

**SCIENCE**

**VIE**  
*et*

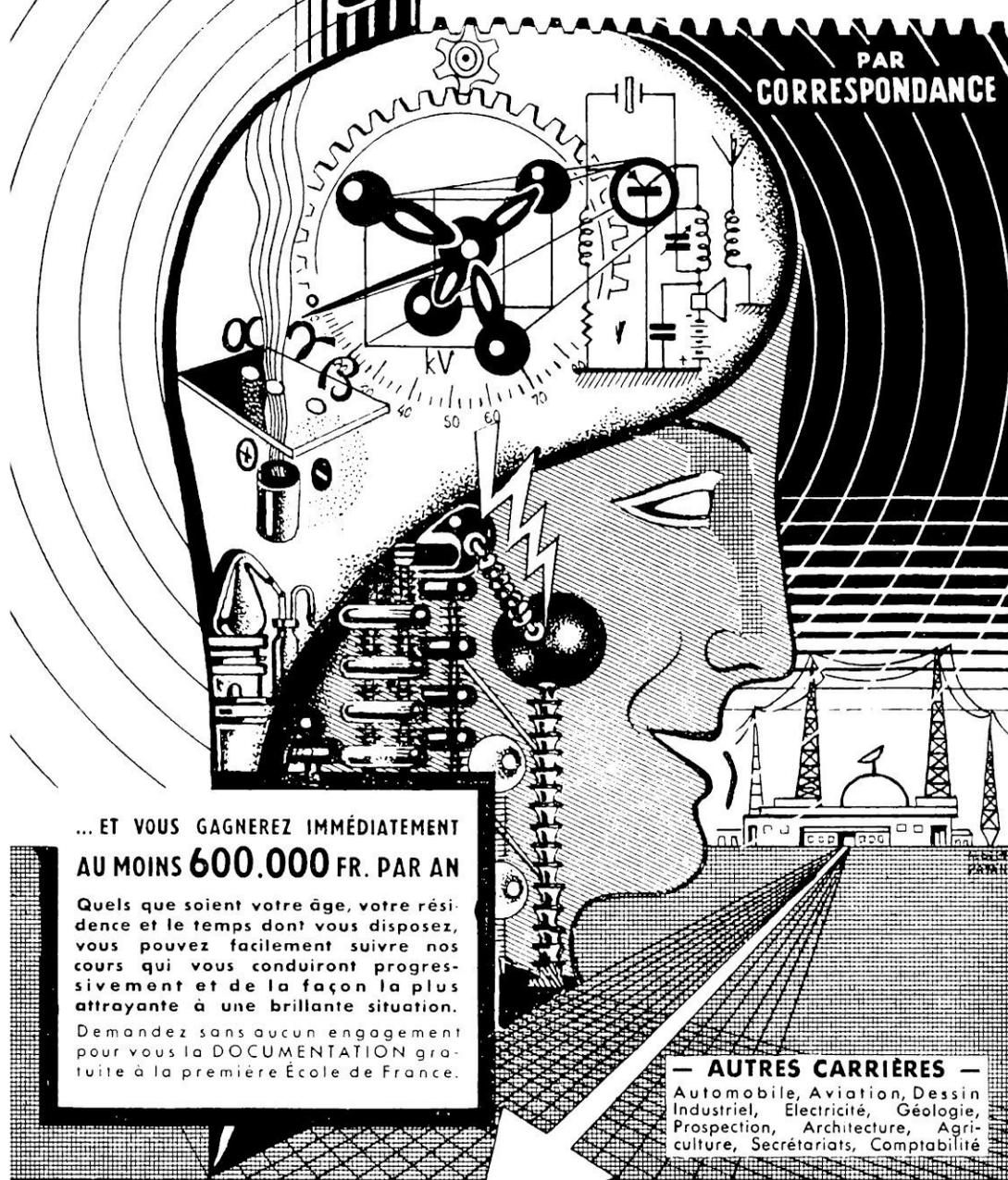
NUMÉRO HORS SÉRIE : 200 F

# L'ÉNERGIE ATOMIQUE



# Devenez **INGÉNIEUR** RADIO-ÉLECTRICIEN

PAR  
CORRESPONDANCE



... ET VOUS GAGNEREZ IMMÉDIATEMENT  
AU MOINS **600.000 FR. PAR AN**

Quels que soient votre âge, votre résidence et le temps dont vous disposez, vous pouvez facilement suivre nos cours qui vous conduiront progressivement et de la façon la plus attrayante à une brillante situation.

Demandez sans aucun engagement pour vous la DOCUMENTATION gratuite à la première École de France.

— **AUTRES CARRIÈRES** —

Automobile, Aviation, Dessin Industriel, Electricité, Géologie, Prospection, Architecture, Agriculture, Secrétariats, Comptabilité

## **ÉCOLE PROFESSIONNELLE SUPÉRIEURE** **21, RUE DE CONSTANTINE. PARIS VII<sup>E</sup>**

NOUS OFFRONS LES MÊMES AVANTAGES A NOS ÉLÈVES BELGES ET SUISSES

# LORRAINE-ESCAUT

**MINES ET USINES DES ACIÉRIES DE LONGWY,  
DE SENELLE-MAUBEUGE ET D'ESCAUT-ET-MEUSE**  
Société Anonyme au Capital de 13 milliards de francs

**Siège Social : 103, rue La Boétie — PARIS (8<sup>e</sup>)**

## **DÉPARTEMENT SIDÉRURGIE**

**Direction Commerciale : 103, rue La Boétie — PARIS (8<sup>e</sup>) — ELY. 97.41**

**TOUS PRODUITS SIDÉRURGIQUES EN  
ACIERS COURANTS ET DE QUALITÉ**  
Tôles Fortes, Fil traité pour Béton Précontraint

## **DÉPARTEMENT TUBES**

**Direction Commerciale : 105, rue Jacques Bingen - PARIS (17<sup>e</sup>) - CAR. 06.23**

**TUBES EN ACIERS ORDINAIRES, SPÉCIAUX ET  
RÉFRACTAIRES, SOUDÉS ET SANS SOUDURE  
DE TOUS DIAMÈTRES ET POUR TOUS USAGES**  
Tubes de Forages, de Mines, de Chaudières, de Conduites

●  
*Usines à :*

*LONGWY (Meurthe-et-Moselle) - THIONVILLE  
(Moselle) - ANZIN (Nord) - MAUBEUGE (Nord) - SEDAN  
(Ardennes) - LAVAL-DIEU (Ardennes) - BREVILLY  
(Ardennes) - NOISY-LE-SEC (Seine) - BÈSSEGES (Gard)*

**Les aciers LORRAINE-ESCAUT sont utilisés sur une grande  
échelle pour la construction de l'usine atomique de Marcoule.**

# C.A.F.L

AU SERVICE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE

# C.A.F.L

a mis au point l'acier 1965 résistant à l'acide nitrique bouillant et réalisé, dans ses ateliers de chaudronnerie, les cuves et évaporateurs de l'usine de MARCOULE

# C.A.F.L

construit des échangeurs pour G<sub>2</sub> G<sub>3</sub>

# C.A.F.L

exécute la maquette du dispositif de chargement du combustible nucléaire pour EDF<sub>1</sub>

C<sup>ie</sup> des **ATELIERS** et **FORGES** de la **LOIRE**

12, rue de la Rochefoucauld — PARIS (9<sup>e</sup>) — Tél. : TRI. 81-50

Adr. Télég. FORGALOIRE-PARIS — Téléx : 21802 FORGALOIR — PARIS

## PROTECTION

contre les

## NEUTRONS THERMIQUES

## “CARBORAL”

## “PERBORAL”

(marques déposées)

FABRICATION ENTIÈREMENT  
FRANÇAISE

BORE ET DÉRIVÉS

Un département  
des **ATELIERS PARTIOT**

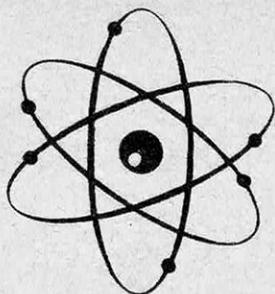
56, av. de Chatou

RUEIL-MALMAISON - Seine-et-Oise

MALmaison + 2680

CARnot + 9034





## 100 MILLIARDS CONSACRÉS EN FRANCE A L'UTILISATION PACIFIQUE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE

Déjà, le Commissariat à l'Énergie Atomique, l'Électricité de France et la Marine Nationale ont jeté les bases de l'utilisation de cette énergie qui va bouleverser la vie de l'Homme. La première pile de MARCOULE (Gard) commence à fabriquer du plutonium et des kilowattheures. Demain, dans l'intérêt national, les grandes industries privées, comme en

Amérique, concourront à son développement et auront besoin de nombreux Techniciens et Ingénieurs spécialisés pour l'étude et la réalisation des piles atomiques destinées aux Centrales électriques et aux navires.

C'est pourquoi, pour la première fois en France, une Ecole par Correspondance de grande notoriété pour la formation des Cadres de l'Industrie, l'INSTITUT TECHNIQUE PROFESSIONNEL, met à la portée des jeunes Elites des Industries classiques qui voudront être les premières bénéficiaires de l'utilisation industrielle de l'énergie nucléaire un enseignement pour la formation de Techniciens et d'Ingénieurs en Énergie Atomique.

Le programme comportera les études suivantes et donnera lieu à des exercices corrigés par des professeurs hautement qualifiés.

**Physique atomique :** Rappels (les électrons; la lumière; les atomes).

**Physique nucléaire :** Structure du noyau - Énergie de liaison - Sections efficaces - Radio-activité naturelle - Étude des rayonnements Alpha, Bêta, Gamma - Les Neutrons; interaction avec la matière - Les réactions nucléaires - Les réactions de fission - Les réactions en chaîne.

**Théorie et Constitution des piles - Cinétique, Contrôle et réglage des piles - Refroidissement des piles - Métaux liquides - Étude de la réalisation des piles existantes :** Pile de Saclay - Piles à eau lourde - Piles à graphite - Réacteurs homogènes - Breeders.

**Classification des piles :** Plutonium - Centrales électriques - Problèmes économiques.

**Matériaux des piles :** Production et propriétés - Uranium - Eau lourde - Graphite, etc.

**Les Radio-éléments :** Utilisation industrielle.

**Protection contre les radiations - Les bombes atomiques.**

Pour toutes demandes de renseignements, écrire à l'INSTITUT TECHNIQUE PROFESSIONNEL, 69, rue de Chabrol, PARIS-10<sup>e</sup>. Section E.A. 01 A.

### ● trois ouvrages essentiels :

**LIBÉRATION ET EXPLOITATION DE L'ÉNERGIE NUCLEAIRE** par Maurice E. Nahmias : 855 F (t.l. incl.).

**GRANDES DÉCOUVERTES DU XX<sup>e</sup> SIÈCLE** (vient de paraître) sous la direction de L. Leprince-Ringuet, de l'Académie des Sciences : 2 750 F (t.l. incl.).

**LA PHYSIQUE (Tome II de l'Encyclopédie Française)** sous la direction de Louis de Broglie, de l'Académie Française, secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences, prix Nobel de Physique : 7 500 F (t.l. incl. - facilités de paiement).

chez tous les libraires et

114 bd Raspail, Paris 6

# LAROUSSE

# L'ÉLECTRONIQUE PEUT TOUT !

L'Électronique est une science dont les applications ne se comptent plus. Son développement industriel est tel que la formation d'électroniciens est devenue impérative dans tous les pays. Indépendamment des firmes spécialisées dans cette branche, toutes les industries modernes sont obligées, à un titre quelconque, d'avoir recours à l'Électronique. (Commande des machines - Contrôles automatiques - Asservissement - Comptage - Mesures, etc.).

Les professionnels qualifiés sont donc assurés de trouver dans les nombreuses branches de l'Industrie que l'Électronique a conquises des situations largement rétribuées et d'un avenir certain, en raison même de l'essor grandissant de cette activité.

L'Électronique n'est pas une science difficile; elle ouvre un monde nouveau et captivant d'applications hier encore inconnues. L'Électronique ne fait pas appel à des abstractions; elle repose sur des notions très simples et très concrètes. Notre cours d'**Électronique et Applications** est conçu pour mettre en lumière ces notions fondamentales. En s'appuyant toujours sur celles-ci, il permet à l'Elève d'acquérir la connaissance de techni-

ques réputées complexes, sans être jamais dépassé. Chaque question importante est illustrée d'exemples complètement traités qui entraînent l'Elève à penser en électronicien. Chaque leçon est suivie de nombreux exercices qui sont de véritables applications choisies dans les problèmes que pose la pratique du métier. Par exemple: Signalisation par cellules photo-électriques - Reproduction électronique sur les machines-outils - Contrôle des moteurs électriques - Pesage électronique - Jaugeage électronique - Calcul du gain et de la puissance des amplificateurs - Calcul de la fréquence des oscillateurs, etc.

Nous nous sommes donc efforcés de donner à nos élèves une formation à la fois technique et pratique, qui leur permettra de comprendre et de solutionner rapidement et correctement tous les problèmes relevant de l'Électronique.

Programme détaillé sur demande **sans engagement** contre 2 timbres à l'INSTITUT TECHNIQUE PROFESSIONNEL, ECOLE DES CADRES DE L'INDUSTRIE, 69, rue de Charbrol. Bât. A, PARIS (X<sup>e</sup>), Section ELN. 01A.

Pour la Belgique: I.T.P. Centre Admin., 87, rue de l'École, à ERPENT-NAMUR.



## COMPTEURS GEIGER ET A SCINTILLATIONS

pour prospection **D'URANIUM** aérienne,  
automobile et pédestre

12 modèles de 19.000 à 3.000.000 de francs

Appareils spéciaux pour radio-carottage  
et enregistrement continu des radiations

Lampes de détection à rayons ultraviolets "Mineralight"  
Marteaux perforateurs autonomes — Sondeuses de carottage

★

## DOSIMÈTRES

et tous appareils de mesure et de contrôle  
de la **RADIOACTIVITÉ** et des **RAYONS X**

★

INSTRUMENTS de GÉOPHYSIQUE

★

## E<sup>TS</sup> VILBER LOURMAT

175, rue de Tolbiac — PARIS-13<sup>e</sup> - Tél : GOB. 88-93  
FOURNISSEURS DU COMMISSARIAT A L'ÉNERGIE ATOMIQUE

Exclusivité des marques : P.R.I. (Los Angeles, U.S.A.) - VICTOREEN (Cleveland, U.S.A.) - SHARPE (Toronto, Canada)  
Fabrication sous licence P. R. I.

# L'ÉNERGIE ATOMIQUE

## SOMMAIRE

★ ÉDITORIAL, par Francis Perrin, <i>Haut-Commissaire à l'Énergie Atomique</i> .....	7
★ QU'EST-CE QU'UN RÉACTEUR NUCLÉAIRE?.....	8
★ LES MATÉRIAUX DU GÉNIE ATOMIQUE.....	31
★ EN DIX ANS LA FRANCE A PRIS RANG PARMIS LES GRANDES PUISSANCES ATOMIQUES .....	44
★ LA RELÈVE DU CHARBON PAR L'URANIUM.....	65
★ NAVIRES, AVIONS ET LOCOMOTIVES ATOMIQUES....	86
★ LES RADIOISOTOPES DANS L'INDUSTRIE .....	100
★ DES ARMES NOUVELLES POUR LA MÉDECINE : LES RADIOISOTOPES ARTIFICIELS .....	118
★ LA BIOLOGIE ADOPTE LES INDICATEURS NUCLÉAIRES.	137
★ LE RÉACTEUR A "FUSION", DANS 10 OU 100 ANS?.	148
★ L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE METTRA-T-ELLE L'HUMANITÉ EN DANGER?.....	150

Avec la collaboration de **Maurice - E. Nahmias**, *Assistant au Collège de France*

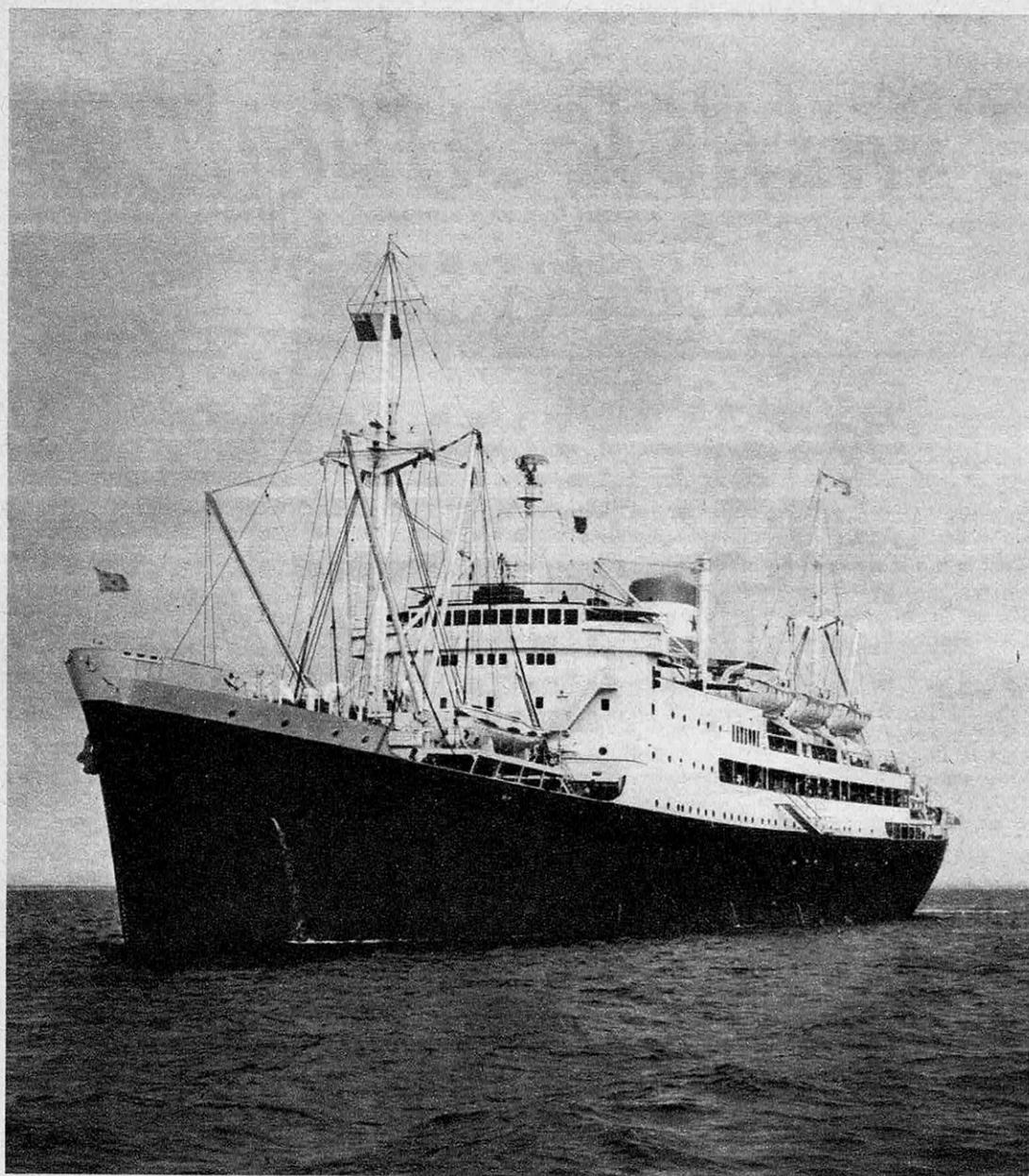
### ABONNEMENTS

	France et Union Fr <sup>nc</sup>	Étranger	Benelux et Congo Belge
un an. ....	1 000 fr.	1 400 fr.	200 fr. belges
avec envoi en recommandé ....	1 400 fr.	1 900 fr.	
<b>Abonnement comprenant en plus</b>			
4 numéros hors série.....	1 650 fr.	2 200 fr.	375 fr. belges
— recommandés.....	2 200 fr.	2 900 fr.	

Changement d'adresse, poster la dernière bande et 30 fr. en timbres-poste.

**Administration, Rédaction** : 5, rue de la Baume, Paris-8<sup>e</sup>. Tél. : Balzac 57-61. Chèque postal 91-07 PARIS  
**Adresse Télégraphique** : SIENVIE Paris. — **Publicité** : 2, rue de la Baume, Paris-8<sup>e</sup>. Tél. Elysées 87-46.

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés pour tous pays. Copyright by **SCIENCE ET VIE** Janvier 1957



*Croisières*

*Fret*

*Passages*

- AMÉRIQUE DU SUD
- COTE OCCIDENTALE D'AFRIQUE
- de L'AMÉRIQUE DU NORD à la COTE OCCIDENTALE D'AFRIQUE
- AFRIQUE DU SUD
- EXTRÊME-ORIENT

**Compagnie Maritime des Chargeurs Réunis**

3, BOULEVARD MALESHERBES - PARIS

ANJOU 08-00

# ÉDITORIAL

**P**AR un effort développé depuis la Libération et qui a pris une ampleur considérable depuis quelques années, la France a pris position parmi les quelques grandes puissances atomiques qui ont créé un ensemble cohérent d'industries atomiques et qui ont, en construction avancée, de véritables centrales industrielles de production d'électricité à partir d'énergie atomique.

L'année 1957 sera à la fois la dernière du premier plan quinquennal français et la première du deuxième. Elle verra l'achèvement des grands ensembles prévus par le premier plan :

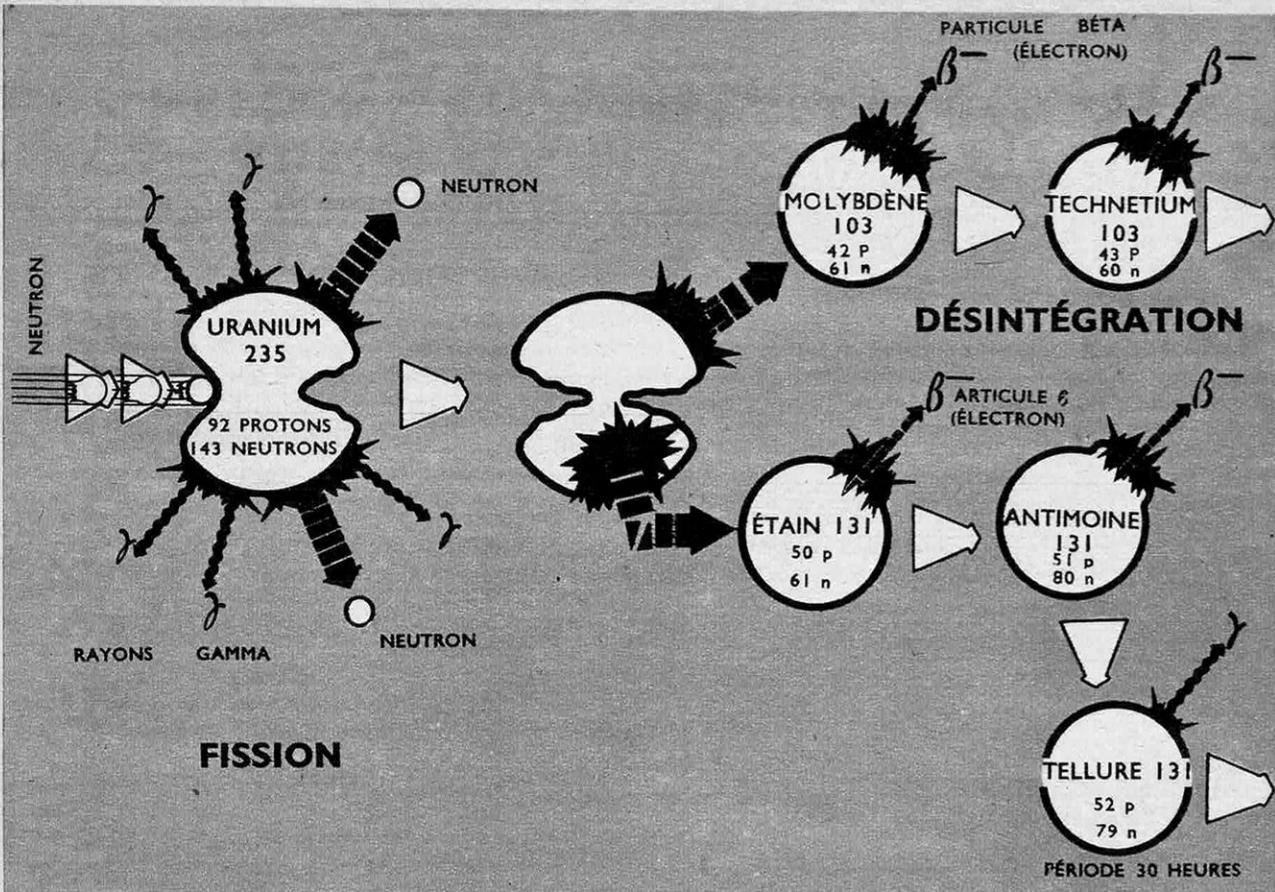
- à *Marcoule*, un Centre de Production de Plutonium avec les grandes piles G1, G2, G3 et l'usine d'extraction chimique associée ;
- à *Saclay*, la pile à haut flux EL.3 destinée en premier lieu à l'étude de la résistance des matériaux à l'action destructrice des rayonnements, et le grand accélérateur à protons de 2 milliards et demi d'électronvolts, qui sera pendant quelques années le plus puissant d'Europe.

Par ailleurs, la production d'uranium par nos quatre divisions minières métropolitaines, considérablement accrue par la mise en service de grandes usines de concentration de minerais, et une importante production de thorium nucléairement pur à partir des minerais de Madagascar, assurent la satisfaction de tous nos besoins en combustible nucléaire.

En même temps, durant cette année 1957, seront commencées certaines des réalisations prévues par le deuxième plan quinquennal atomique français : un nouveau centre de recherche atomique sera construit à Grenoble et doté d'une pile atomique puissante ; deux piles expérimentales nouvelles seront construites à Châtillon ; les études en vue d'une pile expérimentale à haute température seront commencées ; la première centrale atomique de l'Electricité de France, la Centrale de Chinon, sera mise en construction.

Au moment où commence ainsi la réalisation de certains éléments essentiels du deuxième plan quinquennal atomique français, et où se décide le programme de ce plan qui doit nous faire effectivement pénétrer dans l'ère industrielle atomique, il est particulièrement heureux qu'une mise au point d'ensemble sur l'énergie atomique et ses possibilités d'utilisations pacifiques soit présentée au grand public. Les problèmes économiques, sociaux, sanitaires posés par le développement rapide des utilisations industrielles de l'énergie atomique, qu'il faut maintenant prévoir, ne pourront en effet être résolus que dans une compréhension générale suffisante, sinon du détail, du moins des caractères généraux des techniques qui permettront à l'humanité de tirer pleinement profit de cette nouvelle source d'énergie.

FRANCIS PERRIN,  
Haut-Commissaire à l'Énergie  
Atomique

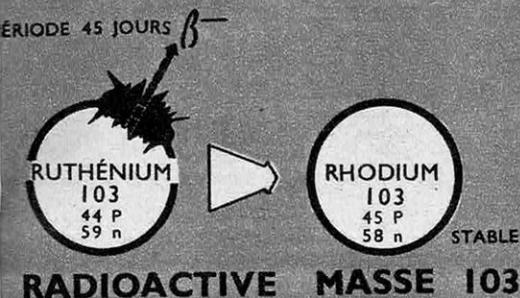


## QU'EST-CE QU'UN RÉA

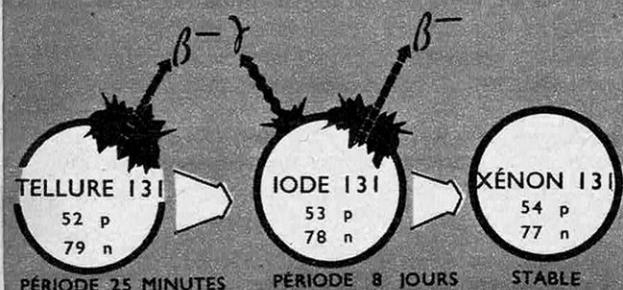
Le roman d'anticipation est un genre littéraire mineur qui, dans sa production courante, est souvent honni par le monde scientifique. Jules Verne, à plus d'un titre, fait cependant figure de précurseur génial bien qu'on puisse lui reprocher de nombreuses erreurs scientifiques graves. Certaines œuvres de H.-G. Wells fournissent également des exemples étonnants de précision prophétique. En 1914, paraissait « The World set free » (Le Monde libéré) où, à la page 25, on peut lire la phrase suivante : « Le problème de la radioactivité induite fut résolu dès 1933. » C'est effectivement en 1933 que Frédéric et Irène Joliot-Curie découvrirent les premiers radioéléments artificiels. On trouve un peu plus loin une autre phrase non moins surprenante où Wells voit pour 1953 la première utilisation industrielle de la « radioactivité » pour la production d'énergie électrique. Or

c'est en 1953 précisément que, dans un coin perdu de l'Etat d'Idaho, aux Etats-Unis, un réacteur nucléaire a fourni la chaleur nécessaire à l'entraînement d'un turboalternateur. Quand Wells entrevoit la création par l'homme d'un élément nouveau qu'il appelle « carolinium », essentiel à l'industrie et à la guerre atomiques, nous ne pouvons que penser à notre plutonium. Souhaitons comme lui que n'ait pas lieu la guerre qu'il voit éviter de justesse en 1958 devant les terrifiantes perspectives de ses « super-bombes », sans doute nos bombes H. Peut-être faut-il aussi considérer notre O.N.U. comme une tentative de réalisation de ce que Wells appelait l'Etat Mondial, auquel il assignait la tâche de contrôler les productions nucléaires.

Depuis la publication de l'ouvrage de H.-G. Wells, il y a 42 ans, la moisson des découvertes dans le domaine de la physique de



## DÉSINTÉGRATION RADIOACTIVE MASSE 131



## LA FISSION DE L'URANIUM 235

Dans un réacteur nucléaire, l'énergie est fournie par l'éclatement (fission) des noyaux de combustible (ici l'uranium-235) après capture d'un neutron. Le noyau se fractionne en deux morceaux en même temps que de nouveaux neutrons sont émis (2,5 neutrons en moyenne). Les nouveaux noyaux possèdent un excès de neutrons et sont instables ; ils se désintègrent en émettant des électrons (rayons  $\beta$ ) accompagnés parfois de rayons  $\gamma$  plus ou moins énergiques, jusqu'à aboutir à des éléments stables. On voit sur la figure les deux familles d'éléments radioactifs qui dérivent d'un couple de fragments initiaux ; dans l'exemple choisi ce sont le molybdène-103 et l'étain-131 qui donnent respectivement du rhodium-103 et du xénon-131 stables. En réalité, l'éclatement du noyau d'uranium peut s'effectuer de nombreuses manières et livre des éléments de poids moyen dont le noyau groupe entre 70 et 160 particules ; il est relativement rare que la division s'effectue en deux parties égales. Tous ces produits de fission s'accroissent dans le combustible et jouent un rôle néfaste, d'une part en absorbant des neutrons et freinant ainsi la réaction en chaîne, d'autre part en rendant dangereuses les manipulations par suite de la radioactivité des éléments intermédiaires. Une pile modeste de 1 000 kW possède, après un an, une radioactivité équivalant à celle de 8 tonnes de radium.

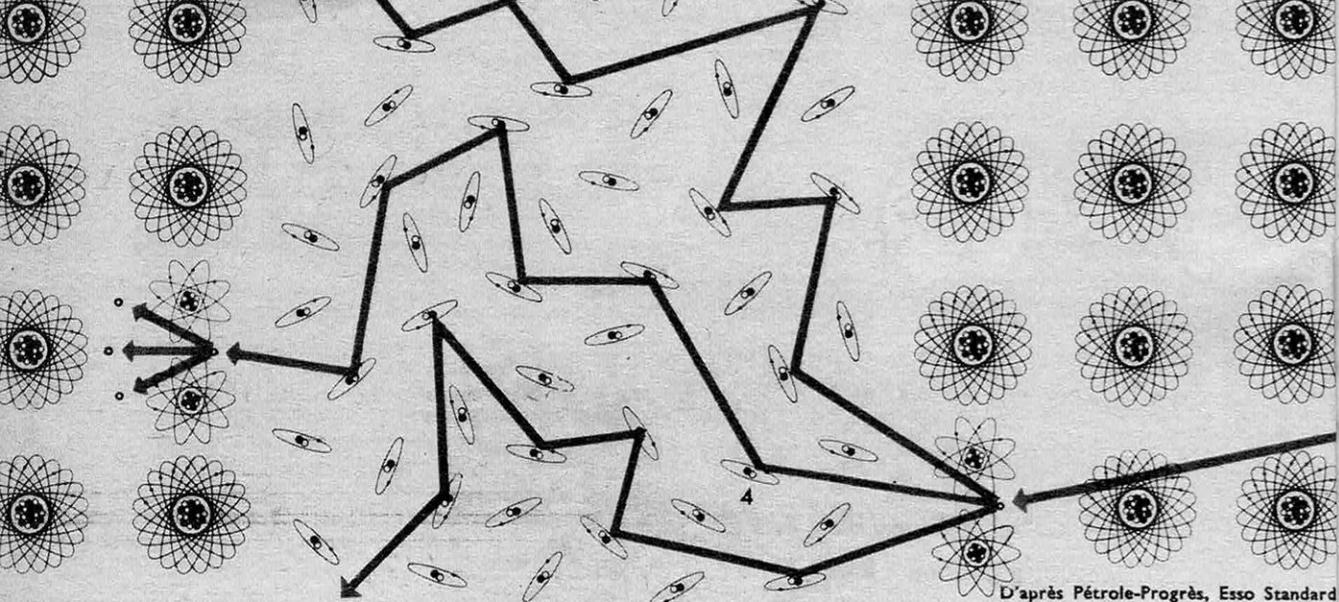
# ACTEUR NUCLÉAIRE ?

l'atome, puis de la physique du noyau a dépassé tout ce que pouvait prédire la plus riche imagination d'un romancier. S'il a soupçonné les énormes quantités d'énergie stockées dans la matière, prévu audacieusement qu'elles deviendraient accessibles à l'homme, au moins en partie, il ne pouvait préciser les modalités de cette victoire, concevoir la complexité des problèmes métallurgiques et chimiques qu'il faudrait résoudre avant que la « pile atomique », comme on l'appelait encore il y a peu de temps, ou le « réacteur nucléaire », pour lui donner son nom correct, sorte de stade expérimental, avant que ne s'édifie en Europe comme en Amérique ces centrales nucléaires où l'uranium vient relayer le charbon pour assurer à notre civilisation l'énergie électrique qui est la condition de son développement. Nous sommes effectivement à l'aube d'une nouvelle révolution industrielle. C'est

avec une confiance et une ardeur légitimées par les résultats déjà acquis que les savants et les ingénieurs du monde entier s'attaquent aux obstacles qui subsistent encore, nombreux et complexes, sur le plan pratique. Bientôt, dans quelques années sans doute, nous pourrions espérer que la centrale nucléaire sera aussi économique ou même plus économique que la centrale thermique traditionnelle, et que, sous ses variantes spécialisées, le réacteur propulsera le navire, la locomotive et peut-être même l'avion.

Comment fonctionne un réacteur nucléaire ? Quelle est la réaction de base qui assure la libération d'énergie en son sein, et comment est-il constitué ?

Il est possible d'en donner au profane une idée assez précise sans qu'il soit besoin d'entrer dans des considérations trop ardues de physique nucléaire.



D'après Pétrole-Progress, Esso Standard

**Dans la réaction en chaîne représentée schématiquement, un neutron venant de droite provoque la fission d'un noyau d'uranium-235, qui s'accompagne de l'émission de trois nouveaux neutrons. Ceux-ci rebondissent sur les noyaux légers du « modérateur » en perdant à chaque choc une partie de leur énergie. Leur vitesse décroît progressivement et c'est à l'état de neutron lent ou « thermique » que l'un d'eux va frapper un nouveau noyau d'uranium-235 dont il provoque l'éclatement, ce qui renouvelle le cycle.**

## Un peu de physique nucléaire

A la base de toute l'industrie atomique se trouve l'uranium. Chacun sait aujourd'hui que c'est un métal très dense, dont les minerais sont relativement très répandus dans l'écorce terrestre, et qu'il est spontanément radioactif, cette radioactivité étant couramment utilisée pour la prospection. Comme tous les éléments, l'uranium est constitué d'atomes comprenant un noyau et un certain nombre d'électrons tournant autour de ce noyau et dits « électrons planétaires ». Il y a ici 92 électrons (on dit que le numéro atomique de l'uranium est 92, il occupe la 92<sup>e</sup> place dans la classification générale des éléments). Les atomes sont des unités extrêmement petites. Dans un gramme d'uranium, qui occupe un volume d'un vingtième de centimètre cube, il y a 3 000 milliards de milliards d'atomes (le chiffre 3 suivi de 21 zéros).

Les noyaux eux-mêmes sont encore incomparablement plus petits, environ 10 000 fois plus petits que les atomes, et cependant leur constitution est complexe. On y trouve en particulier des neutrons, particules dont la charge électrique est nulle, ainsi que leur nom l'indique. D'après le nombre de neutrons, on distingue, pour l'uranium naturel, trois sortes de noyaux qui en contiennent respectivement 142, 143 et 146. Ce sont ce qu'on appelle des « isotopes », ici les isotopes 234, 235 et 238 de l'uranium. Le fait de contenir plus ou moins de neutrons électriquement neutres ne

change rien à la charge du noyau (fournie par un même nombre de protons, 92) et par conséquent au nombre des électrons planétaires de l'atome. Comme ce sont ces électrons qui déterminent les propriétés chimiques de l'élément, tous les isotopes d'un élément donné se comportent chimiquement de manière identique, ce qui rend impossible leur séparation par les méthodes classiques de la chimie.

Le point important pour nous est que ces isotopes ont des masses légèrement différentes et réagissent différemment lorsqu'un neutron venu de l'extérieur vient frapper leur noyau. Le comportement des atomes de l'isotope 235 à 143 neutrons est tout à fait remarquable dans ce cas : ils se brisent presque immédiatement, en quelques millièmes de seconde, se coupent en deux morceaux principaux tout en émettant à la fois des neutrons et un rayonnement très pénétrant dit rayonnement gamma (analogue aux rayons gamma du radium). Ce phénomène, essentiellement différent de la radioactivité où les particules émises ont toujours des masses faibles, a reçu le nom de « fission ».

Cet isotope de l'uranium susceptible de subir la fission a reçu le nom d'uranium-235, le nombre 235 représentant la somme de 92 (pour les protons) et 143 (pour les neutrons). Les deux fragments principaux résultant de l'explosion ne sont pas toujours les mêmes ; parmi ces produits de fission, on a pu identifier une quarantaine d'éléments divers, tous de poids moyen ; ces produits sont eux-mêmes

instables, c'est-à-dire radioactifs, et émettent des particules diverses et de l'énergie jusqu'à ce qu'ils parviennent, au bout d'un temps plus ou moins long, à une forme stable.

Autre fait remarquable : si l'on fait la somme des masses des produits de fission et des neutrons émis lors de l'explosion, le total obtenu est inférieur de quelques dixièmes à la masse de l'atome d'uranium-235 initial. Il y a eu perte de masse et apparition correspondante d'énergie, suivant l'équation désormais célèbre d'Einstein :  $\text{énergie} = \text{masse} \times \text{carré de la vitesse de la lumière}$  ( $W = mc^2$ ). Chaque fission d'un noyau d'uranium libère en moyenne une énergie de 200 millions d'électronvolts ou 200 MeV (mégaélectronvolts). Cette unité d'énergie utilisée en physique nucléaire correspond à  $4,45 \times 10^{-20}$  kilowatts-heures, c'est-à-dire qu'il faut 20 milliards de milliards de MeV ou 10 millions de milliards de fission pour faire 1 kWh. L'énergie dégagée par une fission paraît infime ; elle est en réalité énorme à l'échelle où se produit le phénomène.

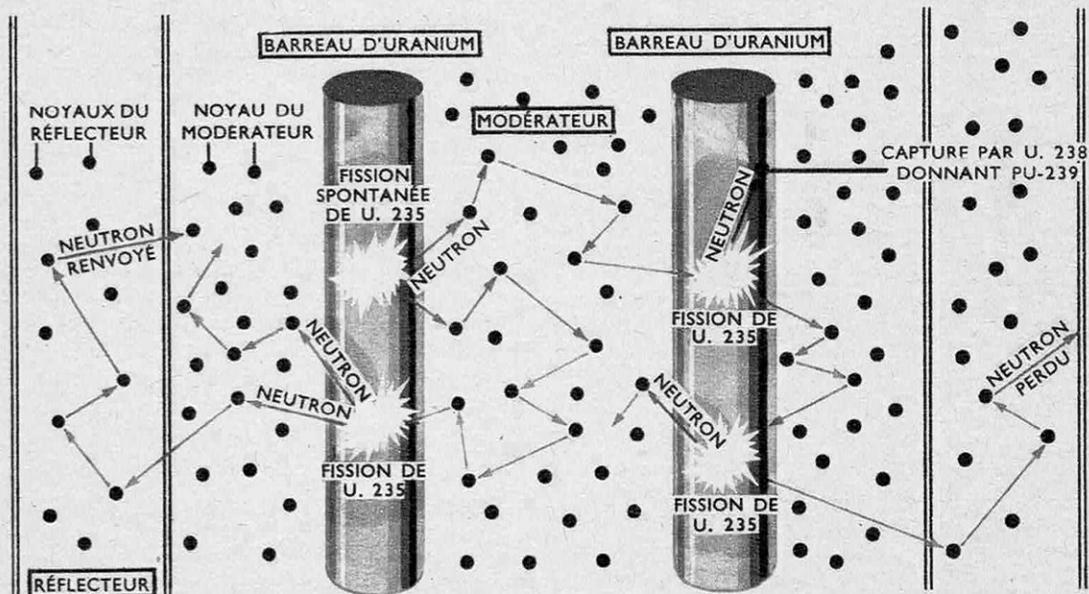
### La « divergence », condition première du fonctionnement d'un réacteur

Sous quelle forme apparaît cette énergie ? Environ 4 % sont représentés par les radiations émises pendant la fission, 16 % proviennent des émissions radioactives des fragments de fission ; le reste, soit 80 %, représente

l'énergie cinétique des fragments de fission eux-mêmes. Projetés avec une vitesse considérable, ils heurtent les atomes voisins et dissipent leur énergie cinétique sous forme de chaleur. C'est cette chaleur qui, en définitive, est exploitée dans les réacteurs nucléaires pour produire de la vapeur que l'on enverra à un turboalternateur. Pour qu'elle soit produite en quantité suffisante, il faut un nombre considérable de fissions. Fort heureusement, et c'est là le fait capital, une fission provoquée par la capture d'un neutron s'accompagne de l'émission de plusieurs neutrons. Il y en a quelquefois trois ou quatre, d'autres fois seulement un ; la moyenne s'établit autour de 2,5. Lorsqu'un de ces neutrons rencontre un autre atome d'uranium-235, il provoque une nouvelle fission. On conçoit alors qu'une fois la réaction amorcée, et elle s'amorce d'elle-même soit par fission spontanée d'un atome d'uranium, soit sous l'action d'un neutron erratique, elle puisse aller en s'amplifiant jusqu'à se transformer en une véritable explosion. On dit alors qu'elle est « divergente ».

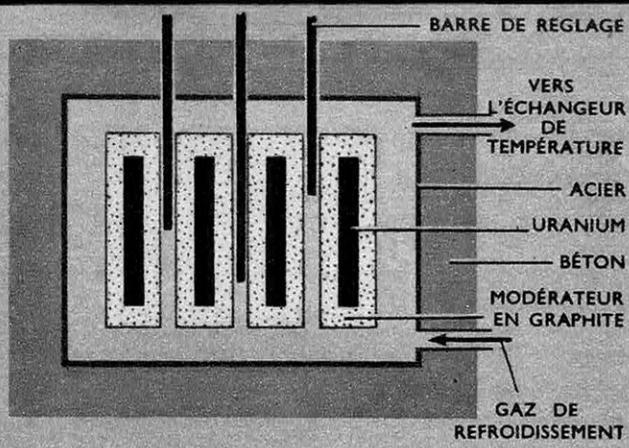
Mais, dans un bloc d'uranium naturel, l'uranium-235 n'est présent qu'en très faible proportion, 0,7 %, les 99,3 % consistant en uranium-238 qui ne subit que rarement la fission. (L'uranium-234, autre isotope naturel, est en proportion pratiquement négligeable et nous n'en parlerons pas.) La probabilité qu'un neutron émis à grande vitesse lors d'une fis-

SUITE PAGE 14



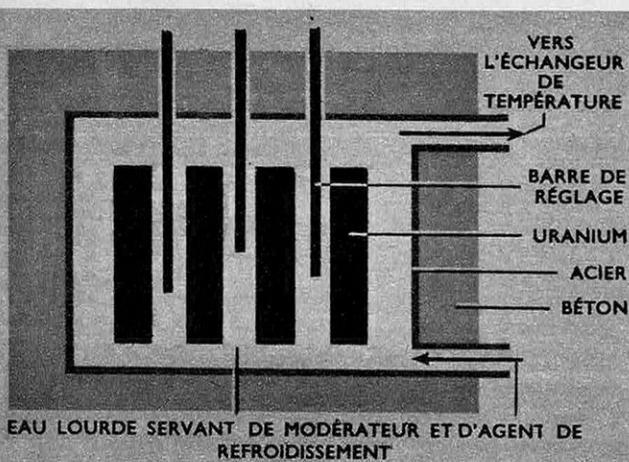
Le réacteur nucléaire comporte, en principe, des éléments de « combustible » (ici barreaux d'uranium naturel) plongés dans la masse du « modérateur » (eau lourde, graphite); le tout est entouré d'un « réflecteur » (en graphite, par exemple) qui renvoie

vers l'intérieur, par diffusion, une partie des neutrons qui tendent à s'échapper ; ils peuvent ainsi provoquer de nouvelles fissions et concourir efficacement à maintenir la réaction en chaîne. Certains neutrons sont perdus parce que captés sans provoquer de fission.



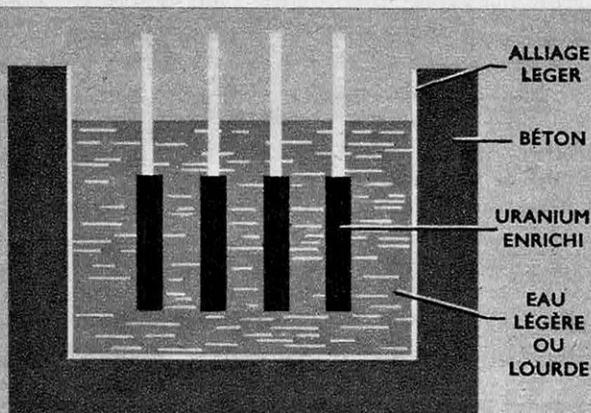
## RÉACTEUR A MODÉRATEUR EN GRAPHITE

Dans un réacteur de ce type (par exemple Marcoule, en France, Calder Hall, en Grande-Bretagne), l'uranium naturel métallique est inséré dans une masse importante de graphite de très grande pureté. Des barres de contrôle, en un matériau absorbant facilement les neutrons (cadmium, par exemple), règlent la réaction. A travers le « cœur » du réacteur et autour de lui on fait circuler un gaz (air, gaz carbonique) pour évacuer la chaleur engendrée par les fissions. Le gaz chaud parvient à un échangeur de température dans lequel il produit de la vapeur.



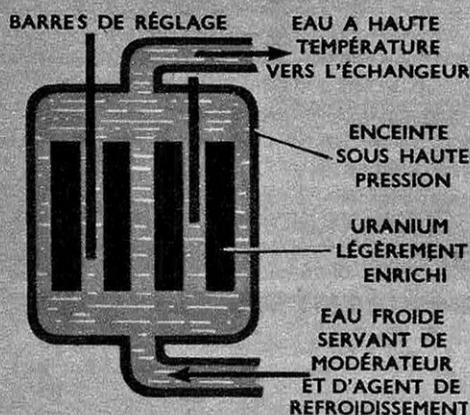
## RÉACTEUR A MODÉRATEUR A EAU LOURDE

Dans ce type de réacteur, le combustible est sous forme de barreaux chemisés suspendus dans un tank contenant de l'eau lourde qui sert à la fois de modérateur et d'agent de refroidissement. Elle est envoyée en circuit fermé à un échangeur de température où elle porte de l'eau ordinaire à l'ébullition ; la vapeur produite alimente des turbines. Ces réacteurs partagent avec ceux à graphite refroidis par un gaz l'avantage de pouvoir utiliser de l'uranium naturel. Ils ont été particulièrement étudiés au Canada où un réacteur de puissance est en construction.



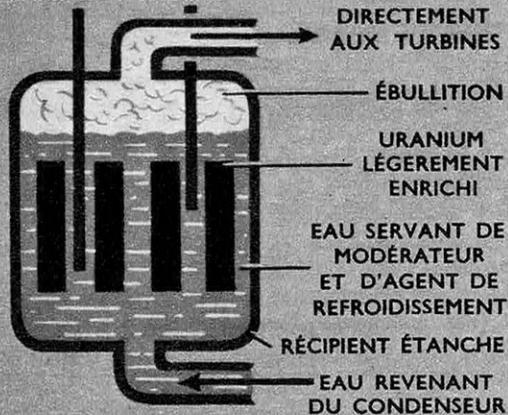
## RÉACTEUR TYPE "PISCINE" OU "AQUARIUM"

Il s'agit ici, étant donné la simplicité de sa construction, d'une forme, particulièrement appréciée, à l'heure actuelle, de réacteur de recherche. Il exige l'emploi de combustible plus ou moins enrichi en éléments fissiles (uranium-235). Des barreaux métalliques chemisés sont suspendus dans un tank profond sans couvercle et plongent dans de l'eau ordinaire ou dans de l'eau lourde. Aucun système de refroidissement n'est prévu en général. La puissance développée peut varier d'une centaine à 10 000 kW et plus. Ces réacteurs se prêtent aisément à des expériences variées.



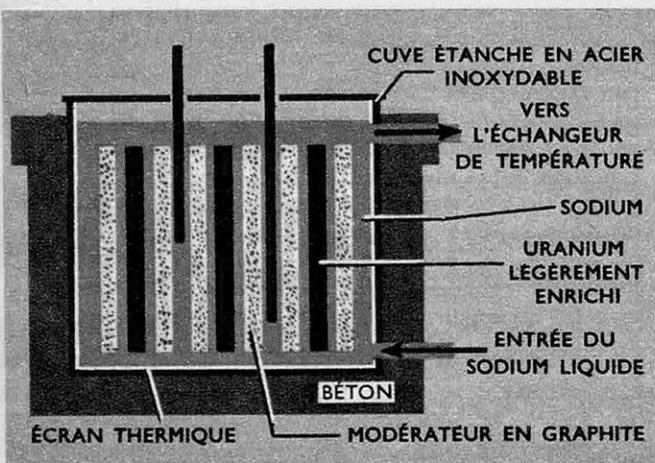
## RÉACTEUR DU TYPE A EAU SOUS PRESSION

Le modérateur est ici de l'eau ordinaire qui sert aussi d'agent de refroidissement. Le combustible doit être de l'uranium enrichi en éléments fissiles. On maintient dans l'enceinte une pression suffisante pour que l'eau ne se vaporise pas. Elle circule en circuit fermé, produisant de la vapeur dans un échangeur de température. Ce type de réacteur, connu aux Etats-Unis sous le nom de P.W.R. (Pressurized Water Reactor) est monté sur le sous-marin « Nautilus » et équipera les premières centrales nucléaires américaines.



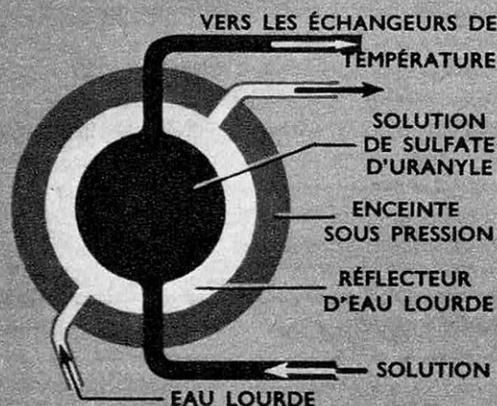
## RÉACTEUR TYPE "A EAU BOUILLANTE"

Ce réacteur utilise, comme le réacteur à eau sous pression, un combustible légèrement enrichi et l'eau ordinaire comme modérateur et agent de refroidissement. Mais ici on ne maintient dans l'enceinte qu'une pression modérée, de sorte que l'eau est portée à l'ébullition et la vapeur actionne directement les turbines. L'installation s'en trouve simplifiée, mais aucun risque de fuite n'est admissible dans le circuit de vapeur, celle-ci étant radioactive et pouvant entraîner des produits de fission si jamais la gaine d'une des barres d'uranium venait à se détériorer.



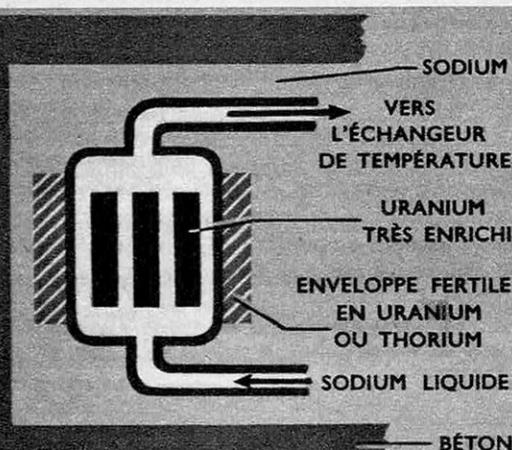
## RÉACTEUR A GRAPHITE ET SODIUM LIQUIDE

Ce type de réacteur, qui utilise le graphite comme modérateur et le sodium fondu pour l'évacuation de la chaleur, semble particulièrement prometteur. L'emploi d'un métal fondu permettrait d'obtenir de la vapeur à haute température, donc d'assurer un bon rendement aux turbines. Mais il exige un combustible enrichi, un conditionnement spécial du graphite contre le sodium, et deux circuits de sodium avec échangeur intermédiaire, seul le sodium du premier circuit étant rendu radioactif par les neutrons du réacteur. Plusieurs installations sont en projet.



## RÉACTEUR TYPE "HOMOGÈNE-AQUEUX"

Le combustible est intimement mêlé au modérateur puisqu'il consiste en une solution de sulfate d'uranyle, fortement enrichie (90 %) en isotope 235, dans de l'eau lourde. Le « cœur » du réacteur est entouré d'un réflecteur à eau lourde. L'ensemble est sous pression pour empêcher les liquides de bouillir. Deux circuits évacuent la chaleur et fournissent, par l'intermédiaire d'échangeurs de température, de la vapeur aux turbines. L'élimination des produits de fission peut être effectuée en continu. Tout le circuit du combustible, échangeur compris, doit être protégé.



## BREEDER RAPIDE REFROIDI AU SODIUM

Le combustible, de l'uranium enrichi à 90 % d'uranium-235, constitue un « cœur » de petites dimensions, refroidi par du sodium liquide. Il n'y a pas de modérateur et les réactions nucléaires sont dues aux neutrons rapides. Autour du « cœur » est disposée une chemise d'uranium ou de thorium où les neutrons qui n'ont pas pris part aux réactions de fission doivent engendrer soit du plutonium, soit de l'uranium-233. La réalisation de réacteurs de ce type pose des problèmes technologiques ardues et, jusqu'à présent, il n'y a en projet que des prototypes expérimentaux.

sion aille frapper précisément un noyau d'uranium-235 est extrêmement faible, pratiquement nulle. Pour que puisse s'établir une réaction en chaîne, un certain nombre de conditions doivent être réalisées.

La première est de purifier à l'extrême l'uranium pour en éliminer tous les autres éléments, car les précieux neutrons sont très facilement absorbés par presque tous les corps. D'autre part, l'uranium-238 est non seulement beaucoup plus abondant que l'uranium-235, mais, dans certaines conditions, il se montre tellement avide de neutrons qu'il arrête toute velléité de constitution de réaction en chaîne. Lorsque les neutrons sont émis lors d'une fission, ils se déplacent à une vitesse tellement élevée que la probabilité de leur capture par n'importe quel noyau atomique est très faible. Mais lorsqu'ils ralentissent et arrivent à l'état de ce qu'on appelle des neutrons intermédiaires, ils peuvent être captés avec une très forte probabilité par l'uranium-238. Cela se produit pour certaines valeurs particulières de leur énergie dites énergies de résonance. Dans ce cas, le noyau 238 s'incorpore le neutron ; il devient donc de l'uranium-239. Cet isotope nouveau est radioactif, émet rapidement une particule bêta et se transforme en un nouveau radioélément : le neptunium-239 ; après le départ d'une autre particule bêta, on parvient au plutonium-239, dont nous verrons l'intérêt par la suite. Du seul point de vue de la réaction en chaîne, ces captures de neutrons intermédiaires sont indésirables.

### A la recherche des neutrons lents

Lorsqu'il s'agit de neutrons lents, appelés aussi neutrons thermiques parce que leur énergie est à peine supérieure à l'énergie cinétique moyenne provenant de l'agitation thermique des molécules, la situation est entièrement différente. Ces neutrons sont beaucoup plus facilement captés par les noyaux 235, d'où fissions, que par les noyaux 238. Malheureusement, dans un bloc d'uranium naturel, les neutrons émis à grande vitesse rebondissent sur les noyaux d'uranium-238 qui sont les plus nombreux et perdent progressivement de l'énergie et, au moment où ils passent par une des valeurs de résonance, ils disparaissent dans l'un des noyaux. Aucun ne peut, en pratique, parvenir à l'état de neutron lent.

Puisque l'uranium-238 joue un rôle si néfaste, nous pouvons penser que le moyen le plus simple est de s'en débarrasser et d'isoler l'uranium-235. Mais nous avons dit qu'il est très difficile de séparer les deux isotopes, car les méthodes ordinaires de la chimie sont inopérantes ; il faut avoir recours à des procédés complexes, extrêmement coûteux, qui n'ont pu être mis en œuvre jusqu'ici qu'aux

Etats-Unis, en U.R.S.S. et, sur une faible échelle, en Angleterre. En outre, dans un bloc d'uranium-235 pur, sans noyaux 238 pour faire disparaître une partie des neutrons, la réaction en chaîne se développerait si rapidement qu'elle deviendrait incontrôlable dès que la « masse critique » serait atteinte, c'est-à-dire dès que la masse serait suffisamment grande pour que les pertes de neutrons par la surface extérieure en laissent suffisamment d'actifs à l'intérieur. Nous aurions ainsi réalisé une bombe atomique et non un engin industriel.

Mais il n'est pas indispensable d'éliminer l'uranium-238. Si, par un montage approprié, on peut soustraire un nombre suffisant de neutrons à l'action des noyaux 238 au moment où leur énergie passe par la valeur de résonance, ils parviendront à l'état de neutrons lents et pourront provoquer des fissions. On est ainsi conduit à introduire dans la masse d'uranium naturel un « modérateur » à travers lequel les neutrons rapides perdront leur énergie dans une succession de chocs élastiques sans réaction nucléaire, rebondissant sur des noyaux d'atomes qui ne les absorbent pas ou peu. Le terme « modérateur » est assez mal choisi et on lui préfère parfois celui de « ralentisseur de neutrons » ; il laisse supposer au profane que cet organe a pour mission de freiner la réaction et que celle-ci s'emballerait si on le supprimait. En réalité, c'est le contraire qui se produit. En l'absence de modérateur, aucune réaction en chaîne ne peut s'établir dans un bloc d'uranium naturel.

### Les « modérateurs »

Les corps susceptibles d'être employés le plus avantageusement comme modérateurs sont ceux de masse atomique faible et qui absorbent peu de neutrons. Il est nécessaire que la masse de l'atome soit faible car les échanges d'énergie dans les chocs élastiques sont d'autant plus importants que les masses sont voisines. Une balle qui frappe un corps volumineux rebondit sans presque perdre de vitesse ; si elle heurte une balle de même dimension, elle lui cède une fraction importante de son énergie cinétique. De même, un neutron rebondit sur un noyau lourd sans ralentir sensiblement, tandis que, s'il vient à rencontrer des protons, par exemple, de masse sensiblement égale à la sienne, il peut perdre en quelques chocs la presque totalité de son énergie.

Un certain nombre d'éléments sont employés ou ont été proposés pour constituer le modérateur. Le plus utilisé est le carbone, sous forme de graphite très purifié. Puis vient le deutérium sous forme d'eau lourde ; le deutérium est un isotope de l'hydrogène ordinaire, dont le noyau, au lieu de contenir un seul

# Petit lexique nucléaire

**ATOME** : Constituant de base de tout élément chimique, comportant un noyau (formé de protons et de neutrons) chargé positivement et des électrons périphériques. Ses dimensions sont extrêmement réduites : dans 1 gramme d'uranium, il y a environ 3 000 000 000 000 000 000 000 atomes (3 000 milliards de milliards).

**BARRE DE CONTROLE** : Barre de matériau absorbant les neutrons, introduite plus ou moins dans un réacteur nucléaire pour régler l'intensité de la réaction.

**BREEDER** : Réacteur nucléaire qui engendre du combustible nucléaire en même temps qu'il en consomme.

**CURIE** : Unité d'activité d'un produit radioactif correspondant à 37 milliards de désintégrations par seconde.

**DEUTÉRIUM** : Hydrogène lourd de masse 2, noyau formé d'un proton et d'un neutron.

**EAU LOURDE** : Eau formée avec du deutérium (hydrogène lourd) au lieu d'hydrogène ordinaire.

**ÉLECTRON** : Particule dont la masse est d'environ 1 860 fois plus faible que celle d'un proton ou d'un neutron. Elle porte la plus petite charge électrique négative qu'on puisse trouver dans la nature.

**ÉLECTRONVOLT** : Unité d'énergie, celle qu'acquiert un électron franchissant une différence de potentiel de 1 volt.

**ÉNERGIE DE LIAISON** : Énergie qui maintient protons et neutrons unis dans le noyau d'un atome.

**FISSILE** : Qui peut subir la fission.

**FISSION** : Éclatement d'un noyau atomique, généralement en deux morceaux de masse différente et avec libération d'énergie. Seuls certains éléments lourds peuvent subir la fission.

**FUSION** : Union de deux noyaux d'éléments légers pour constituer un noyau plus lourd (exemple : fusion de deux noyaux d'hydrogène lourd ou deutérium pour donner un noyau d'hélium). La fusion dégage une énergie considérable mais ne se produit qu'à des températures de l'ordre de plusieurs millions de degrés.

**ION** : Atome qui a perdu ou gagné un ou plusieurs électrons et se trouve électrisé négativement ou positivement.

**ISOTOPES** : Atomes d'un même élément chimique dont le noyau contient, pour un même nombre de protons, un nombre différent de neutrons.

**MASSE CRITIQUE** : Quantité de substance fissile nécessaire pour qu'une réaction en chaîne s'établisse.

**MeV** : Mégaélectronvolt, unité d'énergie valant 1 million d'électronvolts.

**MODÉRATEUR** : Matériau utilisé dans un réacteur nucléaire pour ralentir par collisions successives les neutrons émis lors des fissions; par exemple : graphite, eau lourde, etc.

**NEUTRON** : Particule élémentaire de masse voisine de celle du proton, mais électriquement neutre.

**NOMBRE DE MASSE** : Nombre total de protons et de neutrons présents dans le noyau d'un atome.

**NUMÉRO ATOMIQUE** : Nombre de protons présents dans le noyau d'un atome. Le numéro atomique de l'hydrogène est 1, celui de l'uranium 92.

**PARTICULE ALPHA** : Particule formée de deux neutrons et deux protons (noyau d'hélium) émise lors de la désintégration de certains atomes radioactifs.

**PARTICULE BÊTA** : Électron émis lors de la désintégration de certains atomes radioactifs.

**PÉRIODE** : Temps au bout duquel un produit radioactif perd la moitié de son activité. Il peut aller de la fraction de seconde à des millions d'années.

**PHOTON** : Groupement de rayonnement électromagnétique assimilable à un corpuscule; son énergie est proportionnelle à la fréquence et constitue un « quantum d'énergie ».

**PLUTONIUM** : Élément lourd n'existant dans la nature qu'en quantités infinitésimales et inutilisables, et pouvant être produit dans les réacteurs nucléaires; il peut subir la fission.

**POSITON** : Particule élémentaire de même nature que l'électron, mais chargée positivement. Elle a une vie brève, s'unissant rapidement à un électron (dématérialisation avec production de deux photons gamma).

**PROTON** : Particule élémentaire de charge positive (égale et de signe contraire à celle de l'électron) constituant avec les neutrons tous les noyaux des atomes.

**RADIOISOTOPE** : Isotope radioactif d'un élément.

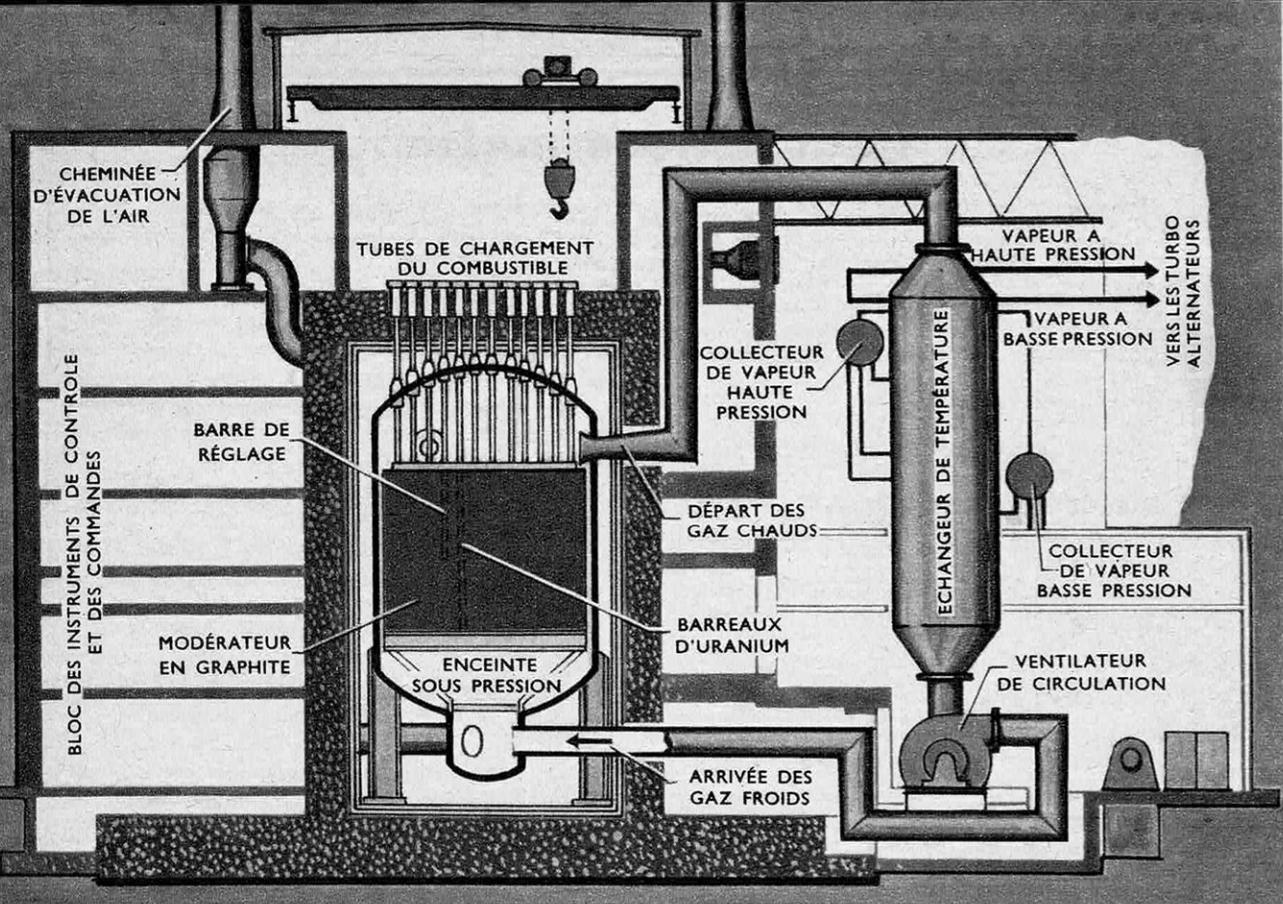
**RAYONNEMENT GAMMA** : Rayonnement électromagnétique, de même nature que la lumière et les rayons X, de très courte longueur d'onde et très pénétrant.

**RÉACTEUR NUCLÉAIRE** : Appareil où se trouve réuni une quantité de matériel fissile suffisante pour que s'établisse une réaction en chaîne contrôlée.

**RÉACTION EN CHAÎNE** : Réaction se propageant et se soutenant d'elle-même dans un réacteur nucléaire; les neutrons émis lors de la fission d'un atome provoquent de nouvelles fissions.

**TRACEUR** : Radioisotope mélangé en faible quantité aux isotopes stables d'un élément et permettant, grâce à sa radioactivité, de le suivre dans toutes ses transformations physiques et chimiques.

**TRITIUM** : Hydrogène très lourd dont le noyau comporte un proton et deux neutrons; il est radioactif.



SUITE DE LA PAGE 14

proton, renferme un proton et un neutron. L'eau lourde est théoriquement et pratiquement plus avantageuse que le graphite et permet de réaliser des réacteurs nucléaires plus compacts. Mais sa fabrication est onéreuse et c'est au graphite que l'on s'est adressé jusqu'ici pour les piles de grande puissance. On pourrait encore employer le béryllium, bien que sa purification devienne très cher et que sa manipulation soit dangereuse. L'eau ordinaire ne peut convenir que lorsqu'on est en mesure d'employer comme « combustible », non plus de l'uranium naturel, mais de l'uranium enrichi en uranium-235.

### Comment fonctionne une pile

Pratiquement, un réacteur nucléaire avec modérateur en graphite sera constitué de la façon suivante :

Dans des cartouches d'aluminium étanches, on enferme de l'uranium naturel ou de l'oxyde d'uranium comprimé, en barres ou en pastilles, après l'avoir minutieusement purifié. Ces cartouches sont insérées dans des blocs de graphite. Les neutrons rapides libérés par les fissions dans l'uranium s'en échappent, traversent facilement l'enveloppe d'aluminium qui les absorbe peu et passent dans un des blocs de graphite. Là, ils rebondissent sur les atomes

de carbone et ressortent à l'état de neutrons lents pour pénétrer dans un des lingots d'uranium voisins où, captés par les atomes d'uranium, ils provoquent de nouvelles fissions. A de tels réacteurs, formés par un entassement de lingots d'uranium alternant avec du graphite, peut convenir le nom de « pile ». On conserve cependant la même dénomination pour les réacteurs à l'eau lourde bien qu'il n'y ait plus d'empilement, les barres d'uranium chemisées d'aluminium étant seulement noyées dans l'eau lourde ; leur fonctionnement est semblable à celui des piles au graphite.

Les neutrons du réacteur ne sont évidemment pas tous utilisés pour des fissions, sinon la réaction serait explosive. Un grand nombre sont absorbés par les différents éléments qui entrent dans sa constitution ou se perdent à l'extérieur. L'économie des neutrons est caractérisée par ce que l'on appelle le « facteur de multiplication ». C'est le rapport du nombre des neutrons d'une génération au nombre des neutrons de la génération précédente. Quand un réacteur a un fonctionnement stable, ce facteur est évidemment égal à l'unité. Tant que les pertes par la surface sont proportionnellement trop élevées, le facteur est inférieur à un et le réacteur ne peut « démarrer ». On peut réduire ces pertes de deux manières, soit en augmentant la masse du système, soit en

# Coupe partielle de la centrale de Calder Hall

**L**ES réacteurs de Calder Hall, en Grande-Bretagne, récemment inaugurés, sont à modérateur en graphite et à refroidissement par gaz carbonique. La coupe montre la disposition générale d'un de ces réacteurs et de l'un des échangeurs de température qui lui est associé. Le réacteur consiste en un treillis de graphite de 9,5 m de diamètre et de 6,5 m de haut enfermé dans un tank cylindrique étanche. Le combustible est de l'uranium naturel en barres de 28 mm de diamètre, enfermées dans des gaines en alliage de magnésium dont la surface extérieure est en hélice pour accroître la surface d'échange de la chaleur avec le gaz. Le poids total de l'uranium dans le réacteur est de 125 tonnes. Dans le graphite sont ménagés 1 696 canaux verticaux de 10 cm de diamètre pouvant recevoir chacun quatre éléments de combustible. Le gaz circule dans l'espace annulaire entre le graphite et les éléments de combustible sous une pression

de 7 atmosphères. Il entre dans le réacteur à 140° C et en sort à 336° par quatre conduites de 3 m de diamètre qui l'amènent à quatre échangeurs de température dont un seul est visible ici. La structure en graphite pèse 1 200 tonnes. Le tank étanche en acier a 18 m de haut et est entouré d'un écran de protection contre les radiations, en béton épais de 2,10 m sur les côtés et 2,40 m à la partie supérieure ; il est doublé sur sa face interne d'un écran thermique en acier refroidi par de l'air qui circule entre cet écran et le tank du réacteur et est évacué par une cheminée. Le chargement et le déchargement du combustible s'effectuent par la partie supérieure. Le contrôle de la réaction est assuré par 60 barres en acier au bore manœuvrées par des moteurs électriques ; 5 d'entre elles servent au réglage « fin » ; un dispositif électromagnétique permet le décrochage des barres qui arrêtent la réaction en cas d'urgence.

l'entourant d'un revêtement réfléchissant. On les emploie en général simultanément.

