30		



- J 19 -
Tableau 9 (suite)

Centre	Cours	Durée du cours	Nombre de participants	Nombres de cours par an	Observations
Palerme	Physique, chirurgie et technique des radiacteurs	-			à l'examen
Pavie	Action biologique des radiations, application des radio-isotopes à l'agriculture et à l'industrie		15		à l'examen
Rome	Physique, chimie et technique des radiacteurs	6 mois	30		
	Technique des radio-éléments	6 sem.	12		
	Médecine nucléaire	-			
Turin	Technique des radio-éléments	3 mois	16		
	Physique, chirurgie et technique des radiacteurs	6 mois	20		
<u>PAYS-BAS</u>					
Leyde	Cours pour médecins travaillant dans le domaine de la physique sanitaire	1 an			
La Haye (R.C.N.)	Physique, chirurgie et technique des radiacteurs	1 sem.			Cadres de l'industrie
Amsterdam	Utilisation et application des isotopes radio-actifs	2 sem.			
Wageningen	Application de l'énergie nucléaire à l'agriculture	4 sem.			Diplômés travaillant dans l'agriculture

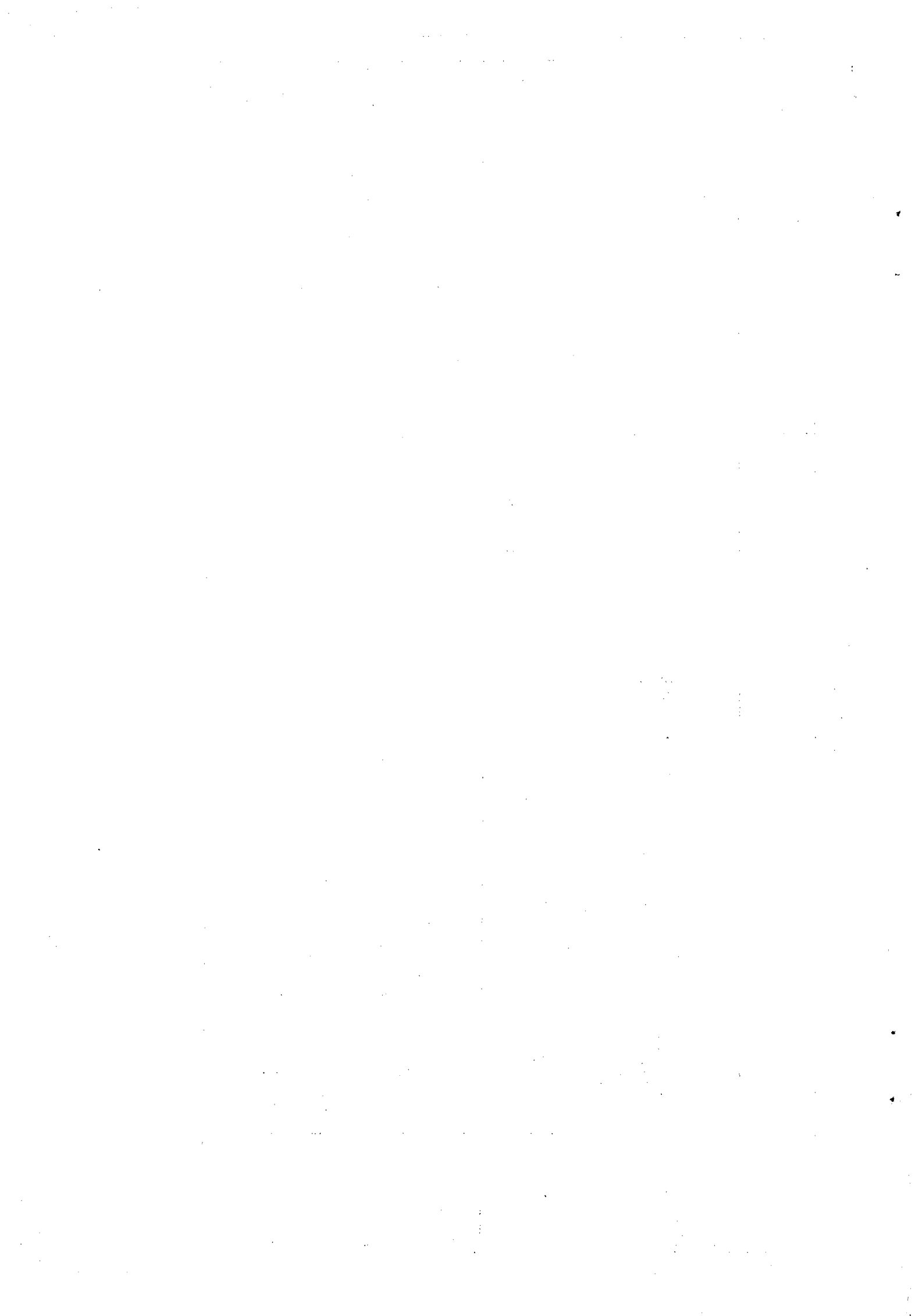


Tableau 10 - ENSEIGNEMENT SUPERIEUR. Add. au catalogue de l'OECE des cours sur l'Energie Nucléaire (1958) - BELGIQUE (*)

Cours	Professeurs	Durée des cours	Conditions d'admission	Principaux Appareils	Diplômes	Remarques
<p>1. UNIVERSITE LIBRE DE BRUXELLES <u>FACULTE DES SCIENCES.</u> Physique théorique, atomique et nucléaire. Physique mathém. approfondie Physique statist. approfondie Physique nucléaire théorique Théorie quantique des champs et particules élémentaires Physique théorique du solide Physique des hautes énergies Cours à option (1) Physique des basses températures</p>	<p>M. Cheniau M. Prigogine M. Demeur M. Cheniau M. Prigogine M. Prigogine M. Demeur M. Prigogine M. Demeur M. van den Dungen M. Prigogine M. Cheniau M. van den Dungen M. Prigogine M. Demeur</p>	<p>30 h. tot. 30 h. tot. 30 h. tot. 15 h. tot. 15 h. tot. 30 h. tot. 30 h. tot. 20 h. tot. 20 h. tot. 20 h. tot. 20 h. tot. 15 h. tot. 15 h. tot. 15 h. tot. 15 h. tot.</p>	<p>Diplôme de licencié en sciences physiques, en sciences chimiques, en sciences, en sciences mathématiques ainsi qu'un diplôme d'ingénieur civil.</p>		<p>Licence spéciale en physique théorique, atomique et nucléaire. Elle est accordée après une année d'études et une épreuve unique.</p>	

(1) Les étudiants sont tenus de suivre un certain nombre de ces cours (60 h. au total).
 (2) Peut être choisi par les étudiants qui n'ont pas encore subi d'examen sur cette matière.

(*) Il y a lieu de permuter les pages 30 (INSTITUT TECHNIQUE SUPERIEUR DE L'ETAT POUR LES INDUSTRIES NUCLEAIRES) et 31 (UNIVERSITE LIBRE DE BRUXELLES) du catalogue de l'OECE.

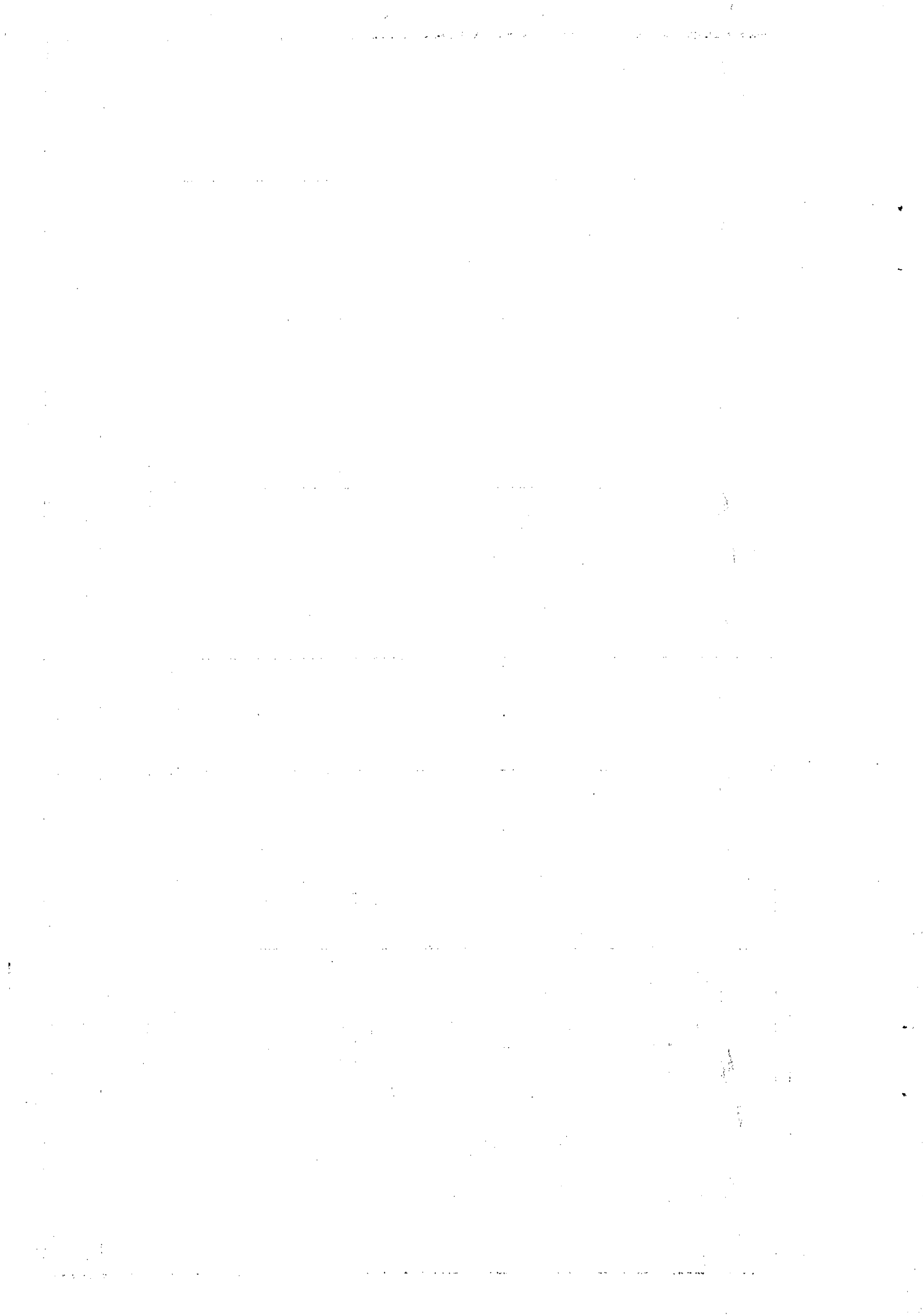


Tableau 10 - ENSEIGNEMENT SUPERIEUR. Add. au catalogue de l'OECE des cours sur l'Energie Nucléaire (1958) - BELGIQUE (suite)

Cours	Professeurs	Durée des cours	Conditions d'admission	Principaux appareils	Diplômes	Remarques
<p>2. <u>UNIVERSITE DE LIEGE</u>. <u>Insitut de Physique Nucléaire</u> <u>et Institut Interuniversitaire</u> <u>des Sciences Nucléaires</u>. Cours sur les techniques utilisées en vue des applications biologiques et médicales des radioisotopes</p>	<p>M. Guebon M. Winand M. Duyckaerts M. Brall</p>	<p>4 semaines</p>	<p>Porteurs d'un diplôme universitaire</p>			<p>Le nombre des participants sera au maximum de 24. L'enseignement est gratuit, toutefois une caution de FB 1.000 est demandée à chaque participant.</p>
<p>3. <u>UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN</u>. Séminaire sur l'emploi des radioisotopes en médecine et en biologie</p>		<p>2 semaines</p>				

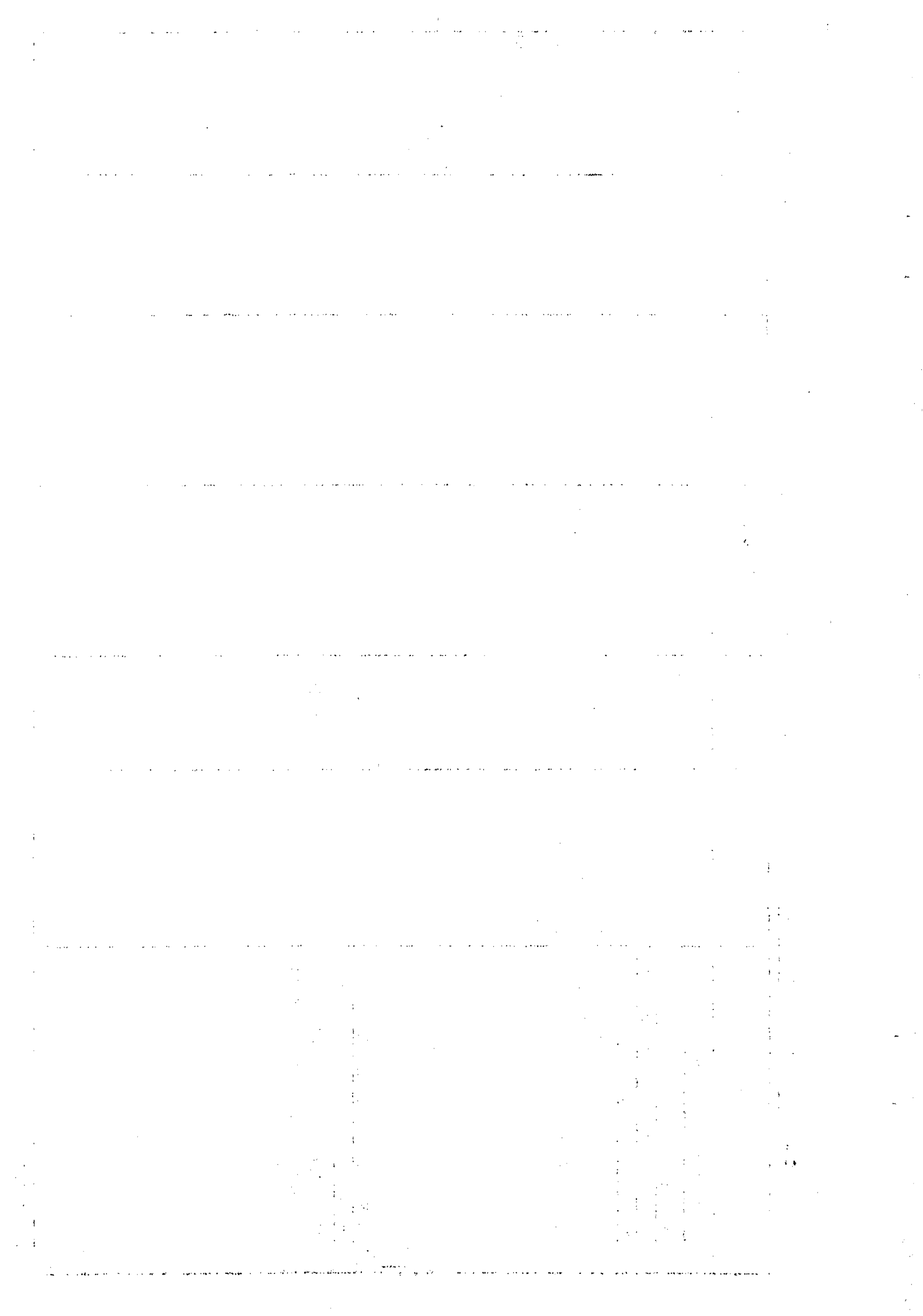


Tableau 10 - ENSEIGNEMENT SUPERIEUR. Add. au catalogue de l'OECE des cours sur l'Energie Nucléaire (1958) - FRANCE.

Cours	Professeurs	Durée des cours	Conditions d'admission	Principaux appareils	Diplômes	Remarques
<p><u>COLLEGE DE FRANCE.</u> <u>Laboratoire de Physique Atomique et Moléculaire.</u> Le sujet des cours est différé chaque année. 1958-59 : l'abandon du principe de parité et la théorie des radioactivités β</p>	<p>M. Perrin</p>			<p>Le laboratoire dispose d'un équipement moderne de physique nucléaire. Il dispose de 2 générateurs de neutrons rapides (2,5 ou 14 MeV) de 2 microscopes électroniques et de microscopes phototoniques en cours de mise au point</p>		
<p><u>UNIVERSITE DE PARIS.</u> <u>Institut Henri Poincaré.</u> Cours de physique théorique</p>	<p>M. de Broglie</p>		<p>Licencié es-Sc.</p>		<p>Doctorat de 3e cycle</p>	
<p>1-Physique théorique approfondie Option : application de la mécanique ondulatoire à la physique nucléaire et à la physique atomique et moléculaire. 2-Physique théorique atomique et nucléaire Cours de physique du solide a) Notions de base données dans des cours communs avec le certificat de physique atomique et nucléaire (mécanique quantique, phys. atomique et moléculaire, thermodynamique statistique)</p>	<p>M. Levy M. Guinier</p>		<p>-- d° --</p>		<p>-- d° --</p>	

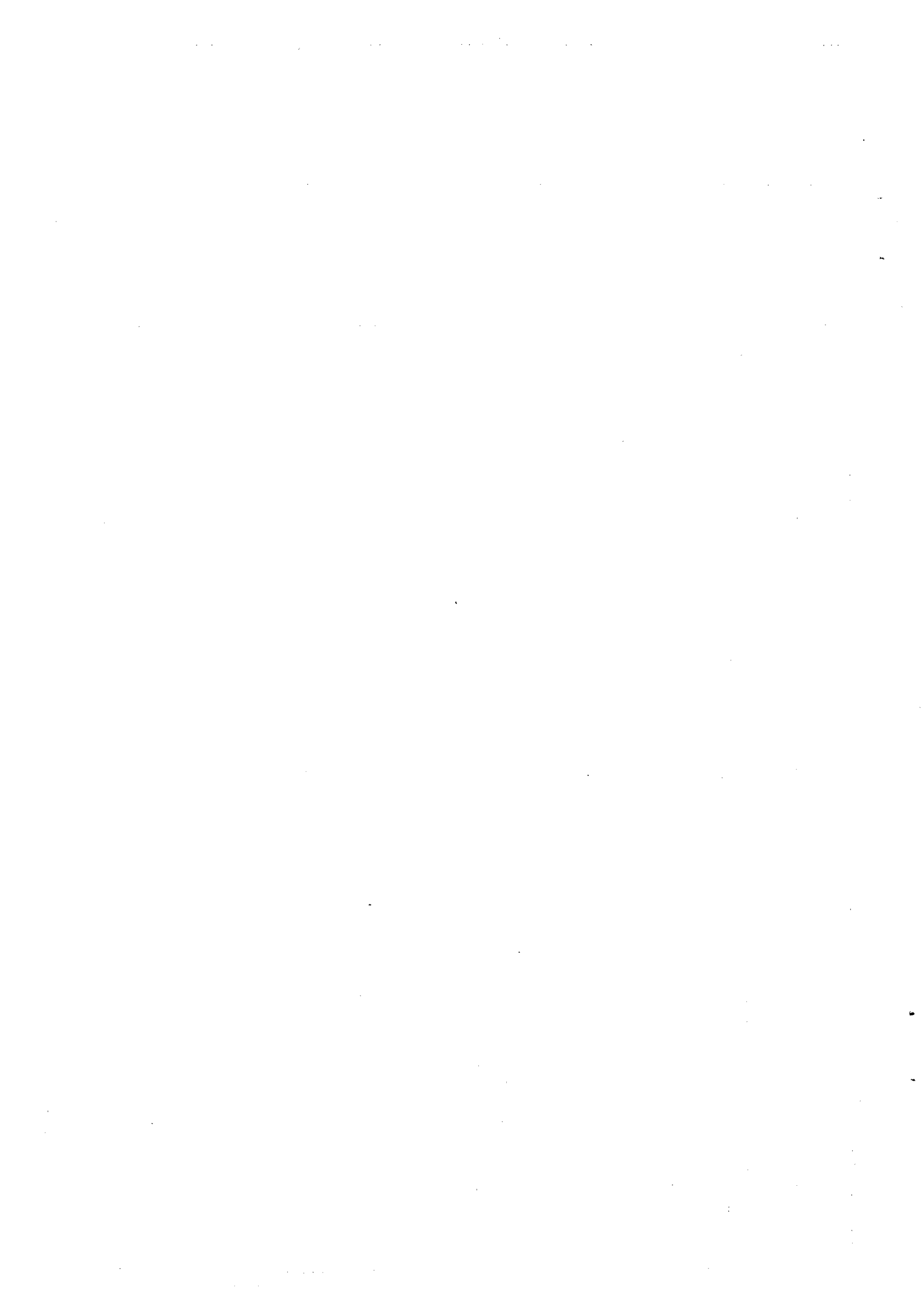


Tableau 10 - ENSEIGNEMENT SUPERIEUR. Add. au catalogue de l'OECE des cours sur l'Energie Nucléaire (1958) - FRANCE (suite)

Cours	Professeurs	Durée des cours	Conditions d'admission	Principaux appareils	Diplômes	Remarques
<p>b) cours spécialisés radiocristallographie magnétisme nucléaire physique des neutrons et ferromagnétisme</p> <p><u>ECOLE NORMALE SUPERIEURE.</u> <u>Laboratoire des Hautes Energies et de Physique des Solides</u> <u>ORSAY</u></p> <p>Cours sur : - l'interaction des radiations nucléaires avec les noyaux - les méthodes de détection en physique nucléaire - les propriétés des gaz ionisés</p> <p><u>UNIVERSITE DE GRENOBLE. (1)</u> <u>Laboratoire d'Electrostatique et Physique du Métal</u> <u>Institut Fourier</u></p> <p>Ferromagnétisme Structure du solide Introduction à la phys. théor. Introduction au magnétisme Antiferro et ferromagnétisme Résonances paramagnétiques</p>	<p>M. Rocard M. Halban M. Guinier M. Levy</p> <p>M. Neel M. Bertaut M. Ayant M. Barbier M. Pauthenet M. Buyle-Bodin</p>			<p>1 grand acc.linéaire d'électrons en construction par tranches (250 MeV 1958 500 MeV 1959 1 GeV 1960 2 GeV ultérieurement)</p>	<p>Certificat de magnétisme et physique du solide</p>	
<p>(1) En ce qui concerne la Section de Génie Atomique de l'Institut Polytechnique de Grenoble, le diplôme décerné est "Ingénieur Atomiste" de l'Université de Grenoble au lieu de "Ingénieur Atomique".</p>						

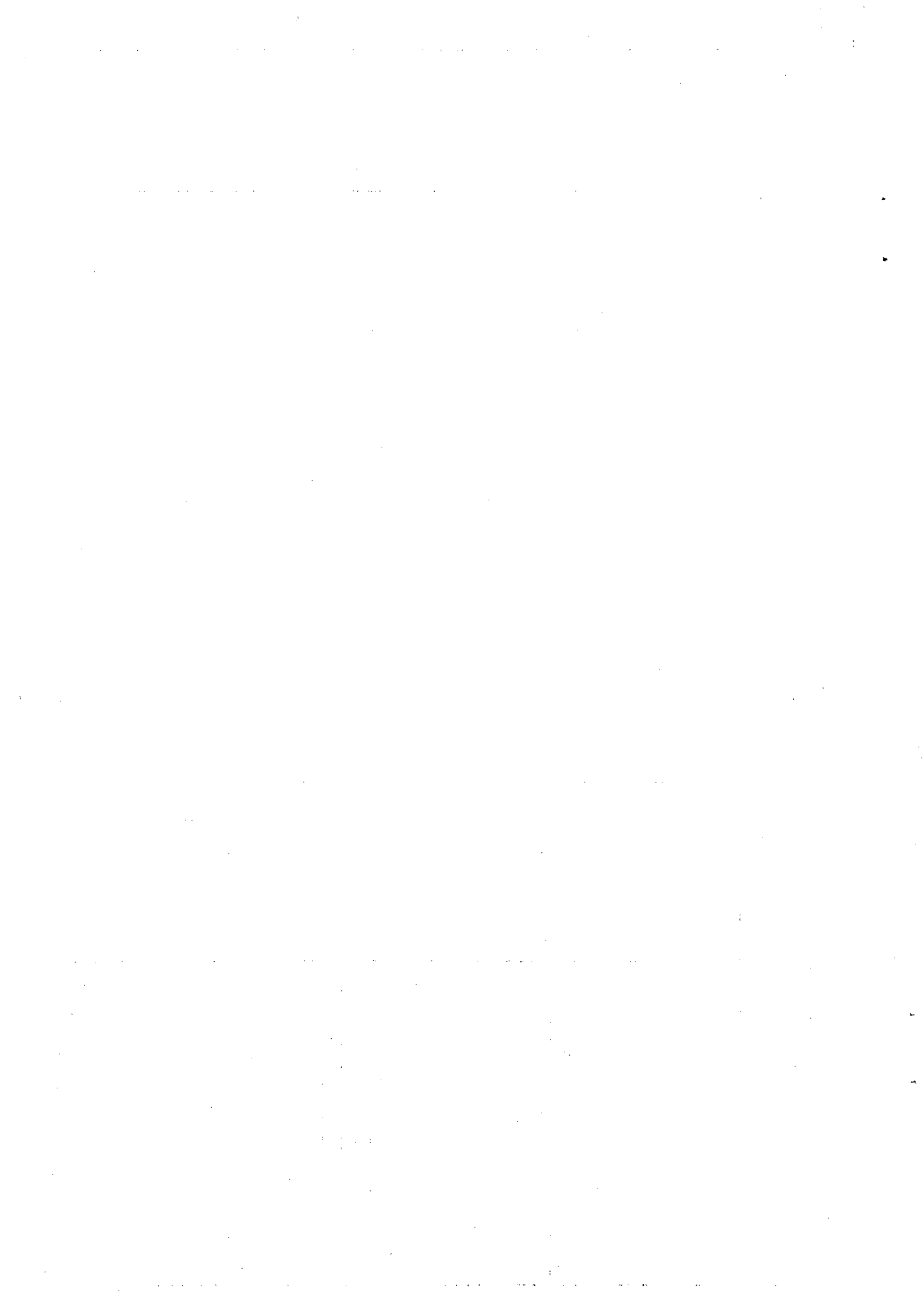


Tableau 10 - ENSEIGNEMENT SUPERIEUR. Add. au catalogue de l'CECE des cours sur l'Energie Nucléaire (1958) - FRANCE (suite)

Cours	Professeurs	Durée des cours	Conditions d'admission	Principaux appareils	Diplômes	Remarques
<p><u>UNIVERSITE DE NANCY.</u> <u>Ecole Nationale Supérieure de Géologie Appliquée et de Prospection Minière</u> - Pétrographie des roches ignées - Géochimie - Radiogéologie</p>	<p>M. Roubault M. Millot M. Coppens</p>				<p>Certificat de pétrographie et de géochimie</p>	<p>Les étudiants font des stages dans les laboratoires de Saclay</p>
<p><u>INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES ET TECHNIQUES NUCLEAIRES.</u> Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay</p>	<p>Une quarantaine de spécialistes du CEA participent aux enseignements spécialisés ci-dessous</p>	<p>1 semaine</p>	<p>Etudiants licenciés es-Sc. ou possédant un diplôme d'ingénieur</p>			
<p>- <u>Physique des plasmas</u> (1er cours le 13 janvier 1959)</p> <p>- <u>Ecole de Pilotage de réacteurs de Marcoule/Saclay/Chinon.</u></p>		<p>4 semaines (2 sessions par an)</p>	<p>Ingénieurs ou cadres de l'industrie intéressés à l'énergie nucléaire.</p>	<p>Les piles spécialisées du CEA et de l'EDF.</p>	<p>Certificat de stage</p>	<p>15 élèves admis au max. Droits d'inscription : 100.000 FF.</p>

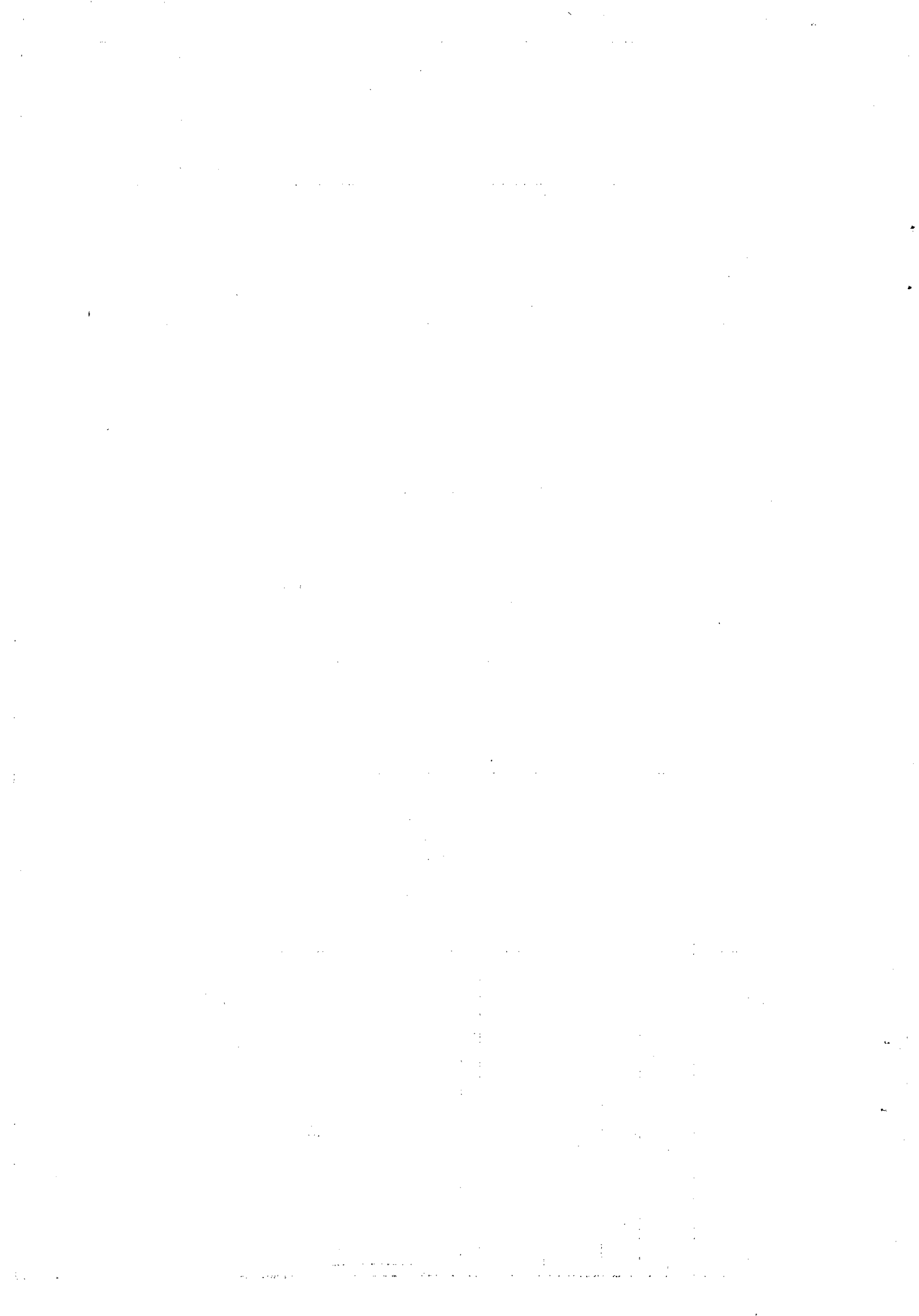
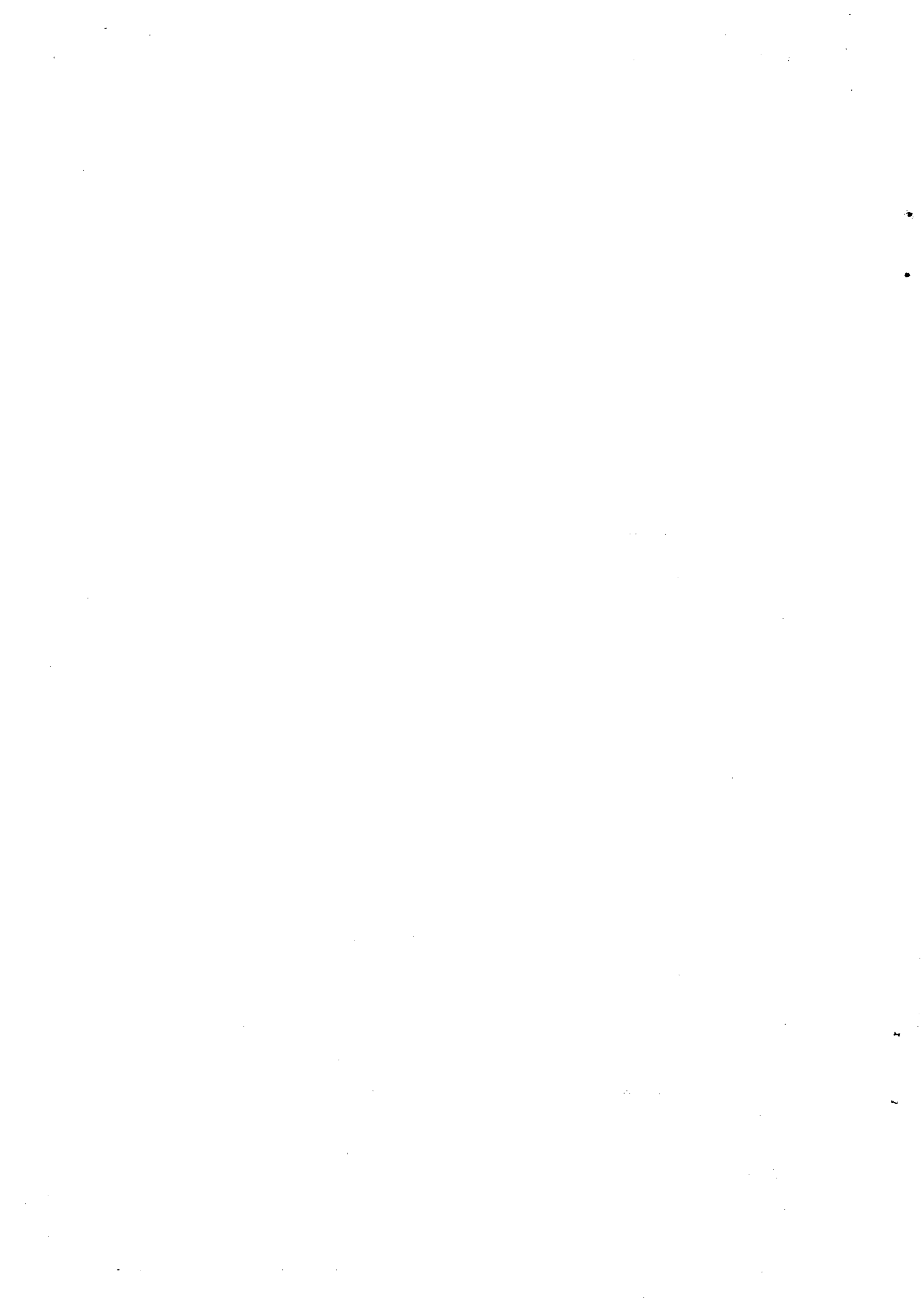


Tableau 10 - ENSEIGNEMENT SUPERIEUR. Add. au catalogue de l'OECE des cours sur l'Energie Nucléaire (1958) - FRANCE (suite)

Cours	Professeurs	Durée des cours	Conditions d'admission	Principaux appareils	Diplômes	Remarques
<p><u>Remarques :</u></p> <p>a) L'I.N.S.T.N. prête un certain concours aux :</p> <p>COURS DU CENTRE DE PREPARATION PRATIQUE AUX APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE L'ENERGIE NUCLEAIRE (PRAIEN)</p> <p>Centre Marcellin Berthelot 28, rue St Dominique</p> <p>b) CENTRE ASSOCIE DU C.N.A.M. DE SACLAY (A.S.E.S.T.)</p> <p>Dans le cadre de la promotion supérieure du travail, de nombreux agents techniques du CEA ont été intéressés par la formation d'ingénieurs des Arts et Métiers</p> <p><u>Programme :</u> Physique, Mathématiques, Chimie, Travaux pratiques</p> <p>Ces agents techniques viendront augmenter le nombre d'ingénieurs travaillant au CEA.</p>		<p>6 h. + 1 semaine de T.P.</p>	<p>Ingénieurs ou licenciés ayant une expérience pratique de l'industrie</p>		<p>Certificat d'assiduité</p>	<p>Droits d'inscription : 140.000 FF.</p>



- Tableau 11 - ENSEIGNEMENT TECHNIQUE. - Add. au catalogue de l'OECE des cours sur l'Energie Nucléaire (1958). - FRANCE.

Cours	Professeurs	Heures par semaine	Nbre de semestres	Conditions d'admission	Diplômes	Remarques
<p><u>CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS - PARIS.</u></p> <p>Cours de radioactivité appliquée.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Stabilité et instabilité nucléaire - les rayonnements nucléaires - les radioéléments - détection des rayonnements - mesure des activités - dosimétrie des rayonnements - identification des radioéléments par méthodes physiques - manipulation des radioéléments - applications typiques des radioéléments 	<p>M. B. Grinberg</p>	<p>2 h. de cours +1 h. d'exercice</p>	<p>40 leçons 1 seule année de novembre à avril</p>	<p>Le cours s'adresse à des ingénieurs, techniciens, cadres de l'industrie ou à des médecins</p>	<p>Certificat de radioactivité appliquée</p>	<p>Les cours sont publics et ont lieu le soir ou le samedi après-midi. Seuls sont autorisés à s'inscrire aux examens les auditeurs justifiant d'une assiduité suffisante (32 présences aux cours pour 40 leçons) 150 élèves environ par an.</p>
<p>Cours de physique nucléaire en vue des applications.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Physique nucléaire (rappels de la théorie atomique, description du noyau, rayonnements corpusculaires, transformations du noyau) - Neutronique et réacteurs nucléaires (neutronique, réacteurs nucléaires, utilisation de l'énergie nucléaire) 	<p>M. J. Martelly</p>	<p>- d° -</p>	<p>- d° -</p>	<p>- d° -</p>	<p>Certificat de physique nucléaire en vue des applications</p>	<p>- d° - 250 élèves environ par an.</p>
<p>Cours de Chimie appliquée à la Science et à l'industrie nucléaire.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Physico-chimie des isotopes - éléments et isotopes artificiels - action physico-chimique des radiations - chimie de l'industrie nucléaire - isotopes. Géochimie et cosmogonie 	<p>M. J. Gueron</p>	<p>- d° -</p>	<p>20 leçons 1 seule année avril à juin</p>	<p>- d° -</p>	<p>Certificat de chimie appliquée à la science et à l'industriel nucléaire</p>	<p>- d° - (13 à 15 présences aux cours pour 20 leçons). 100 à 150 élèves environ par an.</p>

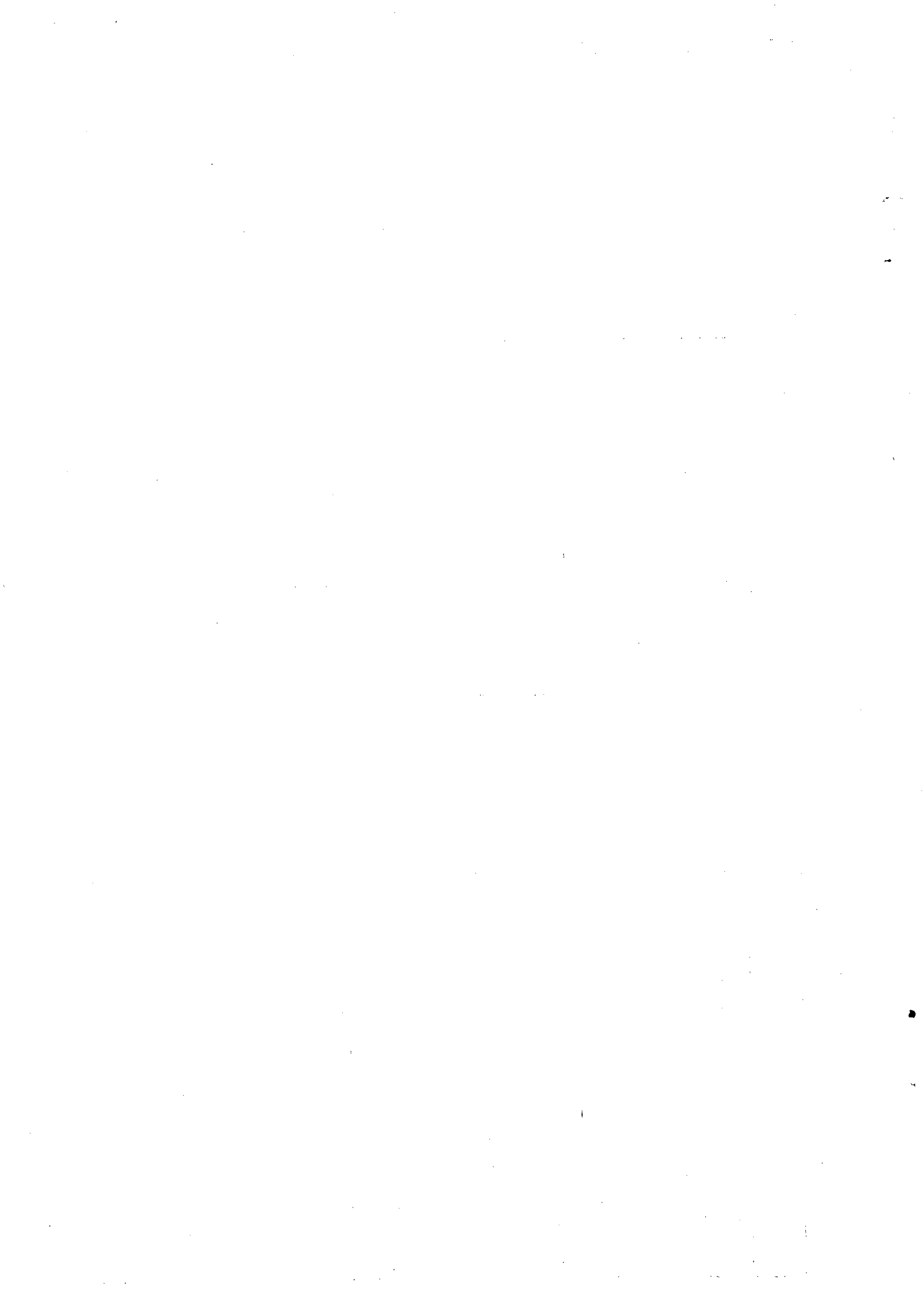


Tableau 11 - ENSEIGNEMENT TECHNIQUE. - Add. au catalogue de l'OECE des cours sur l'Energie Nucléaire (1958) - FRANCE (suite)

Cours	Professeurs	Heures par semaine	Nbre de semestres	Conditions d'admission	Diplômes	Remarques
<p><u>ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS</u> <u>ARTS ET METIERS DE PARIS.</u></p> <p>Conférences sur l'énergie nucléaire données dans le cadre du programme d'enseignement de la 4ème année.</p> <p>7 conférences environ par an</p> <p>Programme de l'année 1957-1958 (+)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Détection des rayonnements (M. Labeyrie) - Les neutrons dans les piles (2 conférences) (M. Tachon) - Contrôle des réacteurs (M. Weill) - Les éléments combustibles dans les piles à neutrons thermiques (M. Gauthron) - Les applications industrielles des radioéléments (M. Lévêque) - Les réacteurs nucléaires (M. Baissas) <p>(+) Le programme 1958-1959 n'est pas encore connu.</p>	<p>Les spécialistes du C.E.A.</p>					

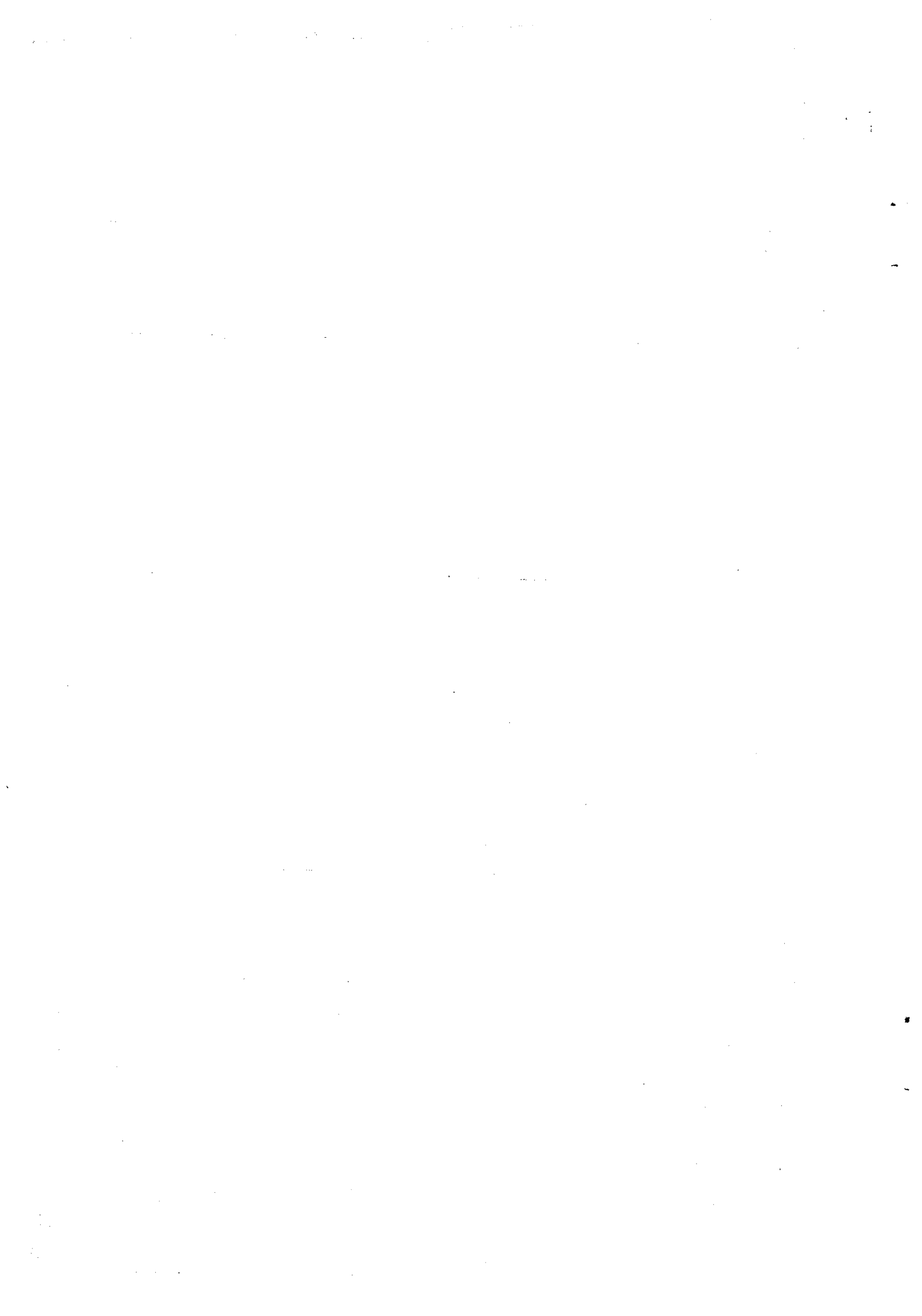


Tableau 11 - ENSEIGNEMENT TECHNIQUE. Add. au catalogue de l'OECE des cours sur l'Energie Nucléaire (1958) - FRANCE (suite)

Cours	Professeurs	Durée des cours	Conditions d'admission	Diplômes	Remarques
<p><u>ECOLE CENTRALE DES ARTS ET MANUFACTURES</u></p> <p>1. Cours de physique générale et de physique des métaux (physique de la matière).</p> <p>50 leçons dont 10 leçons sur :</p> <p><u>Etudes du Noyau de l'Atome</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Rayons positifs - Spectrographie de masse et isotopes - Noyaux - Expériences de déviation des particules α par les noyaux (Rutherford) - Conséquences <p><u>Réactions nucléaires spontanées ou provoquées.</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Généralités. Constituants élémentaires des noyaux - Radioactivité naturelle - Divers types de rayonnements émis, propriétés des rayonnements α, β et γ - Nombre de particules émises - Mise en évidence des trajectoires de particules ionisantes - Mécanisme de la radioactivité - Vie moyenne. Equilibre radioactif. Energie renfermée - Transmutations provoquées donnant des noyaux instables : <ul style="list-style-type: none"> Radioactivité artificielle, Applications - Transmutations provoquées donnant des noyaux stables 	<p>M. Bastien</p>	<p>En 1ère année d'études des 10 leçons + 12 séances de T.P.</p>			

Tableau 11 - ENSEIGNEMENT TECHNIQUE. Add. au catalogue de l'OECE des cours sur l'Energie Nucléaire (1958) - FRANCE (suite)

Cours	Professeurs	Durée des cours	Conditions d'admission	Diplômes	Remarques
<p>-Transmutations par fission : Bombes atomique, Réacteur nucléaire -Réactions thermo-nucléaires Cycle de Bethe</p> <p>2. Cours de Cinématique. 30 leçons dont 2 sur : <u>Etudes de la Cinématique des Populations de Particules.</u></p>	<p>M. Destouches</p>	<p>En 1ère année d'études des 2 leçons</p>			
<p>3. <u>Conférences sur l'Energie Nucléaire (piles)</u></p> <p>-Compléments concernant les réactions par fission : sections de captures, énergies de fission... (ces notions sont destinées à compléter les notions acquises dans le cours de physique). -Les matériaux pouvant servir de combustible. Les ressources mondiales et françaises en uranium. Extraction et traitement des minerais d'uranium. Purification et fusion sous vide de l'uranium. -Les matériaux de structure, possibilité de refroidissement par les métaux liquides. -Tracé, réalisation et exploitation d'une pile de plutonium (type G1 de Marcoule). Le problème des cartouches et de leur gainage.</p>	<p>Conférenciers du C.E.A.</p>	<p>En 1ère année d'études</p>			

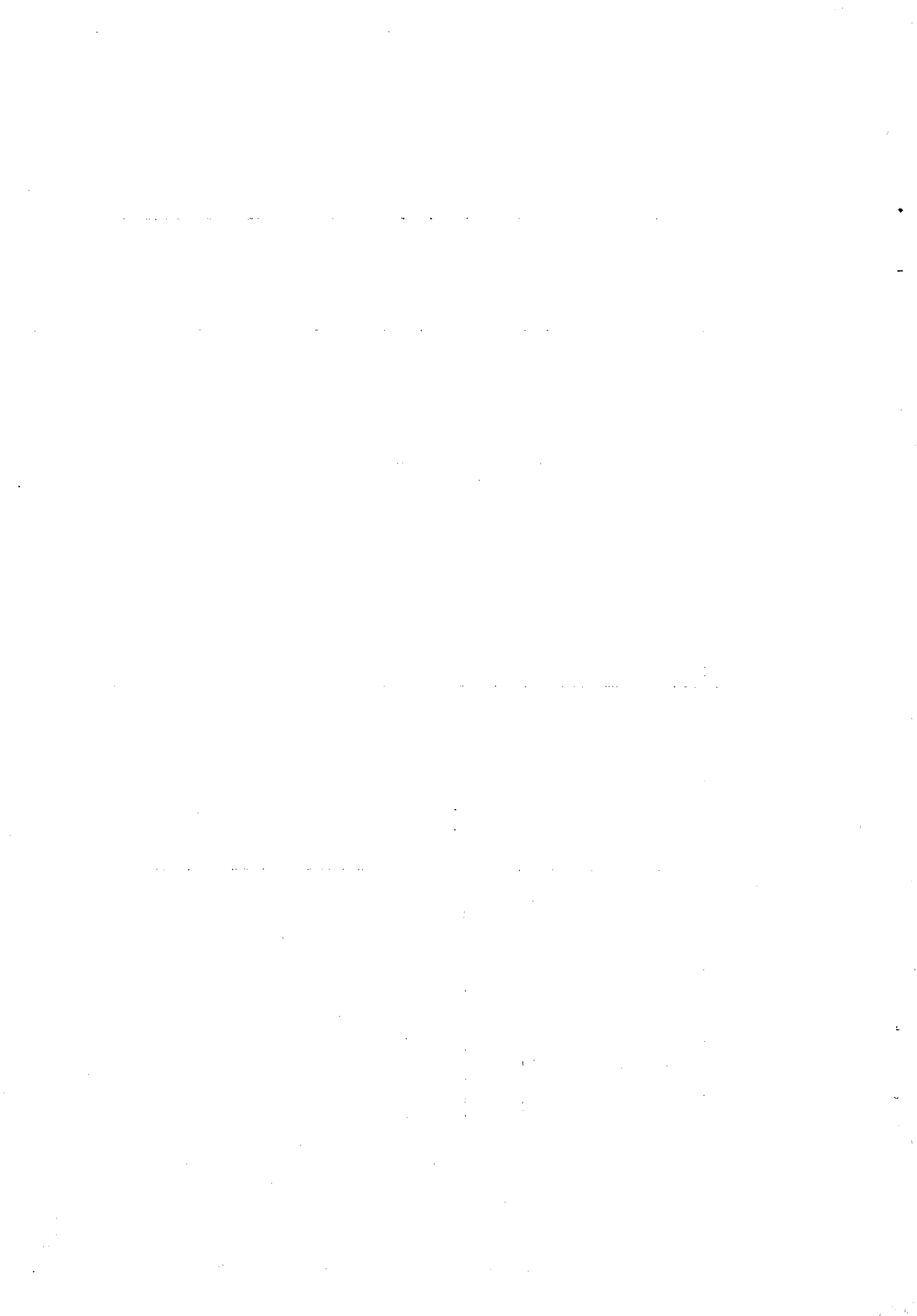


Tableau 11 - ENSEIGNEMENT TECHNIQUE. Add. au catalogue de l'OECE des cours sur l'Energie Nucléaire (1958) - FRANCE (suite)

Cours	Professeurs	Durée des cours	Conditions d'admission	Diplômes	Remarques
<ul style="list-style-type: none"> - Evolution vers des piles à caractères particuliers : réacteurs à combustible enrichi, réacteurs "breeder", réacteurs homogènes. 4. <u>Cours de Chimie générale et minérale</u> 40 leçons dont 5 sur réactions nucléaires et chimie des métaux - Propriétés du noyau de l'atome - Réactions nucléaires - Chimie nucléaire des actinides - Réacteurs à Uranium - Pléiades artificielles - Utilisation des réacteurs radioactifs. 	<p>M. Brusset</p>	<p>En 1ère et 2ème année d'études 5 leçons et 15 séances de T.P.</p>			
<ul style="list-style-type: none"> 5. <u>Cours de Machines thermiques.</u> 40 leçons dont 5 sur l'utilisation de l'énergie thermique des piles - Utilisation de l'énergie thermique que des piles dans les centrales thermiques - Schéma général d'une centrale nucléaire Possibilités diverses - Limitations de température dues à la pile - Organisation du refroidissement de la pile pour l'obtention d'un cycle thermique optimum - Cycle de vapeur des centrales nucléaires - différences avec cycle classique - exemple G1 de Marcoule cycles à plusieurs pressions, etc. 	<p>M. Sedille</p>	<p>En 2ème année d'études 5 leçons et 4 séances de T.P.</p>			

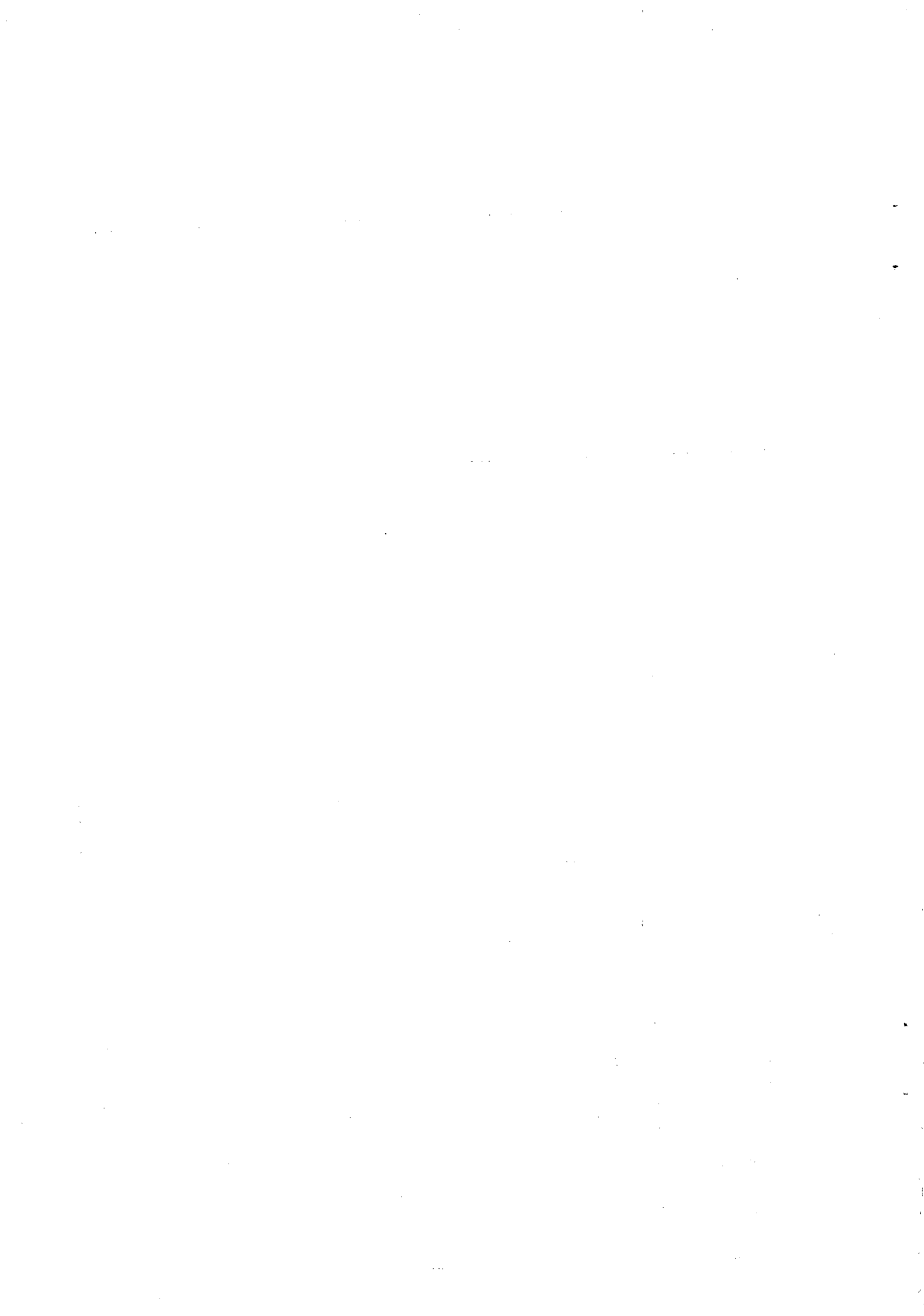


Tableau 11 - ENSEIGNEMENT TECHNIQUE. Add. au catalogue de l'OECE des cours sur l'Energie Nucléaire (1958) - FRANCE (suite)

Cours	Professeurs	Durée des cours	Conditions d'admission	Diplômes	Remarques
<ul style="list-style-type: none"> - Centrales nucléaires et thermiques combinées - Prix de revient de l'énergie nucléaire <p>6. <u>Cours de Métallurgie générale et de Métallurgie des Métaux non ferreux.</u> 26 leçons dont 5 sur les matériaux de structure dans les réacteurs nucléaires, élaboration et propriétés de l'uranium.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Matériaux de structure dans les réacteurs nucléaires - Elaboration et propriétés de l'U. du Pu du Zr et du Be 	<p>M. M. Dangelzer</p>	<p>En 2ème et 3ème année d'études 5 leçons et 3 séances de T.P.</p>			
<p>7. <u>Cours des Applications industrielles de la Chimie minérale.</u> 26 leçons dont 3 sur préparation et purification de l'U</p> <ul style="list-style-type: none"> - Traitement des minerais d'U - Extraction de l'U du minerai en vue de l'obtention d'un concentré 	<p>M. Leger</p>	<p>En 3ème année 3 leçons et 19 séances de T.P.</p>			
<p>8. <u>Cours d'Electronique.</u></p>	<p>M. Jary</p>	<p>En 2ème et 3ème année d'études 30 leçons et 4 séances de T.P.</p>			

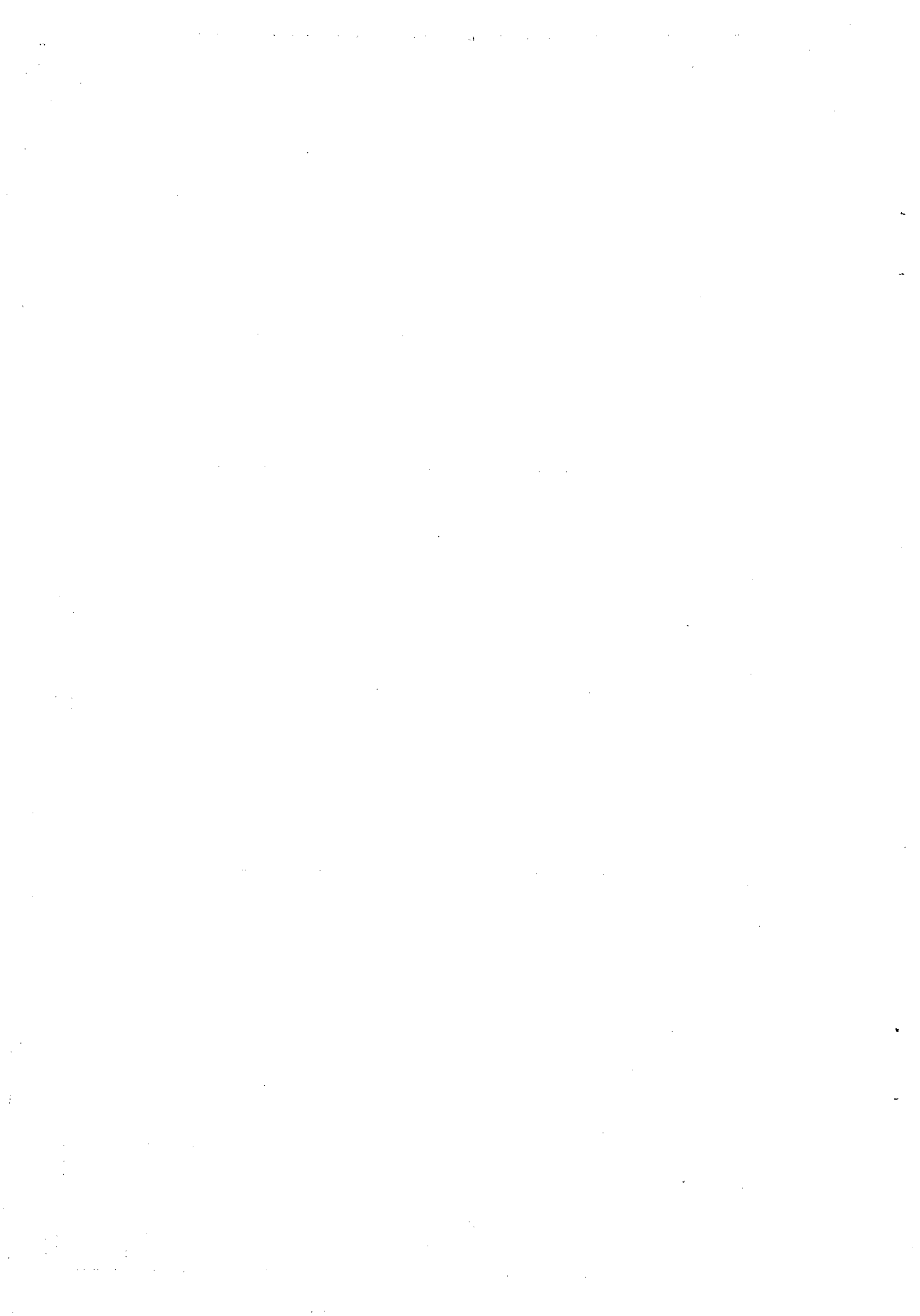
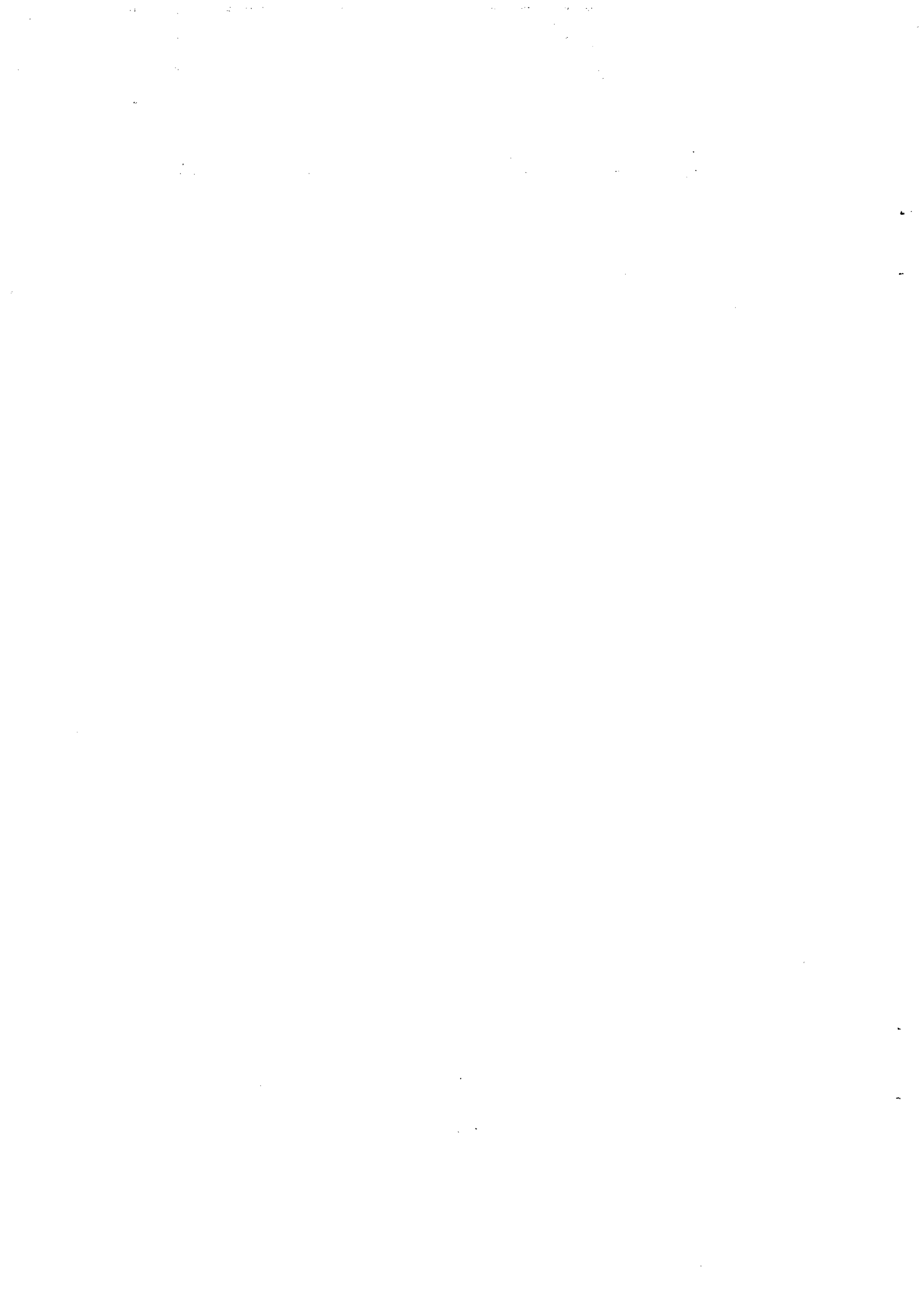


Tableau 11 - ENSEIGNEMENT TECHNIQUE. Add. au catalogue de l'OECE des cours sur l'Energie Nucléaire (1958) - ITALIE (suite)

Cours	Professeurs	Durée des cours	Conditions d'admission	Diplômes	Remarques
<ul style="list-style-type: none">- Montage de circuits électroniques.- Projets et mise au point d'appareils électroniques simples.- Emploi des détecteurs de radiations.- Mesures effectuées au moyen de détecteurs de radiations.					

L'ORGANISATION DE LA RECHERCHE NUCLEAIRE EN ALLEMAGNE.

La description de l'organisation de la recherche nucléaire en Allemagne ne nous a pas été communiquée à ce jour.



B E L G I Q U E

M. de Hemptinne

A. ORGANISATION DE LA RECHERCHE NUCLEAIRE DANS LE PAYS

En Belgique, la recherche dans le domaine nucléaire se fait :

- 1) Dans les Universités et les Grandes Ecoles sous l'égide de l'Institut Interuniversitaire des Sciences Nucléaires (I.I.S.N.) pour ce qui est des recherches fondamentales.
- 2) Au Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire (C.E.N.) pour tout ce qui se rapporte aux réacteurs et aux techniques concomitantes ainsi qu'à la fusion.
- 3) Dans l'industrie pour ce qui intéresse l'activité propre de chaque entreprise. Une collaboration efficiente s'établit entre le C.E.N., l'I.I.S.N. et l'industrie en vue d'éviter les duplications inutiles dans les programmes de travail.

L'I.I.S.N., géré par le Fonds National de la Recherche Scientifique (F.N.R.S.), subsidie et coordonne dans une certaine mesure la recherche de base faite dans les Universités, l'Ecole Royale Militaire et la Faculté Polytechnique de Mons. Les Recteurs des Institutions intéressées siègent au Conseil d'Administration dont font également partie le Commissaire à l'énergie atomique, le Directeur du C.E.N., un représentant de l'industrie, le Président et le Vice-Président de la Commission Scientifique de l'I.I.S.N. (organe uniquement consultatif pour les questions scientifiques) et enfin le Directeur du F.N.R.S. qui préside le Collège. Le budget total pour 1957 a été de l'ordre de 57.000.000 F. Pour 1958, il s'élève à 59.363.567 F; de cette somme, 39.088.270 F seront consacrés à la recherche dans le domaine de la physique et de la chimie nucléaire, dont 15.383.000 F pour l'achat de matériel et 23.705.270 F pour le personnel scientifique et technique; 10.325.297 F seront consacrés à la radiobiologie, dont 2.225.000 F pour l'achat de matériel et 8.100.297 F pour le personnel scientifique et technique. Le personnel dépend directement de l'I.I.S.N. mais accepte de se soumettre à la discipline de l'institution où il travaille. Les projets de recherche sont soumis à la Commission Scientifique qui propose au Conseil l'adoption d'un budget de subvention annuel.

Le C.E.N. est un établissement d'utilité publique. Le Conseil d'Administration, présidé par le Commissaire à l'énergie atomique, est formé de représentants de l'Etat, de l'industrie, des Universités et Fondations scientifiques. Les budgets doivent être approuvés indépendamment par les représentants de chacun des trois secteurs (*).

Des Commissions Scientifiques et Techniques siégeant périodiquement ont pour mission d'associer les Universités et les principales industries aux travaux de recherche du C.E.N. Le C.E.N. a ses bureaux à Bruxelles et ses laboratoires de recherche à Mol.

La plupart des industries intéressées au développement de l'énergie nucléaire se sont groupées en une association professionnelle : le Groupement Professionnel de l'Industrie Nucléaire dont émane une fondation qui participe pour compte des industriels au financement du C.E.N.

Une commission pour l'étude des applications de l'énergie nucléaire vient d'être créée au Congo belge (son siège est à Léopoldville); le budget pour 1958 est de 3.000.000 F; il sera majoré au fur et à mesure du développement des études.

B. DESCRIPTIONS DES GRANDS EQUIPEMENTS ET LEURS CARACTERISTIQUES

PRINCIPALES

a) I.I.S.N.

Le matériel et l'équipement installés par l'I.I.S.N. dans les Universités et les Ecoles Supérieures se composent de :

- un cyclotron pour deutons 13 MeV;
- un accélérateur van de Graaff pour électrons 1,8 MeV;
- un générateur van de Graaff pour protons et deutérons à 2 MeV;
- deux accélérateurs Cockcroft Walton pour deutons ou protons 1,4 MeV et 0,7 MeV;
- un générateur à H.T., courant de poussière, 1 MeV équipé d'un tube d'accélération et d'un analyseur électrostatique;
- un accélérateur linéaire pour électrons 4 MeV;
- un accélérateur Greinacker 1,2 MeV.

(*) Le budget total de 1957 était de 609.000.000 F, en 1958 il se monte à 875.000.000 F dont 192.000.000 F pour l'exploitation et 683.000.000 F pour les investissements.

Les Universités sont parfaitement équipées en spectrographes beta de tous types et en appareils électroniques pour les travaux de spectroscopie nucléaire qui constituent une partie importante de l'activité des Centres Universitaires. Signalons l'existence de plusieurs laboratoires particulièrement bien montés pour la préparation, le développement et l'analyse des plaques nucléaires. Bien que ces laboratoires soient principalement orientés vers l'étude des particules de hautes énergies, ils prêtent souvent leur concours à l'étude de problèmes de basses énergies, analyse de protons de reculs, etc... Signalons aussi que des recherches de décharges dans les gaz préliminaires à l'étude de la fusion se font dans une des Universités du pays; une commission spéciale pour l'étude de la fusion a été créée afin d'éviter des doubles emplois coûteux au cours des développements des recherches dans ce domaine.

b) C.E.N.

Le C.E.N. constitue le principal centre de recherches nucléaires. Au 31 mai 1958, le personnel atteignait un effectif de 804 membres répartis de la façon suivante :

- universitaires : 121
- ingénieurs techniciens et techniciens de rang supérieur : 189
- techniciens qualifiés : 241
- employés et services généraux d'exploitation : 253

Le C.E.N. comprend huit complexes réservés aux diverses disciplines (chimie, électronique, etc...) :

- 1) le hall du réacteur de recherche avec annexes, laboratoires directement liés à la marche du réacteur;
- 2) le laboratoire de physique;
- 3) le laboratoire d'électronique, contrôle des radiations et service médical;
- 4) le laboratoire de chimie;
- 5) le laboratoire de métallurgie;
- 6) le bâtiment réservé aux études théoriques;
- 7) le laboratoire de technologie;
- 8) les installations de traitement des résidus.

1) Hall du réacteur

Le réacteur est logé au centre d'un grand hall de 30 m de large, 40 m de long et 25 m de haut. C'est un réacteur de recherche de type hétérogène. Le combustible est de l'uranium naturel gainé par une feuille d'aluminium. Le modérateur est constitué par du graphite. Sa puissance nominale est de 4 MW, à la puissance de 2,5 MW, le flux au centre est de 10^{12} n/cm²/sec. A ce flux thermique correspond un flux rapide de $1,23 \cdot 10^{12}$ n/cm²/sec. Le réacteur comporte une centaine de canaux expérimentaux répartis sur ses diverses faces.

Une aile du hall abrite un groupe de laboratoires nécessaires à l'étude et à la préparation des radioisotopes et l'élaboration de molécules marquées (niveau d'activité 1 curie).

Une autre aile contient un groupe de laboratoires spécialisés en vue d'expériences où la radioactivité sera nulle et relative à la technique du réacteur.

Le département "Physique du Neutron" installé dans ce même bâtiment utilise les faisceaux de neutrons sortant du réacteur à la détermination de certaines constantes physiques fondamentales.

Un bâtiment accolé au hall du réacteur possède des installations pour le stockage à sec ou sous eau du combustible sortant du réacteur ainsi qu'une cellule blindée avec toutes les facilités permettant l'étude du combustible irradié.

2) Bâtiment "Physique"

Il comprend deux sections : celle de l'étude de l'état solide et celle de la physique radioactive.

Certaines techniques y sont développées afin d'aider d'autres départements, notamment la microscopie électronique, la spectrographie de masse, la diffraction des rayons X.

3) Bâtiment "Electronique", "Contrôle radiations" et "Service Médical"

Le département "Electronique" a la charge du contrôle et de l'entretien de tout appareillage électronique utilisé, ainsi que l'étude de la construction de prototypes.

Le service "Contrôle Radiations" comporte une section "Personnel" chargée de relever les doses absorbées par les travailleurs et une section "Site" qui suit les variations de la radioactivité naturelle dans les alentours.

4) Bâtiment de "Chimie"

Il comprend deux ailes :

- une aile dite chaude équipée pour les travaux sur la matière radioactive. Les laboratoires sont munis de hottes blindées et de boîtes gantées;
- une aile dite froide et qui comprend trois sections : la chimie non active, la chimie des traceurs et la chimie analytique.

5) Bâtiment de "Métallurgie"

Il comporte l'appareillage nécessaire à l'obtention d'uranium nucléairement pur, de certains alliages du métal, ainsi qu'à l'étude des métaux utilisés dans les réacteurs.

6) Bâtiment des études théoriques

Il comprend actuellement des bureaux équipés des moyens de calcul usuels mais sera doté sous peu d'une machine à calculer digitale Ferranti Mercury MK 106 et d'une machine analogique en collaboration avec les services de l'U.L.B.

7) Laboratoire de technologie

Un laboratoire de technologie est spécialement destiné à des études thermodynamiques et des expériences exponentielles.

8) Installation de traitement de résidus

Les installations permettent le traitement des résidus liquides avant évacuation à la rivière et comportent quelques laboratoires de recherche .

Installations en cours de construction

A ces laboratoires existants, il faut ajouter ceux qui sont en construction et dont les achèvements s'échelonnent entre les années 1958 et 1960.

1 - Un réacteur à haut flux :

Un réacteur à haut flux de neutrons pour essais de matériaux et des laboratoires connexes : il s'agit d'un réacteur à uranium hautement enrichi modéré à l'eau et au ber lithium et refroidi à l'eau. Ce réacteur d'un dessin original aura une puissance nominale calorifique de 50 MW à laquelle correspondront un flux thermique de $6,2 \cdot 10^{14}$ n/cm²/sec. et un flux rapide de $2,4 \cdot 10^{15}$ n/cm²/sec., réacteur chargé d'expérience (mise en service prévue : décembre 1959).

2 - Un réacteur prototype générateur d'énergie :

Un réacteur prototype de production d'énergie électrique d'une puissance de 11,500 kW et des services auxiliaires : il s'agit d'un réacteur du type eau sous pression à uranium faiblement enrichi (mise en service prévue : printemps 1960).

3 - Le laboratoire de radioisotopes et de molécules marquées (le service fonctionne depuis 1956 mais le bâtiment spécial sera achevé fin 1959).

- 4 - Le laboratoire de chimie et métallurgie du plutonium; les recherches ont commencé en 1958; la construction d'un bâtiment spécial est prévue pour 1959.
- 5 - Des laboratoires de radiobiologie et radioagronomie; les recherches entreprises dès 1957 seront poursuivies dans des bâtiments et terrains aménagés en 1959.

C. CONSISTANCE DU PROGRAMME DE RECHERCHE NATIONAL

a) Description

Une description détaillée des recherches dépasse le cadre de ce rapport : on ne peut guère qu'énumérer les principaux secteurs auxquels les chercheurs se sont attachés.

Physique

Dans les centres dépendant de l'I.I.S.N., la recherche nucléaire proprement dite est axée principalement sur la spectroscopie nucléaire. Notons en outre quelques recherches sur la détermination des sections efficaces des neutrons rapides, des recherches sur l'état solide, sur les décharges dans les gaz en vue des études de fusion, sur la résonance nucléaire magnétique, la détermination des moments quadripolaires par absorption des micro-ondes et enfin des recherches sur les rayons cosmiques.

Au C.E.N., l'étude de l'état solide et de l'action des rayonnements sur la matière, d'une part, la physique des neutrons, d'autre part, forment les préoccupations majeures des physiciens.

Chimie

Des recherches sur la concentration des minerais d'uranium, la fabrication du métal nucléairement pur et la métallurgie sont au centre des travaux effectués dans les divers laboratoires.

De plus, dans les centres dépendant de l'I.I.S.N. on s'occupe de la séparation des produits de fission, de l'analyse par activation, de l'action chimique des radiations (cette dernière en collaboration avec l'industrie), de la formation d'ions produits par réactions nucléaires.

Au C.E.N., les études chimiques portent sur les techniques d'enrichissement isotopique, les traceurs, la chimie analytique, le retraitement des combustibles irradiés et la préparation des radioisotopes.

Métallurgie

A l'I.I.S.N., la métallurgie est axée sur les connaissances de base des métaux spéciaux tandis qu'au C.E.N., elle porte sur la fabrication des éléments de combustible.

Electronique

Au C.E.N., on s'intéresse à la mise au point d'appareils de mesure et d'équipements de contrôle.

Technologie

Au C.E.N., la technologie générale de conception et l'exploitation des réacteurs constituent un département très important.

Radiobiologie

Les radiobiologistes sont extrêmement actifs dans chacune des quatre Universités du pays. Un centre commun de recherches est en voie de réalisation à Mol; il disposera d'un réacteur, d'une source puissante de rayons gamma et de tout l'équipement nécessaire pour les recherches en radiobiologie et agronomie.

Recherches industrielles

Les industries qui semblent les plus actives dans le domaine de la recherche nucléaire sont celles qui s'intéressent à la production d'éléments de combustible nucléaire, à la vente des radioisotopes et la production des substances marquées, à l'élaboration de projets de réacteurs. Les métallurgistes, en particulier ceux qui construisent les cloches pour réacteurs, les industries électroniques qui ont déjà acquis une expérience dans la construction d'appareils de mesure et système de contrôle développent aussi leur programme de recherches. Les recherches sur les plasmas ont toujours été en honneur aux Ateliers de Constructions Electriques de Charleroi (A.C.E.C.) ce qui les met en bonne place pour l'étude de la fusion.

Des recherches dans le domaine du traitement des eaux résiduaires sont également poussées.

Signalons aussi l'existence de certains laboratoires fort bien équipés, spécialisés dans la recherche pour compte de tiers.

Quant aux isotopes, leur utilisation se généralise tant dans les laboratoires universitaires qu'industriels pour des fins de recherches scientifiques, médicales, industrielles et agronomiques. Leur production régulière dans le réacteur BR 1 contribue à ce développement.

b) Philosophie des recherches

1. Recherches de base

Les sommes à consacrer à la recherche étant limitées, les responsables se sont préoccupés d'éviter, dans toute la mesure du possible, les doubles emplois inutiles, la dispersion des efforts et des hommes. Les Centres Universitaires ont été équipés d'accélérateurs le plus souvent de types différents, adaptés à des buts différents; ils forment une des pièces maîtresses des laboratoires universitaires. Le Centre de Mol, disposant d'un et bientôt de plusieurs réacteurs, se consacre plus particulièrement aux recherches de base nécessitant la proximité d'une source puissante de neutrons.

2. Recherches à caractère industriel

Une partie importante de l'activité du C.E.N. a été et est encore consacrée à la construction des réacteurs BR 1, BR 2 et BR 3. La politique adoptée pour la construction a été de profiter des accords existant entre la Belgique et les Anglo-Américains pour obtenir de l'étranger les conseils et les matières indispensables à la construction des réacteurs, de participer au maximum à l'élaboration des plans et aux essais préliminaires, enfin de confier la réalisation, dans toute la mesure du possible, à des industries belges. La liste des industries ayant pris part à la construction des réacteurs belges montre combien la collaboration entre Centre et industries a été intime et fructueuse.

B.E.N.	études BR 2
SOFINA	études BR 2
TRACTION	études BR 3
VINCOTTE	contrôle cuve BR 2
A.C.E.C.	commande et contrôle BR 1 - BR 2
SOVETRAUX	installation du Waste
AUXELTRA	construction du blindage BR 1
S.G.M.H.	préparation de l'uranium
F.N.	éléments de combustible
PHYSIQUE INDUSTRIELLE	compteurs spéciaux + échelles compt.
M.B.L.E.	machines à poussières
COCKERILL	équipement de contrôle BR 2
Ateliers LA MEUSE	plant container BR 1 - BR 2
LEBRUN	cuve BR 2
FABRICOM	beam ports
TOLERIES GANTOISES	tuyauteries et chaudronnerie BR 2
H.M.S.	revêtement de canal BR 2
	élévateur BR 1
	pont roulant polaire BR 2
Tubes MEUSE	équipements divers
A.C.M.T.	équipements divers
FORAKI	équipements divers

N.B.L.E.	spectrographes pour analyses chimiques des pailles appareil à poussières
O.I.P.	détecteur de radioactivité de l'air pinces-manchons-machoirs de mani- pulation de substances radioactives
GEVAERT	plaques à émulsion spéciale
BALTEAU	radiographie industrielle
VEHI	conteneurs de substances radioactives
LIPS	coffre-fort pour substances radioac- tives
VIEILLE MONTAGNE	blindage en plomb - en cadmium
OVERPOLT-LOHIEL	blindage en plomb
PROTECTION INDUSTRIELLE	vêtements de protection - gants
PREVOYANCE INDUSTRIELLE	vêtements de protection - gants
ETALBO	boîtes Pu

Ainsi les installations de Mol sont un véritable banc d'essais pour l'industrie.

Le réacteur BR 1 a joué et joue encore un rôle éducatif; il est en même temps un instrument de recherche et de production d'isotopes.

Le réacteur BR 2 servira aux essais des matériaux; il sera à la disposition de toute industrie qui en fera la demande. Les physiciens espèrent grâce à ce réacteur pouvoir disposer bientôt de flux de neutrons intenses et de radioéléments de forte densité de radiation; ils espèrent aussi pouvoir étudier les problèmes de corrosion dans des conditions favorables.

Le réacteur BR 3 permettra aux ingénieurs d'acquérir une expérience pratique unique par l'utilisation d'un réacteur prototype de puissance.

Comme l'indique le rapport de l'O.E.C.E., l'enseignement spécialisé dans les sciences nucléaires est dispensé dans les diverses Universités aux étudiants qui le désirent. Le C.E.N. organise des stages et conférences destinés à compléter la formation reçue dans les Universités. En outre, les Universités de Liège et de Louvain organisent périodiquement des semaines de formation destinées plus spécialement aux usagers des radioisotopes.

*
* *

F R A N C E

ORGANISATION DE LA RECHERCHE NUCLEAIRE DANS LE PAYS.

En France, la recherche dans le domaine nucléaire est confiée depuis octobre 1945 à un organisme public rattaché à la Présidence du Conseil : le Commissariat à l'Energie Atomique (C.E.A.). Cet organisme a créé trois centres de recherches :

- 1°- le Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay (C.E.N. - S)
- 2°- le Centre d'Etudes Nucléaires de Fontenay-aux-Roses (C.E.N. - FAR)
- 3°- le Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble (C.E.N. - G).

Ces Centres sont en plein développement.

Mais le C.E.A. ne travaille pas seul. Il entend au contraire associer le plus largement possible à son oeuvre les Universités et les Entreprises Industrielles qualifiées. Dans ce but, il a déjà conclu avec elles de nombreux contrats de recherches et il poursuivra cette politique.

Au 1er janvier 1958, le CEA employait dans ses Centres de Recherches 3 800 agents, dont 1 000 cadres, sur un total de 9 000 agents. Les dépenses engagées au cours de l'année 1957, au titre de la recherche, se répartissent ainsi :

- Investissements : 29 milliards de francs.
- Fonctionnement : 7,2 milliards de francs.

sur un total de 60,9 milliards de francs. Enfin le C.E.A. a conclu ou renouvelé en 1957, avec les Laboratoires de l'Université, des grandes Ecoles et de l'Industrie, 149 contrats d'études et de recherches, d'un montant total de 1 760 millions de francs.

./..

I - LES GRANDS APPAREILS (SITUATION AU 1er JANVIER 1958)A) SACLAY.a) Les accélérateurs de particules.

- 1 Van de Graaff de 5 MeV
- 1 Van de Graaff de 2 MeV
- Cyclotron

Il fournissait un faisceau de protons de 25 MeV, ou de deutons, ou de particules α . On pouvait dès lors extraire du cyclotron le faisceau d'ions accélérés jusque là utilisé pour bombarder des cibles incluses dans la chambre d'accélération.

- Le Synchrotron à protons "SATURNE" de 3 GeV et un accélérateur linéaire de 28 MeV étaient en cours d'installation.

b) Les réacteurs.

- EL2 : réacteur à uranium naturel modéré à l'eau lourde, réflecteur en graphite. C'est le premier réacteur au monde qui soit refroidi par une circulation de gaz (CO₂) comprimé.
- EL3 : réacteur à uranium faiblement enrichi, modéré et refroidi à l'eau lourde et fournissant un flux neutronique élevé : 10^4 neutrons/cm²/s au centre. Il commença au cours de l'année 1958 à jouer son rôle d'instrument de recherche.
- Aguillon : assemblage critique modéré à l'eau lourde et utilisé pour l'étude des différentes géométries possibles de réseaux, et, en général, les expériences de neutronique.
- Proserpine : premier réacteur homogène expérimental en France. La substance fissile utilisée est le plutonium sous forme de sulfate en solution dans l'eau ordinaire qui sert de ralentisseur. Le réflecteur est en glucine doublée de graphite. Ce réacteur était alors au stade des premiers essais et a divergé au cours de l'année 1958.

./..

B) FONTENAY-AUX-ROSES.

- ZOE : premier réacteur français. Initialement, il s'agissait d'un réacteur de puissance nulle, utilisant comme combustible l'oxyde d'uranium. Ce combustible est maintenant de l'uranium. La puissance est montée à 150 KW. Zoé sert surtout à la fabrication de radioéléments.

C) GRENOBLE.

- Ce Centre, dont les travaux de construction ont commencé en octobre 1956, ne disposait alors que de 2 accélérateurs. Ils fournissent, sous une tension de 600 KV, l'un des ions, l'autre des électrons.

II - LA FORMATION DE CHERCHEURS.

Dès sa création, le Commissariat à l'Energie Atomique s'est attaché à mettre au point, en liaison avec l'Université, un enseignement des sciences et techniques nucléaires. Ces activités d'enseignement s'exercent principalement à Saclay au sein de l'Institut National des Sciences et Etudes Nucléaires (I.N.S.T.N.) créé le 18 juin 1956. En plus des cours de Génie Atomique, destinés à former des ingénieurs spécialisés dans les techniques de construction et le fonctionnement des réacteurs nucléaires, l'I.N.S.T.N. dispense des cours dits " de 3ème cycle " qui préparent aux doctorats de spécialités, délivrés par les Facultés des Sciences des Universités :

- Cours de Métallurgie Spéciale
- Cours de Radiobiologie
- Cours de Théorie et Technique des Accélérateurs de Particules
- Cours de Thermique et Mécanique des fluides dans les réacteurs nucléaires.

./..

Les études s'étendent sur 2 années. La première est consacrée à des cours théoriques, des travaux pratiques, des stages dans les laboratoires du CEA, des Universités, du CNRS ou de l'industrie privée. A la fin de la première année, les études sont sanctionnées, en cas de succès, par un Certificat d'Etudes Supérieures. Ces certificats sont délivrés par l'INSTN et sont admis, en vue de l'obtention d'un doctorat de 3ème cycle en équivalence avec ceux délivrés par les Facultés.

La seconde année est essentiellement consacrée à un travail de recherche personnelle qui constituera la thèse de doctorat de 3ème cycle. Le sujet de recherches est choisi en accord avec l'un des professeurs. Il fait l'objet de discussions au fur et à mesure de son développement. En outre, les élèves continuent à participer dans la mesure du possible aux séminaires et aux conférences spécialisées, organisées au CEN de Saclay. Vers la fin de la seconde année d'études, le jury formule une appréciation sur le travail effectué par l'étudiant et sur les résultats obtenus. Si cette appréciation est satisfaisante, le candidat soutient sa thèse de 3ème cycle et obtient alors le titre de "Docteur du 3ème cycle" dans la spécialité choisie.

Les cours sont également ouverts à un nombre limité d'auditeurs libres qui ne participent pas aux travaux pratiques et ne sont pas autorisés à se présenter à l'examen.

III - PROGRAMME FUTUR.

En 1957, les objectifs fixés par le premier plan quinquennal atomique français ont été atteints et la réalisation d'un second plan (1957 - 1961) a été entreprise. Ce second plan prévoit, dans le domaine de la recherche, d'importants travaux d'équipement dans les trois centres déjà existants, la création d'un quatrième centre, la construction et l'étude de quelques prototypes de réacteurs susceptibles de produire de l'énergie dans des conditions techniques et économiques voisines de celles d'une production industrielle normale.

./..

A) CENTRE DE SACLAY:

a) Accélérateurs.

- Cyclotron : réalisation d'une source d'ions multicharges (U, O, C 5 ou 6 fois ionisés) à grande intensité.
- Synchrotron à protons " SATURNE " et accélérateur linéaire : mise au point définitive et construction de chambres à bulles à propane et hydrogène liquide (en fonctionnement depuis 1958).

b) Réacteurs.

- EL 3 : Essais sous rayonnement de matériaux nucléaires entrant dans la construction des piles de puissance.
- Projet EL 4 : Ce sera une pile de puissance, modérée à l'eau lourde et refroidie par du gaz carbonique sous pression. On pense atteindre des taux d'irradiation élevés : 10.000 MW/j/T, une température de l'ordre de 500° et un rendement net de 33 %.

B) CENTRE DE FONTENAY-AUX-ROSES :

a) Réacteurs.

- Construction du réacteur Minerve, de puissance nulle, pour la mesure des absorptions neutroniques (entré en fonctionnement en 1959).
- Construction de Triton, pile piscine, de 1200 kW destinée à l'étude des protections de réacteurs (entrée en fonctionnement en 1959).

b) Fusion thermonucléaire.

- Des études préliminaires ont permis de dégager quelques directions de recherches et des dispositifs expérimentaux sont en cours de montage.

./..

C) CENTRE DE GRENOBLE :

- Construction d'accélérateurs nouveaux.
- Construction d'une pile piscine de 1200 kW :
Mélusine (entrée en fonctionnement en 1959)

D) CONSTRUCTION D'UN QUATRIÈME CENTRE DE RECHERCHES.

Là seront édifiés deux réacteurs prototypes, de technique audacieuse et pleins de promesses :

- a) Pile à haute température
- b) RAPSODIE : Pile à neutrons rapides, utilisant comme combustible le plutonium et refroidie au sodium fondu. Ce réacteur constituera une étape essentielle vers les réacteurs surrégénérateurs.

Dans les domaines de la physique et de la chimie nucléaires, à côté du Commissariat à l'Energie Atomique, diverses institutions publiques rattachées à l'Université ou dépendant du Centre National de la Recherche Scientifique, ou autonomes, effectuent de nombreux travaux. Certaines d'entre elles disposent d'importants moyens de recherches. A Paris ou dans la région parisienne, citons notamment : le Collège de France (équipé d'un cyclotron), l'Institut du Radium, l'Ecole Normale Supérieure, l'Ecole Polytechnique, le Laboratoire de Synthèse Atomique du Centre National de la Recherche Scientifique disposant d'un béta-tron. Les laboratoires d'Orsay de la Faculté des Sciences de Paris (équipés d'un synchro-cyclotron de 150 MeV), à Orsay également, les laboratoires de l'Ecole Normale Supérieure équipés d'un accélérateur linéaire d'électrons (de 250 MeV en 1958 qui sera porté par tranches successives à 2 GeV).

Par ailleurs, citons les Instituts de Recherches Nucléaires d'Alger, de Lyon, de Nancy, de Strasbourg. Il faut encore faire état des relations étroites existant entre le Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble déjà cité et la Faculté des Sciences de cette ville.

L'ORGANISATION DE LA RECHERCHE NUCLEAIRE EN ITALIE

D. Palumbo

Dans le domaine des recherches et des réalisations concernant les applications pacifiques de l'énergie nucléaire, l'Italie aurait dû jouer un rôle de premier plan, non seulement en raison de sa tradition scientifique (il suffit à ce propos de citer le nom de Enrico Fermi), mais encore en raison de ses besoins en énergie. En fait, comme l'indique le rapport des "Trois Sages" intitulé "Un objectif pour l'Euratom", l'Italie est, parmi les nations de la Communauté, celle dont les disponibilités énergétiques sont les plus faibles par habitant et dont les importations de matières premières énergétiques sont proportionnellement les plus importantes (exception faite du Luxembourg).

Notre intention ici n'est pas d'analyser les raisons pour lesquelles le développement de la recherche et les réalisations effectives sont restés en retard sur les besoins et probablement sur les possibilités. Le facteur financier a certainement exercé un effet négatif important.

Notons simplement qu'au cours des dernières années, des secteurs publics et privés importants ont pris des initiatives et ont élaboré et mis en oeuvre des programmes dont le sérieux inspire toute confiance dans le développement ultérieur de ces activités.

A - ORGANISATION DE LA RECHERCHE EN ITALIE

1. Organisations d'Etat

Les organisations créées plus ou moins directement sur l'initiative de l'Etat ont été successivement :

- a) l'Institut National de Physique Nucléaire (I.N.F.N.)
- b) le Comité National pour les Recherches Nucléaires (C.N.R.N.)

L'I.N.F.N. a été créé en 1951 sur l'initiative du C.N.R. (Conseil National de la Recherche), et le C.N.R.N. est né en 1952 à l'initiative du Gouvernement. Le premier est orienté principalement vers la recherche fondamentale; le second, dont les attributions sont plus larges, se consacre surtout aux applications pratiques.

L'I.N.F.N. a été officiellement institué par décret 599 du Président du C.N.R. le 8 août 1951 et réorganisé, sur la base d'un financement adéquat, par décret 635 du Président du C.N.R. en date du 9 juillet 1952. L'I.N.F.N. a pour tâches :

- 1) d'entreprendre les études, recherches et expérimentations dans le domaine de la physique nucléaire en favorisant et en réalisant la coordination des initiatives existantes et de celles qui sont susceptibles d'être prises dans le domaine des études et des recherches,
- 2) de maintenir les rapports et de développer la collaboration avec les organisations internationales et les organismes étrangers consacrés à la recherche nucléaire.

L'Institut est composé de sections et de sous-sections. Les différentes sections ont leur siège respectif auprès de l'Institut de Physique de chacune des universités suivantes : Rome, Padoue, Milan, Turin, Bologne, Pise. Il faut considérer séparément la Section des Accélérateurs, section spéciale créée pour la construction du synchrotron national et des laboratoires annexes, ayant son siège à Frascati (Rome) qui, vers le milieu de l'année dernière, a été transformée en "Laboratoires Nationaux du Synchrotron de l'I.N.F.N."

Les différentes sous-sections ont leur siège respectif auprès des Instituts de Physique des Universités de Florence, Gênes et de Trieste, de l'Institut Polytechnique de Milan, de l'Institut de Physique Théorique de Naples, et enfin de l'Institut Supérieur de Sanità (Rome). La distinction qui est faite entre Sections et sous-Sections, encore qu'elle ne soit pas très nette, se fonde, en dehors de la structure administrative, sur le nombre des professeurs et chercheurs, sur l'importance de la production scientifique, sur les moyens de recherches et sur la nature des ressources économiques.

L'activité de l'I.N.F.N. concerne essentiellement la physique des rayons cosmiques et des particules élémentaires.

L'I.N.F.N. est dirigé par un conseil directeur formé du Président et des directeurs de section titulaires d'une chaire d'université.

De la date de sa création jusqu'au début de 1957, l'I.N.F.N. a pu fonctionner grâce aux contributions financières du C.N.R. et du C.N.R.N. Depuis le 1er janvier 1957, à la suite de la décision n° 834 du Président du C.N.R., il est placé sous l'autorité du C.N.R.N. qui en assure l'administration. Le C.N.R.N. est intervenu dans le budget de 1956/1957 pour la somme de 187 millions de lires (0,3 MUEP), dans l'exercice actuel pour 660 millions de lires (1M,UEP). Pour les financements antérieurs, voir le tableau 1.

L'effectif de l'I.N.F.N. compte plus de 250 physiciens.

Tableau 1

EVOLUTION BUDGETAIRE DU CNRN/INFN (en millions de lires)

Exercice	Somme affectée	dont à l'I.N.F.N.
1952-53	350	250
1953-54	310	310
1954-55 *	1780	230
1955-56	1200	200
1956-57	3300	passe sous l'autorité du CNRN
1957-58 **	3240	
1958-59	12500	

* plus de 800 millions versés par différents organismes pour le synchrotron de Frascati

** depuis le 1er janvier 1957, l'I.N.F.N. fait partie du C.N.R.N.

Le C.N.R.N. a été institué le 26 juin 1952 par décret du Président du Conseil en accord avec le Ministre de l'Industrie et du Commerce et le Ministre de l'Instruction Publique afin d'assurer les études et recherches relatives à l'énergie nucléaire et à ses applications industrielles; le C.N.R.N. a pour mission :

- 1) d'entreprendre des études, recherches et expérimentations dans le domaine de la physique nucléaire; de promouvoir la coordination des initiatives susceptibles d'être prises dans le domaine des études et recherches, et éventuellement de mettre en oeuvre une telle coordination dans le cadre de la législation en vigueur;
- 2) de promouvoir et d'encourager le développement des applications industrielles de l'énergie nucléaire;
- 3) de maintenir les rapports et de développer la coopération avec les organisations internationales et avec les organismes étrangers travaillant dans le domaine des études nucléaires.

Les membres du C.N.R.N. sont nommés pour trois ans, avec possibilité de renouvellement. Le Président du C.N.R.N. adresse au Président du Conseil des Ministres, au Ministre de l'Industrie et du Commerce et au Ministre de l'Instruction Publique, un rapport annuel sur l'activité du C.N.R.N.

dans les domaines scientifique, technique, expérimental, dans celui des applications pratiques et sur le travail des laboratoires et instituts dépendant du Comité ou dont les activités sont coordonnées par ce dernier.

Pour la première période triennale, le Comité était constitué comme suit : MM. Giordani, Panetti, Ferretti, Silvestri-Amari, Ippolito, Amaldi, Medi, Angelini, De Biasi.

Pour la période triennale de 1956 à 1959, le Comité était composé de : MM. Focaccia, Angelini, Amaldi, Caglioti, Carrelli, Castelli, Ferretti, Ippolito, Medi, Silvestri-Amari (ce dernier démissionnaire, étant remplacé par M. Giorgi).

Le Comité comprend les Divisions suivantes : biologie, questions géominières, développement des réacteurs. Il comprend, en outre, un Centre électronique et un Groupe d'études des gaz ionisés. Il est assisté de Commissions d'études concernant respectivement les questions juridiques et économiques, les matériaux des réacteurs, la préparation du personnel, la protection sanitaire et l'implantation des réacteurs. Un projet de loi, actuellement à l'étude, modifiera sensiblement l'organisation des recherches relatives à l'énergie nucléaire; par ailleurs, on projette la création, auprès du Ministère de l'Industrie et du Commerce, d'un Conseil National de l'Energie Nucléaire (C.N.E.N.) dont l'activité englobera les points suivants :

- 1) études et recherches dans le domaine nucléaire et plus particulièrement les applications civiles;
- 2) surveillance scientifique et technique des activités connexes de l'emploi des matières premières et matériaux radioactifs, ainsi que de la production de l'énergie nucléaire;
- 3) service de consultation pour les Administrations d'Etat et collaboration avec les organisations internationales et les organisations étrangères de même type.

Les directives générales seront arrêtées par un Comité comprenant le Président du Conseil de Ministre et les Ministres des Affaires Etrangères, de l'Intérieur, du Trésor, de la Défense, des Travaux Publics, de l'Industrie et du Commerce ainsi que le Ministre des "Participations d'Etats". Le C.N.E.N. sera dirigé par un Conseil placé sous la présidence du Ministre de l'Industrie et du Commerce et composé de 12 conseillers et d'un secrétaire général désignés pour quatre ans par différents Ministères et organismes d'Etat. D'autres organes sont prévus pour le contrôle de la gestion, etc...

On prévoit une contribution de l'Etat s'élevant à 50 milliards de lires (20M.U.E.P.) pour un ensemble de cinq exercices budgétaires, ces chiffres étant répartis de la manière suivante : 1957-58 3,24 milliards (5,2M.U.E.P.); 58-59 12,5 milliards (20M.U.E.P.); 59-60 10 milliards (16M.U.E.P.); 60-61 10 milliards (16M.U.E.P.); 61-62 14,26 milliards (22,8M.U.E.P.). Le C.N.E.N. aura à sa charge, à partir de l'exercice 1958-59, les dépenses pour la participation de l'Italie au C.E.R.N. et à l'Agence Internationale de l'Energie Atomique. L'entrée en activité du C.N.E.N. mettra fin à l'activité du C.N.R.N. dont le patrimoine lui reviendra d'office. De son côté, l'I.N.F.N. passera sous l'autorité du C.N.E.N. à charge pour celui-ci d'en assurer le financement.

Devant le caractère d'urgence des besoins financiers du C.N.R.N., le Parlement, dans l'impossibilité d'approuver rapidement l'ensemble du texte législatif, a approuvé au cours de la dernière législature, une partie concernant le financement du C.N.R.N. pour les deux premières années du plan quinquennal. Pour le budget des cinq dernières années, voir le Tableau I. Pour l'évolution des effectifs, voir le Tableau 2.

Tableau 2

REPARTITION DES EFFECTIFS DU COMITE NATIONAL DE LA RECHERCHE NUCLEAIRE

Personnel	52/53	53/54	54/55	55/56	56/57	57/58
<u>Fonctionnaires et experts</u>						
Physiciens	I	I	2	5	8	20
Géologues		I	2	3	7	15
Ingénieurs des Mines			I	I	I	2
Chimistes					5	11
Naturalistes				2	3	7
Ingénieurs					3	15
Administrateurs					3	5
<u>Employés</u>						
Secrétaires	2	2	4	6	19	32
Comptables			2	5	20	37
Agents techniques				4	26	54
<u>Agents</u>		I	I	4	17	38
TOTAL	3	5	12	30	112	236

Toujours dans le domaine étatique, il convient de mentionner les Instituts Scientifiques des Universités et Ecoles Polytechniques qui entrent pour une part importante dans le développement de la recherche et sur qui pèse toute la charge de l'enseignement supérieur scientifique et technique. Un certain nombre d'entre eux, par exemple l'Institut Polytechnique de Milan et l'Université de Pise, ont pris des initiatives marquantes dans le domaine particulier des applications de l'énergie nucléaire, le premier par la création d'un Centre d'Etudes Nucléaires E. Fermi, le second par sa participation à la création du Centre pour les Applications Militaires de l'énergie nucléaire (C.A.M.-E.N.).