Dans le premier cas, le volume du système, donc le nombre total de neutrons libres, augmente comme le cube des dimensions linéaires, tandis que la surface, et par suite le nombre de neutrons qui s'échappent, augmente seulement comme le carré de ces dimensions. En valeur relative, les pertes par fuites diminuent lorsque les dimensions du réacteur augmentent.

Dans le second cas, on entoure le réacteur d'un « réflecteur » qui renvoie vers l'intérieur une partie des neutrons qui tendent à s'échapper. Ce réflecteur est loin de fonctionner comme un miroir. Les noyaux des atomes qui le constituent dévient les neutrons suivant les lois du hasard, de sorte qu'après un certain nombre de collisions, certains de ces neutrons sont renvoyés en arrière par ce carambolage multiple. La couche réfléchissante idéale serait formée de béryllium, mais, comme nous l'avons vu, il est difficile à produire. Aussi emploie-t-on généralement le graphite et quelquefois l'uranium.

## Un réglage au millième près

Lorsqu'on a donné au réacteur des dimensions suffisantes et qu'on a disposé le réflecteur de neutrons, le facteur de multiplication devient supérieur à 1 et la pile est « divergente » ; on pourrait craindre que la réaction en chaîne prenne rapidement un caractère explosif si on ne considérait que les neutrons émis par les fissions et dont les générations se succèdent très rapidement. Alors, avec un facteur de multiplication de seulement 1,001, par

exemple, la puissance serait multipliée par 20 000 en 10 secondes, ce qui rendrait le contrôle très difficile.

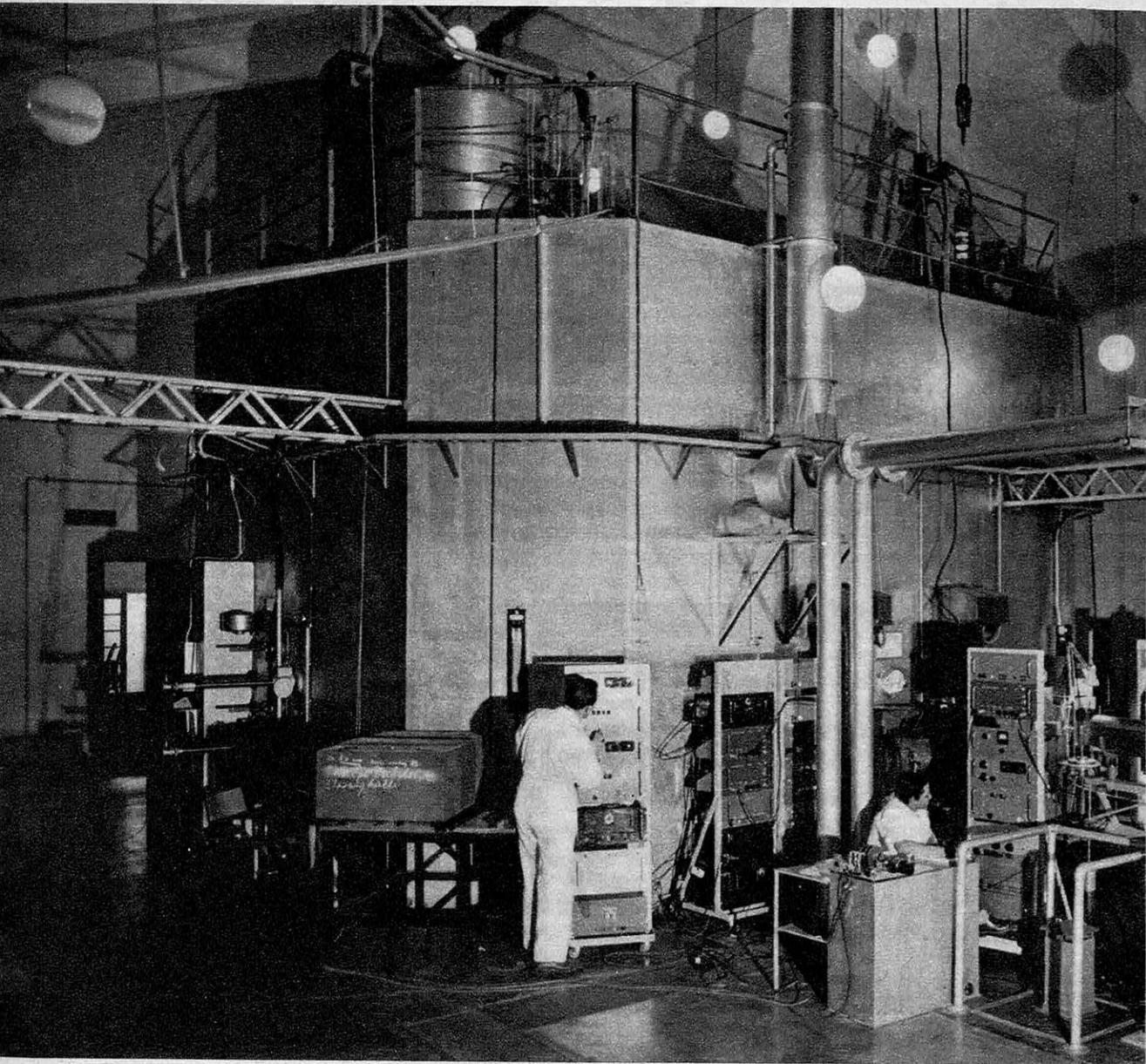
Heureusement, les neutrons d'un réacteur sont de deux sortes : les neutrons « immédiats » sont ceux libérés au cours de la fission même et représentent 99 % du total ; les neutrons « retardés » sont ceux que libèrent certains fragments de fission, avec un retard qui peut aller jusqu'à 1 minute. La vie moyenne des premiers, entre le moment où ils sont produits et celui où ils provoquent eux-mêmes d'autres fissions, est de l'ordre du millième de seconde ; celle des seconds de l'ordre de 10 secondes. Au total, la vie moyenne effective des neutrons est d'environ un dixième de seconde ; avec un facteur de multiplication de 1,001, la puissance n'augmente que de 10 % en 10 secondes, ce qui rend le contrôle aisé.

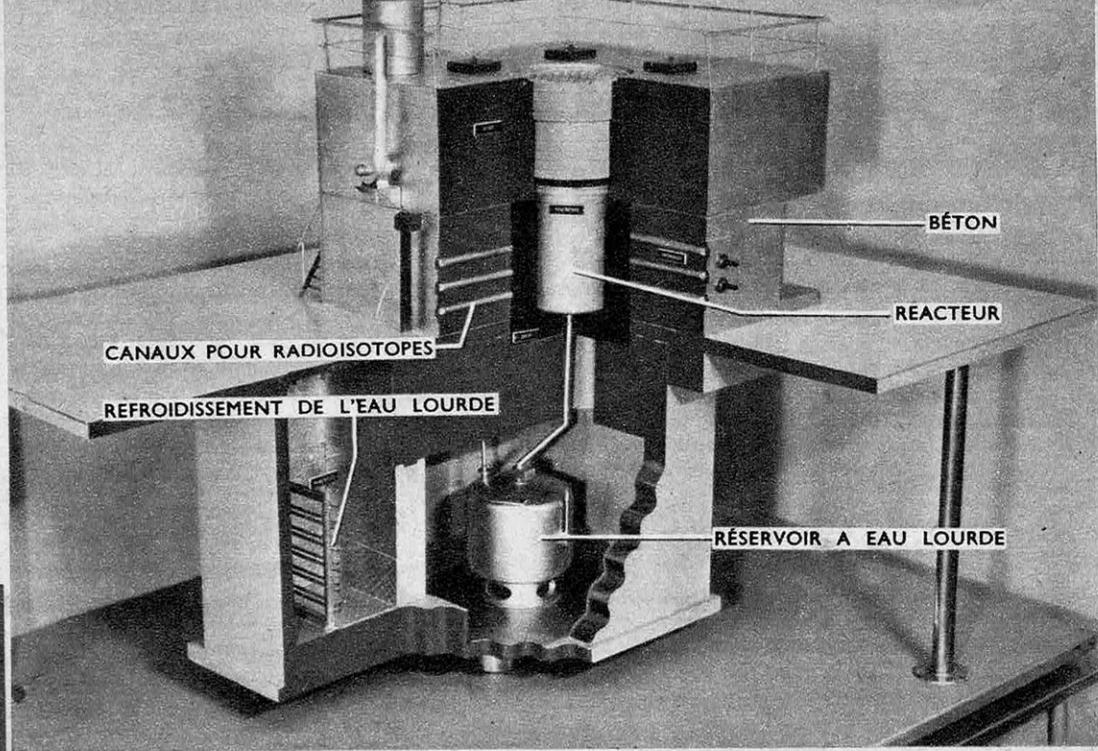
En pratique, le réglage s'effectue à l'aide de barres mobiles de cadmium ou d'acier au bore que l'on enfonce plus ou moins dans le cœur du réacteur. Le cadmium et le bore sont de puissants absorbants de neutrons. La commande des barres se fait automatiquement. Une chambre d'ionisation sensible aux neutrons lents permet de mesurer à chaque instant le flux de neutrons en un point déterminé de la pile. Le courant qui traverse la chambre est convenablement amplifié et commande des moteurs électriques qui enfouissent plus ou moins les barres de réglage dans le réacteur. A la mise en marche, on extrait les barres suffisamment pour que le réacteur devienne divergent et, lorsque le niveau de fonctionnement désiré est atteint, on les réintroduit jusqu'à ce que le facteur de multiplication soit

## Le réacteur "Jeep" à eau lourde (Norvège)

**L**e réacteur « Jeep », édifié à Kjeller en Norvège, est en fonctionnement depuis 1951. Il fait partie du programme de recherches nucléaires dressé en commun par les Pays-Bas et la Norvège. C'est un réacteur à eau lourde et à uranium naturel, l'eau lourde servant à la fois de modérateur et d'agent de refroidissement. La photographie ci-dessous en donne une vue d'ensemble avec, autour du mur de protection, différents appareils électroniques servant aux expériences. Le combustible consiste en 2 200 kg environ d'uranium naturel en barreaux de 30 cm de long logés dans des cartouches d'aluminium. Dans le cœur du réacteur, long de 2 m, peuvent entrer 65 à 76 de ces cartouches. Elles sont plongées dans

de l'eau lourde dont on utilise environ 7 tonnes dans un tank de 2 m de diamètre. Autour du tank se trouve un réflecteur en graphite de 70 cm d'épaisseur. Le contrôle de la réaction est obtenu grâce à quatre plaques de cadmium maintenues entre deux plaques d'aluminium; elles ont 35 cm de large et 1,30 m de long et se déplacent dans l'intervalle entre le tank à eau lourde et le réflecteur. Le tout est entouré d'un écran de béton de 2 m d'épaisseur revêtu de cadmium. On retrouve certains éléments sur le modèle ci-contre. La puissance de ce réacteur, prévu à l'origine pour 100 kW a été portée depuis à 350, puis à 800 kW. Il est utilisé pour des recherches et pour produire des radioisotopes.





SUITE DE LA PAGE 17

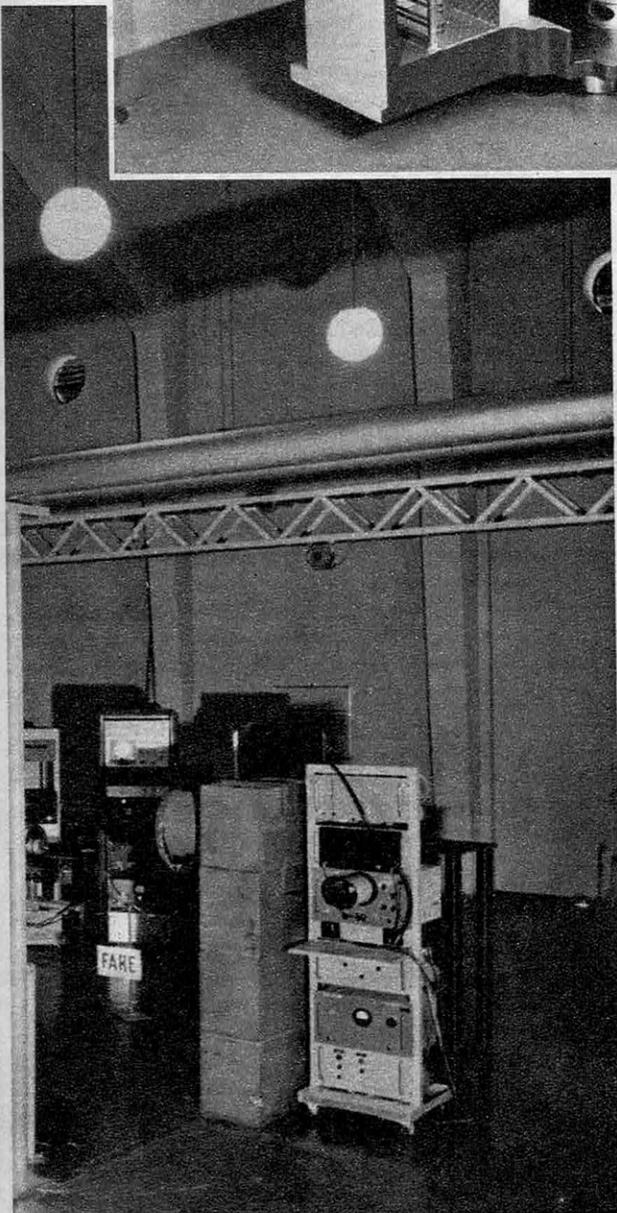
ramené au voisinage de l'unité. La marche du réacteur peut être réglée d'une manière très précise, au millième près, en raison de sa très grande sensibilité à toutes les causes susceptibles de modifier son facteur de multiplication. C'est ainsi que, dans un réacteur à refroidissement par air, les variations de pression atmosphériques entraînent des différences appréciables dans l'absorption des neutrons par l'azote de l'atmosphère.

En plus des barres de réglage, on prévoit toujours des barres de sécurité, déclenchables instantanément et stoppant la réaction.

### La puissance est liée à l'efficacité du refroidissement

L'énergie dégagée par les réactions nucléaires se retrouve sous forme calorifique et la température du réacteur s'élève. Il faut le refroidir, d'abord pour la conservation des matériaux qui le constituent, ensuite pour que la vitesse des neutrons lents ne dépasse pas, du fait de l'agitation thermique, la valeur optimum pour la réaction de fission de l'uranium-235.

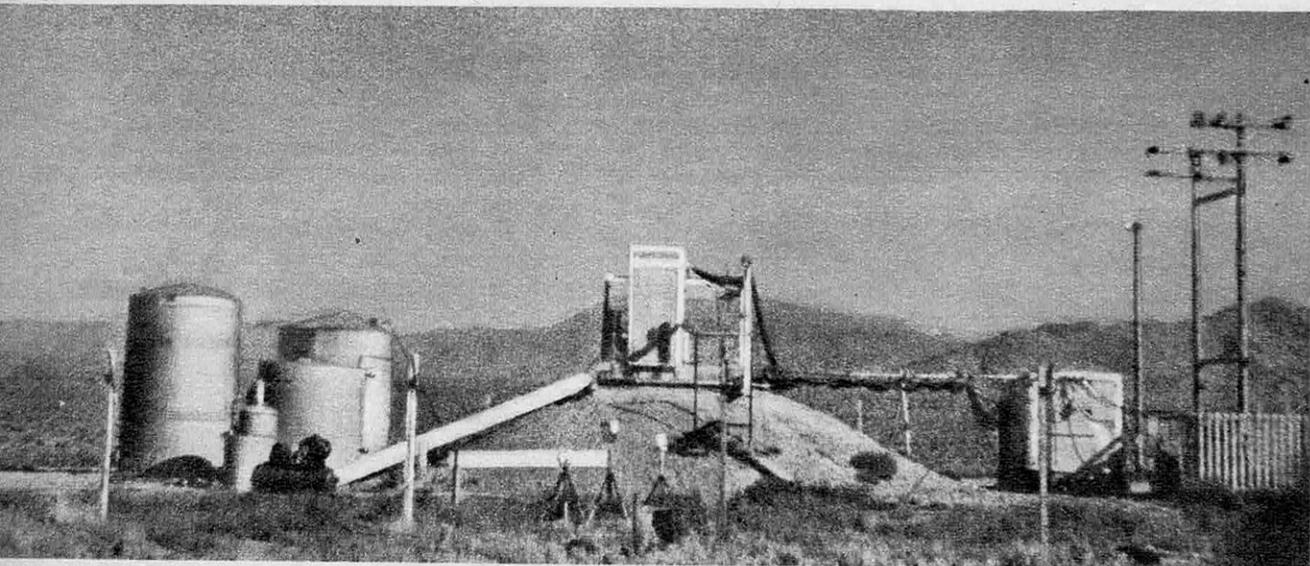
Dans les réacteurs comportant un modérateur à eau lourde, on peut se servir de celle-ci pour évacuer les calories par une circulation appropriée. Pour les piles au graphite, il faut prévoir un refroidissement auxiliaire par un gaz ou un liquide, d'où la nécessité d'une enveloppe, généralement en aluminium, pour protéger l'uranium contre la corrosion. Lorsque le réacteur est refroidi à l'air, l'argon qui y est présent à l'état de traces est transformé



# Le "bouilleur" expérimental Borax-I

**L**E Borax-I a été construit en 1953 par le Laboratoire National d'Argonne, aux Etats-Unis, pour étudier le comportement des réacteurs à modulation et refroidissement par eau quand celle-ci est portée à l'ébullition. Le dessin de la page ci-contre en montre la disposition. Le combustible était très fortement enrichi à 90 % d'uranium-235 et consistait en plaques d'alliage uranium-aluminium recouvertes d'aluminium, logées dans un tank de 1,20 m de diamètre. Un deuxième tank d'acier entourait l'ensemble ; il était partiellement enfoncé dans le sol et sa partie supérieure était recouverte de terre constituant une protection efficace contre les radiations. La photo-

graphie ci-dessus montre l'aspect du Borax-I en 1954 lorsque, les essais terminés, on résolut de provoquer son explosion pour étudier les dommages que pouvait causer à distance l'emballement d'un réacteur. La manœuvre brusque des barres de contrôle entraîna une augmentation soudaine de la puissance développée qui, en un dixième de seconde, dépassa 10 millions de kilowatts. On voit en bas à droite un cliché extrait d'un film ultrarapide montrant la phase critique de l'explosion. La plupart des fragments de combustibles tombèrent dans un rayon de 60 m ; il n'y eut aucun transport de substance radioactives dangereuses au-delà d'une centaine de mètres.



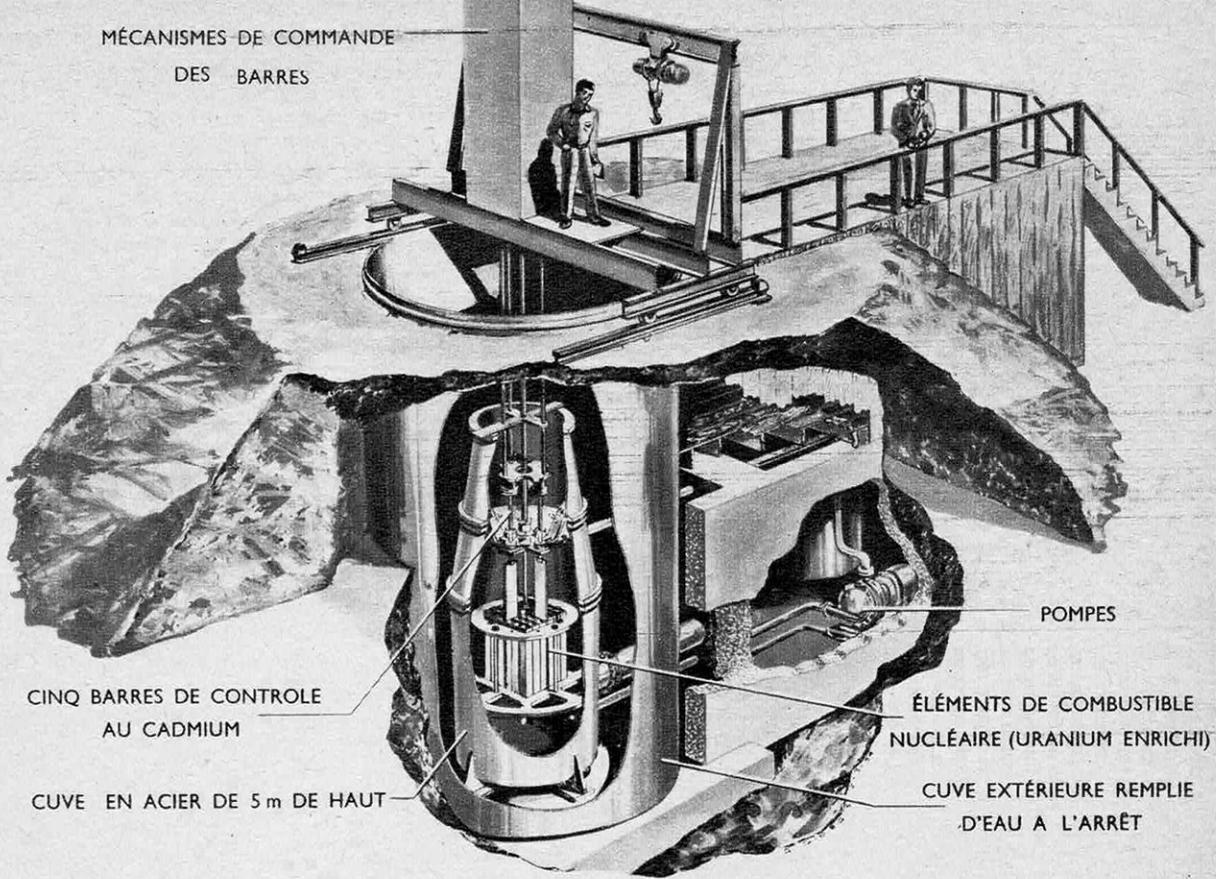
par les neutrons en gaz radioactif ; il est alors indispensable d'évacuer cet air par de très hautes cheminées. Lorsqu'on utilise de l'eau, celle-ci ne peut être rejetée dans un cours d'eau qu'après examen de sa radioactivité. Le refroidissement peut s'effectuer aussi par du sodium, du bismuth ou du plomb fondu.

Pour les réacteurs à l'eau lourde de grande puissance, qui fonctionnent en circuit fermé, on prévoit un système de condensation des vapeurs d'eau lourde et un autre de recombinaison du deutérium et de l'oxygène qui ont été dissociés par les radiations ; la recombinaison accidentelle d'une telle quantité de deutérium et d'oxygène provoquerait une explosion.

La puissance que peut développer un réacteur est essentiellement fonction de l'efficacité de son système de refroidissement qui doit empêcher que la température dépasse celle que peuvent supporter les matériaux qui le

constituent. Supposons que le système assurant le réglage et la sécurité ne fonctionne pas ; la réaction s'emballe, mais en aucun cas le réacteur ne peut se comporter comme une bombe atomique. S'il s'agit d'un réacteur à eau lourde, la température s'élevant, celle-ci se mettrait à bouillir, et les conditions de modulation des vitesses des neutrons n'étant plus satisfaites, le facteur de multiplication tomberait vite au-dessous de l'unité. Dans le cas d'un réacteur en graphite, les matériaux de soutien commenceraient à perdre de leur rigidité et la structure s'effondrerait, provoquant, là encore, l'arrêt de la réaction. Les dégâts seraient importants pour le réacteur, mais resteraient localisés. Une expérience a été intentionnellement faite aux Etats-Unis pour vérifier ces prévisions ; la destruction de la pile n'a entraîné de projection de matériaux dangereux qu'à son voisinage immédiat.

SUITE PAGE 22



**La pile-piscine** présentée à Genève par les Etats-Unis et acquise depuis par le gouvernement helvétique, est destinée aux recherches. Le combustible est un alliage d'uranium et d'aluminium, fortement enrichi en uranium-235 (20%); son poids est de 4,5 kg environ. La cuve en aluminium a 6 m de profondeur et est enfoncée dans le sol; elle contient 12 m<sup>3</sup> d'eau ordinaire déminéralisée qui sert à la fois

de modérateur, d'agent de refroidissement et d'écran contre les radiations. La puissance peut varier de 10 à 100 kW. Cette pile émet une luminescence bleue, visible sur la photographie. Elle est due à l'« effet Cerenkov » maintenant assez bien connu et qu'on peut comparer à une sorte d'onde de choc lorsque des particules sont émises à une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière dans le milieu qu'elles traversent.

SUITE DE LA PAGE 20

### La pile « couveuse »

Au cours du fonctionnement du réacteur, la composition des matériaux qui le constituent se modifie. Du plutonium se forme aux dépens de l'uranium-238; de l'uranium-235 est transformé en uranium-236, car la capture d'un neutron sans fission n'est pas négligeable; les fissions font apparaître des impuretés par leurs résidus. Le facteur de multiplication a tendance à décroître et, au bout d'un certain temps, il faut « recycler » le combustible de la pile, c'est-à-dire le débarrasser des impuretés qui s'y sont accumulées, et d'autre part récupérer et purifier le plutonium-239. Le recyclage doit se faire assez souvent pour éviter la détérioration du plutonium-239 qui deviendrait à la longue du plutonium-240 par absorption de neutrons.

L'apparition du plutonium-239 compense dans une certaine mesure la disparition de l'uranium-235 car il est susceptible de subir la fission comme l'uranium-235. Comme il est beaucoup plus facile de séparer le plutonium de l'uranium « usé » dans un réacteur que d'extraire l'uranium-235 de l'uranium naturel, on attache dans plusieurs pays une grande importance à la production du plutonium. Il est en effet utilisable pour enrichir un combustible nucléaire en matière fissile et réaliser ainsi des réacteurs développant une puissance accrue sous un faible volume. Si l'on parvenait à produire au moins autant de plutonium qu'il disparaît d'uranium-235, on aurait réalisé une pile « sur-régénératrice » ou « breeder », ou encore « couveuse ». L'intérêt d'un tel réacteur est qu'on parviendrait ainsi à « brûler » non seulement la petite quantité d'uranium-235 contenue dans l'uranium naturel, mais aussi indirectement tout l'uranium-238, ce qui ouvrirait de larges perspectives pour l'exploitation de l'énergie nucléaire.

On peut faire jouer aussi au thorium le même rôle qu'à l'uranium-238, en l'introduisant dans un réacteur. Le thorium-232 est en effet capable de capturer un neutron pour former du thorium-233 radioactif. Après deux émissions bêta successives, il donne de l'uranium-233, isotope susceptible de subir la fis-

sion. Les recherches dans cette voie semblent avoir été particulièrement poussées au Canada, aux Etats-Unis et en Grande-Bretagne.

### La protection

Les réactions nucléaires de tous ordres qui ont lieu dans ces réacteurs font apparaître des produits radioactifs dont certains sont gazeux. Il est indispensable d'assurer l'étanchéité absolue du système car ces produits sont dangereux pour l'homme, les animaux et les plantes dès qu'ils dépassent une concentration déterminée. En outre, les réactions nucléaires s'accompagnent de l'émission de rayons gamma très pénétrants.

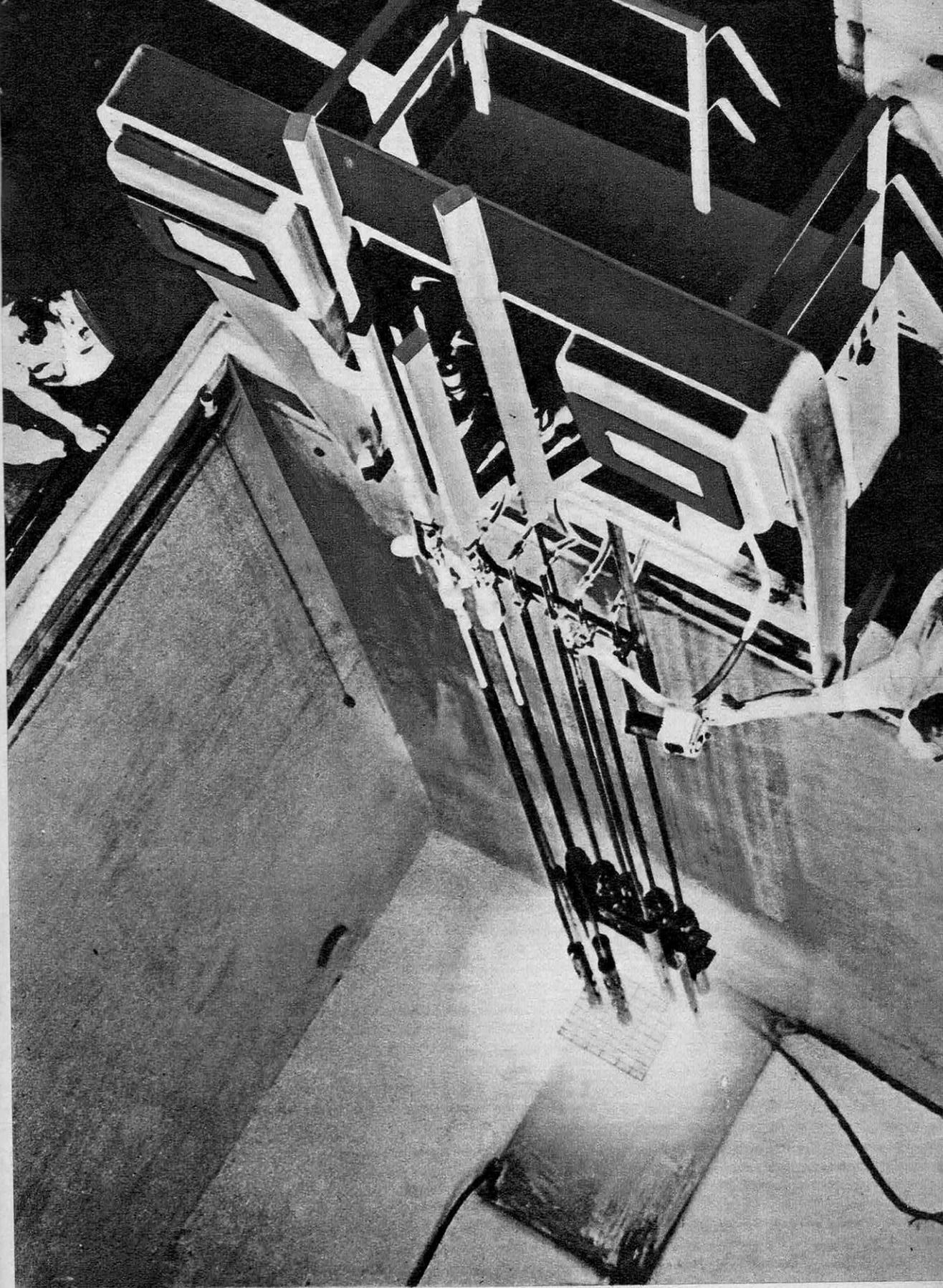
A ce point de vue, un réacteur développant 1 000 kW équivaut à 2 tonnes de radium. On doit arrêter ces radiations au moyen d'écrans contenant le plus possible d'éléments lourds, opaques aux rayons gamma. Le réacteur lui-même est entouré d'une carapace de ciment armé et est souvent aux trois quarts enterré. Après un long arrêt, les produits de fission peuvent avoir encore une radioactivité comparable à celle de plusieurs kg de radium.

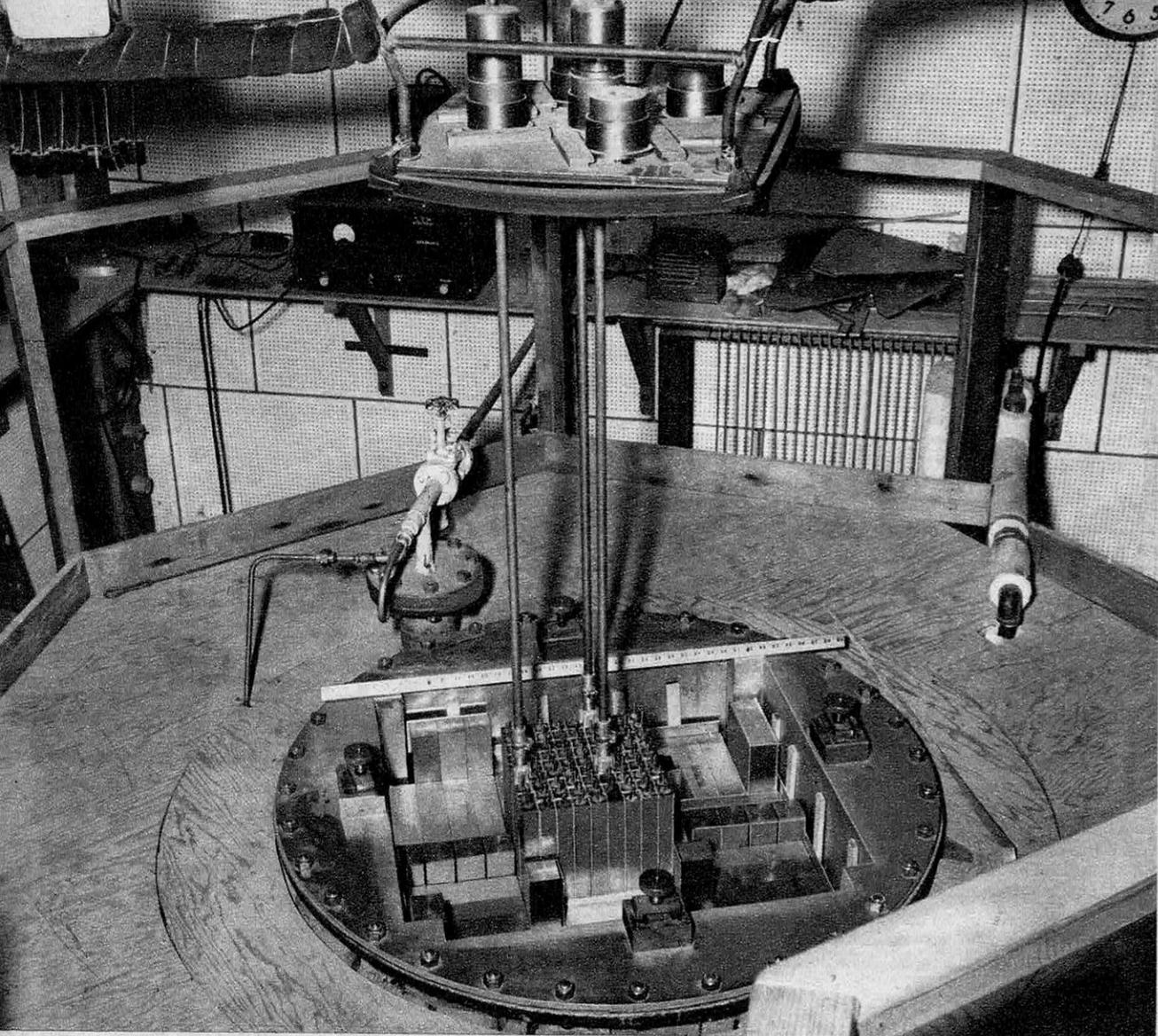
De multiples précautions sont prises pour assurer la sécurité: des appareils détecteurs signalent immédiatement toute trace de corps radioactif dans les zones occupées par le personnel, ainsi que toute dose de radiation dangereuse. Enfin, des services médicaux surveillent constamment le personnel; le pourcentage de victimes d'accidents de toutes sortes dans l'industrie atomique n'est pas supérieur à celui des autres industries, électriques, hydrauliques, etc.; aussi les primes d'assurances y sont-elles les mêmes que dans les autres secteurs industriels.

### Autant de types de réacteurs que de bureaux d'études

De ce qui vient d'être dit, en faisant abstraction de détails particuliers, on peut retenir qu'un réacteur nucléaire comporte comme éléments essentiels:

- un « combustible » nucléaire;
- un modérateur;
- un agent de refroidissement;
- des dispositifs de réglage et de sécurité;





SUITE DE LA PAGE 22

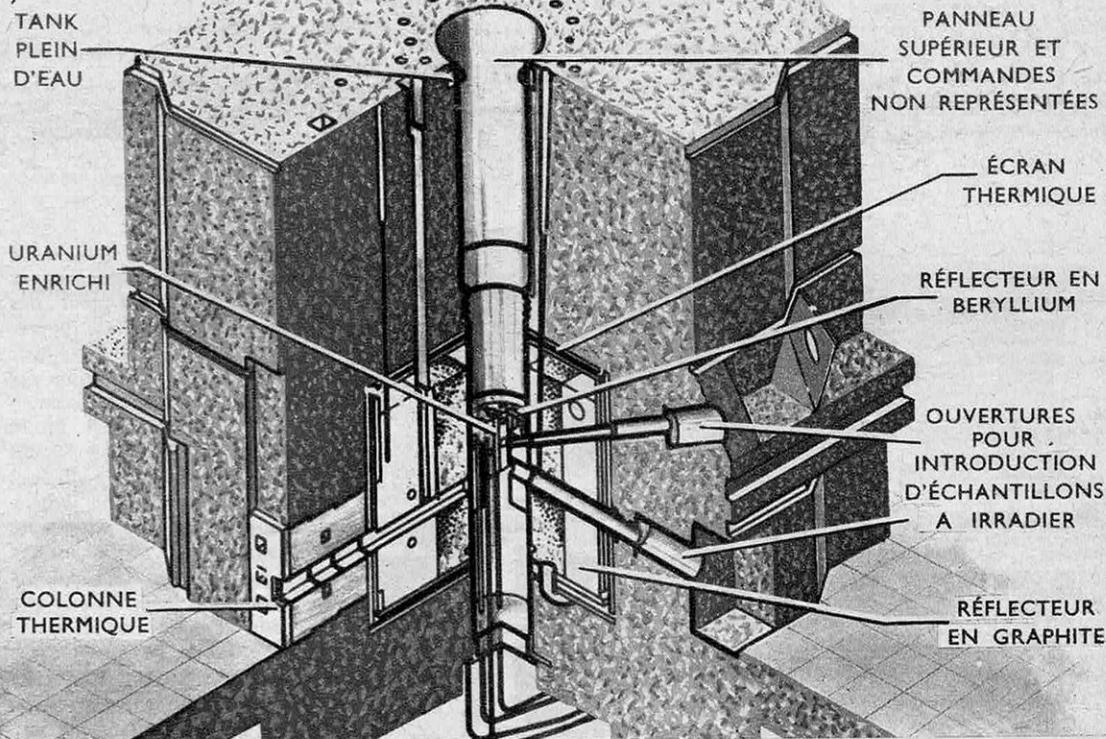
— des enceintes protectrices contre les radiations.

Ce sera le travail de l'ingénieur de choisir pour chacun de ces éléments les matériaux les plus favorables et les combiner au mieux en fonction du but qu'il se propose : réalisation d'une centrale nucléaire, propulsion d'un navire, fabrication de plutonium ou d'uranium-233, recherche expérimentale, etc. On conçoit aisément que les types de réacteurs possibles soient d'une grande diversité, que l'on fasse appel à l'uranium naturel, ou à l'uranium enrichi, soit en uranium-235, soit en plutonium, soit en uranium-233, que l'on préfère comme modérateur le graphite, l'eau lourde, l'eau légère ou tout autre corps, que l'on élise comme agent de refroidissement un gaz comme l'air ou le gaz carbonique, l'eau lourde ou légère, ou encore un métal fondu, que l'on adopte la disposition « hétérogène »

où l'uranium est en général employé sous forme de blocs répartis dans la masse du modérateur, ou la disposition « homogène » où l'uranium est en solution dans le modérateur sous forme de sulfate d'uranyle dans l'eau, ou en suspension dans un métal fondu ou un gaz, etc.

Les variantes paraissent si nombreuses que l'on a pu dire qu'il y avait autant de types de réacteurs que de bureaux d'études s'intéressant à la question.

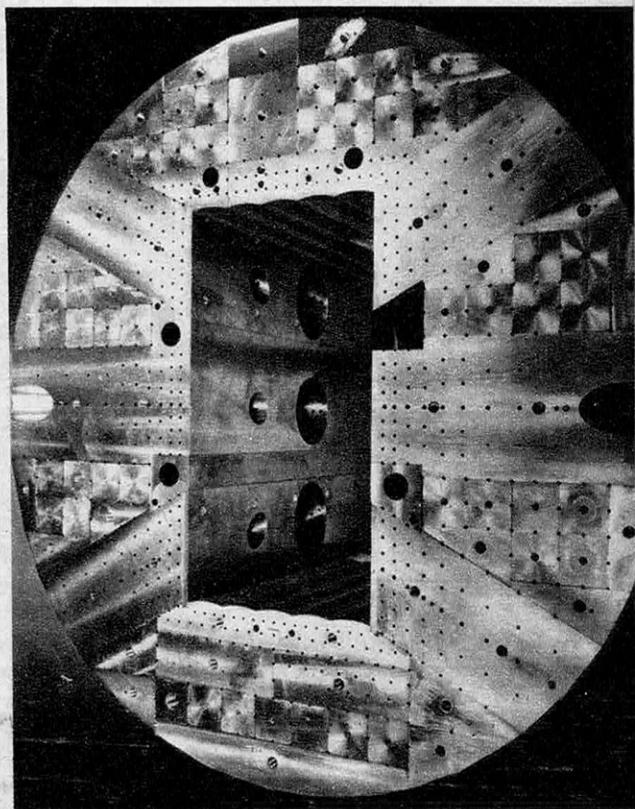
Il est très difficile d'en effectuer une classification rationnelle et simple, mais un certain nombre de ces types méritent une mention spéciale, soit qu'ils aient fait l'objet de réalisations importantes déjà en fonctionnement, soit qu'il s'agisse de projets en cours d'exécution, soit qu'ils apparaissent particulièrement prometteurs pour le développement futur de l'industrie nucléaire.

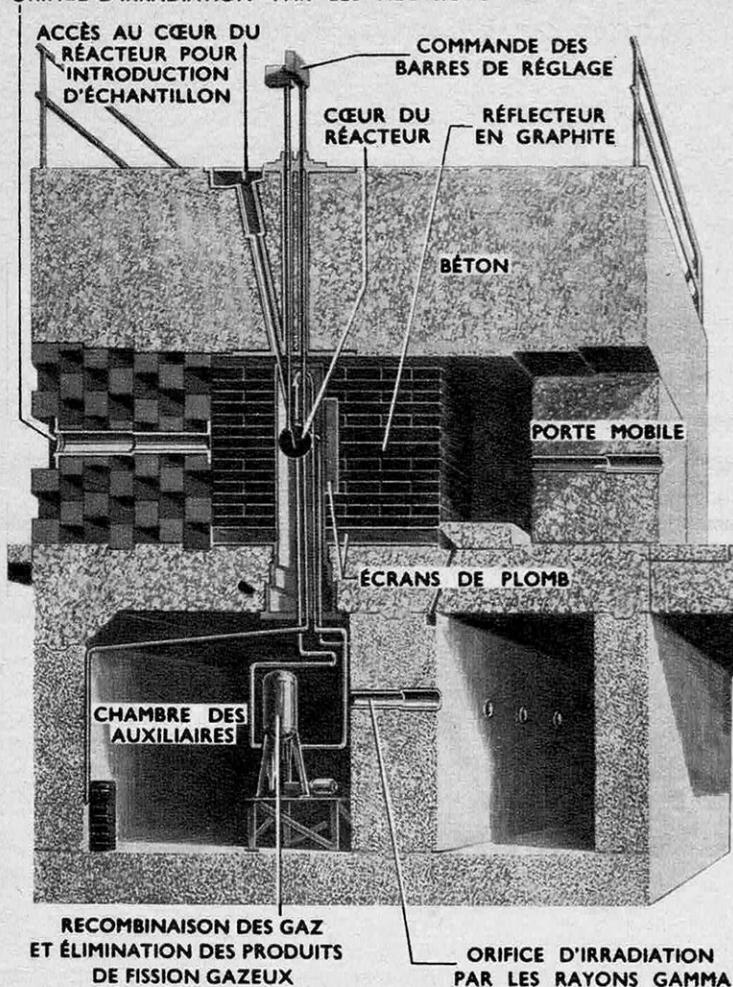


Oak Ridge National Laboratory

## Le "Materials Testing Reactor"

**C**E réacteur, désigné en général par ses initiales M.T.R., fonctionne depuis 1952 à la station d'essais d'Arco, aux Etats-Unis. Il est essentiellement destiné à étudier le comportement des matériaux entrant dans la construction des réacteurs lorsqu'ils sont soumis à une irradiation intense à haute température, soit par des neutrons rapides, soit par des neutrons lents. A ce type M.T.R. se rattachent d'autres réacteurs édifés au Laboratoire National d'Oak Ridge et les piles-piscines, comme celle de la page précédente, qu'acquière plusieurs Universités américaines et plusieurs pays étrangers (Allemagne, Suisse, Japon, etc.). Elles sont caractérisées par l'emploi d'uranium fortement enrichi (20% d'uranium-235) et d'eau ordinaire pour la modulation et le refroidissement. L'enrichissement du combustible permet d'obtenir des flux de neutrons élevés et, grâce à l'emploi de plaques très minces gainées d'aluminium, de multiplier la surface d'échange de la chaleur pour un refroidissement efficace par l'eau circulant à grande vitesse. 1 260 litres d'eau passent par seconde à travers les éléments de combustible et les canaux ménagés dans le réflecteur en béryllium que l'on voit à droite. Le cœur du réacteur est logé dans un puits profond de 9 m autour duquel est disposé un second réflecteur en graphite. On voit à gauche la partie supérieure du cœur avec les éléments de combustible et trois barres de contrôle au cadmium. La puissance développée est de 30 000 kW. De nombreux canaux sont ménagés dans le massif de béton qui entoure le réacteur pour l'introduction des échantillons à étudier. A droite, le réflecteur en béryllium.





## UN RÉACTEUR "HOMOGÈNE"

C'est le premier réacteur servant uniquement à des recherches pour l'industrie privée. La puissance nominale est de 50 kW et il constituera une source de neutrons et de rayons gamma pour des études biologiques, métallurgiques et la fabrication de radioisotopes de vie courte. Le combustible est une solution de sulfate d'uranyle dans de l'eau ordinaire et le « cœur » une sphère de 30 cm de diamètre logée dans un réflecteur en graphite. L'eau de la solution, qui sert de modérateur, est décomposée en partie par les rayonnements et les gaz doivent être recombinés pour éviter une explosion, ce qui s'effectue en sous-sol à l'aide de catalyseurs. Les produits de fission, séparés de la solution, fournissent des rayons gamma. Le refroidissement est par eau. Le réacteur est installé à l'Armor Research Foundation.

SUITE DE LA PAGE 24

### Les réacteurs types

Le premier est le réacteur à uranium naturel, modérateur en graphite et refroidissement par un gaz, type Marcoule, en France, et Calder Hall, en Angleterre. Ce type de réacteur est maintenant bien connu et son fonctionnement ne réserve plus de surprise. Il est relativement économique à construire, n'exigeant pas d'enrichissement du combustible. Bien qu'on puisse lui reprocher son encombrement, il est probable qu'il jouera encore longtemps un rôle important dans l'équipement des centrales nucléaires, au moins de ce côté de l'Atlantique.

Les réacteurs utilisant l'eau lourde comme modérateur et agent de refroidissement ont été surtout développés au Canada. Leur prix de revient semble très élevé et les ressources en eau lourde sont limitées.

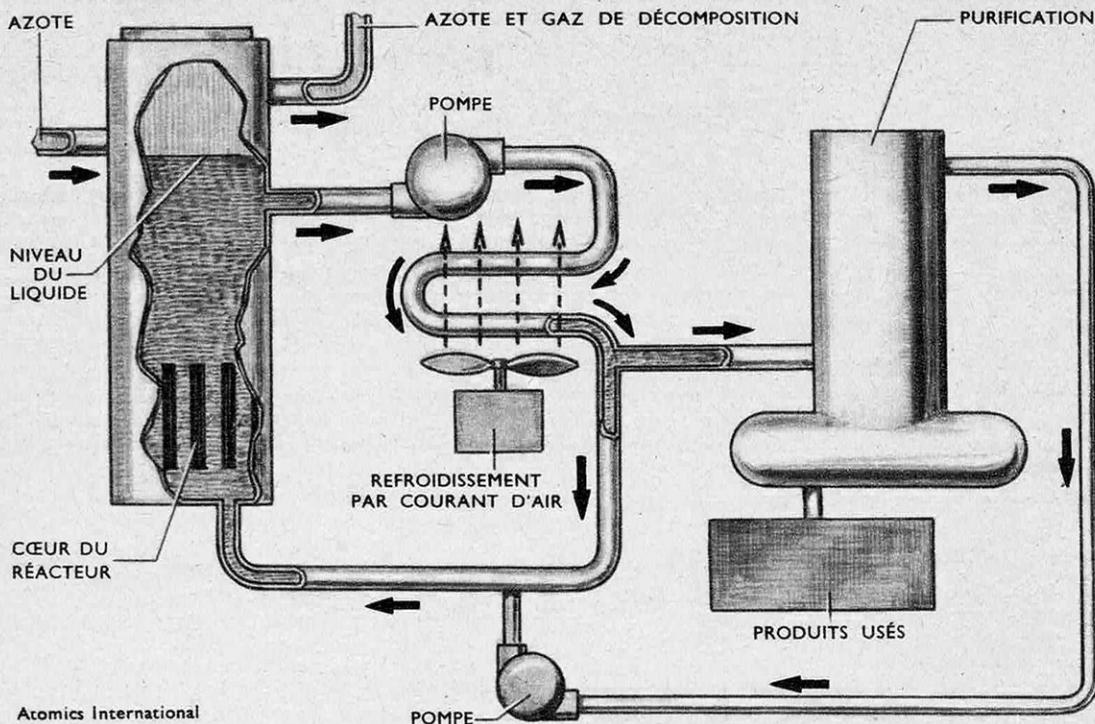
Le type le plus en faveur aux Etats-Unis, pour les premières réalisations industrielles, est le réacteur à eau sous pression. L'eau (ordinaire) joue à la fois le rôle de modérateur et d'agent de refroidissement, et le combustible est légèrement enrichi en uranium-235. Le cir-

cuit de refroidissement est sous pression et l'eau ne se vaporise pas. La vaporisation est obtenue dans un circuit secondaire qui alimente les turbines.

Dans les « bouilleurs », qui ont fait l'objet de recherches poussées aux Etats-Unis, l'eau servant de modérateur circule entre les barres d'uranium et se vaporise, actionnant directement les turbines. Le fonctionnement est, en principe, simplifié et le réacteur est doué d'une assez grande stabilité, tout emballage de la réaction provoquant une vaporisation accrue d'où un freinage automatique. La principale difficulté vient de ce que la vapeur est radioactive et qu'aucun risque de fuite ne peut être toléré dans le circuit de vapeur ; d'autre part, si l'enveloppe d'un des barreaux de combustible venait à perdre de son étanchéité, l'eau entraînant les produits de fission contaminerait gravement la turbine et ses accessoires.

Les réacteurs à modérateur en graphite et refroidissement par sodium fondu sont considérés actuellement comme devant jouer un rôle de premier plan d'ici une dizaine d'an-

SUITE PAGE 30



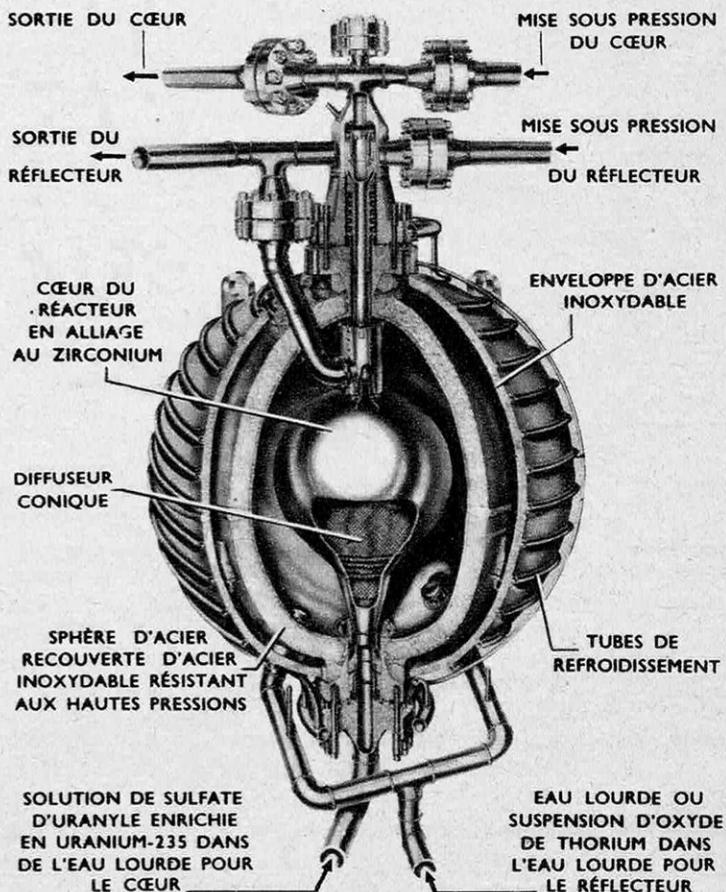
Atomics International

**Schéma de l'OMRE** (Organic Moderated Reactor Experiment), réacteur en construction pour l'Atomic Energy Commission américaine. Il utilisera un composé organique comme modérateur et agent de refroidissement, le diphenyle, dont les avantages

sont le point d'ébullition élevé, le faible pouvoir corrosif et le fait que les neutrons n'y induisent pratiquement pas de radioactivité. Une centrale électrique utilisant un tel réacteur, et d'une puissance de 12 500 kW, est en projet pour la ville de Piqua (Ohio).

## UN "BREEDER" HOMOGÈNE

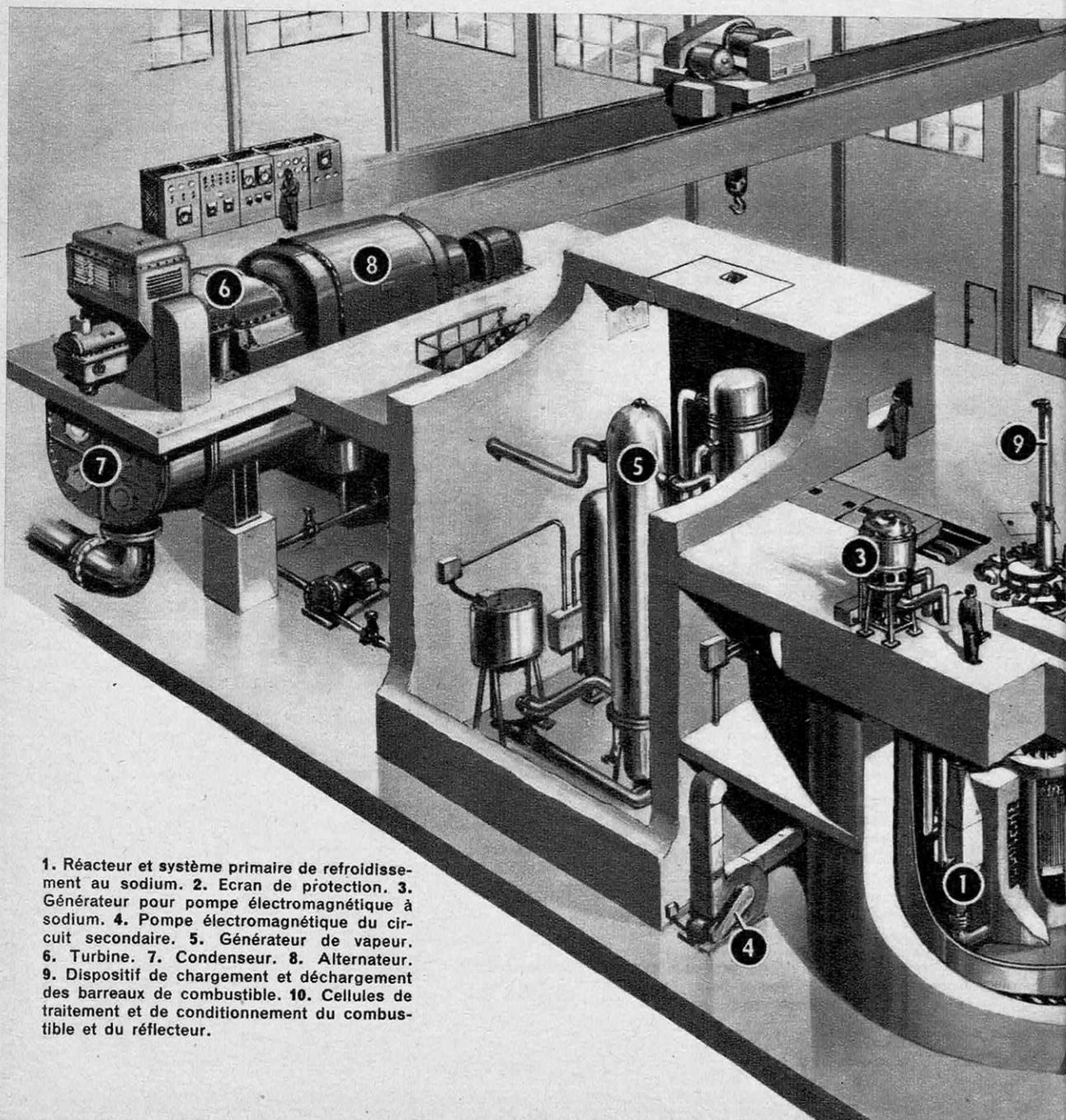
Ce réacteur expérimental d'un type très avancé, est en construction au Laboratoire National d'Oak Ridge, qui est géré par l'Union Carbide and Carbone pour le compte de l'Atomic Energy Commission américaine. Il doit fonctionner suivant le cycle thorium-uranium-233 et développer près de 10 000 kW. Le combustible est une solution diluée de sulfate d'uranyle enrichi à plus de 90% d'uranium-235 dans de l'eau lourde. Cette solution traverse le cœur du réacteur, de forme presque sphérique (80 cm de diamètre); elle y pénètre à 250° et en sort à 300°, la pression dans le circuit étant à 140 kg/cm<sup>2</sup> pour empêcher l'ébullition. Autour du cœur, dans le réflecteur, circule de l'eau lourde portant de l'oxyde de thorium en suspension, qui donne de l'uranium-233. Les deux liquides passent à des échangeurs pour produire de la vapeur. Les produits de fission peuvent être éliminés d'une manière continue.



# Le breeder expérimental d'Argonne (Chicago)

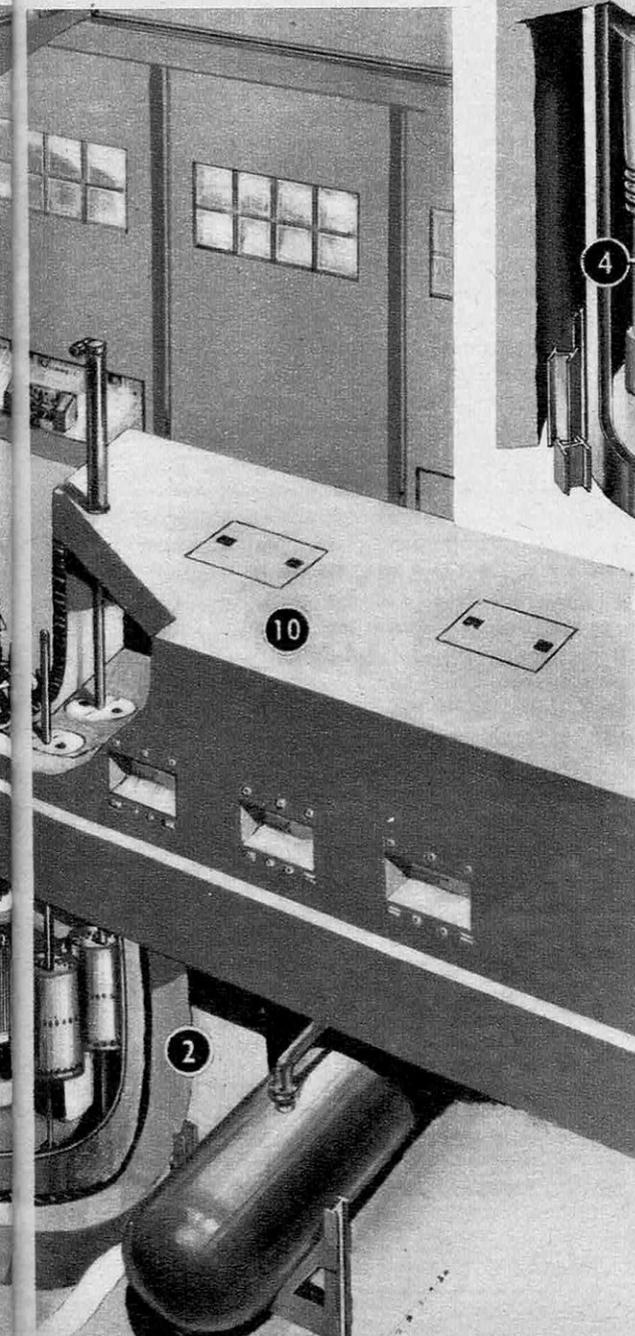
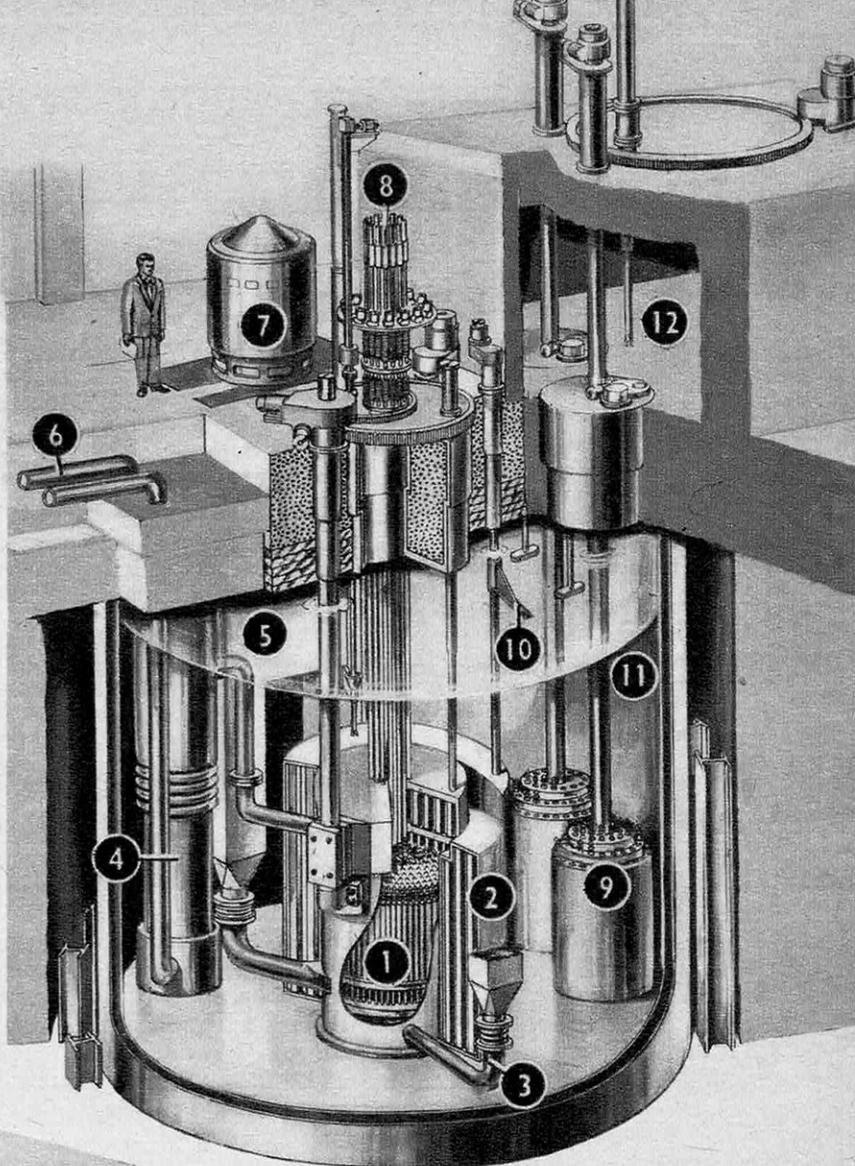
**C**E réacteur (E B R-II) est un des cinq prototypes industriels de puissance choisis par l'Atomic Energy Commission. Il doit être terminé en 1958 et développer plus de 60 000 kW chaleur et 20 000 kW électriques. Il utilisera comme combustible un alliage d'uranium et de plutonium, ne possédera pas de modérateur et sera refroidi par du sodium. On retrouve sur le dessin ci-dessous les principaux éléments de l'installation qui comprend quatre parties : le circuit primaire de refroidissement où le sodium circule du réacteur à un premier échangeur de température ; le circuit secondaire où du sodium circule

du premier échangeur à un deuxième ; l'équipement de production de vapeur et son utilisation dans une turbine ; les cellules de traitement du combustible et de conditionnement des barres. Tout le système primaire est contenu dans une même enceinte, enfermant le réacteur lui-même, le premier circuit de sodium avec l'échangeur (voir croquis page suivante) et l'appareillage de manutention et de stockage des barreaux de combustible. Le dessin de droite montre l'intérieur de cette enceinte, en particulier le réacteur cylindrique entouré de toutes parts par une chemise d'uranium naturel qui joue un double

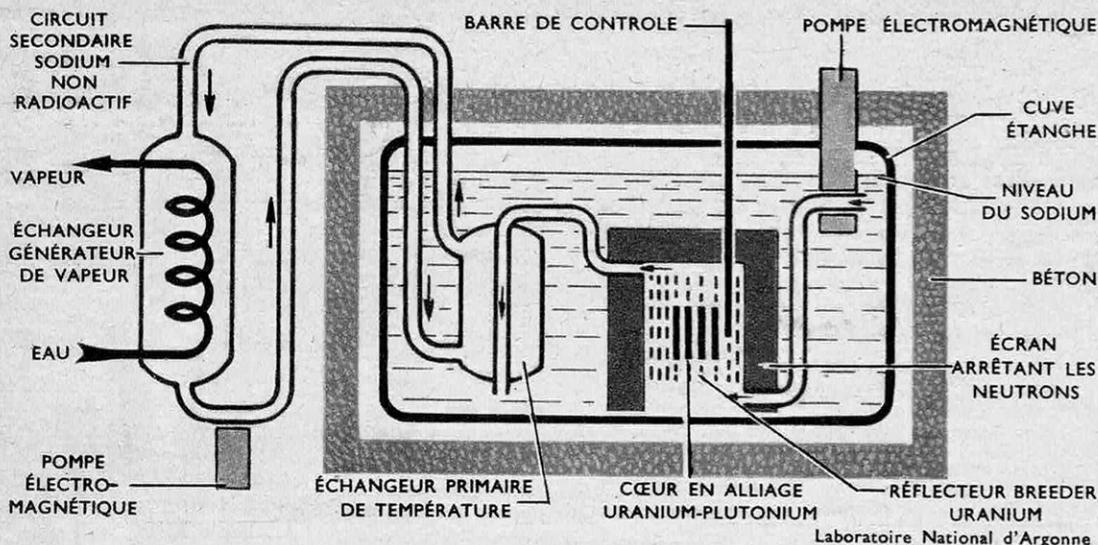


1. Réacteur et système primaire de refroidissement au sodium. 2. Ecran de protection. 3. Générateur pour pompe électromagnétique à sodium. 4. Pompe électromagnétique du circuit secondaire. 5. Générateur de vapeur. 6. Turbine. 7. Condenseur. 8. Alternateur. 9. Dispositif de chargement et déchargement des barreaux de combustible. 10. Cellules de traitement et de conditionnement du combustible et du réflecteur.

1. Cœur du réacteur (combustible et réflecteur-breeder).
2. Ecran arrêtant les neutrons.
3. Pompe de refroidissement du réflecteur-breeder.
4. Echangeur primaire de température.
5. Pompe électromagnétique de circulation.
6. Vers le générateur de vapeur.
7. Générateur à courant continu pour les pompes électromagnétiques à sodium.
8. Commande des barres de réglage.
9. Stockage des barreaux de combustible.
10. Bras de transfert des barreaux pour le chargement.
11. Niveau du sodium.
12. Vers les cellules de traitement du combustible.



rôle : réfléchir les neutrons et engendrer du plutonium (breeding). Le sodium traverse de bas en haut le réacteur et sa chemise, puis arrive alors au premier échangeur. Le chargement et le déchargement des éléments de combustible s'effectuent à l'aide de bras mobiles, commandés à distance, qui, des récipients où ils sont stockés, transfèrent ces éléments au réacteur et inversement ; tout l'appareillage est immergé dans le sodium. Le circuit secondaire, du premier échangeur au générateur de vapeur, n'est pas radioactif et isole ainsi le générateur de vapeur du sodium primaire rendu radioactif par les neutrons du réacteur. La vapeur est produite à  $455^{\circ}$  sous  $90 \text{ kg/cm}^2$ . Enfin, l'équipement de la centrale comprend une installation complète de « recyclage » du combustible et de fabrication des barres. Il est en effet important, pour le prix de revient, de ne pas immobiliser le combustible coûteux irradié pendant la longue période de « refroidissement » nécessaire pour réduire la radioactivité des produits de fission. On opérera par voie « pyrochimique » sur le métal fondu et non dissous, ce qui élimine 90 % des impuretés. Les opérations doivent être commandées à distance.



Laboratoire National d'Argonne

Le réacteur EBR-II des pages précédentes est ici représenté schématiquement. Tous les organes de la cuve étanche sont noyés dans le sodium fondu dont la circulation est assurée par des pompes électromagnétiques. Le circuit primaire de refroidissement

à travers le cœur du réacteur est ouvert. Le sodium étant rendu radioactif par les neutrons, il ne passe pas directement au générateur de vapeur, mais cède sa chaleur à un circuit secondaire de sodium protégé contre les neutrons par un écran approprié.

#### SUITE DE LA PAGE 26

nées lorsque les problèmes spéciaux qu'ils posent auront été résolus. Ils peuvent, dans un circuit secondaire, engendrer de la vapeur à très haute température, et par conséquent le rendement thermique de l'ensemble serait très favorable. Ils sont susceptibles de développer des puissances élevées. Ils exigent des précautions spéciales pour éviter toute fuite dans les circuits de sodium qui réagit violemment avec l'eau, et des pompes électromagnétiques pour assurer la circulation du sodium fondu. Les problèmes de corrosion sont parmi les plus ardues à résoudre.

### Les réacteurs de l'avenir

Utilisant encore le sodium fondu, le « breeder » à neutrons rapides en est encore au stade expérimental aux Etats-Unis et en Grande-Bretagne (Dounreay). Le cœur du réacteur, de très faibles dimensions, est à haute température et refroidi par le sodium. Il est fait d'uranium très enrichi et est entouré d'une enveloppe « fertile », constituée par de l'uranium naturel (car ici l'isotope intéressant est l'uranium-238) ou du thorium, où les neutrons engendrent du plutonium ou de l'uranium-235. On espère produire ainsi plus de combustible qu'il n'en est consommé pendant le fonctionnement.