Le C.A.M.E.N., qui doit être cité parmi les organisations de caractère national, est né de l'initiative conjointe de l'Académie Navale (militaire) de Livourne et de l'Université de Pise.

Il est sans doute difficile de distinguer nettement entre l'activité des instituts universitaires et celle des autres organisations nationales et en particulier du C.N.R.N. qui, bien qu'agissant par l'intermédiaire de l'I.N.F.N., coordonne et finance, tout au moins en partie, les activités de recherches. Pour le reste, le financement de ces instituts est à la charge du budget des Universités et Ecoles dont ils font partie et bénéficie des contributions du Ministère de l'Instruction Publique et éventuellement d'entreprises industrielles privées ou de particuliers.

Mentionnons également le C.N.R. qui est la première en date des institutions italiennes ayant pour objet l'organisation de la recherche fondamentale et appliquée.

Le Centre Sicilien de Physique Nucléaire (C.S.F.N.) a été créé en 1955 auprès de l'Université de Catane dans un but didactique et de recherche; par la suite, ce centre a sollicité l'intervention du Gouvernement provincial (la Sicile étant dotée d'un statut autonome au sein de la République Italienne). Ledit gouvernement, par la loi régionale du 5/8/1957, a créé le Comité Régional de Recherches Nucléaires (C.R.R.N.) pour le développement et la coordination des recherches de physique nucléaire théorique et appliquée sur le territoire de la Sicile. Le C.R.R.N. dispose d'un crédit annuel de cent millions (0,16 M.UEP), le crédit initial ayant été de 250 millions (0,4 M.UEP). Notons que ces sommes viennent en supplément des contributions financières que les organisations nationales doivent verser à la Sicile en tant que partie intégrante de l'Italie.

2. Organisations mixtes

Le Centre des Informations, Etudes et Expériences (C.I.-S.E.) est né en 1946 de l'initiative conjointe du Professeur Bol-la et d'un petit groupe de Physiciens et d'Ingénieurs, sans oublier l'action de M. De Biasi, Ingénieur de la Société Edison; dès le début, ce Centre s'est donné pour tâche le développement en Italie de la Physique Nucléaire Appliquée.

Cette initiative n'a pas manqué d'attirer l'attention des plus importantes sociétés industrielles du pays, lesquelles, dès le premier jour, en ont assuré le financement.

Le Conseil d'Administration du C.I.S.E. est composé des représentants des organismes d'Etat et des différentes sociétés intervenant dans le financement. Il est secondé par un Comité scientifique qui supervise les activités de recherches.

Le C.I.S.E. est doté des laboratoires suivants :

Physique nucléaire	Physique des corps solides
Génie atomique	Electronique
Chimie et radio-chimie	Métallurgie
Technologie spéciale	Techniques expérimentales

Il comprend également un bureau à fonction technique et une importante bibliothèque où l'on trouve notamment le catalogue de l'U.S.A.E.C.

Au cours des dix premières années d'existence, le C.I.-S.E. a utilisé des crédits dépassant au total I milliard de lires (I,6M.UEP) à raison de 50 millions en moyenne par an au cours de la première période quinquennale et de 100 millions par an dans les années suivantes. En 1957 il a utilisé des crédits d'un montant légèrement inférieur au demi milliard (0,8 M.UEP). Il prévoit pour 1958 un budget du même ordre de grandeur.

D'après un inventaire récent, la valeur des appareils actuellement en service atteint un montant de près de 500 millions de lires (0,8M.UEP).

L'évolution des effectifs est reproduite au tableau 3.

Tableau 3

REPARTITION DES EFFECTIFS DU C.I.S.E. DE 1946 A 1958

I946	8	I953	57
I947	8	I954	62
I948	I3	I955	66
I949	22	I956	III
I950	27	I957	II4
I95I	3I	I958	I27
I952	40		

Au cours des II années prises en considération, 25 universitaires ont obtenu leur diplôme auprès du C.I.S.E., 80 chercheurs y ont travaillé, 5 autres ont obtenu un poste de chargé de cours et 3 une chaire universitaire.

Le transfert du centre vers un siège plus important est actuellement à l'étude. A cet effet, le C.I.S.E. a procédé à l'acquisition d'environ 4 hectares de terrain à proximité de l'emplacement du réacteur du centre Enrico Fermi actuellement en construction. On prévoit, dans un premier temps, la construction d'un groupe de huit immeubles couvrant une superficie de 5.400 m², l'immeuble central devant abriter les bureaux, la bibliothèque, les services de rédaction de la revue "Energie Nucléaire", publiée par le C.I.S.E. et les services directs et généraux. Les sept autres édifices indépendants les uns des autres, mais groupés, abritent les laboratoires en question.

Au début de 1957 a été créé l'Agip Nucleare, société financière appartenant au groupe E.N.I. (Organisme National des Hydrocarbures), au capital de 500 millions (0,8M.UEP) et ayant pour siège Milan. L'Agip Nucleare a repris de l'Agip Mineraria la participation de celle-ci à la SOMIREN (Société des Matières Radioactives et de l'Energie Nucléaire) qui, jusqu'à la fin de 1955, s'occupait de la recherche et de l'extraction des minerais uranifères. L'activité de recherche de l'Agip Nucleare est confiée à des Groupes d'étude et de recherche, notamment à des laboratoires inaugurés par la Société au début de 1958. On distingue les groupes suivants :

Physique Expérimentale appliquée	Calcul des réacteurs
Physico-chimie	Physique sanitaire
Echanges de chaleur	Electronique et contrôles

Les effectifs comprennent environ 80 techniciens et titulaires de doctorat. Monsieur l'Ingénieur Martinoli en est l'Administrateur-Délégué et Directeur-Général.

Ces groupes de recherche bénéficient, par ailleurs, du conseil et des informations techniques de la société britannique N.P.P.C. (Nuclear Power Plant Co) dans le cadre d'un accord de représentation et de consultation réciproque qui prévoit, par ailleurs, l'échange de techniciens et d'experts.

Sur le plan des réalisations industrielles (construction de centrales nucléaires) l'Agip Nucleare relève de la S.I.M.E.A. (Société Italienne Méridionale pour l'Energie Atomique) dont elle détient 75 % des actions, l'I.R.I. détenant le reste.

3. Organisations de l'industrie privée

a) En 1957, la FIAT (Fabrique Italienne d'Automobiles de Turin) et la MONTECATINI ont constitué à parts égales le S.O.R.I.N. (Société de Recherches pour les Installations Nucléaires) dont le capital initial de 100 millions (0,16M.UEP) a été élevé par la suite à 1 milliard de lires (1,6M.UEP).

Ont été nommés Directeurs les Ingénieurs Cesoni et Orsoni. La société compte agir, pour son compte propre et pour le compte de tiers, dans le domaine de la recherche nucléaire, scientifique et technique, et dans celui de la construction et de l'exploitation des installations nucléaires industrielles.

Le personnel de la SORIN a travaillé et travaille encore à la mise au point du centre de recherches qui est actuellement en construction à Saluggia (Vercelli, Piemont) et qui sera doté d'un réacteur de recherches (type piscine, puissance maxima de 5 MW) et de laboratoires annexes. La SORIN est dotée des laboratoires suivants :

- Laboratoire de Chimie chaud
- Laboratoire de Radio-Chimie
- Laboratoire de Physique des Corps solides
- Laboratoire Electronique

- b) En dehors de son activité dans le cadre de la SORIN la FIAT a créé à Turin, pour son compte propre, une Section de l'Energie Nucléaire qui dispose de laboratoires en relation avec ceux de Saluggia mais sans lien de dépendance. Les effectifs de ces laboratoires qui comptent d'ores et déjà 40 titulaires de doctorat et 10 ouvriers spécialisés, ne cessent d'augmenter. La Section est dirigée par l'Ingénieur Cesoni.
- c) Dans le cadre de ses différentes activités, en matière nucléaire, la MONTECATINI met actuellement sur pied une organisation coordonnée et toute prête, le moment venu, à fournir un important travail. Dans chaque secteur, la direction oriente l'activité des groupes vers l'étude des problèmes nucléaires, crée des bureaux annexes, encourage les initiatives expérimentales, notamment à l'échelle semi-industrielle, sans cesser par ailleurs de faire participer le personnel à l'activité purement productive pour lui éviter de perdre le contact avec les réalités industrielles.

La même Société agit par l'intermédiaire des sociétés ou Instituts dépendant d'elle, tels que l'Institut Expérimental des Métaux Légers qui, en même temps qu'il utilise des techniques nucléaires pour l'étude des alliages légers, poursuit des recherches sur l'alliage aluminium-uranium. Les effectifs de l'Institut comptent 25 titulaires de doctorat, 13 techniciens diplômés, 45 techniciens, 40 administrateurs, le nombre de personnes occupées aux recherches nucléaires n'étant pas précisé.

- d) L'Institut de Recherches BREDA (Milan) qui agissant pour le compte de tiers, est principalement orienté vers la recherche scientifique et technique sur le double plan métallurgique et mécanique, a créé récemment un laboratoire radio-

isotopique. Les sommes investies jusqu'ici sont de l'ordre de 20 millions; le laboratoire est outillé pour des recherches radioactives de l'ordre de 1 curie au maximum. Il fait lui-même partie d'un ensemble de laboratoires bien équipés pour le traitement des minerais et pour la métallurgie, qui emploient un effectif de 15 titulaires de doctorat, 26 techniciens de laboratoires et un personnel administratif et subalterne.

- e) Le groupe Magneti Marelli qui dispose de larges possibilités de recherches technico-scientifiques et de réalisations industrielles, est bien équipé pour toute étude et réalisation dans le domaine électronique et de toutes ses applications. Il a étudié également les différentes parties des grands accélérateurs.
- f) L'ANSALDO (Gênes), société industrielle spécialisée dans la construction des navires, centrales thermiques, chaudières et turbo-alternateurs, a constitué plusieurs groupes d'ingénieurs pour l'étude des problèmes nucléaires, de manière à les préparer à participer à la construction des centrales électro-nucléaires, tant pour la partie classique que pour la partie proprement nucléaire. Par ailleurs, elle fait usage de radio-isotopes pour ses propres laboratoires.

L'ANSALDO St.GIORGIO, également de Gênes, a construit des électro-aimants pour accélérateurs.

- g) Il existe également en Italie différentes sociétés qui, comme la SENN, la SELNI, la SIEBA déjà mentionnée, se proposent de construire et d'exploiter des centrales nucléaires. Mais, en général, ces sociétés tout au moins en ce qui concerne la recherche et le choix du type de réacteur, s'assurent le conseil d'une ou de plusieurs des organisations déjà citées.

B - DESCRIPTION DES CENTRES IMPORTANTS ET DE LEUR EQUIPEMENT

CARACTERISTIQUES

I. Accélérateurs

a) Laboratoires Nationaux du Synchrotron de Frascati : le centre le plus important de l'INFM est celui de Frascati, dont l'appareillage consiste essentiellement en un électro-synchrotron d'une énergie totale de 1 Gev au moins.

L'ensemble des bâtiments comprend le bâtiment abritant l'accélérateur, les laboratoires électronique et technologique, le laboratoire cryogénétique, l'atelier et différents édifices abritant des services de recherches ainsi que l'Administration et les Services.

Le synchrotron a été projeté et construit en Italie, l'électro-aimant étant fourni par l'Ansaldo S.Giorgio de Gênes et la boîte d'accélération par les Laboratoires de cette dernière à Frascati; l'injecteur a été projeté par l'Institut Supérieur de Santé qui en a également financé la construction.

L'aimant présente la disposition race-track avec quatre tracés rectilignes de 100,6 cm chacun, connectés à quatre cadrans magnétiques d'un rayon moyen de 360 cm. Le champ magnétique maximum est de 9260 Gauss. L'entrefer a une hauteur de 8,6 cm et une largeur de 22,7 cm. L'excitation est sinusoïdale à 20 périodes. L'injecteur est du type Cockroft-Walton 2 MV, 200 mA, et la durée de chaque impulsion est de quelques micro-secondes; il existe deux cavités pour l'accélération. L'alimentation de l'aimant exige un peu plus de 800 kW, les cavités exigent respectivement 2 kW et 60 kW. Le fer de l'aimant atteint un poids d'environ 100 t et le cuivre 10 t.

Le laboratoire cryogénétique dispose de liquéfacteurs d'hydrogène et d'hélium. La production d'hydrogène liquide permettra de couvrir les besoins du Centre de Frascati et de faire certaines livraisons aux autres instituts et laboratoires italiens.

L'état d'avancement de la construction permet de prévoir l'achèvement du synchrotron pour la fin de cette année.

Dans un proche avenir, le centre sera probablement doté d'un réacteur. En ce qui concerne l'évolution des effectifs, il suffit de se reporter au Tableau IV.

b) En dehors de ce synchrotron, on relève l'existence en Italie des différents accélérateurs qui suivent :

L'Institut de Physique de l'Université de Turin dispose bientôt d'un électro-synchrotron de 100 meV construit par la société Brown-Boveri (Baden). Un bétatron de 31 MeV fonctionne actuellement dans le même Institut de Physique et il est utilisé pour des recherches de photoproduction. En fait, il est la propriété de la Brown-Boveri qui l'a cédé à titre de prêt en attendant l'achèvement du synchrotron. Il est probable que ce bétatron restera définitivement à Turin.

Tableau 4

EVOLUTION DES EFFECTIFS DES LABORATOIRES NATIONAUX
DU SYNCHROTRON DE FRASCATI

PERSOINNEL	53/54	54/55	55/56	56/57	57/58
Physiciens	3	5	6	15	16
Ingénieurs	3	4	4	5	5
Mécaniciens		7	15	26	45
Radiomonteurs		1	4	5	13
Dessinateurs					2
Agents techniques					8
Personnel administratif	3	3	4	8	10
Agents			2	2	16
TOTAL	9	20	35	61	115

Le Centre sicilien de physique nucléaire de Cattane dispose d'un Van de Graaff 2 MeV pour l'accélération des ions positifs qui provient de la H.V.E.C. de Burlington. Caractéristiques : courant ionique maximum (protons) : 0,05 mA; tension maxima : $2 \text{ MV} \pm 20 \text{ kV}$; déflexion magnétique des ions accélérés pour l'analyse (et la stabilisation) énergétique des particules accélérées. Il va de soi que l'accélérateur est complété par un système de détection (compteurs à parois de mica, à scintillations) et de comptage (échelle de démultiplication et circuit de comptage électronique au microseconde.)

Il dispose, en outre, d'un liquéfacteur d'air fourni par la Thermodyn (5 l/h); d'un analyseur à 4 voies pour la mesure simultanée de la radioactivité de 4 échantillons pour l'étude de la section efficace de capture des neutrons; de plusieurs microscopes binoculaires dont un à diffusion, sans parler de l'équipement pour la technique des émulsions nucléaires.

L'Institut de physique de l'Université de Trieste dispose d'un accélérateur de deutons de 200 kV pour la production de neutrons, appartenant au type Cockroft-Walton à cloche sous

pression. L'intensité prévue du faisceau ionique est de 2 mA avec une stabilisation poussée de la tension et de l'énergie.

L'Institut de physique de l'Université de Bologne est doté d'un accélérateur Cockroft-Walton de 150 kV dont le poste de haute fréquence peut engendrer un courant ionique d'environ 7 mA. Le programme prévoit la construction d'une source ionique de très haute intensité, soit 100 mA, pour l'étude approfondie des petites sections de capture des éléments légers à des niveaux très bas d'énergie (100 keV).

L'Université supérieure de Santé dispose d'un accélérateur Cockroft-Walton de 1,1 MV.

L'Institut de Sciences physiques de l'Université de Milan a construit un accélérateur d'ions positifs de 160 kV utilisable comme source de neutrons; l'intensité maxima prévue est de $2 \cdot 10^9$ n/s.

L'Institut de physique expérimentale de l'Université de Pavie a construit un accélérateur électrostatique à 4 stades Cockroft-Walton d'une tension maxima de 560 kV et d'un courant ionique maximum de 0,4 mA.

L'Institut de physique de l'Université de Gênes prépare actuellement la réalisation d'un accélérateur de protons et neutrons de 200 à 450 kV et d'une puissance de 3 kW qui sera utilisé pour la production de neutrons et de rayons gamma à partir du lithium.

Le CISE dispose d'un accélérateur Cockroft-Walton de 400 kV et d'un courant ionique (deutons) de 0,5 mA et a commencé la construction d'un accélérateur Van de Graaff de 3 MV et d'un courant ionique de 0,5 mA. Il dispose en outre d'un analyseur d'impulsions à 100 canaux, d'un spectrographe pour la mesure de l'énergie des protons et d'un chronotron (modèle Gatti) pour la mesure des temps de l'ordre de 10^{-9} s.

L'Institut de physique de l'Université de Bari construit actuellement un accélérateur de 250 kV.

L'Institut de physique de l'Université de Rome sera doté à brève échéance d'un accélérateur à impulsions d'environ 200 kV.

Enfin, le Laboratoire de Recherches des Etablissements Pirelli de Milan-Bicocca a été doté d'un accélérateur Van de Graaff ayant une tension réglable de 0,75 à 2 MV et un courant maximum de 0,25 mA. Il est utilisé pour l'accélération d'électrons, mais l'adjonction d'un petit nombre de pièces accessoires permettrait de le convertir en accélérateur à ions positifs. En ce qui concerne les deux bêtatrons de 15 MeV, et un autre de 31 MeV (voir la page 267)

2. Réacteurs de Recherches et d'Enseignement

L'Italie ne possède pas à l'heure actuelle de réacteurs critiques; mais un certain nombre de réacteurs entreront en activité dans les prochains mois.

a) Réacteur et Centre d'Ispira: Réacteur - Le Réacteur Ispira I est du type C P -+ modifié d'après le réacteur qui fonctionne actuellement à l'Argonne Laboratory. Il a été projeté par l'A.C.F. avec la collaboration de techniciens italiens et a été construit par cette même société. Il utilise de l'uranium enrichi à 20%, est modéré et refroidi à l'eau lourde, et dispose d'une puissance thermique de 5 MW. La date de criticité prévue se place en mars 1959. La masse critique pour le réacteur à froid est de 1,160 kg d'uranium 235; à pleine puissance, sans empoisonnement et les canaux expérimentaux étant vides, la masse critique est de 1,460 kg d'U 235. A pleine puissance, en tenant compte de l'empoisonnement et les canaux expérimentaux étant chargés, la masse critique est de 1,980 kg. Il contient 19 éléments de combustible en alliage uranium-aluminium du type ITR avec 16 plaques actives à gainage d'aluminium.

Le flux thermique maximum est de 20 W/cm² ; le taux de consommation moyen est de 10%. Le modérateur est constitué par 300 kg d'eau lourde dont la température maxima est de 295 l.; le réflecteur est constitué par 2.000 kg. d'eau lourde avec une épaisseur radiale de 22 cm et une épaisseur axiale de 60 cm; extérieurement, par 23 tonnes de graphite en blocs. La réactivité extra maxima $\Delta k/k$ varie entre 0,11 et 0,05 selon le niveau de puissance et selon la charge des cavités expérimentales; le coefficient de température à pleine puissance, en l'absence d'empoisonnement et les cavités expérimentales étant vides, est de $-37.10^{-5} \Delta k/k.8C$. Il ne peut devenir positif en aucune condition de fonctionnement.

Le réglage fin s'effectue à l'aide d'une barre cylindrique de cadmium d'une longueur de 70 cm et d'un diamètre de 5,44 cm à commande automatique ou manuelle, qui contrôle une réactivité de 0,004 $\Delta k/k$; la sensibilité du contrôle automatique est de 0,1% de la puissance maxima.

Le contrôle d'arrêt et de sécurité est effectué à l'aide de 6 barres cylindriques de cadmium de dimensions égales à la précédente, à commande automatique et manuelle, qui permet de contrôler 0,042 $\Delta k/k$ par barre avec un taux de réactivité négatif de 0,5 $\Delta k/k.s$.

L'écran thermique est constitué par un cylindre creux de 35 tonnes de fer et de plomb sous une épaisseur de 14 cm; l'écran biologique est constitué par 650 tonnes de béton (4,5 gr/cm³) sous une épaisseur de 180 cm.

A la puissance thermique de 5 MW, le coeur développe 17 MW/m³ et 2,52 MW/kg d'uranium 235.

Le circuit primaire de refroidissement utilise un courant d'eau lourde sous un flux de 120 kg/s., la température variant entre 41 et 51°C. Le circuit secondaire utilise l'eau légère. Les flux neutroniques ont été calculés à l'aide d'une théorie à deux groupes et à régions multiples (un groupe thermique et un groupe rapide du seuil thermique à l'énergie de fission); on a obtenu les résultats suivants :

flux thermique moyen	6,6.10 ¹³ n/cm ² .s
flux thermique maximum	8,85.10 ¹³ n/cm ² .s
flux rapide maximum	10,6.10 ¹³ n/cm ² .s
flux rapide à la surface interne du réflecteur de graphite	0,553.10 ¹³ n/cm ² .s

Le réacteur est enfermé dans un cylindre en tôle d'acier de 8 mm imperméable aux gaz d'un diamètre de 26,90 m et d'un volume de 12.000 m³, capable de supporter une surpression de 700 mm d'eau. Dans les conditions normales de travail il aura une "dépression" de 25 mm. d'eau.

Le réacteur est doté de plus de 20 canaux expérimentaux (sans compter ceux qui sont destinés aux instruments de mesure) dont un certain nombre peuvent être utilisés comme canaux d'irradiation et pour lesquels est prévue l'installation d'un sélecteur de neutrons rapides. Les canaux expérimentaux ont un diamètre de 30 cm et une longueur de plusieurs mètres. Les flux thermiques maximum sont de l'ordre de plusieurs fois 10¹³, les flux rapides étant un peu moindres. En outre, un puits vertical peut remplacer l'élément central du combustible (diamètre 15 cm) et le flux thermique maximum y est de 8,6.10¹³ n/cm² s, le flux rapide 6,6.10¹³ n/cm² s (Ces différents flux ont été calculés selon les modalités précédemment indiquées.)

Le réacteur est doté en outre d'une colonne thermique qui se prolonge vers la face externe du réflecteur de graphite. Elle est constituée par un réseau rectangulaire de graphite de 1,60 x 1,60 m, séparé du réflecteur par une section d'aluminium imperméable aux gaz, et pourvue de volets de fermeture en bore ou en plomb et de différentes portes, de manière à réaliser les plus grandes facilités expérimentales.

Le colonne thermique est susceptible d'être utilisée pour les expériences relatives aux écrans de protection, pour les expériences exponentielles, les faisceaux de neutrons, et les essais et expérimentations technologiques.

Les Etats-Unis sont intervenus dans les dépenses relatives au réacteur pour 0,35 million d'unités USD.

Laboratoires d'Ispra : Tout autour du réacteur, on construit actuellement un Centre qui couvrira environ 130 ha et qui est situé à une distance moyenne de 1,5 km de la rive orientale du lac Majeur. Ce Centre qui abritera la Direction, les bureaux administratifs, les logements, les services généraux et les magasins sera complété par la construction de différents laboratoires relatifs aux disciplines suivantes : physique sanitaire et hygiène industrielle, génie atomique, technologie, isotopes radioactifs, physique des corps solides, métallurgie, questions géo-minières, physique nucléaire et théorique, électronique et instrumentation nucléaire et biologie. Un terrain spécial est prévu pour l'expérimentation agricole.

b) Centre des Etudes Nucléaires Enrico FERMI - Le Centre des Etudes Nucléaires Enrico FERMI de l'Institut polytechnique de Milan installe actuellement un réacteur L 54 de 50 kW fourni par l'Atomics International.

Le combustible est constitué par une solution de sulfate d'uranyle enrichi à 20% d'uranium 235 dans de l'eau naturelle et contiendra environ 1600 gr d'uranium 235. Cette solution est placée dans un récipient sphérique de 40 cm de diamètre, traversé par un tube horizontal pour l'exposition et de 4 tubes verticaux pour le guidage des barres de contrôle. Des dispositifs spéciaux sont prévus pour le trop plein de la solution et pour le traitement des gaz (H₂O et produits gazeux résultant de la fission) expulsés du récipient principal du coeur. Un réservoir situé sous le réacteur communique par des conduits et des soupapes avec le coeur et les services extérieurs. La solution combustible peut être transvasée du réservoir au coeur et vice-versa à partir de commandes extérieures. Le circuit primaire, constitué par des serpentins immergés dans le coeur, utilise un courant d'eau légère distillée (57 l/m), et il est conçu de manière à ce que la température de la solution combustible ne dépasse jamais 80°C à pleine puissance. Le circuit secondaire utilise de l'eau légère.

Le réflecteur qui se présente sous la forme d'un bloc prismatique de 150x210x150 cm³, est constitué par des blocs de graphite de pureté nucléaire d'une densité allant de 1,6 à 1,7 g/cm³.

Le réflecteur est enfermé dans un caisson d'aluminium ouvert sur deux côtés et traversé par des canaux expérimentaux. L'écran biologique est constitué principalement par du béton de 3,7 g/cm³. Il est posé sur deux faces et sur la partie supérieure du caisson à l'exception d'une section utilisée pour la colonne thermique verticale; les autres deux côtés, utilisés comme colonne thermique, sont protégés par des éléments mobiles en béton, partiellement commandés par moteur. Du côté de la colonne thermique, le coeur est entouré d'écrans de bismuth et de plomb destinés à réduire le flux, tout en permettant l'accès du réacteur éteint; à la partie inférieure,

la protection est assurée par du béton qui entoure la chambre d'exposition, la chambre des soupapes, etc... Il s'y adjoint un écran de paraffine et de bore. Les dispositifs expérimentaux comprennent :

- 3 tubes horizontaux de 10 cm de diamètre pour l'extraction des neutrons;
- 4 tubes verticaux de 10 cm de diamètre pour l'extraction des neutrons;
- 3 tubes horizontaux de 8 cm de diamètre pour l'extraction des neutrons;
- 1 tube pneumatique droit de 5 cm de diamètre;
- 1 tube pneumatique courbe de 4 cm de diamètre;
- 1 tube permettant d'exposer des matériaux au centre du coeur de 4 cm de diamètre;
- 1 colonne thermique horizontale de section carrée de 150 cm de côté et haute de 160 cm;
- 2 portes d'accès à la colonne thermique de 15 cm de diamètre;
- 2 portes d'accès à la colonne thermique de section carrée de 15 cm de large;
- 1 colonne thermique verticale de 137 cm de diamètre à sa partie supérieure.

Des canaux sont aménagés au-dessous du réacteur pour l'utilisation de l'activité gamma des produits gazeux de fission.

Il est doté de 4 barres de contrôle verticales, chacune contrôlant 1,8 % de la réactivité. Chaque barre est constituée par un tube d'acier inoxydable contenant des cylindres de carbure de bore de 16 mm de diamètre. Les barres sont commandées par des moteurs électriques connexés à des électroaimants, de manière à assurer la chute libre en cas de fonctionnement défectueux. Le surplus de réactivité à 20°C est de 3 %. Le coefficient de température est de $-0,031 \text{ \%}/^\circ\text{C}$.

Le flux thermique au centre du coeur est supérieur à $10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$; à l'extérieur de l'écran de bismuth, le flux atteint $5 \cdot 10^{11}$ et sur la face extérieure de la colonne thermique horizontale il est de $5 \cdot 10^9$. Le flux rapide (0,5 MeV) au centre du coeur atteint $2 \cdot 10^{12}$; à l'extérieur de l'écran de bismuth, il est de $3,5 \cdot 10^9$. L'écran biologique réduit le niveau des radiations à moins de 1 mr/h.

Comme le réacteur se trouve situé en pleine ville de Milan (bien que dans un quartier périphérique), un soin particulier a été apporté à l'étude des mesures et appareils de sécurité. On a tout particulièrement étudié les circuits de distribution de l'eau, la situation des puits et les conditions météorologiques du lieu.

L'édifice abritant le réacteur est imperméable aux gaz et comporte de nombreuses portes spécialement étudiées à cet effet. Il est maintenu à une sous-pression de 4 mm de mercure (Hg).

Le Centre sera équipé de laboratoires "chauds" du type classique et toutes les précautions seront prises en ce qui concerne la physique sanitaire.

La date de la criticalité prévue pour le réacteur se place au mois de mars 1959.

c) Comité Sicilien - la Faculté des Arts et Métiers de l'Université de Palerme sera prochainement équipée d'un petit réacteur AGN 20I.

Le coeur de réacteur contient 665 gr d'uranium 235 enrichi à 20 %. Sous la forme d'UO₂, il est dispersé d'une manière homogène dans une masse de 11 kg constituant un cylindre de 26 cm de diamètre et de 24 cm de hauteur. Le modérateur est évidemment constitué par du polyéthylène. Le réflecteur en graphite se présente sous une épaisseur de 25 cm et une densité de 1,75 g/cm³. Il est entouré d'un écran de 3,4 t de plomb d'une épaisseur de 10 cm et d'un second écran de 3,9 tonnes d'eau d'une épaisseur de 55 cm.

La puissance peut aller de 0,1 à 5 W, et le flux thermique peut, en conséquence, varier entre 5.10⁶ et 2,5.10⁸ n/cm².s.

Le contrôle est effectué à l'aide de 4 barres verticales contenant des combustibles qui sont introduits par le bas; trois d'entre ces barres contrôlent chacune 1,25 % de la réactivité; la 4ème barre, qui sert au réglage fin, est constituée uniquement par du polyéthylène et contrôle 0,16 % de la réactivité. Le coefficient de température atteint $-2,5 \cdot 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$.

Le réacteur est pourvu d'un "glory-hole" qui traverse le centre du coeur et dont le diamètre est de 2,5 cm., de quatre canaux d'un diamètre d'environ 10 cm., d'une colonne thermique verticale (qui peut être remplie avec de l'eau naturelle, de l'eau lourde ou du graphite), cylindrique, d'un diamètre de 84 cm. et d'une hauteur de 63 cm. Le réacteur, comprenant les instruments et la table de commande, est déjà, depuis plusieurs mois, installé à Palerme où il attend l'arrivée du combustible.

Le réacteur sera abrité dans un bâtiment normal de l'Ecole Supérieure Technique (Facoltà di Ingegneria).

d) Subcritical facility-Cagliari - Depuis quelques semaines, l'Institut de Chimie générale de l'Université de Cagliari est doté d'une unité souscritique, contenant 2 tonnes d'uranium

naturel fourni par les Etats-Unis. Les éléments de combustible sont immergés dans de l'eau naturelle qui sert de modérateur. L'ensemble sous-critique est géré par la Société du Développement Technologique de l'Energie Nucléaire (SETEN).

e) CAMEN - Le Camen projette l'acquisition d'un réacteur de recherche du type piscine, de construction américaine, modéré et réfrigéré à l'eau naturelle, et utilisant comme combustible l'uranium enrichi en alliage d'aluminium, d'une puissance thermique probable de 1 MW.

f) Saluggia - Le réacteur Avogadro, du Centre de Saluggia (SORIN), est du type piscine à 5 MW construit par l'American Machine and Foundry Co.

Ce réacteur, étudié tout d'abord par la AMF et mis au point sous la forme du type à double bassin, a été modifié par la SORIN qui a étudié un type à 3 bassins: le premier servant aux expériences d'irradiations à l'extérieur (une colonne thermique à double accès, vertical et horizontal, avec un flux thermique utile d'environ 10^7 ; 4 tubes d'irradiation de 15,2 cm., un tube d'irradiation de 21 cm., un tube d'irradiation de 30,5 cm., un thrutube de 15,2 cm.).

Le deuxième bassin sert aux expériences de bulk shielding et le troisième (projeté par la SORIN) servant aux essais d'irradiation à sec dans une grande chambre d'irradiation latérale.

D'un autre côté, on a prévu une chambre d'irradiation gamma alimentée par les radiations gamma du combustible utilisé.

Le flux thermique utilisable dans les tubes d'irradiation atteint plusieurs unités en 10^{13} à 5 MW.

Le coeur du réacteur est composé de 25 à 30 éléments du type HTQ à 18 plaques (à 5 MW), le combustible se présentant sous la forme d'un alliage Al-U enrichi à 20% à gainage d'aluminium. Au total le réacteur contiendra 3.500 d. d'uranium 235.

Le contrôle est réalisé au moyen de 5 barres à sécurité "shim safety" et d'une barre de contrôle. Il va sans dire que le réacteur est modéré et refroidi à l'eau naturelle.

Le bâtiment abritant le réacteur se présente sous la forme d'un cylindre de béton d'un diamètre de 32 m. et d'une hauteur de 30 m. entièrement vernissé à l'intérieur pour réaliser l'imperméabilité à l'air, et il est facilement décontaminé en cas d'urgence. Il est conçu pour résister à une surpression statique de 750 mm. d'eau. La piscine, imperméabilisée, est entièrement revêtue d'un carrelage. On a cherché tout particulièrement à éviter le contact de l'eau déminéralisée avec les corps susceptibles de précipiter et par là

d'augmenter le taux de la radioactivité éparsé.

Le système de déminéralisation comprend 2 parties : l'une de 5 m³/h pour l'épuration continue de l'eau d'ores et déjà déminéralisée, l'autre de 3 m³/h pour la déminéralisation de l'eau de premier remplissage et de retour.

Le circuit primaire de réfrigération du réacteur est entièrement en aluminium, les tubes étant soudés. On a apporté un soin particulier à la subdivision de la tubulure primaire en segments dont le volume est suffisamment réduit pour éviter, en cas de rupture de tube, la chute du niveau de l'eau dans la piscine en dessous des limites de sécurité.

Le conditionnement d'air prévu pour la salle du réacteur (env. 20.000 m³) renouvelle l'air 2 fois par heure.

La date de criticalité prévue pour le réacteur se situe vers la fin de février 1959.

La dépense prévue pour l'année 1958 pour le Centre de Saluggia sera d'un peu moins de 3 milliards de lires (4,8 millions d'unités UEP).

Laboratoires de Saluggia : le réacteur est logé dans une construction cylindrique entourée de cinq bâtiments pentagonaux destinés aux usages suivants : cellules chaudes, vestiaires, bureaux et cabines électriques, appareillage hydraulique du réacteur, ateliers pour la préparation des expériences; un sixième bâtiment contient les ventilateurs pour l'aération des laboratoires qui, le cas échéant, expulsent l'air contaminé vers l'installation de décontamination ou vers la cheminée.

D'autres bâtiments sont prévus pour les destinations suivantes : vestiaires, bureaux, magasins, garage, services généraux, ateliers, sous-stations de transformation de 5000kVA, etc... Un groupe de bâtiments abritera les services de décontamination des matériaux radio-actifs qui neutraliseront, avant leur sortie du Centre, tous les déchets du point de vue chimique et les rendront inactifs du point de vue des radiations.

On projette la construction d'un ensemble de bâtiments devant abriter l'installation complète nécessaire à la métallurgie de l'uranium où pourra s'effectuer la régénération du combustible usé et éventuellement la fabrication des combustibles utilisables dans d'autres réacteurs.

Les laboratoires principaux comprennent deux bâtiments qui, une fois achevés, auront une longueur de 170 m et une largeur de 24 m; l'accès à ces laboratoires ne pourra se faire que par l'intermédiaire d'antichambres prévues pour le contrôle sanitaire.

Ces différents bâtiments abriteront : un laboratoire chimique inactif et un laboratoire physique inactif pour l'analyse et l'étude des échantillons solides et liquides; la verrerie; la sous-station de transformation; les services généraux du laboratoire; la salle de filtrage actif de l'air provenant des cavités à gants (gloves boxes); un laboratoire de chimie expérimentale pour les travaux faisant intervenir des matériaux irradiés; les laboratoires d'activité moyenne ayant pour fonction de prévoir les services d'analyse pour tous les échantillons solides et liquides reçus par les laboratoires de haute activité. Les pièces seront équipées d'une "chape" métallique complète pour le "drainage". Elles seront percées à l'avant d'une fenêtre coulissante, mobile dans le sens vertical, et qui, dans la position la plus basse, offre une ouverture de dix centimètres de haut. Cette ouverture laisse passer un courant d'air en direction de la chape à une vitesse de 1 m/s. L'usage des "cavités à gants" interviendra dans les cas où la concentration en rayons alpha dépassera les limites d'absorption de la chape. A l'intérieur de celle-ci il est maintenu une dépression de 3,8 cm d'eau. Le laboratoire de chimie de haute activité sera utilisé pour le développement des techniques analytiques en ce qui concerne les matériaux hautement radioactifs et pour les travaux de recherches relatifs aux matériaux de haute activité. Il sera équipé de "cellules" à charpente d'acier, protégées par des écrans de plomb et d'acier fondu, percées de fenêtres à verre au plomb et dotées de manipulateurs. Il sera complété par des magasins, vestiaires, ateliers actifs, locaux pour les pesées, pour la spectrographie à l'obscurité, pour la préparation des électrodes utilisés dans les spectrographes, une salle pour rayons X, une salle pour la mesure des radiations alpha, bêta, et gamma, un laboratoire métallurgique actif pourvu de "cellules" à charpente d'acier protégées par un écran de plomb et d'acier, des douches.

3. Autres Centres

a) La FIAT dispose à Turin, indépendamment du Centre de Saluggia de la SORIN (à laquelle la FIAT participe dans la proportion de 50%), d'un Centre qui lui appartient en propre et qui, sur une superficie de 3500 m², comprend des laboratoires "chauds" relatifs à la physique de l'état solide, à la radiochimie, à l'électronique, etc.. L'appareillage comprend un bêtatron, un spectrographe de masse, des sources de neutrons, des calculateurs électroniques, notamment de l'I.B.M. 650, et d'autres appareils.

b) La MONTECATINI, à proximité du Centre de Sorin, projette l'installation pour son compte propre d'un laboratoire de synthèse des molécules marquées.

Le Centre "Donegani" de Novare, principal laboratoire de chimie classique de la Montecatini, oriente depuis quelques années son activité dans le domaine des recherches nucléaires.

La Société FARMITALIA, qui dépend de la Montecatini, dispose dans son laboratoire de Milan d'une section pour le traitement des radioisotopes et leur emploi dans le domaine médical.

L'institut Expérimental des Métaux Légers (Montecatini) est équipé d'une bombe au cobalt.

C - LE PROGRAMME DE RECHERCHES ITALIEN

Les recherches actuellement en cours, aussi bien que les projets de recherches, ont déjà été traités dans un premier rapport et dans les fiches. Nous parlerons surtout des programmes de recherches qui se rapportent directement aux applications pratiques. Comme il s'agit de programmes, il semble plus indiqué de les présenter par organismes que par matières.

CNRN - Le CNRN se propose de procéder au transfert graduel vers le Centre d'Ispra de la presque totalité de son activité en matière de recherche appliquée, exception faite de la partie géominière.

Il procédera au transfert de son installation de production d'uranium métallique dans les quantités et selon les méthodes précédemment définies. Son programme comporte les points suivants : recherche sur l'extraction au moyen de solvants, essais de récupération de l'uranium à partir des phosphorites ou par l'intermédiaire de la production d'engrais phosphatés, expériences sur la préparation de fluorures doubles d'uranium, études des méthodes de préparation d' UO_2 par voie humide et par voie sèche, expériences sur la réduction thermique des fluorures d'uranium et de métaux alcalino-terreux, expériences sur la production de thorium métallique à partir du nitrate de thorium pur. Le même programme prévoit, au Centre d'Ispra, la préparation des éléments de combustibles du type Calder Hall et la préparation des éléments de combustibles à dispersion.

En ce qui concerne la physique des solides, il entreprendra des recherches sur la diffraction neutronique, à partir des matériaux magnétiques. Pour la réalisation de ce programme, on peut d'ores et déjà citer le projet, très avancé dans sa réalisation, d'un spectrographe à cristal pour neutrons à double axe.

Dans le domaine de la physique nucléaire, il entreprendra à Ispra l'étude des réactions nucléaires à basse énergie d'un intérêt fondamental; il étudiera également les réactions de capture des neutrons, la dispersion potentielle, la résonance négative, l'interaction des neutrons lents avec les noyaux orientés, et enfin, les réactions de fission. Mentionnons également le projet, fort avancé dans sa réalisation, d'un sélecteur neutronique de vitesse à haute intensité, destiné à fonctionner essentiellement entre 4 et 100 eV.

Dans le même domaine du calcul du réacteur, il faut citer à Ispra l'existence d'un groupe qui s'est engagé dans les activités suivantes :

Préparation des programmes sur calculatrice électronique, pour le calcul des réacteurs se rapportant en particulier aux méthodes multi-groupes. Etude et mise en oeuvre de programmes basés sur les méthodes Monte-Carlo. Etude sur les méthodes hétérogènes de calcul des réacteurs. Il est prévu au programme que le Centre sera doté d'une machine calculatrice électronique permettant d'accélérer le travail du groupe à l'échelle internationale. On a mis à l'étude la réalisation, auprès du Centre, d'une "subcritical facility" pour l'étude des paramètres réticulaires dans les réacteurs. On projette une étude d'expériences exponentielles pour les réacteurs à gaz, à graphite et pour les réacteurs à modérateur organique.

Les projets d'un simulateur analogique de réacteur comprenant la structure nucléaire avec des éléments de retard, des effets de température internes et externes et la simulation de l'échange de chaleur et des installations sont en voie d'achèvement et la construction en a été commencée. Il permettra d'étudier de nouveaux types de systèmes de régulation. En ce qui concerne la cinétique du réacteur et les problèmes connexes (contrôle, stabilité, etc) des simulateurs électroniques sont à l'état de projet avancé.

En ce qui concerne la physico-chimie du réacteur, le programme prévoit l'étude des gaz rares provenant de la fission et la mise au point de méthodes d'extraction des radioisotopes, limités aux éléments suivants : I 131, Au 198, P 32, Na 24.

Ispra sera également le siège du "Service Médico-Biologique", lié au service biologique central du CNRN avec lequel il préparera un programme de recherche dans le domaine radiogénétique et radio-biologique, qui sera développé selon les disponibilités en radioisotopes à vie courte produits par le réacteur Ispra I.

Par l'intermédiaire du laboratoire électronique d'Ispra, il a été commencé la construction d'un "moniteur" actionné à la main ou au pied, utilisé par le personnel affecté à la métallurgie de l'uranium, et des appareils de physique sanitaire sont en projet.

Il est également projeté la construction d'appareils de détection, de dosimétrie et de détermination des concentrations actives de l'eau, de l'air et du sol.

En ce qui concerne l'activité que le Centre d'Ispra déploiera à l'extérieur, nous mentionnerons tout d'abord la division géo-minière qui, sur la base des travaux effectués jusqu'à ce jour, prévoit, à partir de 1961, pour la zone alpine déjà explorée, une production annuelle de l'ordre de 200 t d'uranium métallique; à cet effet, en plus du développement du programme de prospection, on projette la formation d'un petit nombre de techniciens pour la mise en oeuvre d'un programme d'exploitation, de manière à pouvoir extraire à la fin de 1962 un volume de 350 t d'uranium métallique qui constituerait un allègement notable des besoins en uranium pour la charge des réacteurs qui seront vraisemblablement installés en Italie à cette date.

Une autre activité, d'un caractère assez pressant, sera entreprise par le Laboratoire des Gaz Ionisés de l'Institut de Physique de l'Université de Rome; cette activité a pour objet l'étude expérimentale et théorique du comportement d'un gaz ionisé (plasma) soumis à un champ électromagnétique, en vue de l'application de ces phénomènes à la production d'énergie thermonucléaire, avec la mise au point corrélative des techniques nécessaires à la production et à l'isclément du plasma ainsi qu'à l'interprétation des phénomènes qui se produisent.

Dans le domaine des applications agricoles, le C.N.R.N. envisage la création d'un "Centre de recherches pour les applications des radioisotopes et des radiations en biologie et en agriculture" à proximité de Rome. Le même projet prévoit la création d'un "champ gamma" et d'un groupe de laboratoires de recherches, destinés à l'étude des applications des radiations et des radioisotopes aux différents secteurs agricoles et zootechniques. Le champ gamma permettra une superficie d'irradiation d'1 hectare et des études d'irradiation chronique à bas niveau sur 24 hectares. Les frais d'installation sont estimés à 80 millions de lires et les frais annuels de fonctionnement à 35 millions. Les laboratoires de recherches seront répartis en 6 sections (technique-dosimétrie, génétique, pathologie végétale et entomologie, zootechnique, chimie-biochimie-physiologie, microbiologie agricole et industrielle). Les frais d'installation de cet ensemble de laboratoires s'élèveront à 420 millions et les frais annuels de fonctionnement à 235 millions. Il est prévu que le Ministère de l'Agriculture interviendra dans les frais d'installation.

Il y a peu de mois, on a inauguré à Rome l'Institut des Etudes Nucléaires dans le domaine Agricole (I.S.N.A.) qui s'est donné pour tâche le développement et la documentation en ce qui concerne les applications nucléaires à l'agriculture et à la zootechnie.

INFN-Université - En dehors du centre de Frascati, le CNRN coordonne, par l'intermédiaire de l'INFN, les recherches de la plupart des laboratoires universitaires italiens dont l'activité concerne la physique nucléaire appliquée. Parmi les instituts universitaires, dont certains ont déjà été mentionnés (car ils disposent d'accélérateurs de basse énergie pour la production de neutrons et d'autres types d'accélérateurs), nous mentionnons :

Les Instituts de Chimie de l'Université de Padoue et de l'Université de Rome dont l'activité concerne l'analyse des minerais radioactifs et l'étude physico-chimique des réacteurs par l'étude des processus chimiques résultant des radiations, et l'application des radioéléments à l'étude des équilibres chimiques.

L'Institut de Chimie Industrielle de l'Université de Bologne pour les méthodes céramiques.

L'Institut de Physique de l'Université de Gênes pour le "fractionnement" isotopique de A, N, C et (en collaboration avec différents autres instituts) pour l'étude de l'interaction des radiations avec la matière, en même temps que la spectrographie de masse.

L'Institut des Sciences Physiques de l'Université de Milan qui sera chargé de l'étude théorique de la séparation isotopique, de la physique théorique et expérimentale des solides, de la théorie du plasma et du calcul des réacteurs.

L'Institut de Physique de l'Université de Ferrare pour l'application du Co et pour l'étude du ferromagnétisme.

L'Institut de Physique de l'Université de Bologne qui a mis à l'étude l'interaction des radiations avec la matière, la protection sanitaire, et le calcul des réacteurs.

L'Institut de Physique de l'Université de Trieste pour l'étude des modèles nucléaires.

L'Institut de Physique de l'Université de Turin pour l'étude de l'interaction des radiations avec la matière et du plasma.

L'Institut de Physique Supérieure de l'Université de Pavie qui poursuivra ses recherches sur l'état solide et sur la résonance nucléaire.

L'Institut de Physique de l'Université de Modène pour la mesure de la radioactivité de l'air et des roches.

L'Institut de Physique de l'Université de Parme pour l'interaction des radiations avec la matière.

L'Institut de Physique de l'Université de Pise pour le plan de travail relatif aux calculatrices électroniques et pour les travaux relatifs aux micro-ondes et au plasma.

Le Centre de Physique Nucléaire de Cattane pour l'étude de l'interaction de la matière avec les radiations et des applications des radioisotopes.

Le Centre E. Fermi de l'Institut Polytechnique de Milan entreprendra parallèlement à l'étude des caractéristiques du réacteur, des recherches concernant la physique des neutrons, la mise à l'épreuve et l'étalonnage des appareils de détection et de comptage et de l'instrumentation de physique sanitaire notamment pour les neutrons lents et rapides, des expériences sur les structures multiplicatrices et l'étude des effets des radiations sur les matériaux et sur différents systèmes chimiques, en exploitant les possibilités particulières propres aux réacteurs homogènes; l'étude et les applications des radioisotopes à vie courte et très courte.

Il faut noter que l'activité des centres universitaires mentionnés ci-dessus n'est entreprise qu'en partie par l'INFN, et par ailleurs ne constitue qu'une partie des activités de recherches : par exemple, on n'a pas mentionné les recherches théoriques et expérimentales sur les rayons cosmiques, sur les particules élémentaires et sur les phénomènes de haute énergie dont l'étude est pourtant largement répandue en Italie et qui absorbe, tant en hommes qu'en matériel, une bonne partie de l'activité scientifique du pays. Mentionnons les laboratoires de haute montagne de Cervinia (Testa Grigia) et de la Marmolada.

En ce qui concerne les applications biologiques et médicales, de caractère prophylactique ou thérapeutique, un vaste programme d'activité est projeté auprès de l'Institut Supérieur de Santé de Rome, qui dépend du Ministère de l'Intérieur, et par les cliniques et instituts de médecine et de sciences biologiques de différentes universités. L'Institut de Santé, qui utilise des radioisotopes dans ses recherches sur le métabolisme et qui s'occupe du contrôle de l'activité de l'air et des précipitations, a étudié les normes de protection pour les accélérateurs, et a par ailleurs arrêté un programme de recherches sur la protection chimique contre les radiations ionisantes. Il installera vraisemblablement, en accord avec le CNRN, un laboratoire de dosimétrie et de mesures standards.

L'Université de Pavie est chargée d'un programme de recherches de génétique (prof. Buzzatto-Traversi).

La clinique médicale de l'Université de Gênes, qui dispose d'un équipement et de locaux particulièrement au point, est dotée d'un centre des radioisotopes qui exerce une activité didactique et thérapeutique et élabore des programmes dans ce domaine. A Pise fonctionne une école de perfectionnement en ma-

tière de médecine nucléaire, et la clinique médicale est chargée de l'étude des applications des radioisotopes à la radiocardiographie, et de l'étude des problèmes de la circulation sanguine.

Le Centre de Médecine Nucléaire de la Clinique Médicale de l'Université de Rome étudie principalement le mécanisme des dommages biologiques imputables aux radiations et les applications thérapeutiques des radiations de haute énergie.

L'Institut de Radiologie Médicale de l'Université de Rome est doté depuis quelque temps d'un bêta-tron de 15 MeV Siemens à usage thérapeutique et de recherches.

A Milan, l'Institut d'Anatomie Pathologique utilise les techniques historadioautographiques et poursuit les recherches sur les moyens propres à préserver la cellule vivante des dommages dus aux radiations.

Le Centre d'Etudes Physico-Biologique de l'Université de Turin étudie les moyens de prévention et de protection et les normes de sécurité pour les accélérateurs et les réacteurs; des expériences sont en cours sur les possibilités offertes par la cistamine contre les effets de radiations. La Clinique Médicale dispose d'un bêta-tron de 31 MeV pour des usages thérapeutiques.

D'autres recherches sont projetées à la faculté de Médecine de l'Université de Sicile avec la contribution financière du CSRN. L'initiative régionale dotera bientôt le Centre Tumori de Palerme d'un Bêta-tron de 15 MeV Siemens (actuellement en cours de montage) d'un coût de 90 millions de lires. Il sera utilisé pour la thérapeutique fixe et de mouvement.

CISE - Le CISE a arrêté un important programme de recherches pour ses différents laboratoires : nous mentionnons ci-dessous, outre les recherches projetées, celles qui pourraient être entreprises sur contrat.

- Chimie et radiochimie: Développement des méthodes analytiques relatives à l'uranium, au thorium et aux terres rares contenus dans les minéraux; chromatographie sur papier et résine, chromatographie électrophorétique; contrôle spectrographique des terres rares dans l'uranium métallique. Préparation des catalyseurs spéciaux nécessaires à la production industrielle du D.

Etude de la décontamination des eaux contenant des radioisotopes.

Des recherches pourront être entreprises (après instruction supplémentaire du personnel et augmentation de l'équipement) sur : les méthodes de concentration des minerais uranifères pauvres et la transformation de l'uranium en composés techniquement purs; l'étude des modifications de la structure chimique des différents minerais introduits dans le réacteur,

sous l'effet des substances de contact. Physicochimie des réacteurs homogènes : radiochimie et corrosion.

- Electronique : Méthode permettant de préciser dans le temps la position d'une impulsion indépendamment de l'amplitude par la méthode de l'excitation balistique d'un circuit résonant amorti et la mise en action ultérieure d'un circuit à déclenchement. Emploi de la charge d'accumulation dans les diodes à jonction pour l'obtention de retards variables électroniquement contrôlés. Utilisation des variations de capacité des diodes à jonction à polarisation inversée en vue des amplifications paramétriques. Mise au point d'un oscillographe "à échantillon" pour l'analyse des maximum très brefs (10^{-9} s).

On pourrait orienter des recherches dans les domaines suivants : dispositifs de détection et de mesure des radiations; mesure des caractéristiques des phototubes pour la détermination du pouvoir de résolution selon l'amplitude et le temps; mise au point de l'instrumentation électronique nécessaire à l'élaboration de l'information obtenue à partir des détecteurs nucléaires; instrumentation nécessaire aux accélérateurs de particules de basse énergie jusqu'à un maximum de 10 MeV.

- Physique nucléaire : le Groupe de physique nucléaire, dans l'intention d'améliorer son information sur le mécanisme des réactions nucléaires, s'est engagé dans le perfectionnement des techniques neutroniques fondées sur la mesure du temps de vol, en employant le chronotron Gatti et les techniques de l'émulsion nucléaire pour lesquelles on projette, en collaboration avec le Professeur Occhialini, la mise au point d'un appareil pour la lecture rapide des plaques. Pour l'étude de ces réactions, lorsque l'énergie des protons incidents atteint 10 ou 20 MeV, il a entrepris la construction de l'accélérateur Van de Graaff dont il a été question à la page 13. Il travaille actuellement à la mise au point d'une nouvelle méthode de mesure de la section efficace des neutrons pour les puissances allant de 4 à 7 MeV. Il a, en outre, créé un groupe qui étudiera les réactions thermo-nucléaires dans les plasmas en utilisant l'équipement du laboratoire et l'expérience qu'il a acquise au cours de 5 ans d'études consacrés aux décharges dans les gaz (Colli et Facchini) ; il étudiera également l'équipement nécessaire pour la détection des neutrons et des autres radiations.

Il est intéressant de noter qu'au cours des derniers mois, on a inauguré à Milan le Laboratoire CESI (Centre Electro-technique Expérimental Italien) qui se trouve situé à 100 m environ du nouveau siège du CISE et qui dispose des installations nécessaires à la production de courant de haute fréquence, soit 2000 KVA sous une tension variant entre 5 et 150 kV en circuit court.

- Physique des solides : il prépare actuellement la construction d'une installation pour la production de hauts fondants monocristallins nécessaires à l'étude de l'autodiffusion, de la diffusion intermétallique et de la dilatation thermique. Il a mis à l'étude la mise au point d'une méthode pour la purification des substances métalliques et il procède à des recherches sur l'autodiffusion dans le platine et dans d'autres métaux.
- Génie atomique : en ce qui concerne la construction d'un réacteur, les travaux actuellement en cours se rapportent à un projet de réacteur de puissance à uranium naturel et à eau lourde, refroidi par un mélange liquide-vapeur d'eau naturelle. Le refroidissement à l'aide d'un tel mélange offre l'avantage d'une contamination réduite de la structure d'ensemble. Expérimentations sur la capacité de refroidissement et sur les pertes de charge des mélanges de types divers; eau-vapeur en fonction de la pression et de la composition; gaz inerte (azote-air) et eau en fonction de la pression totale de la température et de la composition; étude de la dynamique du réacteur susdit à l'aide du simulateur électronique.

En ce qui concerne la séparation des isotopes, un programme préliminaire de recherches et de développement pourrait comprendre la révision des usines actuelles et la mise en projet d'usines nouvelles pour la production d'eau lourde par le moyen d'échange à deux températures en phases, l'échange avec SH_2 à deux températures, la distillation à basse température, etc; il pourrait comprendre également des études et expérimentations sur la diffusion à l'intérieur d'un courant de gaz inerte, la production d'isotopes d'un intérêt particulier, la séparation électromagnétique et l'analyse des principes fondamentaux de la séparation jusqu'alors insuffisamment étudiés.

- Métallurgie : on prépare actuellement l'appareillage complet nécessaire pour le cyclage thermique; les recherches en cours et les projets portent sur l'extraction actuelle à l'aide de solvants et l'échange ionique par résine soluble; la réduction en solution de U_6 et la précipitation des fluorures doubles en cuves électrolytiques; la réduction de U_3O_8 et la fluoruration de UO_2 à l'aide de HF anhydre en four continu. Des recherches sont susceptibles d'être effectuées en ce qui concerne, non seulement la production de U, mais également celle de thorium et de zirconium.
- Techniques expérimentales : le programme du laboratoire comprend notamment l'étude et la mise au point de techniques nouvelles pour la fabrication de photomultiplicateurs et l'étude de prototypes nouveaux de compteurs Geiger-Müller et d'appareils pour l'analyse radiométrique.

- Technologie spéciale : le laboratoire étudie actuellement le problème du gainage des éléments de combustibles à partir du zirconium et il met au point des méthodes de vérification du contact intermétallique. Il a commencé l'étude de la production des éléments de combustible de UO_2 obtenus par synthèse et d'éléments métallo-céramiques également à base de UO_2 . Il prépare des expériences sur l'évacuation de la chaleur à l'aide des métaux liquides (Na-K).

AGIP NUCLEARE - L'Agip Nucleare poursuit dans ses laboratoires les recherches suivantes :

- Physique expérimentale appliquée : le Groupe s'intéressera notamment à la mesure de la basse réactivité, du flux neutronique et du flux des autres radiations.
- Calcul du réacteur : le Groupe se consacre à l'étude du calcul neutronique et thermique des réacteurs modérés au graphite et refroidis au gaz.
- Physicochimie : des recherches sont en cours en ce qui concerne la décontamination des effluents et les problèmes posés par le contact graphite- CO_2 .
- Physique sanitaire : on procède actuellement à la mesure de la radioactivité en préparations biologiques et à la mesure de la radioactivité dans l'air et dans l'eau.
- Echange de chaleur : des recherches sont en cours sur l'échange de chaleur entre éléments de combustible et réfrigérants gazeux.
- Electronique et contrôle : on a construit un simulateur de la cinétique du réacteur qui sera équipé d'une petite calculatrice analogique projetée par le groupe lui-même. Ce dernier s'occupera par la suite des problèmes de régulation en se servant d'une importante calculatrice analogique qui est en cours d'acquisition.

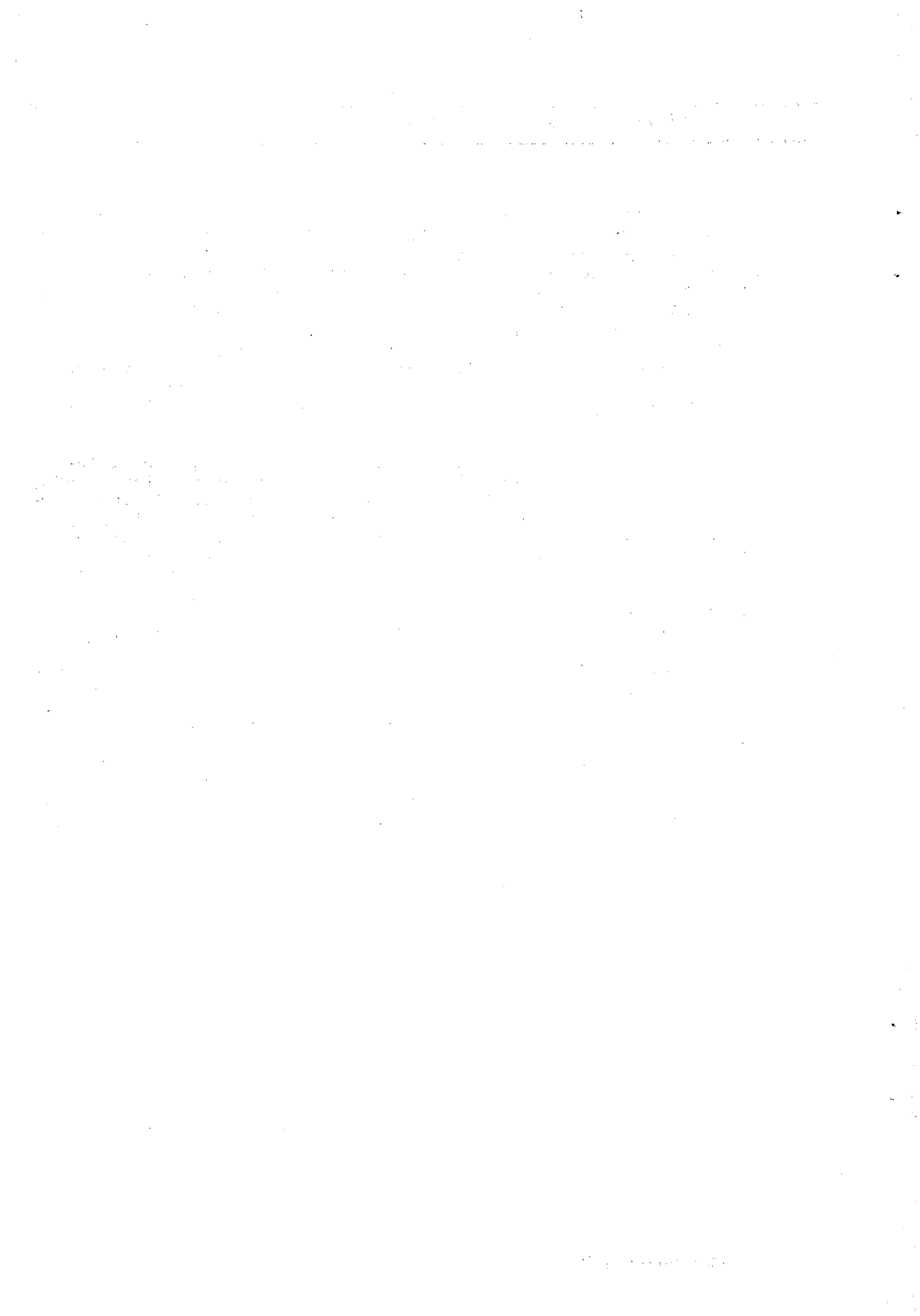
SORIN - Il ne fait pas de doute que la SORIN, et principalement le Centre dont elle dispose à Saluggia, constitueront l'un des principaux centres italiens de recherches, à la fois par l'existence d'un réacteur et par l'importance des deux sociétés dont elle dépend, autant que des sommes engagées par celles-ci. Pour l'instant, le personnel de la SORIN se consacre à la préparation du Centre et il est encore trop tôt pour élaborer un plan de recherches détaillé. Toutefois, l'organisation de la société (voir page 9) et la description du centre de Saluggia (voir page 19) font prévoir que le plan de recherches couvrira en grande partie les recherches prévues à l'annexe I du Traité instituant l'Euratom.

FIAT - La FIAT poursuit actuellement des recherches au Centre de Turin dans les domaines suivants : mise au point de réacteurs à eau sous pression et à eau bouillante, étude d'un projet de réacteur à combustible métallique à l'état liquide; alliages d'uranium; fabrication des éléments de combustible; préparation des matériaux actifs pour waste disposal; propulsion navale; physique du plasma; cinétique des réacteurs, protection contre les radiations; application des radiations à la conservation des aliments; autres utilisations des radioisotopes; développement de la technologie industrielle pour la construction des réacteurs; et enfin aspects économiques de la production d'énergie.

MONTECATINI - Tout comme la FIAT, la MONTECATINI, parallèlement à sa coparticipation à la SORIN dans une proportion de 50%, a des activités propres. Elle s'intéresse, du point de vue énergétique, à la construction de centrales nucléaires soit pour son compte propre, soit pour compte de tiers; étude notamment d'un projet de réacteur à modérateur organique. Dans le domaine minier, elle continuera des recherches dans le domaine de l'extraction et de la concentration des minerais d'uranium et de thorium. Elle a mis en oeuvre un programme d'études relatif à l'utilisation de l'effet des radiations sur la matière et dans les processus d'intérêt industriel. Elle s'intéressera également aux matières spéciales utilisées dans les installations nucléaires. Par l'intermédiaire de sa section des produits chimiques qui a mis au point la production du teflon, elle étudie la construction d'une usine de production de graphite nucléaire. L'Institut des Métaux légers, qui relève de la MONTECATINI, poursuit actuellement des études et des expériences sur l'emploi de l'aluminium dans les réacteurs. Par le biais de la société LABEN, elle étudiera l'appareillage des usines nucléaires et la construction d'équipements électroniques "moniteurs".

*

* *



P A Y S - B A S

R. Houwink

ORGANISATION DE LA RECHERCHE NUCLEAIRE DANS LE PAYS

Dans les Pays-Bas la recherche nucléaire est effectuée par le "Reactor Centrum Nederland" (R.C.N.), qu'on peut considérer plus ou moins comme le centre nucléaire national, et dans des instituts de recherche, les universités et les industries.

Le R.C.N. fut institué en 1955. Les quatre participants sont le Gouvernement, des représentants de la science (*) les Compagnies d'Electricité et l'Industrie.

Le capital initial du R.C.N. est de 7 millions de dollars, fournis pour 50 % par le Gouvernement, 25 % par les Centrales Electriques, et 25 % par l'Industrie. Les dépenses annuelles d'exploitation sont actuellement de l'ordre de 1,5 millions de dollars. L'état-major scientifique et technique comprend 90 personnes, parmi lesquelles 60 sont de formation universitaire. On prévoit qu'au cours de l'année 1959 ces nombres s'élèveront à 120 et 75.

La participation au R.C.N. des centrales électriques comme partenaires de l'Etat, prouve que les centrales électriques qui appartiennent aux autorités locales (les provinces, les municipalités) sont des organismes indépendants, très forts et bien coordonnés par leur organisation centrale (SEP). Le laboratoire de la KEMA à Arnhem participe à leur activité.

Pour réaliser la contribution de l'industrie au R.C.N. on a créé un groupe spécial d'industries néerlandaises intéressées au domaine nucléaire.

Dans le passé, une grande partie des études du R.C.N. a été effectuée par contrat par des organisations établies dans le pays, mais actuellement, ces travaux se concentrent au Centre, à Petten, où une partie du personnel est déjà au travail.

(*) Il s'agit de l'Organisation pour la Recherche Fondamentale sur la matière (FOM), au sein de laquelle les physiciens de toutes les universités coopèrent.

Une autre partie des travaux du R.C.N. a été effectuée à l'étranger, grâce à la collaboration étroite qui existe depuis 1951 entre les Pays-Bas et le centre nucléaire norvégien. A Kjeller (près d'Oslo) on trouve un centre opérant sous des directives hollando-norvégiennes, où on a créé un groupe d'experts très puissant.

Par rapport aux points de vue indiqués plus haut, le programme du R.C.N. est entrepris comme suit :

- a) au centre en construction à Petten, à 50 km au nord d'Amsterdam, sur la côte de la mer du Nord. Dans ce centre fonctionnera un réacteur à haut flux pour l'essai de matériaux, semblable au réacteur de recherche d'Oak Ridge, au début de l'année 1959. Le centre sera équipé de laboratoires nucléaires convenables ;
- b) dans l'établissement commun pour la recherche sur l'énergie nucléaire (Jener, Norvège), on dispose d'un réacteur de recherche à eau lourde et de laboratoires nucléaires ;
- c) à Arnhem a été mis au point un réacteur homogène expérimental en coopération entre R.C.N. et KEMA ;
- d) sous forme de recherches subventionnées par le R.C.N., l'étude de la séparation isotopique par ultracentrifugation est effectuée à Amsterdam par la Fondation pour la Recherche Fondamentale sur la Matière (FOH), au sujet de laquelle il existe un programme de coopération avec l'Allemagne de l'Ouest.

Les autres organisations les plus importantes qui traitent de sujets nucléaires sont :

- F.O.M. à Utrecht disposant d'accélérateurs et faisant des recherches sur la fusion ;
- I.K.O. (Institut pour les recherches nucléaires), qui dispose d'accélérateurs pour l'étude des isotopes ;
- l'Institut Radiobiologique du T.N.O. (voir plus bas) à Rijswijk, développant une grande activité dans le domaine de la biologie et de la médecine ;
- l'Institut des Réacteurs à l'Université technique de Delft, possédant une pile piscine achetée pour la recherche et l'en-

l'enseignement personnel au niveau académique. On envisage la construction d'une installation exponentielle (assemblage critique) ;

- l'ITAL (Institut pour l'application de l'énergie nucléaire dans l'agriculture), Wageningen, qui a en construction un réacteur spécial pour des études agronomiques et qui a déjà mis au point une série d'études sur des sujets très divers partout dans le pays.

En dehors des recherches mentionnées ci-dessus, des recherches nucléaires sont entreprises dans de nombreux centres plus petits et dans les Universités.

Une circonstance spéciale facilitant beaucoup le développement nucléaire au Pays-Bas, est qu'une grande partie des recherches appliquées conventionnelles est concentrée dans une organisation existant depuis 25 ans : le T.N.O. (Organisation pour les recherches appliquées).

Les finances du T.N.O. provenant en majorité des ressources publiques, il est évident que les autres organisations comme le R.C.N. et le F.O.M., auxquelles l'Etat contribue également, essaient autant que possible d'éviter les doubles emplois. Cela implique que les travaux de caractère conventionnel (comme la construction de navires propulsés par l'énergie nucléaire) qu'on trouve fréquemment dans les programmes des instituts nucléaires d'autres pays, ne figurent pas aux programmes des instituts nucléaires néerlandais.

Vu les grandes importations de charbon américain pour la production d'électricité, les Compagnies d'Electricité envisagent de commencer la production d'énergie nucléaire avec des réacteurs d'une capacité électrique de l'ordre de 150 MW. C'est pourquoi leur organisation centrale a nommé un Comité d'évaluation des réacteurs de puissance. Ce Comité étudie les différents types de réacteurs de puissance qui existent sur le marché, et compare leurs mérites techniques et économiques respectifs.

L'industrie hollandaise prend déjà une part active dans les études et la construction d'installations de réacteurs. De nombreux éléments pour le H.F.R., en construction pour le R.C.N. ont été fournis par l'industrie nationale (machines lourdes, équipement électrique et électronique) et la même tactique sera suivie en ce qui concerne les réacteurs de puissance qui seront commandés bientôt. D'autre part, l'industrie fournit des isotopes à l'échelle industrielle et commerciale.

A côté des coopérations internationales déjà mentionnées plus haut avec la Norvège (JENNER) et l'Allemagne de l'Ouest (Ultracentrifugation), les Pays-Bas prennent une part active dans les programmes d'EURATOM et de l'O.E.C.E. (Eurochemic).

L'enseignement dans le domaine nucléaire est actuellement assuré par plusieurs professeurs dans les universités et par quelques instituts non-académiques. La situation est la suivante :

Au niveau académique

Radiochimie : Prof. Dr A.H.V. Aten Jr., Université Municipale d'Amsterdam.

Aspects physiques et technologiques des réacteurs :
Prof. Dr J.J. Went, Université Technique de Delft

Construction mécanique des réacteurs :
Prof. Ir E.F. Boon, Université Technique de Delft

Séparation des isotopes : Prof. Dr J. Kistemaker,
Université de Leiden

Au niveau non-académique

Science nucléaire et construction des réacteurs :
participation du R.C.N. aux cours de
JENNER (Norvège), cours de 9 semaines.

Applications des isotopes : Prof. Dr A.H.V. Aten Jr.,
I.K.O., Amsterdam, cours de 2 semaines.

Technologie des réacteurs : R.C.N., La Haye, cours
de 2 semaines.

Un grand nombre d'autres cours sont en préparation.

*

* *

LES REACTEURS DE RECHERCHE ET LES GRANDS EQUIPEMENTS
DONT DISPOSE LA COMMUNAUTE

A. Ancarani et D. Palumbo

1. Les réacteurs de recherche

Pour l'année 1958, les réacteurs de recherche en fonctionnement, en construction ou à l'état de projet avancé, dans le cadre de la Communauté, sont les suivants:

<u>Pays</u>	<u>Dénomination</u>	<u>Type</u>	<u>Situation actuelle</u>	<u>Puissance</u>
BELGIQUE	BR-1	Uranium naturel-graphite	En fonctionnement	4 MW
	BR-2	haut flux	En construction	50 MW (25 MW)
ALLEMAGNE	Münich	Piscine	En fonctionnement	1 MW
	Hambourg	Piscine	En fonctionnement	5 MW (1 MW)
	FRF (Francfort)	Homogène	En fonctionnement	50 kW
	FRB (Berlin)	Homogène	En fonctionnement	50 kW
	MERLIN (Jülich)	Piscine	En construction	5 MW (2 MW)
	DIDO (Jülich)	CP-5	En construction	10 MW
	FR 2 (Karlsruhe)	U naturel-D ₂ O	En construction	25 MW (12 MW)
FRANCE	ZOE	U naturel-D ₂ O	En fonctionnement	150 kW
	EL-2	U naturel-D ₂ O	En fonctionnement	2.5 MW
	EL-3	U légèrement enrichi D ₂ O	En fonctionnement	15 MW
	Aquilon	U naturel-D ₂ O	En fonctionnement	0
	Mélusine	Piscine	En fonctionnement	1 MW
	Triton	Piscine	En construction	1 MW
	Minerve	Piscine	En construction	0
	Proserpine	Homogène (Pu)	En fonctionnement	1 W
	Alizé	U légèrement enrichi-H ₂ O	En construction	0
	ITALIE	Ispra 1	CP-5	En construction
RS-1 Avogadro		Piscine	En construction	5 MW (1 MW)

<u>Pays</u>	<u>Dénomination</u>	<u>Type</u>	<u>Situation actuelle</u>	<u>Puissance</u>
	CALEN	Piscine	En projet	1 MW
	Institut Poly-technique de Milan	Homogène	En construction	50 kW
PAYS-BAS	HFR	LTR	En construction	20 MW
	ROR	Piscine	En projet	100 kW
	Arnhem	Homogène	En projet	250 kW

Pour un certain nombre de ces réacteurs, nous avons indiqué deux valeurs pour la puissance, le chiffre entre parenthèses représentant le niveau à atteindre au cours d'une première étape. Dans les considérations qui suivent, nous nous référerons toujours, sauf indication contraire, à la valeur maxima.

Un rapide coup d'oeil sur la liste des 25 réacteurs fait apparaître que c'est le type piscine qui est le plus fréquemment représenté.

Le tableau 1 indique pour les différents réacteurs le type et la puissance. Le tableau 2 indique le flux maximum de neutrons thermiques. Bien qu'elles soient purement qualitatives, ces indications aident cependant à se faire une idée des réalisations achevées ou en cours d'exécution dans les six pays de la Communauté.

Un classement des réacteurs selon leur utilisation respective présenterait beaucoup plus d'intérêt. Malheureusement, à part quelques rares exceptions, on constate que la spécialisation n'a pas été le souci majeur des promoteurs des projets, soit pour des raisons historiques (réacteurs en fonctionnement depuis plusieurs années), soit pour des raisons pratiques, car un pays qui aurait voulu assigner à chaque réacteur une utilisation limitée aurait dû assumer un programme de construction d'un poids écrasant. Cependant, dans le cadre d'Euratom, la spécialisation peut être envisagée pour autant que les partenaires de la Communauté s'entendent sur un programme d'utilisation commune de leurs installations respectives.

Domaines d'utilisation des réacteurs. - A l'heure actuelle, les domaines d'utilisation effectifs ou prévus peuvent s'énoncer de la manière suivante (les réacteurs en service à la date du 1.1.1959 sont marqués d'un astérisque) :

- | | | |
|--|--|-------------|
| 1. Recherches de physique: | pratiquement, tous les réacteurs figurant sur la liste, à l'exception d'Aquilon (*) et d'Alizé (France). | |
| 2. Essais de matériaux: | BR-2 | (Belgique) |
| | MERLIN - Jülich 1 | (Allemagne) |
| | DIDO - Jülich 2 | (Allemagne) |
| | FR-2 - Karlsruhe | (Allemagne) |
| | (*) EL-3 | (France) |
| | Ispra-1 | (Italie) |
| | RS-1 Avogadro | (Italie) |
| | HFR | (Pays-Bas) |
| 3. Essais sur la pureté nucléaire des matériaux: | Minerve | (France) |
| 4. Etudes de réseaux: | (*) Aquilon | (France) |
| | Alizé | (France) |
| | (*) Mélusine | (France) |
| 5. Production de radio-isotopes: | (*) BR-1 | (Belgique) |
| | BR-2 | (Belgique) |
| | DIDO - Jülich 2 | (Allemagne) |
| | FR-2 - Karlsruhe | (Allemagne) |
| | (*) EL-2 | (France) |
| | (*) EL-3 | (France) |
| | Ispra-1 | (Italie) |
| | HFR | (Pays-Bas) |
| 6. Expériences exponentielles: | (*) BR-1 | (Belgique) |
| 7. Enseignement et formation des spécialistes | (*) FRF - Berlin | (Allemagne) |
| | FR-2 - Karlsruhe | (Allemagne) |
| | Institut Polytechnique de Milan | (Italie) |
| | HOR | (Pays-Bas) |
| | (éventuellement d'autres réacteurs à l'exclusion des réacteurs à haut flux) | |

Un réacteur ne peut servir à l'un ou l'autre des buts qui ont inspiré sa construction que s'il existe des laboratoires et équipements annexes nécessaires. A l'égard des 7 catégories indiquées ci-dessus, nous pouvons faire les remarques suivantes:

1. Recherches de physique: il n'est pas possible d'évaluer a priori tous les besoins. La gamme des instruments nécessaires aux recherches de physique est très étendue puisqu'elle va des appareillages électroniques jusqu'aux spectromètres

à cristal et aux sélecteurs, etc... Cependant, aucune difficulté insurmontable n'est prévue, on peut même ajouter que, en général, on ne constate pas de besoin en laboratoires chauds spéciaux, au contraire de ce qui arrive pour une exploitation convenable de réacteurs conçus pour l'essai des matériaux, la production des radioisotopes, etc..

2. Essais des matériaux: la bonne marche d'un réacteur d'essai de matériaux impose des conditions assez strictes et suppose l'existence de tout un ensemble de services auxiliaires:

- a) installations pour la conception et la construction des éléments requis pour chaque expérience;
- b) installations pour monter les éléments et pour s'assurer que l'ensemble peut être facilement introduit dans le canal choisi pour l'irradiation;
- c) connexion entre l'expérience en cours et la salle de contrôle général du réacteur, sans oublier le contrôle de l'expérience elle-même et de son incidence sur le fonctionnement du réacteur;
- d) installations pour le démontage des éléments irradiés lors de l'expérience et pour l'observation préliminaire des matériaux irradiés;
- e) laboratoire de haute activité avec cellules chaudes pour l'analyse approfondie des matériaux irradiés;
- f) installations pour la décontamination des éléments ou appareils irradiés;
- g) connexion facile et sûre pour le transport du matériel irradié entre le réacteur et les laboratoires à haute activité.

Les premières conclusions du groupe de travail "Réacteurs à haut flux", formé à l'initiative de la Commission d'Euratom, mettent en évidence l'absence pure et simple d'installations connexes à plusieurs réacteurs d'essais de matériaux existant dans la Communauté. Le tableau 3 illustre suffisamment cette situation. En conclusion, on peut dire que, si le nombre des réacteurs utilisables maintenant ou dans le proche avenir pour les essais de matériaux sur le territoire de la Communauté est au moins égal à 8, leur exploitation totale, au moment de leur mise en service, sera pratiquement impossible par suite du manque de laboratoires et d'installations annexes.

3. Essais sur la pureté nucléaire des matériaux: les besoins concernent surtout des oscillateurs de pile et des appareils électroniques adéquats. Les besoins d'installations annexes sont très inférieurs à ceux qui apparaissent sous le point 2.

4. Etudes de réseaux: les besoins concernent moins les laboratoires auxiliaires à structure complexe que les locaux pour le montage et le démontage des expériences. Le stockage du combustible irradié et utilisé pour l'étude des réseaux ne pose pas de problème particulier vu sa très faible activité.

5. Production de radio-isotopes: La demande croissante d'isotopes radio-actifs et l'expansion de leur production dans les réacteurs de la Communauté ont une importance qu'on ne saurait sous-estimer. Les réacteurs utilisés à cet effet doivent pouvoir disposer des services auxiliaires suivants:

- a) installations pour la préparation des échantillons, ceux-ci étant séparés en deux groupes selon qu'il s'agit d'une irradiation de matériaux inactifs ou déjà radioactifs (regonflage de sources);
- b) laboratoires de moyenne ou de haute activité pour un éventuel traitement chimique des matériaux irradiés;
- c) installations pour la préparation des échantillons irradiés;
- d) service de conditionnement pour les expéditions.

Les locaux figurant sous a) et plus particulièrement sous b) et c) doivent comporter des dispositifs complets d'aération et de manipulation à distance d'un type très similaire aux dispositifs requis pour les essais de matériaux.

Les Centres français de Saclay, Fontenay-aux-Roses et Marcoule, qui sont pour l'instant les plus importants producteurs d'isotopes de la Communauté, disposent d'un équipement qui répond à ces conditions.

6. Expériences exponentielles: Pour effectuer des expériences exponentielles en utilisant un réacteur comme source de neutrons, il est commode de disposer d'une colonne thermique verticale. A cet égard, les réacteurs à uranium naturel-graphite sont particulièrement favorables en raison de leurs grandes dimensions et de la possibilité qu'ils offrent d'"héberger" l'ensemble de l'expérience sans modifications de structure pour le support d'un poids important.

Pour l'instant, le réacteur ER-1 est le seul dans la Communauté à remplir ces conditions, ce qui n'a pas empêché des expériences exponentielles d'être montées auprès d'autres réacteurs.

7. Enseignement et formation pratique: Les réacteurs de recherche et d'essai de matériaux fonctionnent en général suivant un programme qui ne permet pas des arrêts et des mises en marches fréquentes. De plus, leur conception ne permet pas toujours leur utilisation rationnelle comme outil de démonstration. C'est pourquoi plusieurs types de réacteurs ont été conçus spécialement à des fins didactiques: parmi ceux-ci il convient de citer les réacteurs installés à l'Université de Berlin et à l'Ecole Polytechnique de Milan. Toutefois, il est évident que d'autres réacteurs de recherche de la Communauté peuvent être et sont utilisés pour l'enseignement et la formation de spécialistes.

*

*

*

Les caractéristiques techniques principales que nous avons pu obtenir au sujet des réacteurs de recherche en fonctionnement ou en construction dans la Communauté sont mentionnées dans la description individuelle de chacun de ces réacteurs.

Tableau 1 - Classement des réacteurs de recherche en fonction de leur puissance thermique (max.)

	U naturel graphite	U naturel D ₂ O	U légère- ment enri- chi - D ₂ O	U enrichi H ₂ O	Piscine	Piscine modifiée	U enrichi D ₂ O (CP-5)	MTR	Homogène (WB)	Homogène (Pu)
50 MW								BR-2 (4)		
25 MW										
20 MW			3					HFR		
15 MW			EL 3							
10 MW		FR-2								
5 MW										
					RS-1 Avo- gadro (2) MERLIN (Stetter- nich 1)(3) Hambourg (2) CAMEN (2)					
4 MW										
2.5 MW		EL-2								
1 MW		-			Münich Mélusine Triton					

Tableau 1 - Classement des réacteurs de recherche en fonction de leur puissance thermique (max.) - suite)

	U naturel graphite	U naturel D ₂ O	U légèrement enrichi - D ₂ O	U enrichi H ₂ O	Piscine	Piscine modifiée	U enrichi D ₂ O (CP-5)	MTR	Homogène (WB)	Homogène (Pu)
150 kW		ZOE								
100 kW					HOR					
50 kW									Francfort Berlin Ecole Pol. de Milan	
15 kW										
1 W		Aquilon (1)								Proserpine
0				Alizé		Minerve			Arnhem	

NOTES : (1) Puissance maxima 100 W, pendant de courtes périodes.
 (2) Puissance initiale 1 MW.
 (3) Puissance initiale 2 MW.
 (4) Puissance initiale 25 MW.

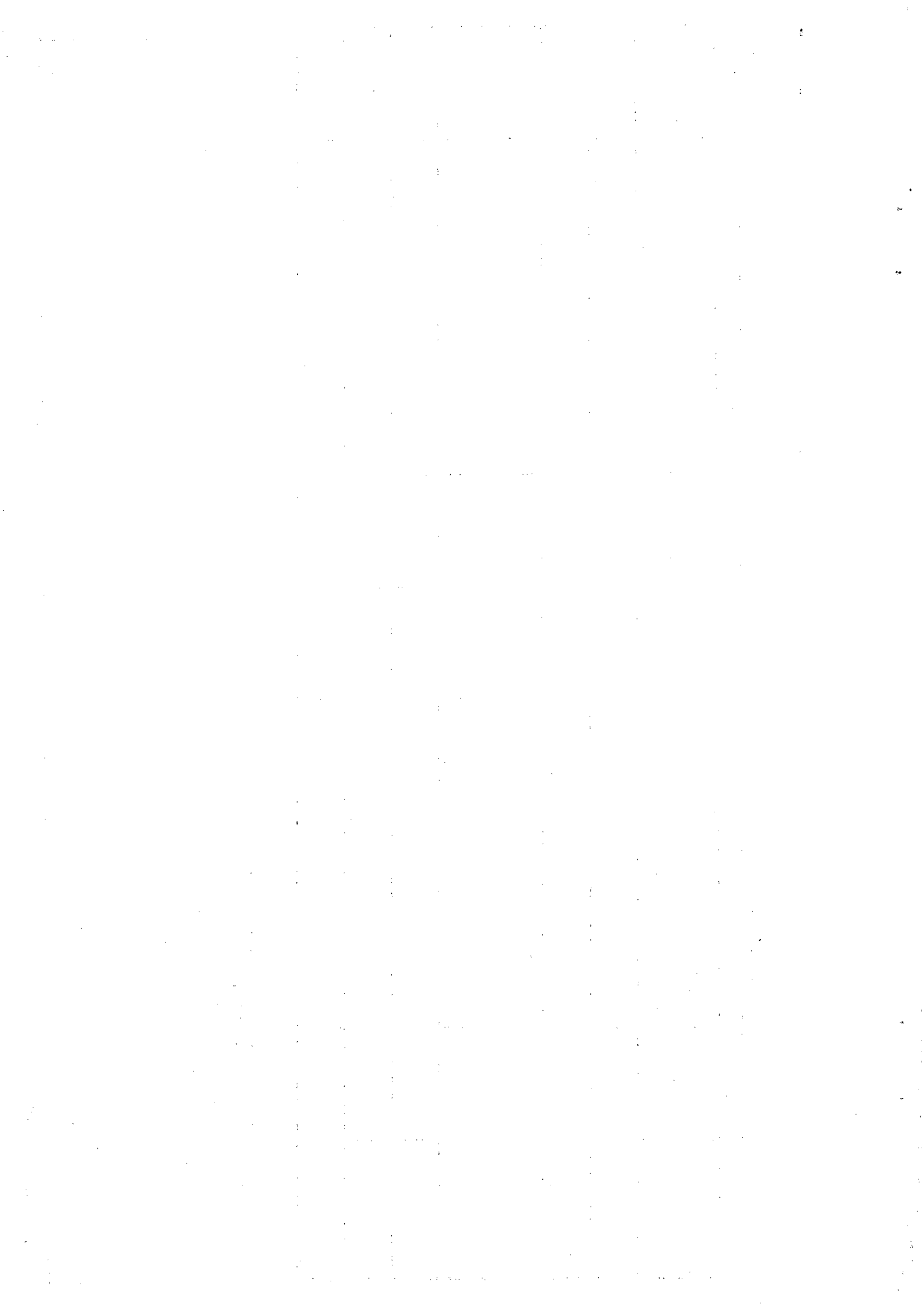


Tableau 2 - Classement des réacteurs de recherche en fonction de leur flux neutronique lent (max.)

Flux max. de neutrons thermiques (n/cm ² sec)	U naturel graphite	U naturel D ₂ O	U légèrement enrichi D ₂ O	U enrichi H ₂ O	Piscine	Piscine modifiée	U enrichi D ₂ O (CP-5)	MTR	Homogène (WB)	Homogène (Pu)
6.2 x 10 ¹⁴								BR-2		
2.6 x 10 ¹⁴								HFR		
10 ¹⁴			EL-3				DIDO (Stettin) Ispra-1			
5 x 10 ¹³					MERLIN (Stettin)					
3.2 x 10 ¹³					Hambourg					
3 x 10 ¹³	Karlsruhe									
2 x 10 ¹³					RS 1-Avogadro					
10 ¹³	EL-2				Mélusine Triton CAMEL					

Tableau 2 - Classement des réacteurs de recherche en fonction de leur flux neutronique lent (Max.) - suite.

Flux max. de neutrons thermiques (n/cm ² sec)	U naturel graphite	U naturel D ₂ O	U légèrement enrichi D ₂ O	U enrichi H ₂ O	Piscine	Piscine modifiée	U enrichi D ₂ O (CP-5)	MTR	Homogène (WB)	Homogène (Pu)
6.6 x 10 ¹²					Münich					
2.1 x 10 ¹²	ER-1									
1.1 x 10 ¹²					HOR					
10 ¹²									Ecole polytechnique de Milan	
10 ¹²		ZOE							Frankfort Berlin	
10 ¹¹						Minerve				
5 x 10 ⁷										Proserpine
10 ⁷		Aquilon								
Faible				Alizé					Arnhem (?)	



Tableau 3 - Réacteurs à haut flux et leurs installations annexes.

Centre	Mol (Belgique)	Stetternich (Allemagne)	Stetternich (Allemagne)	Karlsruhe (Allemagne)	Saclay (France)	Ispra (Italie)	Saluggia (Italie)	Petten (Pays-Bas)
Réacteur	BR-2	MELLIN Stetternich 1	DIDO Stetternich 2	FR 2	EL 3	Ispra 1	RS 1- Avogadro	HFR
Date de criticité	premier semestre 1960	prévue pour 1959	prévue entre 1960 et 1961	prévue pour 1959/1960	4 juillet 1957	prévue pour mars 1959	prévue vers juin 1959	prévue pour 1959
Hall d'assemblage des expériences avec mise en pile	en construction atteignant au réacteur			existe loin du réacteur	en construction près du réacteur	pas envisagé pour le moment	en construction près du réacteur	en construction
Cellule (-s) de démontage	1 cellule + 2 cellules d'observation			1 cellule	envisagé		1 cellule (prévue pour 1960)	1 cellule
Connexion des expériences avec le panneau de contrôle du réacteur	oui (peu de renseignements)			oui (6 renseignements)	oui (1 renseignement)	?	facilement réalisable	?
Mode de transport des matériaux irréguliers et distance à parcourir	sous eau transfert direct			cercueil de plomb 150 m	cercueil 200 m		wagonnet et monte-charriage télécommandés 10-15 m	dans des containers protégés
Laboratoire(-s) chaud(-s)	à l'étude		à l'étude	à l'étude	existe	pas envisagé pour le moment	en projet	

1. Désignation : BR-1
2. Emplacement : Mol
3. Propriétaire : Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire (C.E.N.)
4. Fournisseurs principaux : de nationalité belge
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) : 11 mai 1956
6. Type : uranium naturel-graphite
- Utilisation : recherches de physique; production de radio-isotopes

7. Puissance thermique

totale	{	a) initiale	:	4 MW		
		b) de fonctionnement	:	4 MW		
		c) maxima	:			
spéci- fique	{	/g U-235	{	d) moyenne	:	21.8 W
				e) maxima	:	
	{	/cm ³	{	f) moyenne	:	2.85 W
				g) maxima	:	
	{	/cm ²	{	h) maxima à la surface des	:	
				éléments de combustible :	:	

8. Flux neutronique thermique

moyen	{	a) coeur	:	10^{12} n/cm ² sec
		b) colonne thermique	:	
		c) irradiation facilities	:	
maxim.	{	d) coeur	:	2.1×10^{12} n/cm ² sec
		e) colonne thermique	:	
		f) irradiation facilities	:	

9. Flux neutronique rapide

moyen	{	a) coeur	:	
		b) irradiation facilities	:	
maxim.	{	c) coeur	:	
		d) irradiation facilities	:	

10. Combustible

- a) type et forme du combustible : uranium métallique naturel en barreaux cylindriques
 b) masse totale : 19.7 t
 c) masse fissile : 138 kg
 d) enrichissement : -
 e) dimensions des éléments combustibles : \varnothing 25.4 x 204 mm
 f) nombre d'éléments combustibles : 520 x 23
 g) type et épaisseur du gainage (cladding) : aluminium 1 mm (bouts : 5 mm)

11. Contrôle

- a) type du contrôle : contrôle-sécurité-réglage fin
 b) dimensions des barres de contrôle :
 c) nombre de barres de contrôle : 10 barres de contrôle grossier
 6 barres de sécurité
 1 barre de réglage fin
 d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur

: graphite

13. Réflecteur

:

14. Ecran biologique: béton à base de barytine :
densité 3.4 g/cm³; épaisseur : 2.10 m15. Dimensions du coeur: 6.66 x 6.84 x 6.84 m³ (massif de graphite)16. Dimensions totales du réacteur

: poids du réacteur proprement dit : 4500 t

17. Températures maxima dans le réacteur

- a) combustible : 250° C
 b) modérateur :
 c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

- a) nature : air en circuit ouvert
 b) portée : 50 m³/ sec
 température { c) à l'entrée : 6° C
 d) à la sortie : 68° C (moyen), 80° C (chenal central)
 pression { e) à l'entrée : atmosphérique
 f) à la sortie : atmosphérique

19. Type de bâtiment du réacteur

:

20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions :

- 1 colonne diffusante verticale 1800 x 1920 mm² longueur 1800 mm
 - 1 colonne diffusante horizontale 2160 x 2160 mm² longueur 1800 mm
 - 1 chambre d'expérience biologique (sommet du réacteur) 1500 x 1900 x 2100 mm³
 - 1 chambre d'expériences physiques (sous le réacteur)
 - 1 chambre d'expériences technologiques (sous le réacteur)
- (des irradiations γ peuvent être effectuées dans le chenal hydraulique associé au réacteur sous une épaisseur d'eau de 3 m. Les dimensions de ce bassin sont de 21.40 x 1.67 m)

21. Irradiation facilities

Type, nombre, dimensions et possibilités

Canaux qui traversent le réacteur de part en part

- 3 ϕ 80 verticaux (
 - 29 ϕ 80 horizontaux (
 - 15 carrés de 100 x 100 mm² horizontaux (
 - 3 carrés de 180 x 180 mm² horizontaux (
 - 1 carré de 240 x 240 mm² horizontal (
- 200-300 chenaux d'uranium inutilisés situés sur la périphérie du noyau

Canaux qui atteignent le plan médian du réacteur

- 12 ϕ 80 verticaux (
- 1 ϕ 80 horizontal (

Canaux qui se limitent au réflecteur de graphite

- 6 ϕ 80 horizontaux (
- 1 canal carré de 180 x 180 mm² horizontal (

Canaux qui se limitent au blindage de béton

- 14 ϕ 80 horizontaux (
 - 2 ϕ 200 horizontaux (
 - 4 canaux carrés de 100 x 100 mm² horizontaux (
 - 6 ϕ 40 horizontaux (
 - 2 dispositifs d'irradiations externes du type "autonome"
- (Une boucle à gaz est installée en pile pour étudier les produits de fission)

22. Données physiques

a) k_{∞}	:	1.082
b) η	:	1.321
c) ϵ	:	1.028
d) f	:	0.907
e) p	:	0.879
f) B_m^2	:	$1.229 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$
g) k_{exc}	:	
h) période propre du réacteur	:	
i) coefficient de vide	:	
j) coefficient de température	:	
k) vie moyenne des neutrons	:	$1.4 \times 10^{-3} \text{ sec}$

1. Désignation : BR-2
2. Emplacement : Mol
3. Propriétaire : Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire (C.E.N.)
4. Fournisseurs principaux : Nuclear Development Corporation of America (N.D.A.), U.S.A.
5. Date de criticité (ou situation fin 1958) : prévue pour le premier semestre 1960
6. Type : modèle MTR (Uranium-Béryllium-Eau légère)
Utilisation : recherches de physique - essais de matériaux -
 : production de radioisotopes -
7. Puissance thermique
- | | | | | | | |
|-------------------|---|--|---|------------|---|---------|
| totale | { | a) initiale | : | 25 MW | | |
| | | b) de fonctionnement | : | 50 MW | | |
| | | c) maxima | : | | | |
| spéci-
fique | { | /g U-235 | { | d) moyenne | : | 12.5 kW |
| | | | | e) maxima | : | |
| | | / cm ³ | { | f) moyenne | : | 3.75 kW |
| | | | | g) maxima | : | |
| / cm ² | { | h) maxima à la surface des
éléments de combustibles | : | 380 W | | |
8. Flux neutronique thermique
- | | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|--|
| moyen | { | a) coeur | : | 4.6×10^{14} n/cm ² sec |
| | | b) colonne thermique | : | |
| | | c) irradiation facilities | : | 1.2×10^{14} n/cm ² sec |
| maxim. | { | d) coeur | : | 6.2×10^{14} n/cm ² sec |
| | | e) colonne thermique | : | |
| | | f) irradiation facilities | : | |
9. Flux neutronique rapide
- | | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|--|
| moyen | { | a) coeur | : | 1.0×10^{15} n/cm ² sec |
| | | b) irradiation facilities | : | |
| maxim. | { | c) coeur | : | 2.4×10^{15} n/cm ² sec |
| | | d) irradiation facilities | : | |

10. Combustible

- a) type et forme du combustible : Uranium métallique enrichi en alliage avec de l'aluminium - 6 tubes concentriques
- b) totale :
- c) masse fissile : 4 kg U-235
- d) enrichissement : supérieur à 90 %
- e) dimensions des éléments combustibles : longueur 762 mm - épaisseur des tubes 1.27 mm - diamètres de 76.2 à 30 mm
- f) nombre d'éléments combustibles : 16 x 6
- g) type et épaisseur du gainage (cladding) : aluminium - 0.381 mm

11. Contrôle

- a) type de contrôle : barres de sécurité et de régulation
- b) dimensions des barres de contrôle : barres de régulation: D = 4.17 cm; $L_{tot} = 183$ cm: sect. sup. 91 cm (Cd gainé d'Al); sect. inf. 92 cm (Al) - barres de sécurité $L_{tot} =$; sect. sup. 91 cm (Cd gainé d'Al); sect. inf. (Bc)
- c) nombre des barres de contrôle : 10-15 barres de sécurité
1 barre de régulation
- d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur

: Béryllium - eau légère

13. Réflecteur

: Eau légère

14. Ecran biologique

: béton de baryte. épaisseur 2.59 m (au niveau du plan médian du réacteur)

15. Dimensions du cœur: noyau actif: H = 91.44 cm;
D = 110.04 cm -
section combustible: H=76.2cm
D= m - (avec possibilité d'augmenter H)16. Dimensions totales du réacteur

:

17. Température maxima dans le réacteur

a) combustibles	:	182°C
b) modérateur	:	
c) réflecteur	:	

18. Fluide de refroidissement

a) nature	:	eau légère déminéralisée
b) portée	:	106 m ³ /m
température {	c) à l'entrée	: 40.6°C
	d) à la sortie	: 47.2°C
pression {	e) à l'entrée	: 12.6 kg/cm ²
	f) à la sortie	: 2.6 kg/cm ²

19. Type de bâtiment du réacteur

: bâtiment étanche aux gaz
dépression admissible :
1 kg/cm²

20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions

21. Irradiation facilities

Type, nombre, dimensions et possibilités

Chenaux d'irradiation dans la cuve BR-2 : tous les chenaux dans la cuve de la pile sont verticaux ou faiblement inclinés. L'angle maximum d'inclinaison avec la verticale est de 10°42'

1 ∅ 203, vertical, contre la matrice ; 4 ∅ 203, à la périphérie de la matrice jusqu'à 13 ∅ 84,2, dans la matrice ; jusqu'à 25 ∅ 84,2, dans la matrice
10 ∅ 50,1, à la périphérie de la matrice ; 4 à 6 ∅ 25,4, dans un chenal de ∅ 50,1 à la périphérie du noyau ; 10 à 15 ∅ 33 à 76,2, au centre d'un élément combustible

Chenaux d'irradiation à l'extérieur de la cuve : tous les tubes sont horizontaux

5 ∅ 305, tubes radiaux à 7,5 cm sous le plan médian du noyau de la pile, fond face au noyau

4 ∅ 305, tubes tangentiels, deux au sommet du noyau, deux au bas du noyau

1. Désignation :
2. Emplacement : Garching bei München
3. Propriétaire : Land de Bavière
4. Fournisseurs principaux : American Machine & Foundry (AMF), USA
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) : en service (31 octobre 1957)
6. Type : piscine
- Utilisation : recherche
7. Puissance thermique
- | | | | | |
|------------|---|----------------------|--|------|
| totale | { | a) initiale | : | 1 MW |
| | | b) de fonctionnement | : | |
| | | c) maxima | : | |
| spécifique | { | /g U-235 | d) moyenne | : |
| | | | e) maxima | : |
| | | /cm ³ | f) moyenne | : |
| | | | g) maxima | : |
| | | /cm ² | h) maxima à la surface des éléments de combustible | : |
8. Flux neutronique thermique
- | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|
| moyen | { | a) coeur | : |
| | | b) colonne thermique | : |
| | | c) irradiation facilities | : |
| maxim. | { | d) coeur | : |
| | | e) colonne thermique | : |
| | | f) irradiation facilities | : |
9. Flux neutronique rapide
- | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|
| moyen | { | a) coeur | : |
| | | b) irradiation facilities | : |
| maxim. | { | c) coeur | : |
| | | d) irradiation facilities | : |
- : 5×10^{13} n/cm² sec

10. Combustible

- a) type et forme du combustible : U métal.enrichi-plaques UAl_4+Al
- b) masse totale :
- c) masse fissile : 4.28 kg (masse critique 3.58 kg)
- d) enrichissement : 20 %
- e) dimensions des éléments combustibles :
- f) nombre d'éléments combustibles :
- g) type et épaisseur du gainage (cladding):

11. Contrôle

- a) type de contrôle : barres à base de carbure de bore et d'acier
- b) dimensions des barres de contrôle :
- c) nombre de barres de contrôle : 4 barres de sécurité à base de carbure de bore
1 barre de contrôle en acier
- d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur

: eau légère

13. Réflecteur

: eau légère

14. Ecran biologique

: eau légère-plomb-béton à base de borite-béton normal

15. Dimensions du coeur

:

16. Dimensions totales du réacteur

:

17. Températures maxima dans le réacteur

- a) combustible : 77° C (à la surface du comb.)
- b) modérateur :
- c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

- a) nature : eau légère
- b) portée : 3500 l/min
- température { c) à l'entrée :
d) à la sortie : 32° C
- pression { e) à l'entrée :
f) à la sortie :

19. Type de bâtiment du réacteur

:

20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions

1 colonne thermique $1.20 \text{ m}^2 \times 1.20 \text{ m}$ 21. Irradiation facilities

Type, nombre, dimensions et possibilités

6 canaux d'irradiation \emptyset 15 cm

1 canal d'irradiation

1 canal pneumatique \emptyset 10 cm1 "facility" pour rayons γ 22. Données physiques

- a) k_{∞} :
 - b) η :
 - c) ξ :
 - d) f :
 - e) p :
 - f) B_m^2 :
 - g) k_{exc} :
 - h) période propre du réacteur :
 - i) coefficient de vide :
 - j) coefficient de température :
 - k) vie moyenne des neutrons :
-

1. Désignation :
2. Emplacement : Geesthacht bei Hamburg
3. Propriétaire : Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt m.b.H., Hamburg
4. Fournisseurs principaux : Babcock and Wilcox, U.S.A.
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) : En service (novembre 1958)
6. Type : Piscine
- Utilisation : Recherches
7. Puissance thermique
- | | | | | |
|------------|---|----------------------|---|------|
| totale | { | a) initiale | : | 1 MW |
| | | b) de fonctionnement | : | 5 MW |
| | | c) maxima | : | |
| spécifique | { | /g U-235 | d) moyenne | : |
| | | | e) maxima | : |
| | | /cm ³ | f) moyenne | : |
| | | | g) maxima | : |
| | { | /cm ² | h) maxima à la surface des éléments de combustible: | : |
8. Flux neutronique thermique
- | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|
| moyen | { | a) coeur | : |
| | | b) colonne thermique | : |
| | | c) irradiation facilities | : |
| maxim. | { | d) coeur | : |
| | | e) colonne thermique | : |
| | | f) irradiation facilities | : |
9. Flux neutronique rapide
- | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|
| moyen | { | a) coeur | : |
| | | b) irradiation facilities | : |
| maxim. | { | c) coeur | : |
| | | d) irradiation facilities | : |
- : 6.7 x 10¹³ n/cm² sec

10. Combustible

- a) type et forme du combustible : U métallique (alliage de U-Al) type MTR
- b) masse totale : 3.85 kg (alliage U-Al)
- c) masse fissile :
- d) enrichissement : 20 %
- e) dimensions des éléments combustibles :
- f) nombre des éléments combustibles :
- g) type et épaisseur du gainage (cladding) :

11. Contrôle

- a) type de contrôle : barres de contrôle et de sécurité à base de bore
- b) dimensions des barres de contrôle :
- c) nombre des barres de contrôle : 3 barres de sécurité;
1 barre de contrôle
- d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur

: eau légère

13. Réflecteur

: eau légère ou graphite

14. Ecran biologique

: eau légère - béton à base de barite - béton normal - plomb - fer

15. Dimensions du coeur

:

16. Dimensions totales du réacteur

:

17. Températures maxima dans le réacteur

- a) combustible : 78°C à la surface du combustible
- b) modérateur :
- c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

- a) nature : eau naturelle dans un échangeur de chaleur (1er circuit);
eau légère dans un échangeur de chaleur et une tour de refroidissement (2ème circuit)
- b) portée :
- température { c) à l'entrée :
d) à la sortie : 46 °C
- pression { e) à l'entrée :
f) à la sortie :

19. Type de bâtiment du réacteur20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions : Une colonne thermique $1.5 \text{ m}^2 \times 1.5 \text{ m}$

21. Irradiation facilities

7 canaux d'irradiation radiaux $\varnothing 150 \text{ cm}$
4 canaux d'irradiation tangentiels $\varnothing 150 \text{ cm}$ (couplés deux à deux)
2 canaux d'irradiation radiaux $\varnothing 200 \text{ cm}$
4 canaux d'irradiation pneumatiques $\varnothing 38 \text{ cm}$
1 ouverture pour irradiation de grands ensembles d'appareillage
par neutrons rapides et radiations

22. Données physiques

a) k_{∞} :
b) η :
c) ξ :
d) f :
e) p :
f) B_m^2 :
g) k_{exc} :
h) période propre du réacteur :
i) coefficient de vide :
j) coefficient de température :
k) vie moyenne des neutrons :