Le réacteur homogène se trouve aussi au stade expérimental. Le combustible (uranium très enrichi) se trouve à l'état de sulfate ou de nitrate d'uranyle, en solution dans de l'eau

lourde servant de modérateur. La réaction en chaîne s'établit dans un cœur sphérique entouré d'eau lourde servant de réflecteur et parcouru continuellement par la solution. Celle-ci engendre de la vapeur dans un échangeur de température, un second échangeur étant prévu pour l'eau lourde du réflecteur. Le système présente deux avantages principaux. Il est « autorégulateur » et son fonctionnement est très stable ; pour le réglage, on n'utilise plus de barres absorbantes, mais on fait varier la concentration de la solution active dans le cœur. D'autre part, on peut assurer en continu l'épuration du combustible pour le débarrasser des produits de fission. En contrepartie, la circulation à l'extérieur du réacteur d'un fluide extrêmement radioactif, corrosif et sous haute pression entraîne des servitudes. L'étanchéité de tous les circuits doit être absolue.

Enfin, nous mentionnerons le réacteur actuellement en construction aux Etats-Unis et qui doit utiliser comme modérateur et agent de refroidissement une substance organique, le diphényle. Les avantages prévus sont la faible corrosion des éléments de combustible, la faible radioactivité induite dans la substance par les rayonnements et, étant donné le point d'ébullition élevé du diphényle, la possibilité d'atteindre de hautes températures sous une pression modérée, d'où un rendement thermique élevé de la centrale éventuelle, sans les complications qu'entraîne l'usage d'un métal fondu.

# LES MATÉRIAUX DU GÉNIE ATOMIQUE

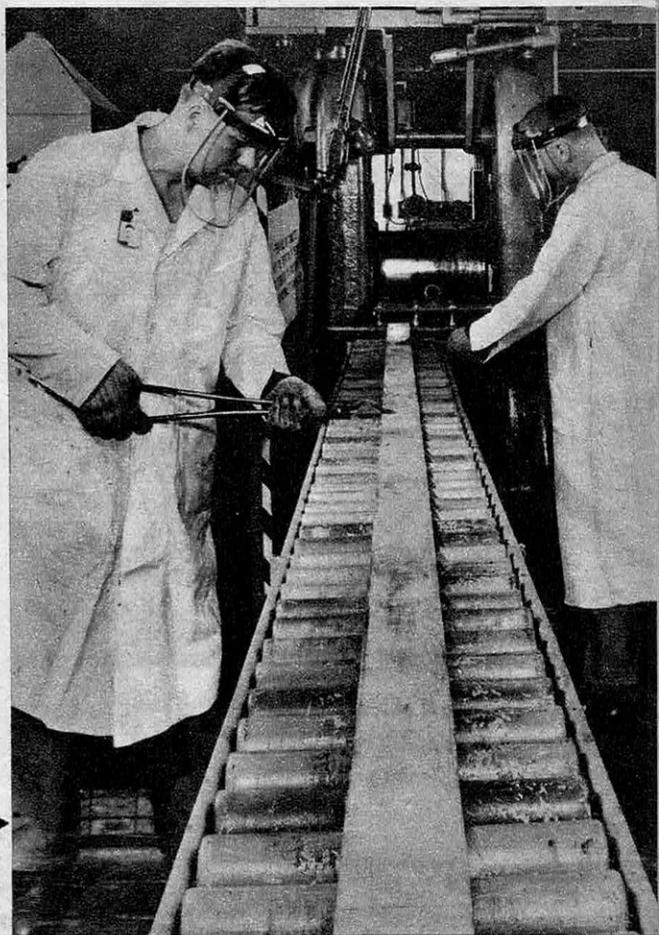
LA Conférence de Genève a marqué une étape importante dans le domaine de la collaboration internationale sur le plan atomique et, dans de nombreux secteurs, le rideau du secret fut largement levé. Les 1 100 communications qui y furent présentées permirent d'avoir des précisions sur la plupart des matériaux indispensables à la production d'énergie nucléaire, alors que jusque-là on devait s'en tenir à des suppositions plus ou moins étayées par des connaissances générales, la plupart du temps fort incomplètes.

Ces matériaux sont assez divers. Trois caractères différencient les principaux d'entre eux des matériaux industriels classiques : leur nouveauté, parfois leur toxicité et, surtout, le degré de pureté extrême qu'ils requièrent. Suivant leur rôle on peut distinguer :

- *Les combustibles nucléaires* : uranium naturel purifié, sous forme métallique, éventuellement allié avec d'autres métaux, tels que l'aluminium, le magnésium, le zirconium, etc., ou sous forme d'oxyde ; uranium plus ou moins enrichi en uranium-235 ; uranium-233 ; plutonium ;
- *Les matériaux « fertiles »* pour les réacteurs surgénérateurs ou « breeders » : uranium-238 livrant le plutonium, et thorium livrant l'uranium-233 ;
- *Les matériaux de gainage* des éléments de combustible ; aluminium, magnésium, zirconium, acier inoxydable, alliages divers ;
- *Les modérateurs de neutrons* : eau, eau lourde, graphite, beryllium, oxyde de beryllium (glucine), éventuellement lithium ;
- *Les éléments de contrôle* : bore, cadmium, hafnium, employés en barres et générale-

ment allié (ou mélangés) à de l'acier inoxydable ou à de l'aluminium ;

- *Les agents de refroidissement* : eau, eau lourde, air, gaz carbonique, hélium, métaux ou mélange de métaux fondus (bismuth, plomb, sodium ou eutectique sodium-potassium) ;
- *Les réflecteurs* : graphite, beryllium ;
- *Les matériaux de protection* contre les ra-

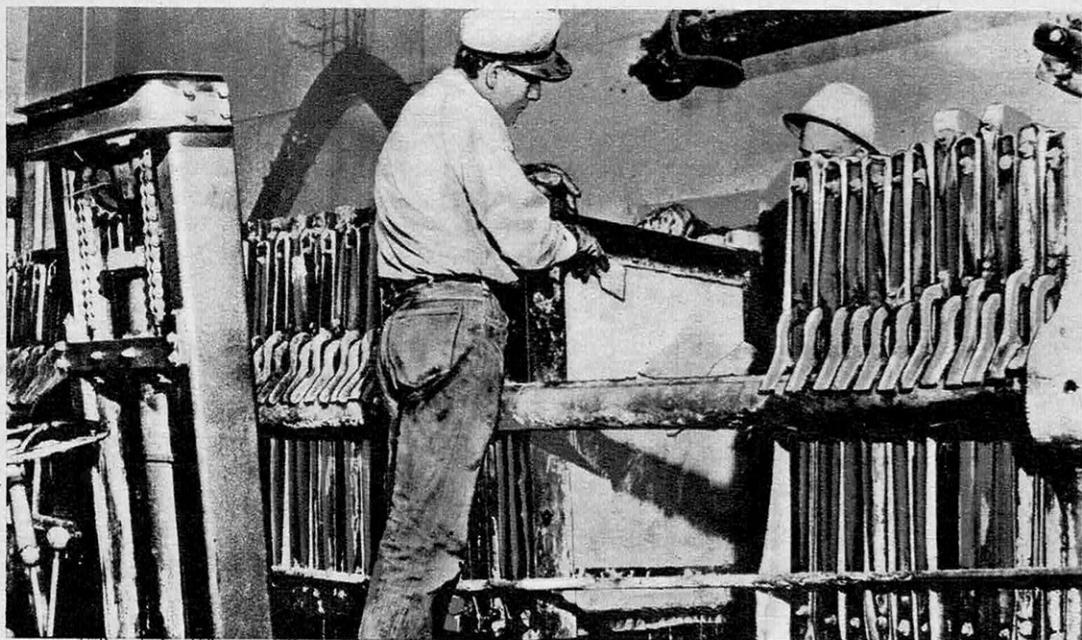


Le laminage de l'uranium dans les ateliers de la « Sylvania Electric Products Inc. ». La bande sera découpée à la demande puis enrobée d'une gaine protectrice en aluminium ou autre métal, l'ensemble formant alors ce que l'on appelle une « cartouche ».

# Enrichissement des minerais d'uranium

**L**es minerais d'uranium ont en général une teneur si faible qu'il est préférable de leur faire subir une concentration sur place avant de les expédier à l'usine qui élabore l'uranium métal. Différents procédés sont employés suivant que l'on traite des minerais riches ou pauvres et, dans ce dernier cas, le plus général, suivant que l'on opère en milieu acide ou alcalin. Le procédé américain dont on donne le schéma ci-contre fait appel à des résines anio-

niques qui fixent l'uranium contenu dans les solutions que l'on fait passer sur elles. Le grand intérêt de cette méthode, relativement récente, consiste dans le fait que les résines peuvent servir indéfiniment et qu'il est facile de récupérer l'uranium qu'elles ont fixé. Une usine de ce type est en construction en Vendée. Ci-dessous, des manœuvres détachent le « gâteau jaune » d'oxyde d'uranium des filtres-presses avant qu'il soit envoyé au séchage.



diations : terre, eau, béton, plomb, fer, bore, etc.

Pour être complet, il faudrait ajouter à ces matériaux de base ceux qui sont indispensables à leur fabrication, par exemple, le calcium de pureté nucléaire qu'exige la métallurgie de l'uranium. Nous limiterons notre exposé aux matériaux essentiels.

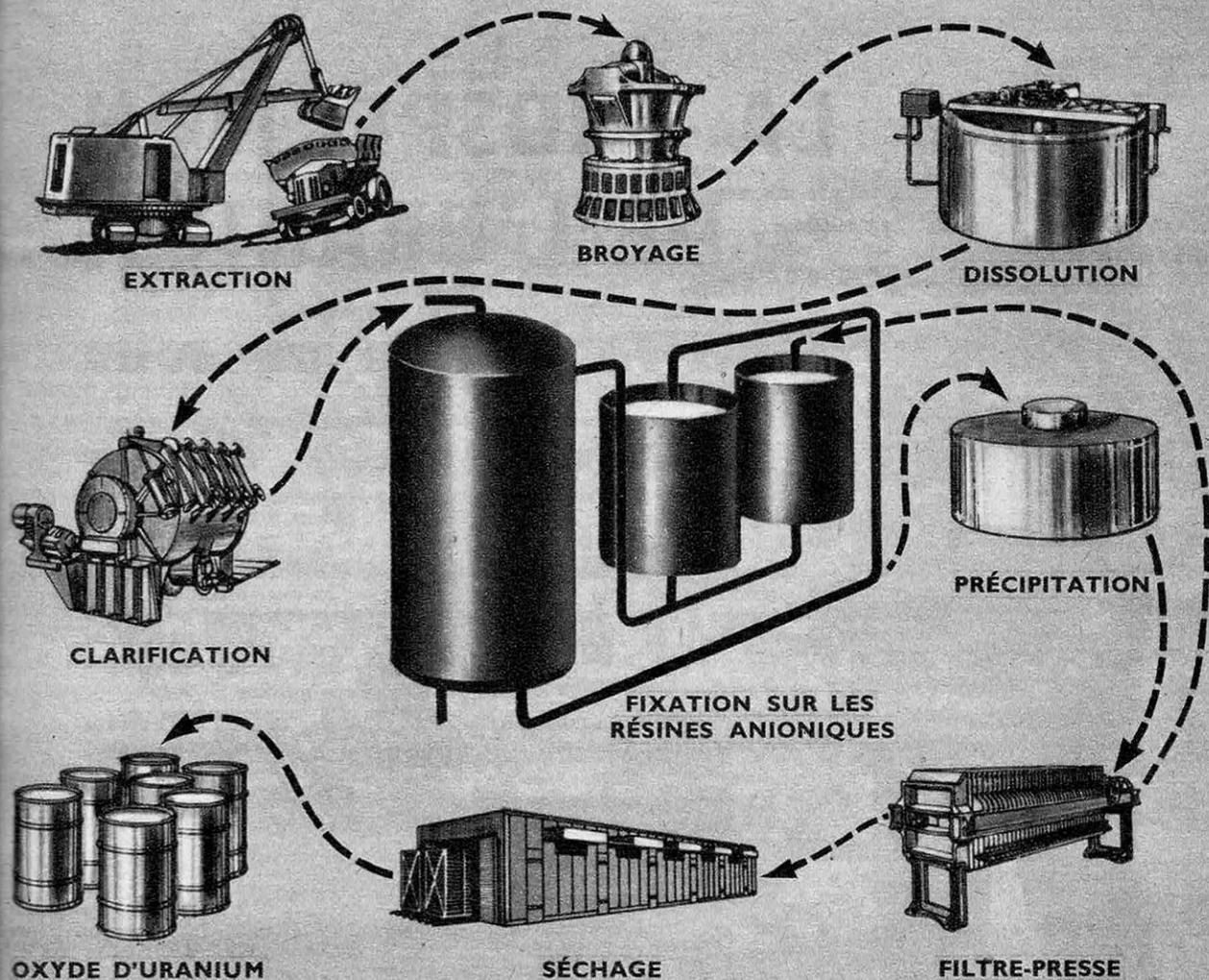
## Le traitement des minerais d'uranium

L'uranium est un métal qui, dans la croûte terrestre, n'est pas plus rare que le cuivre. On pouvait donc croire que son abondance relative (il forme 0,0003 % de la croûte terrestre) permettrait de l'extraire au même prix que ce dernier. Malheureusement, à part quelques minerais particulièrement riches, qui atteignent une teneur en uranium supérieure à 1 %, les autres, et les plus répandus, sont à

faible teneur, jusqu'à quelques kilogrammes, voire quelques grammes à la tonne. Leur exploitation a donc posé avant tout un problème économique. Il s'agissait de n'utiliser que des réactifs peu coûteux comme l'acide sulfurique ou le carbonate de sodium, ou bien des produits plus chers, mais presque inaltérables et, par suite, récupérables.

Les minerais riches, une fois broyés, sont attaqués par une solution d'acide sulfurique ou nitrique. On filtre, on décante, et la séparation des impuretés s'effectue par carbonatation. L'uranium est solubilisé sous forme d'uranyl-carbonate de sodium. Après élimination des impuretés par filtration, la solution est traitée par la soude caustique. L'uranium se sépare et précipite à l'état d'uranate de sodium qui, après nouvelle filtration et séchage, contient environ 60 % d'uranium.

A partir des minerais pauvres, l'attaque en milieu acide se fait exclusivement avec l'aci-



de sulfurique, le minerai broyé étant traité, soit à froid, soit à chaud, avec une quantité d'acide limitée au strict minimum pour éviter la mise en solution de trop grandes quantités d'impuretés.

Les attaques en milieu alcalin ne concernent que les minerais contenant des carbonates ou des impuretés très solubles dans les acides. Les réactifs utilisés sont le carbonate et le bicarbonate de sodium, qui solubilisent l'uranium sous la forme d'uranyl-carbonate de sodium. Lorsque le minerai est du type autunite, les attaques se font par des solutions mixtes carbonate-bicarbonate, à des températures variables. Avec le minerai du type pechblende, il est nécessaire de transformer l'uranium tétravalent insoluble en uranium hexavalent soluble, ceci à des températures plus élevées que précédemment et en présence d'oxygène sous pression. L'uranium étant en solution, il s'agit maintenant de le séparer

des autres substances dissoutes avec lui.

Trois procédés sont employés pour la séparation de l'uranium en milieu acide. Le premier fait appel à l'insolubilisation des sels d'uranium tétravalents, tels que les fluorures et les phosphates, en milieu acide dilué. Une usine, basée sur ce procédé, a été construite à Gueugnon (Saône-et-Loire), par la Société Potasse et Engrais chimiques. Le second procédé utilise des résines du type anionique, qui fixent 50 à 60 grammes d'uranium par litre. Cette opération s'effectue en faisant passer les solutions contenant l'uranium dans des colonnes contenant la résine. L'uranium est ensuite récupéré par une solution de chlorure de sodium et d'acide chlorhydrique. Le chlore se fixe sur la résine et l'uranium est libéré. La solution est ensuite traitée à l'ammoniaque et l'uranium est précipité à l'état d'urate.

Le grand intérêt d'un tel procédé, réside

# LA PROSPECTION DE L'URANIUM

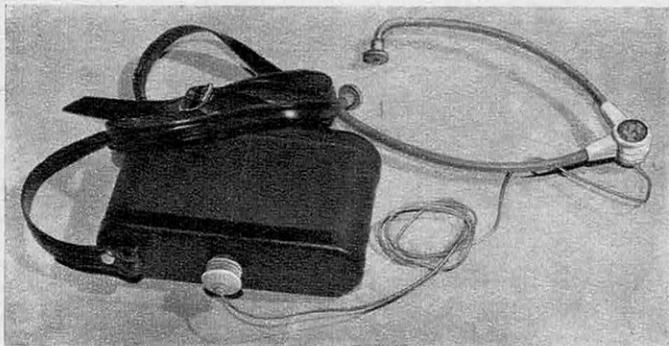
*à la portée de tous*

Avec le détecteur D.R.A. I  
à compteur Geiger-Muller

*Détection auditive*

SOCIÉTÉ D'APPLICATIONS INDUS-  
TRIELLES DE LA PHYSIQUE

Alimentation par une seule pile  
de 1,5 volt = autonomie 1.000 heures



Le plus robuste - Le plus léger (400 gr)  
Format 8 cm × 14 cm - Le meilleur marché

**20.500 Fr.** franco (t. t. c.)

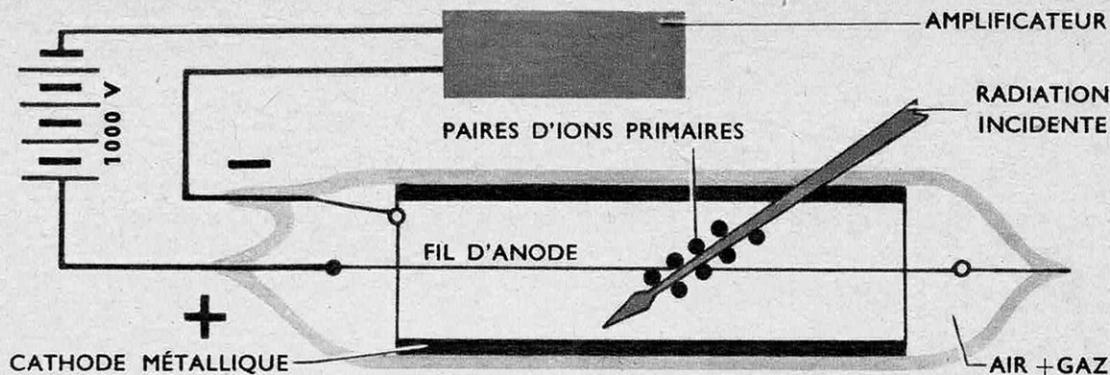
*En vente à la*

## LIBRAIRIE SCIENCE ET VIE

SERVICE C. G.

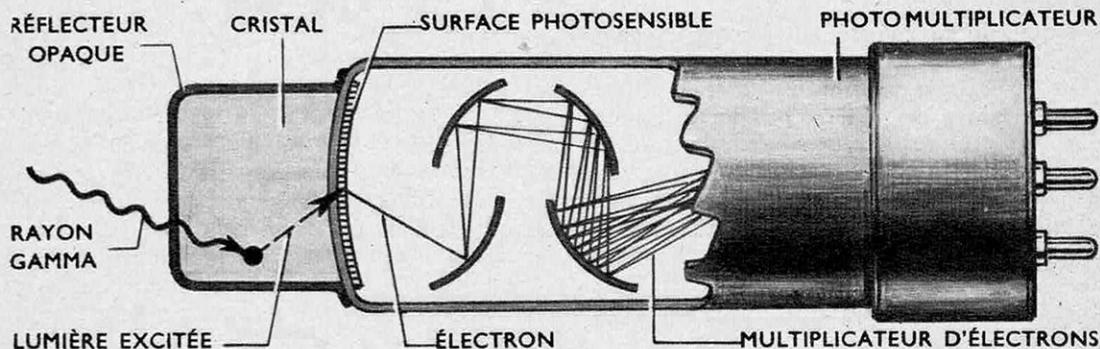
24, rue Chauchat, PARIS-9°. Tél : TAITbout 72-86. C.C.P. Paris 4192-26

Prospectus détaillé expédié sur simple demande



↑  
**Le compteur de Geiger-Muller** est le plus connu des détecteurs de rayonnements. Il en existe plusieurs variétés, mais leur principe de fonctionnement est identique : le rayonnement traverse un gaz enfermé dans une enceinte où règne un fort champ électrique et arrache des électrons aux molécules de ce gaz. Les électrons accélérés par le champ électrique provoquent d'autres arrachements d'électrons aux molécules de gaz, et il se forme de proche en proche une véritable avalanche d'électrons qui se précipitent sur l'électrode positive. Le phénomène dure une fraction de millième de seconde, mais le courant de décharge est suffisant pour être amplifié et enregistré.

↓  
**Les compteurs à scintillations** plus sensibles, surtout aux rayons gamma, prennent de plus en plus la place des compteurs de Geiger-Muller. Lorsqu'un rayon gamma traverse certaines substances transparentes, comme par exemple un cristal d'iodure de sodium, il provoque, dans les couches électroniques des atomes, des perturbations qui se traduisent par des éclairs de fluorescence. Le cristal, protégé de la lumière directe par une paroi opaque, est au contact d'un photomultiplicateur qui transforme ces éclairs lumineux en décharges électriques. On peut même déterminer l'énergie des rayons gamma car l'intensité des éclairs dépend de cette énergie.



SUITE DE LA PAGE 33

dans le fait que les réactifs sont peu coûteux, la résine ne devant pas être considérée comme un réactif mais comme un investissement, puisqu'elle ne s'use pas. Les Etablissements Kuhlmann se sont vu confier l'étude et la mise au point du procédé, ainsi que la construction d'une usine en Vendée.

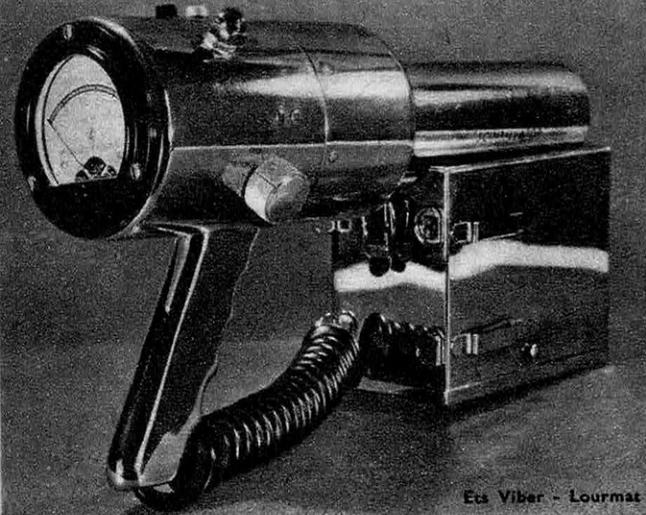
Le troisième procédé a recours à des solvants du type pyro-phosphate acide d'octyle (résultant de l'action de l'anhydride phosphorique sur l'octanol), additionnés de diluants, tels que le kérosène, dans la proportion de deux parties de solvant pour 100 de diluant. La solution préalablement réduite est traitée dans des colonnes où le solvant circule à contre courant. Le solvant, riche en uranium tétravalent, est traité par l'acide fluorhydrique qui précipite l'uranium à l'état de fluorure uraneux insoluble.

Trois méthodes sont aussi utilisées pour séparer l'uranium des solutions d'attaques carbonatées. Ce sont : la précipitation à l'état d'uranate de sodium ; la précipitation obtenue par action de l'hydrogène (réduction) à 70° en présence d'un catalyseur ; enfin la fixation de l'uranium sur résines anioniques.

Tous ces procédés permettent d'extraire l'uranium de minerais dont la teneur peut descendre jusqu'à 250 grammes à la tonne, et même 100 grammes lorsqu'il s'agit du traitement des phosphates au cours de la fabrication des engrais.

### Préparation de l'uranium métal pur

Le combustible nucléaire le plus directement accessible pour la construction des réacteurs est l'uranium naturel où l'isotope fissile,



**Compteur à scintillations, modèle portable, posé sur le boîtier contenant les organes d'alimentation.**

uranium-235, est présent dans la proportion de 7 pour mille. C'est lui qu'emploient, comme point de départ de leur programme de réacteurs, les pays de l'Europe occidentale. Seule condition importante, cet uranium ne doit pas contenir d'éléments susceptibles d'absorber les neutrons, ce qui exige un degré de pureté spécial dit « pureté nucléaire ».

On vient de voir les différentes méthodes employées dans le traitement des minerais. Elles aboutissent presque toutes à la production d'urate de sodium, produit très stable que l'on peut facilement stocker, transporter, et qui permet d'obtenir des solutions très concentrées en uranium, prêtes à l'extraction par simple dissolution dans l'acide nitrique. De toutes façons, que l'on aboutisse à l'urate de sodium, au fluorure uraneux ou au phosphate uraneux, on les transforme en oxyde d'uranium avant d'entamer l'ultime phase de la fabrication du métal pur.

Dans des fours à plateaux ou tournants, on réduit l'oxyde en bioxyde, que l'on transforme en tétrafluorure. Enfin, dans une dernière opération, on fait agir le calcium ou le magnésium pour réduire le tétrafluorure ainsi obtenu en uranium.

### **Les minerais d'uranium**

« Le goût pour l'aventure demeure sans doute l'une des qualités essentielles du prospecteur, mais il est inutile de se bercer d'illusions : la prospection est une œuvre scientifique et technique qui ne peut être exécutée au hasard, par n'importe qui, et sans un minimum de connaissances. » Tel est l'avertissement du professeur M. Roubault, président du Comité des Mines au Commissariat à l'Énergie Atomique. Ceci est particulièrement vrai dans le cas des minerais d'uranium qui ne se distinguent guère à première vue des

formes les plus vulgaires des roches ou des minerais communs.

La radioactivité des minerais d'uranium, qui permet de les détecter à l'aide du compteur de Geiger-Müller ou du compteur à scintillations, est un sérieux atout pour les prospecteurs, mais la distance à laquelle ils peuvent ainsi être détectés, ne dépasse pas quelques mètres. Pour ne pas disperser ses efforts sur des terrains peu favorables, le chercheur doit donc savoir quelles sont les roches qui ont le plus de chances de contenir de l'uranium. Entre les trois grands groupes de roches sédimentaires, éruptives, métamorphiques, ce sont les secondes, avec le granit, et les troisièmes, encore appelées cristallophylliennes, qui se sont révélées les plus favorables. En France, elles correspondent au Massif armoricain, aux Vosges, au Massif central, à la région des Maures et de l'Estérel, à la Corse et aux parties centrales des Alpes et des Pyrénées.

Un autre caractère des minerais d'uranium est la très grande variété des minerais dits d'altération, ou minerais secondaires. Ils proviennent généralement de l'oxydation d'un minerai plus profond, dit minerai primaire et peuvent se trouver très loin de ce dernier. Ils présentent de vives couleurs caractéristiques : jaune, orange et quelquefois vert. En définitive, malgré l'aide des compteurs, il est capital pour le prospecteur de savoir reconnaître les principaux minerais d'uranium.

Parmi les minerais primaires, nous avons : la pechblende, oxyde d'uranium dont l'aspect rappelle celui de la poix, et dont la variété cristallisée constitue l'uraninite ; la thorianite, oxyde de thorium qui peut contenir plusieurs parties pour cent d'uranium ; la tucholite, composé organo-métallique riche en uranium et qui rappelle la pechblende ; enfin les oxydes complexes d'uranium, de niobium, de tantale, de cérium et d'autres éléments de terres rares.

Les minerais secondaires comprennent : l'autunite ou uranite (qu'il ne faut pas confondre avec l'uraninite), phosphate d'uranium et de calcium ; la chalcocite ou torbernite, phosphate d'uranium et de cuivre ; les produits jaunes qui accompagnent les minerais primaires et qui sont des phosphates, silicates, sulfates ou vanadates complexes dans lesquels l'uranium se trouve associé à du plomb, du calcium, du baryum, etc.

Les principaux gisements sont ceux du Grand Lac de l'Ours, du lac Athabaska et de Blind River au Canada, de Shinkolobwe au Congo Belge, du Witwatersrand en Afrique du Sud (où l'uranium est devenu un sous-produit des mines d'or), de Rum Jungle en Australie, du plateau du Colorado aux

Etats-Unis, de l'Uzbekistan et du Kazakhstan en U.R.S.S.

Les compteurs de Geiger qui servent à la prospection sont basés sur la propriété qu'ont les rayonnements radioactifs d'ioniser les gaz. Entre les électrodes du tube rempli d'air et d'un gaz convenable (chlore, brome, etc.), il en résulte le passage de courants momentanés qui se traduisent pratiquement par une série de décharges (ou chocs) que l'on entend dans des écouteurs, ou par la déviation d'une aiguille sur un cadran.

### Méthodes de prospection

Avec de tels appareils, les premières mesures ou observations doivent se faire sur des affleurements rocheux, mais il ne faut pas négliger, en cas d'indice, d'examiner la zone avoisinante, même recouverte de terre végétale. Dans le stade qui précède les premiers travaux de fouille, les mesures s'effectuent tous les 5 mètres, ou moins, aux sommets d'un quadrilatère régulier. On obtient de la sorte ce que l'on appelle un « plan compteur » qui permet de tracer les lignes d'égale activité et par suite de localiser avec plus de précision les zones intéressantes.

Dans des prospections à très grande échelle, et surtout dans les terrains difficilement accessibles, on a recours au compteur à scintillations qui est basé sur la propriété qu'ont certaines substances solides ou liquides d'émettre une brève lueur chaque fois qu'un rayonnement les frappe. Un photomultiplicateur transforme ces éclairs en décharges électriques. Cet appareil qu'un avion peut promener au bout d'un câble au-dessus des zones à étudier donne de précieux résultats. Le C.E.A. l'a largement employé outre-mer.

La radioactivité des minéraux uranifères est encore utilisée pour impressionner des plaques photographiques, mais cette propriété ne sert généralement qu'aux études de détail. D'autres tests font appel à la fluorescence et aux essais chimiques.

Lorsque la minéralisation d'un échantillon actif n'est pas visible, on peut contrôler, sans avoir recours aux laboratoires spécialisés, si cette radioactivité est bien due à l'uranium. Ce test est basé sur la propriété des sels d'uranium fondus dans le fluorure de sodium d'émettre une lumière jaune quand ils sont exposés à la lumière ultraviolette.

### L'uranium-235

L'uranium naturel, dont nous venons de voir la prospection et la métallurgie, est constitué de 99,3 % d'uranium-238, 0,7 % d'uranium-235 et d'uranium-234, dont la proportion est si faible, 0,006 %, qu'elle est négligeable.

La difficulté de séparation des deux isotopes 235 et 238, dont le premier seulement subit facilement la fission, ne tient pas à la faible teneur en isotope 235.

Le problème qui se pose est un problème de séparation physique qui intervient dans l'industrie nucléaire, non seulement pour l'uranium-235, mais aussi pour le deutérium avec lequel on fabrique l'eau lourde. Les méthodes employées font en général intervenir les faibles différences de masses.

A Oak-Ridge, aux Etats-Unis, on utilise la diffusion gazeuse de l'hexafluorure d'uranium à travers des parois poreuses, les molécules légères traversant plus vite ces barrières que les molécules lourdes. C'est aussi à Oak-Ridge qu'a été utilisée la séparation électromagnétique dans laquelle le composé gazeux est ionisé, puis soumis à une déviation magnétique. Les ions légers parcourent des cercles dont les rayons sont inférieurs à ceux parcourus par les ions lourds ; des collecteurs spéciaux les recueillent séparément.

### Le plutonium

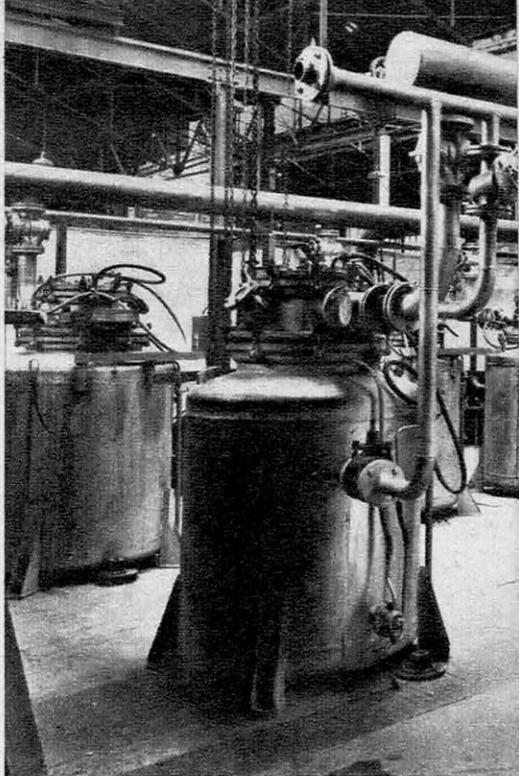
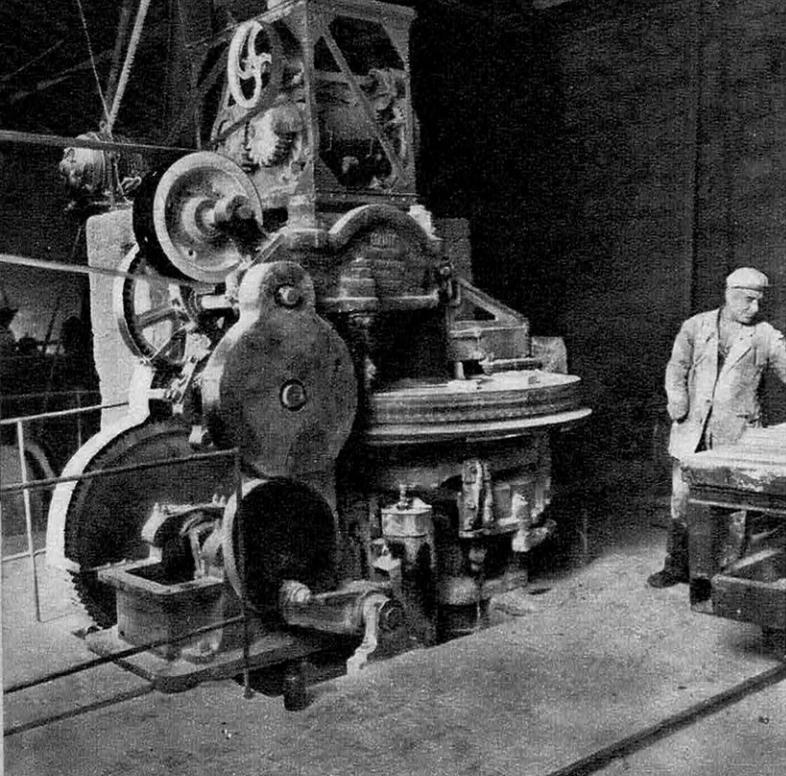
Le plutonium se forme dans les barres d'uranium naturel des réacteurs, aux dépens de l'uranium-238 sous l'action des neutrons. La présence de produits de fission d'une radioactivité intense dans la masse d'uranium ne facilite ni le transport de ces barres, ni leur traitement ultérieur. De très grandes précautions devront être prises aussi par suite de la toxicité du plutonium lui-même ; la dose mortelle pour l'organisme est de 7 millièmes de milligramme. En fait, les opérations doivent être commandées à distance et on apportera un soin particulier à la suppression des poussières.

Le problème chimique est lui-même difficile, par suite de la grande dilution du plutonium dans l'uranium (une pile de 50 000 kW n'en fournit que 15 kg par 100 tonnes d'uranium et par an) et du taux de décontamination à attendre vis-à-vis des produits de fission (dix millièmes des teneurs initiales).

Les procédés en usage sont très divers et secrets. La Conférence de Genève a permis cependant de lever un coin du voile.

La méthode chimique utilisée en France repose sur la solubilité des nitrates de métaux lourds (uranium, plutonium) dans les solvants organiques. Après élimination chimique ou mécanique des gaines, on attaque les barreaux par l'acide nitrique, puis on entraîne l'uranium et le plutonium par un solvant. Le plutonium est extrait en lui donnant une forme chimique telle (valence 3) qu'il est insoluble dans les solvants oxygénés, tandis que l'uranium est extrait à l'eau.

Après ce premier cycle d'opération, l'ura-



## LE CALCIUM DE PURETÉ NUCLÉAIRE

*Utilisé dans l'élaboration de l'uranium au cours de la phase finale de réduction du tétrafluorure d'uranium, ce corps doit présenter, comme la plupart des matériaux du génie atomique, une pureté spéciale.*

niem et le plutonium contiennent encore trop d'impuretés radioactives pour que leur manipulation ne nécessite aucune précaution. Les nouveaux traitements chimiques se faisant alors avec des produits très concentrés, on ne peut pas agir sur plus de 100 à 200 g à la fois. Les opérations se font dans des « boîtes à gants » maintenues en dépression.

Le plutonium est finalement transformé en métal ou en alliage mais, comme il capte très facilement les neutrons lents, les éléments qui serviront de combustible doivent être préparés sous forme de feuilles minces, la presque totalité de la réaction se produisant en surface. Ceci n'est d'ailleurs pas un inconvénient, car c'est aussi par la surface que s'évacue la chaleur. Plus gênante est la basse température de fusion du plutonium, 640°, ce qui interdit de l'employer dans les réacteurs à neutrons rapides, à moins que l'on n'admette que le combustible soit à l'état fondu. Un réacteur expérimental de ce type (LAMPRE) est précisément à l'étude au laboratoire de Los Alamos.

### Le thorium et l'uranium-233

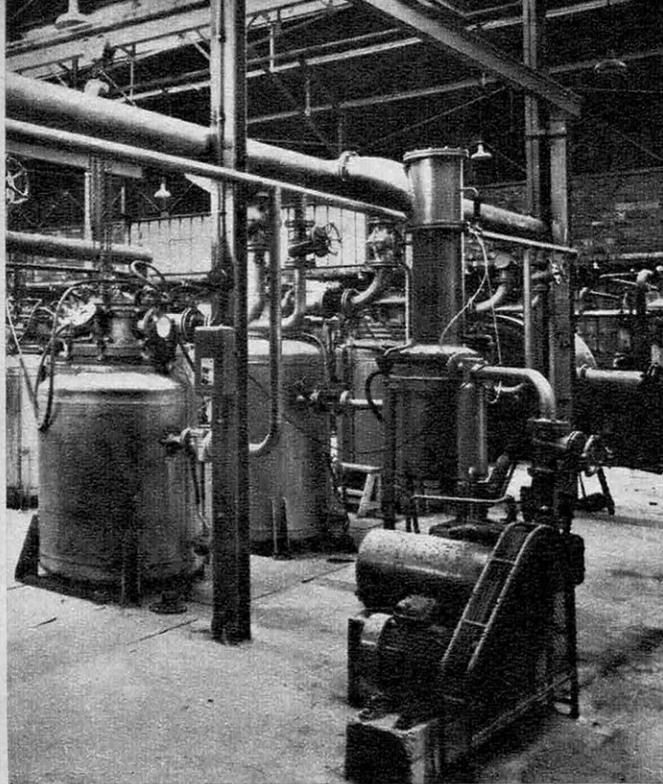
Le thorium existe en quantité importante dans la nature. Il est quatre fois plus abondant que l'uranium. Ses principaux minerais sont la thorianite (silicate de thorium et d'ura-

niem), la thorianite (oxydes de thorium et d'uranium), et la monazite (phosphate de terres rares et de thorium). Le thorium naturel ne comprend pratiquement qu'un isotope, le thorium-232 qui, bombardé par un neutron, donne du thorium-233 radioactif. Ce dernier, par émission d'un rayonnement bêta se transforme en protactinium-233, lui-même radioactif, et qui, par une nouvelle émission bêta donne de l'uranium-233 fissile. Toutes ces transformations sont effectuées à l'échelle industrielle dans les « breeders » au thorium.

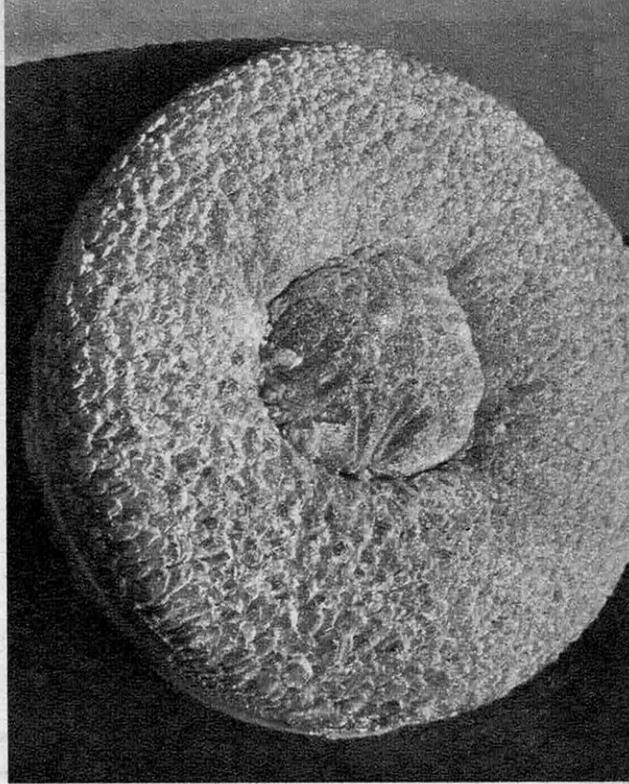
Après une période d'attente de quatre à six mois, pour que la presque totalité du protactinium ait le temps de se désintégrer, l'uranium-233 est extrait par des solvants organiques. Toutes les opérations doivent être conduites à distance, du fait de la radioactivité qui est cependant moindre que celle de l'uranium après irradiation.

### Le graphite

Le graphite est la substance le plus souvent utilisée pour constituer le modérateur des réacteurs nucléaires, car il a une résistance mécanique suffisante à haute température, supporte bien les chocs thermiques et absorbe peu de neutrons. Par contre, il est assez facilement attaqué par les gaz oxydants et, dans



*Il est inutile en effet que sa pureté soit très poussée, il faut surtout qu'il ne contienne pas d'éléments avides de neutrons, bore, etc. Il a donc fallu mettre sur pied des installations nouvelles comme celles*



*ci-dessus de la Société Electrometallurgique du Planet. Le calcium mis en pains (à gauche) subit deux distillations sous vide très poussé (au centre) avant la phase finale de cristallisation (à droite).*

le cas du refroidissement du réacteur par le sodium, retient ce métal dans ses pores et compromet ainsi le bilan des neutrons. Il a l'avantage d'être relativement bon marché, même à l'état de pureté nucléaire.

Le graphite se prépare industriellement par le procédé Acheson. Un mélange de coke de pétrole et de brai est mis en forme et chauffé progressivement jusqu'à 800° : le brai transformé en carbone lie entre eux les grains de coke. Un dernier chauffage au four électrique entre 2400° et 2800° assure la graphitisation.

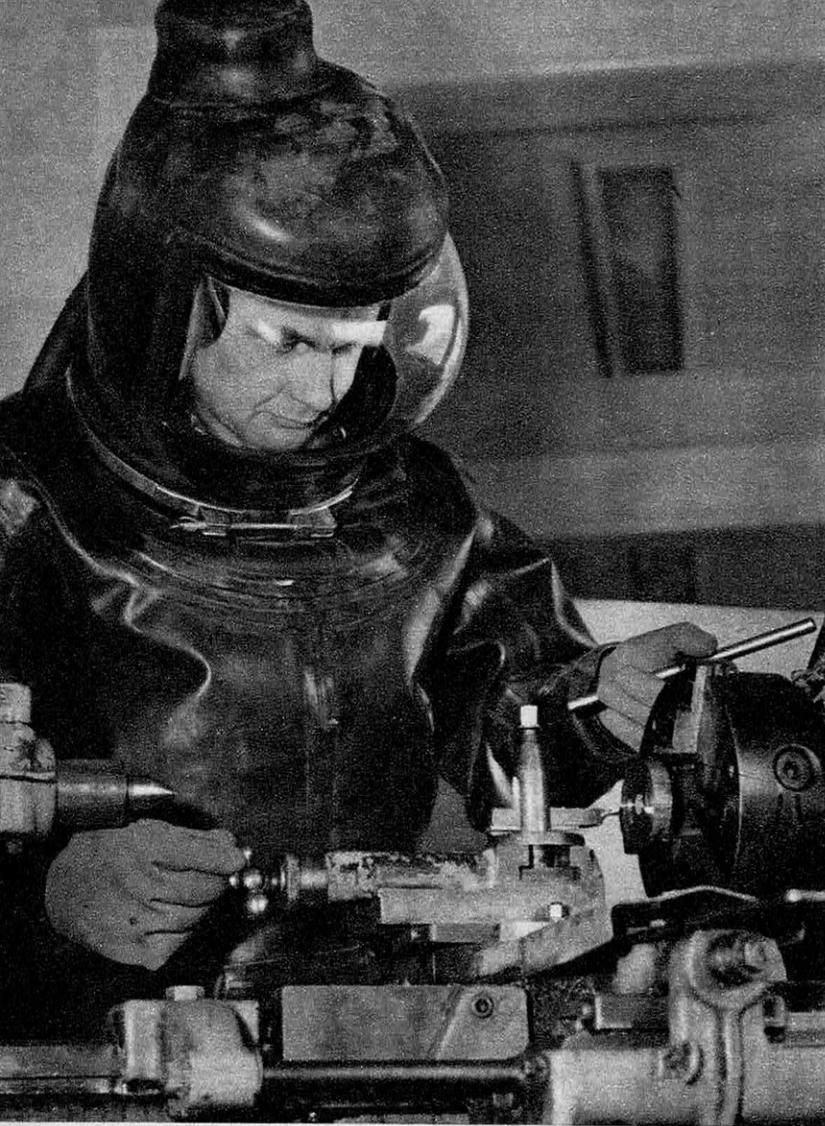
Le matériau obtenu doit posséder une forte densité ; d'autre part, le carbone doit être autant que possible exempt d'éléments avides de neutrons, bore, calcium, titane, vanadium, terres rares, etc. Ces impuretés s'éliminant mal par chauffage, il faut apporter un très grand soin au montage et à la conduite du four pour éviter de contaminer le carbone avec les constituants du revêtement calorifuge.

On peut, comme l'exposait une communication polonaise présentée à Genève, partir de matières premières très pures. Mais ce procédé semble difficile à mettre en œuvre sur le plan industriel, et on préfère procéder à la graphitisation en l'accompagnant ou la faisant suivre d'une purification chimique. Un

procédé américain consiste à baigner des barres chauffées électriquement à 2 500° dans un gaz purificateur contenant du chlore et du fluor ; il peut s'appliquer aux produits déjà graphités comme à ceux en cours de graphitisation. Un procédé français (Péchiney) combine graphitisation et épuration par un réactif halogène ; il permet d'obtenir une grande pureté à partir d'un coke quelconque, en particulier au point de vue de la teneur en bore.

### L'eau lourde

L'eau lourde étant beaucoup plus chère que le graphite, son emploi comme modérateur dans les réacteurs usuels est moins fréquent. Cependant elle permet d'économiser un poids considérable d'uranium naturel et de réaliser des réacteurs plus compacts. Elle absorbe beaucoup moins de neutrons que l'eau ordinaire. Ainsi, dans l'eau lourde, un neutron thermique, dont la vitesse est de l'ordre de 2 500 m/s subit près de 18 000 collisions avant d'être capturé ; il parcourt ainsi environ 365 mètres avant de donner avec le deutérium un atome de tritium (hydrogène de masse 3). Dans l'eau ordinaire, un tel neutron parcourt à peine 17 cm avant d'être



**Le plutonium** est d'une manipulation très délicate : il est très toxique par lui-même, les produits que l'on doit traiter au cours de son élaboration sont très radioactifs, et on ne peut le travailler que par petites quantités pour rester en dessous de la masse critique qui déclencherait une explosion atomique. A gauche, un ouvrier revêtu d'un scafandre autonome tourne une pastille de plutonium aux laboratoires d'Harwell, en Angleterre. Dans ces mêmes laboratoires, à droite, des techniciens percent et pèsent une pièce de plutonium dans une « boîte à gant » dont l'atmosphère est maintenue en dépression. Comme on le voit, dans ces deux cas on évite soigneusement les poussières car la dose mortelle pour l'organisme est de 0,007 mg.

capturé par l'hydrogène, pour donner du deutérium. C'est la raison pour laquelle on emploie l'eau lourde comme ralentisseur de neutrons dans certains réacteurs nucléaires. Aussi la production sur une grande échelle, par centaines de tonnes, est-elle à l'ordre du jour, alors qu'actuellement la seule usine européenne qui en fabrique, celle de Rjukan en Norvège, n'atteint que quelques dizaines de tonnes par an.

Les différences de masse entre les divers isotopes d'un élément moyen ou lourd n'affectent normalement que d'une manière négligeable leur comportement dans de nombreux processus : évaporation, réactions chimiques, échanges d'ions, etc. Mais, ici, il s'agit d'éléments très légers, de masse 1 et 2, de sorte que l'effet de masse y devient appréciable.

L'eau lourde a d'abord été extraite par électrolyse de l'eau ordinaire, où sa concen-

tration normale est de 1/6 700, et c'est en Norvège, dans les grandes installations électrolytiques de la Société Norsk Hydro, que les premiers litres ont été obtenus. Ce procédé est basé sur la moins grande vitesse de dégagement du deutérium par rapport à l'hydrogène dans l'électrolyse de l'eau, de sorte que le bain s'enrichit constamment en eau lourde, et il serait possible d'atteindre une concentration de 99 %. On ne peut mettre cette technique en œuvre que dans des usines où l'électrolyse est déjà installée en vue de produire de l'hydrogène pour la synthèse de l'ammoniac. C'est le cas à Rjukan en Norvège et à Trail au Canada, où le prix de revient est estimé à 50 francs le gramme d'eau lourde.

Aux Etats-Unis on préfère recourir à la réaction d'échange isotopique entre l'hydrogène sulfuré et l'eau. La teneur en deutérium de l'hydrogène sulfuré, en équilibre avec de



l'eau, varie avec la température. Grâce à cette variation, cet hydrogène sulfuré sert, en somme, de véhicule au deutérium, qui est transféré d'une eau à faible concentration à une eau à forte concentration. En définitive, on ne consomme que de l'eau, si l'on néglige les pertes en hydrogène sulfuré. La difficulté réside principalement dans la manipulation de l'hydrogène sulfuré qui est très corrosif à haute température en présence d'eau. Il est cependant probable que la capacité de production d'une telle installation puisse atteindre plusieurs centaines de tonnes par an.

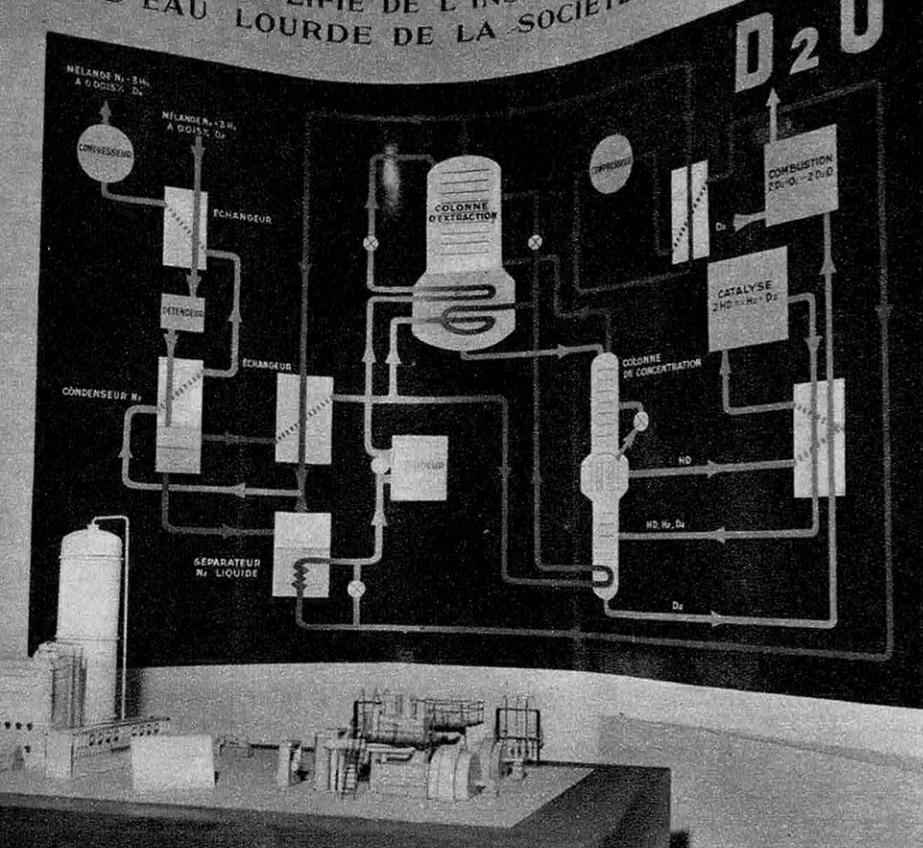
### La distillation

La Grande-Bretagne a étudié un procédé de fabrication de l'eau lourde par distillation de l'eau ordinaire, procédé déjà expérimenté, puis abandonné aux Etats-Unis. Les techniciens britanniques envisageaient d'utiliser les

dégagements de vapeur géothermique de la Nouvelle-Zélande, mais paraissent avoir renoncé à ce projet jugé encore trop onéreux.

En France, une installation pilote, à Toulouse, met en œuvre la distillation de l'hydrogène liquide. Pour une production d'eau lourde d'une tonne par an, la quantité d'hydrogène à traiter serait d'environ 1 000 m<sup>3</sup> à l'heure, mais son origine peut être quelconque. En traitant de la sorte l'hydrogène qui sert à la synthèse de l'ammoniac, on pourrait récupérer une tonne d'eau lourde pour 4 000 tonnes d'ammoniac, ce qui donnerait 120 tonnes d'eau lourde par an en équipant toutes les usines françaises.

Des physico-chimistes du jeune Etat d'Israël ont trouvé que certains micro-organismes « cultivés » dans l'eau arrivent à changer la proportion eau lourde/eau légère de celle-ci. Le même phénomène se produit avec de l'orge et a été découvert dans les brasseries scandi-



## L'EAU LOURDE ET LE GRAPHITE

Ces deux matériaux sont les deux principaux « ralentisseurs » et « réflecteurs » des piles nucléaires. Le graphite a pour lui d'être moins cher, l'eau lourde d'exiger moins d'uranium. Leur principal avantage

naves. Ce « dégrossissage » initial permettrait d'économiser de grandes quantités de courant pour l'électrolyse.

### Le zirconium

Le zirconium et ses alliages présentent un grand intérêt, du fait de leurs caractéristiques mécaniques favorables à températures relativement élevées, de leur faible pouvoir absorbant pour les neutrons et, surtout, de leur résistance à la corrosion en milieu aqueux. On les utilise surtout aux Etats-Unis, en particulier pour les réacteurs à eau sous pression ou à eau bouillante.

Les propriétés de résistance à la corrosion sont particulièrement remarquables dans la série d'alliages dits « zircaloy », mis au point aux Etats-Unis par addition d'étain jusqu'à 1,5 % et de fer, de nickel et de chrome à 0,1 ou 0,2 %.

Le point de fusion du zirconium est très élevé, mais, pour améliorer ses caractéristiques mécaniques, on l'allie à l'aluminium ou au molybdène.

Suivant l'origine du minerai, le zirconium contient 1 à 2 % de hafnium qui constitue un sous-produit de sa métallurgie. Le haf-

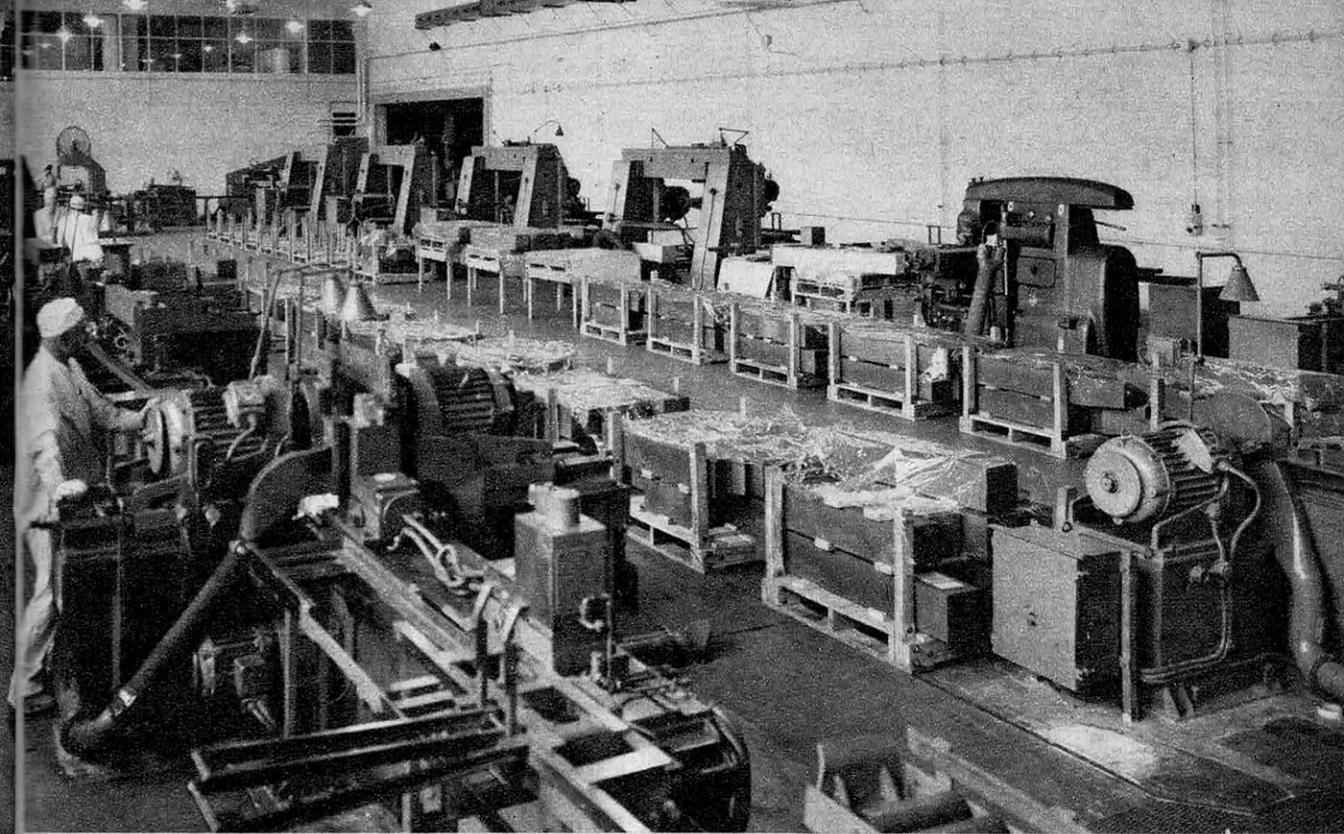
niun présente un très grand pouvoir absorbant pour les neutrons et sert, aux Etats-Unis, à la fabrication des barres de contrôle de certains réacteurs. Sa présence dans le zirconium, même à l'état de traces, est absolument indésirable et il faut l'éliminer soigneusement de l'oxyde de zirconium, point de départ des divers procédés d'obtention du métal.

Le procédé de fabrication le plus répandu à l'heure actuelle est le procédé Kroll dans lequel l'oxyde, transformé en tétrachlorure de zirconium, est réduit par le magnésium. On obtient une masse spongieuse que l'on transforme en billettes par fusion au four à arc à électrode consommable pour éviter toute pollution provenant des creusets. Suit un raffinage à l'hydrure, qui donne une poudre de zirconium.

La mise en forme s'effectue par les procédés habituels de la métallurgie des poudres.

### Le béryllium

Du fait de son faible pouvoir absorbant pour les neutrons et de la possibilité de l'utiliser comme modérateur ou réflecteur, le béryllium connaît actuellement une grande fa-



est d'absorber peu les neutrons et d'avoir une masse atomique faible. Le graphite est actuellement produit industriellement à Marcoule (à droite, vue d'un atelier de taille). Pour l'eau lourde, nous n'en sommes

encore qu'au stade semi-industriel. A gauche, la maquette est celle de l'usine de la Société de l'Air liquide qui traitera l'hydrogène servant à la synthèse de l'ammoniac suivant le schéma indiqué.

veur. Sa métallurgie est basée sur deux procédés : la réduction du fluorure de béryllium par le magnésium et l'électrolyse du chlorure de béryllium fondu. Le métal obtenu est mis en forme, soit en partant d'une billette fondue sous vide, soit en partant de poudre contenue dans une enceinte en fer. La ductilité du métal est faible, ce qui limite dans de nombreux cas ses possibilités d'emploi. La poudre de béryllium est par ailleurs très toxique et attaque les poumons.

### Les autres matériaux

Il existe de nombreux minerais de lithium, mais un très petit nombre seulement sont suffisamment abondants. Le plus important d'entre eux est un silicate double d'aluminium et de lithium, corps aussi dur que le roc et qui contient environ 4 % de lithium. Ce minerai, incolore lorsqu'il est pur, est presque toujours coloré, en particulier par le fer et le manganèse. Parmi les variétés ainsi formées, citons la kunzite et l'hiddenite (vert émeraude), toutes deux utilisées comme pierres précieuses. D'importants gisements existent en Amérique du Nord.

Après concentration des minerais par flottation, ceux-ci sont amenés aux usines de traitement où l'on commence par les chauffer vers 1 100° avant de les mouler. On les attaque alors à 250° par l'acide sulfurique. Le sulfate qui en résulte est entraîné par un solvant, séparé du reste du minerai et mis en présence de carbonate de calcium. Il se produit du carbonate de lithium, qui est séché puis traité par la chaux pour arriver à l'hydroxyde de lithium qu'il suffira de réduire pour obtenir le métal.

La gamme des autres matériaux utilisables dans l'industrie nucléaire s'étend chaque jour. Pour la plupart, ils sont connus depuis longtemps et leur fabrication a souvent atteint le stade industriel. Citons, à titre d'exemple, l'aluminium et le magnésium, dont certains alliages présentent, du fait de leur faible absorption pour les neutrons et de leur facilité de mise en forme, un intérêt considérable pour la construction des réacteurs. D'autres, tels que le bore, recherchés pour leur avidité vis-à-vis des neutrons, connaissent au contraire un essor industriel jusque-là imprévu. Tous voient s'ouvrir devant eux un avenir des plus brillants.

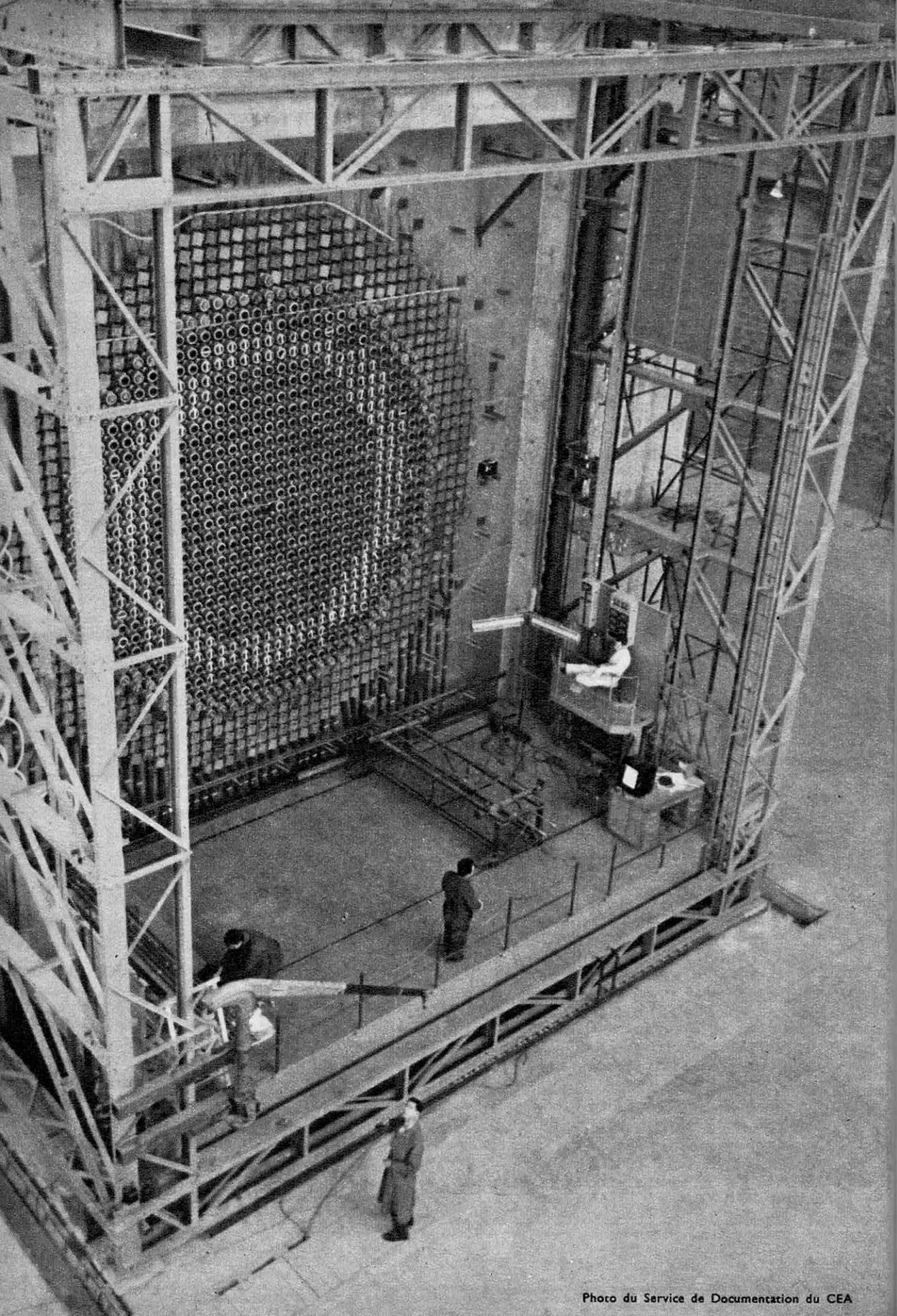


Photo du Service de Documentation du CEA

En dix ans :

# LA FRANCE est devenue GRANDE PUISSANCE ATOMIQUE

À la récente Conférence sur l'Utilisation Pacifique de l'Énergie Atomique, qui s'est déroulée à Genève, 62 communications françaises ont été présentées sur les sujets les plus divers : intégration de l'énergie nucléaire parmi les sources d'énergie, description des réacteurs, traitement des minerais, métallurgie du plutonium, etc., et 32 d'entre elles ont été discutées. La France était d'ailleurs l'un des sept pays chargés de l'organisation de cette conférence. Enfin, le 28 septembre dernier, le réacteur G 1 de Marcoule produisait de l'électricité pour la première fois en Europe continentale de l'Ouest. Ces faits permettent de situer d'une manière tangible la place de notre pays dans le domaine de l'énergie nucléaire.

Certes, avant la guerre, des étapes décisives avaient été franchies en physique nucléaire grâce aux travaux de savants français, mais un petit nombre d'entre eux seulement purent, pendant les hostilités, poursuivre leurs recherches dans les laboratoires anglo-saxons. A l'Armistice, la France appauvrie était tenue à l'écart des grandes réalisations des Etats-Unis et des travaux entrepris au Canada, en Grande-Bretagne et en U.R.S.S. Ces pays possédaient la quasi-exclusivité de l'approvisionnement en uranium et la plupart des

acquisitions scientifiques et techniques étaient couvertes par le secret militaire. Il a donc suffi d'un peu plus de dix ans d'efforts de la part de nos savants et de nos techniciens, utilisant au mieux les crédits qui leur étaient alloués, modiques si on les compare à ceux dont disposent leurs confrères précités, pour que fût comblé notre retard. Nous avons maintenant pris rang parmi les puissances atomiques du monde.

## Un programme atomique complet

Lorsque le Commissariat à l'Énergie Atomique fut créé, le 18 octobre 1945, il s'agissait de former les premières équipes de chercheurs et d'ingénieurs familiarisés avec la science nucléaire et ses applications, leur donner des appareils de recherche, des laboratoires, et rassembler les matières premières indispensables. Le premier plan quinquennal de développement de l'énergie atomique ne fut voté qu'en 1952 : il mettait l'accent sur les applications industrielles de cette nouvelle source d'énergie et prévoyait une production notable de matière fissile. En mai 1955, le gouvernement adoptait un nouveau plan de développement, amplifiant le précédent et tendant à doter le pays de l'infrastructure nécessaire.

D'après ce plan, les efforts doivent porter sur trois domaines :

- production d'énergie électrique par des centrales nucléaires ; au moment où la consommation d'électricité double tous les dix ans en France, alors que les réserves de charbon s'épuisent et que les possibilités d'équipements hydroélectriques nouveaux et rentables se font rares, cette source d'énergie survient fort à propos ;
- réalisation d'unités motrices, en particulier pour les navires : les premiers prototypes

---

**La pile G 1 de Marcoule, première pile française à grande puissance (40 000 kW chaleur), fait partie d'un ensemble (G1, G2, G3) qui développera une puissance thermique totale de 350 000 kW et dont le but principal est la production de plutonium : 15 kg par an avec G1, 100 kg par an lorsque G2 et G3 seront en service. L'énergie électrique ne sera en fait qu'un sous-produit. La génératrice expérimentale accouplée à G1 est déjà en service, elle permettra de récupérer 5 000 kW ; celles de G2 et G3 donneront un apport supplémentaire de 60 000 kW.**

américains ont démontré tout l'intérêt de cette solution et le problème est à l'ordre du jour en Grande-Bretagne ; la France, puissance maritime, ne saurait s'en désintéresser ;

— utilisation des radioéléments artificiels en médecine, en agriculture, dans l'industrie, dans la recherche scientifique et technique.

Les études et les travaux devant conduire aux génératrices nucléaires ont été entrepris en plusieurs étapes. Il a été indispensable de construire d'abord des réacteurs expérimentaux et de recherche, ce qui a permis de fabriquer des radioéléments artificiels depuis mai 1949 et d'arriver, en 1956, à produire de l'électricité. Le combustible nucléaire pur, en l'occurrence le plutonium, sera préparé à l'échelle industrielle dès l'an prochain.

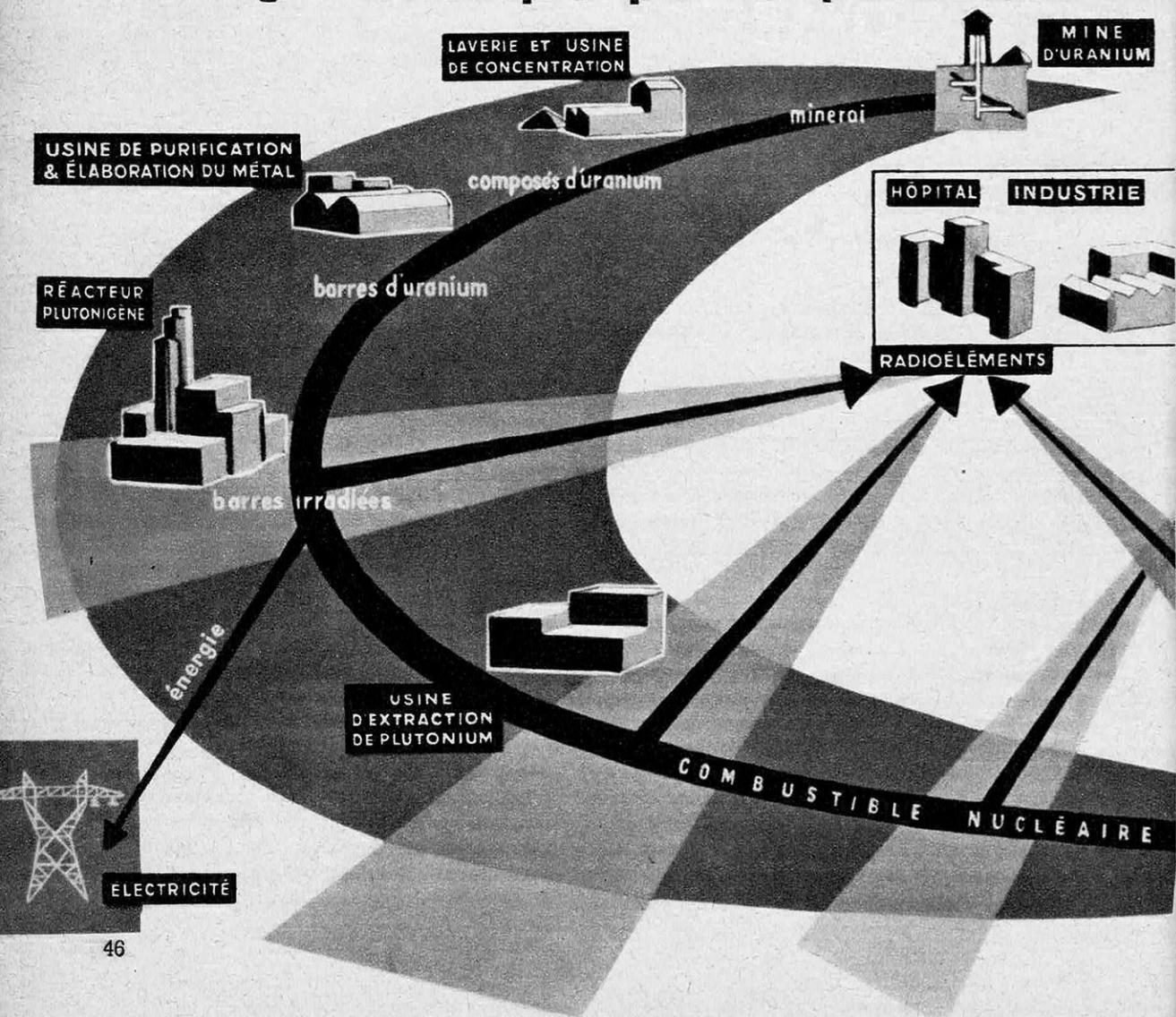
Le plan développe les éléments de base d'un programme atomique complet. Entre les deux grands processus de production de ma-

tériaux fissiles purs destinés à enrichir le combustible des réacteurs de puissance et des moteurs nucléaires, le Commissariat à l'Énergie Atomique a choisi de débiter par la voie du plutonium, sans pour cela renoncer à celle de l'uranium-235 obtenu par séparation isotopique. Le plan vise, d'autre part, à intéresser et à faire participer à sa réalisation des organismes déjà outillés en hommes et matériel spécialisés. C'est, d'une part, l'université qui doit coopérer dans le domaine des recherches fondamentales ; d'autre part, l'industrie qui a déjà rendu possible la mise en service rapide des installations réalisées et dont la collaboration active est un puissant facteur de succès.