1. Désignation : FRF (Forschungsreaktor Frankfurt/Main)
2. Emplacement : Frankfurt (am Römerhof)
3. Propriétaire : Land de Hesse
4. Fournisseurs principaux : Atomics International (North American Aviation Inc.), USA
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) : en service (10 février 1958)
6. Type : homogène à solution
- Utilisation : recherche
7. Puissance thermique
- | | | | | | |
|-----------------|---|----------------------|--|-------|------|
| totale | { | a) initiale | : | | |
| | | b) de fonctionnement | : | 50 kW | |
| | | c) maxima | : | | |
| spéci-
fique | { | /g U-235 | d) moyenne | : | 50 W |
| | | | e) maxima | : | |
| | | /cm ³ | f) moyenne | : | |
| | | | g) maxima | : | |
| | | | h) maxima à la surface des éléments de combustible | : | |
8. Flux neutronique thermique
- | | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|--------------------------------------|
| moyen | { | a) coeur | : | |
| | | b) colonne thermique | : | |
| | | c) irradiation facilities | : | |
| maxim. | { | d) coeur | : | env. 10^{12} n/cm ² sec |
| | | e) colonne thermique | : | |
| | | f) irradiation facilities | : | |
9. Flux neutronique rapide
- | | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|---|
| moyen | { | a) coeur | : | |
| | | b) irradiation facilities | : | |
| maxim. | { | c) coeur | : | env. 2×10^{12} n/cm ² sec |
| | | d) irradiation facilities | : | |

10. Combustible

- a) type et forme du combustible : UO_2SO_4 en solution aqueuse
b) masse totale :
c) masse fissile : 1.8 kg (masse critique 1.6 kg)
d) enrichissement : 20 %
e) dimensions des éléments combustibles :
f) nombre d'éléments combustibles :
g) type et épaisseur du gainage (cladding):

11. Contrôle

- a) type de contrôle : barres
b) dimensions des barres de contrôle :
c) nombre de barres de contrôle : 4 barres à base de carbure de bore
d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur

: eau légère

13. Réflecteur

: graphite

14. Ecran biologique

: béton lourd additionné de brocalcite et de magnétite

15. Dimensions du coeur

:

16. Dimensions totales du réacteur

:

17. Températures maxima dans le réacteur

- a) combustible :
b) modérateur :
c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

- a) nature : eau légère en circuit fermé (1er et 2e circuits); installation de refroidissement (3e circ.)
b) portée :
température { c) à l'entrée :
 d) à la sortie :
pression { e) à l'entrée :
 f) à la sortie :

19. Type de bâtiment du réacteur

:

20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions

- 1 colonne thermique horizontale $1.50 \text{ m}^2 \times 1.50 \text{ m}$
- 1 colonne thermique verticale $\varnothing 40 \text{ cm}$

21. Irradiation facilities

Type, nombre, dimensions et possibilités

- 5 canaux horizontaux
- 4 canaux verticaux
- 1 canal central
- 2 canaux pneumatiques
- installation pour irradiation dans l'espace situé sous la pile

22. Données physiques

- a) k_{∞} : 1.22
 - b) η : 1.32
 - c) ϵ : 1.035
 - d) f : 0.969
 - e) p : 0.924
 - f) Bm^2 :
 - g) k_{exc} : 22 %
 - h) période propre du réacteur :
 - i) coefficient de vide :
 - j) coefficient de température :
 - k) vie moyenne des neutrons :
-

1. Désignation : FRB (Forschungsreaktor Berlin)
2. Emplacement : Wannsee bei Berlin
3. Propriétaire : Sénat de Berlin
4. Fournisseurs principaux : "Atomics International" (North American Aviation Inc.), U.S.A.
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) : en service (27 juillet 1958)
6. Type : homogène à solution
- Utilisation : recherche

7. Puissance thermique

totale	{	a) initiale	:
		b) de fonctionnement	: 50 kW
		c) maxima	:

spé- fici- fique	{	/g U-235	d) moyenne	:
			e) maxima	:
		/cm ³	f) moyenne	:
g) maxima	:			
	{	/cm ²	h) maxima à la surface des éléments combustibles	:

8. Flux neutronique thermique

moyen	{	a) coeur	:
		b) colonne thermique	:
		c) irradiation facilities	:
maxim.	{	d) coeur	: 10 ¹² n/cm ² sec
		e) colonne thermique	:
		f) irradiation facilities	:

9. Flux neutronique rapide

moyen	{	a) coeur	:
		b) irradiation facilities	:
maxim.	{	c) coeur	: 2 x 10 ¹² n/cm ² sec
		d) irradiation facilities	:

10. Combustible

- a) type et forme du combustible : UO_2SO_4 en solution aqueuse
 b) masse totale :
 c) masse fissile : 1.8 kg (U-235)
 d) enrichissement : 20 %
 e) dimensions des éléments combustibles :
 f) nombre d'éléments combustibles :
 g) type et épaisseur du gainage (cladding):

11. Contrôle

- a) type de contrôle : barres à base de carbure de bore
 b) dimensions des barres de contrôle :
 c) nombre de barres de contrôle : 4 barres; chacune contrôle environ 1.2 % de réactivité
 d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur

: eau légère

13. Réflecteur

: graphite

14. Ecran biologique: béton lourd ($d = 3.7 \text{ g/cm}^3$, avec addition de Fl_3O_4 et $Ca_2B_6O_{11}$)15. Dimensions du coeur

:

16. Dimensions totales du réacteur

:

17. Températures maxima dans le réacteur

- a) combustible : solution du combustible : env. 30-80°C; catalyseur : env. 100-260°C
 b) modérateur :
 c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

- a) nature : eau légère en circuit fermé (1er circuit); eau légère en circuit ouvert (2ème circuit)
 b) portée :
 température { c) à l'entrée :
 d) à la sortie :
 pression { e) à l'entrée :
 f) à la sortie :

19. Type de bâtiment du réacteur

:

20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions

21. Irradiation facilities

Type, nombre, dimensions et possibilités

22. Données physiques

- a) k_{∞} :
 - b) λ :
 - c) ξ :
 - d) f :
 - e) p :
 - f) Bm^2 :
 - g) k_{exc} :
 - h) période propre du réacteur :
 - i) coefficient de vide :
 - j) coefficient de température :
 - k) vie moyenne des neutrons :
-

1. Désignation : MERLIN (Medium Energy Research Light Water
Moderated Industrial Nuclear Reactor)
2. Emplacement : Stetternich bei Jülich
3. Propriétaire : Land de Rhénanie du Nord-Westphalie
4. Fournisseurs principaux : AEI-John Thompson Nuclear Energy Cy, G.B.
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) : prévue pour 1959
6. Type : piscine
- Utilisation : recherche
7. Puissance thermique
- | | | | | | |
|-----------------|---|----------------------|---|------|---|
| totale | { | a) initiale | : | 2 MW | |
| | | b) de fonctionnement | : | | |
| | | c) maxima | : | 5 MW | |
| spé-
cifique | { | /g U-235 | d) moyenne | : | |
| | | | e) maxima | : | |
| | | /cm ³ | f) moyenne | : | |
| | | | g) maxima | : | |
| | | /cm ² | h) maxima à la surface des
éléments combustibles | | : |
8. Flux neutronique thermique
- | | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|--|
| moyen | { | a) coeur | : | |
| | | b) colonne thermique | : | |
| | | c) irradiation facilities | : | |
| maxim. | { | d) coeur | : | 5×10^{13} n/cm ² sec |
| | | e) colonne thermique | : | |
| | | f) irradiation facilities | : | |
9. Flux neutronique rapide
- | | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|--|
| moyen | { | a) coeur | : | |
| | | b) irradiation facilities | : | |
| maxim. | { | c) coeur | : | 2×10^{14} n/cm ² sec |
| | | d) irradiation facilities | : | |

10. Combustible

- a) type et forme du combustible : U métallique en plaques type
MTR-Alliage U + Al - 49 éléments
- b) masse totale :
c) masse fissile : 6.9 kg
d) enrichissement : plus de 90 %
e) dimensions des éléments combustibles :
f) nombre d'éléments combustibles :
g) type et épaisseur du gainage (cladding): aluminium

11. Contrôle

- a) type du contrôle : barres de sécurité - barre de
contrôle grossier et fin
- b) dimensions des barres de contrôle :
c) nombre de barres de contrôle : 2 barres de sécurité, 1 barre de
contrôle grossier, 1 barre de
contrôle fin
- d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur :13. Réflecteur :14. Ecran biologique : eau légère - plomb - béton15. Dimensions du coeur :16. Dimensions totales du réacteur :17. Températures maxima dans le réacteur

- a) combustible : 45° à la surface des éléments
combustibles
- b) modérateur :
c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

- a) nature : eau légère en circuit fermé
(1er circuit), eau légère en
tour de refroidissement (2ème
circuit)
- b) portée : 3 m³/min (1er circuit)
- température { c) à l'entrée :
d) à la sortie :
- pression { e) à l'entrée :
f) à la sortie :

19. Type de bâtiment du réacteur :

20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions

2 colonnes thermiques 1350 x 350 mm (f.t. : 2×10^{13} n/cm² sec)21. Irradiation facilities

type, nombre, dimensions et possibilités

Canaux borgnes horizontaux, radiaux7 ϕ 1501 ϕ 3001 de section carrée 75 x 75 mm² ayant une longueur de 600 mm
(f.t. : 5×10^{13} n/cm²; f.r. 2×10^{14} n/cm² sec)2 de 75 x 150 mm²Canaux transversaux tangentiels horizontaux2 ϕ 15022. Données physiques

- | | |
|-------------------------------|---|
| a) k_{∞} | : |
| b) η | : |
| c) ϵ | : |
| d) f | : |
| e) p | : |
| f) B_m^2 | : |
| g) k_{exc} | : |
| h) période propre du réacteur | : |
| i) coefficient de vide | : |
| j) coefficient de température | : |
| k) vie moyenne des neutrons | : |

1. Désignation : DIDO ($D_2O = DDO =$ eau lourde)
2. Emplacement : Stetternich bei Jülich
3. Propriétaire : Land de Rhénanie du Nord-Westphalie
4. Fournisseurs principaux : Head Wrightson Processes Ltd, Grande Bretagne
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) : prévue pour 1960/1961
6. Type : eau lourde (CP-5)
- Utilisation : essai de matériaux
7. Puissance thermique
- | | | | | |
|-----------------|---|----------------------|---|---|
| totale | { | a) initiale | : | |
| | | b) de fonctionnement | : | |
| | | c) maxima | : 10 MW | |
| spéci-
fique | { | /g U-235 | { d) moyenne | : |
| | | | e) maxima | : |
| | { | /cm ³ | { f) moyenne | : |
| | | | g) maxima | : |
| | { | /cm ² | { h) maxima à la surface des
éléments combustibles | : |
8. Flux neutronique thermique
- | | | | |
|--------|---|---------------------------|-----------------------------------|
| moyen | { | a) coeur | : |
| | | b) colonne thermique | : |
| | | c) irradiation facilities | : |
| maxim. | { | d) coeur | : 10^{14} n/cm ² sec |
| | | e) colonne thermique | : |
| | | f) irradiation facilities | : |
9. Flux neutronique rapide
- | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|
| moyen | { | a) coeur | : |
| | | b) irradiation facilities | : |
| maxim. | { | c) coeur | : |
| | | d) irradiation facilities | : |

10. Combustible

- a) type et forme du combustible : alliage U enrichi-Al
(type MTR)
- b) masse totale :
- c) masse fissile :
- d) enrichissement : supérieur à 90 %
- e) dimensions des éléments combustibles : boîte de section carrée (environ 60 x 60 mm²); long. du matériel actif : env. 600 mm; longueur totale : 1700 mm
- f) nombre d'éléments combustibles : 25
- g) type et épaisseur du gainage (cladding): aluminium

11. Contrôle

- a) type de contrôle : plaques de régulation type signal ferroviaire
- b) dimensions des barres de contrôle :
- c) nombre des barres de contrôle :
- d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur: D₂O13. Réflecteur: D₂O - graphite14. Ecran biologique

: plomb-fer-béton

15. Dimensions du coeur

: cuve d'aluminium

16. Dimensions totales du réacteur

: prisme à 10 faces latérales; diamètre : 6.7 m; haut. : 11.6 m

17. Températures maxima dans le réacteur

- a) combustibles :
- b) modérateur :
- c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

- a) nature : D₂O à circuit fermé (1er circuit)
H₂O passant dans une tour de refroidissement (2ème circuit)
- b) portée :
- température { c) à l'entrée
d) à la sortie :
- pression { e) à l'entrée
f) à la sortie :

19. Type de bâtiment du réacteur

: édifice étanche aux gaz

20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions

1 colonne thermique 1500 x 1500 mm² (f.t. : 10¹² n/cm² sec)
 9 colonnes thermiques 96 x 96 mm² (f.t. : 10¹² n/cm² sec)

21. Irradiation facilitiesCanaux horizontaux fixes circulaires jusqu'au réflecteur D₂O

1 ∅ 240 (f.t. : 8 x 10¹³ n/cm² sec)
 1 ∅ 144 (f.t. : 8 x 10¹³ n/cm² sec)
 6 ∅ 96 (f.t. : 7 x 10¹³ n/cm² sec)

Canaux horizontaux fixes circulaires dans le réflecteur en graphite10 ∅ 144 (f.t. : 1.5 x 10¹³ n/cm² sec)Canal horizontal fixe traversant le réflecteur D₂O96 x 48 (en mm) (f.t. : 8 x 10¹³ n/cm² sec)Canaux verticaux amovibles circulaires jusqu'au réflecteur D₂O

4 x 144 (f.t. : 8 x 10¹³ n/cm² sec)
 5 x 96 (f.t. : 5 x 10¹³ n/cm² sec)
 9 x 48 (f.t. : 9 x 10¹³ n/cm² sec)

Canaux verticaux amovibles circulaires dans le réflecteur en graphite

2 ∅ 240 (f.t. : 4 x 10¹² n/cm² sec)
 6 x 144 (f.t. : 4 x 10¹² n/cm² sec)
 2 x 96 (f.t. : 4 x 10¹² n/cm² sec)

2 canaux horizontaux fixes à section rectangulaire dans le réflecteur en graphite à la base192 x 288 mm² (f.t. : 10¹³ n/cm² sec)22. Données physiques

a) k_{∞} :
 b) μ :
 c) ξ :
 d) f :
 e) p :
 f) B_m^2 :
 g) k_{exc} :
 h) période propre du réacteur :
 i) coefficient de vide :
 j) coefficient de température :
 k) vie moyenne des neutrons :

1. Désignation : FR-2 (Forschungsreaktor Karlsruhe)
2. Emplacement : Leopoldshafen bei Karlsruhe
3. Propriétaire : Kernreaktor Bau- und Betriebs GmbH, Karlsruhe
4. Fournisseurs principaux : Kernreaktor Bau- und Betriebs GmbH, Karlsruhe
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) : prévue pour 1959/1960
6. Type : hétérogène à uranium naturel, à eau lourde
Utilisation : recherches, essai de matériaux, production d'isotopes
7. Puissance thermique

totale	{	a) initiale	:	12 MW (combustible en forme				
		b) de fonctionnement	:	de barres)				
		c) maxima	:	25 MW (combustible de forme tubulaire)				
spé- fici- fique	{	/g U-235	{	d) moyenne	:	340 W		
				e) maxima	:			
		/cm ³	{	f) moyenne	{	g) maxima	:	4 W
							:	
				/cm ²	{	h) maxima à la surface des :		
éléments de combustible :		90 W						
8. Flux neutronique thermique

moyen	{	a) coeur	:	7.5×10^{12} n/cm ² sec
		b) colonne thermique	:	
		c) irradiation facilities	:	
maxim.	{	d) coeur	:	3×10^{13} n/cm ² sec (dans le canal central)
		e) colonne thermique	:	
		f) irradiation facilities	:	
9. Flux neutronique rapide

moyen	{	a) coeur	:	2×10^{13} n/cm ² sec
		b) irradiation facilities	:	
maxim.	{	c) coeur	:	
		d) irradiation facilities	:	

10. Combustible

- a) type et forme du combustible : U naturel en barreaux cylindriques
- b) masse totale : 5 t
- c) masse fissile : 35 kg
- d) enrichissement :
- e) dimensions des éléments combustibles : Diam. 3.2 cm - long. 216 cm
- f) nombre des éléments combustibles : 158 (max. 196)
- g) type et épaisseur du gainage (cladding) : Al IS - 0.1 cm - 3 ailettes

11. Contrôle

- a) type de contrôle :
- b) dimensions des barres de contrôle :
- c) nombre des barres de contrôle :
- d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur

: eau lourde 17.8 t (dans la cuve - 23 t (total))

13. Réflecteur

: eau lourde (voir n° 12)

14. Ecran biologique

:

15. Dimensions du coeur

: 11.5 m³ (noyau actif)
19.3 m³ (cuve du noyau actif en aluminium)

16. Dimensions totales du réacteur

:

17. Températures maxima dans le réacteur

:

- a) combustibles : 350° C (maximum)
- b) modérateur : 50° C (maximum)
30° C (en moyenne)
- c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

- a) nature : eau lourde
- b) portée : 330 m³/min.
- température { c) à l'entrée : 36° C
d) à la sortie : 45° C
- pression { e) à l'entrée :
f) à la sortie :

19. Type de bâtiment du réacteur

:

20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions

Canaux verticaux	2 canaux 200 x 200 x 1300 mm ³	(4 x 10 ¹¹ n/cm ² sec)
	2 canaux 200 x 200 x 1300 mm ³	(1 x 10 ¹¹ n/cm ² sec)
	2 canaux 200 x 200 x 1300 mm ³	(2 x 10 ¹¹ n/cm ² sec)
Canaux horizontaux	1 canal 400 x 600 x 2100 mm ³	(4 x 10 ¹¹ n/cm ² sec)
	2 canaux 200 x 200 x 2100 mm ³	(4 x 10 ¹¹ n/cm ² sec)
	2 canaux 100 x 100 x 2100 mm ³	(4 x 10 ¹¹ n/cm ² sec)
	1 canal 200 x 200 x 1700 mm ³ (ce canal est tangentiel)	(4 x 10 ¹¹ n/cm ² sec)

A la surface extérieure de la colonne thermique : 1 x 10⁸ n/cm² sec21. Irradiation facilities

Canaux borgnes horizontaux :

2 ∅ 290	(f.t. : 3 x 10 ¹² n/cm ² sec) (f.r. : 2 x 10 ¹² n/cm ² sec)	Ces canaux se trouvent dans le réflecteur
5 ∅ 134	(f.t. : 3 x 10 ¹² n/cm ² sec) (f.r. : 2 x 10 ¹² n/cm ² sec)	Ces canaux pénètrent dans le réflecteur
3 ∅ 132	(f.t. : 1,7 x 10 ¹³ n/cm ² sec) (f.r. : 0,8 x 10 ¹³ n/cm ² sec)	Ces canaux pénètrent dans le coeur actif à section rectangulaire

Canaux borgnes verticaux :

2 ∅ 130	(f.t. : 1,4 x 10 ¹³ n/cm ² sec) (f.r. : 0,8 x 10 ¹³ n/cm ² sec)	
41 ∅ 30	(f.t. : 0,6 + 1,7 x 10 ¹³ n/cm ² sec) (f.r. : 0,2 + 0,8 x 10 ¹³ n/cm ² sec)	Ces canaux sont distribués dans le coeur et peuvent servir à la production d'isotopes

Canaux transversaux horizontaux

2 ∅ 55	(f.t. : 1,7 x 10 ¹³ n/cm ² sec) (f.r. : 0,8 x 10 ¹³ n/cm ² sec)	
1 ∅ 55	(f.t. : 1 x 10 ¹³ n/cm ² sec) (f.r. : 5 x 10 ¹² n/cm ² sec)	Ce canal est tangentiel

Canaux transversaux verticaux :

1 ∅ 130	(f.t. : 3 x 10 ¹³ n/cm ² sec) (f.r. : 2 x 10 ¹² n/cm ² sec)	Ce canal sera par la suite élargi à un ∅ 200
---------	--	--

22. Données physiques

a)	k_{∞}	:	1.223
b)	β	:	1.32
c)	β	:	1.035
d)	β	:	0,969
e)	ρ	:	0.924
f)	B_{in}^2	:	$4.5565 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$
g)	k_{exc}	:	0.108
h)	période propre du réacteur	:	10^{-2} sec
i)	coefficient de vide	:	
j)	coefficient de température	:	$-2.20 \times 10^{-4} \text{ } \delta \text{ k}/^{\circ}\text{C}$
k)	vie moyenne des neutrons	:	$10^{-3} \text{ sec (environ)}$

1. Désignation : (ZOE) EL 1 (Eau Lourde 1)
2. Emplacement : (Fontenay-aux-Roses) Châtillon
3. Propriétaire : Commissariat à l'Energie Atomique (C.E.A.)
4. Fournisseurs principaux : de nationalité française
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) : 15 décembre 1958
6. Type : uranium naturel-eau lourde
- Utilisation : recherche
7. Puissance thermique
- | | | | | | |
|-----------------|---|----------------------|---|--------|--------|
| totale | { | a) initiale | : | | |
| | | b) de fonctionnement | : | 150 kW | |
| | | c) maxima | : | | |
| spéci-
fique | { | /g U-235 | d) moyenne | : | 12 W |
| | | | e) maxima | : | |
| | | /cm ³ | f) moyenne | : | 1.25 W |
| | | | g) maxima | : | |
| | | | h) maxima à la surface des
éléments de combustible | : | |
8. Flux neutronique thermique
- | | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|---------------------------------|
| moyen | { | a) coeur | : | |
| | | b) colonne thermique | : | |
| | | c) irradiation facilities | : | |
| maxim. | { | d) coeur | : | 10^{12} n/cm ² sec |
| | | e) colonne thermique | : | |
| | | f) irradiation facilities | : | |
9. Flux neutronique rapide
- | | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|--|
| moyen | { | a) coeur | : | |
| | | b) irradiation facilities | : | |
| maxim. | { | c) coeur | : | |
| | | d) irradiation facilities | : | |

10. Combustible

- a) type et forme du combustible : U nat. en barres cylindriques
- b) masse totale : 1.9 t
- c) masse fissile : 13.3 kg
- d) enrichissement :
- e) dimensions des éléments combustibles : Diam. = 3.6 cm - Long. = 155 cm
- f) nombre d'éléments combustibles : 65
- g) type et épaisseur du gainage (cladding):

11. Contrôle

- a) type de contrôle :
- b) dimensions des barres de contrôle :
- c) nombre des barres de contrôle :
- d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur : eau lourde13. Réflecteur :14. Ecran biologique :15. Dimensions du coeur :16. Dimensions totales du réacteur :17. Températures maxima dans le réacteur

- a) combustible :
- b) modérateur :
- c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

- a) nature : eau lourde
- b) portée : 0.16 m³/min

température { c) à l'entrée :
 d) à la sortie :pression { e) à l'entrée : pression atmosphérique
 f) à la sortie : pression atmosphérique19. Type de bâtiment du réacteur :

20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions

21. Irradiation facilities

Type, nombre, dimensions et possibilités

22. Données physiques

- a) k_{∞} :
 - b) β :
 - c) β :
 - d) f :
 - e) p :
 - f) B_{ln}^2 :
 - g) k_{exc} :
 - h) période propre du réacteur :
 - i) coefficient de vide :
 - j) coefficient de température :
 - k) vie moyenne des neutrons :
-

1. Désignation : EL 2 (Eau Lourde 2)
2. Emplacement : Saclay
3. Propriétaire : Commissariat à l'Energie Atomique (C.E.A.)
4. Fournisseurs principaux : de nationalité française
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) : 21 octobre 1952
6. Type : U naturel et eau lourde
Utilisation : recherche et essai de matériaux
7. Puissance thermique
- | | | | | | |
|------------------------|---|----------------------|---|----------|--------|
| totale | { | a) initiale | : | | |
| | | b) de fonctionnement | : | | |
| | | c) maxima | : | 2.500 kW | |
| spé-
fici-
fique | { | /g U-235 | d) moyenne | : | 119 W |
| | | | e) maxima | : | |
| | | /cm ³ | f) moyenne | : | 15.8 W |
| | | | g) maxima | : | |
| | | | h) maxima à la surface des
éléments de combustible | : | |
8. Flux neutronique thermique
- | | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|---------------------------------|
| moyen | { | a) coeur | : | |
| | | b) colonne thermique | : | |
| | | c) irradiation facilities | : | |
| maxim. | { | d) coeur | : | 10^{13} n/cm ² sec |
| | | e) colonne thermique | : | |
| | | f) irradiation facilities | : | |
9. Flux neutronique rapide
- | | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|--|
| moyen | { | a) coeur | : | |
| | | b) irradiation facilities | : | |
| maxim. | { | c) coeur | : | |
| | | d) irradiation facilities | : | |

10. Combustible

- a) type et forme du combustible : U naturel en barres cylindriques
- b) masse totale : 3 t
- c) masse fissile : 21 kg
- d) enrichissement :
- e) dimensions des éléments combustibles : $\varnothing 2.6$ cm - longueur: 52 cm
- f) nombre des éléments combustibles : 135 x 4
- g) type et épaisseur du gainage (cladding) : magnésium

11. Contrôle

- a) type de contrôle :
- b) dimensions des barres de contrôle :
- c) nombre des barres de contrôle :
- d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur : eau lourde13. Réflecteur : eau lourde - graphite14. Ecran biologique :15. Dimensions du coeur :16. Dimensions totales du réacteur :17. Températures maxima dans le réacteur

- a) combustibles :
- b) modérateur :
- c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

- a) nature : CO_2
- b) portée : $67^2 \text{ m}^3/\text{min}$
- température { c) à l'entrée :
d) à la sortie : 140 °C
- pression { e) à l'entrée : 8 kg/cm^2
f) à la sortie : 8 kg/cm^2

19. Type de bâtiment du réacteur

20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions

1 colonne thermique: 1.80 m x 1.80 m x 2.30 m

21. Irradiation facilities

21 canaux horizontaux cylindriques qui atteignent la paroi extérieure de la cuve

40 canaux verticaux cylindriques d'un diamètre de 8.2 cm

22. Données physiques

- a) k_{∞} :
- b) η :
- c) ϵ :
- d) f :
- e) p :
- f) B_m^2 :
- g) k_{exc} :
- h) période propre du réacteur :
- i) coefficient de vide :
- j) coefficient de température :
- k) vie moyenne des neutrons :

1. Désignation : EL 3 (Eau Lourde 3)
2. Emplacement : Saclay
3. Propriétaire : "Commissariat à l'Energie Atomique" (C.E.A.)
4. Fournisseurs principaux : "Chantiers de l'Atlantique" et "France-Atome"
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) : 4 juillet 1957
6. Type Utilisation : Uranium légèrement enrichi et eau lourde
7. Puissance thermique
- | | | | | |
|-------------------|--|---------------------------|-------------|---|
| totale | { | a) initiale | : | |
| | | b) de fonctionnement | : 13 000 kW | |
| | | c) maxima | : 18 000 kW | |
| spé-
fique | { | /g U-235 | d) moyenne | : |
| | | | e) maxima | : |
| | | / cm ³ | f) moyenne | : |
| | | | g) maxima | : |
| / cm ² | h) maxima à la surface des
éléments de combustibles | : 233.5 W/cm ² | | |
8. Flux neutronique thermique
- | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|
| moyen | { | a) coeur | : |
| | | b) colonne thermique | : |
| | | c) irradiation facilities | : |
| maxim. | { | d) coeur | : 10 ¹⁴ n/cm ² sec. (dans le canal) |
| | | e) colonne thermique | : |
| | | f) irradiation facilities | : |
9. Flux neutronique rapide
- | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|
| moyen | { | a) coeur | : |
| | | b) irradiation facilities | : |
| maxim. | { | c) coeur | : |
| | | d) irradiation facilities | : |

10. Combustible

- a) type et forme du combustible : Uranium légèrement enrichi en tubes
- b) masse totale :
- c) masse fissile :
- d) enrichissement : 1.35 %
- e) dimensions des éléments combustibles : 4 tubes ($D_{int} = 22$ mm ; $D_{ext} = 29$ mm) fermés aux extrémités par des pastilles d' U_{nat} (épaisseur 4 mm) $L_{av. past.} = 320$ mm - longueur totale de l'élément de combustible (avec séparateur) = 1382 mm
- f) nombre d'éléments combustibles :
- g) type et épaisseur du gainage (cladding) : Aluminium - Epaisseur 1 mm - tube extérieur (à l'intérieur duquel sont enfilés les tubes d'uranium) : $D_{int} = 40$ mm ; $D_{ext} = 43$ mm -

11. Contrôle

- a) type de contrôle : 6 barres de compensation à base de carbure de bore : $D_{int} = 28$ mm ; $D_{ext} = 36$ mm ; $L = 1400$ mm -
- b) dimensions des barres de contrôle : 2 barres de régulation à base de carbure de bore : $D_{int} = 28$ mm ; $D_{ext} = 36$ mm ; $L = 230$ mm -
- c) nombre des barres de contrôle : 3 barres de sécurité à base de carbure de bore : $D_{int} = 28$ mm ; $D_{ext} = 36$ mm ; $L = 900$ mm -
- d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur

: Eau lourde (épaisseur 40 cm) - Graphite (épaisseur 60 cm - latéralement et au fond)

13. Réflecteur

:

14. Ecran biologique

:

15. Dimensions du coeur

: Cuve : $D_{int} = 2.56$ m ; $H = 4.075$ m -
noyau actif : $D = 1.83$ m
 $H = 1.35$ m

16. Dimensions totales du réacteur : prisme à 14 faces latérales -
Diamètre du cylindre circon-
scrit 10m - hauteur 7 m -
17. Températures maxima dans le réacteur
- a) combustible : 120°C
b) modérateur :
c) réflecteur :
18. Fluide de refroidissement
- a) nature : Eau lourde
b) portée : 1000 m³/h
- température { c) à l'entrée : 40°C (pour une température
 { d) à la sortie :
 { e) à l'entrée :
pression { f) à la sortie :
19. Type de bâtiment du réacteur : bâtiment étanche aux gaz
(surpression: 1 mm_{H₂O};
dépression: 10 cm_{H₂O})
20. Colonnes thermiques
- Nombre et dimensions : 1 colonne thermique
2000 x 2000 x 2000 mm³
21. Irradiation facilities
- Type, nombre, dimensions et possibilités :
- a) Dispositifs qui atteignent le noyau actif :
1 canal central vertical ϕ 182 - 2 zones pour autant de cellules indé-
pendantes
Dispositifs qui pénètrent dans le réflecteur D₂O:
10 canaux ϕ 150 horizontaux, radiaux ; 2 canaux ϕ 250 horizontaux radiaux;
8 canaux pour isotopes ϕ 30, L = 1200 mm, verticaux ; 2 canaux convertis-
seurs verticaux ϕ 270(?) -
- b) Dispositifs qui pénètrent dans le réflecteur en graphite :
22 canaux pour isotopes ; 1 canal ϕ 30, L = 100 mm sans - 4 canaux
 ϕ ... pneumatiques, 2 canaux ϕ ... verticaux (grand diamètre); 4 canaux
horizontaux tangentiels 190 x 190 x 3160 mm³ ; 2 canaux ϕ horizontaux
sécants
Dispositifs situés dans le bouclier biologique:
1 grande cavité 2000 x 2000 x 2000 mm³
2 cavités d'environ 1 m³ (f.t.= 10⁸ n/cm²sec; f.r.= 10⁷ n/cm²sec)

22. Données physiques

	Réacteur froid et	Réacteur chaud	Réacteur chaud
		sans combustion	avec combustion
a) k_{∞}	1.4129	1.3410	1.2959
b) η	1.5469	1.4690	1.4127
c) ξ	1.014	1.014	1.014
d) f	0.9300	0.9307	0.9280
e) p_2	0.9686	0.9673	0.9673
f) B_m^2	10.4 m ⁻²	8.3 m ⁻²	7.0 m ⁻²
g) k_{exc}			
h) période propre du réacteur :			
i) coefficient du vide :			
j) coefficient de température :			
k) vie moyenne des neutrons :		1.79 x 10 ⁻³	2.00 x 10 ⁻³ sec

1. Désignation : AQUILON
2. Emplacement : Saclay
3. Propriétaire : Commissariat à l'Energie Atomique (C.E.A.)
4. Fournisseurs principaux : de nationalité française
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) : 11 août 1956
6. Type : Uranium naturel et eau lourde
- Utilisation : étude de réticules
7. Puissance thermique
- | | | | | |
|---------------|---|----------------------|---|---|
| totale | { | a) initiale | : | |
| | | b) de fonctionnement | : | |
| | | c) maxima | : 0.1 kW | |
| spé-
fici- | { | /g U-235 | d) moyenne | : |
| | | | e) maxima | : |
| | | /cm ³ | f) moyenne | : |
| | | | g) maxima | : |
| | | | h) maxima à la surface des
éléments de combustible | : |
8. Flux neutronique thermique
- | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|
| moyen | { | a) coeur | : |
| | | b) colonne thermique | : |
| | | c) irradiation facilities | : |
| maxim. | { | d) coeur | : 10 ⁷ n/cm ² sec |
| | | e) colonne thermique | : |
| | | f) irradiation facilities | : |
9. Flux neutronique rapide
- | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|
| moyen | { | a) coeur | : |
| | | b) irradiation facilities | : |
| maxim. | { | c) coeur | : |
| | | d) irradiation facilities | : |

10. Combustible

- a) type et forme du combustible : U nat. en barres cylindriques
ou en plaques
b) masse totale : 4 t
c) masse fissile : 28 kg
d) enrichissement :
e) dimensions des éléments combustibles : barres cylindriques-plaques
f) nombre d'éléments combustibles :
g) type et épaisseur du gainage (cladding): aluminium

11. Contrôle

- a) type de contrôle :
b) dimensions des barres de contrôle :
c) nombre de barres de contrôle :
d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur : eau lourde

13. Réflecteur : eau lourde - graphite

14. Ecran biologique :

15. Dimensions du coeur :

16. Dimensions totales du réacteur :

17. Températures maxima dans le réacteur

- a) combustible :
b) modérateur :
c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

- a) nature : eau lourde
b) portée : convention

température { c) à l'entrée :
d) à la sortie :

pression { e) à l'entrée : pression atmosphérique
f) à la sortie : pression atmosphérique

19. Type de bâtiment du réacteur

20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions

21. Irradiation facilities

Type, nombre, dimensions et possibilités

22. Données physiques

- a) k_{∞} :
 - b) η :
 - c) ϵ :
 - d) f :
 - e) p :
 - f) B_m^2 :
 - g) k_{exc} :
 - h) période propre du réacteur :
 - i) coefficient de vide :
 - j) coefficient de température :
 - k) vie moyenne des neutrons :
-

1. Désignation : MELUSINE
2. Emplacement : Grenoble
3. Propriétaire : Commissariat à l'Energie Atomique (C.E.A.)
4. Fournisseurs principaux : Indatom
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) : en service (juillet 1958)
6. Type : piscine
Utilisation : étude de réticules
7. Puissance thermique
- | | | | |
|---------------|---|--|----------|
| totale | { | a) initiale | : 1 MW |
| | | b) de fonctionnement | : 1 MW |
| | | c) maxima | : |
| spé-
fique | { | /g U-235 (d) moyenne | : 308 kW |
| | | (e) maxima | : 600 kW |
| | | /cm ³ (f) moyenne | : 14 W |
| | | (g) maxima | : 28 W |
| | | /cm ² (h) maxima à la surface des
éléments de combustible : | |
8. Flux neutronique thermique
- | | | | |
|--------|---|---------------------------|--|
| moyen | { | a) coeur | : |
| | | b) colonne thermique | : |
| | | c) irradiation facilities | : |
| maxim. | { | d) coeur | : 10 ¹³ n/cm ² sec |
| | | e) colonne thermique | : |
| | | f) irradiation facilities | : |
9. Flux neutronique rapide
- | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|
| moyen | { | a) coeur | : |
| | | b) irradiation facilities | : |
| maxim. | { | c) coeur | : |
| | | d) irradiation facilities | : |

10. Combustible

- a) type et forme du combustible : UAl₄ en Al (type MTR)
 b) masse totale : 19.5 kg
 c) masse fissile : 3.9 kg
 d) enrichissement : 20 %
 e) dimensions des éléments combustibles : 8.3 cm x 7.6 cm x 86.3 cm
 f) nombre des éléments combustibles : 22
 g) type et épaisseur du gainage (cladding) : aluminium - 0.7 mm

11. Contrôle

- a) type de contrôle :
 b) dimensions des barres de contrôle :
 c) nombre des barres de contrôle :
 d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur

: eau légère

13. Réflecteur

:

14. Ecran biologique

: eau légère - béton normal
 (60cm) - béton normal (1.41m)
 en correspondance des zones
 centrales et postérieures -
 béton lourd (d=3.5 g/cm³-4.65m)
 dans la zone frontale

15. Dimensions du coeur

:

16. Dimensions totales du réacteur

: Dimensions internes de la
 piscine: longueur 11 m;
 largeur: 5 m; hauteur: 8.60 m
 (permettant une protection
 de 6.50 m d'eau au-dessus
 du noyau actif).

17. Températures maxima dans le réacteur

- a) combustibles : 105 °C ("canning")
 b) modérateur :
 c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

- a) nature : eau légère (circulation
 forcée)
 b) portée : 3.3 m³/min
 température { c) à l'entrée : 30 °C
 d) à la sortie : 35 °C
 pression { e) à l'entrée : atmosphère
 f) à la sortie : atmosphère

19. Type de bâtiment du réacteur : bâtiment principal:
34 m x 20 m x 20 m -
ciment armé - construc-
tion étanche contre les
sorties d'air pollué
20. Colonnes thermiques
Nombre et dimensions :
21. Irradiation facilities
22. Données physiques
- a) k_{∞} :
 - b) η :
 - c) ξ :
 - d) f :
 - e) p :
 - f) B_m^2 :
 - g) k_{exc} :
 - h) période propre du réacteur :
 - i) coefficient de vide :
 - j) coefficient de température :
 - k) vie moyenne des neutrons :
-

1. Désignation : TRITON
2. Emplacement : (Fontenay-aux-Roses) Châtillon
3. Propriétaire : Commissariat à l'Energie Atomique (C.E.A)
4. Fournisseurs principaux : Indatom
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) : prévue avant janvier 1959
6. Type : piscine
- Utilisation : études sur la protection et sur les blindages

7. Puissance thermique

totale	{	a) initiale	:	1 MW
		b) de fonctionnement	:	1 MW
		c) maxima	:	1.2 MW
spé- fici- fique	{	/g U-235	d) moyenne	:
			e) maxima	:
		/cm ³	f) moyenne	:
			g) maxima	:
			h) maxima à la surface des éléments de combustible	:

8. Flux neutronique thermique

moyen	{	a) coeur	:
		b) colonne thermique	:
		c) irradiation facilities	:
maxim.	{	d) coeur	:
		e) colonne thermique	:
		f) irradiation facilities	:

: 10^{13} n/cm² sec

9. Flux neutronique rapide

moyen	{	a) coeur	:
		b) irradiation facilities	:
maxim.	{	c) coeur	:
		d) irradiation facilities	:

10. Combustible

- a) type et forme de combustible : UAl_4 en Al (type MTR)
- b) masse totale :
- c) masse fissile :
- d) enrichissement : 20 %
- e) dimensions des éléments combustibles :
- f) nombre d'éléments combustibles :
- g) type et épaisseur du gainage (cladding):

11. Contrôle

- a) type de contrôle :
- b) dimensions des barres de contrôle :
- c) nombre de barres de contrôle :
- d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur : eau légère

13. Réflecteur :

14. Ecran biologique : eau légère - béton normal

15. Dimensions du coeur :

16. Dimensions totales du réacteur :

17. Températures maxima dans le réacteur

- a) combustible :
- b) modérateur :
- c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

- a) nature : eau légère
- b) portée :

température { c) à l'entrée :
 d) à la sortie :

pression { e) à l'entrée :
 f) à la sortie :

19. Type de bâtiment du réacteur :

20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions

21. Irradiation facilities

Type, nombre, dimensions et possibilités

22. Données physiques

- a) k_{∞} :
- b) η :
- c) ξ :
- d) f :
- e) p :
- f) B_m^2 :
- g) k_{exc} :
- h) période propre du réacteur :
- i) coefficient de vide :
- j) coefficient de température :
- k) vie moyenne des neutrons :

N.B. Le réacteur TRITON a été construit, pratiquement, selon les mêmes conceptions que MELUSINE. On peut donc se référer, en règle générale, à ce dernier réacteur, encore que des caractéristiques moins sévères aient été imposées pour TRITON dans le domaine de la protection.

1. Désignation : MINERVE
2. Emplacement : Châtillon (Seine)
3. Propriétaire : Commissariat à l'Energie Atomique (C.E.A.)
4. Fournisseurs principaux : Seratom et Indatom
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) : prévue pour avril 1959
6. Type : piscine
- Utilisation : contrôle de la pureté des matériaux; essais de réactivité

7. Puissance thermique

- | | | | | |
|------------------------|---|----------------------|---|------------|
| totale | { | a) initiale | : | très basse |
| | | b) de fonctionnement | : | |
| | | c) maxima | : | |
| spé-
fici-
fique | { | /g U-235 | d) moyenne | : |
| | | | e) maxima | : |
| | | /cm ³ | f) moyenne | : |
| | | | g) maxima | : |
| | | | h) maxima à la surface des
éléments de combustible | : |

8. Flux neutronique thermique

- | | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|---------------------------------|
| moyen | { | a) coeur | : | |
| | | b) colonne thermique | : | |
| | | c) irradiation facilities | : | |
| maxim. | { | d) coeur | : | 10^{11} n/cm ² sec |
| | | e) colonne thermique | : | |
| | | f) irradiation facilities | : | |

9. Flux neutronique rapide

- | | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|--|
| moyen | { | a) coeur | : | |
| | | b) irradiation facilities | : | |
| maxim. | { | c) coeur | : | |
| | | d) irradiation facilities | : | |

10. Combustible
- a) type et forme du combustible : uranium enrichi
 - b) masse totale :
 - c) masse fissile :
 - d) enrichissement :
 - e) dimensions des éléments combustibles :
 - f) nombre d'éléments combustibles :
 - g) type et épaisseur du gainage (cladding) :
11. Contrôle
- a) type du contrôle :
 - b) dimensions des barres de contrôle :
 - c) nombre des barres de contrôle :
 - d) compteurs et autres instruments :
12. Modérateur : eau légère
13. Réflecteur :
14. Ecran biologique :
15. Dimensions du coeur :
16. Dimensions totales du réacteur :
17. Températures maxima dans le réacteur
- a) combustible :
 - b) modérateur :
 - c) réflecteur :
18. Fluide de refroidissement
- a) nature :
 - b) portée :
 - température { c) à l'entrée :
 - d) à la sortie :
 - pression { e) à l'entrée :
 - f) à la sortie :
19. Type de bâtiment du réacteur :

20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions :

21. Irradiation facilities

Type, nombre, dimensions et possibilités

22. Données physiques

- a) k_{∞} :
- b) η :
- c) ξ :
- d) f :
- e) p :
- f) Bm^2 :
- g) k_{exc} :
- h) période propre du réacteur :
- i) coefficient de vide :
- j) coefficient de température :
- k) vie moyenne des neutrons :

1. Désignation : PROSERPINE
2. Emplacement : Saclay
3. Propriétaire : Commissariat à l'Energie Atomique (C.E.A.)
4. Fournisseurs principaux : De nationalité française
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) : 17 mars 1958
6. Type : solution de sulfate de plutonium dans de l'eau légère

Utilisation : études sur l'emploi du plutonium

7. Puissance thermique

totale	{	a) initiale	: ~1 W
		b) de fonctionnement	:
		c) maxima	:
spé- fici-	{	/g U-235 (d) moyenne	:
		(e) maxima	:
		/cm ³ (f) moyenne	:
fique	{	(g) maxima	:
		/cm ² (h) maxima à la surface des éléments de combustible :	:

8. Flux neutronique thermique

moyen	{	a) coeur	:
		b) colonne thermique	:
		c) irradiation facilities	:
maxim.	{	d) coeur	: 5 x 10 ⁷ n/cm ² sec
		e) colonne thermique	:
		f) irradiation facilities	:

9. Flux neutronique rapide

moyen	{	a) coeur	:
		b) irradiation facilities	:
maxim.	{	c) coeur	:
		d) irradiation facilities	:

10. Combustible

- a) type et forme du combustible : Solution de sulfate de plutonium ($\text{Pu}(\text{SO}_4)_2$) dans de l'eau légère
- b) masse totale : 300 g de Pu
- c) masse fissile :
- d) enrichissement :
- e) dimensions des éléments combustibles :
- f) nombre des éléments combustibles :
- g) type et épaisseur du gainage (cladding) :

11. Contrôle

- a) type de contrôle : barres de sécurité et de réglage
- b) dimensions des barres de contrôle : barres de sécurité: tubes d'aluminium (22x25, L=800mm) remplis de carbure de bore - barres de réglage: diamètre utile = 10 mm.
- c) nombre des barres de contrôle : 2 barres de sécurité et 2 barres de réglage (régulation fine et compensation)
- d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur

: eau légère

13. Réflecteur: une couche de 27.5 cm de BeO (densité 2.95 g/cm³), empilée tout autour du noyau actif et une couche de 50 cm de graphite (densité 1.65 g/cm³), empilée tout autour du réflecteur de BeO.14. Ecran biologique

: pas prévu

15. Dimensions du coeur

: noyau actif: cuve cylindrique en acier inoxydable (zircaloy). D=250 mm, H=300 mm. Epaisseur = 1 mm. (La cuve en acier sera ensuite remplacée par une cuve en zircaloy 2)

16. Dimensions totales du réacteur

:

17. Températures maxima dans le réacteur

- a) combustibles :
 b) modérateur :
 c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

- a) nature : aucun
 b) portée :
 température (c) à l'entrée :
 (d) à la sortie :
 pression (e) à l'entrée :
 (f) à la sortie :

19. Type de bâtiment du réacteur

: bâtiment en béton bouché
 30 x 15 x 10 m³

20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions :

2. Irradiation facilities

: 3 tubes verticaux qui permettent d'accéder au milieu multiplicateur.
 1 canal radial (aboutissant contre la cuve) à section carrée 10x10 mm².
 1 canal radial (aboutissant contre la cuve) à section carrée 20x20 mm².
 2 canaux Ø 50 horizontaux circulaires traversant de part en part l'empilement de graphite.