Pour la période allant de 1945 à la fin du premier plan quinquennal, en 1957, on avait prévu :

- la formation des spécialistes ;
- l'équipement de laboratoires dotés de puis-

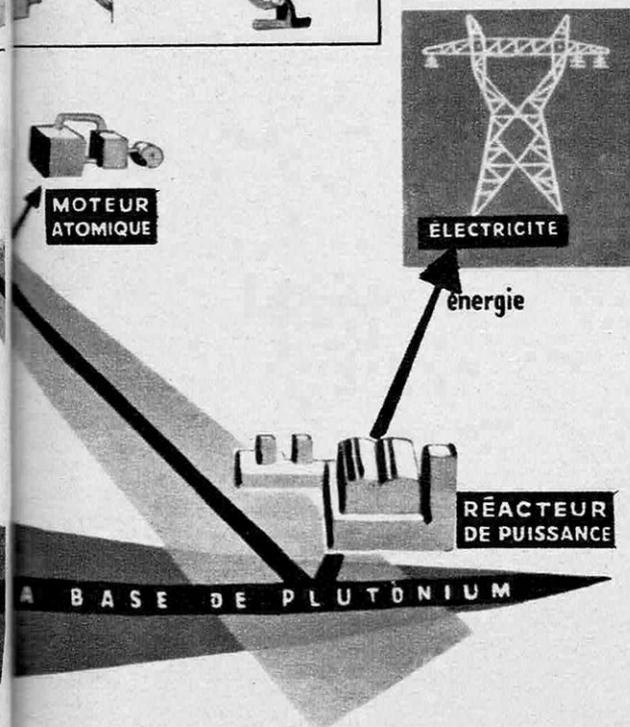
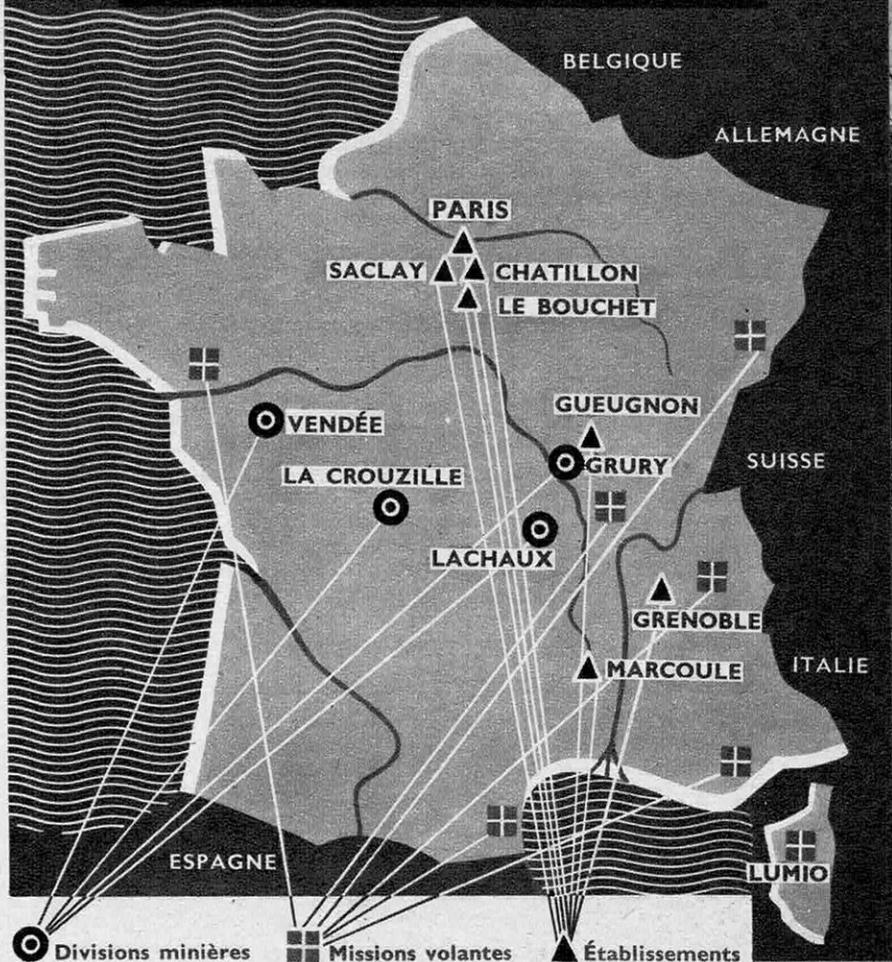
## L'énergie atomique par le plutonium



# L'implantation du CEA

Le développement du Commissariat à l'Énergie Atomique, dont le siège est à Paris, s'est traduit par une augmentation de ses effectifs qui sont passés de 236 à 5 421 personnes, du 31 décembre 1946 au 31 décembre 1955, non compris les travailleurs indigènes recrutés outre-mer. Un nouveau et très important accroissement est à prévoir au cours des années à venir pour la réalisation du programme fixé.

La voie du plutonium pour la production de l'énergie atomique est celle choisie par le C.E.A. Nous en sommes actuellement au stade du réacteur plutonigène avec la pile G1 de Marcoule; la phase suivante sera la première génératrice nucléaire EDF-1. Cette voie a été préférée à celle de la séparation des isotopes U-235 et U-238 qui exige une très importante consommation d'électricité.



- sants équipements modernes : accélérateurs de particules pour l'étude de la structure des noyaux atomiques, installations spéciales, métallurgiques et chimiques pour les recherches sur les métaux utilisés dans les piles ;
- la recherche et l'exploitation, en France métropolitaine et outre-mer, de minerais d'uranium et de thorium ;
  - le lancement industriel de fabrications de matériaux nouveaux ou spécialement adaptés : eau lourde, graphite, calcium, béryllium et son oxyde, zirconium, à un degré de pureté dit nucléaire, dépassant de beaucoup les normes usuelles ;
  - la construction de grandes usines, d'un type complètement original, pour l'élaboration d'uranium métallique pur et pour l'extraction chimique et le traitement métallurgique du plutonium ;
  - la construction de réacteurs de types divers ;
  - la mise en œuvre d'études concernant un prototype de moteur marin, un moteur atomique pour avion (en collaboration

# Le Centre d'Études Nucléaires de Saclay

Le premier centre d'études nucléaires établi à Saclay est un établissement de recherches. Il n'est pas destiné à produire sur place de l'énergie atomique mais à préparer cette production, d'une part en formant des chercheurs, de l'autre en entreprenant les études scientifiques et techniques nécessaires. Il a été édifié sur le plateau de Saclay, près de la Vallée de Chevreuse, non loin de Châtillon. Les premiers travaux commencèrent en 1949 ; la plupart de ceux prévus sont presque terminés. La superficie du terrain disponible, plus de 170 hectares, permettra de faire face à des extensions futures.

Le centre dispose actuellement de deux accélérateurs type Van de Graaf, l'un de 5 MeV (millions d'électronvolts), l'autre de 2 MeV utilisés comme générateurs de neutrons, d'un cyclotron de 25 MeV, d'un accélérateur à cavité de 0,5 MeV, de la pile EL2 et d'une pile à basse puissance « Aquilon ». Les appareils en cours de construction, qui viendront à brève échéance compléter l'ensemble, sont : une pile à haut flux EL3, une seconde pile à basse puissance « Proserpine », un synchrotron à protons, « Saturne », de 2,5 milliards d'électronvolts, un accélérateur linéaire de 28 MeV.

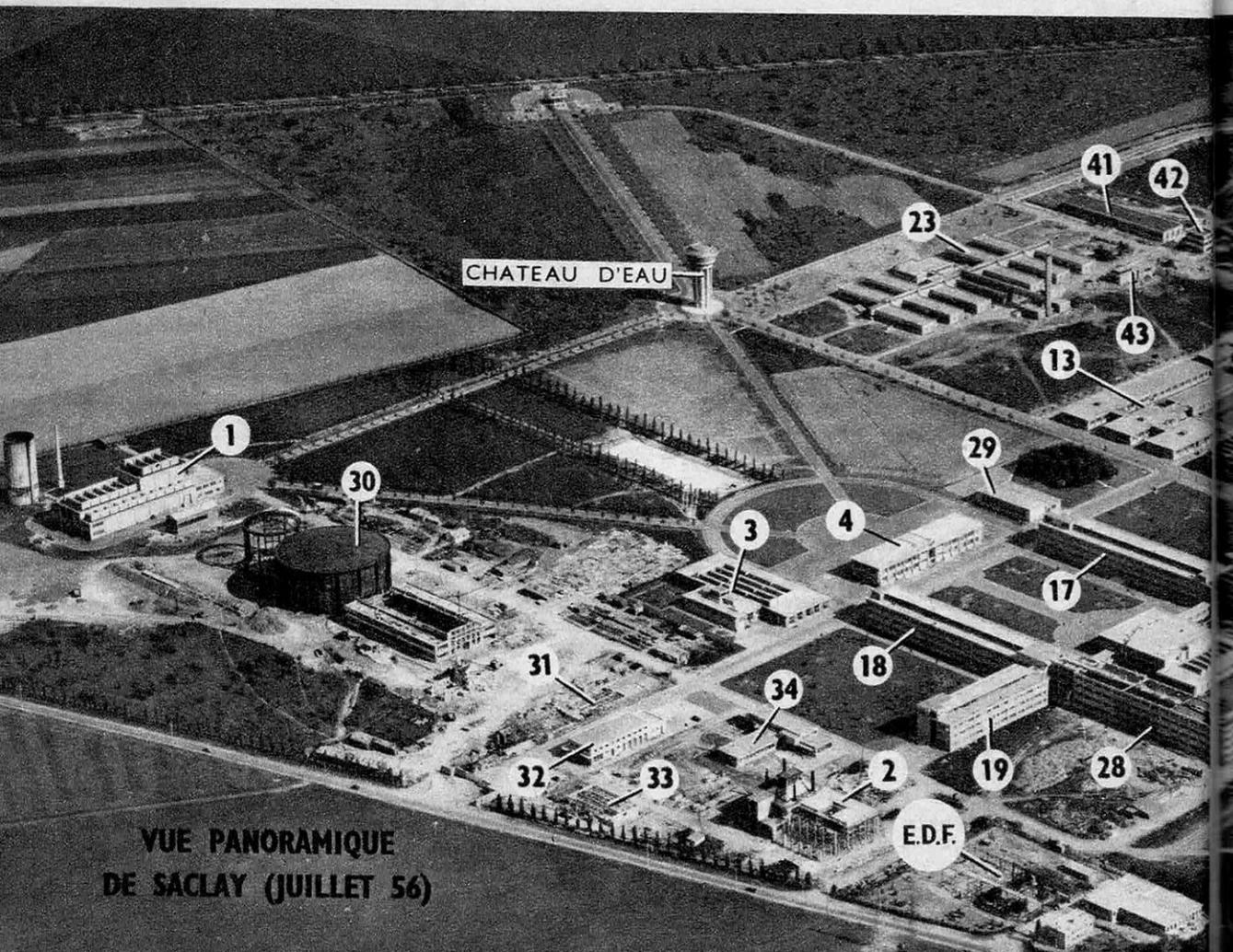
Le cyclotron a été utilisé jusqu'ici pour accélérer des atomes relativement lourds (d'oxygène, de car-

bone et d'azote) six fois ionisés, leur donnant ainsi des énergies atteignant 140 MeV.

La construction du synchrotron « Saturne » a posé de difficiles problèmes : masse métallique énorme (1 100 t) de l'électroaimant, horizontalité et, surtout, stabilité rigoureuse de l'ensemble pour éviter toute déformation, gaine non métallique du canal où les particules sont accélérées. Les blocs d'aimants sont montés sur socles métalliques par groupes de 12, ces socles étant ancrés sur un anneau de béton fortement armé (1 200 t). L'anneau est lui-même supporté par 48 vérins qui s'appuient sur 24 pieux de béton (660 t au total) descendant jusqu'au sable (— 15 m). Enfin, le caoutchouc utilisé sur le synchrotron de Birmingham n'ayant pas donné satisfaction, on aura recours à la matière plastique Araldite, pour réaliser la gaine du canal circulaire.

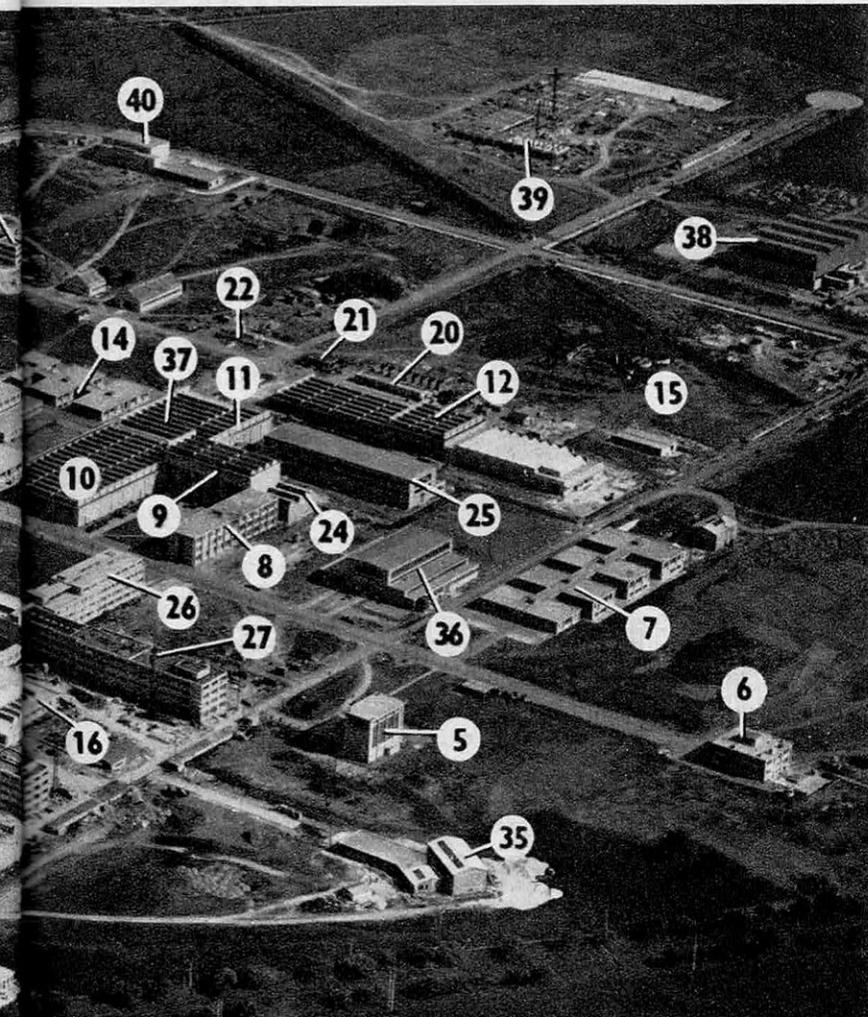
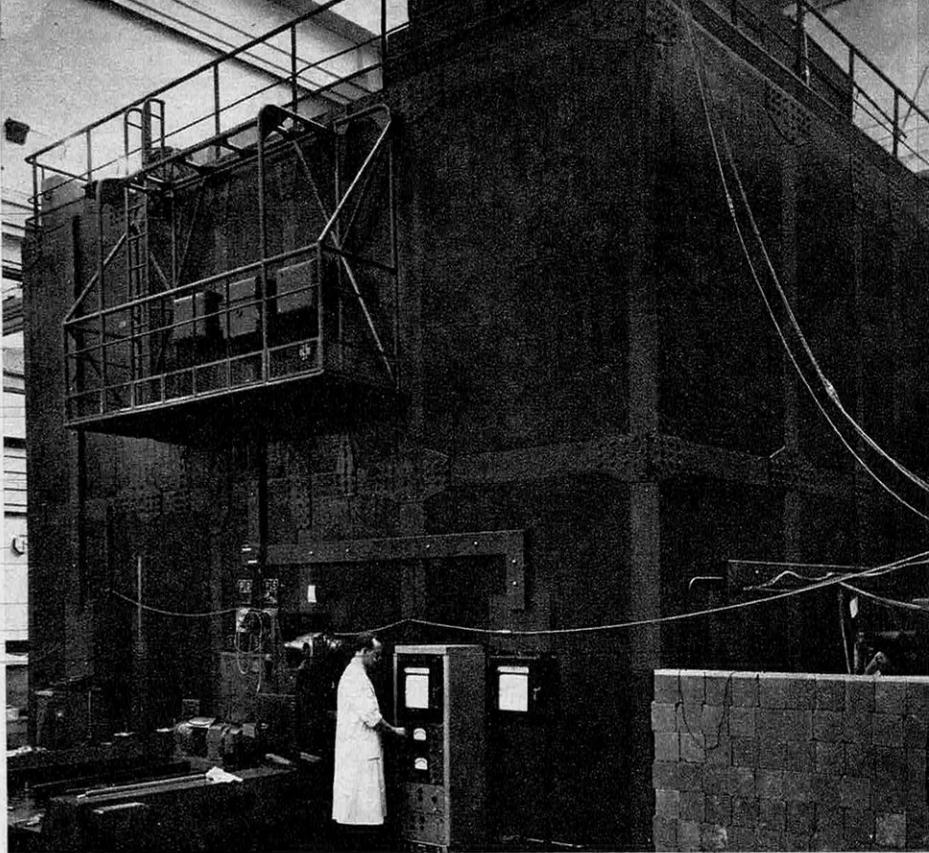
Au sein du « Département des Etudes de Piles », le « Service de Physique mathématique » étudie l'économie et la répartition des neutrons d'un point de vue mathématique ; il dispose de moyens spéciaux de calculs théoriques et numériques ; il procède aussi à des études de physique nucléaire théorique. Le « Service de Neutronique expérimentale » étudie les mêmes problèmes par des méthodes pratiques ; il procède, en outre, à des mesures de sections effi-

SUITE PAGE SUIVANTE



VUE PANORAMIQUE  
DE SACLAY (JUILLET 56)

La pile EL2, initialement refroidie à l'azote, l'est actuellement par le gaz carbonique, la chaleur récupérée servant au chauffage des bâtiments. L'eau lourde qui joue le rôle de ralentisseur a dû aussi être refroidie pour que le réacteur atteigne une puissance de 2 000 kW, la puissance en pointe étant de 2 800 kW. Pour éviter que des particules radioactives d'uranium soient entraînées dans les canalisations de gaz carbonique à la suite de rupture de gaines, des filtres spéciaux sont mis en place.



1. P2
2. Centrale thermique
3. Restaurant
4. Direction
5. Van de Graaff
6. Cyclotron
7. Accélérateurs
8. Techniciens
9. Hall des essais
10. Ateliers
11. Graphite
12. Magasins
13. Electronique
14. Technologie
15. Station d'épuration
16. Documentation - Bibliothèque - Physique mathématique
17. Physique nucléaire
18. Chimie physique
19. Chimie appliquée
20. Parc à métaux
21. Magasins des produits
22. Serre
23. Laboratoire de haute activité
24. Presse
25. Ateliers Technologie
26. Biologie
27. Département des Etudes de Piles Physique mathématique
28. Département de Chimie Radioéléments artificiels
29. Enseignement
30. E L 3
31. Centre médical
32. Bâtiment d'Entrée
33. Mesures
34. Glucine
35. Accélérateur linéaire à électrons
36. Etudes mécaniques (Ateliers)
37. Entretien
38. Cosmotron
39. Etudes industrielles
40. Pile secondaire
41. Laboratoire faible activité
42. Usine des effluents
43. Décontamination



caces. Le « Service des Etudes mécaniques » a en charge les problèmes de construction, d'appareillages mécaniques, de circulation de fluide et d'échanges thermiques. La « Section de Résonance magnétique » se penche sur le problème du comportement des atomes et de noyaux paramagnétiques dans les champs de haute fréquence.

Le « Département de Physico-Chimie » et celui de « Métallurgie et Chimie Appliquée » sont principalement chargés des travaux de recherches relatives aux matériaux nécessaires à la réalisation des piles. La « Section d'Analyse et de Recherches Chimiques Appliquées » assure le contrôle et la pureté des matériaux nucléaires. La « Section des Applications des Radioéléments » se préoccupe d'étendre et de mettre au point l'emploi des radioéléments dans l'industrie. Le « Service de Biologie » effectue des recherches concernant l'effet des rayonnements ionisants sur les cellules et les organismes vivants. Le « Service de Protection contre les Radiations » (S.P.R.) a à sa charge une tâche de surveillance et de contrôle. Il dispose de laboratoires d'analyses photométriques, radiochimiques et biologiques, pour la surveillance individuelle de chaque membre du personnel, ainsi que d'appareils de détection particuliers à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments. Le laboratoire de haute activité, spécialement conçu pour per-

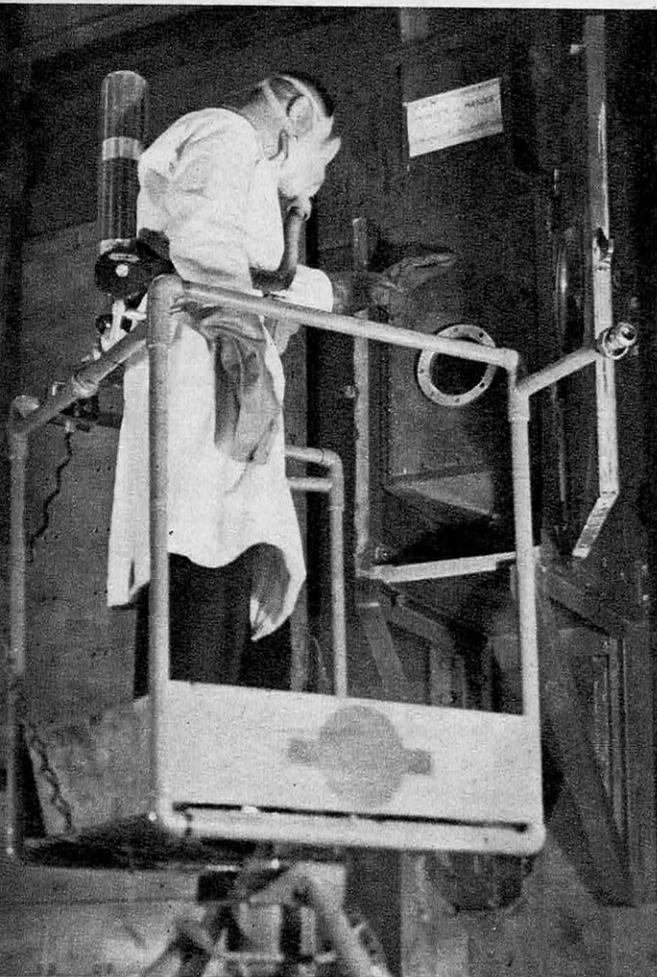
mettre des opérations mettant en jeu une radioactivité élevée, est doté de dispositifs de sécurité spéciaux.

En dehors des Départements précités, un « Service des Constructions Electriques » étudie des appareils électroniques spéciaux en vue de la prospection, de la protection contre les rayonnements, des recherches de physique nucléaire, du contrôle et de la commande des piles. La construction de série est confiée à l'industrie privée qui collabore souvent à l'exécution des prototypes.

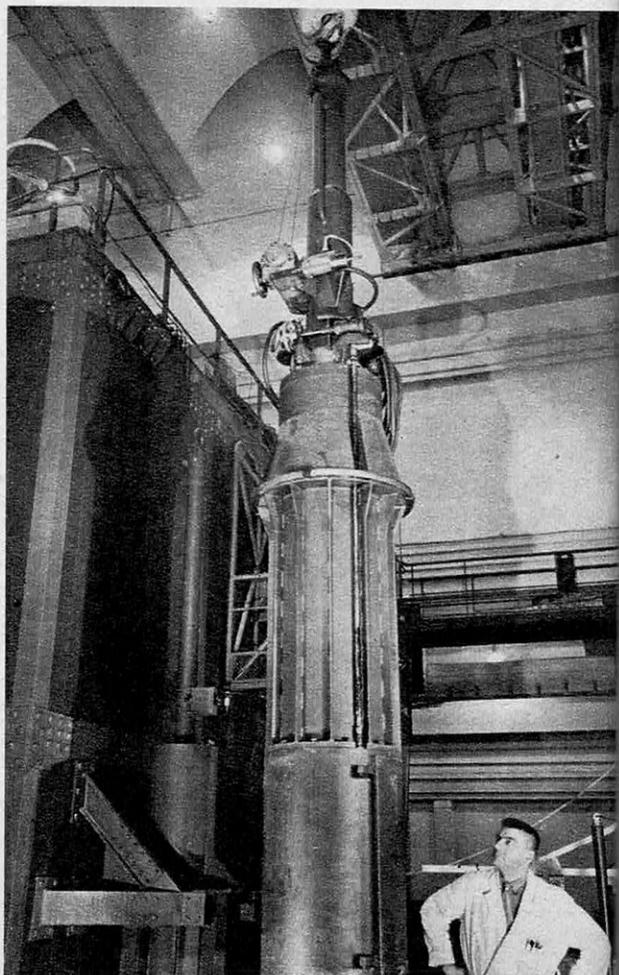
Le « Service des Ateliers Mécaniques » réalise certains dispositifs et montages spéciaux. Enfin le « Service de Documentation » rassemble et diffuse les livres et publications ayant trait à toutes les activités susceptibles d'intéresser le Commissariat à l'Energie Atomique ainsi que les mémoires rédigés par les chercheurs du C.E.A.

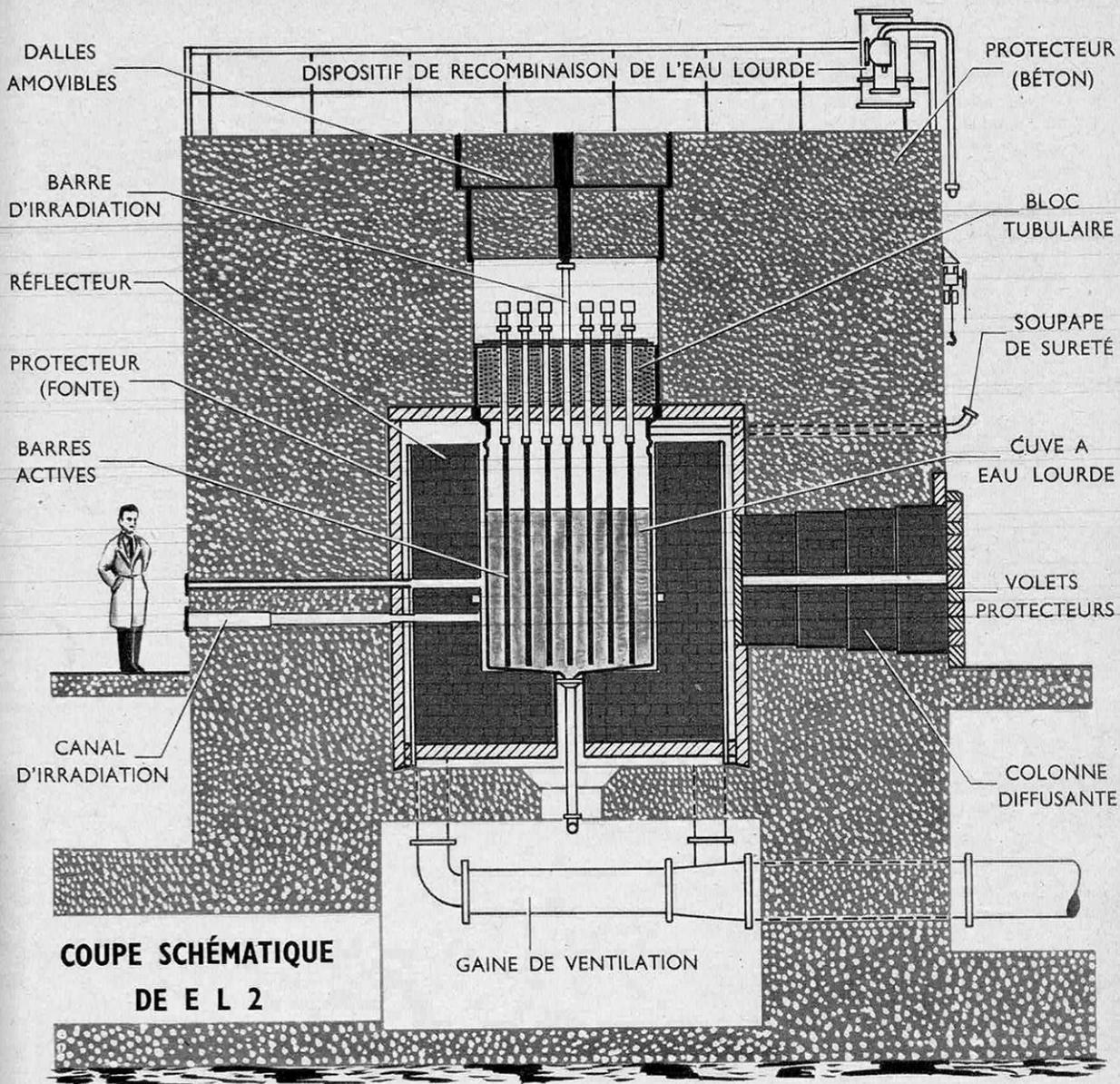
A côté de la partie recherches et études, le Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay a dû organiser des cours de spécialisation, aussi bien pour son personnel et celui de l'ensemble du Commissariat que pour les techniciens de l'industrie privée et les étudiants des universités. Ainsi espère-t-il pouvoir trouver les spécialistes dont le Commissariat lui-même et l'industrie auront de plus en plus besoin dans les années à venir.

**La protection du personnel chargé de vérifier certaines parties de la pile (ici une membrane de sécurité) comporte le port d'un masque autonome.**

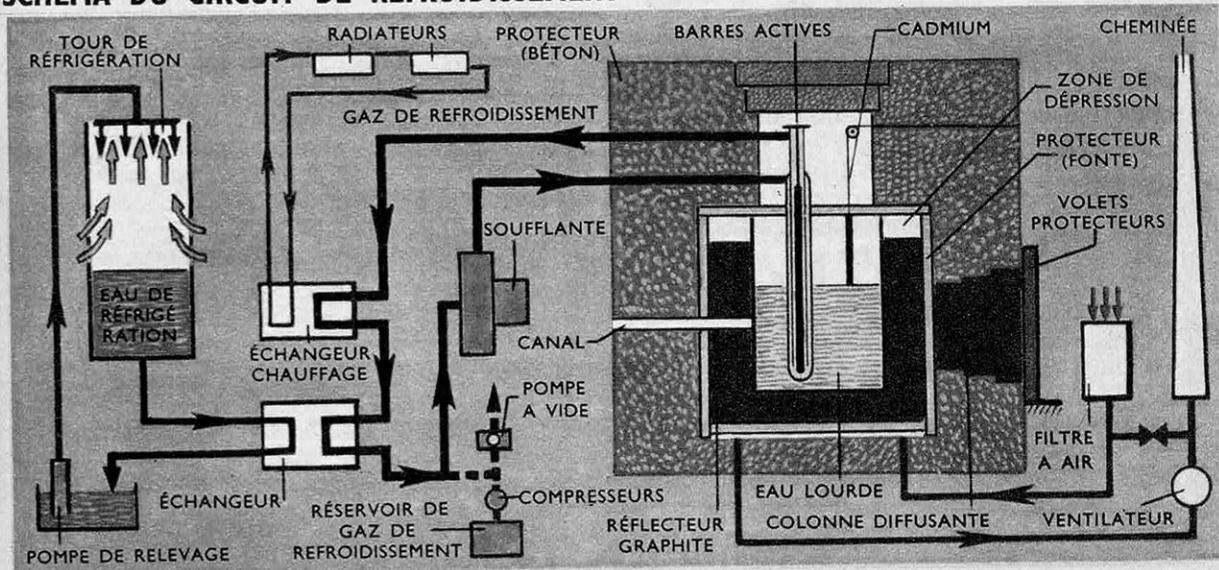


**La manipulation des barres d'uranium radioactives se fait à l'aide de cette hotte de plomb qui les entoure complètement et arrête toutes les radiations.**





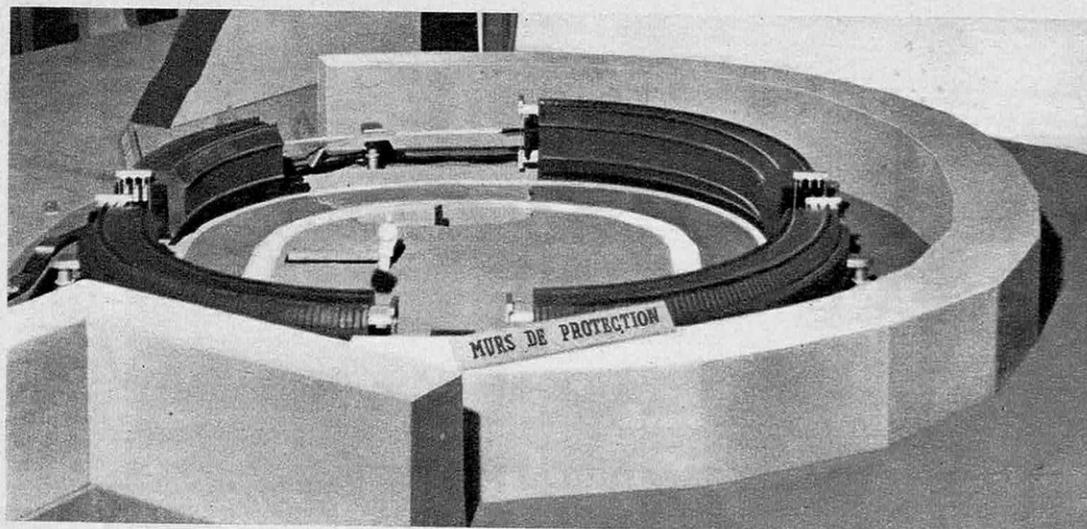
### SCHÉMA DU CIRCUIT DE REFROIDISSEMENT



# Les appareils en construction

↓ *Ce synchrotron à protons sera en service en 1958. Il communiquera à certaines particules une énergie qui atteindra environ 2,5 milliards d'électronvolts.*

→ *La nouvelle pile expérimentale E L 3, dont on voit au premier plan la salle des machines en construction, commencera à « diverger » à la fin de l'an prochain.*



SUITE DE LA PAGE 47

avec la SNECMA) et des réacteurs de type avancé, réacteurs surrégénérateurs ou « breeders » (vraisemblablement réalisés dans quatre ou cinq ans), produisant plus de combustible qu'ils n'en consomment.

## Les réalisations

La Direction des Recherches et Exploitations Minières, fut chargée de la prospection et de l'exploitation des minerais radioactifs ; elle a permis à la France de devenir le premier producteur métropolitain d'Europe occidentale.

L'usine du Bouchet, dans la région parisienne, procède à l'extraction, à la purification et à l'élaboration de l'uranium métallique. Pour le moment, cette usine suffit pour alimenter en uranium naturel les réacteurs français. Une usine pour le traitement des minerais de thorium est en construction au même endroit.

C'est également dans la région parisienne, à Châtillon, qu'ont été montés les premiers laboratoires de recherches. C'est là qu'en décembre 1948, la première « pile » expérimentale française à eau lourde ZOE ou EL-1 est entrée en fonctionnement.

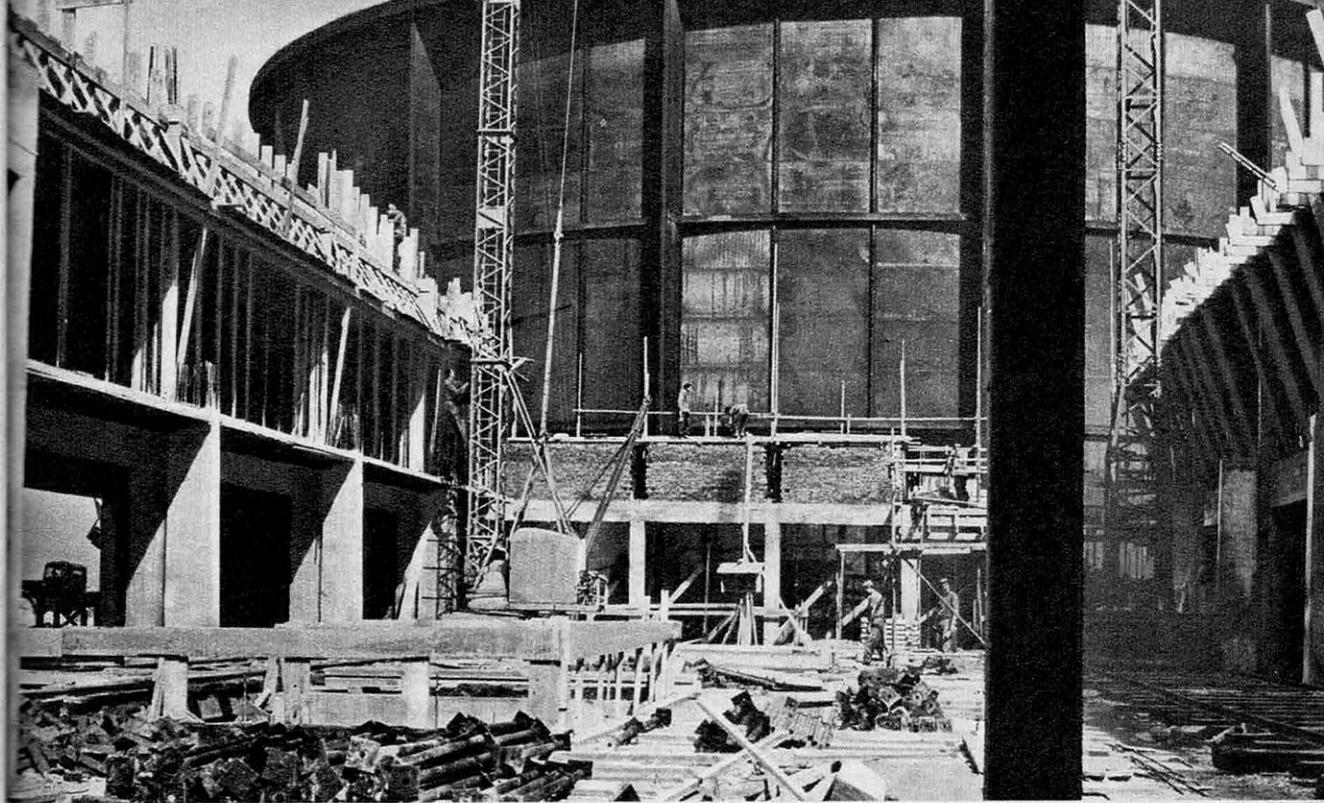
Un Centre d'Etudes Nucléaires (C.E.N.) a ensuite été créé à Saclay. Trois accélérateurs de particules y sont déjà utilisés, tandis que l'on construit, pour 1958, un synchrotron qui pourra communiquer à des protons une énergie de 2 milliards et demi d'électronvolts. De-

puis 1952, un réacteur expérimental de 2 500 kW, EL-2, y est entré en fonctionnement, et, à partir de 1957, un réacteur à très haut flux de neutrons, de 15 000 kW, EL-3, servira aux essais de matériaux des réacteurs de puissance. De plus, deux petits réacteurs de faible puissance, y sont érigés : Aquilon, qui fonctionne depuis août 1956 et Proserpine qui sera mis en marche dans quelques mois. Enfin, des réacteurs de types très divers y sont à l'étude.

La création, à Grenoble, d'un deuxième Centre d'Etudes Nucléaires a été décidée en octobre 1955. Il travaillera en collaboration étroite avec Saclay, ainsi qu'avec l'ensemble universitaire et industriel particulièrement actif de cette région de l'Isère.

Le Centre Industriel de Marcoule est installé dans la vallée du Rhône, près d'Avignon. Trois grands réacteurs au graphite G1, G2 et G3, dits « plutonigènes », ont pour principal objet de produire du plutonium en quantité industrielle. Une usine d'extraction du plutonium, pour laquelle une usine pilote a été réalisée à Châtillon, fonctionnera à partir de 1957. Trois génératrices associées à G1, G2 et G3, produiront une puissance électrique d'environ 60 000 kW. Le premier réacteur G1 a commencé à fonctionner en janvier 1956 et c'est lui qui vient de fournir, pour la première fois en France, de l'électricité d'origine nucléaire.

De son côté, l'Electricité de France prépare,



avec le Commissariat, l'installation d'une génératrice nucléaire dans la vallée de la Loire. La centrale qui lui sera associée fournira, à partir de 1960, une puissance de l'ordre de 60 000 kW au réseau de distribution d'énergie électrique. Ce sera le point de départ du développement particulièrement rapide de la production d'électricité d'origine nucléaire, car, environ tous les trois ans, la puissance ainsi installée en France doit, au minimum, doubler.

Ainsi, après les dix premières années d'existence du Commissariat à l'Energie Atomique, la France peut présenter un bilan positif quant au développement industriel de l'énergie nucléaire. L'ensemble est sans doute moins puissant que celui dont vont disposer les Etats-Unis, l'U.R.S.S. ou la Grande-Bretagne, mais l'infrastructure déjà mise en place autorise de larges espoirs; il dépend des pouvoirs publics que l'énergie nucléaire devienne un important facteur de la prospérité du pays.

### **L'Institut National des Sciences Techniques Nucléaires**

Pour accélérer la formation des spécialistes, le Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay a créé des cours de physique théorique en liaison avec la Faculté des Sciences de Paris. Les auditeurs doivent, évidemment, avoir au moins les connaissances de la licence. D'autre part, des laboratoires sont mis, par le Commissariat à l'Energie Atomique, à la disposition de cher-

cheurs de qualité préparant des thèses de doctorat.

De leur côté, le C.N.R.S. et l'Institut National d'Hygiène organisent, conjointement avec le Commissariat à l'Energie Atomique, des cours destinés aux utilisateurs de radioéléments. Ils comprennent deux sections, l'une de chimie, physique et leurs applications industrielles, l'autre de biologie et de médecine.

Pour les docteurs en médecine et les étudiants en biologie, d'autres cours sont organisés sur l'action des radiations ionisantes sur les organismes vivants et l'emploi des isotopes comme indicateurs en biologie et en médecine. Un cours de protection contre les radiations est réservé aux médecins inspecteurs d'hygiène et aux médecins inspecteurs du travail.

Enfin, tous les ans, de novembre à juillet, un cours de Génie atomique donne à des ingénieurs déjà diplômés, à des agrégés, à des docteurs ès-Sciences, une formation qui leur fournira les moyens d'étudier ou de conduire des réacteurs nucléaires. Cette formation est sanctionnée par un diplôme signé par le ministre de l'Education nationale et le Haut-Commissaire à l'Energie Atomique.

On a groupé cet ensemble de cours sous l'égide d'un nouvel Institut, l'Institut National des Sciences et Techniques nucléaires, qui a été inauguré le lundi 5 novembre 1956 au Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay.

Mais pour pallier le manque de techniciens

en énergie atomique, il serait déraisonnable de réserver une telle éducation scientifique et technique à une trop faible élite. C'est pour-quoi, en marge de l'enseignement de l'Institut National des Sciences et Techniques, la création ou le développement d'instituts techniques professionnels privés est à encourager. Il doit être possible d'exposer, même par correspondance, l'essentiel de cette science qui offre de si larges débouchés.

### **Les gisements uranifères français sont parmi les plus importants d'Europe**

Un des principaux problèmes que le Commissariat à l'Énergie Atomique eut à résoudre, dès sa création, fut de pourvoir à son approvisionnement en ces substances rares et peu prospectées qu'étaient, à cette époque, les minerais radioactifs et les minerais de certains éléments comme le béryllium.

Les premiers travaux amenèrent la découverte de pechblendes massives en 1947 et 1948 dans les gisements de la Faye, près de Grury et la Crouzille. Devant ces résultats encourageants, les prospections furent étendues à toutes les zones favorables que constituent en France les terrains granitiques hercyniens et, dès 1949, trois unités d'exploitation étaient créées à Lachaux, Grury et la Crouzille ; celle de Vendée ne date que de 1953.

Au sud de Lachaux, le gisement de la région des Bois Noirs est actuellement en cours d'étude ; il fournira, dans les prochaines années, une partie importante de notre production métropolitaine. Dans cette même région, au sud-est d'Ambert, un groupe d'indices très intéressants a justifié des travaux de recherches par sondages et galeries.

Dans le Limousin, le puits Henriette, célèbre par la continuité de son filon de pechblende sur plus de 250 mètres de profondeur, n'est pas le seul gisement intéressant. Tout le nord-Limousin, c'est-à-dire la région comprise entre Ambazac et Bessines, est très prometteur.

En Saône-et-Loire, c'est un gisement d'importance moyenne à faible teneur qui est exploité, mais des travaux de reconnaissance sont en cours à La Faye, aux Brosses où une formation de pechblende semble très intéressante, et dans la région de Château-Chinon.

En Vendée, il semble que l'un au moins des gisements de Clisson ou de Mortagne-sur-Sèvre puisse se comparer aux plus beaux gîtes de substances uranifères du monde. La teneur est cependant faible et la mise en exploitation ne pourra se faire que grâce à l'usine de traitement chimique actuellement en cours de construction. De très bons résultats, quoique moins réguliers, ont aussi été enregistrés dans la région des Herbiers.

A Madagascar, les travaux de prospection et de mise en exploitation sont déjà fortement avancés et le nombre des indices repérés en quelques mois de reconnaissance incite à penser que nous devons être en présence d'une région très riche en uranium. Il est en tout cas certain que les ressources en thorium sont considérables.

D'autres travaux de prospection sont entrepris dans divers territoires : Hoggar, Algérie, Adrar des Iforas, Aïr en A.O.F., Cameroun, Tibesti, Oubangui, et Gabon en A.E.F.

### **La prospection privée**

Jusqu'à maintenant, le Commissariat à l'Énergie Atomique a pratiquement assuré seul la prospection et la mise en valeur des gisements uranifères. Cependant, soucieux d'en favoriser au maximum la découverte et l'extraction, il a inauguré, il y a 2 ans, une nouvelle politique destinée à stimuler les efforts des particuliers et de l'industrie privée. C'est ainsi que, dans un communiqué largement diffusé, il a fait connaître qu'il est acheteur de minerais au prix de 4 000 fr par kg d'uranium ; la teneur exigée est de 2 pour mille.

Les conditions d'achat s'appliquent à l'intérieur des régions suivantes :

## **Châtillon, premier centre français**

**C'**EST dans les casemates du fort de Châtillon, mis à la disposition du C.E.A. peu après sa création, que furent installés les premiers laboratoires de recherches. Ils donnèrent naissance, en 1948, à la première pile atomique française, Zoé. Cette pile permit de préparer la construction de la pile de Saclay et de celles, plus puissantes, de Marcoule ; elle contribua, en outre, à la production de radioéléments artificiels pour les hôpitaux, les laboratoires de recherches et l'industrie. Actuellement trois services du « Département de Chimie » fonctionnent à Châtillon. Le « Service des Radioéléments Artificiels » a assuré pour 1955 plus de 4 000 livraisons. La « Section d'Études des Traitements Chimiques des Minerais Pauvres » étudie l'exploitation économique des minerais à faible teneur et, éventuellement de certains sous-produits. Les recherches ont abouti à la construction des premières usines de traitement de Gueugnon et de Vendée. Le « Service du Plutonium » est enfin responsable du traitement des barreaux d'uranium des piles en service et l'unité d'extraction ci-contre, installée après l'obtention des premiers grammes de plutonium en 1949, sert d'usine-pilote pour celle de Marcoule.

— En Bretagne-Normandie, les départements du Finistère, Côtes-du-Nord, Morbihan, Ille-et-Vilaine, Loire-Inférieure (au nord de la Loire), Manche, Mayenne, Maine-et-Loire (au nord de la Loire), Calvados, Orne, Sarthe ;

— Dans le Massif Central, les départements de la Corrèze, Cantal et Haute-Loire, en totalité ; les départements du Tarn, Aveyron, Lozère, Ardèche, dans leur partie située au nord d'une ligne Beauvais-sur-Tescou (Tarn), Mende, Largentière, Le Teil d'Ardèche.

Dans ces régions, le Commissariat poursuivra ses programmes de prospection. La publication des résultats est tenue à la disposition des intéressés dans les bureaux des Préfectures et des Services des Mines. En outre, le C.E.A. effectuera gratuitement les analyses et les études de minerais que les personnes privées ou les compagnies minières considéreraient comme nécessaires, afin de guider leurs recherches. Enfin, il accepte d'organiser gratuitement des stages de formation de prospecteurs.

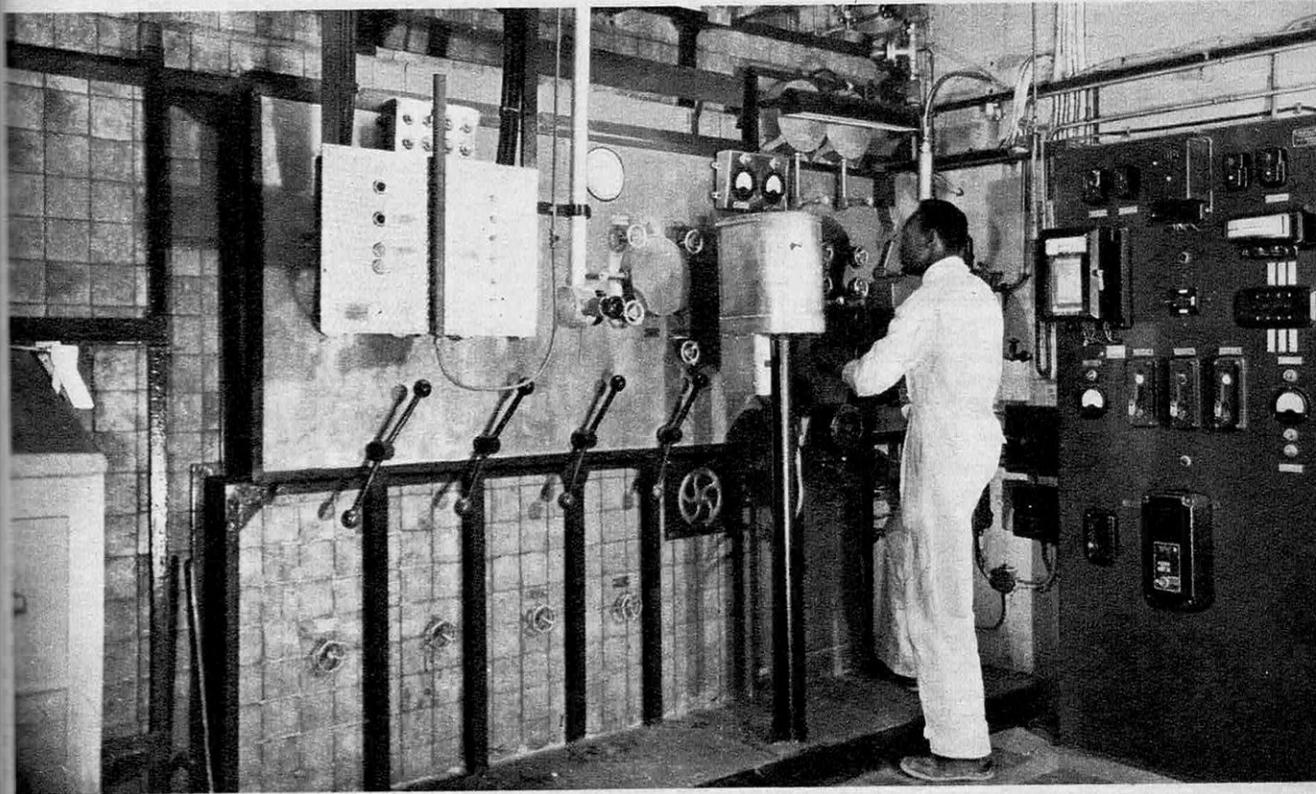
Actuellement, trois particuliers vendent du minerai au Commissariat, il y a sept demandes de permis exclusifs de recherches et une demande de permis d'exploitation. Une seule grande société a été formée, la Compagnie Française des Minerais d'Uranium.

## Droits et devoirs du prospecteur

En dehors des connaissances techniques et géologiques indispensables, le prospecteur privé doit évidemment se conformer aux textes législatifs en vigueur. L'essentiel de ces textes miniers se trouve dans le *Journal Officiel* (21 mai, 13 octobre 1955 et 31 décembre 1955) ; de toute façon, les personnes intéressées gagneront du temps en s'adressant au Service de Mines de l'arrondissement dont elles dépendent, ou au siège du Commissariat.

Recherches systématiques et exploitation font l'objet de permis spéciaux, mais pour les premières recherches, aucun permis n'est exigé. Il est même possible de vendre le minerai, extrait au cours des premiers travaux, sur simple autorisation préfectorale. L'essentiel est d'être d'accord avec le propriétaire du sol, tout au moins lorsque l'on commence les fouilles. Si le propriétaire n'est pas consentant, il est possible d'obtenir une autorisation du ministre chargé des Mines ; dans la pratique, elle ne vient jamais.

Le permis de recherches exclusif n'est opportun que lorsque les indices sont nettement favorables. Il n'est accordé que pour trois ans, renouvelable trois fois. Il garantit le droit au futur permis d'exploitation ; il interdit à tout autre prospecteur d'opérer



# LES RÉACTEURS FRANÇAIS

RÉACTEUR	EMPLACEMENT	TYPE	PUISSANCE	DATE DE MISE EN SERVICE
ZOE - EL 1	Châtillon	Oxyde d'uranium - eau lourde.. Après modification .....	5 kW 150 kW	Fin 1948 1953
EL 2	Saclay	Uranium naturel - eau lourde..	2 500 kW	1956
Aquilon	Saclay	Uranium naturel - eau lourde..	100 W	1956
G 1	Marcoule	Uranium naturel - graphite....	40 000 kW	1956
EL 3	Saclay	Uranium enrichi - eau lourde..	15 000 kW	1957
Proserpine	Saclay	Plutonium - eau ordinaire .....		1957
G 2	Marcoule	Uranium naturel - graphite....	150 000 kW	début 1958
G 3	Marcoule	Uranium naturel - graphite....	150 000 kW	1958
E D F - I	Avoine (près Chinon)	Uranium naturel - graphite....	60 000 kW (électr.)	1960

+ centrales industrielles prévues pour doubler la puissance installée tous les trois ans.

dans le périmètre accordé ; enfin, il permet d'occuper le terrain contre le consentement du propriétaire, par simple arrêté préfectoral. Pour l'obtenir, il faut que des indices suffisants aient été mis en évidence et que le demandeur s'engage à effectuer des dépenses en rapport avec le périmètre demandé.

La loi ne spécifie pas quand finit la recherche et quand commence l'exploitation, mais il est des phases de travaux sur lesquelles le service des Mines ne se trompera pas et qu'il interdira avant l'obtention du permis d'exploitation. En général, la concession à perpétuité n'est plus demandée, car les exigences des cahiers des charges qui s'y rapportent sont pratiquement trop lourdes. On lui préfère le permis d'exploitation qui est accordé pour cinq ans et renouvelable trois fois, ces quinze ans étant souvent suffisants pour exploiter une mine métallique. Pour obtenir ce permis, il ne suffit plus d'indices, il faut que le gisement ait été mis en évidence. Le demandeur doit encore justifier d'une aptitude technique et financière à conduire les travaux.

Le Service des Mines est seul compétent pour l'attribution de tous ces permis, le Comité de l'Energie Atomique n'intervient qu'à titre consultatif.

Le lithium et le béryllium sont soumis à une législation différente, car leur exploitation se fait en carrière. Ce sont, avec le thorium et l'uranium, les matériaux sur lesquels le Commissariat porte son intérêt.

## Les piles françaises

En 1948-1949, la production française d'uranium métallique était très insuffisante, aussi la pile de Châtillon ne contenait que de l'uranium sous forme d'oxyde fritté, plus facile à fabriquer, mais se prêtant moins bien au refroidissement. Cette première pile ne comportait aucun dispositif de refroidissement, et sa

puissance en marche ne pouvait dépasser 5 kW. Elle a subi, depuis, des modifications, qui lui permettent d'atteindre 150 kW.

La première pile de Saclay, dont le projet fut adopté en 1949, contient de l'uranium métallique sous forme de barreaux recouverts d'une gaine protectrice en magnésium. Un rapide courant d'azote, puis maintenant de gaz carbonique comprimé sous environ 10 atmosphères, circule le long de chaque barreau à la vitesse de 100 m/s et emporte la chaleur qui s'en dégage. Avec ce système de refroidissement, les ingénieurs du Commissariat ont ouvert une voie nouvelle.

Quelques semaines après sa mise en marche, les organes de refroidissement ayant été mis en fonctionnement, la puissance atteignit 1 000 kW. Mais les tuyauteries véhiculant le gaz étaient le siège de vibrations pouvant nuire à leur étanchéité ; le réacteur fut démonté. Les perfectionnements apportés à cette occasion lui donnent une puissance de 2 500 kW.

L'organe essentiel est constitué par une cuve d'aluminium d'environ 2 m de diamètre, contenant 6 à 7 tonnes d'eau lourde. L'uranium est disposé en 136 barres, d'un poids total de 4,5 tonnes, suspendues verticalement. La cuve est entourée d'une couche de graphite épaisse de 90 cm qui joue le rôle de réflecteur, d'un bouclier en fonte de 20 cm d'épaisseur qui a pour rôle d'évacuer la chaleur que les rayonnements engendrent dans le graphite, enfin d'un revêtement protecteur de 220 cm de béton. L'ensemble de la pile, des réservoirs de gaz carbonique, de l'échangeur de chaleur et des tuyauteries, est placé dans une enceinte étanche où la pression est maintenue au-dessous de la pression atmosphérique pour éviter toute fuite de gaz radioactifs dans le bâtiment. De plus, un dispositif de catalyse assure la recombinaison de l'oxygène et de l'hydrogène provenant de la dissociation de



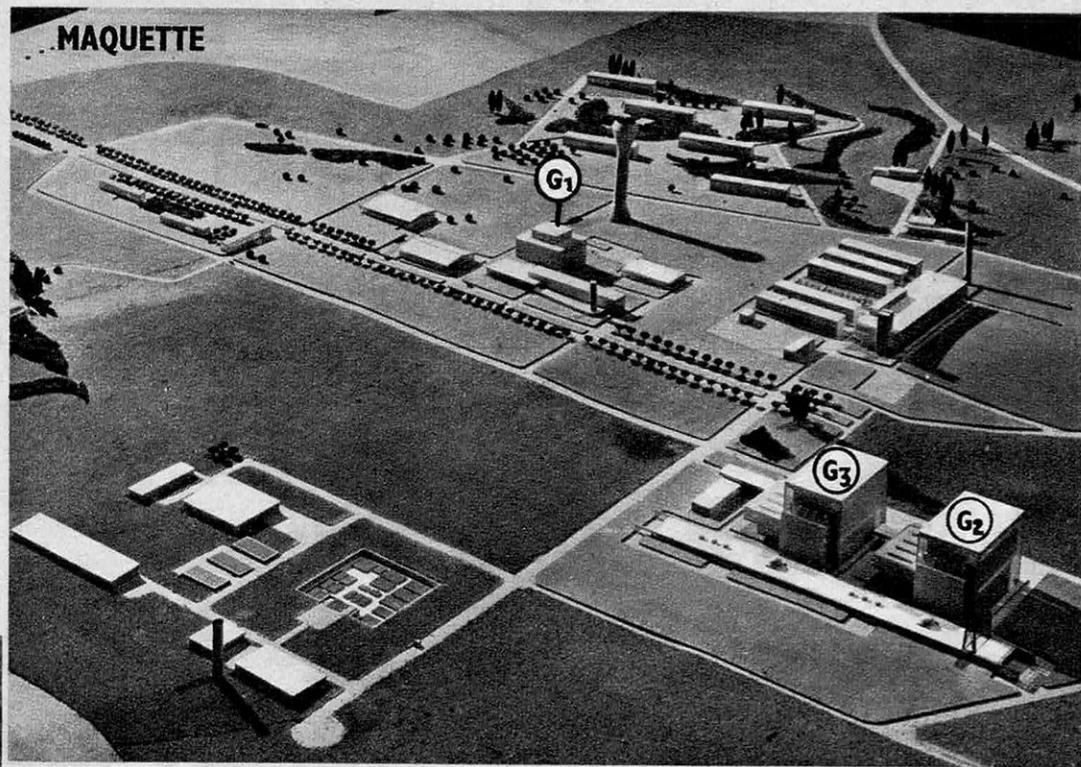
## L'usine d'uranium du Bouchet

**E**N 1946, le Commissariat à l'Énergie Atomique a installé son usine de fabrication d'uranium dans une enclave de la Poudrerie du Bouchet, à une cinquantaine de kilomètres au sud de Paris, près de Corbeil. La production de l'oxyde d'uranium utilisé pour les débuts de Zoé commença en janvier 1948, celle de lingots de métal ne démarra qu'en 1950. Au Bouchet, le minerai arrive sous forme d'uranate de soude, après avoir subi sur place un premier traitement ayant pour principal objectif d'augmenter la teneur en uranium. La purification s'opère par solvant, puis une transformation en peroxyde conduit à l'élaboration du métal (phase ultime ci-dessus). L'usine assure aujourd'hui une production suffisante pour alimenter les piles de Châtillon, de Saclay et

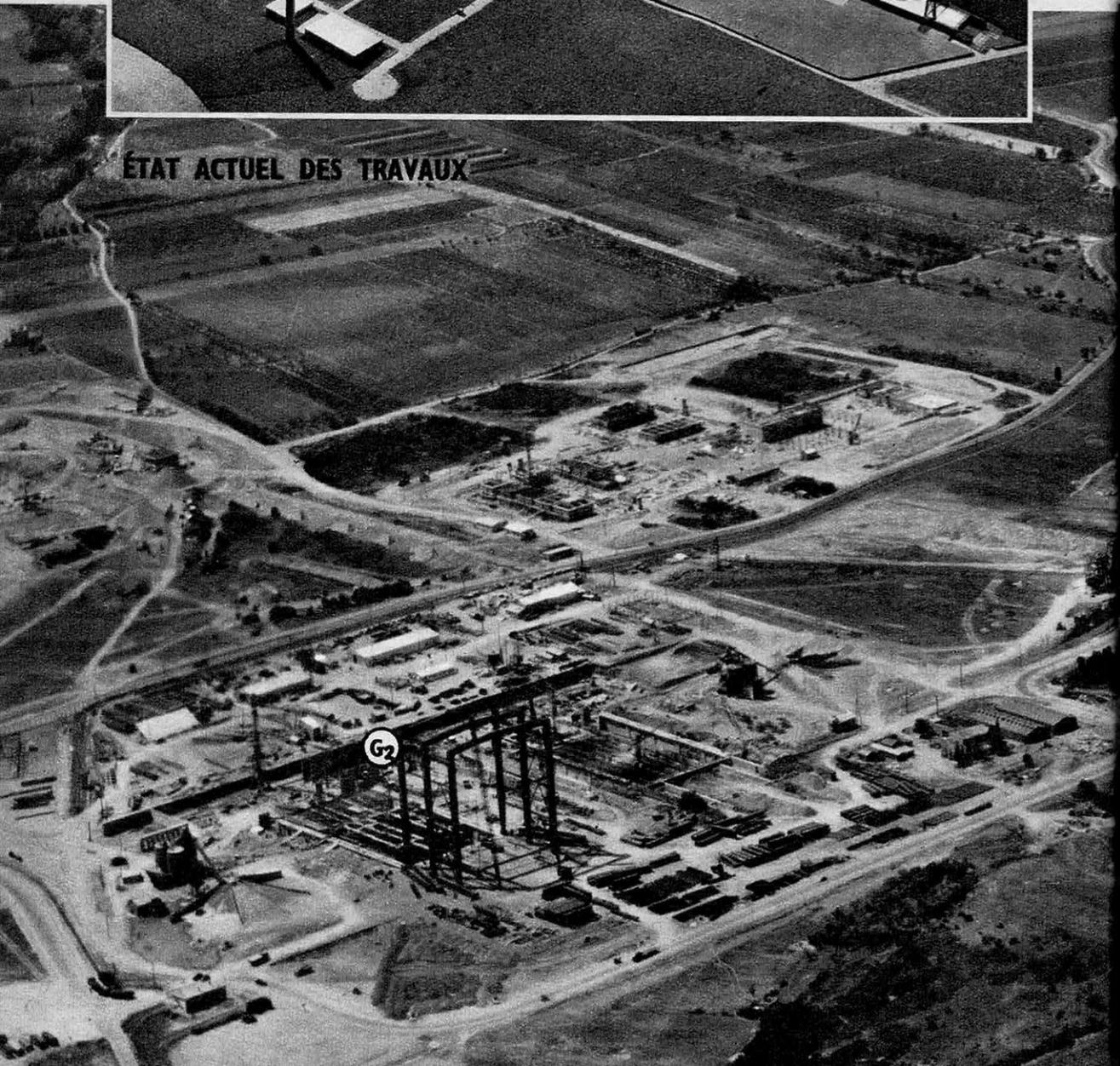
G 1 à Marcoule ; elle prépare en outre l'approvisionnement en combustible des deux autres piles de Marcoule G 2 et G 3. Pour les minerais d'uranothorianite provenant de Madagascar, une nouvelle usine de traitement est en construction. Outre l'uranium, elle permettra d'obtenir des sels de thorium nucléairement purs, sels qui serviront à alimenter les futures piles surgénératrices (« breeders »). Le thorium se transforme en effet en uranium-233 fissile, sous l'effet du bombardement par les neutrons, et sert alors de combustible nucléaire.

Un laboratoire de recherches dépendant du « Département de Chimie », et accolé à l'usine, a pour unique but de rechercher l'augmentation de la production et l'abaissement du prix de revient du métal.

MAQUETTE



ÉTAT ACTUEL DES TRAVAUX



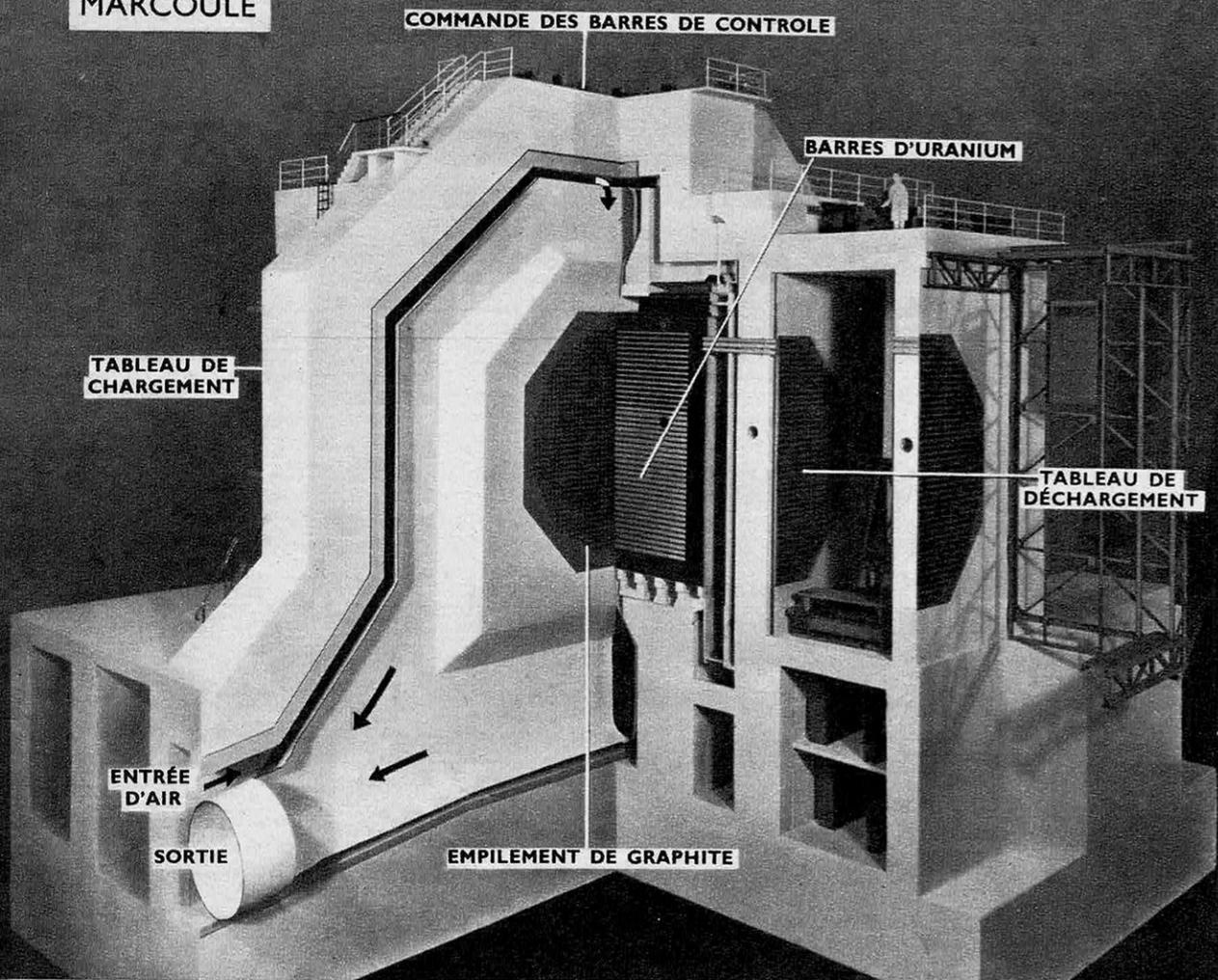
# Le centre industriel de Marcoule

**L**E site choisi pour la construction des trois premières piles atomiques à grande puissance G 1, G 2, G 3 se trouve dans le sud de la France, sur la rive droite du Rhône, à 25 km d'Avignon. Les premiers travaux ont commencé en 1954 par un atelier pour la taille des barres de graphite, ce matériau ayant été choisi comme ralentisseur et réflecteur de neutrons pour les trois piles projetées ; chacun de ces réacteurs en nécessité d'ailleurs plus d'un millier de tonnes, d'une pureté spéciale, dite nucléaire. Leur taille s'effectue avec une extrême précision, dans des conditions de propreté rigoureuse. Leur empilement constitue le « cœur » des piles, cylindre horizontal dans lequel sont ménagés des canaux où prennent place les barreaux d'uranium. D'autres cavités ont dû être prévues dans ce cylindre pour la circulation du fluide (air sous pression pour G 1) chargé d'entraîner la chaleur vers le groupe turboalternateur.

Après dix-huit mois de travaux, G 1 a été mis en service au début de 1956. 2 000 tonnes d'acier auront été utilisées pour le radier qui doit supporter les 30 000 tonnes du bloc pile. Quelque 50 000 tonnes de béton auront été coulées au total, en particulier pour les murs de protection qui recouvrent l'ogive de la charpente métallique. De part et d'autre du bâtiment de la pile s'élève la salle des machines, avec ses soufflantes destinées à faire circuler l'air de refroidissement sous une pression à peine supérieure à celle de l'atmosphère, et la salle de commande avec l'appareillage électronique assurant la conduite et la sécurité de la pile.

La première « divergence » a eu lieu le 7 janvier 1956 et le groupe turboalternateur a délivré ses premiers kilowatts en septembre 1956. La puissance électrique récupérée sera au total de 5 000 kW pour une puissance thermique de 40 000 kW repré-





MAQUETTE DE LA PILE G 1 DE MARCOULE, MONTRANT LES CIRCUITS DE REFROIDISSEMENT.

sentant une partie des 8 000 kW qu'exigent les soufflantes.

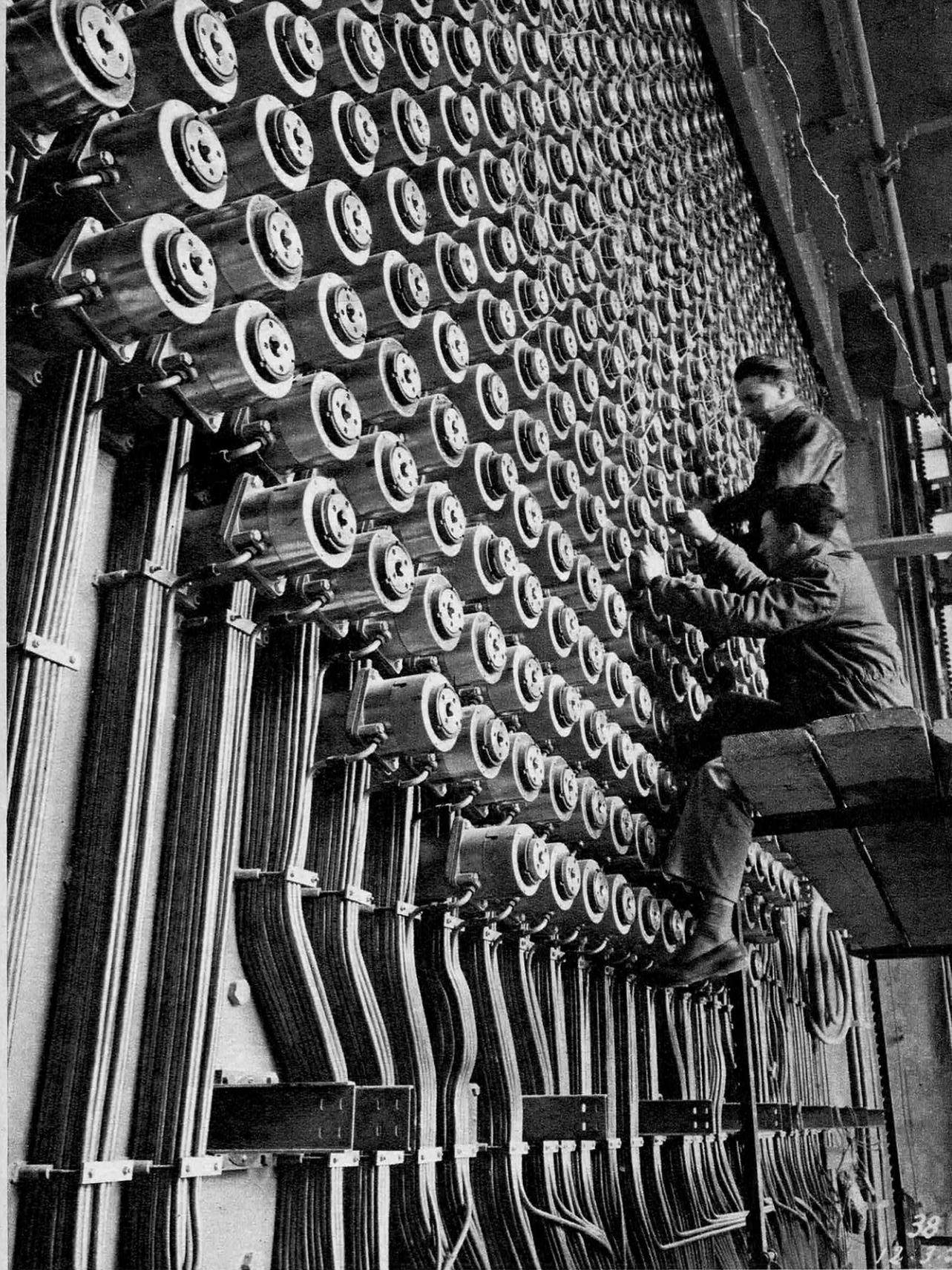
La construction de l'usine de plutonium a commencé au printemps 1955. Au début de 1956, 10 000 m<sup>3</sup> de béton avaient déjà été coulés et, actuellement, les travaux touchent à leur fin. Elle permettra de réaliser l'extraction chimique du plutonium et sa mise sous forme de lingots de métal purifié, la décontamination et la purification de l'uranium appauvri en uranium-235, mais pouvant être facilement réutilisé comme combustible, enfin la séparation et le stockage des produits de fission.

Les principes mis en œuvre à l'installation semi-industrielle de Châtillon seront appliqués, seule la quantité de produits radioactifs traités exigera l'emploi de méthodes encore plus délicates. Les cartouches irradiées dans G 1, seront traitées dès le début de 1957. La production annuelle du plutonium atteindra 100 kg par an avec les trois piles.

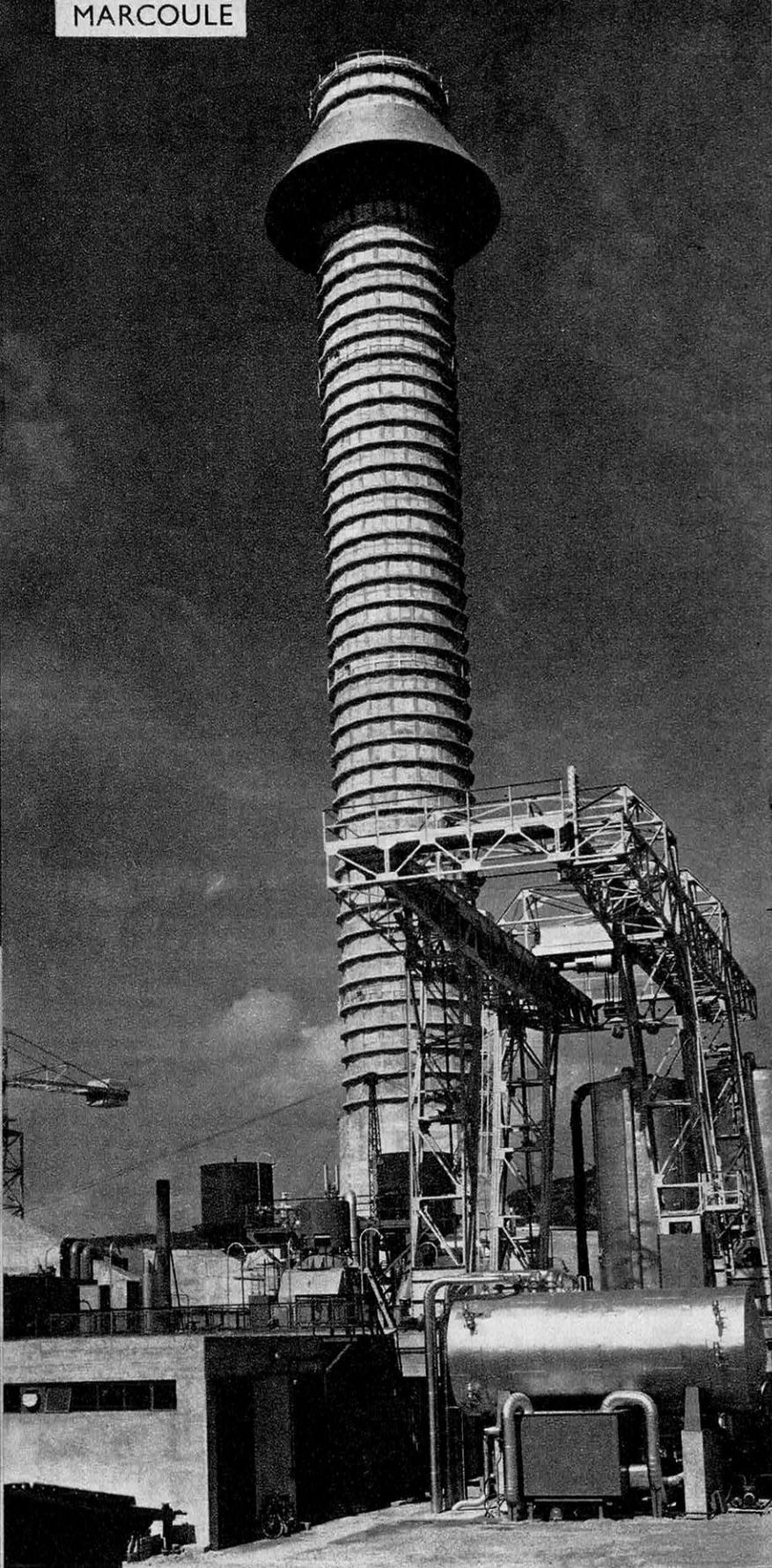
Si G 1 peut être caractérisé par un effort d'industrialisation dans l'emploi de techniques choisies les plus simples possibles en vue d'aboutir vite, G 2 et G 3 correspondront à un nouveau pas en avant à la suite des connaissances acquises grâce aux piles de

Châtillon et de Saclay. Chacun des réacteurs jumeaux utilisera une centaine de tonnes d'uranium comme combustible et un millier de tonnes de graphite comme ralentisseur. Leur puissance calorifique unitaire sera de 150 000 kW et leur refroidissement sera assuré par du gaz carbonique sous une pression de 15 kg/cm<sup>2</sup>. Pour tenir cette pression, les blocs piles seront exécutés en béton précontraint. Les travaux de construction sont en cours. La « divergence » de G 3 suivra à quelques mois celle de G 2 qui est prévue pour le début de 1958.

C'est à l'Electricité de France qu'est revenue l'étude des génératrices électriques associées à chaque pile, en l'occurrence des groupes turboalternateurs transformant en électricité la chaleur produite. Une fois assurée leur propre alimentation, ce sont 60 000 kW qui pourront être fournis par G 2 et G 3 au réseau général de distribution électrique à partir de 1958. Ces premières centrales électriques d'énergie nucléaire, serviront alors d'unités pilotes pour les futures centrales de puissance que l'E.D.F. a projetées. Là, le combustible nucléaire ne sera plus de l'uranium naturel mais de l'uranium enrichi par le plutonium extrait des piles de Marcoule.



*Tableau de chargement de G 1. On voit ici la face antérieure des canaux horizontaux qui contiennent les barres d'uranium, face sur laquelle deux techniciens procèdent à d'ultimes vérifications.*

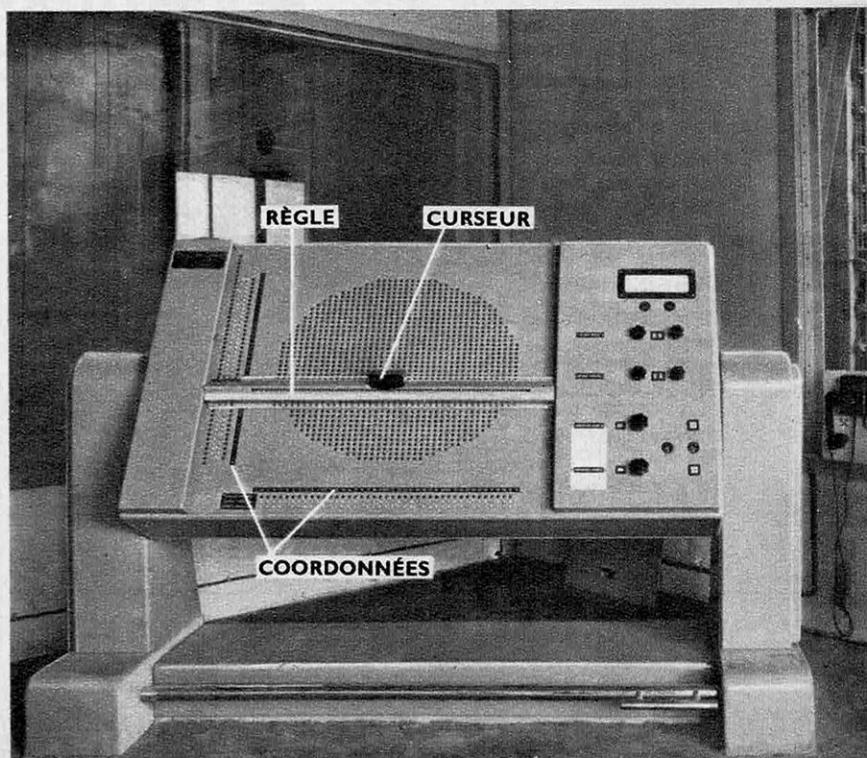


↑  
 Au cœur de G 1 les ouvriers travaillent à la mise en place des blocs de graphite qui constituent à la fois le ralentisseur et le réflecteur. Ces blocs, soigneusement ajustés, sont percés de canaux où seront placées les barres d'uranium.

← Cheminée d'évacuation de l'air de refroidissement du bloc pile G 1. Cet air, peu radioactif, est ainsi plus facilement dilué dans la masse de l'air ambiant et perd toute nocivité. La collerette évite les tourbillons descendants.



**Pupitre de commande des** →  
 installations de chargement  
 et de déchargement. Les  
 cartouches d'uranium sont ainsi  
 manipulées sans fausse ma-  
 nœuvre depuis leur intro-  
 duction par la face antérieure  
 de la pile jusqu'à leur extrac-  
 tion par la face postérieure.  
 La table du pupitre repré-  
 sente une coupe transversale  
 du réacteur. Chaque canal  
 est repéré par des coordon-  
 nées verticales et horizontales  
 grâce au déplacement vertical  
 d'une règle sur laquelle cou-  
 lisse un curseur ; des voyants  
 lumineux matérialisent les  
 ordres en cours d'exécution.



l'eau lourde sous l'action des rayonnements.

En se basant sur le prix de 70 f le gramme d'eau lourde, 20 à 25 f le gramme d'uranium, 0,7 f le gramme de graphite de pureté nucléaire, le coût de EL-2 se situe entre 1 et 2 milliards de francs.

Le réacteur à basse puissance Aquilon, mis en service en août dernier, est essentiellement destiné à des études expérimentales. Il permettra, entre autres choses, de comparer différentes dispositions du combustible nucléaire dans un modérateur liquide, eau ordinaire ou eau lourde. Le réacteur à basse puissance Proserpine sera du type « homogène », c'est-à-dire consistera en un récipient de petites dimensions dans lequel circulera une solution aqueuse de sulfate de plutonium.

La construction de la pile EL-3 à eau lourde et à très haut flux de neutrons ( $10^{14}$  neutrons/cm<sup>2</sup>/sec) est déjà très avancée. Son flux sera environ 10 fois plus élevé que celui de EL-2.

A Marcoule, la première divergence de G1, en janvier 1956, s'est produite avec une masse critique d'une vingtaine de tonnes d'uranium. Au mois de juillet, la montée progressive en puissance était abordée et, le 16 septembre, les 20 000 kW thermiques étaient dépassés. Après réglage des circuits de refroidissement, les 30 000 kW étaient atteints le 28 septembre, la température des gaz permettant alors de produire assez de vapeur pour actionner le groupe turboalternateur. Lorsque la puissance atteindra 40 000 kW thermiques, la puissance électrique disponible sera de 5 000 kW.

Au point de vue production de plutonium, les premières cartouches irradiées dans G1 seront traitées dès le début de l'an prochain, ce qui donnera environ 15 kg par an. La production passera à 100 kg par an lorsque G2 et G3 seront en service.

### **La contribution de l'industrie française**

L'intérêt, pour le pays, du développement de l'énergie atomique et de ses applications n'a pas échappé à l'industrie française qui a apporté au Commissariat à l'Energie Atomique une collaboration efficace. La ligne de conduite du Commissariat a d'ailleurs toujours été d'inciter les entreprises privées ou les services industriels publics à introduire chez eux les techniques nucléaires et à se familiariser avec elles. Aujourd'hui, l'industrie collabore dès le stade des études, maintenant une liaison aussi intime que celle qui existe, dans une même société entre le laboratoire et le bureau d'études.

Des achats de produits chimiques et d'appareillages classiques ont été rapidement suivis de commandes spéciales. Citons deux contrats de fournitures, celui du calcium de

pureté nucléaire, indispensable dans la fabrication de l'uranium (Sté Electrometallurgique du Planet) et celui du graphite ultra-pur (Péchiney); ils portent respectivement sur 250 millions et plus de 2 milliards de francs.

A l'industrie électronique, le Commissariat a adressé des appels d'offres très importants (Central de télécommunications, Derveaux, Electronique et Physique appliquée, etc.). Ils ont entraîné des commandes dont le montant dépasse 700 millions de francs. D'autre part, la Direction des Recherches et Exploitations minières fait appel à toute la gamme des matériels miniers dont certains ont été spécialement étudiés pour elle.

La Société Kuhlmann a mis au point une installation pilote de traitement chimique des minerais uranifères qui sert à l'établissement de l'usine de Vendée. Pour leur part, le groupe Loire-Penhoët est entreprise pilote pour la construction du nouveau réacteur EL-3 de Saclay, St-Gobain est chargé de la réalisation de l'usine de traitement de plutonium de Marcoule, tandis que la Compagnie française de l'Eau Lourde et la Société Pierrefitte-Kalaa-Djerda vont permettre au Commissariat de réduire ses onéreuses importations d'eau lourde.

La politique adoptée en France est voisine de celle qui est pratiquée aux Etats-Unis, où l'entreprise générale des réalisations est confiée à des groupes industriels dont les travaux sont poursuivis sous l'autorité d'une Commission gouvernementale.

C'est dans cet état d'esprit que viennent de se créer de nouveaux groupements : Indatom, France-Atome, l'Association Technique pour la Production et l'Utilisation de l'Energie Nucléaire, etc., qui rassemblent de nombreuses sociétés importantes.

Deux exceptions sont à signaler : le Commissariat gère lui-même, au Bouchet, l'établissement industriel où est produit l'uranium métallique et il a dû procéder à la mise en exploitation de plusieurs mines d'uranium.

Un chiffre résume à lui seul l'effort de la France dans le domaine de l'énergie nucléaire, c'est celui de 100 milliards adopté en mai 1955 pour le nouveau plan triennal. Mais l'activité de notre industrie nucléaire ne se limite pas au seul plan national, de multiples échanges ont lieu avec les pays étrangers : Etats-Unis, Grande-Bretagne, Inde (travaux communs sur l'utilisation du béryllium et de l'oxyde de béryllium); Commission Atomique israélienne (usine pilote de préparation d'eau lourde), Suède (fabrication du premier jeu de barres d'uranium métallique de son réacteur), Norvège (graphite). Ainsi en développant sa propre industrie, la France ne cesse d'apporter une contribution efficace à la collaboration internationale dans le domaine nucléaire.

# LA RELÈVE DU CHARBON PAR L'URANIUM

L'APPLICATION la plus évidente de la fission est la production d'énergie. Puisque l'on sait, par des montages appropriés, obtenir des réactions en chaîne, les empêcher de se transformer en explosions destructrices et contrôler avec précision le flux d'énergie qu'elles libèrent, l'uranium doit normalement prendre rang parmi les « combustibles ». La chaleur que l'on parvient à lui faire dégager dans les réacteurs doit pouvoir servir à produire de la vapeur pour alimenter une centrale électrique, au même titre que celle que le charbon ou le fuel-oil engendrent en brûlant dans les foyers des chaudières classiques.

Que l'opération soit techniquement réalisable a été d'ores et déjà surabondamment démontré : dès 1951, un réacteur expérimental à Arco, aux Etats-Unis, a actionné un turbo-alternateur raccordé à un réseau de distribution ; la performance était modeste puisque la puissance ne dépassait pas 150 kW. On a fait beaucoup mieux depuis, aux Etats-Unis mêmes, avec d'autres réacteurs expérimentaux et avec les prototypes destinés aux sous-marins à propulsion atomique Nautilus et Seawolf. L'U.R.S.S. exploite depuis 1954 une petite centrale de 5 000 kW, puissance voisine de celle que livre le premier grand réacteur français de Marcoule ; la Grande-Bretagne, avec les réacteurs de Calder Hall mis en service officiellement en octobre dernier, atteint le cap des 100 000 kW.

## La grande pénurie d'énergie

Il ne s'agirait que d'expériences et de réalisations isolées sans grande portée pratique si, en même temps que les économistes et les techniciens dressent, non sans inquiétude, l'inventaire des sources d'énergie électrique et évaluent la durée probable des gisements de charbon et de pétrole, la prospection méthodique de l'uranium ne confirmait l'abondance de ses minerais exploitables. On a la certi-

tude dès aujourd'hui qu'aucune pénurie de combustible nucléaire ne s'opposera à la multiplication des réacteurs de puissance lorsque celle-ci deviendra nécessaire. La relève sera assurée sans qu'il soit mis en danger l'avenir de notre civilisation mécanique, fondée sur l'abondance de la force motrice.

L'énergie nucléaire arrive ainsi à son heure, presque providentiellement. On a pu calculer que, pour donner au monde entier un standard de vie approchant celui des Etats-Unis, il faudrait multiplier par 5 la quantité d'énergie développée actuellement ; s'il en était ainsi, les réserves énormes de combustibles fossiles : charbon, pétrole, gaz naturel, appelées à en fournir la quasi-totalité (la part de l'hydraulique, dont la période de croissance rapide est terminée, ne pouvant guère dépasser 1 %) seraient épuisées en 50 ou 60 ans. Cette estimation sommaire n'a pour but que de souligner la gravité du problème auquel auront à faire face nos petits-enfants si nous ne cherchons pas dès aujourd'hui des sources d'énergie de remplacement. En fait, dans le monde actuel, la comparaison des réserves et des besoins, faite en tenant compte du doublement de la demande tous les dix ans, loi assez bien vérifiée jusqu'ici dans de nombreux pays, laisse espérer que la crise de l'énergie ne se fera pas sentir avant au moins un siècle sur le plan mondial. Mais les ressources énergétiques, combustibles fossiles ou hydraulique, sont très inégalement réparties géographiquement. Certains pays, les Etats-Unis par exemple, disposent de charbon en grande quantité et pourraient vivre et se développer sur leurs réserves pendant plusieurs siècles. D'autres, comme l'Inde, n'ont même pas commencé leur équipement hydroélectrique. Dans les pays insuffisamment pourvus en charbon, le prix de l'énergie se trouve grevé de frais de transport. En outre, ce combustible va devenir de plus en plus cher avec les difficultés croissantes d'extraction. Rares sont



les régions où, d'ici l'an 2000, on pourra faire face aux besoins toujours croissants de la consommation sans augmentation sensible de prix.

### **Les besoins commandent**

On conçoit que chaque nation adapte ses programmes d'équipement nucléaire suivant ses ressources et ses besoins particuliers. La Grande-Bretagne, pays industriel qui tire pratiquement toute son énergie d'un charbon de plus en plus profond, de plus en plus coûteux, dépourvue de pétrole et de gaz naturel, se lance dès maintenant dans un programme massif de centrales atomiques de grande puissance. Pour le Canada, dont l'équipement hydroélectrique est loin d'être achevé et qui dispose des pétroles de l'Alberta, l'énergie d'origine atomique présente beaucoup moins d'intérêt immédiat, sauf pour réduire les différences de prix de l'électricité d'un

point à l'autre de son territoire très étendu.

La position de la France est intermédiaire entre celles de la Grande-Bretagne et du Canada : son approvisionnement en charbon, insuffisant avec les seules ressources métropolitaines, est complété sans trop de difficultés par des importations, et il lui reste un certain nombre de sites hydrauliques à équiper. Aussi le programme nucléaire industriel est-il plus modeste et vise-t-il surtout à préparer l'industrie aux tâches qui l'attendent, ainsi qu'on l'a vu plus haut. Les prototypes de Marcoule livreront 60 000 kW en 1958 et, en 1959, la centrale de l'Electricité de France, installée sur la Loire, développera 60 000 kW : tous les trois ou quatre ans, la puissance installée chaque année doit doubler.

Quant aux Etats-Unis, bien que le charbon y soit très bon marché, bien que des équipements hydrauliques avantageux puissent encore être installés sur de nombreuses rivières,



## La première centrale nucléaire britannique

**C**'est à proximité immédiate de l'usine d'extraction du plutonium de Windscale, dans le Cumberland, et des deux réacteurs qui y fonctionnent depuis 1950, que la centrale de Calder Hall a été édifiée. On en voit ci-dessus, à gauche, la première section, Calder Hall A, avec ses réfrigérants-tours hyperboliques (l'usine de Windscale est à droite). Cette première section, inaugurée le 17 octobre dernier, doit livrer 92 000 kW au total, dont 65 000 kW pour le réseau national d'interconnexion, le reste allant à d'autres installations de l'Atomic Energy Authority. Quand la seconde section entrera en fonctionnement, d'ici 18 mois environ, la puissance sera doublée et ce seront 150 000 kW environ qui seront disponibles pour le réseau général de distribution. Il y aura alors en tout quatre réacteurs alimentant deux usines avec chacune 4 turboréacteurs. L'énergie électrique n'est

cependant ici qu'accessoire, les réacteurs étant avant tout prévus pour la fabrication du plutonium et fonctionnant à température relativement modérée. Ils utilisent de l'uranium naturel, du graphite, et du gaz carbonique pour leur refroidissement. Deux autres stations du même type sont en construction à Chapel Cross près d'Annan et seront terminées en 1958. A ce moment, l'Atomic Energy Authority aura en fonctionnement huit réacteurs de puissance délivrant au total un million et demi de kilowatts-chaudeur. On voit à gauche l'étage de chargement et de déchargement d'un des réacteurs de Calder Hall A, au-dessus de l'énorme massif de béton qui l'entoure. Chacun des 106 orifices que l'on aperçoit dessert 16 des canaux où sont logés les barreaux de combustible nucléaire. Sur soixante de ces orifices sont montés les mécanismes actionnant les barres de réglage.



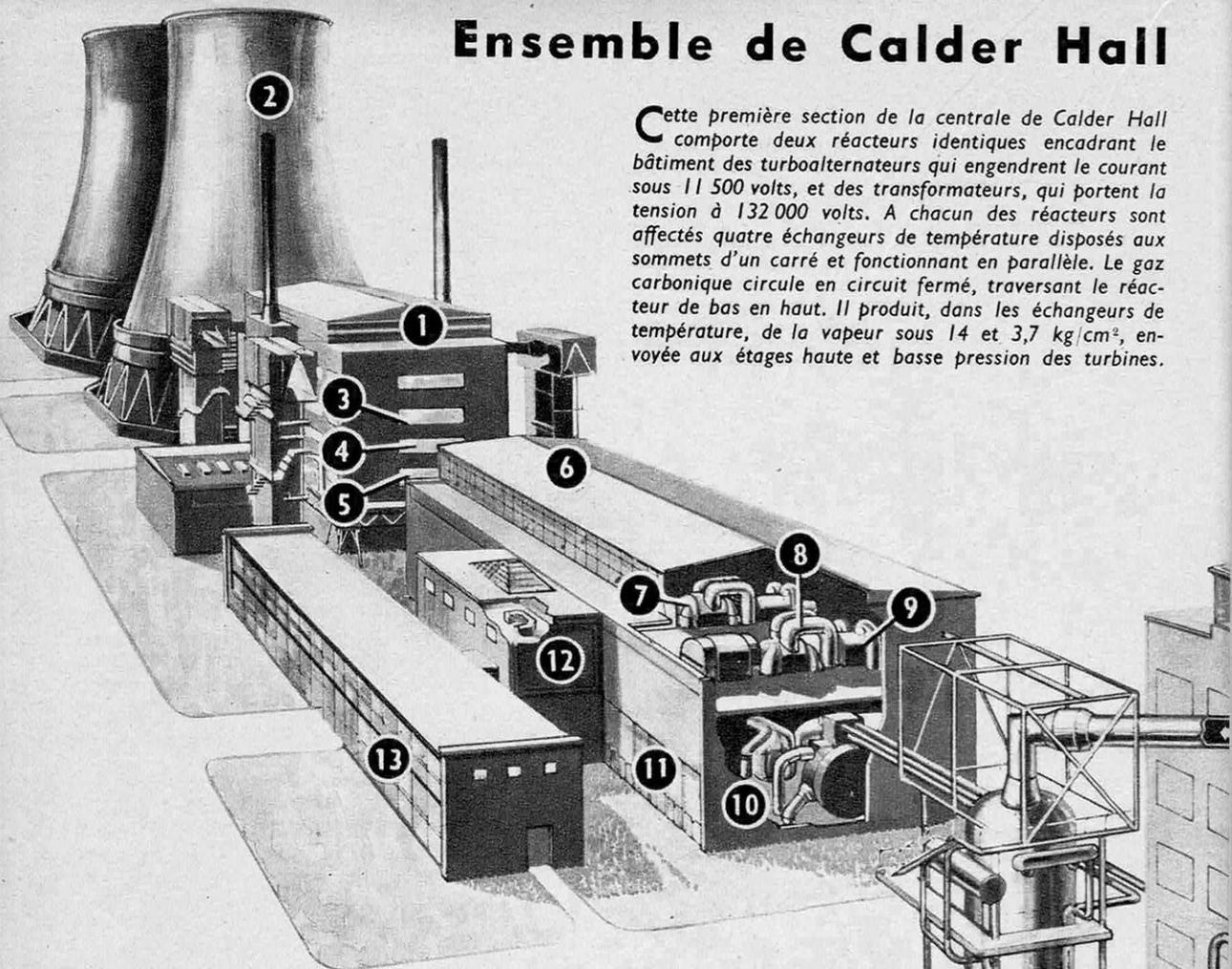
bien que le pétrole et le gaz naturel y soient abondants, plusieurs centrales électriques de grande puissance, de conceptions différentes, sont en construction. La Commission de l'Energie Atomique américaine finance la plupart de ces projets, au moins partiellement, et délivre les autorisations nécessaires à ceux proposés par les entreprises privées, car elle est la seule dispensatrice de combustible nucléaire. Sa politique est de déterminer, par la construction de prototypes successifs et l'étude de leur comportement, quels sont les modèles de réacteurs de puissance dont le prix de revient est le plus bas et dont l'exploitation est la plus sûre et la plus économique. La situation privilégiée des Etats-Unis, quant à l'abondance des sources d'énergie conventionnelles, leur permet d'attendre les résultats de ces réacteurs expérimentaux, d'ailleurs plus évolués que ceux qu'édifient les pays de l'Europe occidentale, avant d'entreprendre leur

équipement nucléaire à une grande échelle. D'ici cinq ou dix ans, les « breeders » ou sur-générateurs seront vraisemblablement au point et on pourra aisément les multiplier en utilisant, pour les premières charges, les stocks de matières fissiles, uranium-235 et plutonium, accumulés pour l'armée.

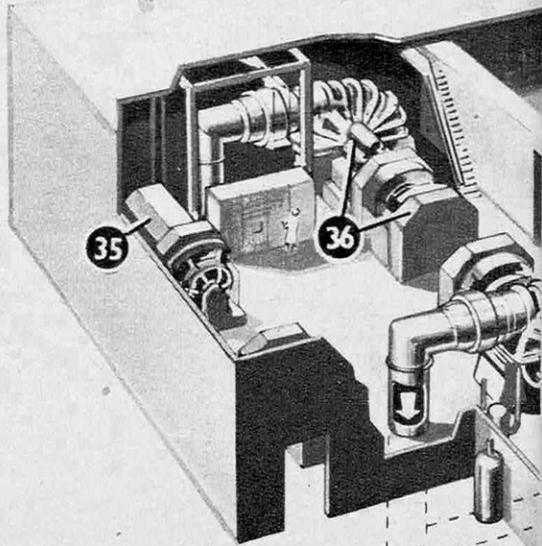
D'ici cinq ou dix ans aussi, l'expérience acquise dans le monde permettra aux centrales nucléaires de livrer le kilowatt-heure à un prix comparable à celui des centrales classiques. Le prix de revient actuel est difficile à évaluer : il est certainement peu favorable, car les rendements sont encore médiocres, mais ils iront en s'améliorant. De même, avec les progrès de la technique, les frais d'établissement d'une centrale nucléaire deviendront bientôt comparables à ceux d'une centrale thermique fonctionnant au charbon. Seule, l'usure des installations semble devoir être un peu plus rapide : la « vie » d'un réacteur semble devoir

# Ensemble de Calder Hall

Cette première section de la centrale de Calder Hall comporte deux réacteurs identiques encadrant le bâtiment des turboalternateurs qui engendrent le courant sous 11 500 volts, et des transformateurs, qui portent la tension à 132 000 volts. A chacun des réacteurs sont affectés quatre échangeurs de température disposés aux sommets d'un carré et fonctionnant en parallèle. Le gaz carbonique circule en circuit fermé, traversant le réacteur de bas en haut. Il produit, dans les échangeurs de température, de la vapeur sous 14 et 3,7 kg/cm<sup>2</sup>, envoyée aux étages haute et basse pression des turbines.



- |  |  |
|--|--|
| 1. Réacteur N° 1                               | 21. Sortie du gaz carbonique chaud   |
| 2. Tours de refroidissement de la centrale     | 22. Barreaux de combustible  |
| 3. Préparation du combustible                  | 23. Ecran thermique en acier   |
| 4. Analyse des gaz                             | 24. Arrivée du gaz carbonique froid  |
| 5. Poste de commande                           | 25. Entrée d'air de balayage   |
| 6. Hall des turbines                           | 26. Sortie du gaz carbonique chaud   |
| 7. Alternateur de 21 000 kW                    | 27. Evacuation du combustible usé  |
| 8. Turbine basse pression                      | 28. Container blindé   |
| 9. Turbine haute pression                      | 29. Transport de combustible usé à l'usine de Windscale pour extraction du plutonium |
| 10. Condenseur                                 | 30. Surchauffeur à haute pression  |
| 11. Transformateurs                            | 31. Collecteur de vapeur haute pression  |
| 12. Poste de commutation                       | 32. Surchauffeur à basse pression et économiseurs                                    |
| 13. Bloc administratif                         | 33. Collecteur de vapeur basse pression  |
| 14. Réacteur N° 2                              | 34. Vapeur à haute pression envoyée à la turbine                                     |
| 15. Pont roulant                               | 35. Groupe convertisseur   |
| 16. Machine de chargement légèrement blindée   | 36. Moteur et ventilateur de circulation du gaz carbonique                           |
| 17. Machine de déchargement fortement blindée  |  |
| 18. Ventilateur d'évacuation d'air de balayage |  |
| 19. Echangeurs de température                  |  |
| 20. Ecran biologique de 2 m d'épaisseur        |  |



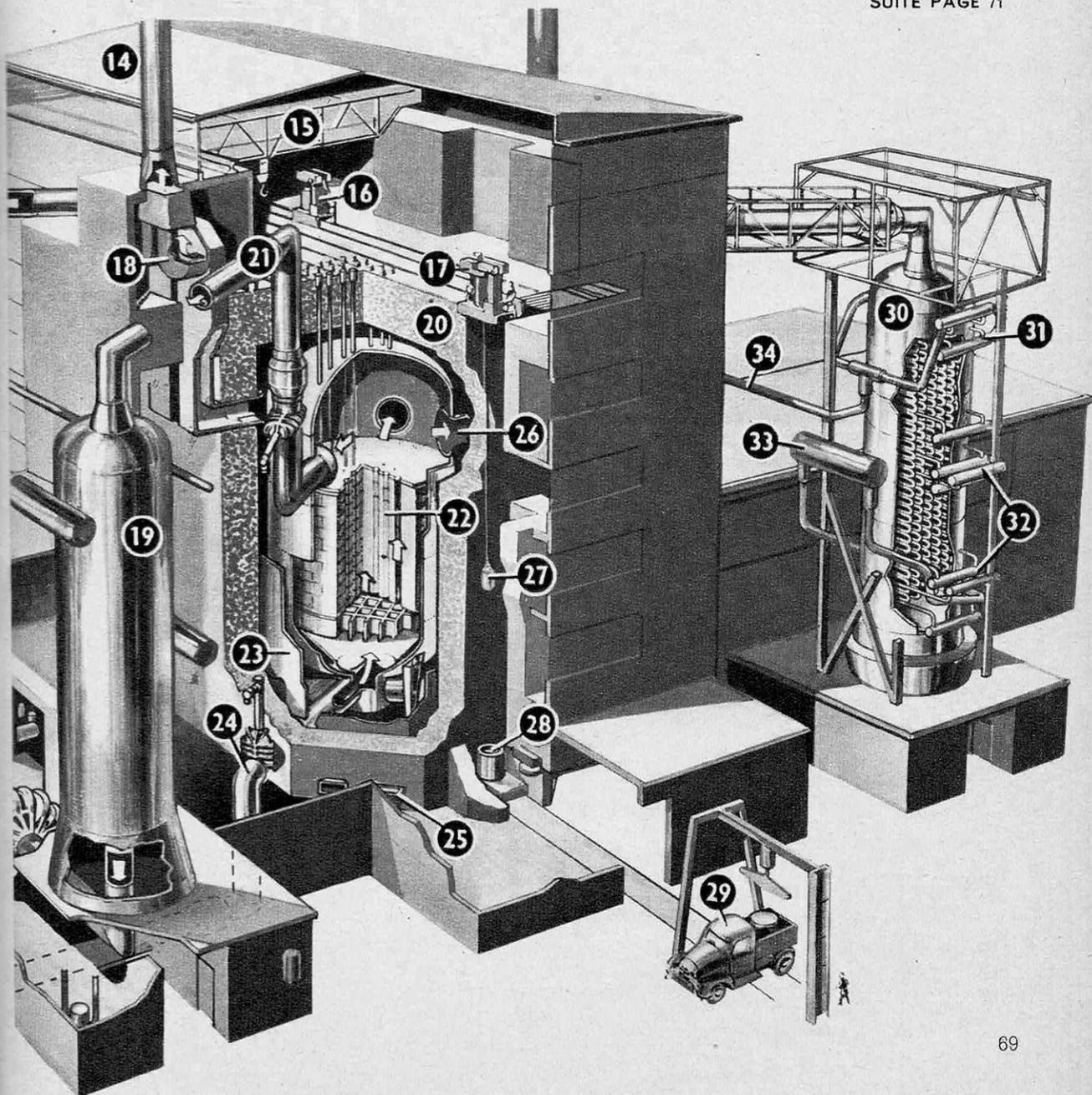
s'étaler sur une vingtaine d'années (plusieurs piles fonctionnent déjà depuis plus de dix ans d'une manière satisfaisante), contre trente pour celle d'une centrale classique. En contrepartie, les frais d'exploitation et les dépenses de combustible seront minimales. Celles-ci pourront même peut-être devenir négatives lorsque les « breeders » perfectionnés fabriqueront plus de matière fissile qu'ils n'en consommeront.

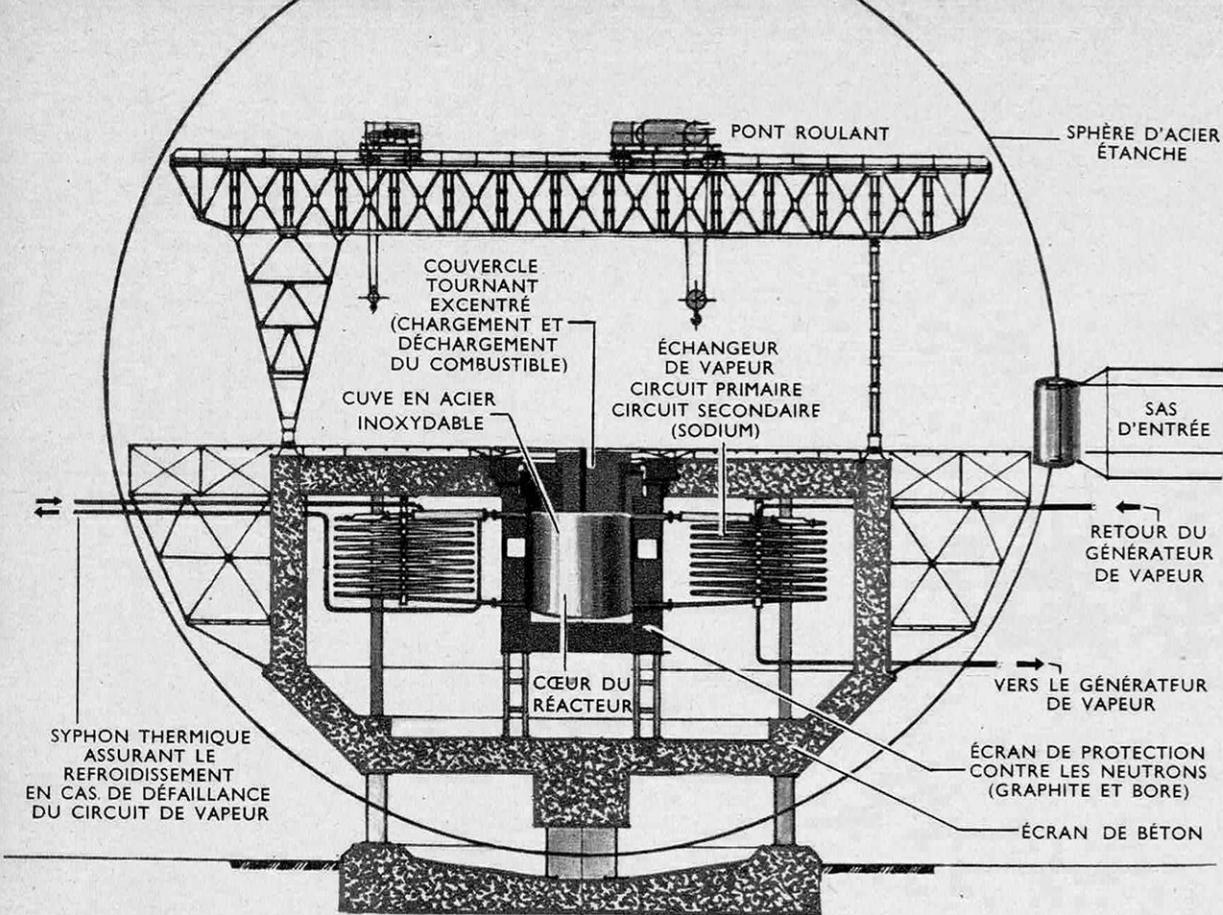
### Les « breeders » décupleront le rendement des réacteurs

La mise au point des « breeders » marquera l'étape décisive dans le développement industriel de l'énergie nucléaire. Dans les réacteurs que l'on sait construire actuellement

avec l'uranium naturel, on tire du combustible une énergie équivalant seulement à celle que livrerait 10 000 fois son poids de charbon. D'ici quelques années, on parviendra sans doute à multiplier le rendement par 10. Dans quelque dix ans, avec les « breeders », le rendement équivaldra à un million de fois le poids du combustible en charbon, de sorte que si, en l'an 2000, toute l'électricité de la planète était fournie par l'uranium, on ne consommerait par an que quelques milliers de tonnes, moins que l'on en a extrait en 1955. Ces « breeders » à uranium très enrichi en matière fissile seront vraisemblablement plus faciles à construire que les réacteurs à uranium naturel, plus compacts, et avec un meilleur bilan de neutrons pour assurer la con-

SUITE PAGE 71

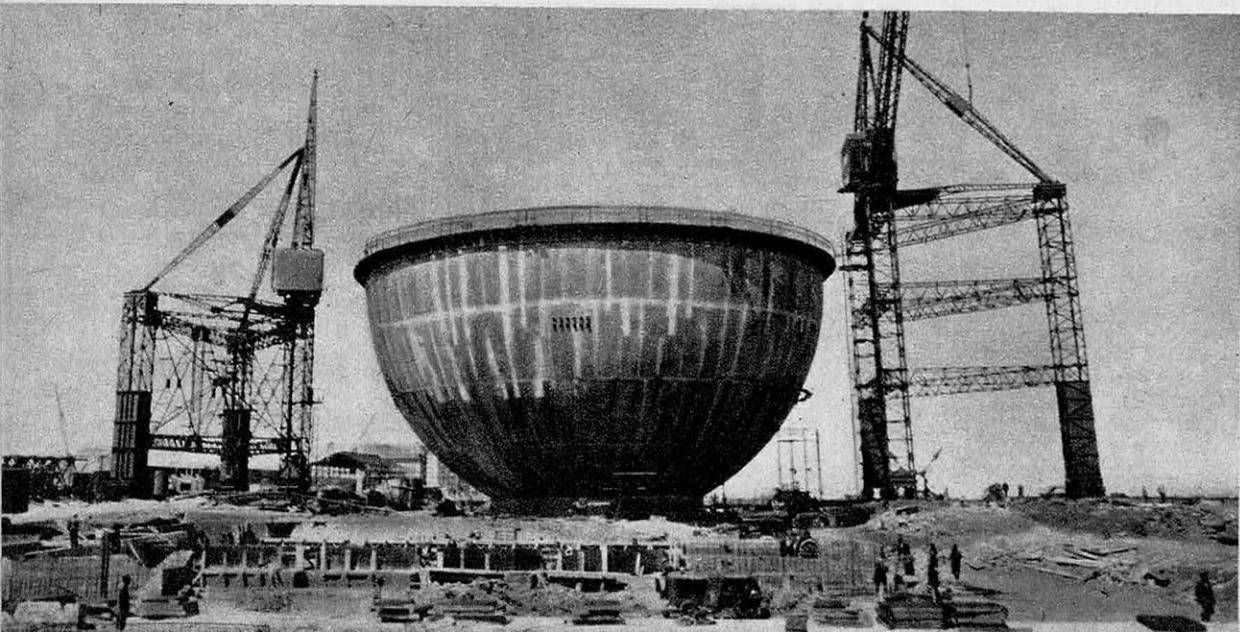




## Le "breeder" rapide de Dounreay

Ce réacteur expérimental est actuellement en construction sur la côte nord de l'Écosse ; il doit être achevé en 1958. Son combustible sera de l'uranium très enrichi en matière fissile, uranium-235 ou plutonium-239. Il ne comportera pas de modérateur et utilisera les neutrons rapides. Il fonctionnera à haute température et sera refroidi par du sodium liquide circulant en circuit fermé dans le massif de

béton et cédant sa chaleur à un circuit secondaire de sodium produisant de la vapeur dans un échangeur de température. Autour du cœur du réacteur, une enveloppe de thorium engendrera de l'uranium-233, matériau fissile. On voit ci-dessous, en cours d'édification, la sphère étanche en acier de 30 m de diamètre qui, en cas d'incident, empêchera les matières radioactives de se répandre dans le voisinage.



# LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES DE LA GRANDE-BRETAGNE

EMPLACEMENT	RÉACTEURS	TYPE	PUISSANCE	DATE DE MISE EN FONCTIONNEMENT
HARWELL	Gleep	Uranium naturel, graphite, expérimental.	100 kW	1947
HARWELL	Bepo	Uranium naturel, graphite, expérimental, production de radioisotopes .....	6 MW	1948
WINDSCALE	Windscale	Uranium naturel, graphite, deux réacteurs pour production de plutonium .....		1950
HARWELL	Zephyr	Plutonium, breeder expérimental .....	100 W	1954
HARWELL	Dimple	Uranium enrichi, eau lourde, expérimental	quelques W	1954
HARWELL	Dido	Uran.-235 presque pur, eau lourde, exp.	10 MW	1956
HARWELL	Pluto I	Uranium enrichi, eau lourde, exp. ....	10 MW	1957
CAITHNESS	Dounreay	Uranium-235 ou plutonium, thorium, breeder .....	60 MW	1958
CAITHNESS	Pluto II	Comme Pluto I .....	10 MW	1958
HARWELL	Zeus	Uranium enrichi, breeder, exp. ....	100 W	1955
HARWELL	Lido	Uranium enrichi, type piscine .....	100 kW	1957
CUMBERLAND	Calder Hall A	Uranium naturel, graphite, gaz carbonique	92 MW (électr.)	1956
CUMBERLAND	Calder Hall B	Comme Calder Hall A .....	92 MW (électr.)	1958
DUMFRIESSHIRE	Chapel Cross	Comme Calder Hall B (4 réacteurs pour l'armée) .....	184 MW (électr.)	1958
HARWELL	Homogène	Sel d'uranium enrichi, breeder, exp. ....	quelques W	1957
HARWELL	Suspension	Suspension d'uranium enrichi, exp. ....		1957
BRADWELL BERKELEY	Pippa I à 4	Uranium naturel-graphite (2 centrales élect.) .....	300 MW (électr.)	1960

+ 10 centrales électriques terminées en 1965.

Non compris quelques réacteurs expérimentaux réalisés ou projetés par l'industrie privée.

SUITE DE LA PAGE 69

version de l'uranium-238 et du thorium respectivement en plutonium ou en uranium-233, selon le cycle choisi.

On a vu précédemment qu'il n'existe que trois éléments fissiles : l'uranium-235, le plutonium-239 et l'uranium-233. Seul le premier se trouve dans la nature et constitue donc le point de départ obligatoire de toute l'industrie nucléaire. C'est lui qui permet la fabrication du plutonium qui, espère-t-on, servira à enrichir le combustible des « breeders » plus économiquement que l'uranium-235 que les Etats-Unis, l'U.R.S.S. et, à une moindre échelle, la Grande-Bretagne, parviennent à extraire à grands frais de l'uranium naturel.

Dans un « breeder » fonctionnant suivant le cycle uranium-plutonium, le cœur du réacteur chargé en plutonium dégage de la chaleur utilisable industriellement, tandis que, dans l'uranium disposé à son voisinage, il engendre plus de plutonium qu'il n'en est détruit par fission. Périodiquement, les matériaux sont extraits du réacteur et traités chimiquement ; une partie du plutonium sert à recharger le cœur du réacteur, et celui en excès est mis en réserve pour l'édification de nouvelles installations.

Le thorium, étant une matière « fertile »

au même titre que l'uranium-238, peut remplacer l'uranium dans ce cycle. L'uranium-233 qu'il donne présente certains avantages pratiques sur le plutonium, car il est beaucoup moins toxique. La toxicité du plutonium est telle, en effet, que toutes les opérations de conditionnement des charges doivent être conduites avec de grandes précautions, en faisant appel à toutes les ressources de l'automatisation. Les propriétés physiques du plutonium sur lesquelles doivent se fonder ses traitements métallurgiques sont en outre beaucoup moins bien connues que celles de l'uranium.

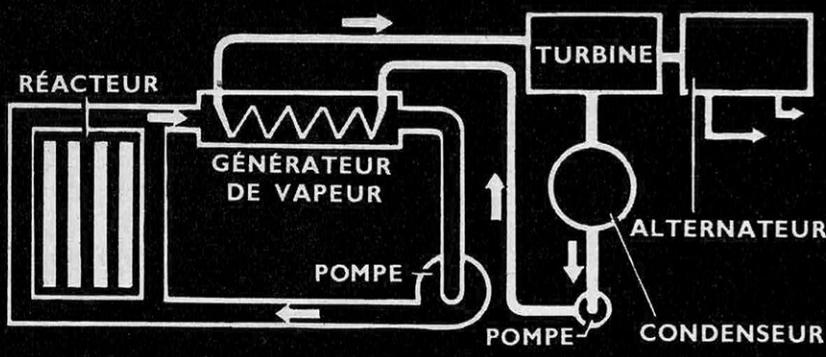
Quoi qu'il en soit, le traitement du combustible et des matériaux fertiles représente la dépense principale dans l'exploitation des « breeders ». Ce type de réacteur, qui sera sans doute celui de l'avenir, pose cependant des problèmes technologiques ardues dont les solutions proposées n'ont pas encore fait leurs preuves. On y travaille activement en plusieurs pays.

## En Grande-Bretagne, 4 000 000 kW nucléaires en 1965

C'est en Grande-Bretagne que le programme de centrales nucléaires est le plus important et le plus cohérent. Il est fondé essentiel-

71

SUITE PAGE 75



ÉLÉMENTS D'OXYDE D'URANIUM NATUREL

TIGES DE CONTROLE EN HAFNIUM

GRILLE MAINTENANT LES ÉLÉMENTS EN PLACE

ÉLÉMENTS D'ALLIAGE ZIRCONIUM-URANIUM TRÈS ENRICHI

CUVE EN ACIER RECOUVERTE D'ACIER INOXYDABLE



ÉLÉMENTS D'OXYDE D'URANIUM NATUREL RECOUVERTS D'ALLIAGE DE ZIRCONIUM

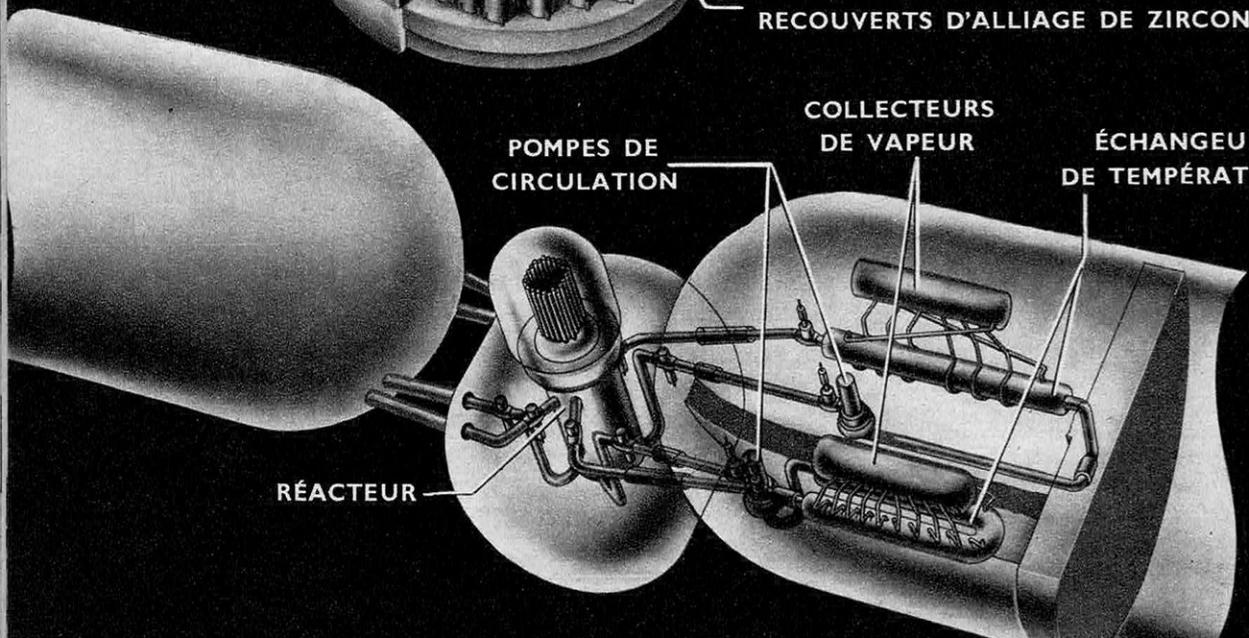


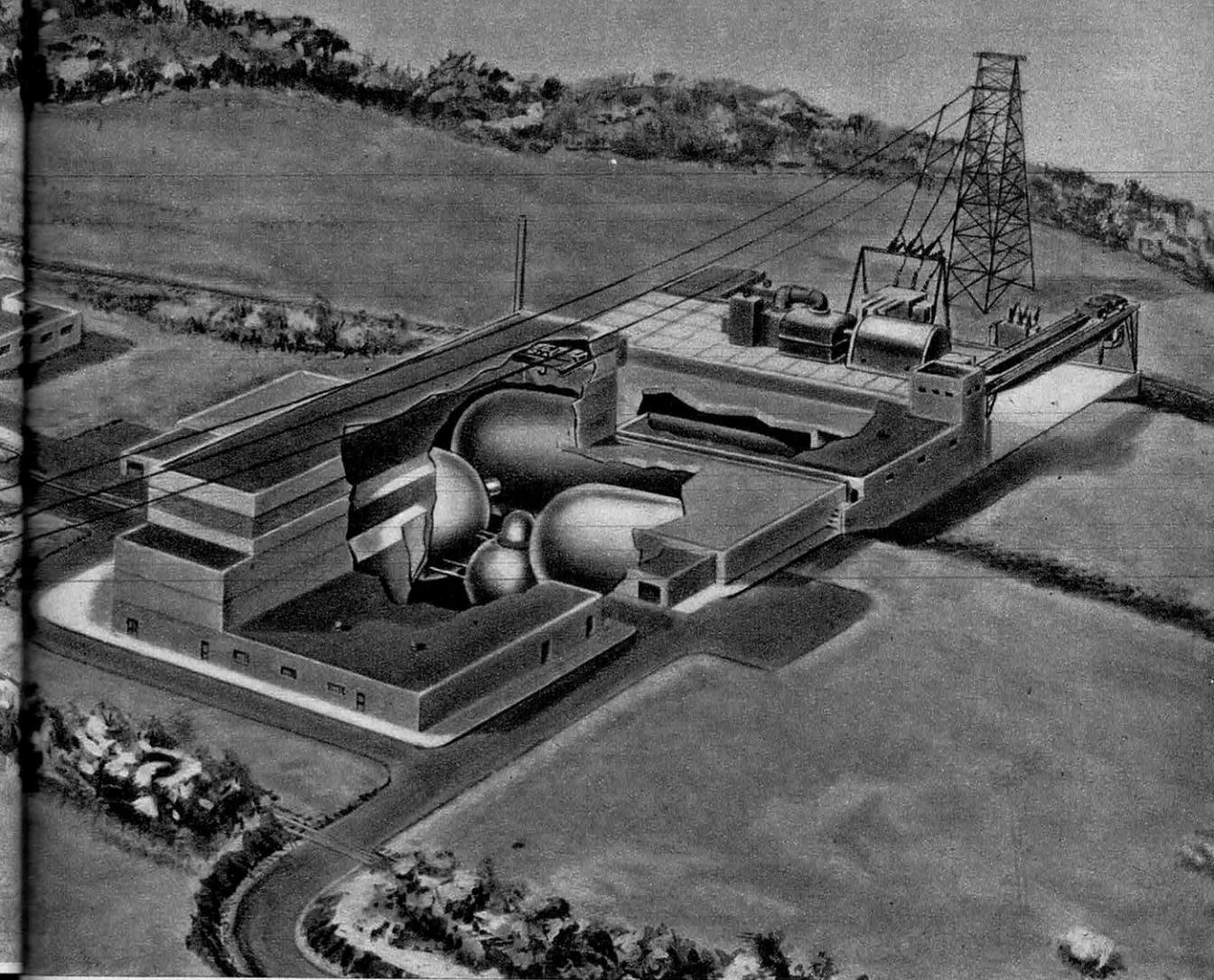
POMPES DE CIRCULATION

COLLECTEURS DE VAPEUR

ÉCHANGEURS DE TEMPÉRATURE

RÉACTEUR

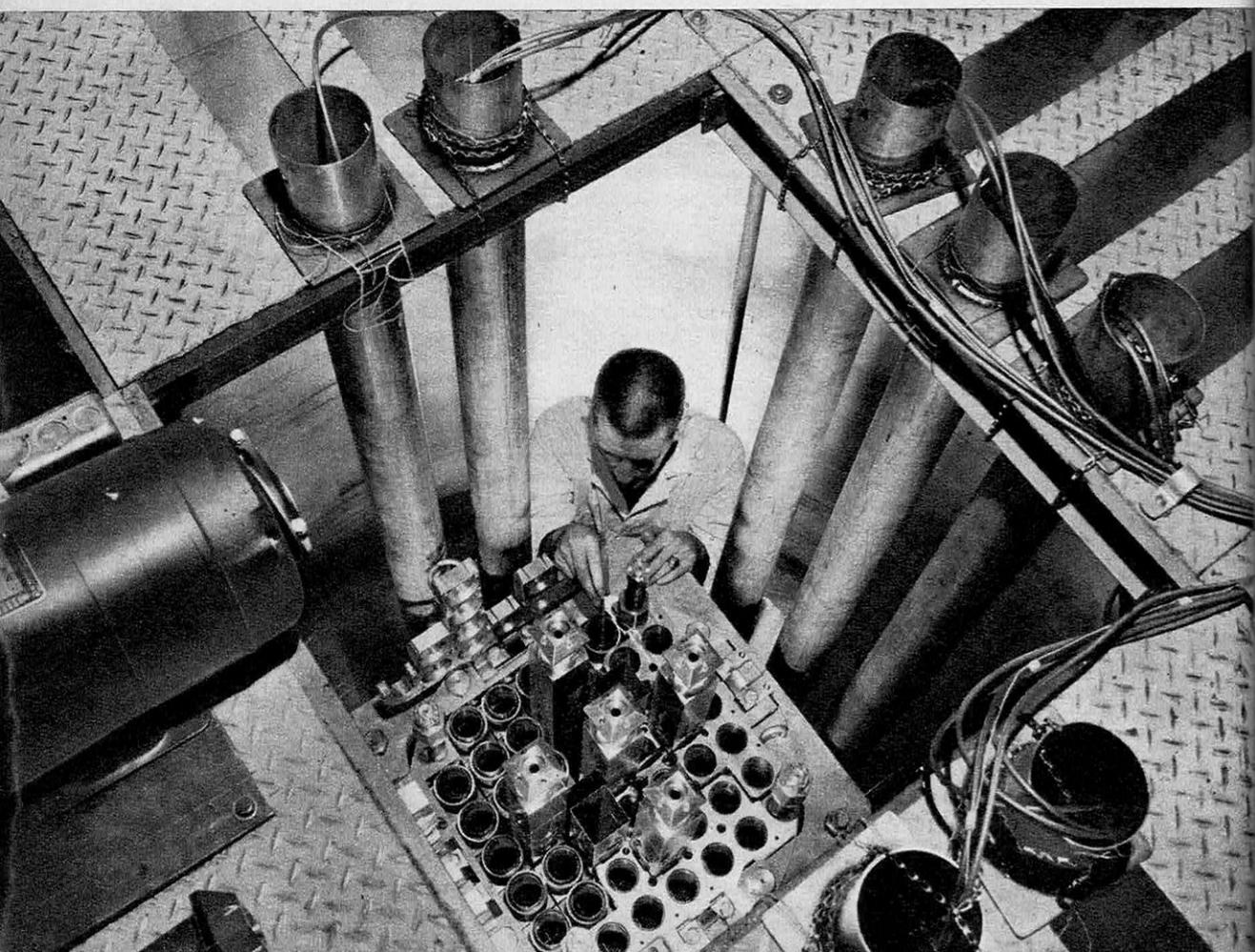
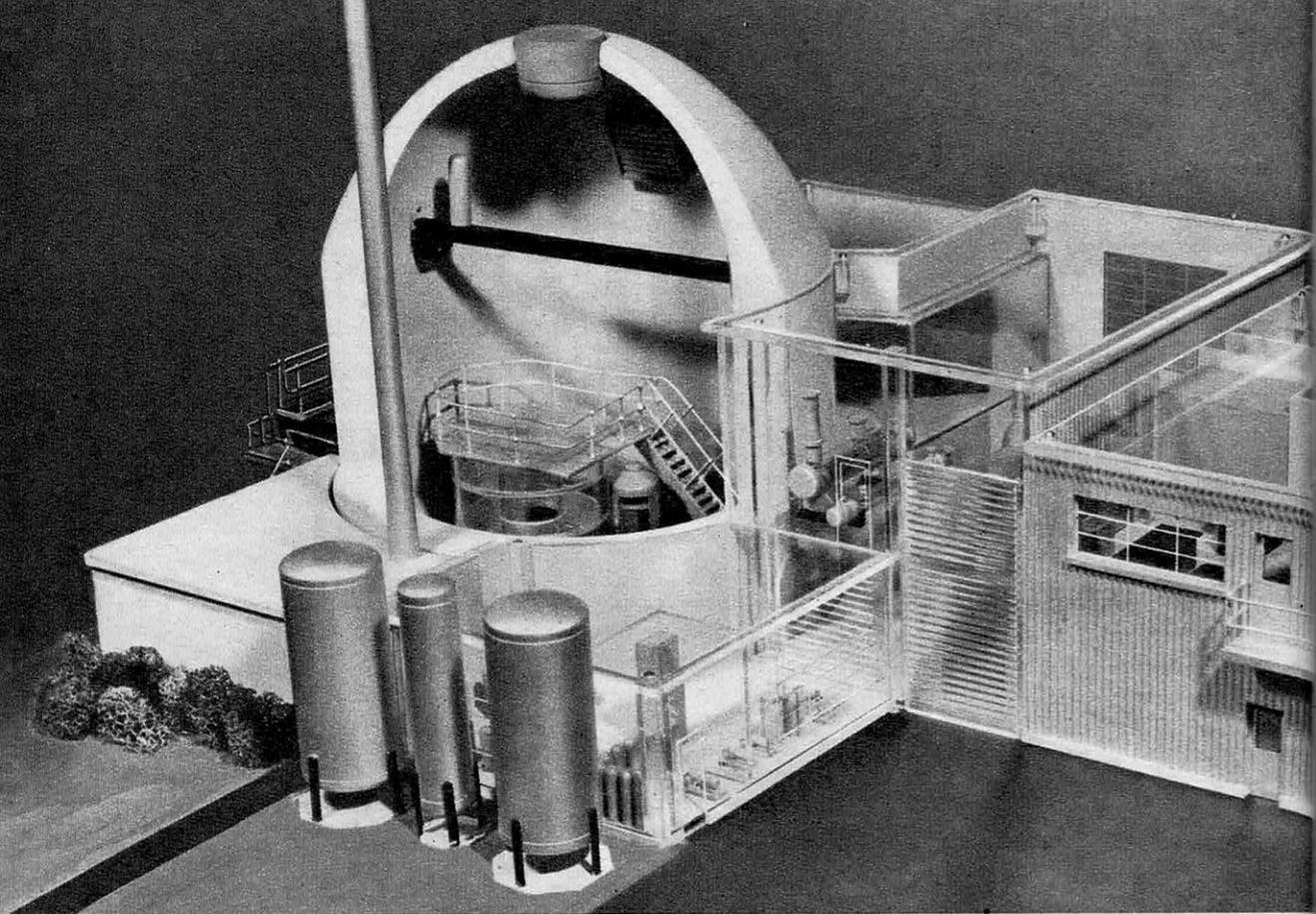




## La centrale de Shippingport : 100 000 kW

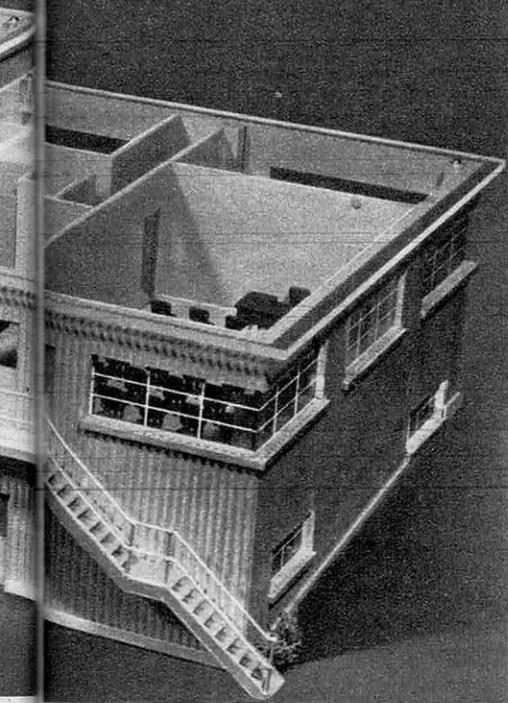
Cette centrale, qui doit entrer en service en 1957, fait partie du programme de démonstration des réacteurs de puissance de la Commission de l'Énergie Atomique américaine. Elle est en construction à une soixantaine de kilomètres de Pittsburgh. Le réacteur est du type à eau sous pression et fonctionne suivant le schéma de la page ci-contre. L'eau (ordinaire, mais de grande pureté) sert à la fois de modérateur et d'agent de transfert de la chaleur. Le cœur du réacteur est constitué par un assemblage d'éléments gainés de Zircaloy, les uns à base d'uranium naturel, les autres d'uranium très enrichi en isotope fissile 235. Ce dernier est sous forme d'alliage uranium-zirconium, et l'uranium naturel sous forme d'oxyde. On voit, page ci-contre, le dessin du cœur du réacteur dans sa cuve d'acier inoxydable et au-dessous, la disposition des circuits de refroidissement et de production de vapeur : deux ont été figurés, mais l'installation en comporte quatre. S'agissant d'une centrale expérimentale, bien que de grande puissance, les échangeurs de température sont de types divers. L'eau de refroidissement est maintenue sous une pres-

sion de  $140 \text{ kg/cm}^2$ , de sorte qu'elle n'est pas portée à l'ébullition bien que sa température à la sortie du réacteur soit de  $285^\circ\text{C}$ . On voit sur le dessin ci-dessus que la partie nucléaire de l'installation est tout entière enfermée dans une enceinte en acier calculée de manière à résister à la pression dans les cas les plus défavorables, par exemple rupture du circuit de refroidissement entraînant la destruction du cœur, et compte tenu de toutes les libérations d'énergie concevables par réaction de l'eau avec les différents métaux. Toute l'installation est répartie entre quatre enceintes métalliques : celle du réacteur, sphérique, au centre ; celles, cylindriques, des échangeurs, groupés deux à deux ; celle des auxiliaires et du système de mise sous pression. Indiquons, pour donner une idée des dimensions, que la sphère du réacteur a 12 m de diamètre et que les enceintes cylindriques ont 15 m de diamètre et respectivement 30 m de long pour les échangeurs de température et 44 m pour les auxiliaires. La charge du réacteur est de 52 kg d'uranium-235 dans les éléments enrichis et 12 tonnes d'uranium naturel.



# Une centrale nucléaire transportable par avion

L'armée américaine a mis à l'étude des centrales nucléaires de construction simplifiée destinées à être édifiées dans des bases éloignées et dont les éléments doivent pouvoir être transportés par air. Le prototype est en construction à Fort Belvoir (Virginie) et sera terminé au début de 1957. Il est réalisé par l'American Locomotive Company et le réacteur est du type à eau sous pression qui sert à la fois de modérateur, de réflecteur et d'agent de refroidissement. Le combustible est de l'uranium très enrichi, en plaques recouvertes d'acier inoxydable. Le cœur du réacteur, que l'on voit sur la page ci-contre, comporte 45 éléments de combustible avec cinq barres de réglage, la barre centrale servant au réglage fin. La puissance développée est de 10 000 kW chaleur et 2 105 kW électriques, dont 180 kW servent pour les auxiliaires de la centrale. Avec 1 925 kW nets, le rendement atteint près de 20 %. On voit ci-contre la disposition générale de la centrale. Tous les organes du circuit d'eau primaire, comprenant le réacteur lui-même, l'échangeur-générateur de vapeur, la pompe de circulation et le système de chauffage électrique qui maintient la pression du circuit à 84 kg/cm<sup>2</sup>, sont groupés dans une vaste enceinte de 11 m de diamètre et 20 m de haut, en acier recouvert de 60 cm de béton. Autour du cœur du réacteur, la protection contre les radiations est assurée non par du béton, mais par plusieurs cylindres concentriques en tôle d'acier de 5 cm d'épaisseur enfermés dans un tank plein d'eau. Des centrales analogues développant 10 000 kW électriques sont actuellement à l'étude.