22. Données physiques

- a) k :
 b) :
 c) :
 d) :
 e) p :
 f) β_m^2 :
 g) k_{exc} :
 h) période propre du réacteur :
 i) coefficient de vide :
 j) coefficient de température :
 k) vie moyenne des neutrons : 3.5×10^{-4} sec

1. Désignation : Alizé
2. Emplacement : Saclay
3. Propriétaire : Commissariat à l'Energie Atomique (C.E.A.)
4. Fournisseurs principaux : C.A.R.A.
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) : prévue pour février 1959
6. Type :
- Utilisation :
7. Puissance thermique
- | | | | |
|------------|---|---|---|
| totale | { | a) initiale | : |
| | | b) de fonctionnement | : |
| | | c) maxima | : |
| spécifique | { | /g U-235 (d) moyenne | : |
| | | (e) maxima | : |
| | | /cm ³ (f) moyenne | : |
| | | (g) maxima | : |
| | { | /cm ² (h) maxima à la surface des éléments de combustible | : |
8. Flux neutronique thermique
- | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|
| moyen | { | a) coeur | : |
| | | b) colonne thermique | : |
| | | c) irradiation facilities | : |
| maxim. | { | d) coeur | : |
| | | e) colonne thermique | : |
| | | f) irradiation facilities | : |
9. Flux neutronique rapide
- | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|
| moyen | { | a) coeur | : |
| | | b) irradiation facilities | : |
| maxim. | { | c) coeur | : |
| | | d) irradiation facilities | : |

10. Combustible

- a) type et forme du combustible :
- b) masse totale :
- c) masse fissile :
- d) enrichissement :
- e) dimensions des éléments combustibles :
- f) nombre des éléments combustibles :
- g) type et épaisseur du gainage (cladding) :

11. Contrôle

- a) type de contrôle :
- b) dimensions des barres de contrôle :
- c) nombre des barres de contrôle :
- d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur :13. Réflecteur :14. Ecran biologique :15. Dimensions du coeur :16. Dimensions totales du réacteur :17. Températures maxima dans le réacteur

- a) combustibles :
- b) modérateur :
- c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

- a) nature :
- b) portée :
- c) température { c) à l'entrée :
- d) à la sortie :
- { e) à l'entrée :
- f) à la sortie :

19. Type de bâtiment du réacteur :

20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions :

21. Irradiation facilities22. Données physiques

- a) k_{∞} :
- b) η :
- c) ϵ :
- d) f :
- e) p :
- f) Bm^2 :
- g) k_{exc} :
- h) période propre du réacteur :
- i) coefficient de vide :
- j) coefficient de température :
- k) vie moyenne des neutrons :

1. Désignation : Ispra-1
2. Emplacement : Ispra (Varese)
3. Propriétaire : Comitato Nazionale per le Ricerche Nucleari
4. Fournisseurs principaux : "American Car and Foundry" (U.S.A.)
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) : mars 1959
6. Type : CP-5
- Utilisation
7. Puissance thermique
- | | | | | | |
|--------|-------------------|----------------------|---|---------|---------------------------|
| totale | { | a) initiale | : | | |
| | | b) de fonctionnement | : | 5000 kW | |
| | | c) maxima | : | | |
| { | /g U-235 | { | d) moyenne | : | 2520 W/g _{U-235} |
| | | e) maxima | : | | |
| { | / cm ³ | { | f) moyenne | : | 17 W/cm ³ |
| | | g) maxima | : | | |
| { | / cm ² | { | h) maxima à la surface des éléments de combustibles | : | 20 W/cm ² |
8. Flux neutronique thermique
- | | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|--|
| moyen | { | a) coeur | : | 6.6×10^{13} n/cm ² sec |
| | | b) colonne thermique | : | |
| | | c) irradiation facilities | : | |
| maxim. | { | d) coeur | : | 10^{14} n/cm ² sec |
| | | e) colonne thermique | : | |
| | | f) irradiation facilities | : | |
9. Flux neutronique rapide
- | | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|---|
| moyen | { | a) coeur | : | |
| | | b) irradiation facilities | : | |
| maxim. | { | c) coeur | : | 10.6×10^{13} n/cm ² sec |
| | | d) irradiation facilities | : | |

10. Combustible

- a) type et forme du combustible : éléments de combustible type M.T.R.) composés de 17 plaques (environ 600 g d'U enrichi à 20 %)
- b) masse totale : 17.272 kg
- c) masse fissile : 3.428 kg U-235
- d) enrichissement : 20 % (environ)
- e) dimensions des éléments combustibles :
- f) nombre d'éléments combustibles : 19
- g) type et épaisseur du gainage : aluminium

11. Contrôle

- a) type de contrôle : 6 barres de sécurité (cylindres creux en cadmium : ϕ 54.4, L = 700 mm)
1 barre de régulation
 ϕ 54.4, L = 700 mm)
- b) dimensions des barres de contrôle :
- c) nombre des barres de contrôle :
- d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur

: eau lourde

13. Réflecteur

: eau lourde (épaisseur 22 cm, quantité 2000 kg) - Graphite (épaisseur 60 cm, quantité 23000 kg)

14. Ecran biologique: béton lourd: épaisseur moyenne 1.80 m; densité 4.7 g/cm³; poids 650 t15. Dimensions du coeur: noyau: D = 78 cm; H
cuve en aluminium :
D = 120 cm; H = cm16. Dimensions totales du réacteur

:

17. Températures maxima dans le réacteur

- a) combustibles :
- b) modérateur :
- c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

a) nature	:	Eau lourde
b) portée	:	120 kg/sec
température	{ c) à l'entrée	: 41°C
	{ d) à la sortie	: 51°C
pression	{ e) à l'entrée	:
	{ f) à la sortie	:

19. Type de bâtiment du réacteur

: Edifice cylindrique en
acier étanche aux gaz

20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions

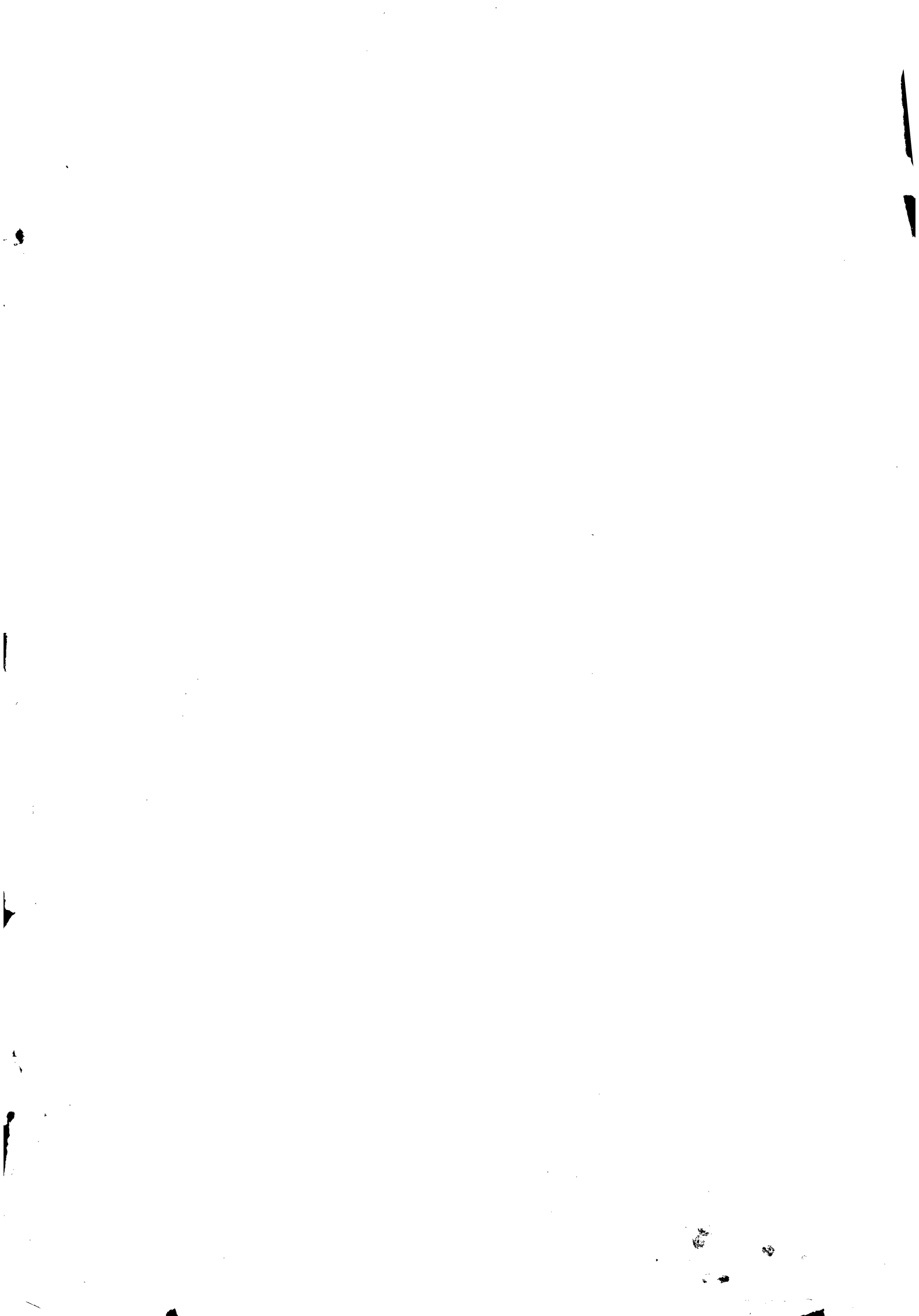
21. Irradiation facilities

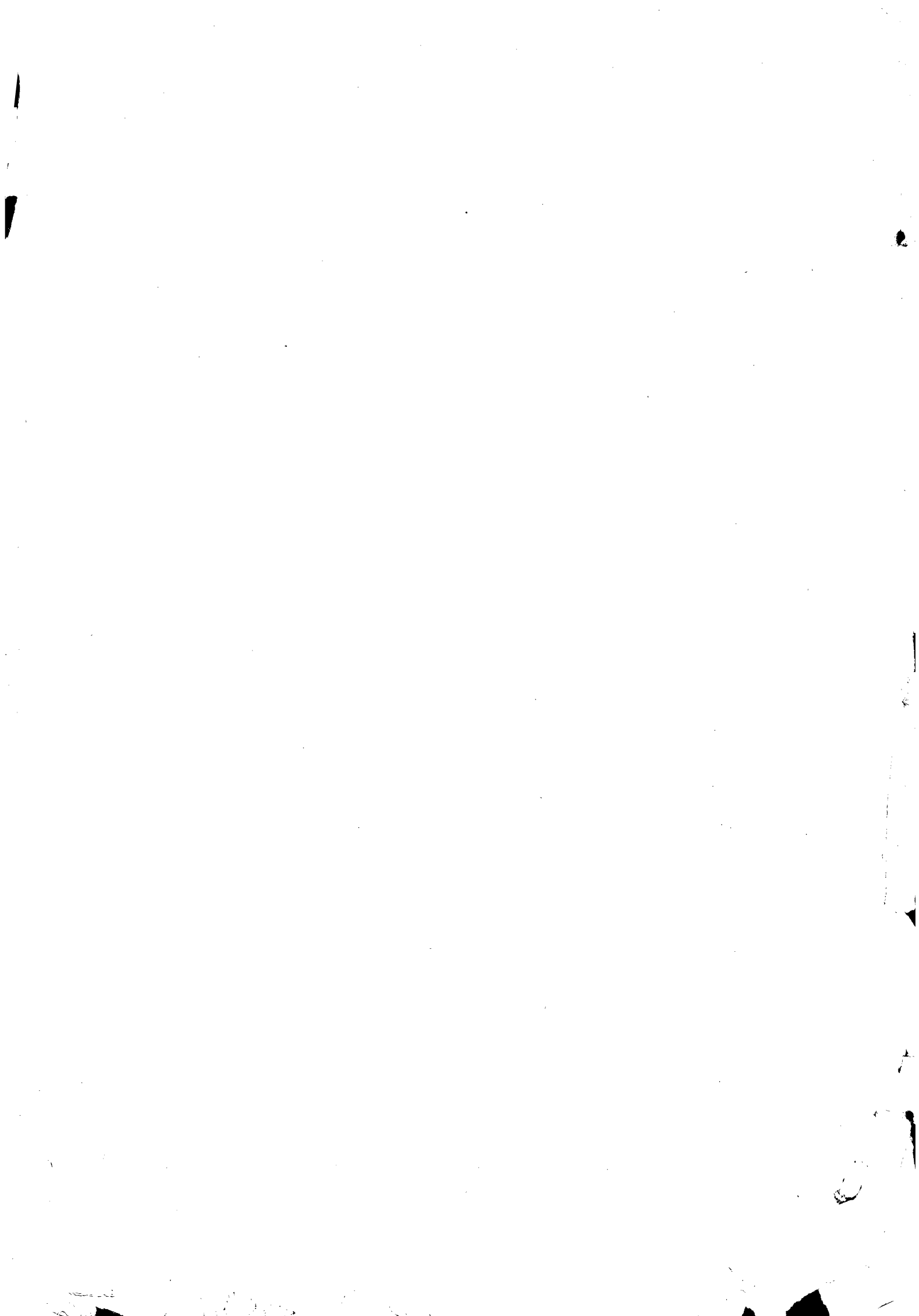
Type, nombre, dimensions et possibilités

1 canal tangentiel ϕ 305 ; 1 canal horizontal tangentiel ϕ 203 ;
6 canaux horizontaux radiaux ϕ 152 ; 6 canaux horizontaux radiaux ϕ 102 ;
2 canaux pour isotopes $310 \times 210 \text{ mm}^2$; 3 canaux pneumatiques ϕ 36 ;
4 canaux verticaux dans le réflecteur de graphite ϕ 76 ; 1 canal vertical
dans le réflecteur D_2O ϕ 152 ; 1 canal vertical central ϕ 152.
(f.t.: $8.6 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$; f.r.: $10.6 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$)

22. Données physiques

a)	:
b)	:
c)	:
d) f	:
e) p	:
f) Bm^2	:
g) k_{exc}	:
h) période propre du réacteur	:
i) coefficient du vide	:
j) coefficient de température	:
k) vie moyenne des neutrons	:





1. Designation : RS-1 Avogadro
2. Emplacement : Saluggia (Vercelli)
3. Propriétaire : SORIN
4. Fournisseurs principaux : American Machine & Foundry (A.M.F. Atomics), USA
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) : prévue vers juin 1959
6. Type : piscine
Utilisation : recherches et essais de matériaux
7. Puissance thermique

totale	{	a) initiale	:	1 MW
		b) de fonctionnement	:	5 MW
		c) maxima	:	
spéci- fique	{	/g U-235	d) moyenne	:
			e) maxima	:
		/ cm ³	f) moyenne	:
			g) maxima	:
			h) maxima à la surface des éléments de combustibles:	:
8. Flux neutronique thermique

moyen	{	a) coeur	:	6×10^{12} n/cm ² sec (à la
		b) colonne thermique	:	puissance de 1 MW)
		c) irradiation facilities	:	
maxim.	{	d) coeur	:	7.5×10^{13} n/cm ² sec (à la
		e) colonne thermique	:	puissance de 1 MW)
		f) irradiation facilities	:	
9. Flux neutronique rapide

moyen	{	a) coeur	:	2.4×10^{13} n/cm ² sec (à la
		b) irradiation facilities	:	puissance de 1 MW)
maxim.	{	c) coeur	:	
		d) irradiation facilities	:	

10. Combustible

- a) type et forme du combustible : éléments du type MTR à 18 plaques. Alliage Al-U
- b) Masse totale : 33.179 kg
- c) masse fissile : 6.586 kg U-235
- d) enrichissement : 20 % (environ)
- e) dimensions des éléments combustibles : plaques rectangulaires (15.3 x 23 cm²) contenant 75 g U (15 g U-235) chaque élément de combustible contient 6-12-18 plaques
- f) nombre d'éléments combustibles : 43
- g) type et épaisseur du gainage (cladding) : gainage d'aluminium

11. Contrôle

- a) type de contrôle : barres de sécurité et de contrôle
- b) dimensions des barres de contrôle :
- c) nombre des barres de contrôle : 5 barres de sécurité (boron) 1 barre de contrôle (acier inoxydable)
- d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur

: eau légère

13. Réflecteur

:

14. Ecran biologique

: eau légère; parois du bassin en béton

15. Dimensions du coeur

:

16. Dimensions totales du réacteur

: piscine à 3 bassins: le 1er servant aux expériences d'irradiation à l'extérieur; le 2e aux expériences de bulk shielding et le 3e aux essais d'irradiation à sec. Les parois sont en béton normal dans la partie sup. et en béton à la brite (dens. 3.5 g/cm³) dans les parties correspondant au coeur.

17. Températures maxima dans le réacteur

- a) combustible :
- b) modérateur :
- c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

a) nature	:	eau légère déminéralisée
b) portée	:	130 l/sec
température	{ c) à l'entrée	: 38°C
	{ d) à la sortie	: 47°C
pression	{ e) à l'entrée	:
	{ f) à la sortie	:

19. Type de bâtiment du réacteur

: bâtiment en forme de cylindre de béton : D = 32 m, H = 30 m. Le bâtiment est imperméable à l'air. Surpression statique admissible : 750 mm H₂O.

20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions

Colonne thermique à double accès, vertical et horizontal (f.t. $\sim 10^7$ n/cm²sec)

21. Irradiation facilities

Type, nombre, dimensions et possibilités

4 canaux horizontant ϕ - 1 canal horizontal ϕ 210 -
 1 canal horizontal ϕ 305 - 1 canal transversal ϕ 152 -
 (f.t. dans les divers canaux supérieur à 10^{13} n/cm²sec)
 1 chambre d'irradiation (avec utilisation du combustible irradié)

22. Données physiques

a) k_{∞}	:	
b) η	:	
c) ξ	:	
d) f	:	
e) p	:	
f) B_m^2	:	
g) k_{exc}	:	
h) période propre au réacteur	:	
i) coefficient de vide	:	
j) coefficient de température	:	$-1.34 \times 10^{-4} \Delta k/k^\circ C$ (entre 20 et 30°C)
k) vie moyenne des neutrons	:	5.40×10^{-5} sec

1. Désignation :
2. Emplacement : San Pietro a Grado (Livourne)
3. Propriétaire : CAMEN
4. Fournisseurs principaux : de nationalité américaine
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) :
6. Type : piscine
- Utilisation : recherches
7. Puissance thermique
- | | | | | |
|---------------|---|----------------------|---|------|
| totale | { | a) initiale | : | 1 MW |
| | | b) de fonctionnement | : | 5 MW |
| | | c) maxima | : | |
| spé-
fici- | { | /g U-235 | d) moyenne | : |
| | | | e) maxima | : |
| | | /cm ³ | f) moyenne | : |
| | | g) maxima | : | |
| | | /cm ² | h) maxima à la surface des
éléments de combustible | : |
8. Flux neutronique thermique
- | | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|---------------------------------|
| moyen | { | a) coeur | : | |
| | | b) colonne thermique | : | |
| | | c) irradiation facilities | : | |
| maxim. | { | d) coeur | : | 10^{13} n/cm ² sec |
| | | e) colonne thermique | : | |
| | | f) irradiation facilities | : | |
9. Flux neutronique rapide
- | | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|--|
| moyen | { | a) coeur | : | |
| | | b) irradiation facilities | : | |
| maxim. | { | c) coeur | : | |
| | | d) irradiation facilities | : | |

10. Combustible

- a) type et forme du combustible : éléments du type MTR
Alliage U-Al
- b) masse totale :
- c) masse fissile :
- d) enrichissement : 20 %
- e) dimensions des éléments combustibles :
- f) nombre d'éléments combustibles :
- g) type et épaisseur du gainage (cladding) :

11. Contrôle

- a) type de contrôle :
- b) dimensions des barres de contrôle :
- c) nombre des barres de contrôle :
- d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur : eau légère13. Réflecteur :14. Ecran biologique :15. Dimensions du coeur :16. Dimensions totales du réacteur :17. Températures maxima dans le réacteur

- a) combustibles : 250
- b) modérateur :
- c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

- a) nature : eau légère
- b) portée :
- température { c) à l'entrée
d) à la sortie :
- pression { e) à l'entrée
f) à la sortie :

19. Type de bâtiment du réacteur :

20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions :

21. Irradiation facilities

Type, nombre, dimensions et possibilités

22. Données physiques

- a) k_{∞} :
- b) η :
- c) ϵ :
- d) f :
- e) p :
- f) Bm^2 :
- g) k_{exc} :
- h) période propre du réacteur :
- i) coefficient de vide :
- j) coefficient de température :
- k) vie moyenne des neutrons :

1. Désignation : Réacteur du Centro di Studi Nucleari E.FERMI
2. Emplacement : Milan
3. Propriétaire : Institut Polytechnique de Milan
4. Fournisseurs principaux : Atomics International, U.S.A.
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) : prévue pour le mois de mars 1959
6. Type : L-54 - Solution de sulfate d'uranyle dans de l'eau naturelle
Utilisation principale : formation de spécialistes et recherche
7. Puissance thermique
- | | | | | |
|-----------------|---|----------------------|---|---|
| totale | { | a) initiale | : | |
| | | b) de fonctionnement | : 50 kW | |
| | | c) maxima | : | |
| spéci-
fique | { | /g U-235 | d) moyenne | : |
| | | | e) maxima | : |
| | | / cm ³ | f) moyenne | : |
| | | | g) maxima | : |
| | | | h) maxima à la surface des éléments de combustibles | : |
8. Flux neutronique thermique
- | | | | |
|--------|---|---------------------------|--|
| moyen | { | a) coeur | : |
| | | b) colonne thermique | : |
| | | c) irradiation facilities | : |
| maxim. | { | d) coeur | : > 10 ¹² n/cm ² sec |
| | | e) colonne thermique | : |
| | | f) irradiation facilities | : |
9. Flux neutronique rapide
- | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|
| moyen | { | a) coeur | : |
| | | b) irradiation facilities | : |
| maxim. | { | c) coeur | : 2 x 10 ¹² n/cm ² sec
(0.5 MeV) |
| | | d) irradiation facilities | : |

10. Combustible

- a) type et forme du combustible : solution de sulfate d'uranyle dans H₂O
- b) masse totale : 7.5 kg²
- c) masse fissile : 1.6 kg U-235 (environ)
- d) enrichissement : 20 %
- e) dimensions des éléments combustibles :
- f) nombre d'éléments combustibles :
- g) type et épaisseur du gainage (cladding):

11. Contrôle

- a) type de contrôle : barres verticales
- b) dimensions des barres de contrôle : tubes d'acier inoxydable entourant des cylindres de carbure de bore de 16 mm de diamètre
- c) nombre des barres de contrôle : 4 barres, chacune contrôlant 1.8 % de la réactivité
- d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur

: eau légère

13. Réflecteur: Graphite. Les carreaux du réflecteur constituent un bloc de 1500 x 2100 x 1500 mm³ et le poids d'environ 7 t.14. Ecran biologique: béton d'une densité 3.7 g/cm³15. Dimensions du coeur

: noyau actif : sphère de 40 cm de diamètre

16. Dimensions totales du réacteur

:

17. Températures maxima dans le réacteur

- a) combustibles : 80°C (à pleine puissance)
- b) modérateur :
- c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

- a) nature : eau légère
- b) portée :
- température { c) à l'entrée :
d) à la sortie :
- pression { e) à l'entrée :
f) à la sortie :

19. Type de bâtiment du réacteur

:

20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions

1 colonne thermique verticale de 137 cm de diamètre à sa partie supérieure
1 colonne thermique horizontale de section carrée $150 \times 150 \text{ cm}^2$
et haute de 160 cm (flux thermique : $5 \times 10^9 \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$)

21. Irradiation facilities

Type, nombre, dimensions et possibilités

3 canaux horizontaux ϕ 100 ; 4 canaux verticaux ϕ 100 ; 3 canaux horizontaux ϕ 80 ;

1 tube pneumatique droit ϕ 50 ; 1 tube pneumatique courbe ϕ 40 ; 1 tube ϕ 40 permettant d'exposer des matériaux au centre du noyau actif ;
des canaux sont ménagés en-dessous du réacteur pour l'utilisation de l'activité gamma des produits gazeux de fission

22. Données physiques

- a) k_{∞} :
- b) η :
- c) ξ :
- d) f :
- e) p :
- f) B_m^2 :
- g) k_{exc} : 3 % (à 20°C)
- h) période propre du réacteur :
- i) coefficient du vide :
- j) coefficient de température : -0,031 %/°C
- k) vie moyenne des neutrons :

1. Désignation : H.F.R.
2. Emplacement : Petten (N.H.)
3. Propriétaire : Reactor Centrum Nederland (R.C.N.)
4. Fournisseurs principaux : American Car and Foundry, U.S.A.
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) : 1959
6. Type : M.T.R.
- Utilisation : Essais de matière et recherche

7. Puissance thermique

totale { a) initiale :
 { b) de fonctionnement : 20000 kW
 { c) maxima :

spéci- { /g U-235 { d) moyenne :
 fique { e) maxima :
 { / cm³ { f) moyenne :
 { g) maxima :
 { / cm² { h) maxima à la surface des
 éléments de combustibles :

8. Flux neutronique thermique

moyen { a) coeur : 1.5×10^{14} n/cm² sec
 { b) colonne thermique :
 { c) irradiation facilities :

maxim. { d) coeur : 2.6×10^{14} n/cm² sec
 { e) colonne thermique :
 { f) irradiation facilities :

9. Flux neutronique rapide

moyen { a) coeur :
 { b) irradiation facilities :

maxim. { c) coeur : 7.8×10^{14} n/cm² sec
 { d) irradiation facilities :

10. Combustible

- a) type et forme du combustible :
b) masse totale :
c) masse fissile : 3.46 kg U-235
(charge initiale = 4.2 kg U-235)
d) enrichissement : 90 %
e) dimensions des éléments combustibles : Epaisseur alliage U-Al =
0.5 mm - épaisseur revêtement =
0.4 mm
f) nombre d'éléments combustibles : 35 éléments de combustible com-
posés chacun de 19 plaques (+ 36
éléments de réflecteur en béryl-
lium et 10 éléments de gainage
en aluminium). Dimensions élé-
ments: 7.5 x 7.5 x 100 cm)
g) type et épaisseur du gainage
(cladding) : Aluminium ; 0.4 mm

11. Contrôle

- a) type de contrôle : Longueur des barres double de
celle du noyau : première moitié
en Cd, deuxième moitié en ma-
tière fissile
b) dimensions des barres de contrôle :
c) nombre des barres de contrôle : 6 barres de contrôle, avec pos-
sibilité d'en ajouter 16 autres
d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur : eau légère13. Réflecteur :14. Ecran biologique : béton contenant de la magnétite
de densité 3.7 - 4.2 g/cm³
Epaisseur 2.7 m (minimum 1.2m)15. Dimensions du coeur : Cuve: D = 1.60 m ; H = 5.0 m ;
Epaisseur = 24 mm16. Dimensions totales du réacteur17. Températures maxima dans le réacteur

- a) combustibles :
b) modérateur :
c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

a) nature	:	eau légère (100 m ³)
b) portée	:	56.6 m ³ /mm
température	{ c) à l'entrée	: 48.9°C
	{ d) à la sortie	: 55.2°C
pression	{ c) à l'entrée	:
	{ f) à la sortie	:

19. Type de bâtiment du réacteur :20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions : colonne thermique D = 1700mm

21. Irradiation facilities

Type, nombre, dimensions et possibilités : Canaux borgnes horizontaux
 8 ϕ 170 (f.t.: $1.1 \times 10^{14} \text{n/cm}^2 \text{sec}$)
 f.r.: $0,5 \times 10^{12} \text{n/cm}^2 \text{sec}$
Canaux borgnes verticaux
 2 ϕ 250 (f.t.: $2.6 \times 10^{14} \text{n/cm}^2 \text{sec}$)
 f.r.: $7.8 \times 10^{14} \text{n/cm}^2 \text{sec}$
 1 ϕ 150 ; 1 de section
 500 x 200 mm² (1 tube en U ou
 2 tubes séparés)
Canaux hydrauliques : 2
Canaux pneumatiques : 6
 1 tube en U ϕ 70 (bras éloi-
 gnés de 300 mm)
Cavité d'essais technologiques
 D = 1700 mm

22. Données physiques

a) k_{∞}	:	
b) β	:	
c) ϵ	:	
d) f	:	
e) p	:	
f) B_m^2	:	
g) k_{exc}	:	13.2 %
h) période propre du réacteur	:	
i) coefficient de vide	:	
j) coefficient de température	:	
k) vie moyenne des neutrons	:	$7.3 \times 10^{-5} \text{ sec}$

1. Désignation : H.O.R.
2. Emplacement : Delft
3. Propriétaire : Gouvernement des Pays-Bas
4. Fournisseurs principaux : American Machine and Foundry (A.M.F. Atomics), U.S.A.
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) :
6. Type : piscine
- Utilisation : enseignement et recherche

7. Puissance thermique

totale { a) initiale : 100 kW
 { b) de fonctionnement :
 { c) maxima :

spéci- { /g U-235 { d) moyenne :
 fique { e) maxima :
 { / cm³ { f) moyenne :
 { g) maxima :
 { / cm² { h) maxima à la surface des :
 éléments de combustibles :

8. Flux neutronique thermique

moyen { a) coeur :
 { b) colonne thermique :
 { c) irradiation facilities :

maxim. { d) coeur : 1.1 x 10¹² n/cm² sec
 { e) colonne thermique :
 { f) irradiation facilities :

9. Flux neutronique rapide

moyen { a) coeur :
 { b) irradiation facilities :

maxim. { c) coeur :
 { d) irradiation facilities :

10. Combustible

- a) type et forme du combustible :
- b) masse totale :
- c) masse totale : 3.5 kg U-235
- d) enrichissement : 20 %
- e) dimensions des éléments combustibles :
- f) nombre d'éléments combustibles :
- g) type et épaisseur du gainage (cladding) :

11. Contrôle

- a) type de contrôle :
- b) dimensions des barres de contrôle :
- c) nombre des barres de contrôle :
- d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur : eau légère13. Réflecteur :14. Ecran biologique :15. Dimensions du coeur :16. Dimensions totales du réacteur :17. Températures maxima dans le réacteur :

- a) combustibles :
- b) modérateur :
- c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

- a) nature : eau légère
- b) portée :
- température { c) à l'entrée :
- { d) à la sortie :
- pression { e) à l'entrée :
- { f) à la sortie :

19. Type de bâtiment du réacteur :

20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions

21. Irradiation facilities

Type, nombre, dimensions et possibilités

22. Données physiques

- a) k_{∞} :
- b) η :
- c) ξ :
- d) f :
- e) p :
- f) B_m^2 :
- g) k :
- h) période propre du réacteur :
- i) coefficient de vide :
- j) coefficient de température :
- k) vie moyenne des neutrons :

1. Désignation :
2. Emplacement : Arnhem
3. Propriétaire : Reactor Centrum Nederland (R.C.N.) et KEMA
4. Fournisseurs principaux :
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) :
6. Type : homogène à suspension aqueuse
Utilisation : recherches pour production de puissance
7. Puissance thermique
- | | | | | | |
|------------------------|---|----------------------|--------------------------|----------------------------|---|
| totale | { | a) initiale | : | | |
| | | b) de fonctionnement | : | | |
| | | c) maxima | : | | |
| spé-
fici-
fique | { | /g U-235 | { | d) moyenne | : |
| | | | e) maxima | : | |
| | { | / cm ³ | { | f) moyenne | : |
| | | | g) maxima | : | |
| | { | / cm ² | { | h) maxima à la surface des | : |
| | | | éléments de combustibles | : | |
8. Flux neutronique thermique
- | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|
| moyen | { | a) coeur | : |
| | | b) colonne thermique | : |
| | | c) irradiation facilities | : |
| maxim. | { | d) coeur | : |
| | | e) colonne thermique | : |
| | | f) irradiation facilities | : |
9. Flux neutronique rapide
- | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|
| moyen | { | a) coeur | : |
| | | b) irradiation facilities | : |
| maxim. | { | c) coeur | : |
| | | d) irradiation facilities | : |

10. Combustible

- a) type et forme du combustible : UO_2 enrichi en suspension dans l'eau
- b) masse totale :
- c) masse fissile : 1 kg U-235
- d) enrichissement :
- e) dimensions des éléments combustibles :
- f) nombre d'éléments combustibles :
- g) type et épaisseur du gainage (cladding) :

11. Contrôle

- a) type de contrôle :
- b) dimensions des barres de contrôle :
- c) nombre des barres de contrôle :

12. Modérateur

: eau légère

13. Réflecteur

:

14. Ecran biologique

:

15. Dimensions du coeur

:

16. Dimensions totales du réacteur

:

17. Températures maxima dans le réacteur

- a) combustibles :
- b) modérateur :
- c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

- a) nature : suspension de UO_2 dans l'eau légère
- b) portée :
- température { c) à l'entrée :
- { d) à la sortie :
- pression { e) à l'entrée :
- { f) à la sortie :

19. Type de bâtiment du réacteur

:

20. Colonnes thermiques

Nombre et dimensions :

21. Irradiation facilities

Type, nombre, dimensions et possibilités

22. Données physiques

- a) k_{∞} :
- b) η :
- c) ϵ :
- d) f :
- e) p :
- f) B_m^2 :
- g) k_{exc} :
- h) période propre du réacteur :
- i) coefficient de vide :
- j) coefficient de température :
- k) vie moyenne des neutrons :

1. Désignation : SUSPOP
2. Emplacement :
3. Propriétaire : R.C.N.-K.E.M.A. Reactor Development Group
4. Fournisseurs principaux : Comprimo N.V., Amsterdam; N.V. Philips, Heindhoven
5. Date de criticalité (ou situation fin 1958) :
6. Type : Suspension de UO_2 dans H_2O
Utilisation : Etude sur les réacteurs à suspension
7. Puissance thermique
- | | | | | | | |
|-------------------|---|---|---|------------|---|--|
| totale | { | a) initiale | : | | | |
| | | b) de fonctionnement | : | 250 kW | | |
| | | c) maxima | : | | | |
| spéci-
fique | { | /g U-235 | { | d) moyenne | : | |
| | | | | e) maxima | : | |
| | | / cm ³ | { | f) moyenne | : | |
| | | | | g) maxima | : | |
| / cm ² | { | h) maxima à la surface des
éléments de combustibles: | : | | | |
8. Flux neutronique thermique
- | | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|---------------------------------|
| moyen | { | a) coeur | : | 10^{13} n/cm ² sec |
| | | b) colonne thermique | : | |
| | | c) irradiation facilities | : | |
| maxim. | { | d) coeur | : | |
| | | e) colonne thermique | : | |
| | | f) irradiation facilities | : | |
9. Flux neutronique rapide
- | | | | | |
|--------|---|---------------------------|---|--|
| moyen | { | a) coeur | : | |
| | | b) irradiation facilities | : | |
| maxim. | { | c) coeur | : | |
| | | d) irradiation facilities | : | |

10. Combustible

- a) type et forme du combustible : Suspension de UO_2 dans H_2O
(4 % UO_2 (volume); $4\% \text{ d' } UO_2$)
- b) totale :
- c) masse fissile :
- d) enrichissement : 20 %
- e) dimensions des éléments combustibles :
- f) nombre d'éléments combustibles :
- g) type et épaisseur du gainage (cladding) :

11. Contrôle

- a) type de contrôle :
- b) dimensions des barres de contrôle :
- c) nombre des barres de contrôle :
- d) compteurs et autres instruments :

12. Modérateur :13. Réflecteur : BeO et graphite14. Ecran biologique15. Dimensions du coeur : Cuve sphérique (D=30 cm)
ou cylindrique (D=28,1 cm)16. Dimensions totales du réacteur :17. Température maxima dans le réacteur

- a) combustible : 250°C
- b) modérateur :
- c) réflecteur :

18. Fluide de refroidissement

- a) nature : suspension de UO_2 dans H_2O
- b) portée : 12 m³/h
- température { c) à l'entrée : 230°C
d) à la sortie : 250°C
- pression { e) à l'entrée :
f) à la sortie : 40 kg/cm² (pression totale
du système : 60 kg/cm²)

19. Type de bâtiment du réacteur

20. Colonnes thermiques

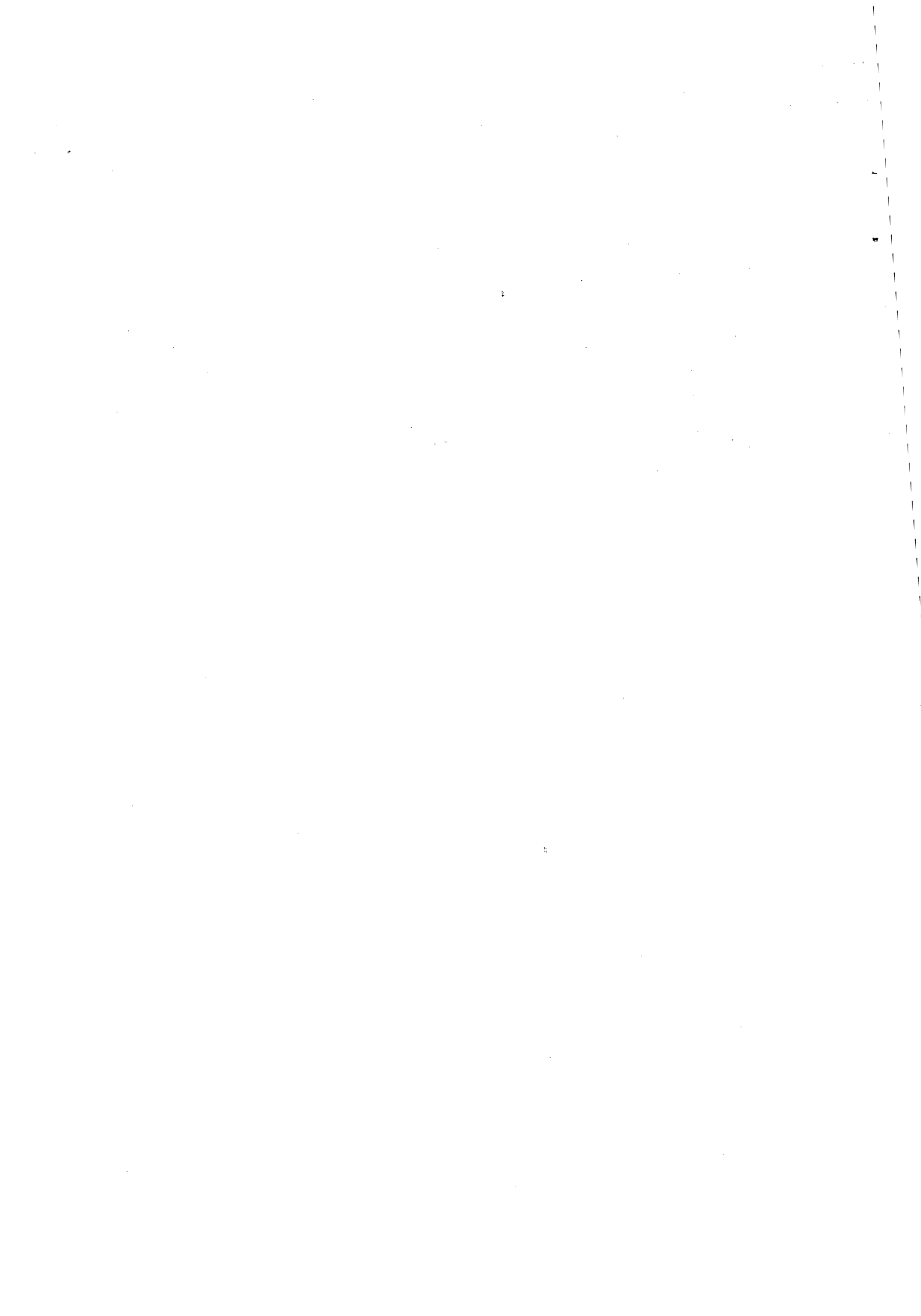
Nombre et dimensions

21. Irradiation facilities

Type, nombre, dimensions et possibilités

22. Données physiques

- a) k_{∞} :
- b) η :
- c) ϵ :
- d) f :
- e) p :
- f) Bm^2 :
- g) k_{exc} :
- h) période propre du réacteur :
- i) coefficient de vide :
- j) coefficient de température :
- k) vie moyenne des neutrons :



2. Accélérateurs à haute énergie

Les accélérateurs de particules chargées pour les hautes énergies (nous entendons une énergie de l'ordre du GeV) sont tous du type à résonance. L'accélération est toujours produite par un champ à haute fréquence. Suivant la géométrie de l'orbite on peut les diviser en accélérateurs de type synchrotron et en accélérateurs linéaires.

Dans le synchrotron le rayon de l'orbite décrite par la particule est presque constant et donc le champ magnétique est limité à une couronne circulaire, déformée éventuellement par la présence de segments rectilignes. Les particules (électrons ou protons) sont injectées avec une énergie de l'ordre du MeV et le champ magnétique augmente après l'injection. L'accélération est produite par des cavités résonantes à haute fréquence placées en plusieurs points de la trajectoire. L'énergie cédée aux particules à chaque tour doit être supérieure à celle perdue par rayonnement. La fréquence, sauf éventuellement pour une courte période initiale, doit varier proportionnellement à la vitesse. La focalisation du faisceau est produite par un gradient radial constant du champ magnétique (focalisation faible) ou par un gradient de signe alterné (focalisation forte) ou par d'autres moyens.

Dans le cas d'électrons de haute énergie, on peut obtenir des photons de haute énergie qu'on utilise pour la photoproduction de mésons. Avec des photons d'environ 1 GeV, on peut obtenir la photoproduction multiple (jusqu'à 5 pions). La photoproduction de mésons lourds et d'hypérons demande des photons d'une énergie légèrement supérieure à 1 GeV. Comme la longueur d'onde des photons de 1 GeV est de l'ordre du rayon classique de l'électron, on peut faire des études sur l'électron lui-même, ainsi que sur des phénomènes d'électrodynamique qui, au stade actuel, sont à l'état de prévisions théoriques ou qui ne sont pas suffisamment connus à des énergies aussi élevées.

Avec des faisceaux bien collimés de protons d'énergie de quelques GeV, dont la longueur d'onde associée est considérablement inférieure au rayon du noyau, on pourra faire des expériences de diffusion dont les résultats pourront fournir des renseignements sur la nature du nucléon.

On peut produire, par collisions inélastiques proton-nucléon, de nombreuses particules de haute énergie; leur distribution peut encore donner des renseignements sur la structure du nucléon. Il sera possible d'améliorer nos connaissances sur les antiparticules (antiprotons, antineutrons).

Dans les accélérateurs linéaires pour électrons, les électrons sont accélérés dans un guide d'onde à section circulaire portant des diaphragmes perforés pour réduire la vitesse de phase au dessous de c . La focalisation radiale peut être produite par un champ magnétique axial. Les énergies atteintes peuvent arriver à plusieurs GeV avec des courants moyens de l'ordre du μA . Leur utilisation est analogue à celle des synchrotrons à électrons.

Il existe dans la Communauté 2 synchrotrons à électrons (Frascati, Bonn) et 2 synchrotrons à protons (Saclay, Delft) dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 1; en construction en Allemagne (Hambourg) un synchrotron à électrons de 7,5 GeV. Les trois premiers, achevés en 1958, sont en cours de mise au point; celui de Delft sera achevé en juillet 1959. De plus, il y a en construction, également à Orsay, un accélérateur linéaire pour électrons qui atteindra une énergie finale de 2 GeV; et en projet aux Pays-Bas (Amsterdam), 1 accélérateur linéaire pour électrons qui sera construit par étapes successives pour arriver à une énergie finale de 2,5-3 GeV.

Il faut encore mentionner le grand proton synchrotron (25 GeV) en construction au CERN à Genève, auquel participent les pays de la Communauté, mais par un traité différent de celui créant l'Euratom.

En résumé, on peut dire qu'en ce qui concerne les hautes énergies, et en tenant compte de la contribution apportée dans ce domaine par les études sur le rayonnement cosmique qui sont bien avancées dans nos pays, la situation dans la Communauté est satisfaisante en ce qui concerne les appareils. Reste à voir à quel rythme ils seront utilisés une fois en pleine marche. Voici en comparaison l'état actuel de l'équipement pour les hautes énergies aux USA, Angleterre et URSS:

- USA: 2 synchrotrons à protons en fonctionnement (3 GeV, 6,2 GeV) et 3 en construction. 2 synchrotrons à électrons en fonctionnement (1,2 GeV, 1,5 GeV) et 1 en construction. 1 accélérateur linéaire pour électrons de 1 GeV, et un autre en construction.
- Angleterre: 1 synchrotron à protons 1 GeV et un autre en construction.
- URSS: 1 synchrotron à protons 10 GeV et 3 en construction - 1 synchrotron à électrons en construction.

Accélérateurs de moyenne énergie

Dans le domaine des moyennes énergies (dizaines ou centaines de MeV) on trouve pour les ions (protons, deutérons) : les cyclotrons, les synchrocyclotrons et les accélérateurs linéaires; pour les électrons: les betatrons, les microtrons et les accélérateurs linéaires. Leur utilisation peut varier, selon l'énergie, entre la plus grande partie des travaux de physique nucléaire (réactions nucléaires, études des niveaux, diffusion, photoproduction des neutrons, production des radioisotopes, etc) jusqu'à la production des pions, sans compter les applications médicales.

Le principe du cyclotron est trop connu pour qu'il soit nécessaire de le rappeler ici. On dispose dans la Communauté de 5 cyclotrons dont les caractéristiques sont données dans le tableau 5.

Dans le synchrocyclotron, la tension accélératrice a une fréquence variable qui diminue pendant l'accélération pour compenser l'augmentation relativiste de la masse des particules. La Communauté dispose de 3 machines dont les caractéristiques sont données dans le tableau 6.

Cet équipement est bien inférieur à celui que l'on trouve dans les autres pays, notamment aux Etats-Unis.

	USA	URSS	Angleterre
- cyclotrons	36	8	4
- synchrocyclotrons	8	?	2

Avec le betatron où l'accélération est produite par induction, on peut utiliser soit les électrons accélérés, soit les photons de bremsstrahlung. Plusieurs machines de ce type sont destinées à des usages médicaux.

On n'a dans la Communauté que 12 betatrons au total. En comparaison des autres pays, et particulièrement vis-à-vis des Etats-Unis, la situation de la Communauté est insuffisante. Les caractéristiques sont données dans le tableau 7.

En ce qui concerne leur utilisation, on peut ajouter aux betatrons les accélérateurs linéaires de moyenne et basse énergie. Il existe dans la Communauté 5 accélérateurs de ce type (tableau 8),

Il est à remarquer que toutes les machines existant dans la Communauté ont été construites en Europe; mais alors que pour les betatrons la production se fait -au moins partiellement- sur des bases industrielles, les cyclotrons et synchrotrons sont tous des prototypes.

Accélérateurs de basse énergie

Les accélérateurs de basse énergie (de quelques centaines de KeV à quelques MeV) sont couramment du type à tube d'accélération électrostatique: C.W. (ou assimilés), Van de Graaff (ou assimilés). Ils sont utilisés dans le domaine qui nous concerne de plus près, soit pour la spectroscopie nucléaire (le V.d.G. en particulier grâce à sa faible dispersion d'énergie), soit pour la production de neutrons. Ils sont aussi utilisés, ainsi que les accélérateurs linéaires de basse énergie pour l'injection dans les synchrotrons de haute énergie. Quant à la production, il est peut-être utile de rappeler ici l'ordre de grandeur des performances de quelques sources neutroniques (hormis les réacteurs):

<u>Sources</u>	<u>puissance (ou activité)</u>	<u>réactions utilisées</u>	<u>n/sec</u>
Ra-Be	1 Curie	${}^9\text{Be} (d,n)$	10^7
CW 250 kV	25 W	${}^3\text{H}(d,n) {}^4\text{He}$	$3 \cdot 10^{10}$
V.d.G. 2 MV	100 W	${}^9\text{Be}(d,n) {}^{10}\text{B}$	10^{11}
Cyclotron 10 MeV	1 kW	"	$3 \cdot 10^{11}$
Accél.linéaire électron/photon 6 MeV	4 kW	${}^2\text{D}(\gamma,n) {}^1\text{H}$	$3 \cdot 10^{11}$

Il est à noter que plusieurs des accélérateurs électrostatiques sont destinés à des usages industriels et thérapeutiques.

Même si quelques machines sont importées, la plus grande partie est construite dans la Communauté. Le type dérivé du V.d.G. a fait l'objet de modifications importantes en France où leur construction se fait d'une façon systématique. Pour les générateurs du type CW, leur construction se fait industriellement par une firme hollandaise.

En comparaison avec les 130 machines de ce type existant aux Etats-Unis et les 26 en Angleterre, la situation de la Communauté (v. tableaux 9 et 10) n'est pas brillante.

Un programme d'études et de développement poussé des réacteurs demande un nombre important d'accélérateurs de ces types. Il faut noter en effet que déjà dans les centres les plus actifs, les machines existantes sont surchargées de travail. A remarquer, sauf peut-être pour le cas du cyclotron de Saclay le manque d'accélérateurs pour ions lourds.



Tableau 4

SYNCHROTRONS

	Synchrotrons à protons		Synchrotrons à électrons	
	France	Pays-Bas	Allemagne	Italie
Lieu et propriétaire	Saclay-CEA	Delft-Inst.HET	Bonn-Université	FRASCATI-INFN
Dénomination	Saturne	-	-	-
rayon magnétique (cm)	842	-	170	360
rayon équivalent (cm)	1097	325	263	437
focalisation	faible g.c.	au bord	forte g.alt.	faible g.c.
index du champ n	0,6	0	17	0,61
énergie finale GeV	3	1	0,5	1,1
cycle de fonctionnement.	3,2	2	-	-
cycle/sec.	10 ⁻⁷	-	50	20
N ions/cycle	10	-	-	-
champ à l'injection G	226	-	69	22,7
champ maximum (kG)	14,9	17,5	10	9,26
cavités H.F.	1	-	6	2
harmonique	2	1	9	4
H.F. min. (Mc/s)	0,16	0,4	161,45	42,6
max.	8,71	10	163	43,7
poids du fer (T)	1080	25	12	95
poids du cuivre (T)	55	1,6	4,8	8
entrefer (cm ²)	52,75 x 17,54	25 x 10	10 x 4,5	22,7 x 8,6
dispositif injection	électrostatique	cyclotron.	électrostatique	électrostatique
énergie injectée MeV	3,6	10	3	2
courant injecté mA	1,5	-	100	200

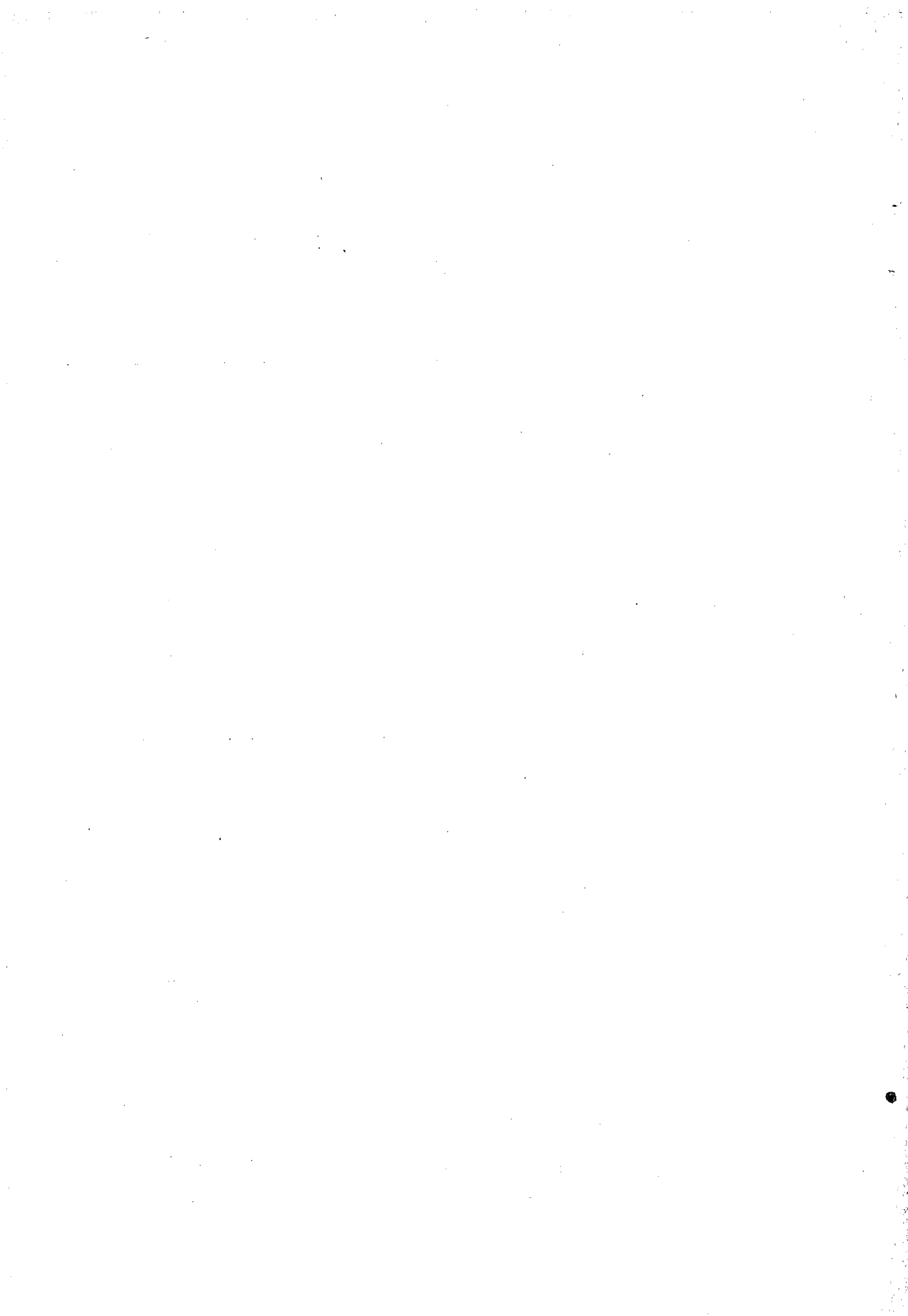


Tableau 5
CYCLOTRONS

Pays	Lieu	Nature des ions accélérés	Energie max. MeV	rayon max. orbite cm	∅ pièces polaires en cm	H.F. accélérée	Achèvement
BELGIQUE	Centre Phys.Nucl UNIV. LOUVAIN	d	12,7	41	102	13,6	1949
ALLEMAGNE	Max Planck Inst. HEIDELBERG	d α	13 26	43	101	12,8	1954(1956)
FRANCE	Centre d'Et.Nucl CEA SACLAY	p d α	11 22 44	66	176	10,6	1953
	Collège de France Lab.Phys.Nucl. ORSAY	d α	6,7 12	35	91	11,5	1959
FAYS-BAS	UNIV. TECHEM. DELFT	p	12	36	85	21,5	1958

En construction à ORSAY un cyclotron pour d, 20 MeV de 200 cm de diamètre.