SUITE DE LA PAGE 71

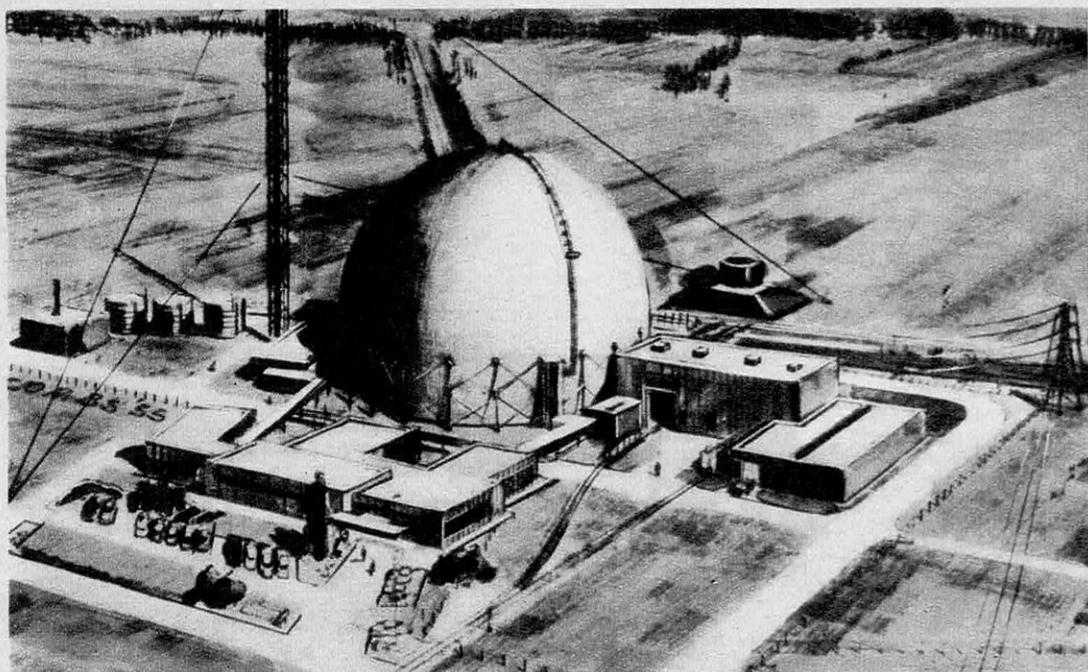
lement sur l'emploi, au départ, de l'uranium naturel. Dès 1953 on envisageait la construction d'une centrale prototype qui devait être Calder Hall et dont les travaux furent commencés cette même année. 300 millions de livres, près de 300 milliards de francs, devaient être affectés en dix ans à la construction de 12 autres centrales devant produire, en 1965, 12 milliards de kWh, soit l'équivalent de 5 à 6 millions de tonnes de charbon brûlées dans des centrales classiques.

La centrale de Calder Hall, qui a été inaugurée officiellement par la reine, le 17 octobre dernier, comporte deux réacteurs alimentant quatre groupes turboalternateurs fournissant au total 92 000 kW, dont 65 000 environ seront envoyés sur le réseau d'interconnexion, le « grid ». Ce sont des réacteurs utilisant le graphite comme modérateur et le gaz carbonique pour le refroidissement. Ils forment la première partie d'un ensemble qui comportera quatre réacteurs, portant la puissance totale de Calder Hall à 184 000 kW dès 1958-1959.

Les deux premières centrales industrielles, du même type, qui seront édifiées par la Central Electricity Authority, se trouveront à Bradwell (Essex), à l'embouchure de la rivière Blackwater, et à Berkeley (Gloucestershire), sur l'estuaire de la Severn ; une troisième, non comprise dans le programme initial, sera construite par le South of Scotland Electricity Board, à Partincross, sur la côte de l'Ayrshire. Elles doivent être prêtes dès 1960-1961. Grâce à l'expérience acquise avec Calder Hall, leur puissance sera bien supérieure à celle prévue à l'origine. Au lieu de 200 mégawatts (200 000 kW), elles fourniront sans doute près de 300 MW, et les centrales suivantes du programme 400 MW. La puissance nucléaire installée en 1965 atteindra ainsi 3 500 à 4 000 MW, au lieu des 1 750 à 2 000 MW prévus, et satisfera plus du cinquième des besoins de la Grande-Bretagne en énergie, économisant plus de 10 millions de tonnes de charbon par an. Toujours du type Calder Hall, deux centrales sont en construction à Chapel Cross, près d'Annan, dans le sud-ouest de l'Ecosse. Elles doivent essentiellement fournir du plutonium pour l'armée, mais leurs quatre réacteurs livreront en 1959 quelque 200 MW d'électricité comme sous-produit. Deux autres réacteurs pour l'armée

← Le réacteur de la centrale est ici en cours de construction. On voit en particulier les tubes qui, commandés à distance, extrairont les éléments usés.

SUITE PAGE 78

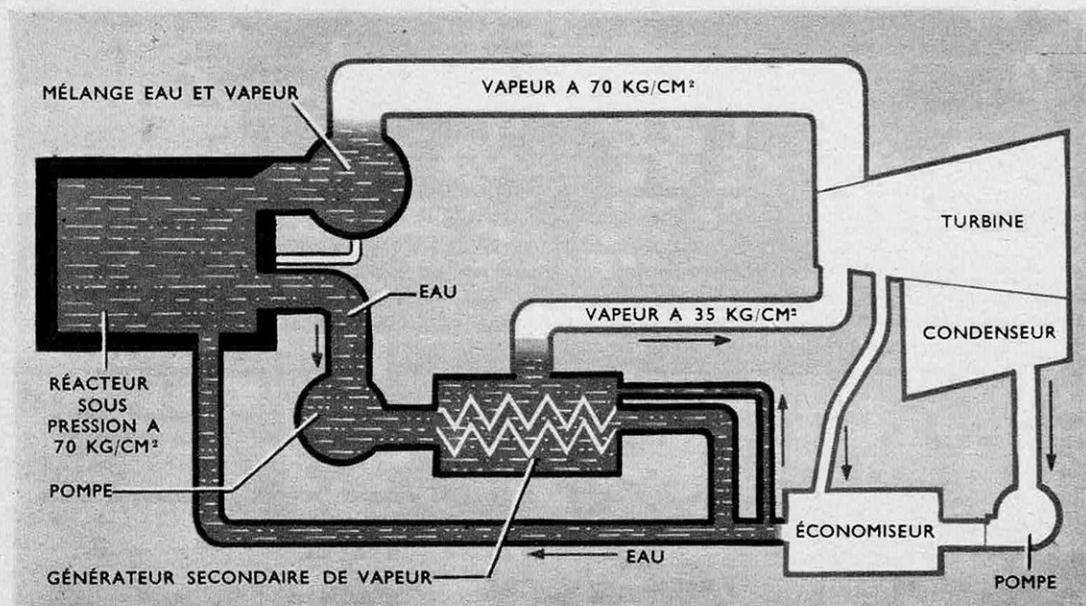


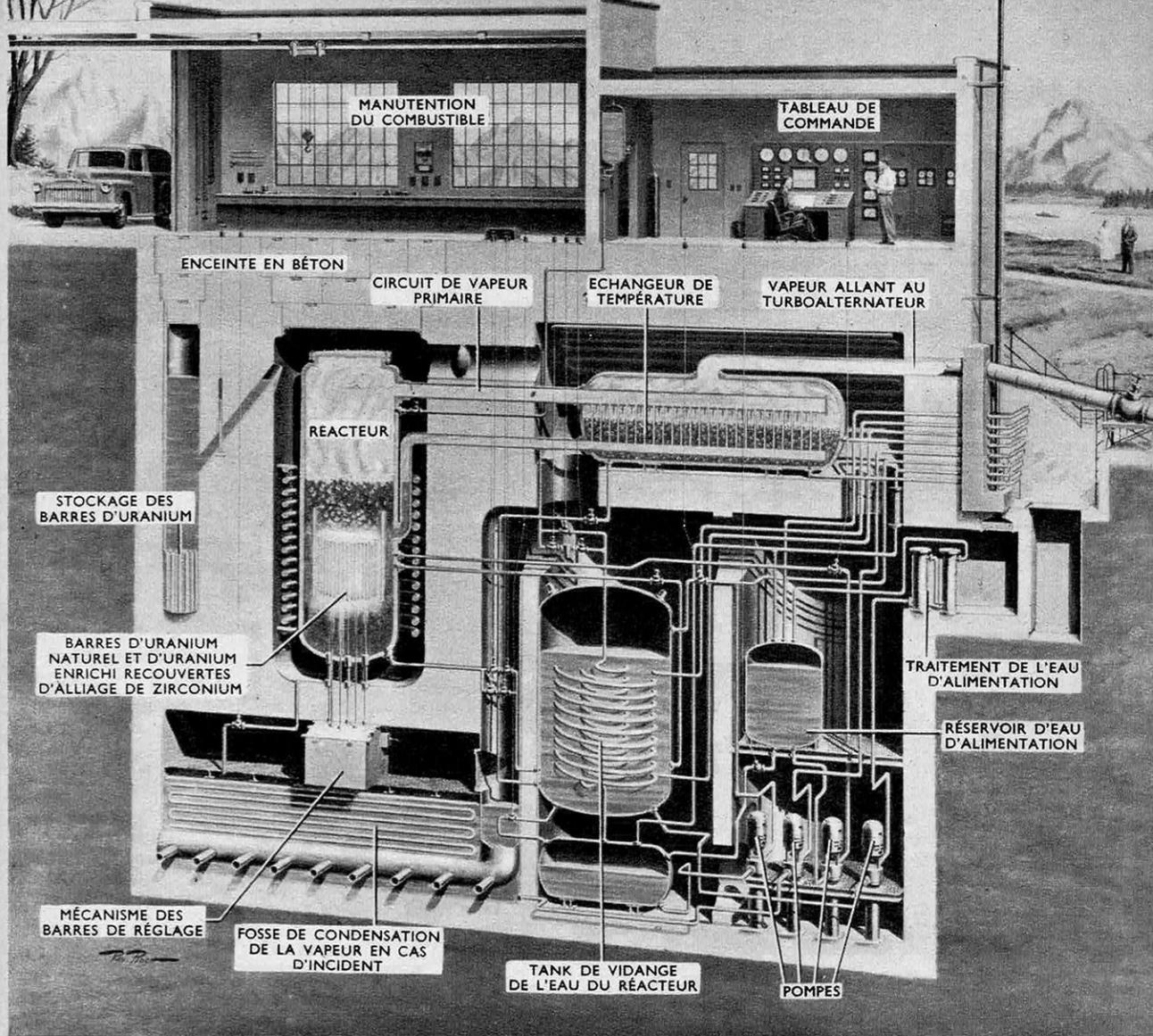
## La centrale de Dresden : 180 000 kW

L'originalité de cette centrale, étudiée par la General Electric pour la Commonwealth Edison Company de Chicago, et dont on voit ci-dessus l'avant-projet en vue aérienne, réside dans la disposition des circuits de vapeur. Le réacteur est à eau bouillante, mais, comme le montre le schéma, celle-ci est utilisée de deux manières : d'une part elle alimente par vaporisation directe l'étage haute pression de la turbine ; d'autre part elle engendre de la vapeur à basse pression dans un échangeur de température.

Ces cycles complexes ont pour but de rendre plus stable le fonctionnement du réacteur en réduisant la quantité de vapeur qui y est directement produite. Le rendement thermique de l'ensemble s'en trouve aussi amélioré.

Le combustible consiste en 68 tonnes d'oxyde d'uranium légèrement enrichi et est logé dans un tank sous pression de 3,60 m de diamètre et 12 m de haut. Il n'y a pas moins de 121 barres de réglage. La centrale électrique doit être mise en service en 1960.



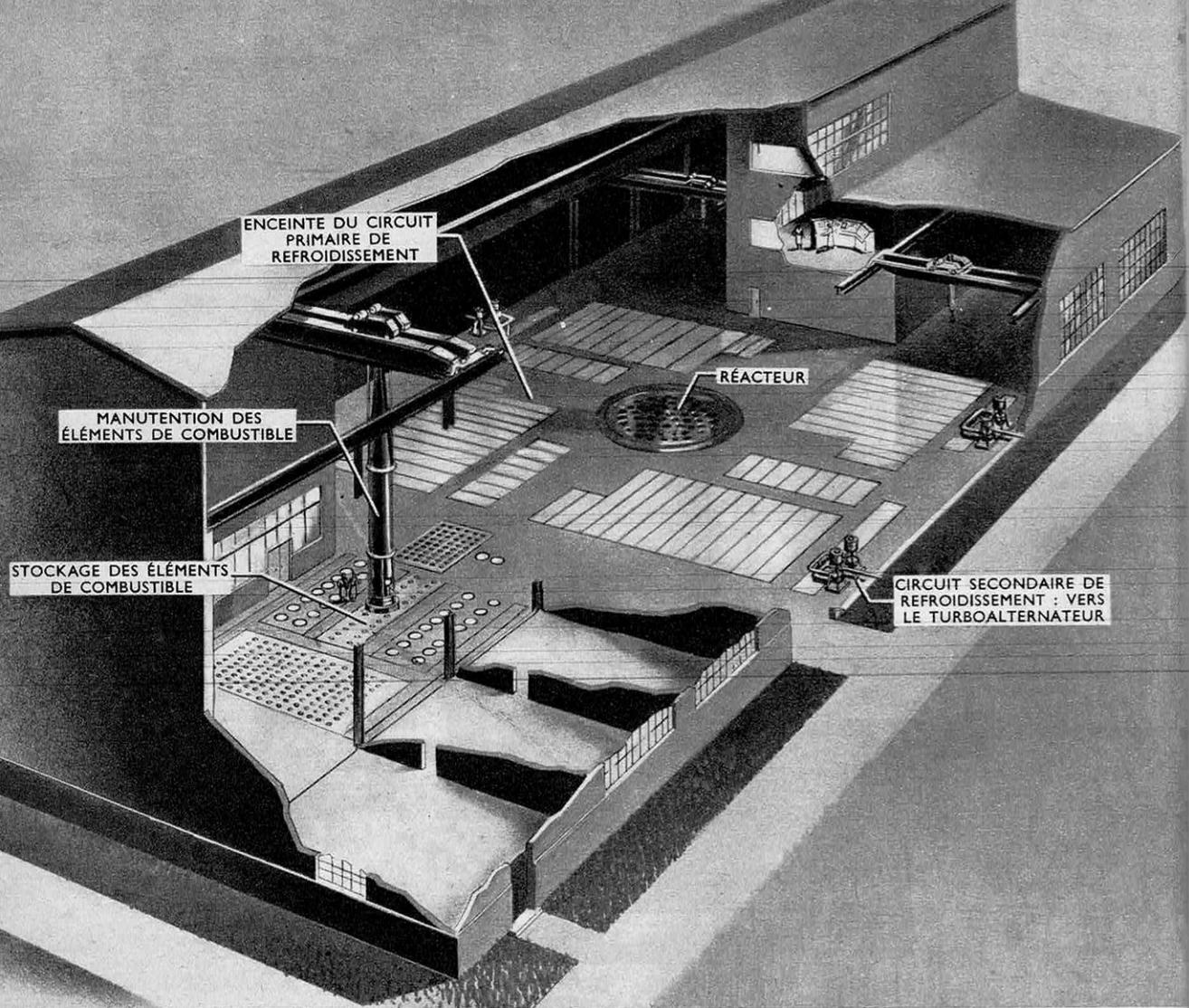


## Un projet de petite centrale

Le prix de revient du kilowatt-heure livré par les centrales nucléaires ne leur permet pas encore de concurrencer les centrales classiques dans les pays industrialisés où le combustible est bon marché. Il n'en est pas de même dans certaines régions moins favorisées de ce point de vue. C'est pour elles que l'AMF Atomic de New York et la Mitchell Engineering Inc. de Londres ont étudié en commun de petites centrales économiques et d'un fonctionnement simplifié. L'une d'elles, de 22 000 kW, doit être édiflée dans le Minnesota, à Elk River. Elle utilise un réacteur à eau bouillante en cycle fermé, la vapeur cédant sa chaleur à un circuit secondaire par l'intermédiaire d'un échangeur de température, se condensant et revenant par gravité au réacteur, sans pompes de circulation. Ainsi cette vapeur rendue radioactive dans le réacteur ne risque pas de contaminer les turboalternateurs. Le combustible est constitué par des plaques minces d'uranium naturel

gainées d'alliage de zirconium. Le modérateur étant l'eau naturelle et non l'eau lourde, il est indispensable d'utiliser quelques éléments en uranium très enrichi en isotope 235.

La vapeur est produite par le réacteur à 280 degrés sous 63 kg/cm<sup>2</sup>; celle engendrée dans l'échangeur parvient aux turbines à 260° sous 45 kg/cm<sup>2</sup> et peut être surchauffée par les moyens classiques. Plusieurs dispositifs de sécurité sont prévus : une dizaine de barres de réglage maintiennent automatiquement la pression constante dans le réacteur et le circuit primaire ; si cette pression s'élève néanmoins, le niveau de l'eau s'abaisse et les réactions nucléaires sont freinées par la présence d'un excès de vapeur qui « modère » moins bien les neutrons que l'eau ; enfin en dernier ressort, la réaction peut être stoppée par injection d'acide borique, chassé dans le réacteur par de l'hélium sous pression. En aucun cas la vapeur radioactive ne peut se répandre dans l'atmosphère.



SUITE PAGE 75

seront également édifiés à Calder Hall même.

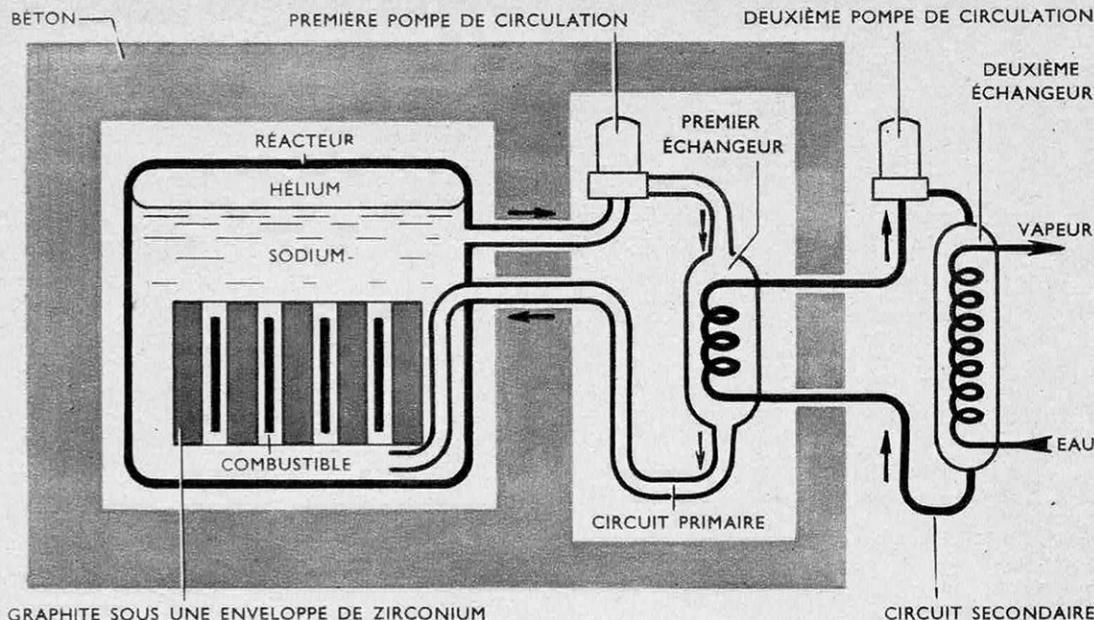
Les réacteurs du type Calder Hall, à uranium naturel, graphite et gaz carbonique, ont été choisis pour les premières réalisations britanniques, mais d'importantes recherches en cours portent sur la mise au point d'ensembles plus évolués, utilisant le plutonium, sous-produit des premières piles, pour enrichir le combustible. On étudie ainsi dès maintenant, en Grande-Bretagne, les réacteurs à eau sous pression et ceux refroidis par le sodium fondu, et l'on espère avoir résolu, d'ici 1960, les problèmes techniques qu'ils posent, surtout au point de vue corrosion. Plusieurs centrales du programme décennal pourraient être de l'un ou l'autre type. De plus, à Dounreay, dans le nord de l'Ecosse, s'achève la construction d'un « breeder » rapide expérimental, refroidi au sodium, mettant à profit l'expérience acquise avec les réacteurs pilotes du grand centre de Harwell, Zéphyr et Zeus. Il pourra

fonctionner avec un combustible enrichi par de l'uranium-235 (provenant de l'usine de diffusion gazeuse de Capenhurst) ou du plutonium, et utilisera le cycle thorium-uranium-233. Il entrera en opération en 1958 et délivrera 60 MW.

### La première centrale du Canada

La première centrale nucléaire du Canada, désignée par les lettres N.P.D. (Nuclear Power Demonstration), doit être mise en marche en 1959 à Des Joachims, à 250 km au nord-ouest d'Ottawa, sur la rivière du même nom. Le réacteur utilisera comme combustible de l'uranium naturel, peut-être légèrement enrichi en matière fissile à l'aide de plutonium, et comme modérateur de l'eau lourde.

C'est l'aboutissement logique des recherches poursuivies au Canada avec les réacteurs à eau lourde du centre de Chalk River. Le



## Réacteur au sodium-graphite pour 75 000 KW

Ce projet de l'Atomics International (North American Aviation) est une extrapolation de l'installation pilote connue sous le nom de SRE (Sodium Reactor Experiment) où le réacteur, utilisant le graphite comme modérateur et le sodium pour le refroidissement, doit développer 20 000 kW chaleur. Ici, il fournira 240 000 kW chaleur pour une centrale électrique de 75 000 kW nets (puissance des auxiliaires déduite). Le schéma ci-dessus indique la disposition de principe des circuits : un circuit de sodium primaire ; un circuit de sodium secondaire entre deux échangeurs de température ; un circuit

amenant la vapeur aux turbines. A gauche, vue générale du bâtiment du réacteur placé en sous-sol dans un tank d'acier. Il consiste en un cylindre de 3,60 m de diamètre et 3 m de haut formé de 192 éléments de combustible (uranium enrichi à 1,8 %) et 211 éléments de modérateur (graphite dans des cartouches étanches en zirconium). Le tout est entouré d'un réflecteur en graphite de 60 cm d'épaisseur. On envisage de remplacer l'uranium par un alliage de thorium et uranium-235 et le graphite du réflecteur par une chemise de thorium pour obtenir un « breeder » de grande puissance.

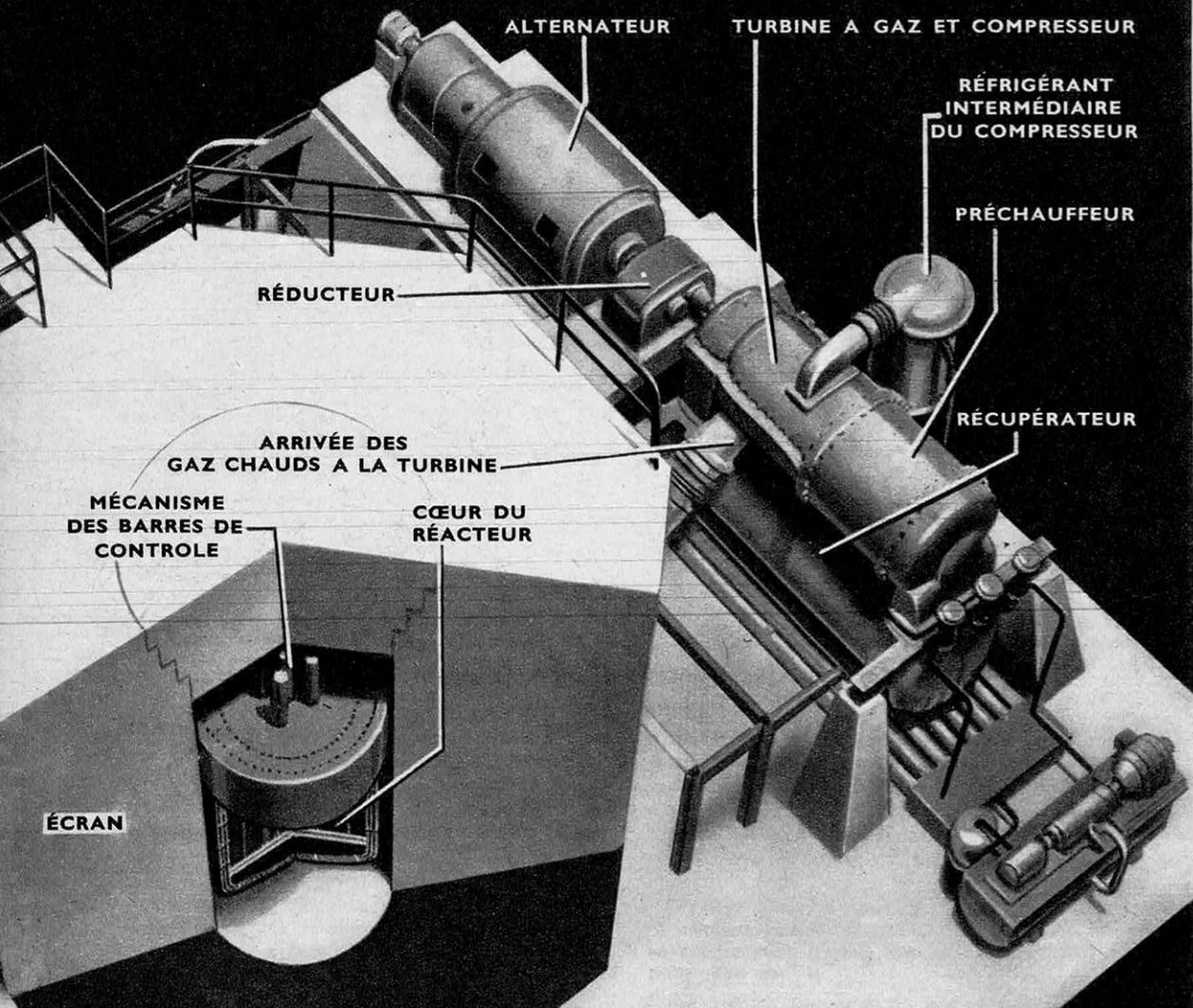
premier, Zeep, remonte à 1945 (il a été le premier réacteur à fonctionner en dehors des Etats-Unis) et développe 10 watts. Puis vint en 1947, le N.R.X., de 40 000 kW chaleur, dont le flux de neutrons particulièrement élevé a permis au Canada d'entreprendre la production d'isotopes de haute activité spécifique, en particulier le cobalt-60 des « bombes au cobalt » utilisées dans le traitement du cancer.

Le troisième réacteur, N.R.U., est pratiquement achevé ; il est prévu pour une puissance de 200 000 kW chaleur, produira du plutonium et engendrera un flux de neutrons quintuple de celui du N.R.X. Comme celui-ci, il « brûlera » de l'uranium naturel, avec de l'eau lourde comme modérateur, mais le système de refroidissement sera différent : de l'eau ordinaire, puisée à la rivière, circulera dans le tank d'aluminium contenant les barreaux d'uranium et le modérateur, alors

que, dans le N.R.U., le refroidissement est assuré par l'eau lourde en circuit fermé, passant du cœur du réacteur à huit échangeurs de température extérieurs refroidis par eau. Aucun de ces trois réacteurs ne produit d'électricité.

Le N.P.D. est prévu au contraire pour 20 MW électriques. Une autre centrale de 100 MW est à l'étude.

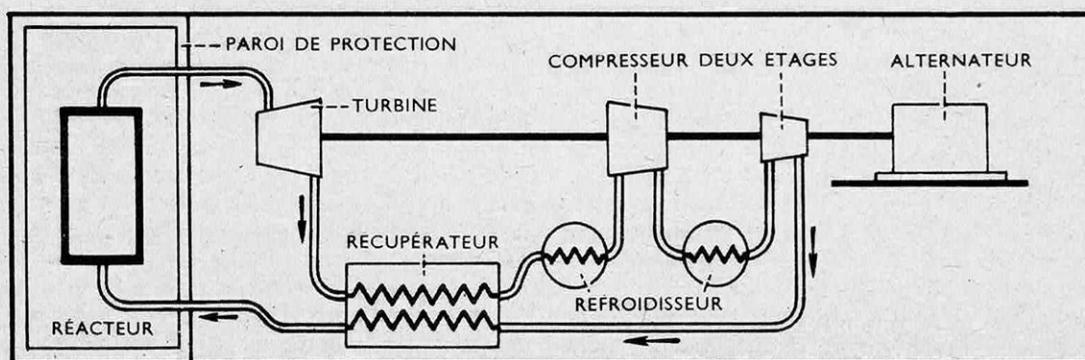
A la différence de la Grande-Bretagne, le Canada, disposant d'abondantes réserves hydrauliques et thermiques, n'envisage pas un développement rapide des centrales nucléaires. La puissance installée actuelle est de 16 000 MW ; tenant compte d'une augmentation annuelle des besoins de l'ordre de 5 % au cours des 25 prochaines années, on évalue à 48 000 MW la puissance installée en 1981. Sur ce total, 33 000 MW seront fournis par des centrales hydrauliques, 8 000 à 11 000 MW par des centrales thermiques conventionnelles et

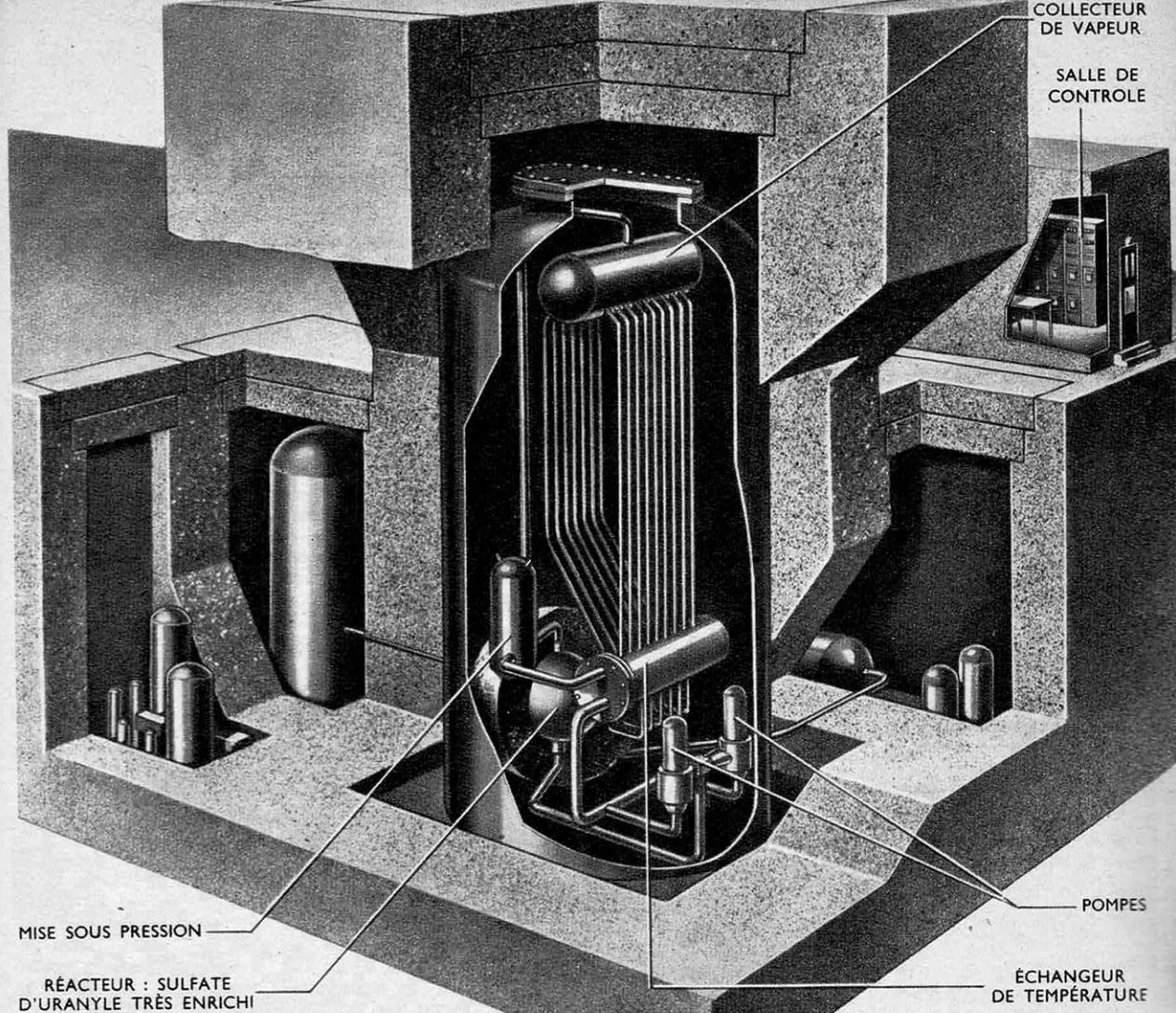


## Une centrale à turbine à gaz

Les seuls programmes de développement de centrales nucléaires comportant des réacteurs refroidis par un gaz sont ceux de la France et de la Grande-Bretagne. Cependant de tels réacteurs associés directement à des turbines à gaz sont à l'étude. Le projet le plus avancé est celui de la Ford Instrument C°, aux

Etats-Unis. On voit ci-dessous le schéma que parcourt le gaz (azote, gaz carbonique ou hélium) en circuit fermé. Les avantages résultent de la simplicité de construction et de fonctionnement. Les principales difficultés de réalisation tiennent à l'emploi de pressions et de températures très élevées.

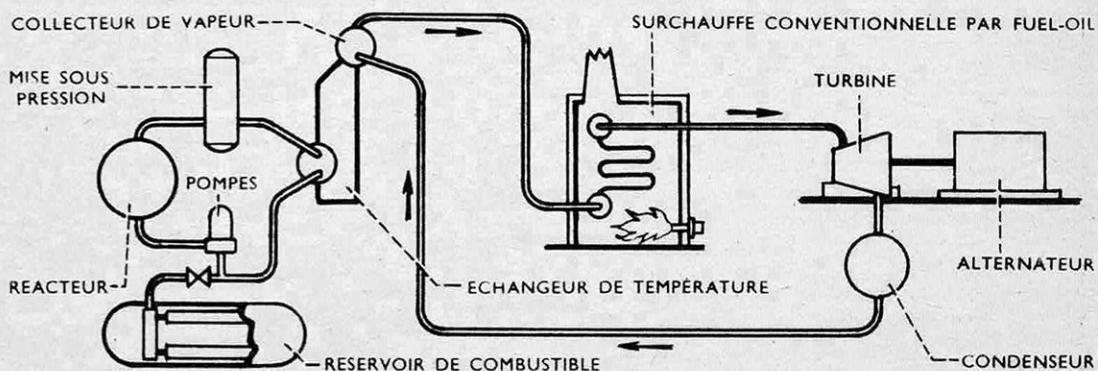




## Centrale à réacteur homogène

Ce projet de la Foster Wheeler Corp. s'inscrit dans le cadre du programme de petites centrales développant entre 5 000 et 40 000 kW. Le combustible est une solution de sulfate d'uranyle très enrichi en isotope 235. Comme le montre le schéma ci-dessous, la solution passe du réacteur, simple sphère sous

pression élevée, à un échangeur générateur de vapeur, celle-ci pouvant être surchauffée à volonté. Il n'y a pas de barres de contrôle, les réacteurs homogènes aqueux étant naturellement stables. La séparation des produits de fission et le remplacement de l'uranium 235 utilisé peuvent s'effectuer en continu.



# PRINCIPAUX RÉACTEURS DE PUISSANCE EN CONSTRUCTION OU EN

Emplacement	Shippingport (Pittsburgh)	Rowe (Massachusetts)	Indian Point (New York)	Dresden (Chicago)	— (Nebraska)
Type	Eau sous pression	Eau sous pression	Eau sous pression	Eau bouillante (1)	Sodium graphite
Puissance chaleur	264 MW	500 MW	500 MW	680 MW	250 MW
Puissance électricité	100 MW	134 MW	250 MW (2)	180 MW	75 MW
Combustible	12 t uranium naturel + 52 kg enrichi à 90%	28,4 t uranium enrichi à 27%	275 kg uranium enrichi à 90% + 8 100 kg thorium	68 t uranium enrichi à 1,1%	24,6 t uranium enrichi à 1,8%
Modérateur	Eau ordinaire	Eau ordinaire	Eau ordinaire	Eau ordinaire	Graphite
Refroidissement	Eau ordinaire	Eau ordinaire	Eau ordinaire	Eau ordinaire	Sodium
Température	285°	280°	260°	250°	495°
Date de mise en service	1957	1959	1959	1960	1959

(1) Double cycle, haute pression et basse pression. (2) Y compris 100 MW fournis par surchauffe classique par fuel-oil.

SUITE DE LA PAGE 79

4 000 à 7 000 MW par des centrales thermiques nucléaires, suivant le prix auquel elles pourront livrer le kilowatt-heure.

## Diversité des réalisations américaines

Aux Etats-Unis, pas plus qu'au Canada, l'équipement du pays en centrales nucléaires ne présente aucun caractère d'urgence, mais les travaux sur de nombreux prototypes n'en

sont pas moins poursuivis activement. Le fait le plus saillant est la diversité des techniques non seulement envisagées, mais faisant l'objet de projets concrets et même de réalisations à l'échelle expérimentale. La première centrale industrielle américaine sera celle de Shippingport, près de Pittsburgh, et livrera 100 MW à la fin de 1957 ; elle sera à eau sous pression, c'est-à-dire d'un type que les Américains considèrent avec une faveur particulière, puisque trois des grands projets de cen-

## Une technique d'avenir: le LMFR

Les initiales LMFR signifient : Liquid Metal Fuelled Reactor ou « réacteur à combustible sous forme de métal liquide ». Le combustible est en effet de l'uranium-233 en solution dans le bismuth liquide. Cette solution a un point de fusion relativement bas. Le bismuth, d'autre part, capte très peu de neutrons de sorte qu'il en reste un assez grand nombre de disponibles pour engendrer dans du thorium, disposé autour du cœur du réacteur, plus d'uranium-233 qu'il ne s'en consomme dans le cœur. Il s'agit donc d'un « breeder ». Ce type de réacteur a fait l'objet d'études poussées à Brookhaven, aux Etats-Unis, où ont été dressés les plans d'une centrale de 210 000 kW électriques. On en voit le schéma ci-contre. Le cœur du réacteur est en graphite percé de canaux où circule la solution uranium-bismuth, directement au contact du graphite. L'enveloppe du cœur est également en

graphite et on en trouve encore des barreaux dans la jaquette où circule une suspension d'un composé de thorium et de bismuth dans du bismuth. Un circuit double intermédiaire de sodium fondu transporte la chaleur à l'échangeur de température où est produite la vapeur destinée à la turbine. La solution uranium-bismuth entre dans le réacteur à 400° et en sort à 550°. Le circuit du cœur développe 500 000 kW chaleur et celui de la jaquette 50 000 kW. La vapeur est engendrée à 482° sous 88 kg/cm<sup>2</sup>, d'où un bon rendement de la turbine. Autres avantages importants du système : emploi de pressions modérées dans les circuits de métaux fondus et traitement de la solution uranium-bismuth et de la suspension de thorium dans le bismuth en continu pour extraction des produits de fission de la première, et séparation de l'uranium-233 qui s'est formé dans le thorium.

## PROJET AUX ÉTATS-UNIS

Monroe (Michigan)	Eastern (Pennsylvania)	— (Florida)
Breeder rapide	Homogène aqueux	Bismuth-graphite
300 MW	450 MW	550 MW
100 MW	150 MW	210 MW
2,1 t uranium enrichi à 20% (Plutonium)	Solution de sulfate d'uranyle dans eau lourde + suspension de thorium	170 kg uranium-233 (?)
Sans	Eau lourde	Graphite
Sodium	Solution de combustible	Bismuth
426°	300°	550°
1960	1962	1962

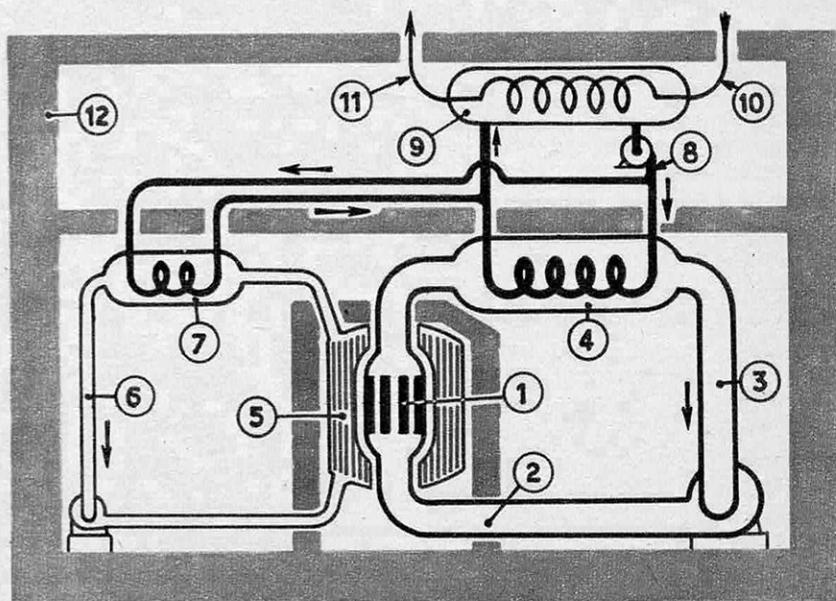
trales, Shippingport, Rowe et Indian Point près de New York, doivent appliquer des techniques voisines. Les autres, comme on le voit dans le tableau ci-dessus, sont de types divers : eau bouillante, refroidissement par sodium avec modérateur en graphite, « breeder » rapide refroidi par sodium et sans modérateur, « breeder » lent avec solution de sulfate d'uranyle dans l'eau lourde, refroidissement par bismuth avec modérateur en graphite. Les variantes sont encore plus nom-

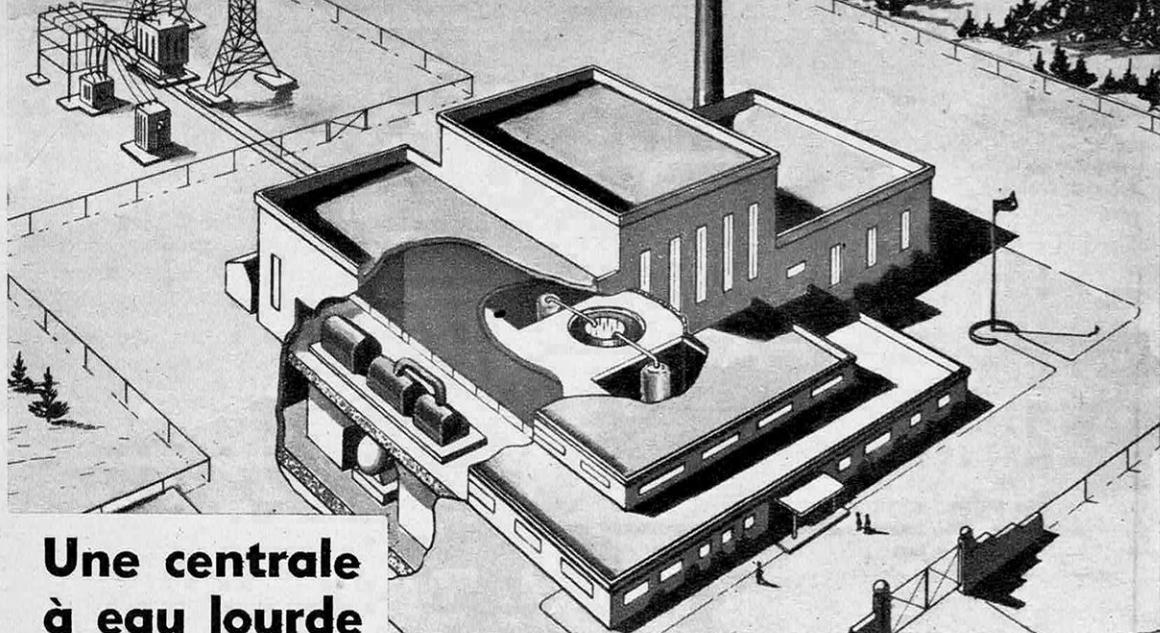
breuses pour les réacteurs pilotes ou expérimentaux de faible puissance non portés dans le tableau.

La Commission de l'Énergie Atomique américaine ne semble pas avoir élaboré une doctrine ferme pour le développement nucléaire industriel. Elle s'efforce, avec succès, d'intéresser les entreprises privées à se lancer dans cette branche nouvelle, soit qu'elle leur confie la réalisation des réacteurs expérimentaux qu'elle finance entièrement, soit qu'elle apporte une contribution financière importante à certains projets qui lui sont soumis et qui répondent aux programmes généraux qu'elle dresse. D'ailleurs plusieurs grandes firmes américaines ont manifesté l'intention d'édifier des centrales sans l'aide gouvernementale.

Un premier programme quinquennal de la Commission de l'Énergie Atomique pour des réacteurs de puissance importante proposait cinq solutions : l'eau sous pression, le bouilleur, le type à sodium et graphite, le réacteur homogène aqueux, le « breeder » rapide. Plus récemment, la Commission s'est orientée vers les réacteurs de petite puissance, de 5 à 40 MW, dont elle désire voir démontrer l'intérêt économique pour desservir des régions isolées, ne disposant ni de charbon, ni de pétrole, et dont le ravitaillement est très onéreux. Les réponses à ses propositions ont été assez nombreuses et, là encore, les techniques sont très variées, depuis l'eau sous pression et le bouilleur désormais classiques, jusqu'à l'emploi de modérateurs organiques (diphényl), de solutions de matière fissile dans le bismuth et d'agents de refroidissement gazeux agissant directement, en circuit fermé, des turbines à gaz.

1. Graphite
2. Solution uranium-bismuth
3. Circuit à 500 000 kW
4. Échangeur de température circuit principal
5. Suspension thorium-bismuth
6. Circuit à 50 000 kW
7. Échangeur de température circuit auxiliaire
8. Circuit intermédiaire à sodium liquide
9. Échangeur - générateur de vapeur
10. Eau
11. Vapeur
12. Béton





## Une centrale à eau lourde

**L**a centrale canadienne de Des Joachims diffère essentiellement des projets américains à eau sous pression par le fait qu'elle utilise l'eau lourde au lieu du graphite comme modérateur. On peut donc employer comme combustible de l'uranium naturel. Il semble que le prix de revient du kWh soit du même ordre, le combustible étant moins coûteux, mais l'eau lourde très chère. La centrale expérimentale de 20 000 kW électrique fera peut-être appel cependant à de

l'uranium légèrement additionné de plutonium. Deux circuits d'eau lourde sont prévus : le principal évacuera la chaleur par circulation dans des tubes autour des barreaux d'uranium et produira de la vapeur dans un échangeur ; l'autre est celui du modérateur. Autour du cœur du réacteur, de l'eau ordinaire servira de réflecteur. De l'hélium est utilisé pour maintenir le niveau de l'eau lourde et vider le réacteur en cas d'incident.

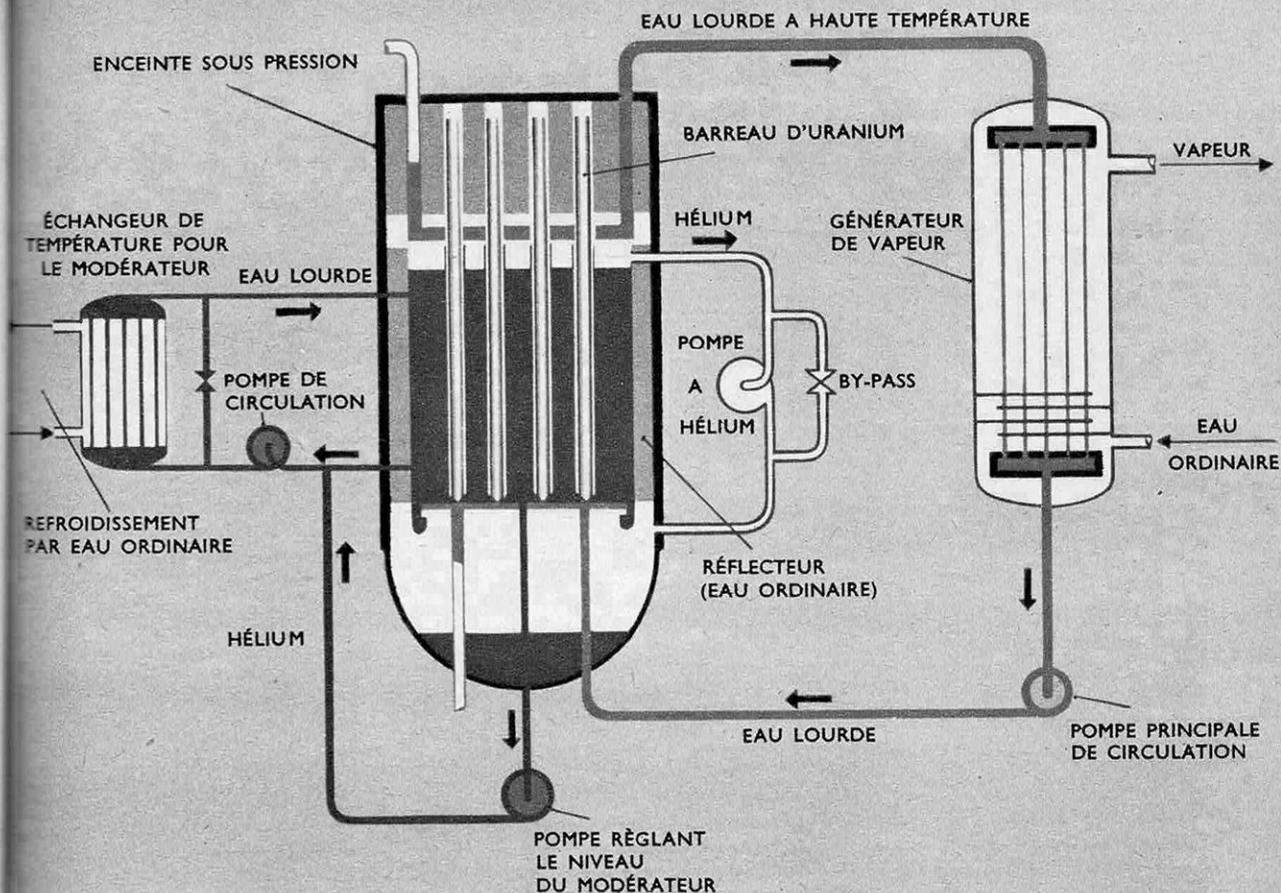
L'armée américaine s'intéresse à de tels réacteurs de faible puissance, compacts, transportables, susceptibles d'être utilisés dans des pays lointains, ne demandant pour leur conduite qu'un personnel restreint et fonctionnant longtemps sans entretien. Le réacteur à refroidissement par un gaz amené directement à une turbine paraît particulièrement séduisant, car il est de construction simple, possède un rendement élevé et n'exige pas la proximité d'une rivière ; le principal problème qu'il pose est la fabrication d'éléments de combustible ayant une durée acceptable aux hautes températures nécessaires pour que le rendement de la turbine soit élevé.

Parmi les types de réacteurs en cours d'étude par la Commission de l'Energie Atomique américaine, deux méritent une mention spéciale pour leur originalité. L'un, le LAPRE fait appel à une solution d'oxyde d'uranium enrichi dans de l'acide phosphorique aqueux ; ce liquide est extrêmement corrosif et la cuve du réacteur ainsi que les canalisations intérieures doivent être recouvertes d'or. L'autre, le LAMPRE, utilise un alliage de plutonium fondu comme combustible ; il fonctionnera ainsi à température très élevée ; le premier

modèle livrant 1 000 kW est prévu pour 1959, et déjà des unités pilotes de 50 à 100 MW sont à l'étude.

### Vaste programme en U.R.S.S.

En ce qui concerne l'U.R.S.S., nous avons déjà signalé le réacteur de 5 000 kW en fonctionnement depuis 1954 ; il est à uranium légèrement enrichi avec modérateur en graphite et refroidissement par eau. Le plan de développement de l'équipement nucléaire, dont on ne connaît les grandes lignes que par des déclarations de savants en visite à l'étranger ou par des articles de « la Pravda », paraît fort ambitieux. C'est ainsi que Igor Kourtchatov a annoncé que la puissance nucléaire installée en U.R.S.S. atteindra 2 000 à 2 500 MW dès 1960. Deux centrales fournissant au total 1 000 MW seraient installées dans l'Oural, une autre de 400 MW près de Moscou, avec, en plus, une dizaine de réacteurs pilotes développant entre 50 et 200 MW et de techniques très diverses. Il semble que dans ce total ne soit pas compris le réacteur à eau sous pression de 100 MW annoncé auparavant par Moscou. Parmi les dix réacteurs expérimentaux figureraient des types à eau sous pres-



sion, des bouilleurs, des réacteurs à eau lourde et refroidissement par gaz carbonique, d'autres au sodium-graphite, des « breeders » rapides refroidis par le sodium, des « breeders » homogènes fonctionnant suivant le cycle thorium-uranium-233.

Dans le reste du monde, peu de réacteurs sont prévus, dépassant le stade expérimental. Pour la plupart, ces réacteurs seront importés des Etats-Unis ou de la Grande-Bretagne et serviront à des recherches scientifiques. C'est le cas de la Belgique (un réacteur doit fournir l'énergie électrique que requerra la prochaine Exposition internationale), de la Tchécoslovaquie, de l'Espagne, de la Suisse, des pays de l'Amérique latine. L'Inde a élaboré un plan quinquennal et a déjà reçu un réacteur du type « piscine » à uranium enrichi de la Grande-Bretagne ; le Canada doit lui fournir une pile du type N.R.X. à installer à Trombay, près de Bombay. Le Japon est en pourparlers avec la Grande-Bretagne pour un réacteur type Calder Hall et avec les Etats-Unis pour un bouilleur. L'Allemagne de l'Ouest recevra un certain nombre de réacteurs de recherches fabriqués par l'industrie privée britannique, en particulier du type Merlin (« piscine »), par

l'A.E.I. - John Thomson Nuclear Energy Company et du type bouilleur, par A.M.F. - Mitchell. Les Pays-Bas et la Norvège ont élaboré un programme commun fondé sur des réacteurs à eau lourde ; une première réalisation industrielle de 20 MW chaleur est prévue pour 1958, à Halden, en Norvège.

On fait aussi appel à l'eau lourde en Suède, où deux réacteurs industriels sont en projet. Le premier, Adam, développera 77 000 kW chaleur pour le chauffage urbain ; le second, Eve, alimentera une centrale électrique souterraine de 100 000 kW. Ils doivent entrer en fonctionnement respectivement en 1960 et 1963. D'ici 1965, on verra apparaître trois ou quatre autres centrales fournissant de l'électricité et aussi de la vapeur pour diverses industries (fabriques de pâtes à papier).

Signalons enfin que des essais sont en cours aux Etats-Unis pour l'utilisation de la chaleur des réacteurs à d'autres fins que la production de vapeur et d'électricité. Elle doit, en effet, se prêter à des opérations chimiques exigeant de hautes températures, telles que la gazéification du charbon. Il y a là un domaine d'application extrêmement prometteur, mais à peu près entièrement inexploré.

## Les transports à l'âge nucléaire

# NAVIRES, AVIONS ET LOCOMOTIVES ATOMIQUES

DEPUIS le lancement du sous-marin atomique *Nautilus*, il est hors de doute que l'énergie nucléaire, considérée comme source de force motrice, est appelée à jouer un rôle important dans le domaine de la propulsion. Sans doute ne peut-on encore juger de l'extension que prendra, dans le domaine des transports civils, cette révolution qui n'intéresse encore que la marine de guerre, aujourd'hui avec les sous-marins atomiques dont plus d'une vingtaine sont en projet, demain avec les croiseurs et les porte-avions. Le premier navire de commerce à propulsion nucléaire ne se fera certainement plus attendre longtemps ; ce doit être un cargo mixte, après qu'on ait longtemps hésité entre le pétrolier, le cargo ou le « paquebot de la paix » dont le Président Eisenhower avait lancé l'idée en 1955.

L'avion à rayon d'action illimité est à l'étude et volera peut-être avant que la première locomotive nucléaire n'entraîne les lourds convois ferroviaires à travers les Montagnes Rocheuses ou l'Oural. L'automobile atomique paraît plus lointaine et d'un intérêt moins évident ; les auteurs de projets d'avant-garde s'y intéressent moins qu'au véhicule interplanétaire, dont la propulsion nucléaire vient élargir les perspectives de réalisation, au moins sur le papier.

Les propulseurs atomiques obéissent aux mêmes principes généraux que les unités motrices destinées aux installations fixes terrestres, mais les conditions particulières auxquelles ils sont soumis posent aux ingénieurs, plus qu'aux savants, des problèmes technologiques ardu. C'est de leur solution plus ou moins rapide que dépend l'extension de l'énergie nucléaire aux transports. Pour le matériel de guerre, il est classique de considérer que le prix de revient passe au second plan ; il est

donc logique que le premier propulseur atomique, dont la force motrice, a-t-on dit, revient 10 fois plus cher que celle fournie par les systèmes classiques, ait été monté sur un sous-marin ; de même, le premier avion atomique sera un bombardier lourd.

Pour les applications civiles, au contraire, le prix de revient est un facteur capital. Mais tout laisse prévoir que l'expérience acquise actuellement à grands frais, les progrès de la métallurgie, l'expérimentation de solutions inédites pour les réacteurs et leurs circuits associés, permettront d'élever le rendement des installations et d'en abaisser le prix.

### Le problème n° 1 la protection du personnel

Les principes généraux développés dans le chapitre précédent à propos des centrales nucléaires s'appliquent intégralement aux réacteurs destinés à équiper des engins mobiles, qu'ils se déplacent sur l'eau, dans l'eau, dans l'air ou sur terre. Bien entendu, pour toutes ces applications, on donnera la préférence aux équipements les plus compacts, et c'est pourquoi, sauf pour les bâtiments de haute mer, il semble que le réacteur très enrichi, du type homogène, doive trouver dans ce domaine un brillant avenir. Nous n'en sommes pas encore là.

Le problème de la protection contre les rayonnements émis par les réacteurs domine toutes leurs applications aux transports. Il faut malheureusement constater que, dans ce sens, les progrès sont très lents et qu'on ignore encore dans quelle voie pourra être accompli le pas décisif. En attendant que soit trouvée la formule magique pour arrêter les neutrons et surtout les rayons gamma, il faut s'accommoder des épaisseurs énormes de ma-



LE SOUS-MARIN ATOMIQUE "NAUTILUS" QUITTE NEW YORK POUR DES ESSAIS EN MER

tériaux que leur absorption exige et supporter le handicap du poids de ces blindages. De ce fait, le véhicule atomique ne peut être qu'un véhicule lourd, ce qui ne veut pas dire lent, car les propulseurs nucléaires peuvent développer des puissances considérables. Celui qui se prête le moins mal à leur installation est évidemment le navire, où la place ne manque généralement pas pour édifier des murailles de protection efficaces. Il en va autrement à bord d'un avion ou sur une locomotive (à cause du gabarit). Sans doute trouvera-t-on des compromis, comme de n'installer qu'une protection partielle sur les faces des réacteurs qui ne regardent pas l'équipage, quitte à prévoir à l'arrêt, des tunnels ou garages spéciaux où les véhicules viendraient se ranger. Ce ne peuvent être que des palliatifs, et le problème de la sécurité demeure au premier rang des difficultés à surmonter.

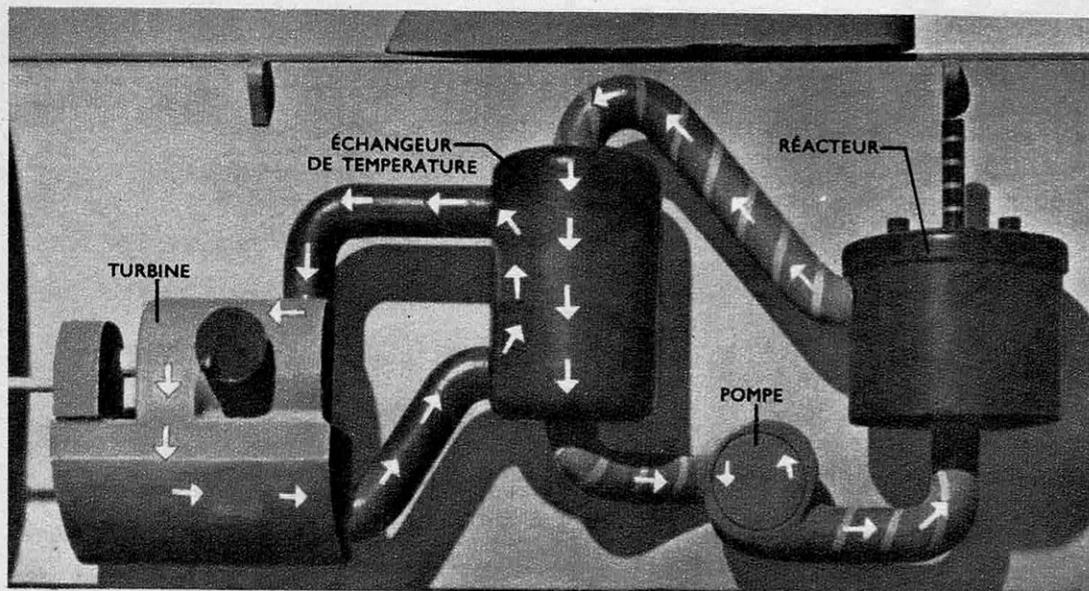
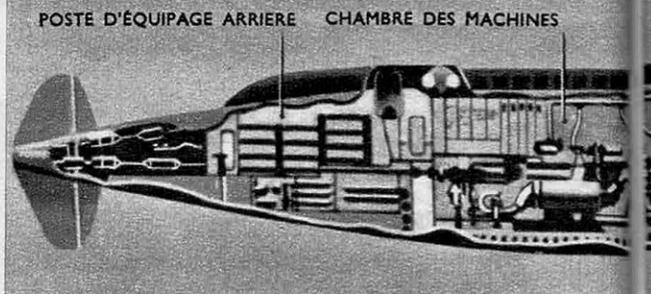
### **Le sous-marin atomique bouleverse la stratégie navale**

Le sous-marin est, de tous les navires de haute mer, le plus indiqué pour bénéficier des premiers progrès de la propulsion nucléaire

qui lui apporte enfin la solution du problème du moteur unique. Sur un sous-marin classique, il faut deux appareils moteurs distincts : des diesels pour la marche en surface et en plongée peu profonde avec le schnorkel ; des moteurs électriques alimentés par des batteries d'accumulateurs pour la navigation en plongée profonde. L'ensemble représente un poids considérable. L'autonomie en plongée est limitée par la capacité des accumulateurs. En surface, elle demeure réduite par la nécessité de brûler du gas-oil pour recharger périodiquement les batteries. Les propulseurs nucléaires sont utilisables dans les deux cas puisqu'ils n'exigent pas d'alimentation en air. Avec eux, plus d'accumulateurs lourds et présentant un risque permanent d'explosion des gaz qui se dégagent, plus de servitudes d'entretien, plus de remontée en surface pour leur recharge nocturne. Le combustible nucléaire permettant de faire plusieurs fois le tour de la terre sans renouvellement, plus de mission abandonnée faute de carburant, plus d'escalas dans les eaux neutres ou amies où les espions guettent, plus d'opérations de ravitaillement en haute mer, aussi dangereuses pour le

# Le Nautilus

**L**e premier sous-marin atomique, le Nautilus, fut lancé le 21 janvier 1954 à Groton (USA) et mis en service le 10 janvier 1955. Les schémas ci-contre et ci-dessous donnent une idée de ses aménagements et de son ensemble propulsif. Son réacteur est identique au prototype à refroidissement à eau sous pression de la station d'Idaho. Ce prototype a été transformé en réacteur d'étude et sert actuellement à l'entraînement des spécialistes de la marine. Sa charge en combustible n'a été renouvelée qu'après 30 mois de marche, dont 66 jours consécutifs à plein régime.



pétrolier ravitailleur que pour le sous-marin.

D'ores et déjà, le sous-marin atomique a trouvé un propulseur nucléaire adéquat, qui ira en se perfectionnant, perdant en volume et en poids et augmentant sa puissance, rendant d'autant plus aisée la protection de l'équipage contre les radiations qu'il deviendra plus compact.

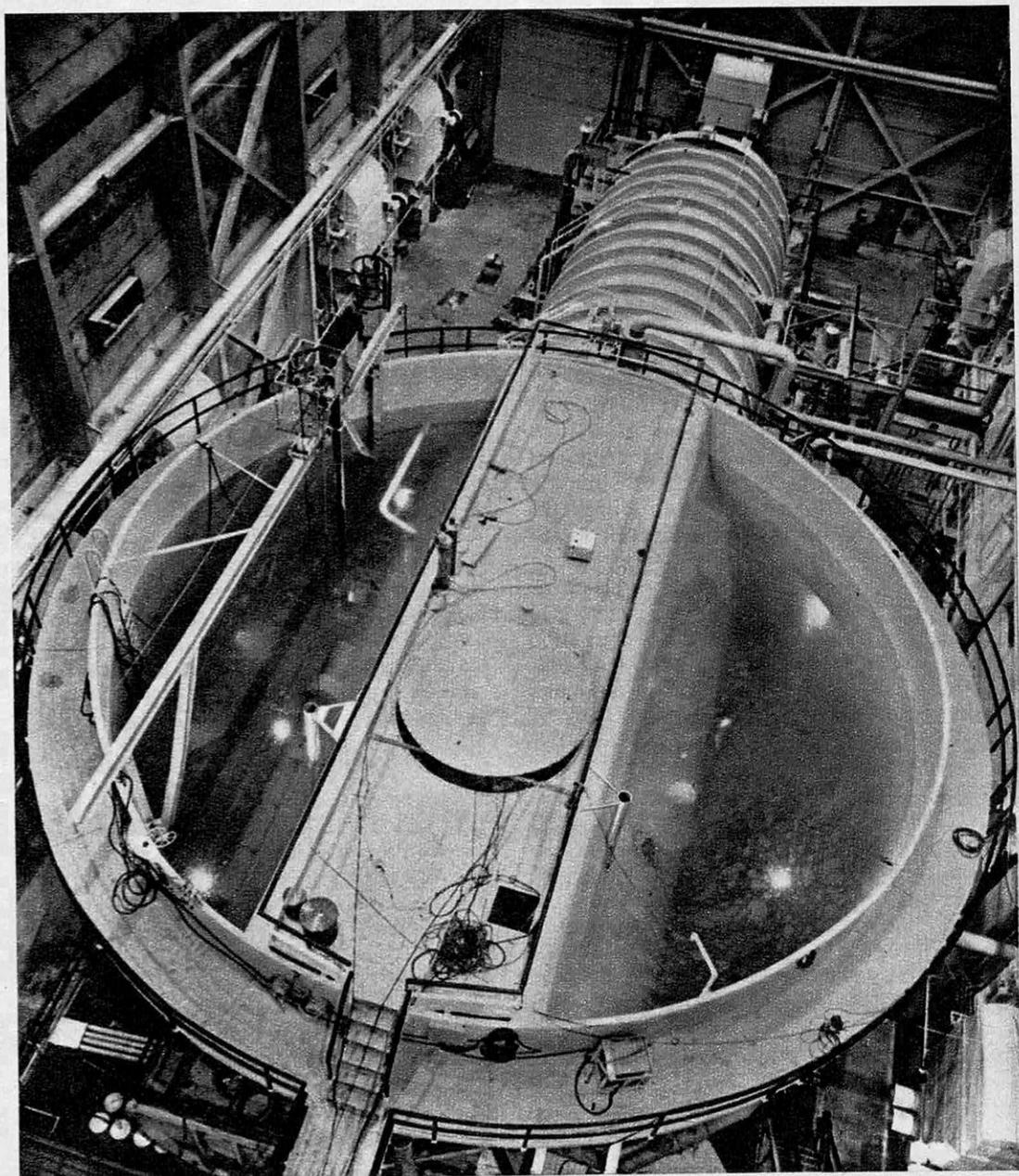
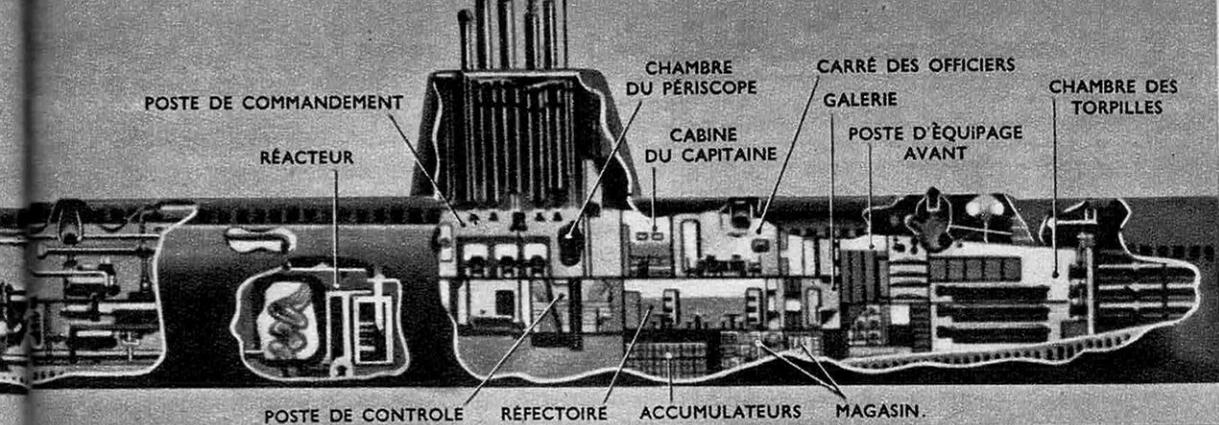
Le sous-marin atomique est appelé, par ses performances, à bouleverser la stratégie navale. N'étant plus tributaire du combustible, il jouira d'un rayon d'action pratiquement sans limite et pourra assurer indéfiniment le guet par radar au large des côtes. Avec un propulseur de grande puissance, sa vitesse en plongée dépassera celle des navires de surface et il pourra la soutenir sur des milliers de milles.

## Le « Nautilus »

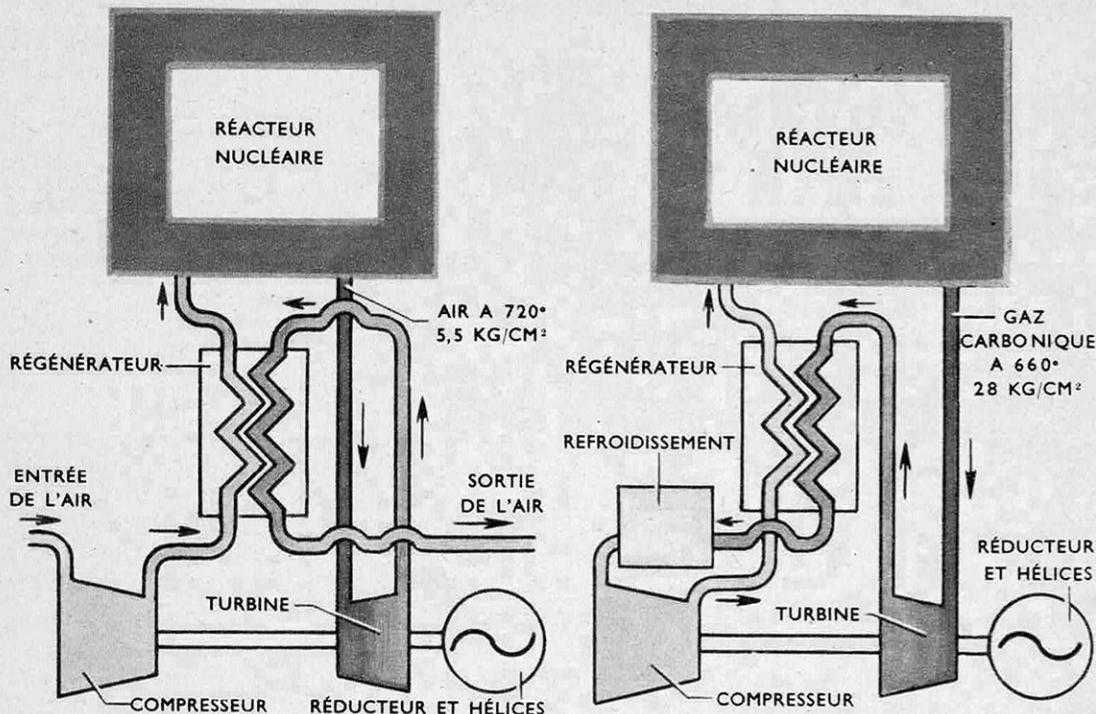
Le premier sous-marin atomique est le Nautilus américain, de 90 m de long, déplaçant 2 800 tonnes en surface et d'une vitesse

maximum de 25 nœuds au moins en plongée. Sa propulsion s'effectue par le schéma classique : un générateur de vapeur alimente deux groupes de turbines, à bâbord et à tribord, qui entraînent les hélices par l'intermédiaire d'un réducteur.