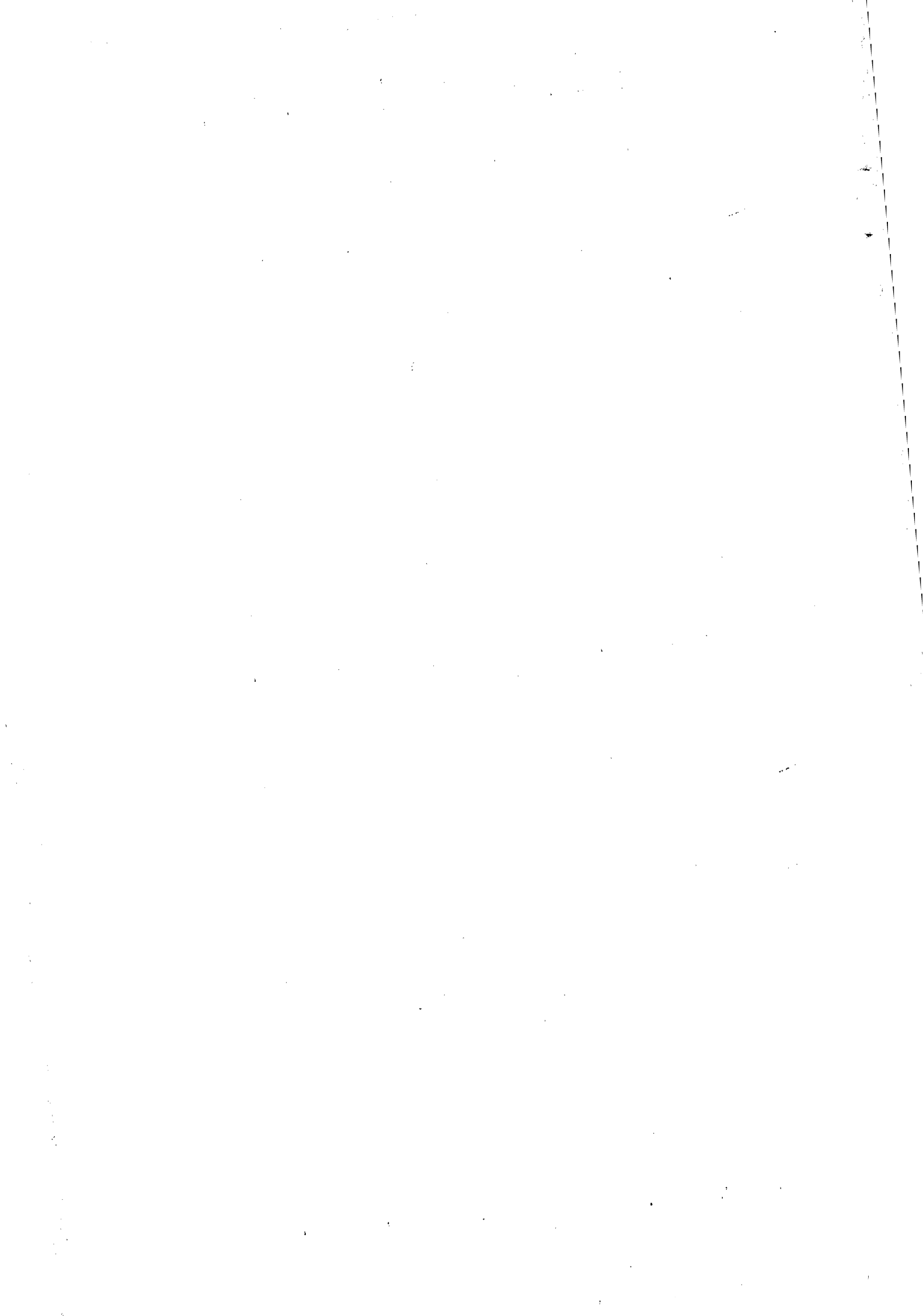
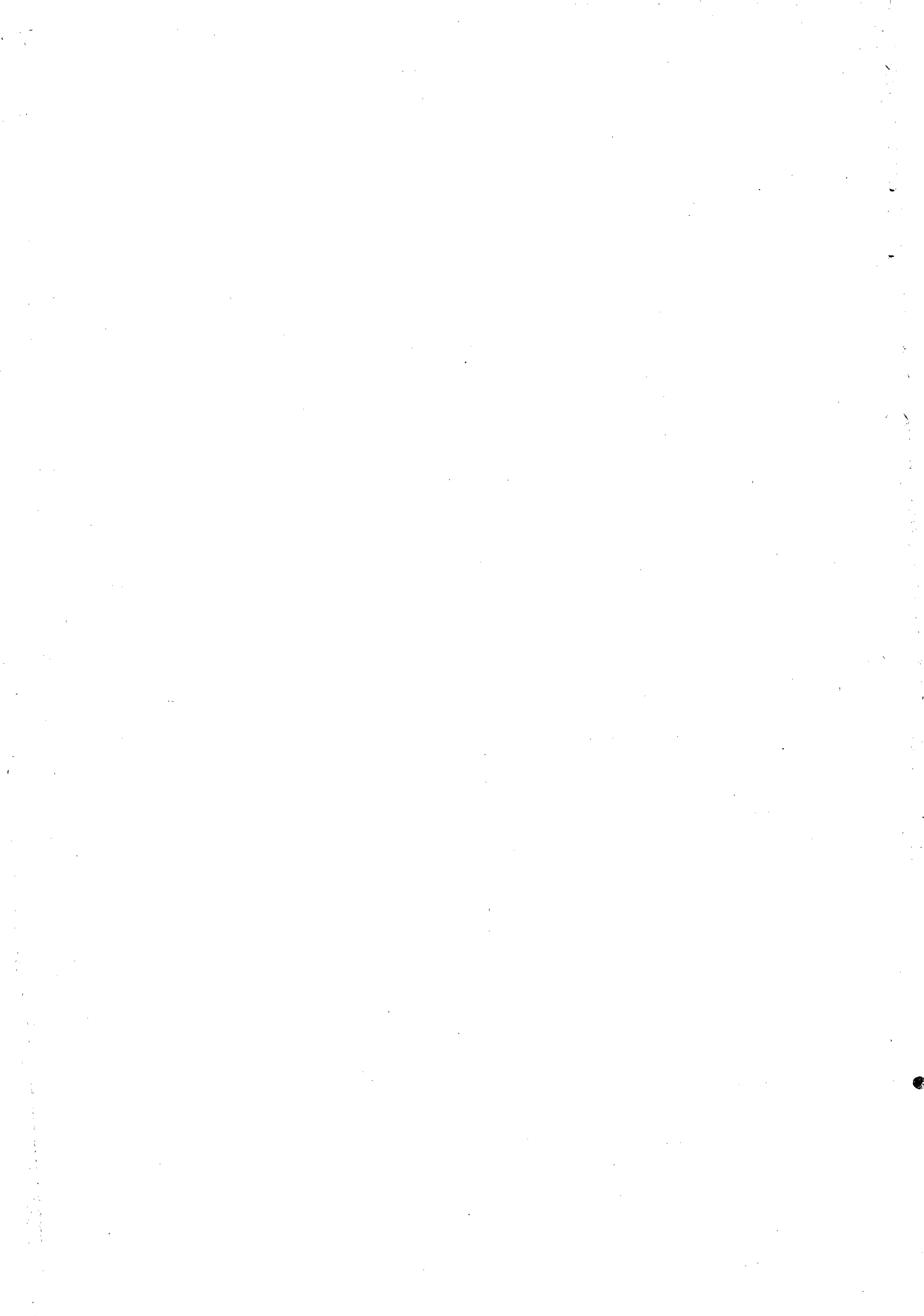


Tableau 6

SYNCHROCYCLOTRONS

Pays	Lieu	Nature des ions accél.	Energie max. MeV	rayon max. orbite cm	Ø pièce polaire cm	Intervalle de la variation de la HP accél. Mc/sec.	Fréquence de répétition sec ⁻¹	Achèvement
ALLEMAGNE	Bonn	d d	35 70	84	186	11,2-10,7	1800	1958
FRANCE	Fac. Sciences ORSAY	p d	155 80	123	280	25,2-15,2	500	1958
PAYS-BAS	Inst. Rech. Nucléaires AMSTERDAM	d d	28 56	89	180	10,43-10,05	1900	1949



LES REACTEURS DE RECHERCHE ET LES GRANDS EQUIPEMENTS

Tableau 7

BETATRONS

Pays	Lieu	rayon de l'orbite cm	Energie MeV
ALLEMAGNE	Inst.de Physique Ecole Polytechnique KARLSRUHE	24	31
	Siemens-Reiniger- Werke - ERLANGEN	20	15
		21	35
	Univ.de FRANKFURT	21	35
	Univ. de HEIDELBERG	19,2	35
	Univ. de WUERZBURG	20	35
FRANCE	Inst.Gustave Roussy PARIS	19	22
	Ministère de la Santé - PARIS	19	24
ITALIE	Clinique médicale Univ. de TURIN	26	31
	Inst. de Physique Univ. de TURIN	24,5	31
	Inst.Radiologie méd. Univ. de ROME	10	15
	Centre du Cancer PALERME	10	15
PAYS-BAS	Univ. d'Etat de GRONINGUE		5

Tableau 8

Accélérateurs linéaires ou à cavité de moyenne et basse énergies

Pays	Lieu	nature des ions accél.	Energie MeV
BELGIQUE	Ecole Royale Militaire BRUXELLES	p	10
	UNIV. GAND	e	4
FRANCE	C.E.N. SACLAY	e	28
		p (cavitron)	0,5
	Centre anticancéreux-NANCY	e	4
	Fondation Curie (hôpital) PARIS	e	4
	Lab.électronique et radio- électricité + UNIV. PARIS	e	2

Tableau 9

VAN DE GRAEFF et types dérivés

Pays	Lieu	nature des ions accélérés	Energie KV
BELGIQUE	Centre de physique nucléaire - LOUVAIN	p, d	1,8
	Laboratoire physique nucléaire - LIEGE	p, d	2
		p, d (poussière)	0,8
ALLEMAGNE	UNIV. DE HEIDELBERG	p, d, α , e	1
	UNIV. DE BONN	e	3
	UNIV. DE MAINZ	p, d, α , e	5
	UNIV. DE HEICHIGEN	p, d, α , e	1,5
	UNIV. DE FREIBURG	p, d	6
			1,5
	UNIV. DE ERLANGEN		0,7
	UNIV. DE HAMBURG	p	1,5
3			
FRANCE	CEN SACLAY	p, d	2
		p, d, α	5
	UNIV. DE GRENOBLE		0,6
	CEN GRENOBLE	p, e	0,6
		e	0,6
			1,4
		1,2	

Tableau 9 (suite)

Pays	Lieu	nature des ions accélérés	Energie MV
FRANCE (suite)	ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE PARIS	p, d, e	2
	ECOLE POLYTECHNIQUE	p, d	2
	COLLEGE DE FRANCE PARIS	d	0,6
	UNIV. DE LYON	p, d, d, e	2
ITALIE	Clinique médicale BOLOGNE	e, X	2
	C.S.F.N. CATANE	p, d	2
	Sté Pirelli - MILAN	e	2
PAYS-BAS	Ecole Hautes Etudes Techniques - DELFT	p, d	2,5
		p	0,6
	UNIV. ETAT UTRECHT	p, d, d	3
	UNIV. ETAT GRONINGUE		0,5

Tableau 10

COCKROFT-WALTON et assimilés

Pays	Lieu	nature des ions accélérés	Energie MV
BELGIQUE	Ecole Royale Militaire BRUXELLES	p	1,4
	Ecole Polytechnique MONS	p, d, d	1,3
	Laboratoire phys.nucl. UNIV. LIEGE	p, d	1
	UNIV. LIBRE BRUXELLES	p, d	0,85
ALLEMAGNE	FRANCFORT UNIV.	p, d	1,5
	UNIV. MARBURG		2
	UNIV. FREIBURG		0,9
	UNIV. GOTTINGEN	d	1 (2)
	UNIV. MAINZ	p, d	1,5
FRANCE	Ecole Normale Sup, STRASBOURG	d	0,6
			1,5
	Lab. Synthèse Atomique IVRY	d	0,9
ITALIE	C.I.S.E. - MILAN	d	0,4
	Inst.Sup.Santé-ROME	p, d	1
	UNIV. PAVIE		0,5
	UNIV. GENES	p, d	0,4
PAYS-BAS	UNIV.ETAT UTRECHT	p, d	0,8
	UNIV. GRONINGUE	p, d	0,6

Dans ce chapitre, nous nous sommes limités à la description des réacteurs de recherche et des machines accélératrices.

La recherche nucléaire nécessite la mise au point et l'utilisation d'autres appareillages très onéreux.

En physique nucléaire, il faut citer les sélecteurs de vitesse pour les neutrons, les chambres à bulle, certains appareils de comptage particulièrement délicats, les machines à calculer de différents types.

La séparation isotopique implique également l'emploi de machines importantes telles que le séparateur électromagnétique à grand pouvoir de résolution (il en existe un en France), et les unités de diffusion gazeuse, développées également en France seulement.

Ces divers appareils ne sont pas décrits dans ce rapport.

*

*

*

LES REACTEURS DE PUISSANCE A EAU LOURDE

DANS LA COMMUNAUTE

S. Bertolletti

I - GENERALITES

Les réacteurs à eau lourde dans le monde

Parmi les réacteurs existants, les réacteurs à eau lourde sont en nombre appréciable; de plus des types de réacteurs à eau lourde non encore réalisés et de nombreuses variantes des types existants ont été envisagés. (Voir le tableau I ci-joint).

Cependant, il convient de faire, au départ, une distinction plus importante encore que celle des types proprement dits: c'est la distinction qui existe entre un réacteur de recherche et réacteur de puissance.

Dans un réacteur de recherche, on se concentre sur l'utilisation des rayonnements qui résultent de la réaction nucléaire. L'énergie libérée est un sous-produit gênant et le coeur actif de la pile est maintenu à une température aussi peu élevée que possible.

On élude ainsi les problèmes techniques essentiels d'un réacteur de puissance où l'on cherche à extraire le plus possible de calories à une température aussi élevée que possible.

Il s'ensuit que, malgré le grand nombre de réacteurs à eau lourde de recherche qui ont été construits, l'expérience disponible, de ce fait, pour l'établissement de projets de réacteurs de puissance de types analogues, est insignifiante.

On peut encore ajouter que les réacteurs à eau lourde ont fait l'objet de publications relativement peu nombreuses lors de la dernière conférence de Genève: 36 en tout, dont 8 par le Canada, 6 par la Suède, 6 par la Norvège, 4 par la Suisse et les U.S.A., 3 par la France, 2 par la Yougoslavie et la Tchécoslovaquie, 1 par les Pays-Bas et par l'U.R.S.S. Il y a lieu de

croire que cette répartition ne reflète pas l'ampleur des travaux entrepris, par exemple en ce qui concerne l'Allemagne, l'Angleterre et l'U.R.S.S.

Le Canada est de loin le pays où les réacteurs à eau lourde ont été étudiés de la façon la plus poussée. Indépendamment de la réalisation de NRX (40 MW) et NRU (200 MW) qui sont des réacteurs de recherche, ce pays a actuellement en chantier un prototype de réacteur de puissance NPD₂ (20 MWe). L'effort de réalisation du Canada axé sur un type unique (refroidissement à eau lourde pressurisée) est cependant complété par des études comme celles de la Canadian General Electric (refroidissement organique) et les développements envisagés du type existant (ébullition, surchauffe).

Derrière le Canada viennent, hors d'Euratom, la Norvège et la Suède; ces pays ont construit des réacteurs de recherche à eau lourde, mais dans la voie des réalisations industrielles ont mené des politiques différentes.

En Norvège on a voulu très tôt mettre en route une expérience industrielle de production de vapeur nucléaire. Le réacteur de Halden conçu comme un réacteur à eau lourde bouillante avec circulation naturelle (type original) devrait entrer en fonctionnement d'ici peu de temps, mais sa marche à pleine puissance (10 MW, vapeur saturée à 40 atm) ne peut être espérée avant un an. (*)

En Suède, par contre, on s'est livré à des études pour évaluer les possibilités des types refroidis au gaz et à l'eau lourde pressurisée. C'est à l'heure actuelle l'eau lourde pressurisée qui a été adoptée comme réfrigérant. Des deux réalisations d'abord prévues (R3 et Adam) une seule verra le jour avec un caisson pressurisé sous le nom R3-Adam. Il s'agit d'une centrale de chauffage urbain avec récupération de 10 MWe, qui est actuellement en construction. Une réalisation ultérieure de plus grande capacité a été décidée sous le nom R4-Eve.

Aux USA aucun projet n'a été retenu jusqu'ici malgré les intentions manifestées (jusqu'ici abortives) par Nuclear Eng. Co. (Zinn), les études de N.D.A. sur le type S.W.R. (préliminaire) et sur le type S.D.R. (études de réalisation pour une petite centrale pour l'Alaska) et celles de Du Pont sur le type P.W.R. Il semble que, en dépit d'une production

(*) Ce réacteur, transformé en entreprise commune de l'OECE, est accessible à l'Euratom qui représente les six pays dans les conseils de l'Entreprise.

d'eau lourde très importante et de l'expérience acquise dans l'emploi de l'eau lourde à grande échelle industrielle mais sans production d'électricité (Savannah River plant), les USA ne se soient pas livrés jusqu'à une époque récente à des études importantes dans ce domaine. Cependant, dans le courant de l'année 58 l'A.E.C. a décidé d'aborder la question et a confié à N.D.A. une étude économique préliminaire. N.D.A. pencherait vers la réalisation préalable d'un prototype de relativement faible capacité (65 MWe environ) refroidi à l'eau lourde bouillante.

Les rares indications rencontrées dans la presse font penser que l'Angleterre, qui a construit des réacteurs de recherche à eau lourde, n'a pas complètement rebuté le réacteur à eau lourde de puissance (études de Hawker Siddeley, de UKAEA).

En U.R.S.S. et dans les pays communistes les références aux réacteurs à D₂O sont extrêmement rares. Il y a lieu de penser que l'U.R.S.S. s'est dessaisie d'un projet de réacteur refroidi au gaz avec caisson pressurisé dont la réalisation est actuellement envisagée en Tchécoslovaquie. L'U.R.S.S. et la Tchécoslovaquie se sont livrées à des études théoriques sur le réacteur homogène à eau lourde et uranium naturel ce qui constitue un effort original.

On voit donc que, à l'exception de l'effort canadien les réacteurs à eau lourde de puissance constituent un domaine encore peu défriché.

II - REALISATIONS ET TRAVAUX ENTREPRIS DANS LA COMMUNAUTE

La réalisation de réacteurs à eau lourde dans les pays de la Communauté concerne exclusivement les réacteurs de recherche. Ces réacteurs sont tous des réacteurs hétérogènes, à la fois modérés et refroidis à l'eau lourde, à l'exception du réacteur français EL2 (refroidi au CO₂ comprimé, 2,5MW). Ces réacteurs sont les suivants:

	Allemagne	France	Italie
existant		EL1 0,15MW EL3 15MW	
en construction	FR 1 12 MW		ISPRA I 5 MW
en projet	"DIDO" 10 MW		

En ce qui concerne les réacteurs de puissance aucun projet n'a été arrêté d'une façon définitive dans aucun des pays de la Communauté. Les études entreprises sont suivant le cas soit des études fragmentaires qui n'entrent pas dans le cadre du programme technique d'un réacteur déterminé soit des études ayant le caractère d'avant-projets ne résultant pas d'une optimisation des paramètres retenus (conceptual designs).

On peut admettre que la construction de réacteurs de recherche a amené les entreprises industrielles ayant participé à leur construction à mettre au point les techniques adéquates sur des points particuliers comme:

- Circulation et manipulation de l'eau lourde sous faible pression à des températures peu supérieures à la température ambiante.
- Déminéralisation et reconcentration de l'eau lourde.
- Recombinaison des gaz dissociés par radiolyse.
- Appareils de détection des produits de fission gazeux dans l'eau lourde.
- Technique d'isolement thermique d'un canal à combustible par rapport à la masse du modérateur.

Cet acquis est à l'heure actuelle principalement français.

Nous allons passer en revue les différents pays de la Communauté:

Les trois pays du Benelux n'ont jamais envisagé jusqu'ici de s'intéresser aux réacteurs de puissance à eau lourde; les Pays-Bas cependant ont participé indirectement au programme norvégien de Halden.

La France qui possède déjà un acquis technique en ce qui concerne l'eau lourde (voir plus haut) s'est d'abord intéressée à l'eau lourde à cause de la possibilité théorique de construire avec ce modérateur une installation de puissance de petites dimensions utilisant l'uranium naturel comme combustible. Cette possibilité a fait l'objet de recherches assez poussées avec le concours de l'industrie. Les recherches entreprises allaient de l'étude des propriétés nucléaires des réseaux eau lourde (expérience critique Aquilon) à des études de tenue de combustibles et à la mise au point des techniques convenables pour la construction (et le placage) des pièces de chaudronnerie épaisses de grandes dimensions, des pompes, vannes et accessoires capables d'assurer une étanchéité convenable sous une pression élevée, des faisceaux d'échangeurs en inox. Ces efforts

ont été abandonnés en raison du caractère peu pratique, pour de petites unités, de ce genre de solution, comparé à l'emploi de réacteurs à uranium enrichi. Ce n'est que beaucoup plus récemment que l'on a vu dans le réacteur à eau lourde un compétiteur direct du réacteur à graphite type Calder Hall. Ces réacteurs à eau lourde bénéficient en France des recherches effectuées précédemment. Trois types en sont considérés avec intérêt: le réacteur refroidi au gaz, le réacteur refroidi à l'eau lourde pressurisée, le réacteur refroidi au liquide organique.

L'effort a porté jusqu'ici essentiellement sur la neutronique - utilisation systématique d'"Aquilon" (voir rapport P 336 de Genève) qui s'est d'ailleurs révélé un peu étri-qué pour ces nouvelles tâches -, sur la définition de l'élément combustible et sur le dessin d'un tube de force adéquat. On peut ajouter que les connaissances françaises en matière de refroidissement par gaz favorisent a priori un réacteur à eau lourde refroidi au gaz, mais l'opinion actuelle des responsables du projet de recherche qui a reçu le nom de EL4 est que l'on manque encore de données expérimentales pour faire un choix entre les types cités plus haut.

En Allemagne des études ont été entreprises par certaines industries: Ces projets conçus comme des propositions commerciales risquent de manquer d'un budget aussi longtemps qu'un acheteur ne se sera pas manifesté.

A.E.G. et Interatom (Demag) ont, semble-t-il, en cours d'étude des avant-projets refroidis au gaz et au liquide organique respectivement. Mais c'est seulement chez Siemens que les travaux ont un caractère un peu plus poussé.

Siemens, d'abord axé sur l'étude d'un réacteur refroidi à l'eau lourde pressurisée à caisson pressurisé, aborde maintenant le type à tubes de force qui est susceptible d'avoir une capacité unitaire plus élevée. Le financement de l'étude d'une centrale de 100 MWe de ce type étant assuré on pense avoir atteint d'ici 3 ans le stade où on pourra prendre la décision définitive de construire cette centrale en connaissance de cause. Le type à caisson pressurisé serait tenu en réserve pour la réalisation éventuelle de centrales de petite capacité.

Les travaux de bureau d'études entrepris chez Siemens vont de pair avec des recherches expérimentales: étude de transferts de chaleur, pertes de charge, technologie du zirconium. L'étude des propriétés nucléaires du réseau sera entreprise aussitôt que possible ainsi que des essais sous irradiation.

En Italie, à part les travaux effectués en collaboration entre C.I.S.E. et Ansaldo les réacteurs de puissance à eau lourde n'ont été l'objet que de spéculations jusqu'ici assez

vagues comme l'intention manifestée par Montecatini de collaborer avec le C.N.R.N. à l'étude d'un type à réfrigérant organique.

Au C.I.S.E. et chez Ansaldo cependant on a consacré un travail important à la conception d'un réacteur modéré à l'eau lourde et refroidi à la vapeur d'eau légère très humide circulant dans des tubes de force en Zircaloy.

Dans la phase actuelle on s'efforce moins de rédiger un avant-projet complet que d'acquérir les connaissances de base nécessaires; deux questions principales sont abordées actuellement:

- étude expérimentale des transferts de chaleur avec la vapeur humide. Après une expérimentation destinée à étudier les pertes de charge dans l'écoulement de ce fluide mixte un montage à basse pression a permis de se familiariser avec les phénomènes d'échange de chaleur et notamment le burn-out. Il a également permis de mettre au point la technique expérimentale qui a été transposée sans difficultés majeures à haute pression. Ces expériences une fois achevées donneront une bonne connaissance des phénomènes.
- Conception générale du réacteur:
Ce travail effectué chez Ansaldo doit conduire à concevoir des dispositions constructives qui seront essayées. Dans le dessin des tubes de force on vise à obtenir
 - a) démontabilité aisée des tubes,
 - b) une étanchéité convenable aux extrémités sans production d'efforts parasites dans le Zircaloy.

De plus on prépare l'étude neutronique expérimentale du réseau et l'étude du comportement dynamique sur simulateur. On étudie également les propriétés des joints intermétalliques notamment U-Zr en vue de l'application à des éléments combustibles métalliques.

III - CONCLUSION

Il apparaît donc que des recherches consacrées aux réacteurs de puissance à eau lourde dans la Communauté sont encore à l'heure actuelle à un stade peu avancé. Les efforts entrepris sont encore très fragmentaires et désordonnés. L'absence de moyens d'irradiation convenables est la raison de l'absence presque totale d'études sous irradiation. L'absence d'une installation critique ayant des possibilités beaucoup plus développées qu'Aquilon, est également une importante

lacune d'équipement. Euratom peut jouer un rôle utile surtout s'il lui est possible de démontrer que les besoins seront satisfaits au mieux dans un cadre commun. Il deviendra alors relativement aisé de convaincre les différents organismes de l'utilité de coordonner leurs programmes de recherche.

*

*

*

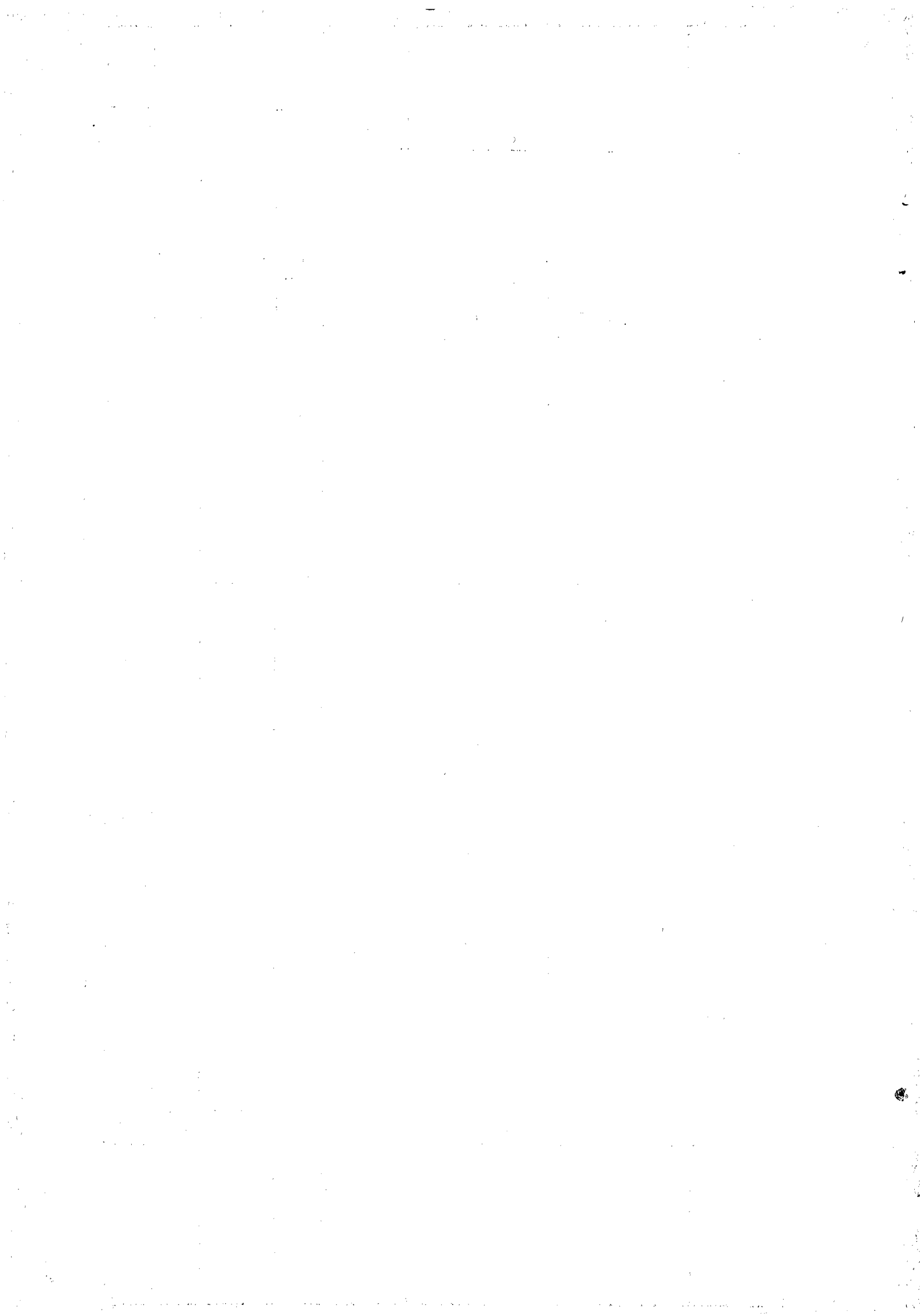


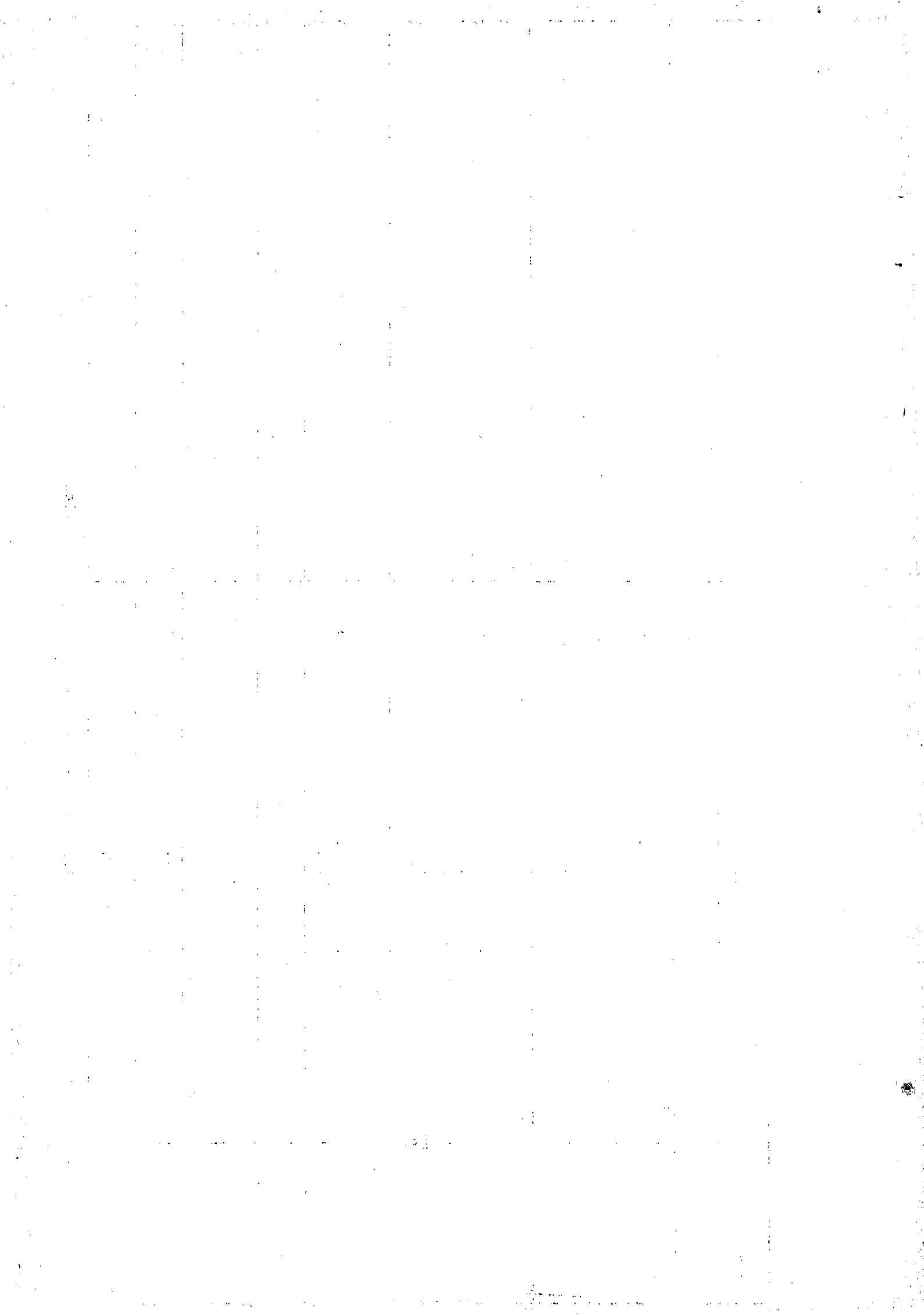
Tableau I

Réacteurs de puissance à eau lourde - Recherches en cours

Annexe

Mode refroidissement	Cuve résistante				PUISSANCE				Tubes résistants	
	Pays	étude	réf.	nom	nature	Pays	étude	réf.	nom	nature
Gaz	Allemagne	A.E.G.			a					
	Angeleterre	Hawker & Siddeley	Nucl. Eng. Sept. 58		a, b					
	France	C.E.A.	P. 2419	EL4	a	France	C.E.A.			a, b
	Suède	A.S.E.A.	P. 2094		a	Suède	A.S.E.A.	P. 2419		a
	Tchécosl. URSS		A.E.No.1, 56		a, b, c? a, b	USA	Nucl. Eng. Co (Zinn)	Nucl. Pow Oct 58		Oct 58
Eau lourde pressurisée	Allemagne	Siemens	Gen. expo.	SWDR	a, b					
	Canada	AECL		NPDI	a, b	Canada	AECL	P. 208. P. 209	NPD2	a, b, c
	France	C.E.A.			a, b	France	C.E.A.		EL4	a, b
	Suède	ASEA, AB	P. 135	R3-Adam	a, b, c	Suède	?			a
	URSS USA	Atomenergi DuPont	P. 136 A.E.No1, 56 P. 610	R4-Eve	a, b a a, b?	Suisse USA	Sulzer DuPont	P. 246 P. 610		
Eau lourde bouillante	Norvège	I.F.A.	P. 559	Halden	a, b, c					
	URSS		A.E.No.1, 56		a					
	USA	A.N.L. (Zinn)	Nucl. Eng. Co N.D.A.		a, b	USA		- id -		
Vapeur humide						Italie USA	CISE N.D.A.	NDA 2562-1	SWR	a, b a
Liquide org.	Canada	Can. Gen. Elec.	P. 210		a					
	Suisse	Brown-Boveri	P. 259		a					
	Allemagne	Interatom			a					
Sodium liquide	Tchécoslov. USA		P. 2094	SDR	a, b, c? a, b, c					
		N.D.A.								
Homogène	Tchécoslov. URSS		P. 2105 P. 2296		a a					

a- concept évaluation, b- development, c- development and construction



LA PRODUCTION D'EAU LOURDE

P. KRUYS.

I. Introduction

Des recherches sur la production d'eau lourde sont menées avec vigueur en Allemagne, en France et en Italie. En Allemagne, les travaux sont effectués exclusivement dans l'industrie privée, tandis qu'en France et en Italie, des centres nationaux (C.E.A., C.I.S.E.) en liaison avec des industries publiques ou privées, s'occupent de la préparation de l'eau lourde.

Il nous a semblé préférable de classer les renseignements par procédés, plutôt que par pays.

2. Description des méthodes d'obtention de D₂O étudiées Résultats obtenus

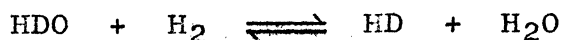
a) La distillation fractionnée de l'eau naturelle.

C'est ainsi que, durant plusieurs années, la totalité de la production d'eau lourde a été assurée aux Etats-Unis. En Europe, plusieurs pays ont effectué des études économiques de ce procédé. On peut résumer ainsi les conclusions de ces travaux: pour les énormes quantités de vapeur à traiter (plusieurs centaines de milliers de tonnes par tonne d'eau lourde) ou bien les colonnes à distiller disponibles ont une efficacité suffisante, c'est-à-dire qu'elles présentent une perte de charge assez faible pour ne pas être économiquement prohibitive, et dans ce cas elles sont d'un prix excessif, ou bien ces colonnes sont de construction peu coûteuse mais alors, à cause des pertes de charge qu'elles présentent, et de la dépense correspondante d'énergie, le prix de revient global de l'eau lourde est trop élevé.

La distillation finale d'eau pré-enrichie en D₂O par un autre procédé, peut être réalisée économiquement dans certains cas. Une unité expérimentale de finition, installée à l'usine de la Société Pierrefitte Kalaadjerdja (France), a donné toute satisfaction. Elle permet d'obtenir, par distillation sous pression réduite dans deux colonnes en cascade garnies de remplissage DIXON, une concentration en eau lourde de l'ordre de 80 à 90 % au départ d'eau préconcentrée à 0,6 %. Une unité de reconcentration d'eau lourde polluée va être installée à Saclay (colonne Kuhn). Mais l'obtention industrielle d'eau lourde par distillation fractionnée d'eau naturelle est abandonnée au profit d'une des quatre méthodes dont il est question ci-dessous.

b) Distillation de l'hydrogène liquide.

Ce procédé peut être dépendant d'une usine productrice d'hydrogène (électrolyse ou gaz de synthèse), ou indépendant par association avec la méthode d'échange isotopique :



Dans le procédé dépendant, l'installation de production d'eau lourde est alimentée en hydrogène qu'elle purifie avant de le liquéfier et de le distiller pour en retirer le deutérium; l'hydrogène appauvri est ensuite restitué à l'usine mère.

De façon générale, dans les pays industriels, le "fleuve d'hydrogène" qui arrose l'industrie chimique charrie environ 4 g. d'eau lourde par an et par habitant..

En France, ce procédé est étudié depuis 1953. Les études et les expérimentations sont menées sous contrat du C.E.A. et avec son aide par l'Air Liquide (AL) associé à l'Office National Industriel de l'Azote (O.N.I.A.) dans la Compagnie Française de l'Eau Lourde (C.F.E.L.). Elles ont abouti à la construction par l'A.L. dans l'enceinte de l'O.N.I.A. à Toulouse d'une usine pilote qui est exploitée par la C.F.E.L. Elle est entrée en fonctionnement depuis peu. Calculée pour un débit de 4.000m³ TPN/h. de gaz de synthèse (mélange d'azote et d'hydrogène) elle devrait produire 2 à 3 tonnes d'eau lourde par an.

Ces travaux ont permis à un noyau de chercheurs d'acquérir une expérience unique en France sur la technique du froid. Les divers problèmes posés par la liquéfaction industrielle de l'hydrogène ont été résolus de façon satisfaisante. Il convient en outre de signaler :

- I - la mise au point d'un échangeur réversible d'un type original et qui permet l'élimination dans l'hydrogène des toutes dernières traces d'impuretés (azote, hélium...) Cet échangeur et sa mise en oeuvre font l'objet d'un brevet français numéro I.III.083.
- 2 - l'étude de différents types de plateaux perforés et de plateaux à cloche dans la distillation fractionnée de l'hydrogène. Les résultats obtenus, en accord avec ceux d'AUGOOD et ceux plus récents de TIMMERHAUS (NBS report 5074, 15 mai 1957), montrent la parfaite extrapolabilité de ceux-ci à de grands diamètres à condition de prendre certaines précautions dans la construction des grands plateaux.

Les nombreux essais effectués ont permis d'acquérir une expérience précieuse sur les paramètres importants de la distillation de l'hydrogène liquide: influence de la forme des plateaux, leur écartement minimum, la valeur limite de débit avant l'engorgement de la colonne, la relation entre le rendement des plateaux et le débit, etc...

- 3 - la catalyse ortho-para de l'hydrogène liquide. La transformation exothermique de l'ortho-hydrogène en para-hydrogène libérant une quantité de chaleur (240 cal/mole) supérieure à la chaleur de vaporisation de l'hydrogène (210 cal/mole), il est indispensable d'empêcher, au maximum, cette transformation. L'expérience a montré qu'avec l'emploi du cuivre et

de l'acier inoxydable comme matériaux de construction, on arrive à un taux de conversion d'environ 5 % sans répercussion sérieuse sur le bilan frigorifique de l'installation.

Par ailleurs, les problèmes d'isolement thermique de la partie la plus froide ont été particulièrement étudiés. Les colonnes et l'épuration froide sont entourées d'un écran en cuivre maintenu à la température de l'azote liquide, l'ensemble étant placé dans une enveloppe cylindrique étanche remplie de santocel sous très faible pression. Un système de transport pneumatique est utilisé pour transvaser le santocel. Les enrichissements obtenus sont mesurés grâce à des dispositifs spéciaux de mesure continue. Une attention particulière a été donnée aux dispositifs de sécurité: les commandes d'organes essentiels sont souvent doublés pour diminuer les risques de panne. Il est probable qu'après un an de fonctionnement, cette unité pilote permettra de calculer le prix de revient de l'eau lourde dans une usine de grande dimension.

Il serait très intéressant de comparer les résultats obtenus dans l'usine pilote française et ceux relatifs à l'usine pilote construite, en Allemagne, par Linde pour le compte de HOECHST Farbwerke. Les renseignements au sujet de cette unité (d'une capacité nominale de 6 tonnes/an) sont très vagues: il paraîtrait qu'elle est plus simple que celle de Toulouse et que l'isolation thermique ne serait pas faite sous vide mais sous hydrogène à la pression atmosphérique.

Quoi qu'il en soit, il est établi que deux pays (Allemagne, France) de la Communauté étudient de façon très approfondie la production du deutérium par distillation de l'hydrogène liquide ce qui devrait permettre dans un avenir assez proche de tirer des conclusions valables sur la rentabilité et la technologie du procédé. Il est certain qu'un des avantages de cette technique réside dans sa très faible consommation d'énergie par gramme d'eau lourde produit (4,8 kw /g D₂O d'après une estimation de Clusius et Starke; 3,7 kw /g dans le projet de la Hydrocarbon Research, Inc.). Par contre, les investissements sont très importants.

c) Procédé par échange hydrogène-eau.

La réaction d'échange $H_2O + HD \rightleftharpoons HDO + H_2$ est une de celles qui possèdent une constante d'équilibre élevée. Pour la réaction liquide-gaz, la valeur de cette constante varie d'environ 4,7 à 0° C à 1,9 à 225° C

I - Echange catalytique en phase vapeur.

L'adjonction de cette technique à des procédés tels que la distillation d'hydrogène ou l'échange bitherme ammoniac-

hydrogène assure à ceux-ci une source infinie de deutérium en provenance directe de l'eau naturelle. C'est pourquoi ce procédé mérite une investigation détaillée. Des travaux importants sont en cours à ce sujet en France (C.E.A.) et en Allemagne (Degussa en collaboration avec le Professeur Becker).

Les travaux effectués au C.E.A. ont porté principalement sur la cinétique de la réaction d'échange et l'étude d'une série de catalyseurs (platine et palladium déposés sur alumine, nickel absorbé sur oxyde de chrome).

Aux températures élevées auxquelles il est nécessaire d'opérer pour avoir une constante d'équilibre favorable au transfert de deutérium de l'eau à l'hydrogène (600° C si possible), l'activité catalytique n'est pas une considération majeure, l'essentiel est qu'à cette température aucune destruction notable du catalyseur ne se produise. De ce point de vue, les catalyseurs Ni/Cr₂O₃, quoique moins actifs que ceux à base de métaux précieux, semblent intéressants parce qu'ils présentent une bien meilleure résistance à l'empoisonnement et à la chaleur.

Une étude systématique de catalyseurs à base d'oxydes métalliques à surface spécifique importante, en particulier les oxydes de fer, et de catalyseurs sur support métallique est en cours.

Plusieurs questions importantes doivent encore être résolues (résistance mécanique du catalyseur, choix de matériaux de structure n'influençant pas l'équilibre isotopique dans les différentes parties de l'appareillage, etc..) avant que l'on puisse faire une estimation raisonnable de la valeur de ce procédé.

2 - Echange eau-hydrogène en phase liquide.

Les spécialistes sont d'accord pour dire que l'échange en phase liquide, appliqué en bitherme, deviendrait le plus économique de tous les procédés indépendants de production d'eau lourde si on parvenait à mettre au point un catalyseur économique gardant son activité dans l'eau liquide. On pourrait, dès lors, utiliser des tours d'absorption classiques. Il n'est donc pas surprenant que des efforts très sérieux aient été consacrés à ce procédé, sans cependant avoir encore donné des résultats appréciables.

En Allemagne, la société Degussa en collaboration avec le Professeur Becker de l'Université de Marburg étudie un procédé basé sur l'échange hydrogène-eau à deux températures et la firme Fried-Uhde de Dortmund a été chargée par Degussa de construire une installation pilote. Celle-ci permettra de résoudre des problèmes technologiques et de faire une estimation économique du procédé. Nous n'avons pas de détails sur

la nature du catalyseur utilisé, le type de tour de contact, etc. Tout au plus, sait-on que l'hydrogène et l'eau sont "mélangés" intimement avec un catalyseur en suspension dans des colonnes à haute pression maintenues respectivement à basse et haute températures.

En France, le C.E.A. a confié à l'Institut Français du Pétrole (I.F.P.) l'étude de la catalyse d'échange en phase liquide. Ces recherches ont permis d'évaluer séparément les vitesses des phénomènes de diffusion d'une part, de la réaction chimique proprement dite d'autre part, dans un domaine où elles interviennent toutes deux.

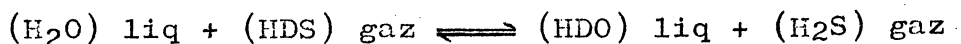
En fait, il ne s'agit pas d'une véritable inactivation du catalyseur par l'eau liquide, mais plutôt de l'intervention prépondérante de phénomènes de diffusion très lents à travers la masse de liquide et à travers une couche laminaire. L'activité chimique, elle, est du même ordre de grandeur en phase liquide et en phase gazeuse.

Il a été vérifié, en particulier, que l'utilisation de pressions élevées (100 kg/cm²) permet de réduire la limitation due à la diffusion de l'hydrogène dans la masse du liquide. De plus, l'activité d'une série de catalyseurs a été mesurée. Il en résulte que le platine colloïdal possède, de loin, l'activité spécifique la plus forte, mais que la résistance à l'empoisonnement est également la plus faible. De plus, la récupération du catalyseur colloïdal constitue un problème très difficile à résoudre. Parmi les catalyseurs pulvérulents ou granulés, les plus intéressants sont le platine déposé sur alumine et le nickel-oxyde de chrome. Ce dernier, quoique moins actif, est plus résistant à l'empoisonnement et sa séparation ne pose pas de problème sérieux.

Une pré-évaluation économique du procédé bitherme H₂-H₂O utilisant pour catalyseur le platine colloïdal faite par l'I.F.P., montre qu'il serait peu coûteux en énergie, mais que l'investissement en catalyseur, le renouvellement ou la régénération de ce dernier constituent des facteurs primordiaux dans le calcul du prix de revient de l'eau lourde produite.

d) Procédé d'échange H₂S - H₂O.

La quasi totalité, ou la totalité de l'eau lourde aujourd'hui séparée aux Etats-Unis est obtenue par cette méthode. Deux raisons militent essentiellement en sa faveur : d'une part, la matière de départ est l'eau, et, par conséquent, la production n'est pas limitée par une source industrielle d'hydrogène; d'autre part, la réaction d'équilibre :



est rapide, ne requiert pas de catalyseur, et possède une constante d'équilibre avantageuse. Par contre, la corrosion par l'hydrogène sulfuré pose un problème délicat à résoudre.

En Allemagne, c'est surtout la société Pintsch Bamag qui a étudié ce procédé. Il est difficile de se faire une idée exacte de la situation. En effet, en dépit de déclarations officielles de la Pintsch Bamag, il n'est pas certain que celle-ci ait obtenu le prêt gouvernemental qu'elle avait sollicité pour la construction d'une unité pilote. D'autre part, il paraîtrait que cette unité pilote serait montée chez HOECHST par la Pintsch Bamag agissant en tant que constructeur uniquement.

Quoi qu'il en soit, il semble bien que Pintsch Bamag et peut-être HOECHST ont acquis les connaissances suffisantes pour entreprendre la construction d'une usine pilote.

En Belgique, quoique le procédé d'échange H_2O-H_2S ne soit pas étudié en lui-même, une étude du mécanisme de la corrosion des aciers en présence d'hydrogène sulfuré a été réalisée au Centre de la Faculté Polytechnique de Mons. Un ensemble d'essais a mis en évidence la formation de microcathodes et la précipitation de FeS à ces microcathodes ainsi que la formation, au niveau de ces microcathodes, de bulles d'hydrogène.

En France, le procédé d'échange H_2O-H_2S fait l'objet d'une étude poussée car l'existence en un même lieu (Lacq) d'une source abondante d' H_2S et d'énergie d'un prix de revient inférieur au prix moyen français incite à examiner de près les chances d'une réalisation industrielle.

Les études ont été entreprises au début par le C.E.A. dans trois domaines : la physico-chimie, l'économie du procédé et la technologie. Actuellement, elles sont confiées à une société, la Société pour l'Obtention du Deutérium (S.O.D.), qui coordonne les travaux.

Les études physico-chimiques ont porté essentiellement sur la re-détermination de la constante d'équilibre et sur la cinétique de l'échange. En effet, les valeurs publiées de la constante d'équilibre sont assez nombreuses, mais peu concordantes, aussi a-t-elle été déterminée de 10 en 10° C entre 0° et 150°. Les résultats obtenus sont en bonne concordance avec ceux de Varshavskii et Vaisberg (J.Chim.Phys. (U.R.S.S.), 29, n° 3, 523 (1955)).

L'étude de la cinétique d'échange montre que la vitesse d'échange est une fonction croissante de la concentration en H_2S de la phase liquide tant que celle-ci reste faible, mais atteint une valeur limite lorsque cette concentration dépasse environ 50 % de la concentration à saturation. L'efficacité des premiers plateaux du haut de la tour froide du premier étage d'un

bitherme est donc faible. D'autre part, la réaction d'échange est globalement du premier ordre.

Le rendement r d'un plateau peut être exprimé par la relation simple :

$$- \log (I - r) = K.f (Q,S,h).$$

où Q est le débit gazeux réel, mesuré dans les conditions de fonctionnement par orifice; S est la surface de séparation liquide-gaz par orifice; h est la hauteur de parcours des bulles gazeuses dans le liquide et K un coefficient obtenu expérimentalement. Notons que le terme $f (Q,S,h)$ est indépendant de la pression et de la température.

L'étude économique du procédé utilisant l'hydrogène sulfuré à l'état gazeux montre que sa rentabilité dépend du choix des paramètres : températures et pression de marche, schémas de circulation, nombre d'étages.

Une petite unité pilote a été construite et expérimentée à Lacq où le gisement de gaz naturel contient une forte proportion d' H_2S (15 % en volume). Les expériences ont montré d'une part qu'il est capital d'utiliser un gaz très bien purifié et que d'autre part le procédé est viable et ne pose pas a priori de problème très difficile (sauf celui de la corrosion).

Notons enfin que la S.O.D. a décidé de construire une installation spécialement conçue pour étudier la corrosion. Le programme des travaux comprend l'étude de la corrosion par l'hydrogène sulfuré, par l'eau saturée en H_2S ; la corrosion dans des conditions de contre-courant de fluides (pour simuler les tours d'échanges); corrosion-érosion en dynamique (pour simuler les échangeurs de chaleur). Ces essais seront effectués sur un certain nombre de matériaux de construction, sous tension ou non.

e) Procédé par échange ammoniac-hydrogène.

Ce procédé n'est étudié qu'en France, en particulier au C.E.A. en collaboration avec les Houillères du Bassin du Nord et du Pas-de-Calais. Pourtant, la constante d'équilibre de l'échange ammoniac-hydrogène est voisine, pour une température identique, de celle de la réaction eau-hydrogène, avec la possibilité de réaliser pratiquement le contre-courant gaz-liquide à des températures beaucoup plus basses qu'avec ce dernier système. Il en résulte qu'on peut mettre à profit un coefficient de séparation bien plus grand. A la température de solidification de l'ammoniac ($-78^\circ C$), le coefficient de séparation est de l'ordre de 9. C'est pourquoi, bien que cette réaction d'échange nécessite l'usage d'un catalyseur, son application à une production industrielle d'eau lourde est très intéressante à étudier.

Les travaux sont encore peu avancés d'une façon générale. Un seul catalyseur actif connu est l'amidure de potassium. Un grand nombre de composés ont été essayés sans succès : amines primaires, secondaires et tertiaires, aliphatiques ou aromatiques, l'urée, la guanidine, des sels de cuivre, de nickel et de cobalt, le soufre en solution, le lithium en solution.

L'amidure de potassium étant soluble dans l'ammoniac, le procédé s'apparente à celui d'échange H_2S-H_2O ou au procédé H_2-H_2O en phase liquide utilisant un catalyseur colloïdal.

De plus, l'amidure de potassium est un réactif assez onéreux et qui ne peut pas être mis en contact avec une atmosphère humide.

En plus dans le procédé bitherme classique, se pose le grave problème de la séparation du catalyseur de l'ammoniac deutéré.

La mise au point d'un catalyseur solide de cette réaction d'échange semble être la pierre angulaire de ce procédé. Des travaux sont en cours dans ce sens actuellement.

f) Le CISE effectue depuis plusieurs années des recherches sur la mise au point de différentes méthodes applicables à la séparation isotopique, en général, et à la production d'eau lourde en particulier.

L'équipe de M. SILVESTRI a étudié (ou étudie encore) les procédés suivants pour l'obtention du deutérium :

- 1) l'échange hydrogène-eau,
- 2) la distillation fractionnée de vapeur d'eau d'origine géothermique à Larderello (Italie),
- 3) la séparation isotopique dans un mélange liquide-gaz par écoulement concourant à grande vitesse.

Ce dernier procédé mérite une attention particulière en raison de son originalité. Toutefois, ces travaux ne sont pas suffisamment développés pour dégager des conclusions sur les possibilités industrielles de cette méthode.

En résumé, celle-ci est basée sur le principe suivant. Il est bien connu qu'on peut forcer un liquide à "monter" le long d'une surface verticale, sous la forme d'un film liquide, si la vitesse du gaz, utilisé comme agent porteur, est suffisamment élevée. Un transfert de masse a lieu dans des conditions d'écoulement isotherme tandis que dans des conditions d'écoulement non isotherme un échange de chaleur se produit également.

Appliqué au cas de l'eau lourde, l'étude du CISE porte sur la mise au point de conditions de transfert de masse, dans un système isotherme où de l'eau est entraînée le long d'une paroi par un courant de vapeur d'eau. L'eau naturelle étant composée d'un mélange HDO-H₂O dans le rapport de 1/7.000, il se produit un enrichissement de la phase liquide en HDO.

Ce procédé fait également l'objet d'investigations en vue d'une application, dans des conditions non isothermes, à l'échange chimique entre l'hydrogène et l'eau.

Il faut noter que l'équipe du CISE a développé plusieurs méthodes analytiques pour la détermination de la teneur en deutérium dans les mélanges eau légère-eau lourde.

En conclusion, parmi les différentes méthodes étudiées actuellement dans la Communauté, il est incontestable que c'est la distillation fractionnée d'hydrogène liquide qui a atteint le stade de développement le plus élevé. Toutefois, de nombreux problèmes technologiques doivent encore trouver une solution.

Parmi les différents procédés d'échange isotopique ceux basés sur l'échange bitherme

ammoniac-hydrogène
eau-hydrogène

sont les plus prometteurs. Ils font l'objet de nombreux travaux dans les laboratoires français et allemand. Leur développement est lié à la mise au point de catalyseurs d'activité convenable, de durée de vie suffisante et facilement séparable du milieu réactionnel.

D'une manière générale, les travaux sur l'ensemble de ces méthodes n'ont pas atteint un stade de développement qui permet de faire des estimations de prix de revient et de dire si l'une d'elles aboutira, dans l'avenir, à la production d'eau lourde à un prix comparable à celui établi par la U.S.A.E.C.

*

*

*

F U S I O N

D. PALUMBO

Introduction

Les recherches sur la possibilité d'obtenir de l'énergie par des réactions thermo-nucléaires contrôlées n'ont donné jusqu'à présent que des résultats négatifs, malgré les efforts faits en Angleterre, aux Etats-Unis et en Russie. La récente Conférence de Genève, outre les nombreuses informations fournies sur les travaux exécutés dans les différents pays, a servi à faire ressortir les très grandes difficultés rencontrées et la multitude des problèmes fondamentaux et techniques qui restent encore à résoudre.

La tendance qui s'est manifestée pendant et après cette Conférence a été de se replier vers les problèmes fondamentaux de physique du plasma. Peut-être que pour les pays de la Communauté, où les travaux sur la fusion sont peu avancés et parfois à l'état de projet seulement, cette situation est avantageuse. Les temps ne semblent pas encore mûrs pour la réalisation de grandes machines, même au stade de prototype.

Plusieurs voies, plus ou moins prometteuses, sont ouvertes, mais aucune d'elles encore ne s'est avérée nettement supérieure à une autre. C'est pourquoi il a paru opportun de commencer par une courte description de certaines méthodes employées actuellement, pour rappeler surtout les quelques résultats positifs obtenus et les nombreuses difficultés qui subsistent encore.

Dans le tableau qui suit, on trouvera les investissements, le personnel scientifique et quelques indications sommaires sur le programme des différents groupes. Une comparaison avec les pays qui ont une plus grande expérience, Angleterre, Etats-Unis, est certainement intéressante. Il est regrettable que des données analogues ne soient pas disponibles pour la Russie.