Ici, les chaudières à mazout sont remplacées par un réacteur nucléaire portant à haute température de l'eau sous pression qui circule en circuit fermé entre le réacteur et un échangeur de température qui vaporise l'eau envoyée aux turbines. Le réacteur est du même type, dit à eau sous pression, que celui de la centrale électrique de Shippingport, et réalisé par la même Compagnie, Westinghouse, qui a utilisé pour son unité terrestre de grande puissance l'expérience acquise avec le prototype marin. Il comporte un tank de petites dimensions contenant de l'eau et des éléments de combustible nucléaire à base d'alliage d'uranium — 235, gainés de « Zircaloy », alliage de zirconium, pour les protéger contre la corrosion. Les barres de contrôle sont en hafnium.



*Le sous-marin fictif d'Idaho qui sert aux essais du premier propulseur nucléaire Mark I. De l'eau de mer entoure la partie de la coque réservée au réacteur ; les turbines sont logées dans le cylindre à l'arrière-plan.*



La turbine à gaz peut se concevoir en circuit ouvert ou en circuit fermé. Ces deux cycles sont représentés ici de façon très simplifiée. Le second (à droite) évite tout rejet de gaz radioactif dans l'atmosphère.

SUITE DE LA PAGE 88

L'eau portée à haute température sous une pression de l'ordre de 120 kg/cm<sup>2</sup> ne se vaporise pas. Elle parvient à un échangeur de température où la vapeur est produite dans le circuit secondaire. La température et la pression de cette vapeur sont modérées et le rendement thermique ne dépasse probablement pas 25 %. On ne possède pas de précision sur la puissance développée, l'amiral américain Rickover, qui a présidé à cette réalisation, ayant seulement déclaré qu'elle correspondait aux besoins d'une ville de 20 000 habitants.

Au printemps dernier 16 mois après sa mise en service, le *Nautilus* avait parcouru quelque 23 000 milles, dont plus de la moitié en plongée. Au cours d'une croisière, il a couvert 1 300 milles en plongée en 84 heures. Sa charge de combustible peut n'être renouvelée que, tous les 2 ans et demi.

Le réacteur du *Nautilus*, autrefois désigné sous les initiales S T R Mark II (Submarine Thermal Reactor), est maintenant appelé S 2 W (W pour Westinghouse). L'ancien S T R Mk I, rebaptisé S 1 W, était le prototype édifié à terre, à la station d'essais des réacteurs de l'Idaho, dans une section de coque d'un sous-marin fictif aux dimensions du *Nautilus*; l'ensemble était logé dans un énorme tank rempli d'eau pour réaliser des conditions analogues à celles rencontrées en mer. Il a été progressivement transformé en réacteur d'étude pour l'essai des perfectionnements à

apporter aux futurs propulseurs navals de ce type, en particulier aux « cœurs » des réacteurs, et pour l'entraînement des spécialistes de la marine appelés à conduire ces unités. Il est maintenant dénommé Naval Reactor Test Facility et sa charge de combustible a été renouvelée après quelque 30 mois d'opération et après avoir fonctionné pendant 66 jours consécutifs à pleine charge, démontrant l'endurance des réacteurs à eau sous pression et leurs possibilités d'utilisation sur des navires croisant à grande vitesse et sans ravitaillement pendant de longues périodes.

## 15 sous-marins atomiques américains

Le réacteur S 1 G (G pour General Electric), prototype terrestre du S 2 G qui équipera le sous-marin *Seawolf*, a été construit à West Milton, dans l'Etat de New York, et est en cours d'essais. Le sous-marin lui-même a été lancé le 22 juillet 1955 et doit être achevé en 1959. Le réacteur utilise le sodium liquide comme agent de transport de la chaleur. La vapeur produite dans l'échangeur actionne un turbogénérateur de 12 500 kW. L'énergie produite par le S 1 G dépassant celle nécessaire aux essais, le surplus est vendu aux compagnies électriques locales de distribution.

Un troisième prototype terrestre : S 3 G, est en construction à West Milton. Le Congrès américain a autorisé la construction d'un sous-

marin radar qui doit être propulsé par deux réacteurs de ce modèle. Ce sera le plus grand sous-marin qui ait jamais été construit (5 450 tonnes) et le premier à être équipé de deux réacteurs. Enfin, un contrat a été passé avec la Combustion Engineering Co pour la mise au point d'un réacteur adapté à un sous-marin de « petit tonnage ».

Le *Nautilus* et le *Seawolf* ont des déplacements respectifs de 2 800 et 2 900 t, alors que les sous-marins en service dans la Marine américaine ont des déplacements de l'ordre de 1 700 tonnes. Il y aurait au total, aux Etats-Unis, au moins une quinzaine de sous-marins atomiques à l'étude. Les études se poursuivent pour la réalisation de réacteurs destinés à des bâtiments de gros tonnage, en particulier à un porte-avions pour lequel on a cité le chiffre de 80 000 tonnes de déplacement et qui serait équipé de 8 réacteurs, et à un croiseur qui en recevrait quatre. D'autres portent sur de petits réacteurs perfectionnés, avec modérateur organique, qui pourraient équiper des unités légères.

L'U.R.S.S. a probablement en cours de réalisation un important programme de sous-marins atomiques ; elle a entrepris, d'autre part, la construction d'un brise-glaces de 16 000 t avec une puissance de 44 000 ch.

En France, on sait que la Marine a entrepris de construire un sous-marin atomique avec la collaboration du Commissariat à l'Energie Atomique. Malheureusement, pour la réalisation d'un réacteur développant une puissance élevée sous un faible volume, nous ne disposons pas des mêmes ressources que les Etats-Unis et l'U.R.S.S. Le combustible du *Nautilus* est de l'uranium très enrichi en U-235 et qui nous fait défaut. Celui que les Etats-Unis nous ont offert ne peut être consacré qu'à des applications pacifiques et non à la construction d'un sous-marin. Nous devons donc envisager l'emploi du plutonium, sous-produit de nos piles à uranium naturel, dont la production est encore faible et dont l'utilisation pose des problèmes qui sont loin d'être entièrement résolus. Certains pensent cependant que le sous-marin français serait lancé avant 5 ans. De toute façon, il était indispensable que nous entreprenions dès maintenant cette étude qui permettra de familiariser nos ingénieurs avec les problèmes techniques particuliers des propulseurs nucléaires marins, et de former des équipages spécialisés.

### Des solutions très diverses

A peu près tous les types de réacteurs peuvent convenir pour la propulsion, chacun ayant ses avantages et ses inconvénients.

La plupart des fluides proposés pour l'éva-

cuation de la chaleur du noyau du réacteur deviennent radioactifs par capture de neutrons et obligent à protéger spécialement les canalisations qu'ils parcourent et l'échangeur de température. Cependant, l'eau présente l'avantage de ne pas devenir dangereusement radioactive en circulant dans le faisceau tubulaire à l'intérieur du réacteur. L'hydrogène de l'eau, en absorbant un neutron, devient du deutérium stable ; celui-ci peut, à son tour, capturer un neutron et devient alors du tritium radioactif, mais émetteur seulement de particules bêta peu énergiques qui sont absorbés par les parois des canalisations sans qu'il soit nécessaire de prévoir d'autre protection. L'oxygène de l'eau se transforme, sous l'action des neutrons rapides, en radioazote-16, émetteur de particules bêta et de rayons gamma très pénétrants. Mais comme la période de ce radioélément est de 7 secondes, il ne peut s'accumuler en quantité dangereuse.

### La turbine à gaz

Du point de vue compacité, les systèmes de propulsion employant des turbines à gaz sont particulièrement séduisants ; sous condition que le réacteur développe des températures élevées, leur rendement serait au moins aussi bon que celui des systèmes proposés jusqu'ici et leur prix du même ordre. Un ingénieur de Harwell, J.E.B. Perkins, en a fait récemment une étude poussée dans la revue *Nuclear Power*.

Ces turbines peuvent se concevoir avec circulation des gaz en circuit fermé ou en circuit ouvert. Il est évident que si l'air parvient directement à la turbine après avoir traversé le réacteur nucléaire, le circuit ouvert ne peut convenir par suite de la radioactivité des gaz d'échappement rejetés à l'atmosphère.

Avec circulation des gaz en circuit fermé, le propulseur peut être plus ou moins complexe suivant la place dont on dispose et le rendement que l'on veut obtenir. Le compresseur, par exemple, peut être à deux ou plusieurs étages avec refroidissement intermédiaire pour réduire le travail qui lui est demandé. La turbine peut être aussi en deux parties, : l'une entraînant le compresseur, l'autre fournissant la force motrice, et, entre les deux, un réchauffeur peut porter à nouveau les gaz à la température maximum. Un échangeur de température supplémentaire pourra récupérer la chaleur des gaz qui s'échappent de la turbine en la transférant à ceux qui sortent du compresseur avant leur entrée dans la turbine. Ainsi obtiendra-t-on un bilan thermique des plus favorable, mais le prix de revient de l'installation s'en ressentira.

Le réacteur nucléaire et la turbine à gaz

peuvent être combinés de deux manières principales. Dans la première, le gaz entraînant la chaleur du réacteur passe directement à la turbine. Le principal problème qui se pose alors est la contamination possible des gaz par les produits de fission ou par les impuretés qu'il contient et que les neutrons ont rendues radioactives. Le gaz lui-même doit naturellement être choisi de manière à ne pas être sensible aux neutrons. Tout le circuit doit être rigoureusement étanche, ce qui est très difficile à réaliser et conduit à envisager de loger toute l'installation dans une enceinte sous pression pour que, si fuite il y a dans le circuit, elle se produise vers l'intérieur et non vers l'extérieur.

Dans la seconde combinaison, on prévoit deux circuits : l'un pour le refroidissement du réacteur par un fluide qui peut être un gaz ou un métal en fusion. Les gaz, d'une manière générale, conviennent assez mal pour le refroidissement des réacteurs fonctionnant à haute température ; l'air, en particulier, est un très mauvais agent de transfert de la chaleur et, pour qu'il puisse évacuer toute celle que développe le réacteur, il faudrait qu'il le traverse à une vitesse prohibitive, la surface d'échange de la chaleur étant relativement faible. Au contraire, le sodium, par exemple, emporte beaucoup plus de chaleur sous un faible volume. Comme on peut réaliser des échangeurs de température de grande surface, il la cédera sans difficulté au gaz du circuit moteur.

### La turbine à hélium

Lorsqu'on admet de refroidir le réacteur par un gaz, on peut choisir l'hydrogène, le gaz carbonique, ou encore l'hélium (tiré des sources terrestres et non de l'atmosphère où il contient trop d'isotopes de masse 3 qui capte les neutrons). L'hélium présente des avantages et des inconvénients ; il transporte mieux la chaleur, et la vitesse du son dans ce gaz est trois fois plus élevée que dans l'air, de sorte qu'il circule mieux à grande vitesse dans les canalisations étroites du réacteur et autour de l'extrémité des pales des turbines qui peuvent tourner plus vite ; mais sa chaleur spécifique élevée oblige à prévoir des compresseurs à étages multiples avec refroidissement intermédiaire qui compliquent l'installation.

Rolls-Royce, en Angleterre, a étudié un propulseur nucléaire avec refroidissement du réacteur par sodium fondu et circuit moteur à hélium en cycle fermé. Un compresseur à deux étages, avec refroidissement intermédiaire, envoie l'hélium à un échangeur de température où le sodium lui transfère sa chaleur. Le gaz arrive à une première turbine à haute pression actionnant le compresseur, puis à une

seconde turbine basse pression entraînant le réducteur et l'hélice. En quittant la turbine, l'hélium cède la plus grande partie de sa chaleur restante au circuit de sodium dans un récupérateur, puis passe à un refroidisseur avant de revenir au compresseur. L'ensemble occupe un volume relativement réduit et trouverait facilement place à bord d'un navire, bien que l'installation soit un peu plus compliquée que nous ne l'avons dit ; il faut, en effet, lorsque l'on utilise le sodium comme agent de refroidissement, prévoir, entre le circuit primaire de refroidissement du réacteur nucléaire et celui du gaz qui entraîne les turbines, un circuit intermédiaire de sodium avec les échangeurs de température convenables. C'est que le sodium qui a été soumis aux neutrons du réacteur, devient radioactif émetteur de rayons gamma, et il faut protéger toutes les canalisations qu'il parcourt, ainsi que son échangeur de température. Peut-être pourrait-on se passer du circuit intermédiaire en utilisant le lithium, mais on sait encore mal se servir de ce métal.

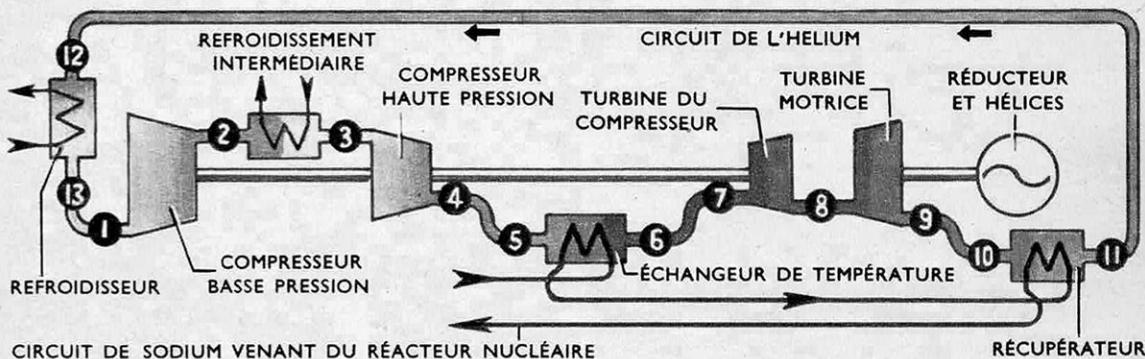
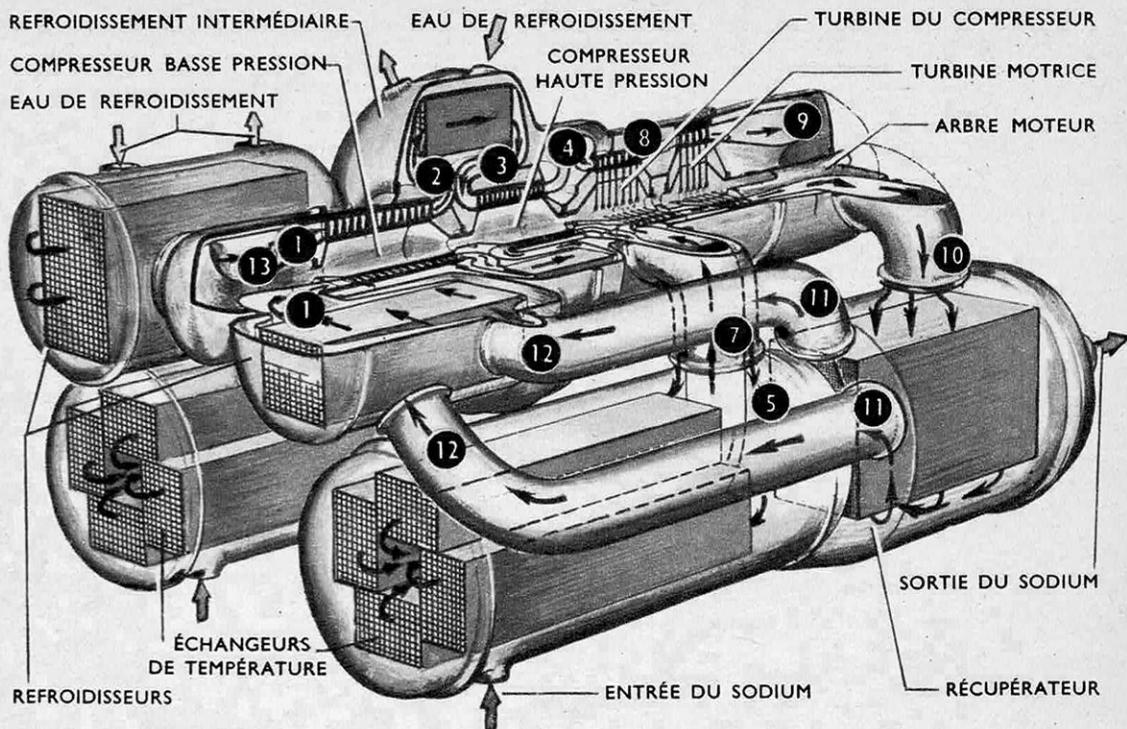
### La barrière des températures

La température à laquelle peut fonctionner un réacteur dépend de la nature du combustible et de celle de l'agent de refroidissement. L'uranium métallique fond vers 1 100°, mais éprouve vers 660° un changement de structure très gênant qui s'accompagne d'une variation de volume pouvant déformer ou faire éclater les gaines qui le protègent contre la corrosion. Au contraire, l'oxyde ou le carbure d'uranium ne fondent qu'au-dessus de 2 000°. Pour sa part, le sodium bout à 880° à la pression atmosphérique, mais en admettant une légère surpression dans le circuit, on peut dépasser 1 000°. En gros, il semble que l'on puisse atteindre pratiquement des températures de l'ordre de 700° à l'échangeur de température, avec 100 ou 200° de plus pour l'intérieur du combustible.

Les hautes températures, nécessaires pour que la turbine à gaz ait un bon rendement, posent des problèmes technologiques ardues pour le réacteur dont le combustible et éventuellement le modérateur sont exposés à une corrosion rapide, ainsi que pour les échangeurs de température. Ce sera la tâche des métallurgistes de mettre au point des alliages spéciaux où les métaux « nouveaux », béryllium, zirconium, tantale, molybdène, niobium joueront un rôle capital.

### Les avantages du cargo atomique

Le navire de commerce à propulsion nucléaire jouirait d'avantages évidents. En premier lieu, sa vitesse pourrait être très supé-



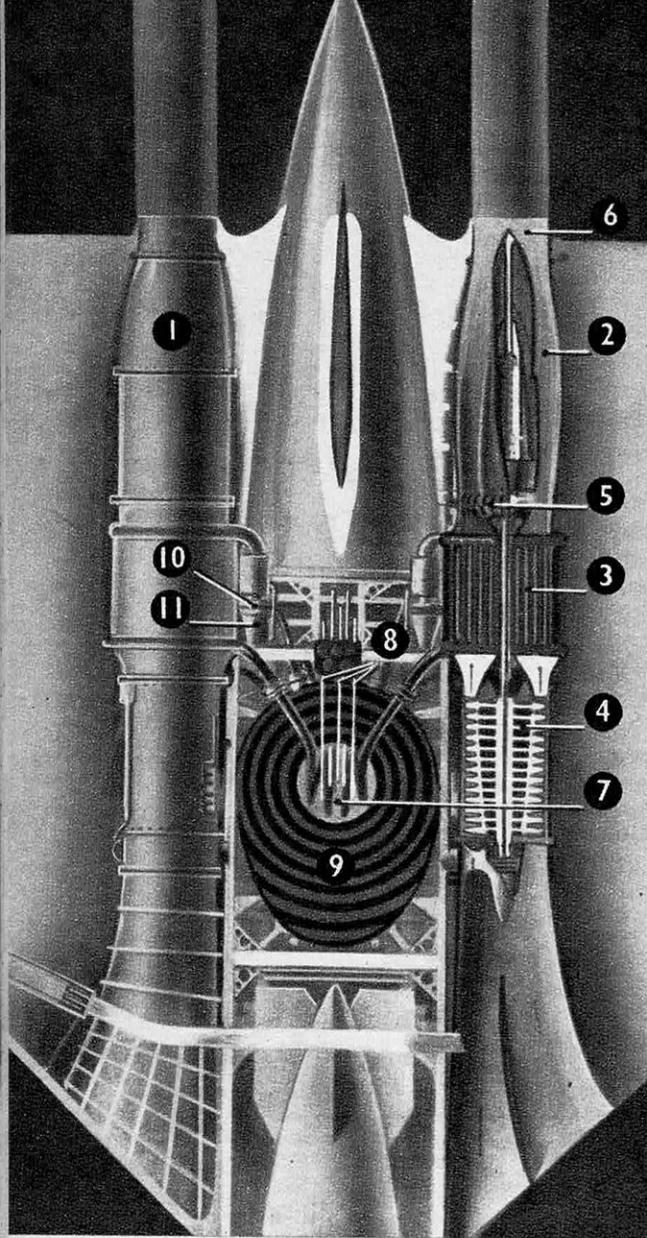
*Cette turbine à gaz marine de 15 000 chevaux effectifs est un projet de Rolls-Royce. Seul le circuit de gaz (hélium) est figuré. Deux autres circuits, avec échangeur intercalé, utilisent le sodium fondu : l'un à travers le réacteur nucléaire, l'autre chauffant le gaz. Les chiffres se correspondent sur le dessin et sur le schéma.*

rieure à celle d'un navire à propulsion classique, car la consommation de combustible étant très faible, on pourrait l'équiper d'un système propulseur de puissance bien supérieure. D'autre part, les soutes à combustible seraient supprimées au bénéfice du volume des cales à marchandises ; leur épuisement progressif au cours d'une traversée ne modifierait plus l'équilibre du bateau et il ne serait plus nécessaire de lester les réservoirs avec de l'eau de mer quand ils ne contiennent plus de carburant, ce qui pose des problèmes d'entretien compliqués. Les ravitaillements en combustible seraient très peu fréquents, d'où une importante diminution des frais d'exploitation qu'entraînent généralement la main-d'œuvre et

le temps nécessaire à ces opérations. La rotation des navires serait accélérée.

Le plus favorisé des bâtiments de guerre atomiques étant le sous-marin, on a pu se demander s'il ne conviendrait pas d'envisager des cargos sous-marins atomiques. Il ne paraît pas que cette solution puisse être retenue, au moins pour deux raisons. La première est la présence d'une coque devant résister à la pression et qui diminue considérablement le rapport du poids utile de la cargaison au poids total. La seconde tient au fait qu'un cargo est appelé à emporter une charge variable, ce qui pose des problèmes d'assiette difficiles à admettre avec un sous-marin.

Les avantages de la propulsion nucléaire



Sur l'avion atomique de ce projet d'avant-garde (d'après *Life*) les moteurs sont des turboréacteurs (1 et 2) dont les chambres de combustion sont remplacées par des échangeurs de température (3). L'air aspiré à l'avant passe dans un compresseur (4) puis est chauffé à 650° dans l'échangeur. Il se détend à travers la turbine (5) et est éjecté à grande vitesse par une tuyère (6) pour propulser l'appareil par réaction. Le réacteur nucléaire (7), à combustible très enrichi, contrôlé par un certain nombre de barres de réglage (8) absorbant les neutrons, est refroidi par du métal en fusion, sodium, par exemple, qui transporte la chaleur dégagée à l'échangeur de température. Ce réacteur peut être débranché et enlevé d'une seule pièce lorsque le combustible doit être renouvelé, ce qui n'est nécessaire qu'à intervalles éloignés. Autour du réacteur, un blindage (9) opaque aux radiations est constitué par des couches concentriques de plomb et d'un produit hydrogéné. La pompe (10) et la turbine (11) assurent la circulation du sodium entre le réacteur nucléaire et l'échangeur.

ont été mis en évidence par la crise de Suez. La route du Cap ne peut devenir rentable que si elle est empruntée par des bâtiments de gros tonnage capables d'emporter des cargaisons importantes à une vitesse de croisière suffisamment grande, et dégagés de l'obligation de faire de longues escales, dans des ports spécialement adaptés à leur tirant d'eau, pour se ravitailler en charbon ou en mazout. Les bateaux marchands atomiques pourraient parcourir les plus longues routes commerciales sans toucher terre.

### Un cargo de 15 milliards

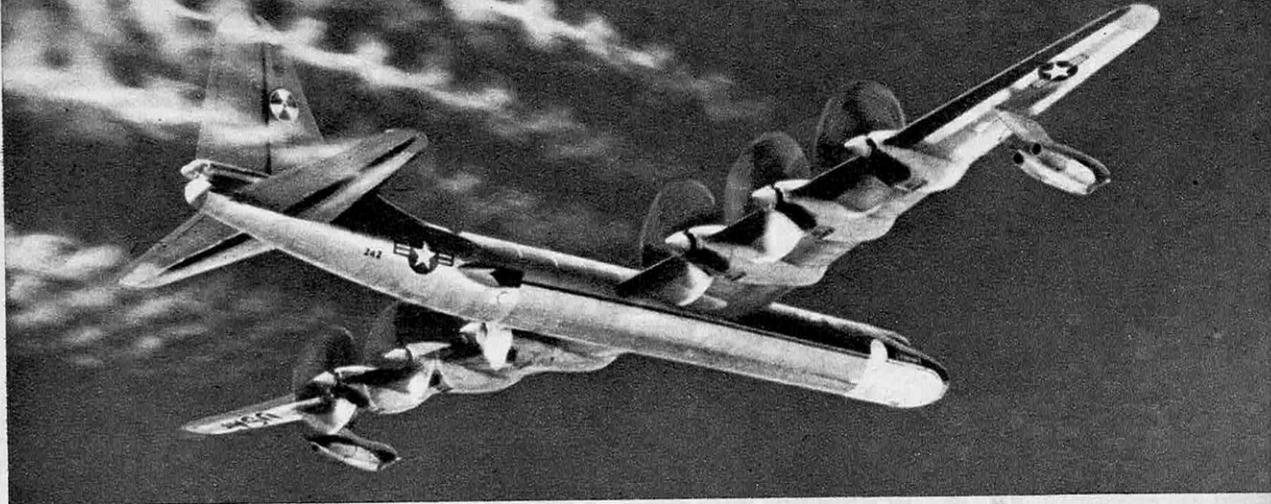
La construction du premier navire marchand atomique a été décidée aux Etats-Unis. Ce sera un cargo mixte de 12 000 tonnes qui pourra transporter 100 passagers et aura une vitesse de croisière de 21 nœuds. Il sera mis en service d'ici trois ans. Sa construction a été confiée à la Commission de l'Energie Atomique américaine pour le réacteur, et aux bureaux maritimes du Département américain du Commerce pour la coque et toutes les installations non atomiques du bord. Il coûtera 40 millions de dollars ( plus de 15 milliards de francs) dont 22 millions pour l'appareil propulsif. En principe, ce dernier comportera un réacteur à eau sous pression, comme celui du *Nautilus*, mais perfectionné et qui développera 20 000 ch.

La Commission se propose d'ailleurs d'expérimenter et d'appliquer à la navigation marchande d'autres types de réacteurs : le réacteur à modérateur et refroidisseur organique, le refroidissement au gaz avec turbine en circuit fermé, le réacteur à ébullition d'eau et le réacteur homogène aqueux. C'est ainsi qu'elle a passé un contrat avec une société privée pour la mise à l'étude d'un pétrolier de la classe des Supertankers (38 000 tonnes, 215 m de long), qui pourrait prendre la mer en 1961. Il sera probablement équipé d'un réacteur à refroidissement par un gaz, qui actionnerait directement, en circuit fermé, une turbine motrice.

Au Japon, on étudie un supertanker de 40 000 tonnes à propulsion nucléaire.

### Les pétroliers atomiques seraient immédiatement rentables

Tous les calculs de prix de revient pour la propulsion nucléaire des navires marchands sont extrêmement incertains faute de bases concrètes. D'après certaines estimations, la propulsion atomique des cargos coûterait deux fois plus cher que la propulsion au mazout pour une puissance donnée. Reste à savoir si cette différence de prix, impressionnante à



Sur ce B-36, un réacteur a volé pour la première fois en fonctionnement (il ne servait pas à la propulsion) pour étudier son comportement en altitude et l'action de ses rayonnements sur les divers instruments de bord.

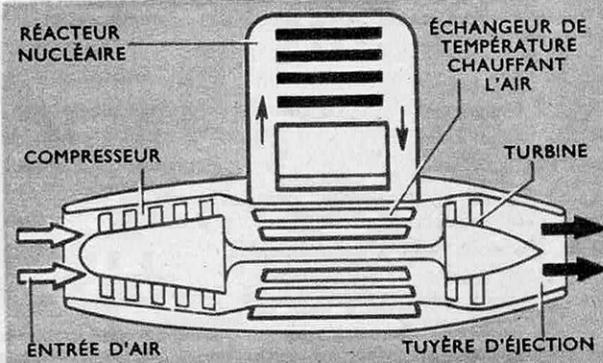
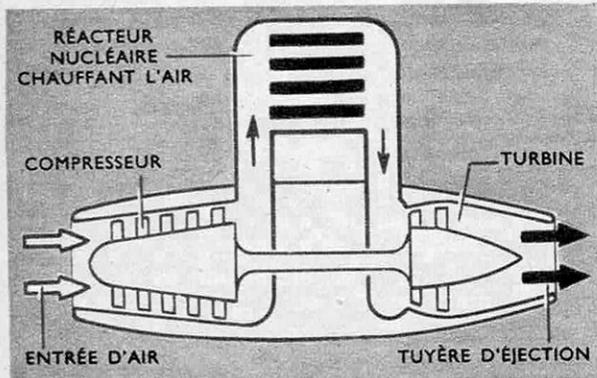
première vue, ne serait pas plus que compensée par la rotation et les traversées plus rapides, l'absence des escales de ravitaillement et donc les routes maritimes plus courtes, l'élimination du poids mort du combustible de réserve et le volume plus considérable de la cargaison transportée. Pour Louis H. Roddis, directeur du Département des Réacteurs à la Commission américaine à l'Energie Atomique, le progrès ne fait pas de doute, même en tenant compte des investissements considérables qu'exige un bâtiment atomique et de la formation coûteuse des équipages très spécialisés.

Parmi tous les navires marchands, les pétroliers offrent les perspectives les plus favorables pour la propulsion atomique. En moyenne, ils passent 80 % et parfois 90 % de leur temps en mer, ce qui permettrait une utilisation intensive de leur combustible. Le mazout qu'ils brûlent actuellement représente une fraction appréciable de leur charge utile, atteignant jusqu'à 10 %, et qui pourrait être

économisée. Enfin, la cargaison elle-même pourrait servir de protection contre les radiations ; le seul élément radioactif engendré par les neutrons serait le radiophosphore dont la vie est relativement courte, de sorte qu'après une période de stockage de quelques semaines, le brut qui aurait séjourné dans les réservoirs entourant le réacteur pourrait être livré sans danger à la consommation. L'économie de poids serait très appréciable. Pour le voyage de retour à vide, il suffirait de remplir les réservoirs avec de l'eau de mer.

Les installations portuaires seraient sans changement ; il faudrait seulement prévoir, en certains ports, des moyens de manutention et des équipements spéciaux pour effectuer les ravitaillements en combustible nucléaire, c'est-à-dire extraire la partie active du réacteur lorsqu'elle serait usée et la remplacer par une nouvelle. L'opération demanderait entre 6 et 48 heures au maximum.

Le département de la Marine marchande



Le turboréacteur nucléaire peut se concevoir de deux manières : en cycle ouvert (à gauche) avec chauffage direct de l'air ; en cycle fermé avec circulation d'un fluide intermédiaire entre le réacteur et un échangeur de température (à droite) ce qui élimine toute contamination de la turbine par la radioactivité des gaz.

américaine est particulièrement optimiste en évaluant à 44 %, dans le cas des tankers, l'augmentation du prix de revient de la propulsion atomique par rapport à la propulsion par diesels. D'après lui, leur exploitation serait dès maintenant rentable, bien que la marge de bénéfice soit réduite. Elle justifierait un programme d'ensemble permettant, après comparaison à l'usage des avantages économiques respectifs des divers systèmes propulsifs, de passer d'ici une dizaine d'années à une construction en série, les prix étant alors réduits d'une manière décisive.

### **L'avion atomique n'aura qu'une protection partielle**

Les premiers travaux sur la propulsion nucléaire des avions remontent à 1946, lorsque l'Air Force Américaine chargea la Fairchild Corporation d'entreprendre les études préliminaires et que le Manhattan District — la Commission de l'Energie Atomique n'était pas encore née — mit une partie de ses services d'Oak Ridge sur le problème. Celui-ci ne progressa que très lentement, avec la participation de la division des turbines à gaz de la General Electric, puis de Convair pour l'étude de la cellule. En 1954, le laboratoire d'Oak Ridge termina la construction d'un imposant système de pylônes pour l'étude expérimentale des blindages contre les rayonnements et, au début de 1956, on annonça le premier vol d'un bombardier B-36 modifié avec un réacteur à bord, non pour sa propulsion, mais toujours pour expérimenter diverses solutions pour la protection de l'équipage et de l'équipement électronique de l'avion. Peu après, on construisait à Arco, dans le désert de l'Idaho, une piste de 4 500 mètres de long. Il semble donc que les réalisations soient proches ; d'ailleurs le développement des réacteurs pour la propulsion des avions est inscrit en deuxième position sur la liste des recherches prioritaires de l'Air Force, immédiatement après les engins téléguidés intercontinentaux. Deux constructeurs au moins, Boeing et Bell, ont mis l'avion atomique à l'étude, indépendamment du programme gouvernemental.

Le problème de l'avion atomique est beaucoup plus difficile à résoudre que celui du sous-marin. Si le réacteur nucléaire ne consomme que des masses dérisoires de substance fissile, il est par contre très lourd à cause des écrans dont il faut l'entourer pour arrêter les radiations. Et le poids est un ennemi beaucoup plus redoutable dans l'air que sous l'eau. Chaque kilogramme de blindage exige un kilogramme supplémentaire d'avion pour le porter. Les premières études conduisaient à des avions d'un tonnage de 250 à 500 ton-

nes au minimum. Depuis, les études sur les écrans protecteurs ont permis de ramener le tonnage à une centaine de tonnes, dont 50 environ pour le blindage. La solution ne réside pas dans l'adoption de matériaux nouveaux plus opaques que le plomb aux rayonnements, mais dans le fractionnement judicieux de ces écrans disposés autour du réacteur. L'avion lui-même et son équipage n'exigent pas l'un et l'autre le même degré de protection. L'avion doit être protégé contre les neutrons et la chaleur, mais peut supporter une certaine irradiation par les rayons gamma. Au contraire, l'équipage doit être protégé aussi parfaitement que possible contre toutes les radiations.

Un premier système d'écran entoure donc le réacteur. Il est fait de plomb, qui arrête en partie les rayons gamma, et d'eau, ou d'une substance hydrogénée, qui ralentit les neutrons et facilite leur capture par une dernière couche à laquelle est incorporé du bore. Les passagers et l'équipage, placés le plus loin possible de ce premier blindage, recevraient encore une dose excessive de rayons gamma. Un dernier écran lourd, à leur proximité immédiate, ramène l'intensité du rayonnement restant à une valeur acceptable.

Le fait qu'il ne l'annule jamais complètement est un grave sujet de préoccupation. Les effets sur l'organisme des rayons de courte longueur d'onde, rayons X ou rayons gamma, sont cumulatifs, c'est-à-dire que des doses reçues à intervalles même éloignés s'ajoutent. Il faudra donc comptabiliser les doses reçues par chaque membre de l'équipage et lui interdire de voler sur avion atomique quand la dose absorbée dépassera la valeur admissible. La boutade humoristique qui dit que les aviateurs atomiques ne se poseront au sol que pour faire valoir leurs droits à la retraite n'est pas tellement éloignée de la réalité. Elle ne vise pas la longue durée des voyages sans escales que permettrait un appareil consommant infiniment peu de combustible, mais l'insuffisance jusqu'ici inévitable de la protection contre les rayonnements.

### **Turbopropulseur, turboréacteur ou fusée ?**

L'avion atomique pourra être un appareil à turbopropulseurs (c'est-à-dire à hélices entraînées par des turbines à gaz), à turboréacteurs (de l'air chaud entraînant leurs compresseurs d'alimentation avant d'être éjecté par des tuyères propulsives), ou à statoréacteurs (l'air se comprimant alors lui-même sous l'effet de la vitesse et s'éjectant par les tuyères sans actionner de compresseur). Disons tout de suite, pour éviter toute confusion, que nous sommes obligés d'employer le même mot

« réacteur » pour désigner deux organes essentiellement différents : le réacteur nucléaire, source d'énergie motrice, et le réacteur tout court qui, sous ses deux formes de turbo-réacteur et de statoréacteur, a pour fonction d'assurer l'éjection des gaz moteurs pour la propulsion par réaction.

Dans tous les cas, de l'air, puisé dans l'atmosphère, est comprimé, soit naturellement sous l'effet de la vitesse si celle-ci est suffisante, soit par des compresseurs. Il est ensuite porté à haute température avant d'être envoyé aux tuyères ou aux turbines. La disposition est simple en principe, mais comme un avion ne peut voler indéfiniment, il faut, lorsqu'il « coupe » ses réacteurs (au sens aviation et non nucléaire) que son réacteur (au sens nucléaire) soit refroidi convenablement, car il continue à dégager de la chaleur pendant assez longtemps après l'arrêt. Un système de refroidissement auxiliaire doit être prévu et compliquera l'installation.

### L'avantage est au turboréacteur

Pour chauffer l'air avant son éjection, on peut évidemment envisager de le faire circuler directement dans le réacteur nucléaire par des canalisations appropriées. Soumis à son passage à un flux intense de neutrons il deviendrait radioactif, ce qui ne présenterait pas d'inconvénient grave en vol, mais est absolument exclu pour le fonctionnement au sol. Aussi doit-on préférer le mode de chauffage indirect. Un liquide, qui peut être, par exemple, du sodium fondu, circule grâce à une pompe entre le réacteur et un échangeur de température où il cède sa chaleur à l'air. Cet air ne peut évidemment suivre un circuit fermé et revenir aux compresseurs, puis au réacteur nucléaire, par suite de l'absence de « source froide » à bord d'un avion, à moins d'installer des radiateurs extérieurs de grande surface qui constitueraient de sérieux obstacles à la propulsion et qui seraient d'ailleurs inopérants à haute altitude.

La température relativement modérée à laquelle fonctionne un réacteur nucléaire, même enrichi, ne peut guère convenir à la solution statoréacteur qui ne fonctionne d'une manière satisfaisante qu'à des vitesses largement supersoniques. Le poids du turbopropulseur, d'autre part, est assez élevé, de sorte que la solution la plus séduisante semble être le turboréacteur classique. Il est étudié aux Etats-Unis où l'on a annoncé que l'on avait fait fonctionner un tel engin au sol, à la station d'essais d'Arco.

Une dernière solution pour la propulsion par réaction serait fondée sur le principe de la fusée. Ici, on n'éjecte plus de l'air puisé

dans l'atmosphère, mais un fluide convenable emporté dans des réservoirs. On voit que, dans ce cas, on renonce à l'avantage du rayon d'action très étendu, car la durée de fonctionnement est limitée par l'approvisionnement préalable en fluide moteur. Celui-ci, après avoir servi d'agent de refroidissement, est éjecté sans retour. On ne peut guère, sur ce principe, concevoir que des engins fonctionnant pendant des temps très courts, non récupérables, et dont le prix de revient serait pratiquement prohibitif, au moins dans l'état actuel de la technique.

### Avion ou hydravion d'au moins 100 tonnes

Comment se présentera en résumé un avion atomique ?

Ce sera nécessairement, comme nous l'avons vu, un appareil lourd, d'au moins 100 tonnes, probablement pas plus rapide que les types conventionnels. Son avantage capital sera dans son rayon d'action pratiquement illimité. Avec un réacteur de n'importe quel modèle, il pourra faire plusieurs fois le tour de la terre sans ravitaillement ; ceci intéresse surtout l'aviation militaire qui pourra assurer la surveillance de grandes étendues d'océan, la chasse au sous-marin ou le bombardement intercontinental. Toute considération de prix de revient mise à part, une flotte de quelques-uns de ces avions géants et infatigables assurerait la surveillance radar permanente autour du continent américain, rendant inutile l'entretien coûteux des bases de l'Arctique.

L'aviation commerciale pourra tirer bénéfice de l'avion atomique par la suppression des escales jusqu'ici indispensables sur les longs parcours.

Il est cependant probable que les premiers modèles, tout au moins, d'avions atomiques seront pourvus d'un double système de propulsion, l'un conventionnel pour le décollage et l'atterrissage, l'autre nucléaire pour le vol en croisière, ce qui n'est pas fait pour en réduire le prix.

La consommation de combustible en cours de vol n'entraînant qu'une diminution de poids négligeable, l'avion se trouvera porter la même charge à l'atterrissage et au décollage. Mais cette charge étant très grande, il faudra prévoir des trains d'atterrissage renforcés pour supporter les efforts, et des pistes de très grande longueur. C'est pour cette même raison que l'on a proposé de réaliser d'abord un hydravion qui pourrait — autre avantage — faire ses essais au-dessus de vastes étendues d'eau désertes. Signalons d'ailleurs que certains ingénieurs pensent que l'ère atomique pourrait remettre en honneur le

plus léger que l'air pour le trafic transatlantique.

Un accident, dont on ne saurait négliger l'éventualité, aurait de graves conséquences, non seulement pour l'avion, mais pour la région avoisinante où se répandraient les produits de fission extrêmement radioactifs libérés par le réacteur endommagé. Entraînés par le vent, ceux-ci pourraient même exercer leur action nocive à de grandes distances du point de chute. Cette seule considération pourrait suffire à faire renoncer à la réalisation d'avions de ligne atomiques.

### La locomotive atomique, idéale pour traverser les déserts

Le premier avant-projet un peu sérieux de locomotive atomique a été étudié par le docteur Lyle B. Borst, professeur à l'Université de l'Utah, avec la collaboration d'experts représentant les cinq grandes compagnies de chemins de fer des Etats-Unis et d'ingénieurs appartenant à d'importantes firmes industrielles spécialisées dans les applications de la vapeur.

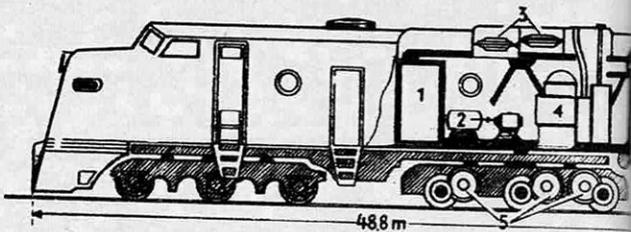
L'engin du docteur Borst doit pouvoir, d'après lui, rouler une année entière avec 5 kg d'uranium et être quatre fois plus puissant que les plus modernes des locomotives diesel-électriques. Il est divisé en deux éléments articulés : l'un est moteur, porté par deux fois 2 bogies à 3 essieux, l'autre porte le système de refroidissement de la vapeur et repose sur un bogie à 3 essieux et un à 2 essieux. Il doit développer 7 000 ch ; sa vitesse ne sera pas supérieure à celle des locomotives électriques classiques.

La température relativement modérée à la doit utiliser un combustible très enrichi, probablement à l'état de sulfate d'uranyle en solution dans de l'eau. La vapeur d'eau produite actionnerait une turbine entraînant une génératrice électrique qui fournirait le courant aux moteurs de traction. C'est la transmission électrique classique qui présente, sans aucun doute, des avantages pour une aussi grosse unité. Le réacteur proprement dit sera de volume réduit (90 cm de haut, 90 cm de long et 60 cm de large), mais il sera entouré d'un revêtement de plomb de 1,20 m d'épaisseur. Pour assurer une sécurité totale en cas de collision ou de déraillement, cet écran sera doublé d'une enceinte en acier, et la protection à elle seule pèsera 200 tonnes, ce qui portera le poids total de la locomotive à 327 tonnes.

Reprenant l'étude de ce projet, un Allemand, le docteur Nicolas Gössl a proposé de remplacer le refroidissement par eau par le refroidissement par un gaz tel que l'hélium peu sensible à la radioactivité ; il espère ainsi

## Le projet américain

Le réacteur utiliserait une solution d'uranium 235 produisant de la vapeur dans un échangeur de température. La vapeur surchauffée arriverait à une turbine qui entrainerait une génératrice électrique. Le poids total de la machine serait de 327 t, le revêtement protecteur du réacteur représentant 200 tonnes à lui seul. La puissance atteindrait 7 000 ch et le rayon d'action 80 000 km.



Doc. "La Vie du Rail"

économiser 90 tonnes sur le poids de la protection. En remplaçant, d'autre part, la transmission électrique par une transmission mécanique actionnée directement par la turbine, le poids total de l'engin serait ramené à 175 tonnes et sa longueur à 35 mètres avec 8 essieux moteurs. On se rapproche ainsi des dimensions habituelles des unités de traction en service sur les réseaux européens. Il est sans doute inutile d'ajouter qu'une pareille réalisation semble encore bien lointaine.

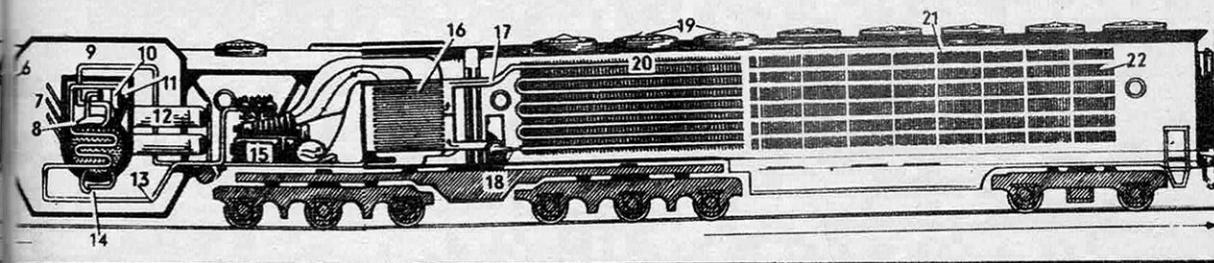
Signalons qu'on a pu mettre en doute la nécessité d'une protection très poussée et très lourde dans le cas particulier des locomotives. Leur commande peut s'effectuer à distance, et il suffirait simplement d'intercaler deux ou trois wagons contenant des marchandises non activables par le rayonnement entre la loco-

## La locomotive atomique allemande

L'emploi d'un gaz tel que l'hélium, au lieu de vapeur pour entrainer la turbine motrice, permettrait une sensible économie de poids. L'hélium, peu sensible à la radioactivité, autorise en effet un revêtement protecteur relativement léger. On arriverait ainsi à un poids total de 170 à 180 t pour une longueur de 35 mètres avec 8 essieux moteurs. En utilisant une transmission hydro-mécanique, la charge par essieu serait alors de 15 t avec une disposition d'essieux convenable. La puissance à la jante serait d'environ 6 000 ch.

# de locomotive à réacteur homogène

- |  |  |   |
|--|--|---|
| 1. Tableau de commande et de distribution. | 9. Eau de refroidissement du réacteur. | chaude à l'élément refroidisseur.         |
| 2. Générateur auxiliaire.                  | 10. Séparateur d'eau.                  | 18. Eau de refroidissement au condenseur. |
| 3. Ventilateurs.                           | 11. Vapeur provenant du réacteur.      | 19. Ventilateurs.                         |
| 4. Chaudière de chauffage.                 | 12. Générateur principal.              | 20. Eau refroidie par l'air.              |
| 5. Moteurs de traction.                    | 13. Conduite d'amenée de vapeur.       | 21. Élément (véhicule) refroidisseur.     |
| 6. Enveloppe de protection du réacteur.    | 14. Pompe de circulation.              | 22. Ouvertures d'évacuation de l'air.     |
| 7. Barres de commande.                     | 15. Turbine.                           |   |
| 8. Solution d'uranium 235.                 | 16. Condenseur.                        |   |
|  | 17. Conduite d'amenée d'eau            |   |



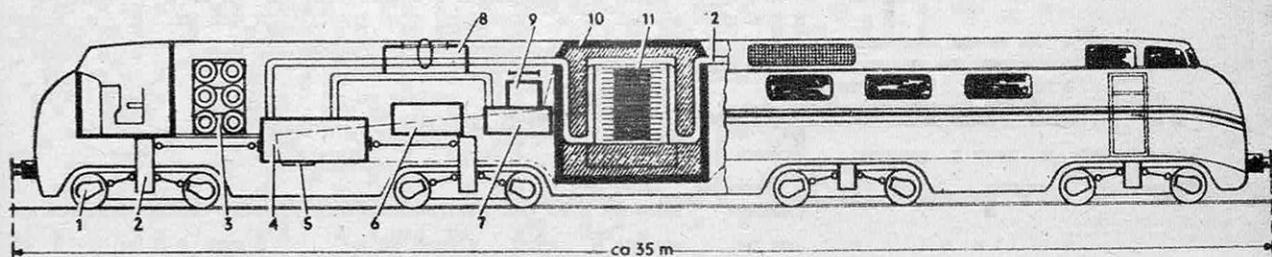
motive et le poste de conduite, pour protéger suffisamment le personnel et les voyageurs. Pour les arrêts dans les gares, on pourrait concevoir l'aménagement de tunnels spéciaux recouvrant les locomotives. Il est difficile d'admettre que ces simples précautions assureraient d'une manière satisfaisante la sécurité en cas d'incident.

Les avantages théoriques de la locomotive atomique sur la locomotive électrique sont évidents ; plus de caténaires, de pantographes ni de sous-stations de transformation ; plus de changements de locomotive aux frontières quand les réseaux de distribution d'électricité diffèrent par la tension ou la fréquence. L'entretien ne semble pas devoir être plus onéreux, et il est même possible que la vente des sous-produits constitués par les

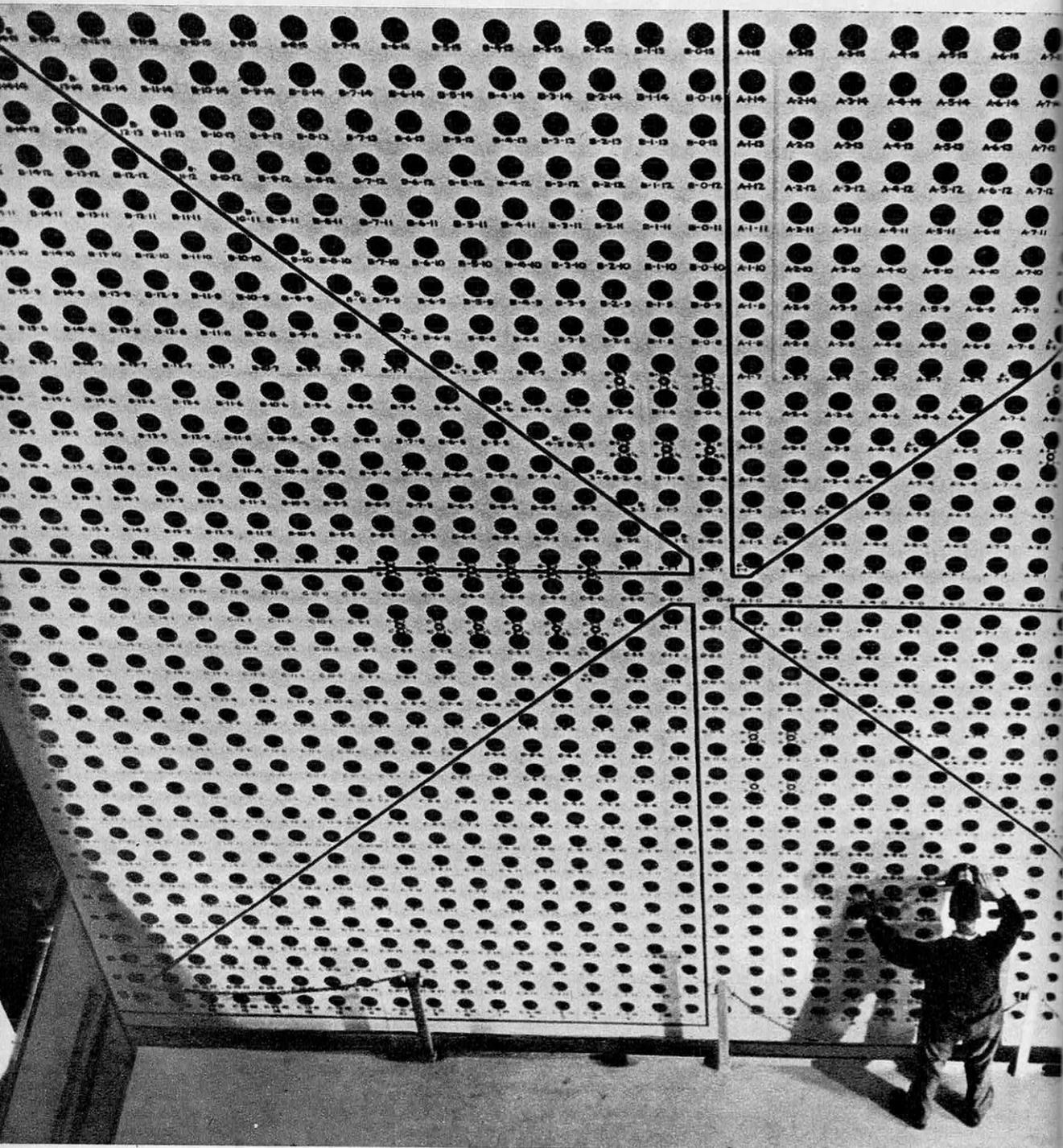
radioéléments de fission dégrève sensiblement le budget des locomotives atomiques. Mais la locomotive atomique, étant donné le prix élevé de sa construction, devra être utilisée d'une façon intensive. Même aux Etats-Unis, il ne semble pas que l'on en aurait un emploi suffisant. On a annoncé cependant les essais prochains en U.R.S.S. d'une locomotive atomique qui pourrait rendre de grands services sur le Transsibérien.

Dans l'état actuel des choses, et sans vouloir préjuger des progrès futurs de la technique, il semble que l'énergie atomique puisse jouer un rôle beaucoup plus avantageux dans le domaine ferroviaire en fournissant aux réseaux électrifiés de l'énergie par l'intermédiaire de centrales, plutôt que par l'installation de réacteurs sur les engins de traction.

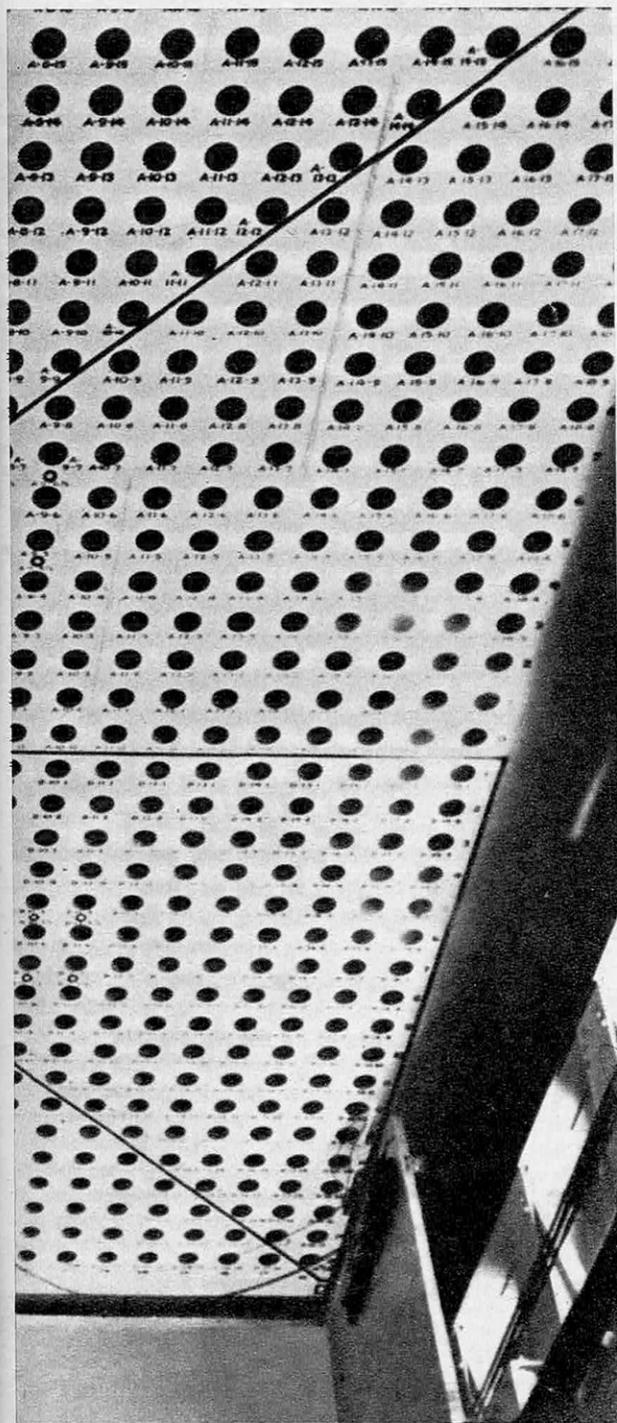
- |  |   |   |
|--|---|---|
| 1. Entraînement de l'essieu.                     | 5. Appui de l'élément porteur du réacteur.          | 9. Chaudière de chauffage (chauffage par circulation d'hélium). |
| 2. Inverseur - répartiteur.                      | 6. Compresseurs haute et (derrière) basse pression. | 10. Enveloppe protectrice du réacteur.                          |
| 3. Batterie de bouteilles d'hélium.              | 7. Turbine haute pression.                          | 11. Barres d'uranium dans le modérateur.                        |
| 4. Turbine produisant l'énergie (basse pression) | 8. Refroidisseur à ventilateur.                     | 12. Conduite d'hélium.  |



# LES RADIOISOTOPES



# DANS L'INDUSTRIE



LES réacteurs nucléaires fournissent en abondance les radioisotopes qui ont pris rang aujourd'hui parmi les plus puissants outils dont dispose la recherche scientifique. Ils trouvent aujourd'hui dans l'industrie, et aussi en médecine, des applications importantes, si nombreuses qu'il n'est pas possible de les évoquer toutes.

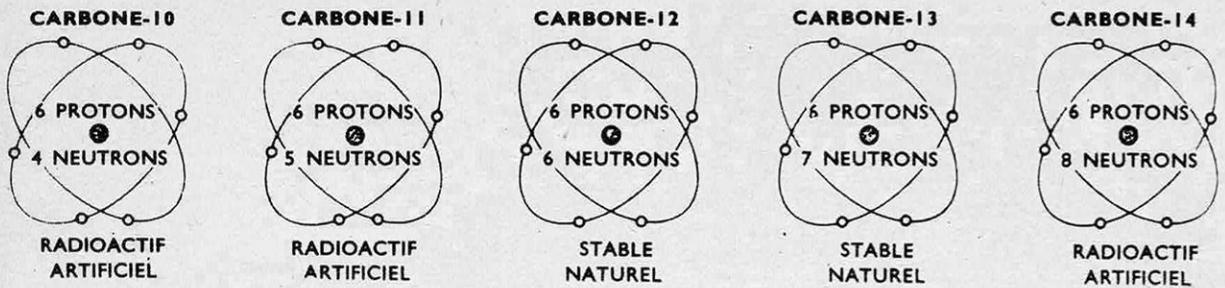
Les corps simples, ou éléments, que l'on a recensés dans la nature se présentent, sauf rares exceptions, sous forme de mélanges d'atomes de constitution différente. Nous avons déjà, dans les chapitres précédents, rencontré les trois formes de l'hydrogène : l'hydrogène léger, l'hydrogène lourd (deutérium) et l'hydrogène très lourd (tritium). Ils ont en commun le fait que leur noyau contient un proton unique ; dans le deutérium, le proton s'est adjoint un neutron et, dans le tritium, deux neutrons. La charge du noyau est la même, mais pas sa masse.

De même, nous avons rencontré les uranium-233, 234, 235, 238, où les noyaux atomiques contiennent toujours 92 protons, assortis respectivement de 141, 142, 143 et 146 neutrons.

Le fait est général. On trouve dans la nature le chlore-35 et le chlore-37, le silicium-28, le silicium-29 et le silicium-30, le brome-79 et le brome-81, le carbone-12 et le carbone-13, etc.

Les diverses variétés d'un même élément ont des noyaux de même charge, donc ont le même nombre d'électrons planétaires, et comme c'est la configuration de ces électrons planétaires qui détermine les propriétés chimiques, leurs propriétés chimiques sont identiques. On ne peut pratiquement pas les distinguer dans toutes les réactions où ces éléments interviennent, que ces réactions soient mises en œuvre industriellement ou qu'elles aient lieu dans l'intimité des tissus d'un être vivant.

*Dans les trous que présente cette face de la pile atomique de Brookhaven (USA) on introduit les éléments que l'on veut rendre radioactifs. On fabrique ainsi, à bon marché, un grand nombre de radioisotopes utilisés en médecine, biologie, industrie, etc.*



**Le carbone 12 et le carbone 13** sont les seuls isotopes naturels du carbone ; ils entrent respectivement pour 98,9 et 1,1 % dans sa composition.

Tous les isotopes stables ou instables contiennent le même nombre de protons dans leur noyau, mais ils diffèrent par le nombre de leurs neutrons.

Sauf pour les éléments radioactifs classiques : uranium, radium, thorium, etc., les isotopes naturels des éléments sont, en règle générale, stables.

C'est en 1933 que M. et Mme Joliot-Curie créèrent pour la première fois des isotopes instables. Depuis lors, on a réussi à fabriquer, pour chaque élément, un ou plusieurs isotopes instables, radioactifs.

Prenons, par exemple, le carbone. Nous avons vu que l'on trouve dans la nature les carbones 12 et 13, dont les noyaux contiennent tous 6 protons et respectivement 6 ou 7 neutrons. Ces noyaux sont stables. Mais on sait aujourd'hui créer les carbones 10, 11 et 14, dont les noyaux contiennent toujours 6 protons, mais 4, 5 et 8 neutrons, et sont instables, radioactifs.

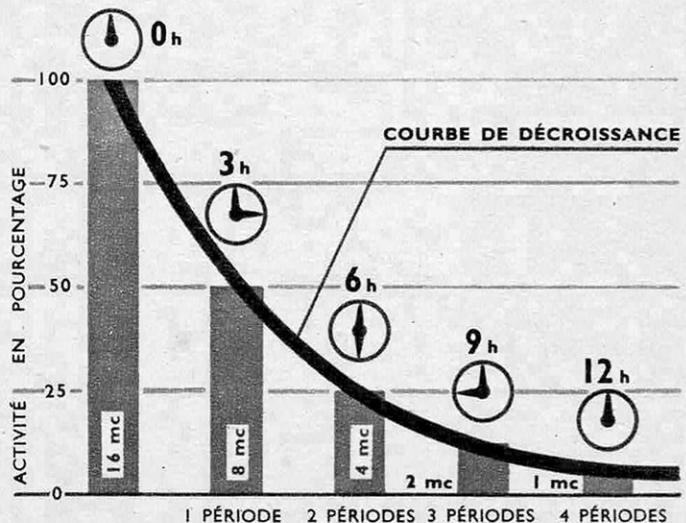
Les atomes instables reviennent à un état stable plus ou moins rapidement, suivant leur « période », terme que définit la figure ci-dessous, en émettant un rayonnement caractéristique qui permet leur détection et est à la base de toutes leurs applications pratiques.

### Comment se fabriquent les radioisotopes

Les premiers radioéléments artificiels furent produits en bombardant certaines substances par les particules alpha émises par un radioélément naturel, en l'espèce le polonium. Depuis, on en a obtenu une beaucoup plus grande diversité avec les cyclotrons accélérant des particules diverses, depuis les simples protons jusqu'aux atomes ionisés d'éléments tels que l'azote, l'oxygène, le néon, etc. Mais c'est seulement par les réacteurs atomiques que les radioisotopes ont pu être fournis en quantités vraiment industrielles. Ils y sont produits de deux manières : d'une part, par bombardement par les neutrons ; d'autre part, directement par les fissions.

La figure page 103 montre les deux principales réactions provoquées par le bombardement neutronique. La première est la réaction (n,  $\gamma$ ) dans laquelle un neutron est capturé par un noyau atomique qui émet un rayon gamma. La masse du noyau se trouve ainsi

La « période » d'un radioélément caractérise la décroissance de son activité. Celle-ci est toujours réduite dans la même proportion dans des intervalles de temps égaux (on dit que la décroissance suit une loi « exponentielle »). La « période » est l'intervalle correspondant à une diminution de moitié. Dans l'exemple pris ici, l'activité de l'échantillon est réduite de 16 à 8 millicuries, puis de 8 à 4 millicuries, de 4 à 2 et de 2 à 1 millicurie, chaque fois en 3 heures. La « période » du radioélément qui le constitue est donc de 3 heures.



accrue d'une unité ; le carbone-13 devient du carbone-14 radioactif, le phosphore-31 devient du phosphore-32 radioactif. C'est par le même procédé que l'on obtient les fameuses sources radioactives de cobalt-60 qui remplacent de plus en plus le radium, en irradiant du cobalt-59 avec les neutrons des réacteurs. On remarquera que, par ce procédé, les radioisotopes créés dans la masse du produit irradié appartiennent au même élément chimique dont on ne peut le séparer par des méthodes simples. Pour la plupart des applications industrielles, cela ne présente aucun inconvénient, ce qui n'est pas le cas pour certaines recherches de laboratoire où l'on désire opérer avec des radioisotopes purs. Signalons que, dans certains conditions spéciales, on peut cependant obtenir une séparation complète des radioisotopes produits par la réaction  $(n, \gamma)$ . Si les atomes irradiés sont inclus dans une molécule complexe, l'émission du rayon gamma provoque un recul brusque du noyau intéressé qui rompt ses liaisons avec les autres atomes et se trouve libéré (effet Szilard-Chalmers). Par exemple, après bombardement de l'iodure d'éthyle par les neutrons, on peut isoler chimiquement le radioiode libéré de l'iode inactif qui reste à l'état d'iodeure.

La deuxième réaction importante est la réaction  $(n, p)$ , où un neutron est capturé et un proton émis. La masse du noyau intéressé ne change pas, mais sa charge électrique diminue d'une unité. On obtient un isotope radioactif d'un élément différent : l'azote-14 devient le carbone-14 radioactif ; le soufre-32 devient du phosphore-32 radioactif. Comme il s'agit d'éléments différents, on peut séparer chimiquement les produits radioactifs.

La séparation est encore possible avec la réaction  $(n, \gamma)$  si le radioisotope désiré est un descendant du radioisotope obtenu directement par l'irradiation. Ainsi pourra-t-on préparer l'iode-131 qui dérive du tellure-131, lui-même provenant du tellure-130 par capture d'un neutron.

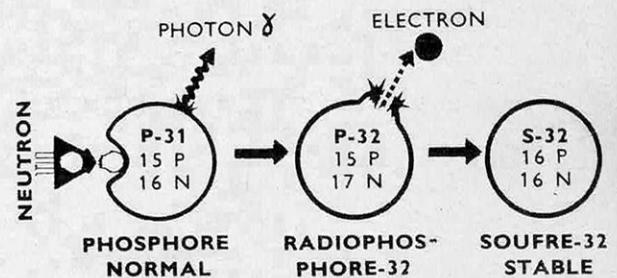
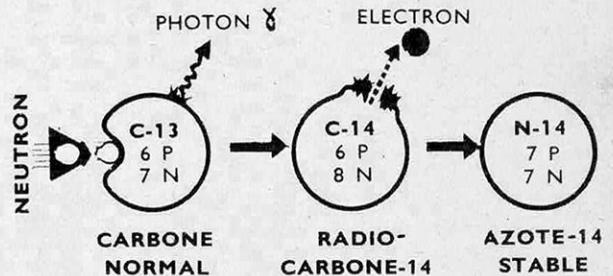
L'activité des échantillons soumis à l'irradiation dépend de multiples facteurs, entre autres, et surtout, du flux de neutrons du réacteur, de la période du radioisotope et de la

durée de l'irradiation. Au fur et à mesure que l'on forme des noyaux radioactifs, on ne peut empêcher ces mêmes noyaux devenus radioactifs de se désintégrer. Si la période radioactive est assez longue, on produira au début plus de noyaux radioactifs par seconde qu'il ne s'en détruit ; au bout d'un certain temps, environ cinq fois la période, un régime d'équilibre s'établit et il n'y a plus intérêt à poursuivre l'irradiation.

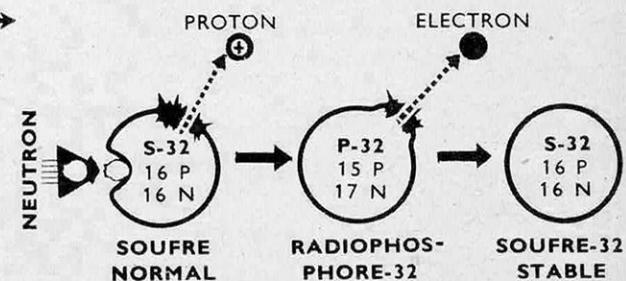
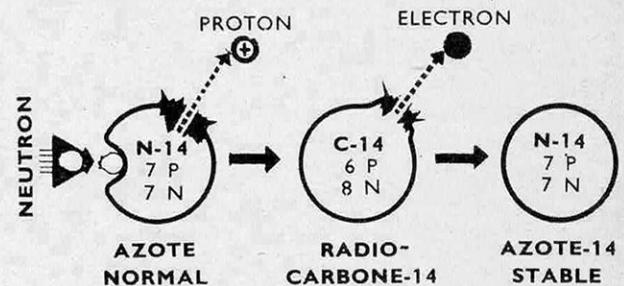
Ainsi, une cible de cobalt-59, introduite dans un réacteur, devient de plus en plus radioactive ; théoriquement, la période du cobalt-60

SUITE PAGE 105

## CAPTURE D'UN NEUTRON RÉACTION $(n, \gamma)$



## TRANSMUTATION RÉACTION $(n, p)$

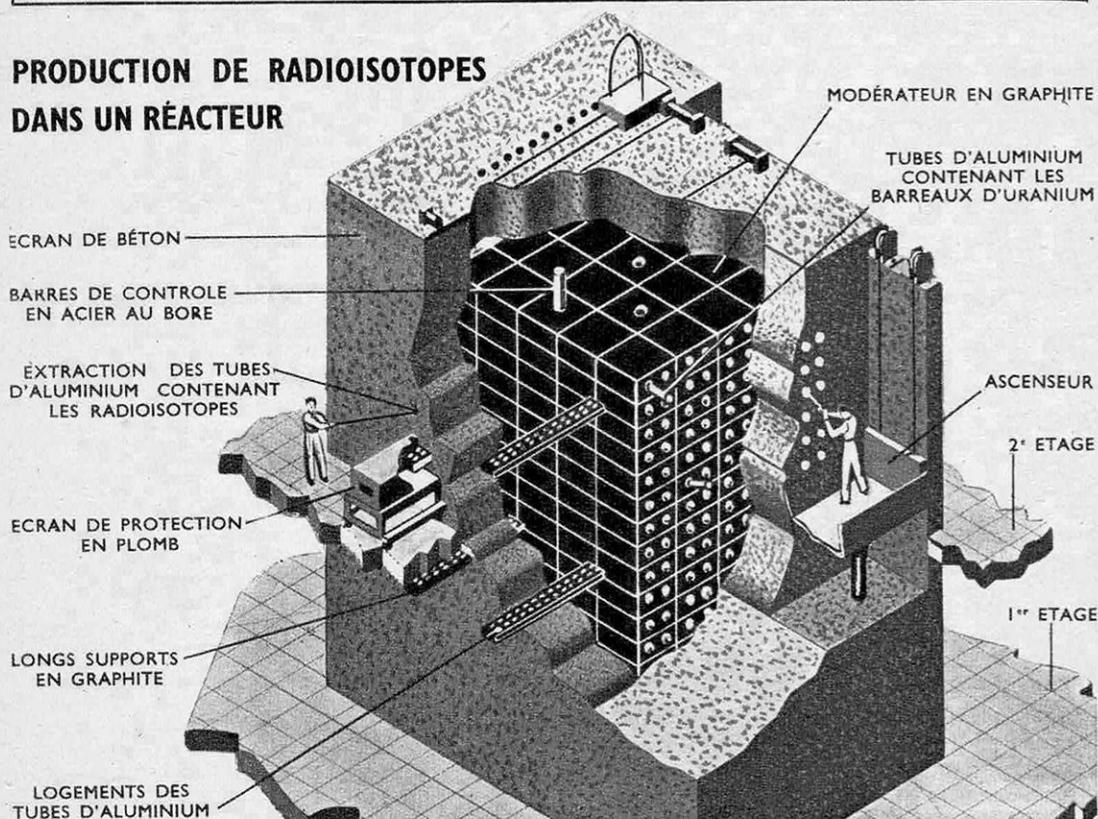


Sous l'action des neutrons, deux réactions différentes peuvent engendrer le radiocarbone 14 et le radiophosphore 32. En haut, on part du carbone et du phosphore normaux, dont les noyaux captent un neutron en émettant un rayonnement  $\gamma$ . En bas, on part de l'azote et du soufre normaux qui subissent une transmutation avec émission d'un proton. Dans le deuxième cas, à flux de neutrons égal, le rendement en radioélément est bien supérieur à ce qu'il est dans le premier. On a indiqué à droite les produits stables de la radioactivité des radioisotopes.