COMMUNAUTE

Centre	1958		1959		Objet des recherches
	Phys.	Budget M \$	Phys.	Budget M \$	
Bruxelles			6	0,07	Pinch linéaire (stade initial)
Munich)	65	1,2	110	2,0	Stellarator, pinch linéaire et toroïdal, théorie
Aachen)			45		Pinch rapide, électron relativiste
C.E.A.	25	0,8	50	2,50	Pinch toroïdal, miroirs, sources
Rome	6	0,15	12	0,35	Compression rapide (stade initial)
Pays-Bas	18	0,25	30	0,5	Pinch, H.F., miroirs
TOTAL	114	2,40	208	5,42	
Rapport budget milliers \$/pers.21			26		

GRANDE-BRETAGNE

Centre	1958		1959		Objet des recherches
	Phys.	Budget M \$	Phys.	Budget M \$	
AERE)	120	3	150	6	Pinch linéaire et toroïdal, miroirs (?)
AWRE)					
AEI)					
Rapport B/P	25		40		

ETATS-UNIS

Centre	1958		1959		Objet des recherches
	Phys.	Budget	Phys.	Budget	
Los Alamos	38	3,3	40	4,6	Pinch, miroirs, plasma tournant
Oak Ridge	70	4,9	99	6,7	DCX
Princeton	97	12,2	115	16,8	Stellarator
Livermore	83	6,7	93	7,4	Miroirs, pinch, Astron
Divers	-	1,8	-	2,5	
TOTAL	288	28,7	347	38	
Rapport B/P	100		110		

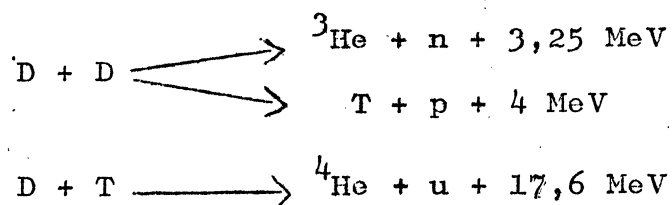
De l'examen des différents programmes, il ressort que le travail est bien partagé et qu'il n'y a pas de doubles emplois inutiles.

Une différence frappante existe entre les rapports budget/personnel pour les différents pays. Les valeurs considérablement plus basses que l'on a pour la Communauté (qui seraient sensiblement plus hautes si l'on ne considérait que les groupes principaux) peuvent être dues soit à une sous-estimation des frais à supporter, soit au fait qu'il n'y a pas de grandes machines dans les programmes et qu'il n'est donc pas prévu, par conséquent, de moyens importants de stockage d'énergie dont le coût représente un pourcentage sensible des budgets.

I - GENERALITES

Si l'on considère l'énergie de liaison par nucléon dans les noyaux, on remarque qu'on a, superposées à l'allure régulière, qui présente un maximum pour les nuclides moyens, de sensibles variations pour les nuclides très légers. On a ainsi deux voies fondamentales pour obtenir de l'énergie par des procédés nucléaires : fission des nuclides lourds, fusion des nuclides légers, et très légers.

A l'heure actuelle, alors que la fission ne s'est montré utilisable pratiquement que pour quelques rares éléments très lourds (U, Pu), on espère que la fusion pourra l'être en pratique, à l'échelle terrestre, d'une façon contrôlable, pour les isotopes de l'hydrogène D, T. Les réactions que l'on espère utiliser sont les suivantes :



Pour qu'une de ces deux réactions puisse se produire il faut que les deux nuclides (D, D) ou (D, T), arrivent à se rapprocher assez pour que les forces nucléaires soient prédominantes. Pour cela il faut qu'ils dépassent la barrière coulombienne (due à l'égalité de leur charge). C'est une des raisons pour lesquelles il sera difficile d'exploiter, à l'échelle terrestre, des réactions exoénergétiques (par exemple : ${}^3\text{He} + \text{D} \longrightarrow {}^4\text{He} + \text{p} + 18,3 \text{ MeV}$) produites par des éléments de nombre atomique plus élevé.

On voit tout de suite que la section efficace de réaction aura des valeurs négligeables aux petites énergies cinétiques possédées par les nuclides (dans le système du centre de masse), et ne deviendront considérables que pour des valeurs élevées de cette énergie.

Pour la réaction D-D, la section efficace atteint le maximum, de l'ordre de 0,2 barns, vers 1000 keV, tandis que pour la réaction D-Tle maximum, de 5 barns environ, est atteint à 100 keV. De la petitesse de ces sections efficaces découlent deux conséquences :

- 1) Nécessité de disposer de nuclides dont l'énergie soit de l'ordre de centaines de keV,
- 2) Nécessité de faire usage d'atomes totalement ionisés. En effet, les sections d'ionisation et d'excitation des atomes sont de l'ordre du carré du rayon atomique, donc très supérieures aux sections efficaces de fusion, ce qui fait que si on lance un faisceau de deutons contre des atomes d'hydrogène lourd, la plus grande partie de l'énergie cinétique disponible sera perdue en ionisation et excitation atomique avant qu'il n'y ait une chance appréciable de fusion.

Pratiquement, il faudrait disposer d'un gaz totalement (ou presque) ionisé, ayant une température cinétique * (ici et après, la notion de température doit être prise dans une acceptation différente de celle de température thermo-dynamique), suffisamment élevée pour que la section de fusion soit appréciable. En outre, ce gaz devrait avoir une densité élevée. En effet, comme la réaction escomptée est binaire, sa vitesse - et donc la vitesse de production d'énergie - sera proportionnelle au carré de la densité, et bien entendu à la vitesse des noyaux et à la section efficace.

On peut voir⁽²⁾ que dans l'hypothèse (discutable) où la distribution des vitesses des noyaux est maxwellienne, la vitesse de production d'énergie de la réaction D-D dépend de la température selon

$$n^2 T^{-2} \exp \left(- a T^{-\frac{1}{3}} \right)$$

n étant le nombre de deutons/cm³ (pour T 50 keV).

Mais parmi les processus qui otent de l'énergie au système et peuvent empêcher la réaction de s'autoentretenir, il y a le rayonnement. Si le gaz chaud rayonnait de l'énergie comme un corps noir, il n'y aurait presque aucune chance d'atteindre la température d'ignition. Mais, comme pour les dimensions réalisables le rayonnement thermique est négligeable, il ne faut considérer que la perte par bremsstrahlung qui, (pour un gaz maxwellien) est proportionnelle à $Z^2 T^{\frac{1}{2}} n^2$, Z étant le numéro atomique, et celle des radiations "magnétiques" qui d'ailleurs⁽³⁾ compte tenu de l'autoabsorption - est bien moins dangereuse. On voit l'importance du danger des impuretés de numéro atomique élevé.

* A l'énergie de kT de 1 keV correspond la température de 2,4.10⁷°K.

A cause de la façon différente dont l'énergie produite et celle rayonnée dépendent de T , il y a une température d'ignition qui serait indépendante de la densité, si l'on ne comptait que les pertes par bremsstrahlung. D'après Post⁽²⁾ cette température pour un gaz maxwellien (sans compter les autres pertes d'énergie) sera de 35 keV pour D-Deut 4 keV pour D-T. Pour atteindre un dégagement d'énergie raisonnable (de l'ordre de celle qu'on peut avoir dans un réacteur à fusion, c'est-à-dire 100 W/cm³) à la température 100 keV pour D-D, il faut une densité de l'ordre de 10^{15} deutons/cm³. Le problème est donc d'ioniser totalement et de chauffer un gaz de deutérium de densité considérable, à des températures très élevées, et de le contenir d'une façon autant que possible stable. Comme il n'est pas question d'essayer de contenir le plasma par des parois matérielles, il ne reste à envisager que des champs de force de nature électromagnétique.

Le confinement au moyen de champs permanents électriques se heurtant à de grandes difficultés, l'attention de la plupart des physiciens a été retenue par le champ magnétique. Il est bien évident toutefois que si un champ magnétostatique de géométrie convenable peut contenir indéfiniment une particule chargée, on ne peut en dire autant pour un gaz de particules, du fait qu'un champ magnétique statique n'influence pas l'énergie des particules, même électriquement chargées, et ne peut donc changer la distribution de Boltzmann. Toutefois, on peut prouver par les équations générales de la magnétohydrodynamique qu'un champ magnétique exerce sur un plasma une pression qui, dans le cas le plus simple, est proportionnelle au carré du champ. Il y aura malgré tout perte de particules par diffusion. Il semble que ces pertes sont inversement proportionnelles au carré du champ magnétique et que, dans des conditions réalisables, leur importance n'est pas très grande.

Si l'on admet le principe que le confinement du plasma ne peut être obtenu qu'au moyen de champs magnétiques de géométrie convenable, on voit tout de suite que ces champs ne peuvent être obtenus que par deux méthodes différentes : au moyen de courants ayant, au moins en grande partie, leur siège dans le plasma lui-même; au moyen de courants extérieurs. Nous bornant à citer les principales tentatives faites jusqu'à présent, et bien que cette classification ne soit pas très nette, nous pouvons inclure dans la première solution, la striction linéaire ou toroïdale, et dans la seconde le Stellarator et les machines à miroirs magnétiques.

Striction linéaire

L'effet de striction, connu depuis de nombreuses années et dont la théorie élémentaire est très simple, amène tant au confinement qu'au chauffage du plasma obtenu par l'effet Joule et par la compression (probablement par l'intermédiaire d'ondes de choc). Des expériences en ce sens ont été faites en Angleterre, aux Etats-Unis et en Russie depuis de nombreuses années, et plus récemment en Europe.

Dès le début on a vu que les principales difficultés venaient de la naissance d'instabilités de types divers qui désintègrent rapidement la colonne de plasma.

La théorie a montré qu'un champ magnétique axial extérieur et l'utilisation, comme conducteur de retour, d'une chemise métallique enveloppant le tube de décharge, pouvaient améliorer la stabilité.

Dans le cas de la striction linéaire, en l'absence de champs magnétiques axiaux, on obtient facilement des neutrons produits par les réactions de fusion D-D. Mais de leur distribution angulaire, on peut conclure qu'ils ne proviennent pas de réactions thermonucléaires. On pense qu'ils proviennent de deutons qui, par un mécanisme pas encore bien éclairci, ont acquis une énergie considérable (deuteron fugitif), ou plutôt qu'ils sont reliés à la naissance de certaines instabilités. Cette dernière hypothèse est confirmée par d'autres méthodes diagnostiques, notamment par l'emploi de sondes magnétiques. Les temps de confinement sont de l'ordre de quelques dizaines de microsecondes. Dans ces conditions les pertes aux électrodes ne sont pas trop grandes. L'utilisation d'un champ magnétique axial (striction linéaire stabilisée) n'a pas donné de résultats très encourageants. Du reste, en ce cas, même si l'on réussissait à éviter la naissance d'instabilités dans la colonne de plasma, l'exploitation de ce dispositif serait compromise par la présence des électrodes. Il est difficile que le développement des recherches dans ce domaine puisse amener à la construction de machines utilisables.

Certaines évaluations de Latham et Nation⁽⁴⁾, même pour un mélange D-T, amènent à des dimensions de la chambre de décharge difficilement réalisables. Toutefois, des études ultérieures, au stade de laboratoire, pourront fournir des informations sur les propriétés fondamentales du plasma et éclaircir des phénomènes encore inconnus, comme le mécanisme de la formation des instabilités, le problème des particules fugitives, le mécanisme de la stabilisation, etc..

Il est important de noter que les études sur les décharges linéaires sont relativement simples et peu coûteuses.

Les décharges toroïdales constituent le perfectionnement logique des décharges linéaires. L'absence d'électrodes réduit les pertes et les causes d'impuretés dans le gaz. C'est dans ce domaine que l'on a le plus d'expérience et c'est celui qui permettra probablement la meilleure évaluation des difficultés de la physique du plasma. Les recherches actuelles ont pour objectif principal l'étude de la stabilité. Bien qu'il n'y ait pas de théorie du phénomène, on peut appliquer les résultats théoriques valables pour la striction linéaire (Rosenbluth, Suydam, Tayler, etc..), tous basés sur l'existence d'un champ magnétique axial extérieur. Etant donné la haute conductibilité du plasma, le flux magnétique axial demeure inchangé pendant la striction.

Selon Rosenbluth, pour la stabilité, le champ axial à l'extérieur du plasma confiné devrait être opposé à celui contenu dans le plasma. Pour la stabilité, Suydam donne, comme hypothèse plus générale, une condition nécessaire (on ne sait si elle est suffisante) mettant en jeu le gradient de pression, les champs magnétiques axial et azimutal et leurs dérivées.

On peut se faire une image, pas très exacte, en imaginant l'anneau de plasma, resserré, parcouru en surface par un courant axial induit, qui provoque la contraction et assure le confinement par interaction avec le champ magnétique azimutal extérieur qu'il produit lui-même, enfermant un champ magnétique axial bien supérieur à celui produit primitivement par les courants extérieurs.

L'échauffement du plasma est obtenu soit par effet Joule, soit par l'interdiffusion de deux champs magnétiques. Les températures finales que l'on peut atteindre sont de l'ordre (bien que mineures) de celles données par la fameuse équation de Bennett

$$4 NkT = I^2$$

où N est le nombre d'ions par cm de plasma et I le courant induit (u.e.m.).

Les plus grosses machines actuellement en fonctionnement sont la Zeta anglaise et la russe Alpha,* constituées toutes deux par un tore de 3 mètres de diamètre ayant une section de 1 mètre de diamètre. Les courants atteignent dans toutes deux 200.000 A avec des temps de montée de 10^{-3} s. Les expériences faites avec Zeta⁽⁵⁾ ont montré l'obtention d'une certaine stabilisation et fourni des résultats reproductibles obtenus par les diverses techniques diagnostiques (sondes magnétiques, microondes en émission et en transmission, élargissement et déplacement Doppler sur les spectres des impuretés, etc..).

On a observé des neutrons (10^5 - 10^6 par décharge) et des rayons X de grande énergie (jusqu'à 500 keV). La distribution énergétique et angulaire des neutrons ferait exclure l'origine thermonucléaire. Neutrons et rayons X pourraient être produits respectivement par les deutons et électrons fugitifs, bien que ces hypothèses, surtout pour les neutrons, présentent de considérables difficultés.

Il reste de nombreux problèmes, tant fondamentaux que techniques, à affronter comme l'amélioration de la stabilité en essayant de tenir séparés le champ magnétique axial

* construite en 6 mois après la publication relative à Zeta au début de 1958.

à l'intérieur du plasma et celui azimutal, et de programmer un champ magnétique axial à l'extérieur du plasma de direction opposée au champ intérieur; le réchauffement par interdiffusion de ces champs; l'importance des particules fugitives et des ondes de choc; l'origine des neutrons et des rayons X; le choix des matériaux, etc...

En ce qui concerne la réalisation d'un réacteur thermonucléaire de géométrie toroïdale, des résultats d'un calcul (optimiste) pour l'exploitation des réactions D-T sont reportés par Rosenbluth (6).

Une liste des principales machines existantes et de leurs caractéristiques est reportée dans le rapport de Biker-ton (5).

Les machines à miroirs magnétiques, dans leurs différentes formes, constituent l'une des méthodes les plus prometteuses.

Une particule chargée (7), dans des conditions initiales convenables, peut être indéfiniment confinée dans un champ magnétique ayant symétrie de révolution, champ dans lequel l'intensité le long de chaque ligne de force est minimum sur les points d'un plan perpendiculaire à l'axe de symétrie qui est le plan de symétrie de l'appareil. La théorie élémentaire de ce confinement est basée sur la conservation (approchée) du moment magnétique $N = \frac{E_{\perp}}{B} *$.

Cela fait que, comme l'énergie cinétique totale doit se conserver à mesure que la particule avance vers la région où le champ est plus fort, la composante de la vitesse parallèle au champ diminue et peut finalement s'annuler et changer de signe (effet miroir). Afin que cette réflexion puisse se produire, il est nécessaire que, dans le plan de symétrie, $\frac{E_{\parallel}}{E_{\perp}} = R-1$, R étant le rapport entre l'intensité du champ aux miroirs et l'intensité du champ au plan. Cette limitation définit le cône de pertes. Des pertes pourront encore se produire à cause de la non exacte invariance du moment magnétique; le calcul a montré que, dans des conditions pratiquement réalisées, elles ne sont pas importantes.

Naturellement, lorsqu'un plasma est présent dans l'espace envisagé, les collisions entre particules vont provoquer des pertes latérales et axiales (aux miroirs), qui sont d'ailleurs plus sensibles pour les particules de charge élevée (impuretés), ce qui a pour effet de purifier le plasma.

* E_{\perp} et E_{\parallel} sont les énergies cinétiques des mouvements perpendiculaire et parallèle aux lignes de forces magnétiques

Ces pertes, à cause de la diminution des sections efficaces de collision avec l'énergie, seront plus importantes quand le gaz est froid. L'influence de la diffusion ambipolaire dans certains cas a pour effet de réduire la valeur effective de R .

Les problèmes les plus graves sont, comme d'habitude, ceux qui concernent la stabilité du plasma. Selon l'intuition de Teller, confirmée théoriquement par les calculs de Rosenbluth, la géométrie du champ magnétique, pour la stabilité, devrait être assujettie à des conditions très sévères. Heureusement, l'expérience (Q-cumber, Toy Top, Table-Top) a prouvé qu'on peut obtenir tout de même une stabilité suffisante (quelques m sec.) sans recourir à la "cusped geometry" prévue par la théorie. Toutefois, même les théories successives de Berkowitz et al ne peuvent justifier entièrement ces résultats. Les instabilités pourraient être provoquées par d'autres mécanismes (anisotropie de la pression, courants d'ions dans le plasma); là encore la théorie n'est pas suffisamment avancée.

Il est possible, dans les machines à miroirs, d'effectuer sur le plasma des compressions (radiales et axiales) au moyen d'une augmentation globale du champ magnétique ou du déplacement (électrique ou mécanique) des miroirs. Si le temps de variation du champ est petit par rapport à la période de rotation des ions, ces compressions peuvent être considérées comme adiabatiques et comportent un échauffement du plasma. Le plasma se comporte comme un gaz ayant 2 degrés de liberté dans le cas de la compression radiale, 1 dans le cas de la compression axiale.

Il est également possible, par variation du champ, de réaliser des transferts de plasma.

La formation du plasma à l'intérieur de la machine peut se faire, soit par ionisation et chauffage du gaz initialement contenu, soit par injection d'ions et électrons ou de plasma, suivie de leur capture dans l'espace de confinement.

Pour qu'une particule, injectée de l'extérieur, puisse être capturée, il faut que change le champ, la vitesse ou la charge spécifique de la particule.

La méthode de la variation du champ a été utilisée soit par injection extérieure, soit par injection intérieure. Dans le premier cas, l'augmentation du champ empêche la sortie des ions injectés; dans le second cas, la source étant placée à l'intérieur de la machine, l'augmentation du champ coopère, avec les mouvements de procession, à empêcher que les ions retombent sur la source.

Les collisions entre ions ou des phénomènes coopératifs peuvent fournir le mécanisme pour la variation de la vitesse permettant la capture sans variation concomitante du champ.

Enfin, la variation de la charge spécifique est utilisée dans le cas de l'injection d'ions moléculaires, D_2^+ dont la dissociation est produite par leur passage à travers un arc entretenu dans l'espace de confinement (DCX) ou par collision avec le gaz neutre résiduel. Dans les deux cas, pour la constitution du plasma, il faut que le courant d'injection soit suffisamment élevé pour compenser les pertes provoquées, entre autre, à cause du gaz résiduel et notamment par échange de charge. Cela amène à des valeurs critiques du courant ionique injecté au dessous desquelles le remplissage est impossible *.

Parmi les problèmes théoriques qui restent à résoudre on peut mentionner le problème général des pertes, l'influence de la pression du plasma, l'effet des conducteurs métalliques, des champs électriques, et surtout le problème de la stabilité.

La situation actuelle est bien résumée, en particulier pour le miroir à champ variable, par Post : alors qu'il faudrait un temps de confinement de l'ordre d'une seconde, on n'a obtenu que des millisecondes; tandis qu'il faudrait des énergies de centaines de keV, on n'a atteint, peut-être, que 1 keV.

Le Stellarator

Le système Stellarator, développé essentiellement par Spitzer⁽⁹⁾ et son groupe à Princeton, se base sur le confinement au moyen d'un champ magnétique extérieur.

Dans un tore, les lignes de force d'un champ magnétique axial, créé au moyen de courants azimutaux extérieurs, seront circulaires; il en découle, la circulation étant constante et la longueur des lignes variables, que ce champ n'est pas uniforme. Il est facile de prouver, en se basant sur le mouvement de chaque particule, que dans ces conditions les ions positifs et les électrons subirait une dérive perpendiculaire au plan équatorial et de sens opposé, donnant lieu à une séparation des charges et du champ électrique qui détruirait rapidement l'équilibre.

Pour surmonter cette difficulté, on a recours à une transformation rotationnelle du champ, c'est-à-dire que l'on a recours à des champs magnétiques dont les lignes de force ne se ferment pas après un seul tour. Si l'on considère une section transversale du tore et la ligne de force qui passe par un des points de cette section, celle-ci après chaque tour du tore ne rencontre pas la section sur le même point; ainsi une même ligne aura avec la même section un ensemble de points d'intersection qui, grosso modo, formera une ligne fermée d'une allure régulière; la ligne de force dans l'espace annulaire décrira donc une sorte de surface toroïdale : surface magnétique. Sous des conditions, qui ne sont pas trop restrictives, on peut prouver qu'il existe une ligne de force fermée, axe magnétique, qui coupe chaque section en un seul point qui est le point invariant de la transformation rotationnelle.

* Parmi ces machines on peut mentionner aussi les magnétrons à ions et les machines à plasma tournant du genre Ixion.

L'angle formé par chaque ligne après chaque tour par rapport à l'axe magnétique est "l'angle de transformation rotationnelle". Cet angle peut ou non dépendre de la distance entre l'axe magnétique et la ligne considérée. Dans le premier cas, la transformation rotationnelle présente donc aussi un cisaillement.

Une transformation rotationnelle peut être produite soit en déformant le tore (par ex. en lui donnant la forme d'un 8), soit au moyen d'enroulements hélicoïdaux supplémentaires.

Actuellement, on utilise la seconde méthode : on ajoute à l'enroulement principal, qui fournit le champ axial B_0 , 2ℓ spires hélicoïdales; deux spires contiguës sont parcourues par des courants de sens contraires, de façon à ce que leur effet sur le champ axial soit négligeable. Un calcul, en seconde approximation, montre que l'on obtient ainsi un champ azimuthal, non nul en moyenne, et que l'angle de transformation rotationnelle est proportionnel (dans une certaine approximation) à $r^{2\ell-4}$, r étant la distance de la ligne considérée à l'axe magnétique. On a donc cisaillement si $\ell > 2$.

Dans un champ magnétique ainsi constitué, tant l'étude des orbites de chaque particule que celle du comportement du plasma au moyen des équations de la magnétohydrostatique montrent la possibilité d'un confinement stable d'un plasma (en ne tenant pas compte des phénomènes de diffusion, qui, en théorie, ne devraient pas être prohibitifs), à condition que le rapport β entre la pression du plasma et la pression magnétique $B_0^2/8\pi$ soit suffisamment petit. Si l'on néglige l'interchange entre plasma et champ magnétique, on trouve que la limite supérieure de ce rapport est proportionnelle au carré de l'angle de transformation rotationnelle et il est maximum pour $\ell = 2$. Si l'on tient compte de l'interchange, il est nécessaire d'avoir recours au cisaillement qui n'a lieu que si $\ell > 2$.

Il faut de plus, pour la stabilité, que le courant dans le plasma, qui en principe donne lui-même lieu à une transformation rotationnelle, ne détruise pas celui produit par l'enroulement hélicoïdal externe, et donc que le courant dans le plasma ne dépasse pas une certaine limite (limite de Kruskal).

Les pertes dues aux impuretés peuvent être réduites soit en perfectionnant le vide, soit au moyen de déflecteur dans lequel, en donnant une forme convenable au champ magnétique dans une zone du tube, les ions proches de la paroi (impuretés et ions lents) sont extraits du tube. Dans les appareils construits jusqu'à présent, le gaz est froid au départ. Le problème de son réchauffement a été affronté en recourant à diverses méthodes :

a) Chauffage ohmique, au moyen de courants axiaux induits dans le plasma. Comme la résistivité d'un plasma diminue avec l'accroissement de la température (comme $T^{-3/2}$) cette méthode devient inefficace pour des températures de l'ordre de 10^6 °K. En outre, le phénomène prévu par Kruskal pose une limite au courant induit. On a observé des électrons fugitifs qui provoquent finalement de grandes pertes d'énergie.

b) Pompage magnétique, en faisant varier le champ de confinement, il se produit une compression adiabatique radiale dans le plasma. L'énergie est transférée directement aux composantes de la vitesse perpendiculaires au champ. Si le phénomène était réversible, on ne pourrait avoir un effet net. La réversibilité peut être empêchée soit par des collisions donnant de l'énergie cinétique au mouvement axial des ions, (gyrorelaxation), soit par échappement du gaz chaud des zones du tube dans lequel s'effectue le pompage, (temps de transit). Le premier mécanisme est peu efficace aux hautes températures, parce que la section efficace de collision diminue avec l'énergie; le second, par contre, devrait agir même à température très élevées. Des résultats expérimentaux manquent encore pour cette méthode.

c) L'échauffement par résonance cyclotronique des ions est très prometteur. L'existence d'une fréquence de résonance du plasma proche de la fréquence cyclotronique des ions devrait permettre de fournir de l'énergie au plasma par ce moyen. On a des preuves expérimentales indirectes de son efficacité, mais il manque encore des résultats sur les températures que l'on peut obtenir effectivement.

Le résultat négatif le plus important constaté jusqu'à présent sur les Stellarators réalisés, est la perte de plasma aux parois du tube, qui est 100-1000 fois plus forte que celle prévue théoriquement. Mais on n'a pas encore éclairci la cause de ce phénomène qu'il faut éliminer, faute de quoi l'utilisation du Stellarator serait impossible pour la production de réactions thermo-nucléaires.

*

* *

Toutes les méthodes esquissées exigent la mise en oeuvre de moyens de diagnostic parmi lesquels on peut rappeler :

- mesure des grandeurs électriques,
- sondes électriques et magnétiques,
- spectroscopie,
- détection de particules et rayons X
- microondes,
- photographie rapide.

Un effort considérable est aussi nécessaire dans les techniques de stockage d'énergie, de la production des champs magnétiques, du vide (ces deux dernières particulièrement pour le Stellarator et les machines à miroirs).

L'étude et le perfectionnement des sources d'ions et de plasma sont essentiels, surtout dans le cas des machines à miroirs.

II - RECHERCHES DANS LES PAYS DE LA COMMUNAUTE

BELGIQUE

A l'Université libre de Bruxelles, un groupe de 10 chercheurs (M. Baudoux, M. Lafleur) s'occupe de la décharge dans les gaz.

Ce groupe (initialement moins nombreux) a commencé des recherches sur les décharges linéaires dans des tubes en pyrex avec écran métallique et stabilisation magnétique (jusqu'à 2000 G), par enregistrement des grandeurs électriques. Des moyens spectroscopiques de diagnostic sont maintenant disponibles pour l'observation des variations d'intensité des raies. On aura bientôt un convertisseur d'images permettant d'obtenir 5 photos successives d'une même décharge (ouverture 10^{-7} sec, décalage $5 \cdot 10^{-7}$ sec.).

On étudiera les instabilités $m = 1$ au moyen d'une disposition hélicoïdale de couple opposé de sondes.

Des recherches seront entreprises sur les ondes de choc.

Le groupe disposera bientôt d'un banc de condensateur pour 25 kJ.

Il faut également mentionner un petit groupe de 2 ou 3 théoriciens qui travaillent à l'Université de Bruxelles.

Enfin à l'ACEC (Charleroi) un groupe s'occupera de la décharge dans les gaz (M. Hoyaux).

ALLEMAGNE

D'importantes recherches théoriques⁽¹¹⁾ qui ont donné de remarquables résultats ont été effectuées par le groupe de Göttingen (actuellement à Munich).

L'équilibre d'ionisation des atomes d'impuretés (notamment de l'oxygène) dans une décharge, le temps nécessaire pour son établissement et la perte d'énergie provoquée par l'excitation des niveaux quantiques ont été étudiés par Biermann, Knorr, Schmidt.

On a étudié les limites d'applicabilité du chauffage ohmique. Pour le chauffage H.F. des recherches ont été faites par Körper. Des études très importantes (Schlüter, Schmidt) ont été faites sur les chauffages par gyrorelaxation et on a reconnu ses possibilités d'application dans le cas où la fréquence du champ magnétique est proche de celle des chocs des ions.

On a cherché les solutions (Jörgens, Kippenhahn) des équations de la magnétohydrostatique dans le cas de plasma toroidal en déduisant la nature des courants extérieurs et des courants, en surface ou en volume, dans le plasma. Pour certains cas particuliers, ces recherches ont été achevées par Meyer et Schmidt, soit analytiquement, soit par construction de modèles.

Les problèmes fondamentaux de la stabilité ont été traités par Hain, Lüst, Schlüter. Dans certains cas on a prévu théoriquement (Jordan) l'action stabilisatrice du champ magnétique axial.

Lüst et Schlüter ont étudié également le problème des trajectoires des particules individuelles dans un champ magnétique de symétrie axiale, en déduisant en intégrale des équations du mouvement qui dépendent de la composante du champ magnétique selon les méridiens et qui n'est pas affectée par un champ électrique dirigé selon les méridiens. En s'appuyant sur cette intégrale et sur celle de l'énergie on a prouvé la possibilité de confinement stable. Des études détaillées de certains cas particuliers ont été faites par Fisser et Kippenhahn et par Hertweck, qui avec Schlüter ont étudié également la validité et l'invariance adiabatique du moment magnétique pendant la variation du champ magnétique.

La structure et les propriétés des ondes de choc ont été analysées dans différents cas par Davis, Hain, Lüst et Schlüter.

Les travaux expérimentaux sont faits surtout à Munich (Max-Planck-Institut), en collaboration étroite avec les théoriciens, à Aachen-Jülich, et encore à Munich auprès de la Technische Hochschule.

Les travaux actuellement en cours au Max-Planck-Institut (von Gierke) ont été commencés à Göttingen il y a deux ans environ. Au commencement le but principal était le diagnostic, et à cet effet on a créé des groupes spécialisés dans les différentes techniques. A présent, les recherches sont dirigées dans les directions suivantes:

- 1) Problème de la décharge - On a étudié le bilan énergétique et le degré d'ionisation en fonction du temps dans une décharge toroidale dans un tore de pyrex avec champ magnétique axial. Ce dispositif qui fonctionnait déjà à Göttingen a été perfectionné à Munich (paroi de stabilisation, noyau de fer, etc...). On a mesuré, en plus du courant et des tensions, d'autres grandeurs comme le rendement lumineux, l'intensité des lignes spectrales, les rayons X, etc..., le tout en fonction du temps. On compte utiliser un oscillographe à 8 tracés pour l'enregistrement simultané sur film.
- 2) Dispositif toroidal pour l'obtention de hautes températures. Ce dispositif Mimikry est semblable à l'anglais Zeta à une échelle réduite, 1 m de grand \varnothing , 30 cm de petit \varnothing . Ce dispositif qui a été construit par des firmes allemandes, a été conçu de façon à avoir une grande flexibilité expérimentale. On compte commencer les expériences dans les premiers mois de cette année.
- 3) Stellarator - Un petit Stellarator, semblable au modèle B de Princeton est à peu près au même stade. Les enroulements donnant la transformation rotationnelle du champ magnétique sont prévus de façon à produire également le cisaillement. On se propose d'étudier l'équilibre, la stabilité et le phénomène de diffusion et coopératif d'un plasma enfermé dans un champ magnétique presque stationnaire. Le chauffage sera fait en ayant soin d'éviter le champ électrique dans le plasma qui pourrait donner lieu à des instabilités. On prévoit des températures de l'ordre de 10^6 K. La plus grande partie du dispositif est déjà construite et les autres sont en construction. Des études et expériences préliminaires sur des problèmes spécifiques sont en cours. Si cette première machine donne des résultats satisfaisants, une seconde machine sera projetée, notamment pour l'étude du chauffage.

Parmi les méthodes diagnostiques utilisées dans ces travaux, on peut citer:

Spectroscopie: pour son application à l'étude des hautes températures, on tâche d'étendre les méthodes utilisées dans le visible et dans le proche U.V., autant que possible, à l'U.V. lointain et aux rayons X. Sont en cours des mesures de densité électronique d'un plasma raréfié (10^{13} - 10^{14} particules cm^3 excitées par H.F.). De plus on mesurera la température électronique et la température des atomes par effet Doppler (par interférométrie). On se propose de contrôler l'influence du champ magnétique. Sur un plasma de plus grande densité, (10^{16}) on se propose de mesurer les temps pendant lequel il reste thermique en présence de courant électrique croissant et de grande densité ainsi que les limites de validité entre la formule de Saha et la formule "Corona". On étudiera également l'effet Faraday. D'autres expériences concernant la largeur des lignes en fonction du temps sont en projet.

Microondes: Le groupe qui s'occupe des microondes a été organisé durant l'été 58. Pour le moment on s'équipe pour travailler dans les domaines des 4 mm et 8 mm, on pense pouvoir arriver en 59 à 2 mm et 1 mm. On a surtout fait des travaux préliminaires pour des expériences ultérieures.

Mesures nucléaires: On a commencé d'une façon préliminaire des mesures de rayons X. Sont en préparation: mesure du rendement intégral des neutrons, la distribution des neutrons dans le temps, la répartition spectrale des neutrons (par émulsion), on disposera d'une chambre à brouillard. Mesures du rendement intégral, de distribution dans le temps et spectre seront faites également sur les rayons X.

Sondes: sont en préparation des sondes Langmuir, simples et doubles dont le champ d'application sera peut-être limité. Sondes magnétiques pour mesurer les variations du champ dans l'espace ou dans le temps. Les degrés d'utilisation et les limites d'emploi de générateurs Hall seront examinés au moyen de décharges d'essais. Une étude théorique a montré les limites d'applicabilité des sondes de particules.

Photographie rapide: On a construit une camera destinée à la résolution temporelle d'une image fractionnée par un miroir tournant. On a construit une camera à modulations video qui permet d'enregistrer soit l'image dans un temps très bref, (microseconde), soit l'image d'une fente en fonction du temps.

Un groupe de physiciens est spécialement chargé de la technique du vide poussé. Des essais sur les pompes et les instruments de mesure sont en cours. Par la suite, on développera des dispositifs métalliques chauffables. On travaille à la réalisation d'un omégatron (en principe un spectromètre de masse) dans le but d'enregistrer d'une façon particulièrement rapide la nature des pollutions. Des expériences en cours concernant la pulvérisation cathodique des différents matériaux par le deutéron de 150 keV.

Pour le stockage d'énergie on dispose de condensateurs pour 100 kJ qui seront portés à 2 ou 300.

Une équipe d'ingénieurs et un laboratoire d'électronique collabore avec les physiciens pour les problèmes techniques.

Le personnel qui travaille au Max-Planck-Institut comprend environ 15 théoriciens, 25 expérimentaux.

Le groupe de AACHEN (Fucks, Jordan) a un programme sur la striction concernant principalement les décharges rapides et des travaux sur les électrons relativistes dans un plasma. Dans des travaux récents des courants de l'ordre 10^6 A et des températures de 10^6 °C ont été obtenus. On travaille sur de petits dispositifs toroidaux. Dans le nouveau centre de Jülich, un laboratoire sera réservé à la fusion. Le groupe dispose d'une

trentaine de chercheurs.

A la Technische Hochschule (Fünfer) on travaille sur les décharges linéaires dans le deutérium. La contraction du plasma est étudiée au moyen d'une camera à 4 cellules de Kerr, qui permet la prise de 4 clichés en succession réglable. Au moyen des émulsions nucléaires on étudie la distribution en énergie des neutrons, pour obtenir des informations sur leur origine. On étudie aussi l'effet de stabilisation du champ magnétique axial en relation avec le moment et l'intensité d'émission des neutrons. Un laboratoire destiné à ce groupe est en construction à Garching près de Munich. On dispose pour le stockage de l'énergie de 128 kJ.

Le groupe compte 8 physiciens.

Des groupes moins importants (Kiel, Hannover) s'occupent en particulier de l'aspect spectroscopique du problème.

FRANCE

Les recherches sur la physique du plasma ont commencé en France en 1955 au Service de Neutronique Expérimentale du Commissariat à l'Energie Atomique à Fontenay-aux-Roses (Vendryes, Hubert).

Les recherches récentes reportées dans la littérature⁽¹¹⁾ ont eu pour objet la reproduction des travaux faits précédemment dans d'autres pays (notamment en Russie). Des décharges linéaires dans le deutérium dans une chambre en pyrex entourée d'une chemise en cuivre et saturée dans un champ magnétique axial qui peut aller jusqu'à un millier de Gauss. On a enregistré les grandeurs électriques (courant et tension). Des calculs assez simples, basés sur des hypothèses raisonnables permettent de déduire l'allure du rayon de la colonne de plasma pendant la décharge. L'étude de la colonne est faite également au moyen de la cinématographie rapide (1 micro sec.). Les tensions utilisées sont de l'ordre de 30 kV. La durée de la colonne est de l'ordre de quelques micro sec. Dans des expériences préliminaires, sans chemise métallique, sur un champ magnétique axial on a trouvé la production de neutrons ($10^6 - 10^7$ par décharge) et de rayons X due à des phénomènes d'instabilité.

Dans des conditions semblables à celles ci-dessus, on a fait sur des décharges toroidales des mesures de grandeurs électriques, des mesures spectroscopiques (raies de l'hydrogène et d'impureté) et de rayons X. Les expériences ont confirmé le rôle stabilisateur du champ magnétique axial; la production des rayons X est attribuable aux électrons fugitifs.

L'étude des décharges dans le deutérium dans un tore d'aluminium (80 cm de grand diamètre et 7 cm de petit diamètre)

a été faite au moyen d'enregistrement des grandeurs électriques, photographie rapide, spectroscopie. Le couplage entre circuit inducteur (dans lequel on décharge une batterie de condensateur capable d'emmagasiner jusqu'à 75 kJ) et plasma est amélioré par des circuits magnétiques en fer. Des enroulements peuvent produire un champ magnétique axial de 5 000 Gauss environ.

On a étudié les problèmes soulevés par la présence des manchons isolants; l'influence du champ magnétique axial, de la tension de charge du condensateur et de la pression du deuterium (10^{-2} , 10^{-3} torr). Les observations spectroscopiques ont révélé l'élargissement des raies Balmer du deuterium, probablement par effet Stark, qui est fonction du champ magnétique axial.

Dans quelques décharges, des températures de l'ordre de 10^6 °K ont été probablement atteintes.

Pour 1959, un vaste programme, dans le cadre d'un contrat de recherche EURATOM-CEA, est en cours de développement. A l'équipe de Fontenay-aux-Roses s'est ajoutée celle du Service de Physique Appliquée à Saclay (Winter) qui vient d'achever la construction du grand accélérateur Saturne.

Le programme comporte la poursuite des recherches sur la striction et des études poussées sur les miroirs magnétiques. La première partie sera faite à FAR utilisant le tore Equateur C (diamètres 1 m et 10 cm) en cuivre émaillé avec manchons isolants et le tore TA. Ce dernier est en aluminium (diamètres 2 m, 30 cm), avec quatre manchons isolants. A l'intérieur se trouve une chemise continue en acier ondulé de 1 mm d'épaisseur. Le couplage magnétique avec le circuit primaire est réalisé par des circuits magnétiques en fer, et des enroulements produisant le champ axial.

Le back-out pour l'amélioration du vide est provoqué en chauffant par induction la chemise continue.

La préionisation se fait par H.F. dans deux ampoules où le deuterium passe avant de se diffuser dans la chambre.

Les recherches en programme consistent dans l'étude de la distribution du champ magnétique à l'intérieur de la décharge au moyen de sondes magnétiques et dans celle des électrons run away au moyen des rayons X dont la distribution spatiale et le spectre énergétique seront observés en introduisant dans la décharge des films protégés par des écrans métalliques d'épaisseur variable.

On prévoit également la programmation du champ magnétique axial pour étudier son influence sur la stabilisation. L'alimentation de la décharge est réalisée en déchargeant dans les enroulements primaires une batterie de condensateur emmagasinant 45 kJ effectifs. Des perfectionnements, notamment en ce qui concerne la chemise continue sont en cours d'accomplissement.

Le programme des miroirs magnétiques couvre le domaine des machines à miroirs pulsés (FAR) et celui des machines continues (Saclay, FAR).

On a commencé à FAR des recherches pour la construction d'une machine à miroirs dont le bobinage est constitué par une seule spire, formée par un conducteur massif de profil opportun dans laquelle on décharge 50 kJ. Des photos prises avec la camera Beckmann montrent des instabilités. Il faut toutefois remarquer que la densité du gaz était forte et la température basse.

Une seconde chambre à miroirs est en projet. L'injection sera faite soit par un canon à plasma placé à l'un des bouts, la capture du plasma - même dans une proportion modeste - devant s'effectuer par le mécanisme des chocs, soit par deux canons à plasma opposés, la capture pouvant s'effectuer par interaction des plasmoides ou par choc.

Successivement l'injection dans une chambre à miroir sera effectuée radialement à partir de deux ou trois points du cercle équatorial pour étudier, entre autre, le mécanisme de capture par interaction. Ces travaux seront commencés cet été.

Pour effectuer le chauffage par interaction e.m. on a projeté une machine où le transfert du plasma dans une chambre de petit diamètre sera effectué par variations des champs magnétiques; des mesures de la vitesse de transfert sont en programme.

Tous ces travaux demandent des études poussées sur les sources de plasma. Des essais sont en cours sur des canons à plasma au titane, à boutons et à rondelles. On a également entrepris la construction d'une source Marshall.

Une machine à miroirs continue sera éventuellement construite à FAR. L'injection d'ions moléculaires rapides sera effectuée radialement par de nombreuses sources. En exploitant les champs magnétiques on obtiendra une focalisation des ions qui permettra de se passer de la stabilisation de l'énergie des ions injectés. La dissociation des ions se produira probablement par arc. La charge spatiale sera neutralisée par l'injection d'électrons.

L'alimentation exige une source de 50 kV 5 A.

Le programme de Saclay est dirigé vers la construction d'une machine continue du genre DCX et sur l'étude des possibilités d'améliorer le confinement par H.F. Ce programme comporte l'étude poussée des sources d'ions. On dispose déjà d'une source pulsée d'ions atomiques à extraction et focalisation électrostatique débitant un courant de 90 mA. Les ions sont accélérés jusqu'à 100 keV. Des sources d'ions moléculaires, du type PIG, sont en cours d'étude. Le but est d'arriver, par étapes, à des courants de l'ordre de 1 A.

Est également à l'étude la neutralisation du faisceau ionique. On se propose d'arriver à injecter un courant pouvant aller jusqu'à 1 A, d'ions ayant une énergie de l'ordre de 1 MeV.

Pour la capture, on envisage l'emploi d'arc ou d'autres méthodes (jets moléculaires, champs tournants, collisions dissociatives sur un plasma).

Une étude poussée de l'espace de confinement (géométrie des champs magnétiques, études des trajectoires) sera entreprise.

La connaissance exacte des sections efficaces de dissociation et échange de charge étant nécessaire (les données dont on dispose actuellement sont contradictoires) des mesures à ce sujet sont en programme.

A Saclay, on a déjà fait des études de caractère fondamental sur les décharges sans électrodes dans une chambre sphérique qui ont mis en évidence des phénomènes liés aux oscillations propres du plasma dont l'interprétation est en cours.

Les moyens de diagnostic dont on dispose (ou disposera bientôt) consistent en:

Microondes: A FAR on dispose d'un équipement à 8 mm pour la détection, qui a été utilisé pour des mesures sur Equateur et sur la machine à miroirs. A Saclay, on utilise un interféromètre à microondes de 8 mm pour la mesure de la densité électronique dans un plasma. Les deux laboratoires ont en projet des équipements à 4 mm.

Spectroscopie: On utilise des spectrographes à prisme, et on disposera bientôt de spectrographes à réseaux et d'interféromètres Fabry-Perot.

Sondes: On emploie déjà des sondes magnétiques; des sondes piézoélectriques sont en projet.

Photographie ultra-rapide: On dispose déjà d'une camera Beckmann qui a été utilisée pour de nombreuses recherches à FAR; d'autres moyens seront peut-être nécessaires.

Détection des neutrons: par émulsions nucléaires et chambre à diffusion (en projet).

Des mesures sur les rayons X sont également en cours.

Pour le stockage de l'énergie, on dispose à FAR de condensateurs qui, convenablement équipés d'ignitrons, pourront emmagasiner au total 700 kJ. On prévoit d'ajouter 1 MJ. Des batteries d'accumulateurs et des machines tournantes sont également prévues.

ITALIE

Au commencement de 1957, deux petits groupes (l'un pour les études théoriques, l'autre pour les travaux expérimentaux) ont été créés.

Le premier groupe a commencé à travailler, en collaboration avec le CERN, sur le problème du confinement d'un plasma dans un champ magnétostatique et est arrivé à des résultats intéressants.

Le groupe expérimental a construit d'abord une source ionique H.F. pour l'étude de la recombinaison.

Actuellement des travaux sont en cours sur la compression radiale rapide dans un tube linéaire de 20 cm de diamètre et 1 m de longueur. Le tube est enveloppé par une chemise en cuivre, divisée en six secteurs dans laquelle on décharge une batterie de condensateurs de 150 kJ (fréquence propre 0,5 MHz). Cette disposition en secteur a pour but d'augmenter le voltage effectif, diminuer le temps de décharge et obtenir une distribution plus symétrique du champ électrique dans le tube. Le but principal de cette expérience est l'étude des conditions dans lesquelles un plasma peut se détacher des parois, et celle du mécanisme de formation de couches minces de courant.

Des recherches de caractère fondamental sont en cours sur l'effet d'un champ magnétique sur une décharge à arc dans le Hg. Des mesures préliminaires avec sondes sont en cours pour l'étude de la distribution, dans le temps et dans l'espace, du champ magnétique dans une décharge linéaire, ainsi que pour celle du faible plasma existant entre la décharge resserrée et les parois (quelques kJ, 20 micro sec.).

Les dispositifs comprennent l'enregistrement des grandeurs électriques, l'emploi de miroirs tournants et la spectroscopie (spectroscopes à prisme et à réseau). L'emploi des microondes est prévu.

D'autres études sur la striction sont en programme.

Le groupe est actuellement formé par 8 physiciens qui travaillent dans l'Institut de Physique de l'université de Rome.

Un laboratoire est en construction à Bracciano, à proximité de Rome.

HOLLANDE

Au sein de la Fondation F.O.M. a été instituée une équipe de travail "Recherches sur les réactions thermo-nucléaires" (Brinkman) comprenant 4 groupes de travail dont le programme est le suivant:

Groupe I - théorie (Brinkman) - Laboratoire Central T.N.O. Delft

- Recherches théoriques dans le domaine de la magnétohydrodynamique.

Collaboration aux recherches expérimentales des autres groupes de travail.

Groupe II - Université d'Etat d'Utrecht (Smit) - Utrecht

- Recherches expérimentales sur la possibilité d'obtenir du plasma chaud dans un champ magnétique constant et homogène et dans un champ électrique alternatif de la fréquence de résonance cyclotron des ions ou, éventuellement, dans d'autres champs alternatifs de haute fréquence.

- L'élaboration de méthodes pour la mesure des concentrations des électrons et des ions, des températures des électrons et des ions, des phénomènes de transport et des champs électriques et magnétiques dans les décharges gazeuses, au moyen de sondes, de microondes et de spectroscopie optique.

- Vérification et application de ces méthodes aux décharges mentionnées, ainsi qu'à une petite décharge gazeuse toroidale concentrée, qui sera produite en coopération avec d'autres groupes.

Groupe III - Université municipale d'Amsterdam (Kistemaker)

- Recherches expérimentales sur des décharges toroidales (décharges en champs électriques et magnétiques croisés).

Cette recherche comprend l'étude des caractéristiques de la tension de courant de la décharge en fonction des différents paramètres, la détermination de la température à partir du spectre de bruit et de l'effet Doppler des raies spectrales, l'examen de la répartition du potentiel dans le plasma au moyen de sondes, etc...

Groupe IV - S.A. KEMA à Arnhem (Horst) - Décharges à arc

- Production de décharges linéaires à basse pression gazeuse en employant une grande puissance électrique et en appliquant la stabilisation magnétique.

- Calcul technique et financier pour la construction éventuelle de transformateurs et de bobines pour les décharges toroidales dans les gaz.

- Elaboration d'un projet de physique technique pour un grand tube de décharge toroidale et d'un transformateur connexe, alimenté par des sources de courant alternatif à basse fréquence (de l'ordre de 50 Hz), et éventuellement par du courant continu.

- Expériences éventuelles sur la décharge.

La F.O.M. a pris l'initiative de créer un Institut de Physique du plasma (Braams) à RIJNHUIZEN et qui doit être terminé au début de l'été 59. La construction d'un nouveau laboratoire est projetée courant 59. Le personnel prévu est de 25 universitaires. Le programme de l'Institut est le suivant:

- Recherches sur les décharges gazeuses en général, dirigées sur la fusion nucléaire, notamment étude des pinch et des décharges de haute fréquence et étude des méthodes diagnostiques de mesure du plasma.

- Etude du confinement de particules chargées et de plasma dans des bouteilles magnétiques de différentes configurations. Confinement par haute fréquence.

- Etude des méthodes servant à porter le plasma à de hautes températures.

- Création de sources de particules chargées et de plasma.

III - ORGANISATION, PERSONNEL, ENSEIGNEMENT

Les contacts entre les différents groupes, aussi bien ceux de la Communauté que ceux de presque toute l'Europe, sont assurés par des colloques périodiques (environ tous les trois mois) organisés par le CERN, jusqu'à présent au siège du CERN à Genève.

Dans ces colloques, dont l'utilité est certainement très grande, on traite non seulement les problèmes scientifiques et techniques mais aussi ceux ayant trait à l'organisation de la recherche.

L'une des difficultés majeures à laquelle se heurtent à peu près tous les pays c'est la difficulté de trouver du personnel au courant des problèmes théoriques et expérimentaux. En effet, jusqu'à il y a quelques années, la magnétohydrodynamique et la physique des très hautes températures n'intéressaient que les astrophysiciens. Les quelques théoriciens que l'on trouve dans la Communauté viennent presque tous de cette souche. Quant

aux expérimentateurs, on pourrait les trouver dans d'autres domaines de la physique. En effet, de nombreux travaux de diagnostic relèvent d'autres domaines, plus classiques, et donc plus peuplés, de la physique. Le personnel nécessaire pour la plus grande partie des différentes techniques (sources ioniques, vide poussé, champ magnétique, stockage d'énergie) pourrait être trouvé également dans les laboratoires ou les industries électrotechniques et électriques. Pour les trois premiers points en particulier, on pourrait utiliser l'expérience acquise par les physiciens et ingénieurs qui ont travaillé à la construction de grosses machines accélératrices. C'est ce qui se produit maintenant à Saclay et qui, peut-être, se produira ailleurs.

En tous cas, une reconversion vers les nouvelles tâches du personnel disponible est souhaitable. C'est dans ce but que l'on a organisé des cours dans la Communauté: en France auprès du Centre de Saclay, un cours de six mois; à Munich, en collaboration avec l'Institut Max Planck et l'Ecole Polytechnique, un cours de trois mois. La Société Italienne de Physique a manifesté son intérêt en organisant un cours sur la physique du plasma pendant l'été 1958; un cours d'été plus large aura lieu également courant 1959. Euratom s'est intéressé à ces initiatives soit en octroyant des bourses d'étude, soit en participant à leur financement.

La formation du personnel jeune devrait être plutôt la tâche des Universités. En ce moment, l'intérêt des Universités pour ce problème ne paraît pas très grand, surtout dans certains pays de la Communauté. La collaboration des Universités est d'ailleurs d'autant plus souhaitable que de nombreux problèmes, surtout de caractère théorique, pourraient être traités au niveau académique.

Quant aux échanges de chercheurs entre les différents pays et la circulation entre les différentes équipes, pour Euratom, au moins dans le cadre de la Communauté, il ne devrait pas, du moins en principe, y avoir de problème, d'autant plus que la formation d'équipes mixtes est explicitement prévue dans les contrats de recherche qu'Euratom a en cours de discussion avec le CEA et l'Institut Max Planck.

Des visites aux laboratoires importants des Etats-Unis seront possibles et on peut espérer que le prochain cours d'été de la Soc.It.Phys. donnera lieu à de fructueux contacts avec les chercheurs russes.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) - Danish.At.En.Commission : II meeting CERN, déc. 1958
- (2) - Post : Rev.Mod.Phys. 28, 338 (1956)
- (3) - Trubnikov : II Conf. Genève P. 2213
- (4) - Latham - Nation : II meeting CERN, déc. 1958
- (5) - Bickerton : II meeting CERN, déc. 1958
- (6) - N.N. Rosenbluth : II Conf. Genève, P/347
- (7) - Post: II Conf. Genève, P/377
- (8) - CEA : II meeting CERN, déc. 1958
- (9) - Spitzer : II Conf. Genève, P/2170
- (10) - Max-Planck-Inst.: II meeting CERN, déc. 1958
- (11) - Biermann : II Conf. Genève, P/1056
- (12) - CEA : II Conf. Genève, P/1181, 1182

On a fait large usage de l'ouvrage de Bishop:
Project Sherwood.