# LES RADIOISOTOPES ARTIFICIELS LES PLUS UTILISÉS

RADIOISOTOPE	RAYONNEMENT PRINCIPAL (Énergie en MeV)	PÉRIODE	PRINCIPAUX EMPLOIS
Carbone - 14 ...	$\beta$ (0,15)	5 000 ans	Chimie organique, métallurgie du fer, détergents, biologie.
Phosphore - 32 .	$\beta$ (1,7)	14 jours	Métallurgie, chimie du phosphore, biologie.
Soufre - 35 .....	$\beta$ (0,17)	87 jours	Chimie analytique, Sidérurgie, agronomie.
Chlore - 36 .....	$\beta$ (0,7)	10 000 ans	Recherches sur les aciers inoxydables.
Calcium - 45 ....	$\beta$ (0,25)	180 jours	Chimie analytique, alliages, mesures d'épaisseurs, agronomie.
Fer - 55 .....	X (0,2)	3 ans	Métallurgie du fer, alliages, corrosion, usure, lubrification.
Fer - 59 .....	$\gamma$ (1,3)	44 jours	idem.
Cobalt - 60 .....	$\gamma$ (1,3)	5,3 ans	Gammagraphie, téléthérapie.
Strontium - 90 ..	$\beta$ (0,6)	20 ans	Elimination des charges statiques.
Yttrium - 90 ...	$\beta$ (2,5)	60 heures	
Ruthénium - 106	$\beta$ (0,04)	290 jours	Radiométagraphie.
Iode - 131 .....	$\gamma$ (0,7)	8 jours	Biochimie de l'iode.
Césium - 134 ...	$\gamma$ (1,4)	2,3 ans	Téléthérapie.
Cérium - 144 ...	$\gamma$ (0,13)	275 jours	Radiométagraphie.
Europium - 152 .	$\gamma$ (0,12)	5,3 ans	Téléthérapie.
Tantale - 182 ...	$\gamma$ (0,15)	117 jours	Radiométagraphie.
Iridium - 192 ...	$\gamma$ (0,5)	70 jours	Radiométagraphie.
Thallium - 204 ..	$\beta$ (0,76)	3 ans	Mesures d'épaisseurs.

## PRODUCTION DE RADIOISOTOPES DANS UN RÉACTEUR

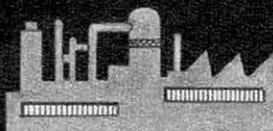
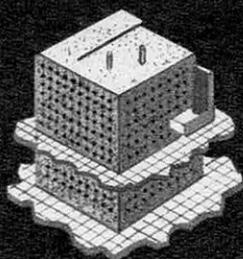


Les échantillons à irradier sont placés dans des tubes en aluminium que l'on introduit dans des logements ménagés dans des supports coulissants en graphite. Après traitement, les échantillons radioactifs sont extraits sous la protection d'un écran de plomb et manipulés à distance avec de grandes précautions.

RÉACTEUR NUCLÉAIRE  
A URANIUM

EXTRACTION  
DU PLUTONIUM

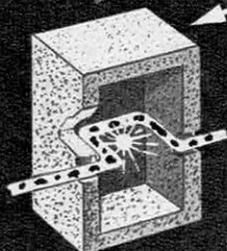
La principale source et la moins coûteuse de radioisotopes pour les applications industrielles les plus simples est constituée par les produits de fission, sous-produits de l'extraction du plutonium des barreaux d'uranium ayant séjourné dans un réacteur nucléaire. Leurs poids atomiques sont compris entre 70 et 160 et ils peuvent être utilisés directement en mélange brut ou après une séparation chimique.



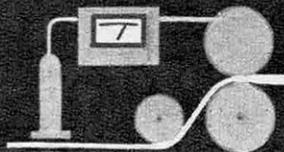
RÉSIDUS  
DE FISSION



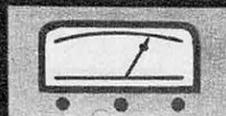
ÉLIMINATION DE  
CHARGES STATIQUES



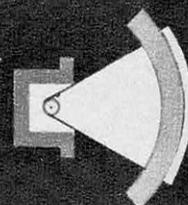
STÉRILISATION A FROID  
POLYMERISATIONS  
VULCANISATION ETC.



CONTROLES  
DE FABRICATIONS  
INDUSTRIELLES



ACTIVATION  
DE SUBSTANCES  
PHOSPHORESCENTES



RADIOGRAPHIE

SUITE DE LA PAGE 103

étant de 5 ans, l'activité de la cible doit augmenter progressivement pendant les 25 premières années de son irradiation. En fait, le cobalt-60 formé dans la cible est soumis lui-même à l'action des neutrons et donne du cobalt-61 dont la période est 1 heure 3/4 ; on voit qu'il n'y a pas intérêt à augmenter trop la teneur en cobalt-60 puisque, lorsque le nombre de ses atomes radioactifs augmente, il se trouve réduit par la formation des atomes du cobalt-61 que leur courte période rend inutilisables.

### Les produits de fission ne sont plus indésirables

Dans la masse des combustibles nucléaires, la fission des noyaux lourds d'uranium ou de plutonium engendre, comme on l'a vu précédemment, des noyaux de poids moyen fortement radioactifs. Ces produits de fission, qui absorbent inutilement des neutrons, empoisonnent progressivement le combustible qu'il faut purifier au bout d'une certaine durée de fonctionnement. Dans les premiers temps, on les considérait comme des déchets hautement indésirables, dangereux à manipuler et dont on ne pouvait se débarrasser qu'en prenant de grandes précautions. Le point de vue a changé radicalement depuis que se sont développées les applications des radioisotopes que ces produits de fission peuvent livrer en grand nombre, et surtout avec une activité spécifique élevée. Leurs masses, comme on l'a vu, s'échelonnent entre 70 et 160, mais seuls présentent un intérêt pratique, lorsque l'on veut les séparer, ceux dont la vie est assez longue pour que leur activité soit encore appréciable après le

« refroidissement » des lingots d'uranium et les opérations d'extraction. Il est évident que ceux dont la période est inférieure à un jour sont difficilement accessibles à l'utilisateur. Dans l'état présent de la technique, les plus importants radioisotopes engendrés directement par les fissions sont le césium-137, le strontium-90, le cérium-144 et le zirconium-95.

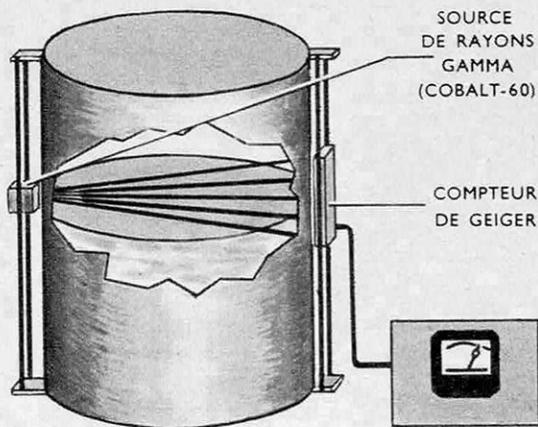
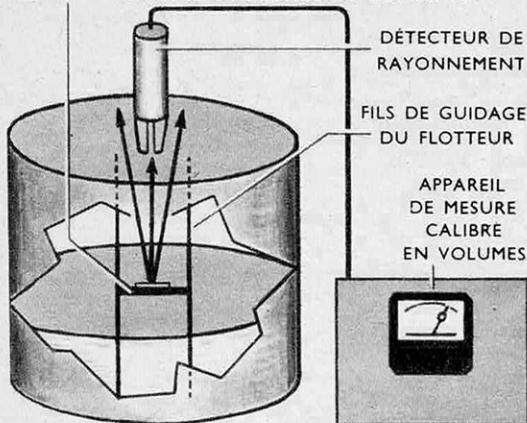
Le strontium-90 a une période de 20 ans et peut constituer des sources très actives et durables de particules bêta. L'absence de rayonnement gamma permet de les manipuler sans autre précaution que de les inclure dans une feuille mince d'argent qui laisse passer les particules bêta en évitant le contact direct avec le strontium radioactif très toxique. Le rayonnement bêta est surtout engendré par l'yttrium-90 qu'il livre en se désintégrant et dont la période est de 60 heures.

Le cérium-144 (période 275 jours) émet non seulement des particules bêta, mais des rayons gamma et ne peut être manipulé qu'à distance lorsqu'il s'agit de sources intenses. Son produit de désintégration est le praséodyme-144 qui livre des particules bêta très énergiques et dont l'activité spécifique est élevée.

Le césium-137 est surtout intéressant pour son rayonnement gamma et semble appelé à rendre de grands services pour le traitement du cancer ; sa période étant de 30 ans, les sources de césium-137 durent longtemps avant de devoir être remplacées. Le zirconium-95 et son descendant, le nobium-95, donnent un rayonnement gamma encore plus pénétrant, mais les sources ont une vie courte.

Un autre radioisotope très intéressant est le krypton-85 qui est gazeux. Il convient pour

FLOTTEUR PORTANT LA SOURCE DE COBALT-60



**Le niveau des cuves est mesuré automatiquement avec l'emploi de sources radioactives.** A gauche, le plus ou moins grand éloignement de la source entraîne des variations de l'intensité reçue par le détecteur. A droite, lorsque le niveau arrive au compteur, le nombre des signaux reçus varie brusquement. Ce montage n'exige aucune modification des réservoirs qui peuvent contenir des produits corrosifs sous haute ou basse pression.

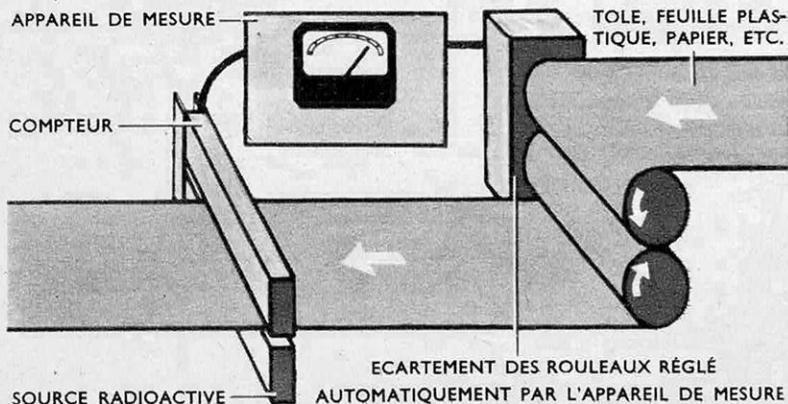
des applications industrielles particulières qui n'exigent que des activités modérées, par exemple pour l'élimination de charges statiques. Il serait particulièrement précieux, car, en cas d'accident survenant à ces sources, il se dilue très rapidement dans l'air sans rien contaminer. Il faut, dans sa préparation, le séparer d'un autre gaz, le xénon, produit de fission radioactif bêta, mais dont l'isotope 137 peut devenir du xénon-136 stable par émission d'un neutron. Ce gaz rare, qui a d'importantes applications dans l'industrie des lampes, est extrait à grands frais de l'air, où il se trouve à l'état de traces. On a calculé que la réalisation d'un programme de centrales nucléaires consommant annuellement 20 tonnes de combustible permettrait d'obtenir comme sous-produit 260 m<sup>3</sup> de xénon par an à un prix de revient très inférieur.

La séparation des produits de fission est nécessaire lorsque l'on veut constituer des sources ayant des caractéristiques de rayonnement bien définies, par exemple pour le trai-

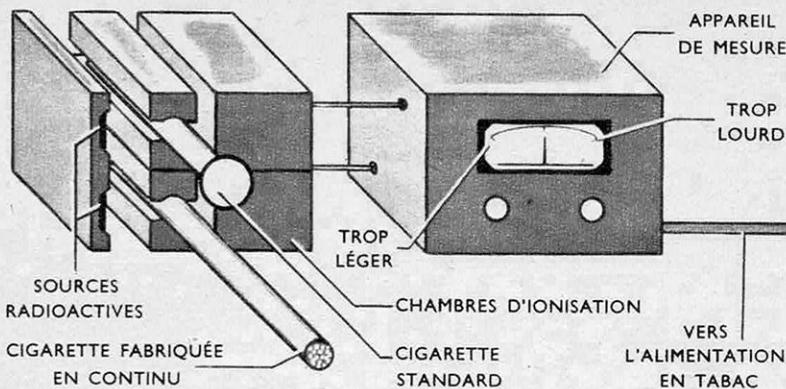
tement du cancer en médecine ou pour les mesures d'épaisseurs dans l'industrie. Mais il est d'autres applications où l'intensité du rayonnement importe avant tout, par exemple pour irradier des produits chimiques et y provoquer des réactions; aucune séparation n'est alors nécessaire. Actuellement, on doit attendre au moins 4 ou 5 mois avant de traiter les barreaux de combustible, et la radioactivité a déjà décliné sensiblement quand on peut disposer des produits de fission. Aussi envisage-t-on d'utiliser directement les rayons gamma émis par les barreaux de combustible à leur sortie des réacteurs. Les réacteurs homogènes aqueux, où la purification peut s'effectuer en continu, fourniront des produits de fission disponibles presque immédiatement.

« Traceurs »  
ou « émetteurs spécifiques »

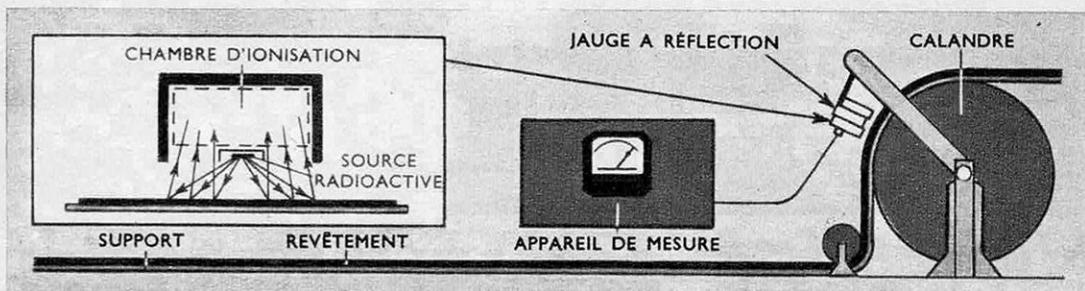
Les applications industrielles des radioisotopes sont extrêmement nombreuses et il est malaisé d'en effectuer un classement rationnel.



**L'épaisseur d'une feuille se mesure en la faisant défilé entre une source radioactive convenable (émetteur  $\beta$  ou  $\gamma$  selon la nature du matériau) et un compteur. Celui-ci est relié à un intégrateur, étaloné en épaisseurs, qui peut corriger automatiquement l'écartement des rouleaux entre lesquels la feuille se trouve laminée.**



**La fabrication de cigarettes est rigoureusement contrôlée en comparant la cigarette fabriquée en continu à une cigarette type. On lit sur l'appareil de mesure si la densité du tabac est trop faible ou trop grande ; la correction s'effectue automatiquement sur l'alimentation en tabac.**



**L'épaisseur d'une couche (ici le revêtement d'une tôle) dont un seul côté est accessible, se mesure en utilisant le phénomène de diffusion du rayonnement vers l'arrière. La fraction réfléchie dépend de l'épaisseur de la couche et est reçue par un appareil de détection placé au voisinage de la source et protégé contre son rayonnement.**

On peut distinguer celles où la nature de l'élément joue le principal rôle ; son rayonnement sert uniquement à déceler sa présence et éventuellement à le doser. Dans d'autres, c'est le rayonnement, sa nature et son intensité qui importent et qui dictent la composition de la source. Le premier domaine est plus particulièrement celui des « traceurs » qui permettent de suivre les opérations industrielles les plus variées ; le second fait appel au pouvoir de pénétration du rayonnement ou à ses propriétés ionisantes et aux actions qui en dérivent sur les matériaux irradiés. Les limites entre les deux domaines sont mal définies. Aussi nous permettrons-nous de suivre un ordre assez arbitraire dans la revue rapide et forcément incomplète des usages industriels des radioisotopes.

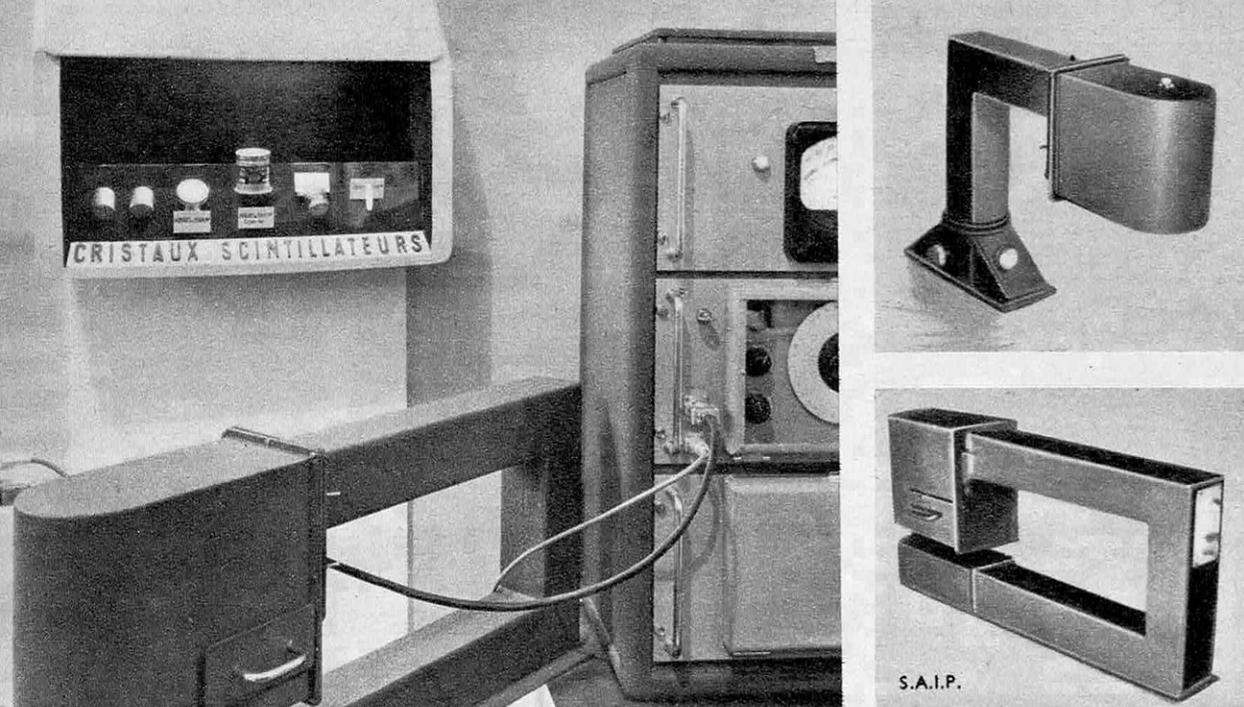
### Mesure des niveaux

Le rayonnement gamma pénétrant permet de repérer aisément les niveaux dans les récipients à parois épaisses les plus divers et dans lesquels règnent des conditions qui rendent inapplicables les méthodes habituelles : hautes pressions, liquides corrosifs, métaux en fusion, etc. Plusieurs procédés peuvent être employés.

Le plus simple consiste à disposer de part

et d'autre du récipient, et dans le même plan horizontal, une source radioactive et un détecteur, compteur de Geiger, par exemple. L'intensité du rayonnement reçu par le détecteur varie fortement suivant que le niveau du liquide est au-dessus ou au-dessous de ce plan. Cette variation peut être utilisée, soit pour actionner un signal d'alarme, soit pour agir sur un dispositif d'alimentation de manière à maintenir le niveau constant. Le procédé s'applique aussi bien aux chaudières, aux fours de fonderie, aux tanks de stockage dans l'industrie chimique, qu'aux silos pour matières granuleuses. On l'emploie couramment pour le contrôle du remplissage des bouteilles de butane ou de propane où il est dangereux de dépasser le niveau normal.

Un autre procédé consiste à placer la source radioactive soit sur un flotteur, soit au fond de la cuve, à l'intérieur ou à l'extérieur de celle-ci. Dans le premier cas, le flux reçu par le détecteur varie en raison inverse du carré de la distance de la source ; dans le second, il dépend de l'épaisseur traversée. On peut ainsi non seulement régler le niveau d'un liquide, mais enregistrer ses variations d'une manière continue. Dans certains cas spéciaux, on incorpore même la source au liquide, en suspension ou en solution.



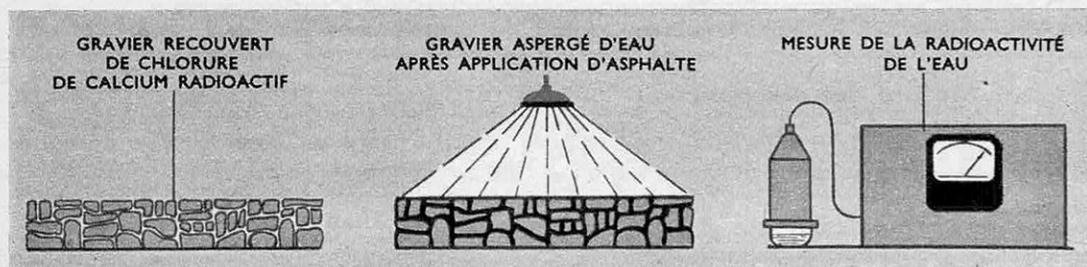
**Deux jauges pour mesure d'épaisseur** : A gauche, et en bas, à droite, une jauge par absorption, utilisable lorsqu'on a accès aux deux côtés du matériau (la source et le détecteur sont de part et d'autre) ; en haut, une jauge par rétrodiffusion, lorsqu'on n'accède qu'à un seul côté (la source et le détecteur sont du même côté).

### Mesure d'épaisseurs

Diverses méthodes permettent de mesurer l'épaisseur des matériaux. Si on a accès des deux côtés de l'échantillon à contrôler, on place la source et le détecteur de part et d'autre et on utilise la variation d'absorption du rayonnement en fonction de l'épaisseur. La précision est loin d'être absolue et ne dépasse en général pas 2 %, mais elle est suffisante dans la plupart des opérations industrielles où l'on cherche surtout à effectuer des mesures rapides. C'est le cas dans toutes les fabrications en série de tôles métalliques, de rubans et feuilles plastiques, de films photographiques, de feuilles de verre, etc. Le contrôle est continu et se prête au réglage automatique, en cours de fabrication, du débit

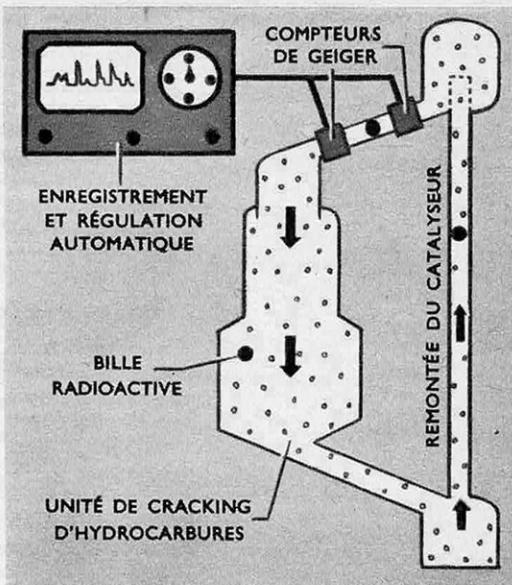
des dispositifs d'alimentation, de la distance des rouleaux de laminoirs, de la température des fours, etc. La très grande variété des rayonnements émis par les radioéléments permet de mesurer ainsi des épaisseurs depuis une fraction de micron jusqu'à des dizaines de centimètres. Dans le cas de substances peu absorbantes comme le papier, le carton, la cellophane, la source radioactive est constituée par un émetteur de particules bêta, tandis que pour les substances métalliques on fait appel aux émetteurs de rayons gamma.

Lorsque seule une des faces de l'objet est accessible à l'observation, tel un revêtement caoutchouté, par exemple, on incorpore à la pâte un radioélément émetteur bêta, comme le carbone-14, et on mesure le rayonnement émis par la surface de l'objet. Mais il faut

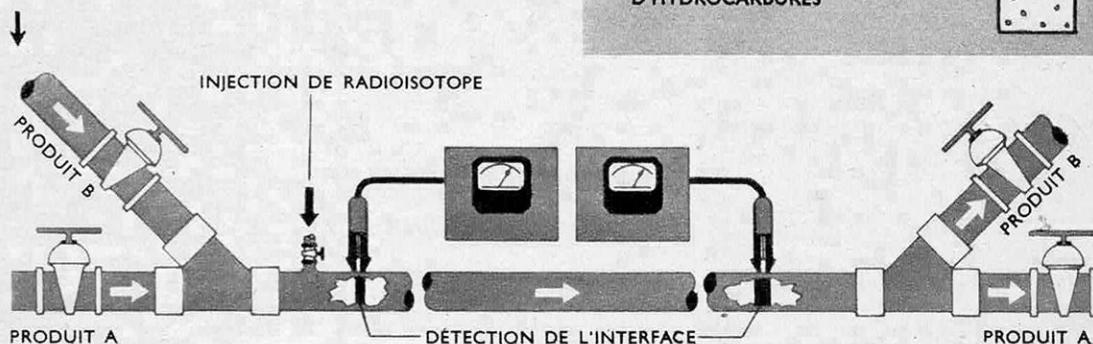


**Le pouvoir couvrant d'une asphalt** s'étudie en recouvrant un échantillon de gravier de chlorure de radio-calcium-45, puis d'asphalte. De l'eau est aspergée sur l'ensemble et la mesure de sa radioactivité indique le pouvoir couvrant de l'asphalte, fonction de la quantité de chlorure de calcium qu'elle a ainsi pu dissoudre.

La vitesse de circulation du catalyseur dans une unité de cracking catalytique se mesure en y dispersant quelques billes contenant un produit radioactif. La mesure du temps de passage d'une bille à travers la conduite amenant le catalyseur dans l'unité du cracking s'effectue très simplement à l'aide de compteurs placés aux extrémités de la conduite. Elle indique immédiatement la vitesse de circulation du catalyseur sans qu'il soit nécessaire d'interrompre l'opération, révèle aussitôt les écarts par rapport à la normale et permet une régulation automatique.



Dans un pipe-line, on injecte une substance radioactive pour « marquer » l'interface qui sépare deux « cargaisons » de produits différents. Après un parcours de plusieurs centaines de kilomètres, la présence aisément décelable du radioélément signale le passage de l'interface sous le compteur et permet d'aiguiller les produits vers des réservoirs différents.



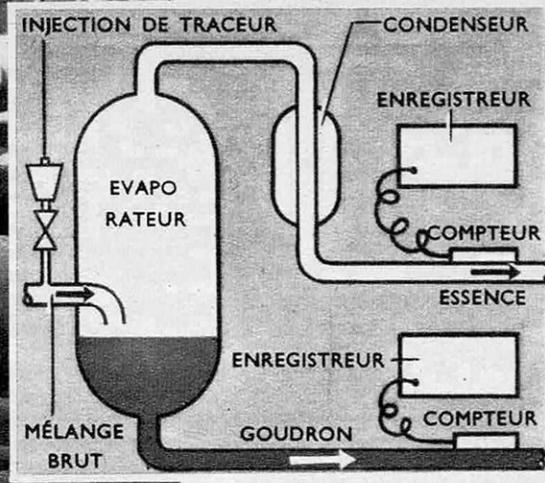
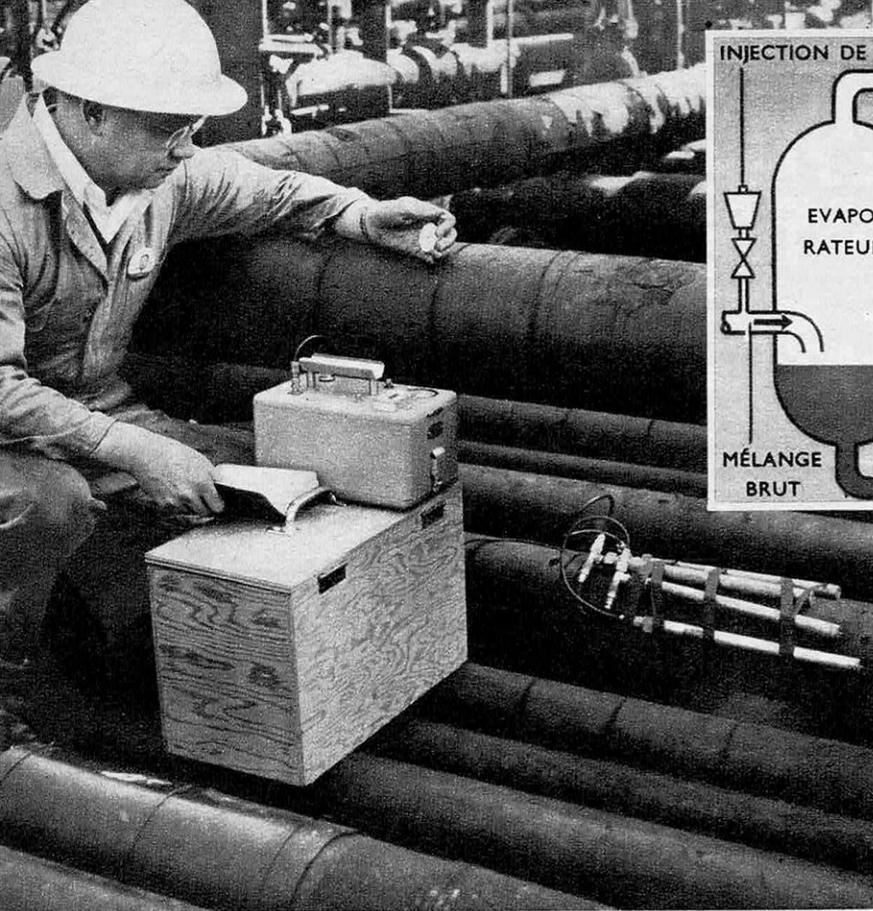
remarquer que lorsque l'épaisseur d'une couche radioactive homogène augmente, l'intensité du rayonnement commence bien par croître aussi avec l'épaisseur, mais seulement jusqu'à une certaine valeur dite « épaisseur optimum ». Au-delà, le rayonnement reste constant car celui des atomes radioactifs trop profonds est absorbé dans la masse même du produit radioactif. On utilise cette méthode pour contrôler l'épaisseur des émaux employés en céramique, ou encore l'épaisseur du lubrifiant dont sont enduits les fils de rayonne afin de faciliter leur pliage et leur torsion au cours du tissage. Elle sert aussi à vérifier la densité des pigments déposés sur une étoffe au cours d'une opération de teinture, le pouvoir couvrant des encres, des peintures, etc.

### Le « back scattering »

Si le produit radioactif ne peut être incorporé à la substance, ou s'il s'agit de réceptionner un produit contrôlé par la méthode précédente, mais dont la radioactivité a disparu pendant le stockage, on fait intervenir le procédé du « back scattering » ou « rétro-

diffusion » du rayonnement. Il consiste à utiliser une source radioactive bêta placée en face de la surface accessible ; à côté de cette source se trouve un compteur de Geiger convenablement protégé contre le rayonnement direct. La surface de l'échantillon reçoit les particules bêta et en diffuse une partie vers l'arrière, c'est-à-dire vers le compteur. Le pouvoir diffusant augmente avec l'épaisseur et avec le numéro atomique de l'élément qui constitue l'écran, mais est indépendant de la température, ce qui est très utile lorsque les contrôles ne peuvent être répétés à la même température.

Le « back scattering » des particules bêta est utilisé pour mesurer l'épaisseur de divers revêtements : émulsions photographiques, laques, vernis, enduits sur porcelaine, films de caoutchouc ou de matière plastique sur des rouleaux de calendres, étamages, dépôts électrolytiques sur acier, etc. Celui des rayons gamma se prête à la mesure des épaisseurs des tôles des réservoirs métalliques, des chaudières, des coques de navires. Il permet de suivre la progression de la corrosion sans avoir à vider les réservoirs, d'évaluer l'épaisseur des dépôts calcaires ou cryptogamiques



*Dans la distillation du pétrole, on peut vérifier que le goudron n'est pas entraîné par l'essence plus volatile. On additionne le mélange d'un traceur radioactif non distillable et on place des compteurs sur les canalisations de sortie de l'essence et de goudron. Toute la radioactivité doit se retrouver dans le goudron ; lorsqu'on en détecte dans l'essence, la distillation a été imparfaite.*



(salissures des coques) en fonction du temps et d'apprécier l'efficacité des moyens mis en œuvre pour les combattre.

Signalons encore une utilisation très particulière des radioisotopes à la mesure de l'épaisseur des couches de neige dans les régions inhabitées. Une source radioactive posée sur le sol, un compteur suspendu à un pylône, un système électronique intégrateur lié à un émetteur de radio se mettant en marche automatiquement à intervalles réguliers, le tout installé en un endroit convenablement choisi, permettent de connaître l'abondance des précipitations neigeuses au long de l'hiver. Ce seront des indications précieuses pour la météorologie et surtout pour les prévisions hydrologiques sur lesquelles se fondent les programmes de production des centrales hydrauliques alimentées par les bassins intéressés.

### Mesure de densité

L'absorption du rayonnement gamma par un matériau solide ou liquide dépend de la nature chimique de ce matériau et de sa densité. Aussi la mesure d'une densité se fera par un procédé équivalent à celui de la mesure des épaisseurs. Par exemple, pour vérifier la densité d'un liquide dans une canalisation ou dans un réservoir, on placera d'un côté une source radioactive émettant des rayons gamma et de l'autre un compteur. On pourra ainsi contrôler de façon continue une concentration au cours d'une réaction chimique, mesurer la teneur d'une suspension dans un liquide, repérer les changements de densité dans un pipe-line, etc.

Si la densité est très élevée, on peut également utiliser la méthode du « back scattering » en plaçant source et compteur du même côté de la surface du récipient.

Ces techniques sont avantageusement appliquées aux mélanges hétérogènes dont il est intéressant de connaître le degré de malaxage, notamment dans l'industrie de la soie artificielle, du caoutchouc, de la pâte à papier, etc. On peut aussi incorporer un produit radioactif à l'un des constituants du mélange et contrôler la variation de la radioactivité au cours du malaxage.

Lorsque, dans un mélange hétérogène, on désire repérer certains éléments, on peut utiliser leurs différences d'interaction avec les divers rayonnements émis par les radioéléments. Par exemple, si des blocs de schiste et

de charbon circulent sur un tapis, on pourra les trier d'après les différences que présentent ces deux corps pour le « back scattering » du rayonnement gamma. Cette méthode est utilisée dans les houillères anglaises.

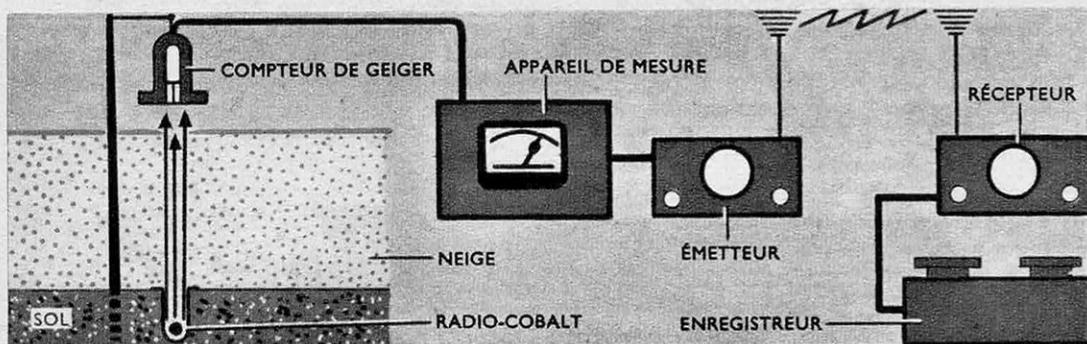
### Techniques de marquage

Qu'il s'agisse de paquets de cigarettes, d'ampoules pharmaceutiques, de tubes dentifrices, les fabrications en série posent des problèmes de comptage rapide des pièces qui sortent à cadence élevée des ateliers. Pour des cadences de quelques dizaines par minute, on emploie des cellules photoélectriques devant lesquelles défilent, interceptant un faisceau lumineux, les produits finis sortant des machines automatiques. Ce procédé ne convient plus lorsqu'il faut compter jusqu'à 10 000 objets par minute. On peut alors faire défiler les objets entre une source radioactive et un compteur, ou mieux les « marquer » individuellement avec un radioisotope à vie courte.

N'importe quel objet peut être ainsi « marqué » et repéré par un compteur. Dans l'industrie pétrolière, la vitesse de circulation des fluides dans les unités de raffinage sera contrôlée par des compteurs disposés sur les canalisations pour détecter le passage de « billes » radioactives entraînées par le courant. Dans les pipe-lines, où l'on envoie successivement plusieurs « cargaisons » d'hydrocarbures différents, on a perdu pendant longtemps des centaines de barils faute de connaître le moment exact où elles se succèdent à l'arrivée. Comme ces cargaisons diffusent peu l'une dans l'autre, on injecte au départ un produit radioactif dans l'« interface » entre les deux qualités de produit pétrolier ; en le détectant à l'arrivée, on aiguille sans erreur les différentes sortes d'hydrocarbures dans leurs réservoirs respectifs. Cette technique est également appliquée à toutes sortes de conduites dans les raffineries et les parcs de stockage. Toujours dans les pipe-lines, le marquage radioactif des racleurs utilisés pour leur nettoyage permet de connaître à tout moment leur position.

Sur les champs pétrolifères eux-mêmes, les radioisotopes rendent des services inestimables en permettant de suivre les migrations du pétrole ou des hydrocarbures gazeux à travers les roches d'un gisement. On injecte, par exemple, du gaz radioactif, tel que le krypton-85, par un puits et on mesure, d'une part, le temps qui s'écoule entre le moment de l'injection et la réapparition de l'isotope dans les autres puits, de l'autre, la quantité d'isotope retrouvée. On évalue ainsi la direction d'écoulement, la porosité des roches, etc. à l'intérieur du gisement, et l'on peut conduire l'ex-

**Pour « aiguiller » les produits vers leurs réservoirs respectifs, un ingénieur guette l'« interface » à l'aide d'un compteur mobile placé sur la conduite.**



**L'épaisseur des chutes de neige** dans les régions montagneuses est intéressante à connaître pour les prévisions hydrauliques. Dans les zones d'accès difficile on place des sources de radiocobalt-60 dont le rayonnement est plus ou moins absorbé suivant la hauteur de neige qui les recouvre. Un compteur placé à la verticale transmet les mesures, à intervalles fixes, par un petit émetteur automatique, à un récepteur relié à un enregistreur.

plait en connaissance de cause, prévoir les opérations spéciales nécessaires telles que recompression par injection de gaz, etc.

Mélangés au ciment, les radioisotopes fournissent des repères précis quant au niveau atteint par ce ciment derrière le tubage. Mélangés à des résines synthétiques servant de support, ils sont envoyés avec les fluides de fracturation des roches-magasins pour évaluer la profondeur des fractures produites en vue d'améliorer la production. La radioactivité a aussi apporté une contribution exceptionnelle à la prospection du pétrole; les sondages aux rayons  $\gamma$  et aux neutrons  $\gamma$  sont maintenant classiques. Ces techniques ont été étendues à l'étude de la densité et de l'humidité des sols qui intéresse au premier chef architectes et constructeurs d'ouvrages d'art pour le calcul des fondations, et même toutes les entreprises qui envisagent d'enterrer des canalisations.

### Du dragage à la protection des ouvriers

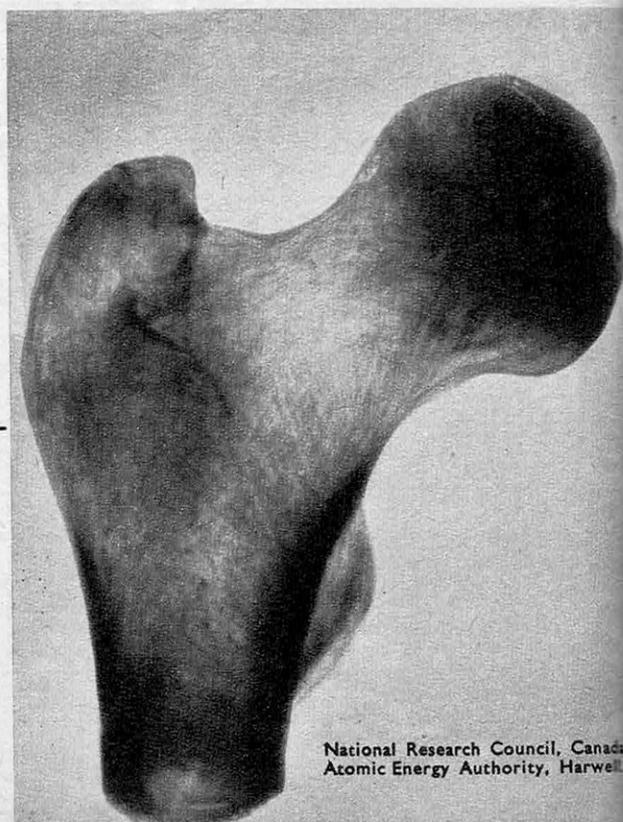
Dans l'estuaire de la Tamise, des essais viennent d'être entrepris pour l'étude des mouvements de la vase. Pour cela, on utilise du verre pulvérisé contenant de l'oxyde de scandium irradié. Ce verre contenant du scandium-46 est mélangé à de la vase et le mélange est immergé dans le lit du fleuve. On

peut suivre ainsi le déplacement de la vase et organiser au mieux les opérations de dragage.

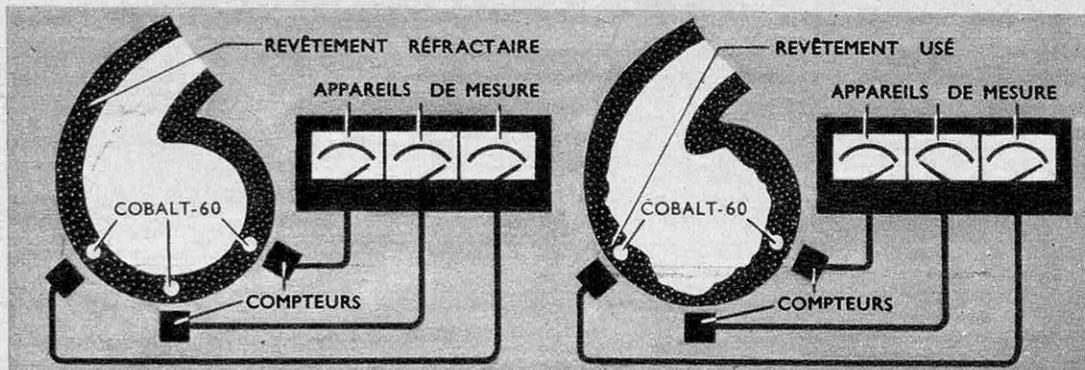
Les sources de rayons gamma, telles que celles de radiocobalt, pourraient d'ailleurs trouver des applications dans le balisage de l'entrée des ports maritimes et celui des aéroports. Leur détection serait assurée par des compteurs à scintillation disposés à l'étrave des navires et mobiles autour d'un axe vertical pour balayer l'horizon, ou fixés au plancher des avions. Une source de 10 curies serait détectable à 1 000 m à travers le brouillard.

Dans l'industrie mécanique, les radioisotopes peuvent aider à la protection des ouvriers, en particulier de ceux qui manœuvrent des

**Ces trois radiographies** ont été obtenues avec des radioéléments artificiels : la perceuse à main avec l'iridium-192 ; le chronomètre avec le thulium-170 ; le fémur avec l'américium-241 ; cette dernière radiographie constitue surtout une curiosité : l'américium, élément transurannique, est actuellement fabriqué en quantités infimes, et ses applications en médecine ou dans l'industrie demeurent lointaines.



National Research Council, Canada Atomic Energy Authority, Harwell.



*L'usure des revêtements réfractaires des hauts fourneaux, des fours et des convertisseurs utilisés en sidérurgie est l'objet d'une surveillance délicate que l'emploi d'isotopes radioactifs a aisément résolue. On incorpore au revêtement des billes de cobalt-60 dont il suffit de détecter le rayonnement. La disparition d'une bille que révèle le compteur placé en regard indiqué aussitôt que l'usure du revêtement a atteint la valeur limite.*

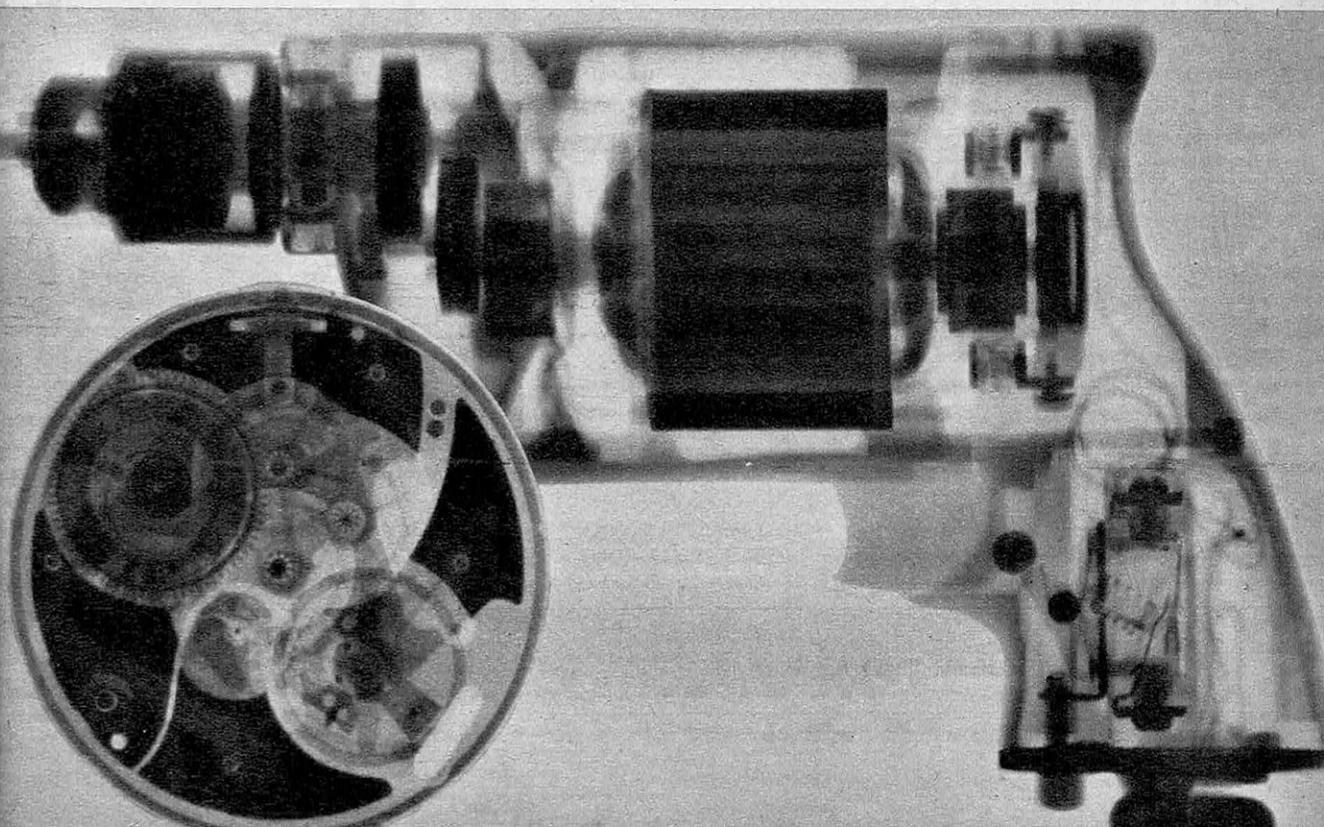
presses. Une société américaine a lancé des bracelets et des bagues portant des préparations radioactives dont l'activité est à peine triple de celle des peintures qui recouvrent le cadran des montres lumineuses, et par conséquent inoffensive. Dès que l'ouvrier introduit malencontreusement la main dans une zone interdite, les compteurs donnent un nombre suffisamment grand d'impulsions et, par l'intermédiaire d'un thyatron, actionnent un interrupteur qui bloque la presse.

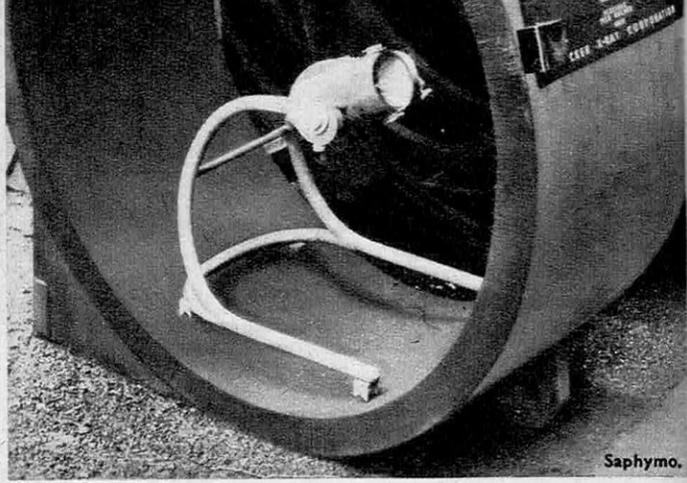
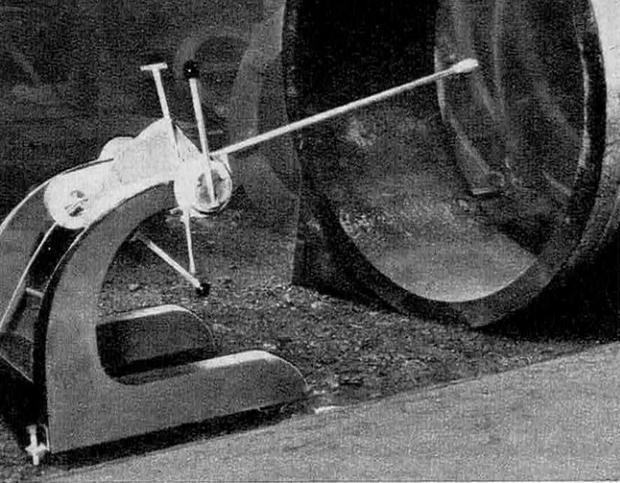
Un dispositif analogue fonctionne en sens inverse, c'est-à-dire qu'un compteur, près de la presse, se trouve constamment irradié par les préparations que porte l'ouvrier : il agit sur un relais temporisé à 15 secondes au

maximum et, s'il n'est pas soumis au rayonnement, il coupe le système électrique ou hydraulique qui actionne la presse ; ce perfectionnement a pour but d'obliger l'ouvrier à porter ses bracelets ou bagues de protection.

### Radiographies par les rayons gamma

L'inspection des soudures et la recherche des défauts dans une masse métallique se font maintenant avec le radiocobalt-60 ou le radiotantale-182, dont les périodes respectives sont de 5 ans et de 4 mois. Fabriqués dans les réacteurs atomiques, ils donnent des rayonnements gamma dont le pouvoir de pénétration





Saphymo.

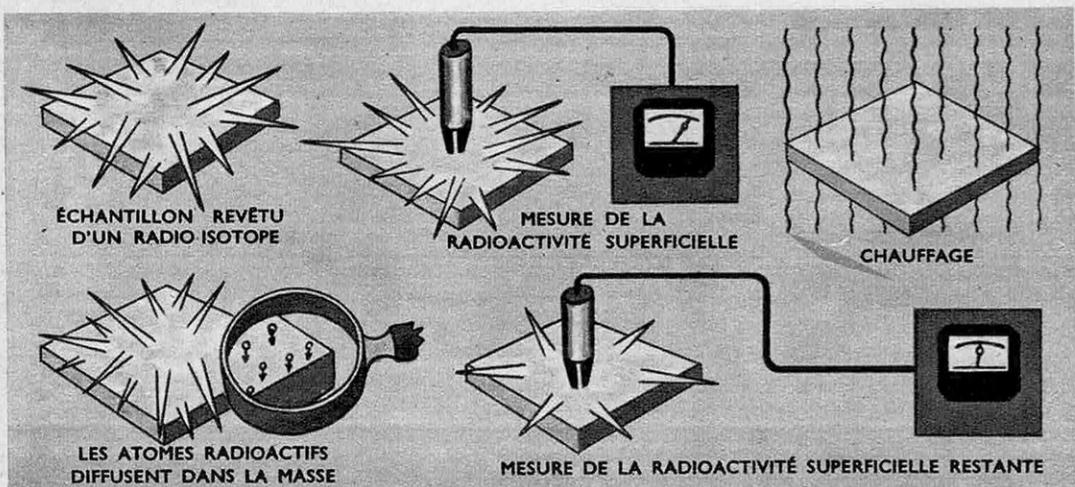
Deux « gammablocs » pour radiographie industrielle. Ce sont des containers mobiles permettant le transport et le stockage de la source (radiocobalt, radiocésium ou radioiridium) à l'abri d'un écran protecteur en plomb, et sa mise en place à distance pour les radiographies. La source peut être extraite, au besoin, de son enceinte protectrice, pour effectuer des irradiations panoramiques ou inspecter des cavités de dimensions restreintes.

est analogue à celui des rayons gamma du radium. On utilise aussi le césium-137 et l'euprotium-154. On place tout simplement la source d'un côté de la pièce à radiographier et de l'autre une émulsion photographique. Les sources sont très peu encombrantes et peuvent contrôler des épaisseurs d'acier de l'ordre de 30 cm. L'émission du rayonnement est panoramique et permet la prise de nombreux clichés à la fois, spécialement pour l'étude des pièces de révolution.

Lorsqu'il s'agit d'épaisseurs faibles, il est nécessaire d'employer un rayonnement plus « mou », comme celui de l'iridium-192, du cérium-144.

au radiothulium-170 utilisable pour la radiographie et la radioscopie médicales, car la pénétration de son rayonnement est du même ordre que les rayons X de 100 000 électrons-volts environ que livrent les tubes servant couramment en radiologie. Le médecin pourra faire des « scopies » au domicile du malade, sans autre appareil qu'un écran fluorescent et une source radioactive peu encombrante.

L'américium-241 pourra jouer un rôle analogue, car son émission gamma a une énergie de l'ordre de 60 000 électrons-volts. Mais il faudra qu'il soit produit en quantité suffisante dans des réacteurs utilisant du plutonium. Il se forme en effet par capture succes-



La diffusion dans les métaux est étudiée en faisant appel à un radioisotope. On a représenté ici schématiquement les différentes phases de l'opération. La décroissance de la radioactivité en surface permet d'évaluer la vitesse de diffusion du métal déposé à la surface vers l'intérieur. La mesure est rapide et précise. Cette méthode est la seule qui permette d'étudier la diffusion d'un métal dans lui-même avec un radioisotope du métal

sive de deux neutrons par un noyau de plutonium-239 avant qu'il subisse la fission ; le plutonium-241 ainsi formé se désintègre en émettant une particule bêta et en donnant l'américium-241. Son emploi présenterait des avantages pour la fabrication des peintures luminescentes, car son rayonnement gamma est beaucoup moins pénétrant que celui du radium ou du thorium utilisés jusqu'à présent. Son rayonnement alpha, qui provoque la luminescence de sels spéciaux, est facilement absorbé par quelques centièmes de millimètre d'un revêtement quelconque ; mais il rend l'élément très toxique, et la seule précaution à prendre est d'éviter son introduction dans l'organisme.

### Problèmes métallurgiques

Les radioisotopes permettent d'étudier l'usure des pièces mécaniques et celle des outils de coupe dans toutes les opérations

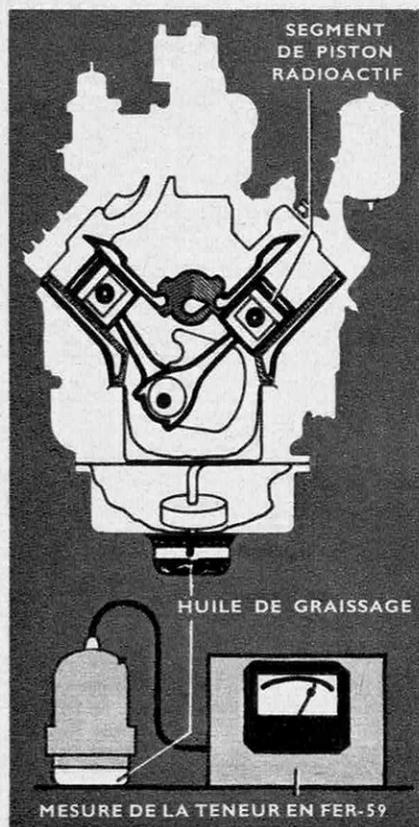
d'usinage. Le principe de la méthode est de rendre une des pièces radioactive et d'enregistrer au cours du fonctionnement de la machine, sans qu'il soit besoin de l'arrêter ou de la démonter, la radioactivité de l'huile de graissage où se trouvent les particules arrachées au métal. Celles qui sont arrachées aux outils de coupe se retrouvent en partie dans le lubrifiant et en partie sur les tournures et copeaux de la pièce travaillée.

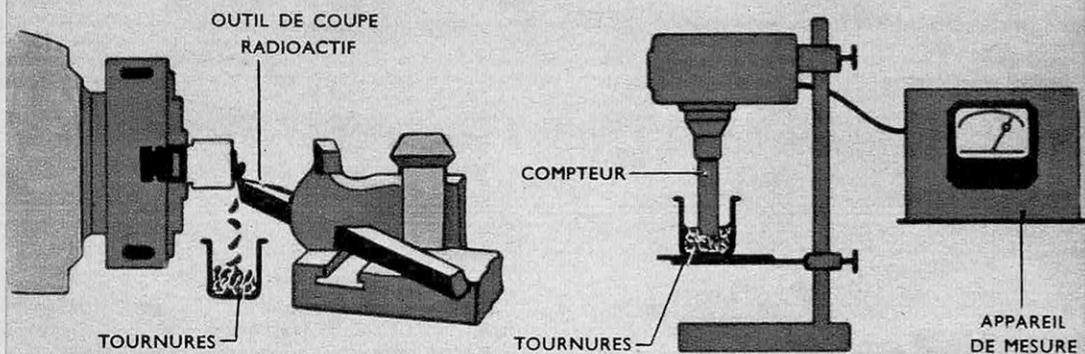
Pour activer les pièces ou les outils, on peut procéder soit par dépôt électrolytique de radioisotopes, soit par leur introduction dans la masse au cours de la fabrication même, soit enfin par irradiation de l'élément fabriqué dans un réacteur atomique à grand flux de neutrons. C'est ainsi que l'on a rendu radioactifs des segments de pistons par irradiation pour étudier l'efficacité des lubrifiants pour moteurs et apprécier très rapidement leurs qualités. On opère de même pour les outils de coupe dont on étudie l'usure plus ou moins

### ÉTUDE DE L'USURE D'UN MOTEUR

Le frottement et la lubrification dans un moteur sont étudiés ici en utilisant un segment de piston rendu radioactif par un séjour dans un réacteur nucléaire. On mesure à intervalles réguliers la teneur en radiofer

(arraché au segment) de l'huile de graissage sans même arrêter le moteur, et on suit ainsi l'usure d'après l'accroissement de la radioactivité. Le compteur de Geiger spécial est, comme on le voit à droite plongé directement dans l'éprouvette où l'on a recueilli un échantillon de l'huile de graissage.





**L'outil de coupe** (ou seulement la partie rapportée qui travaille) a été rendu radioactif par séjour dans un réacteur : les tournures lui arrachent des particules dont on mesure la radioactivité pour évaluer son usure.

rapide en fonction de divers facteurs : nature de la pièce travaillée, vitesse de coupe, profondeur de travail, emploi de lubrifiants variés.

Lors du frottement de deux pièces métalliques, une partie des atomes de l'une est absorbée par l'autre, mais comme il s'agit de quantités minimes, on n'avait jusqu'ici qu'une idée vague de l'importance de ce transfert. Aujourd'hui, avec des radioisotopes incorporés à l'une des pièces, il est possible de l'évaluer avec précision : par exemple, avec un vilebrequin contenant du fer radioactif, introduit dans sa masse au moment de la coulée du métal, il suffira d'appliquer un film photographique sur les coussinets et d'en mesurer le noircissement dans un temps donné pour connaître quantitativement l'effet du frottement et la diffusion qui en résulte. Cette méthode d'autoradiographie est maintenant courante dans les laboratoires métallurgiques pour les recherches sur la structure des métaux.

En métallurgie, et en sidérurgie en particulier, les radioisotopes sont aujourd'hui de plus en plus appliqués pour suivre et contrôler les opérations industrielles, depuis le triage des minerais jusqu'à la coulée et aux traitements thermiques. Ils servent ainsi à l'étude du mouvement des charges et des gaz dans les hauts-fourneaux, de la formation des scories, de la dispersion des éléments dans les alliages, de l'usure des revêtements réfractaires des fours et des convertisseurs, de la contamination des aciers par diverses impuretés au cours de leur élaboration.

### **Ionisation par les rayonnements**

Selon leur nature et leur énergie, les rayonnements ionisent plus ou moins les gaz et les rendent conducteurs. L'ionisation qu'ils provoquent dans l'air est couramment utilisée pour l'élimination des charges électrostatiques.

Tout le monde sait la facilité avec laquelle les substances isolantes en mouvement s'électrisent. En s'accumulant à la surface des fils de soie, de coton, de laine, etc., les charges statiques attirent les poussières, se repoussent mutuellement et provoquent des aigrettes capables d'engendrer des explosions lorsque l'atmosphère de l'usine renferme des combustibles volatils. Des peignes portant des substances radioactives rendent l'air conducteur au voisinage des fils.

On emploie un procédé analogue pour dissiper les charges statiques qui tendent à s'accumuler dans les cages des balances de précision et qui faussent les mesures. Plus importantes sont les applications à l'aéronautique : les bords des ailes d'avions sont munis de peignes radioactivés pour éliminer les charges dues au frottement de l'air. Sur les camions-citernes servant au transport des liquides combustibles, des appendices de garde-boue en caoutchouc radioactif assurent une décharge convenable sans qu'il soit besoin de faire traîner une chaîne sur le sol.

Dans les arcs électriques, dans les pistolets servant à la métallisation, dans les cages d'ascenseurs de gratte-ciel, les éliminateurs de charges, notamment le phosphore-32, sont d'un emploi courant.

C'est sur les variations de l'ionisation, provoquée dans une enceinte par une source de particules alpha, lorsque la composition du gaz qui la traverse change, même de peu, que sont fondés des détecteurs d'incendie montés sur des navires, dans les docks, hangars, centrales électriques, etc. Ils révèlent non seulement des dégagements de fumée, mais aussi les combustions lentes invisibles comme celle du caoutchouc, la fermentation des stocks de pommes de terre, etc.

Dans certains cas, il peut être avantageux d'incorporer des éléments radioactifs à des carburants liquides, des gaz, des isolants, des

peintures, pour mettre en évidence, avec un détecteur approprié, des fuites ou des élévations anormales de température.

### Les « indicateurs » radioactifs

Du fait que tous les isotopes d'un même élément chimique, radioactifs ou non, se comportent de la même manière dans toutes les réactions, il faut s'attendre à ce que les applications des radioisotopes soient, d'ores et déjà, innombrables dans le domaine de la chimie, à l'usine comme au laboratoire. Pour ne donner qu'un exemple, le soufre radioactif se comporte exactement comme le soufre stable, avec la seule différence que son émission bêta permet de le détecter et de le doser. Si on le fait entrer dans une combinaison chimique déterminée, on pourra suivre le sort de cette combinaison à travers toutes les réactions auxquelles elle prendra part et on connaîtra ainsi le sort des combinaisons chimiques analogues à base de soufre non radioactif. Tel est le principe de la méthode des « indicateurs » dont les variantes sont presque infinies dans leurs modalités d'applications.

### Vers une chimie nouvelle

Mais il est un autre domaine d'emploi tout récent et qui paraît particulièrement riche en possibilités nouvelles. C'est celui des réactions chimiques induites par les rayonnements. Un exemple typique est fourni par la polymérisation de l'éthylène gazeux sous l'action des rayonnements gamma et par les changements observés dans les propriétés des hauts-polymères irradiés. Chez ces derniers, les rayons gamma ont pour premier effet de rompre un certain nombre de liaisons chimiques et, dans les recombinaisons qui s'effectuent ensuite, des liens nouveaux s'établissent dans les trois dimensions. Le produit final présente des caractéristiques nettement améliorées, demeurant solide à 160°, alors que le polyéthylène normal se ramollit à 80°.

Dans l'industrie du pétrole d'importantes recherches sont en cours (en particulier à l'Esso-Research and Engineering Co, filiale de la Standard Oil américaine) sur l'action des rayons gamma sur les hydrocarbures. Les procédés modernes de raffinage font intervenir des températures fréquemment supérieures à 500°, de fortes pressions, des catalyseurs dont l'action pourrait être aidée, sinon remplacée par celle des rayons gamma. Des installations coûteuses de production de chaleur pourraient ainsi être éliminées tout en tirant du brut le maximum de produits nobles.

D'une manière plus générale, par les changements chimiques qu'ils provoquent en brisant les molécules des composés et libérant

des radicaux libres, les rayons gamma apparaissent susceptibles de déclencher des réactions qui ne s'effectueraient pas d'elles-mêmes ou s'effectueraient très lentement. Les sources intenses que l'on sait obtenir aujourd'hui par irradiation (cobalt-60), ou par extraction des produits de fission, renouvelleront ainsi peut-être les méthodes classiques de la chimie pour l'obtention des produits déjà connus et livreront même des produits nouveaux dont on ne peut présager l'avenir.

### Les actions biologiques

Nous évoquerons, pour terminer, un vaste domaine ouvert aux radioéléments : l'exploitation à grande échelle de leurs applications médicales, d'une part pour le traitement industriel des denrées alimentaires, de l'autre pour la création d'espèces végétales améliorées.

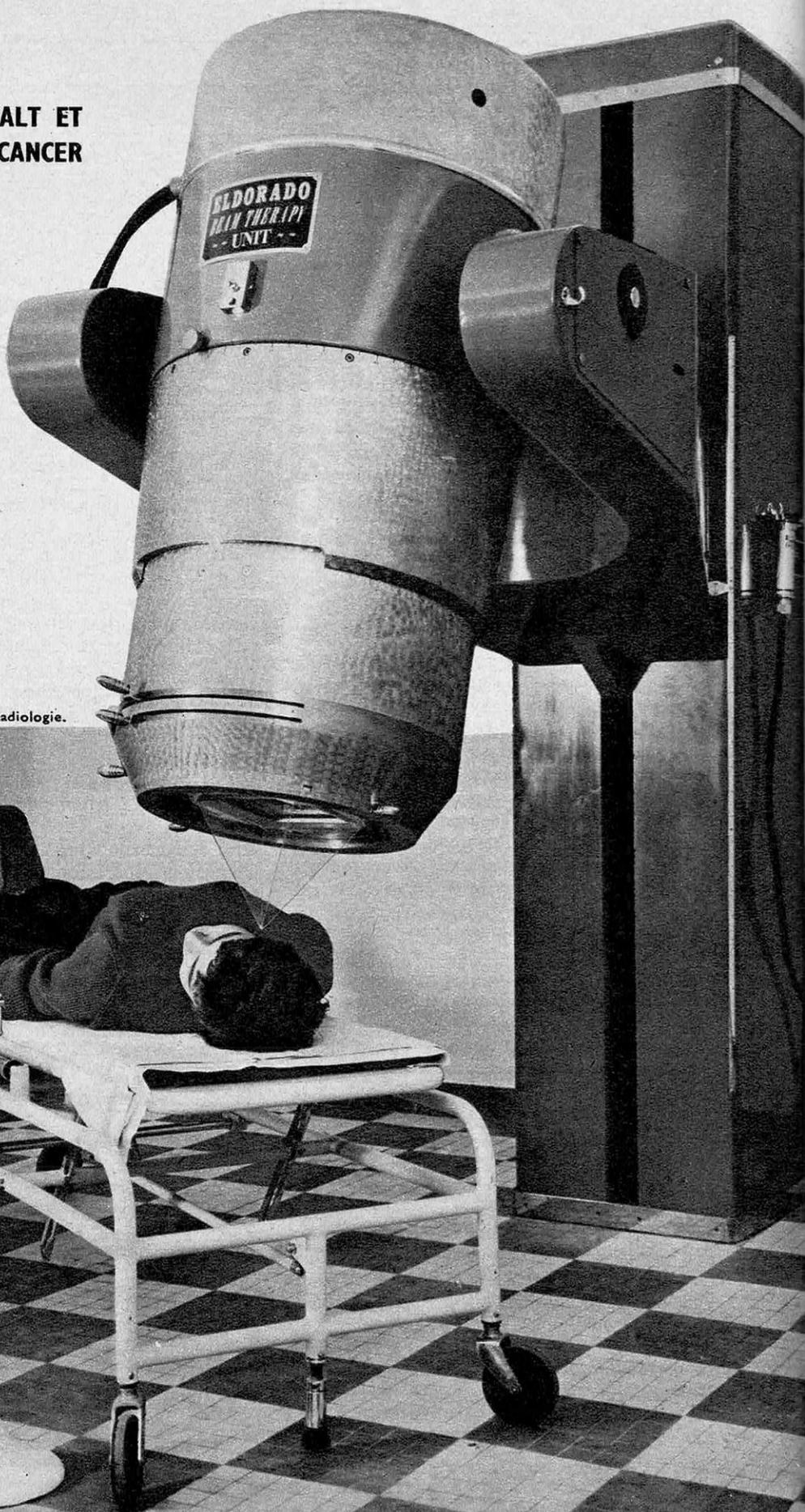
Les radiations tuant facilement les organismes vivants, on peut avec elles stériliser partiellement ou totalement les produits les plus divers sans avoir recours à la chaleur. Le problème est simple dans le cas de substances inertes comme les fils et catguts chirurgicaux, cotons et pansements, instruments divers, dont certains ne peuvent supporter sans dommage des températures élevées et que les rayons gamma stérilisent rapidement et parfaitement, sans même qu'il soit nécessaire d'ouvrir leurs emballages. Il est plus délicat dans le cas de matières alimentaires, la viande en particulier, où l'action chimique des radiations nuit à la saveur. Les recherches se poursuivent activement à ce sujet aux Etats-Unis. De grands progrès ont été faits pour le traitement avant stockage des pommes de terre et des oignons, afin de réduire leur pouvoir germinatif ; de petites doses suffisent pour que des pommes de terre se conservent sans aucun dommage pendant plus d'un an.

La recherche agronomique poursuit d'autre part ses efforts pour induire des mutations dans un certain nombre d'espèces végétales à l'aide des rayonnements radioactifs. Elles ont été effectivement obtenues, mais rares sont jusqu'ici celles qui représentent un progrès. On a pu provoquer des changements de coloration de certaines fleurs et créer des variétés plus résistantes aux maladies cryptogamiques. Une variété de blé à tige courte et de grand rendement apparaît particulièrement intéressante car, à récolte égale, elle exigerait moins d'engrais. De même on a obtenu des avoines qui mûrissent plus d'une semaine avant les variétés dont elles dérivent et conviendraient ainsi pour les cultures en pays à étés courts. On voit les perspectives nouvelles qu'ouvrent de telles recherches.

## LA BOMBE AU COBALT ET LE TRAITEMENT DU CANCER

A la clinique Hartmann de Neuilly, on utilise cette bombe au cobalt pour traiter le cancer. Le malade, sans préparation spéciale, est couché sous l'appareil et orienté convenablement. La pyramide en plexiglas ne guide pas les radiations mais facilite le repérage de la région à irradier. La « dose » exacte est délivrée en faisant agir de l'air comprimé sur un diaphragme de mercure qui monte ou descend pour laisser passer ou interrompre le rayonnement du cobalt.

Cie Générale de Radiologie.



# Radioisotopes artificiels armes nouvelles en médecine

LES radioéléments artificiels trouvent en médecine, tant pour le diagnostic que pour la thérapeutique, des utilisations déjà nombreuses et qui doivent s'étendre encore au cours des prochaines années. Elles reposent sur la nature et les propriétés de leurs rayonnements.

Comme on l'a vu dans un chapitre précédent, ces rayonnements sont de deux types : le rayonnement  $\beta$  (bêta) qui est corpusculaire et constitué par des électrons, et le rayonnement  $\gamma$  (gamma) de nature ondulatoire. Parmi les radioisotopes employés en médecine, quelques-uns n'émettent qu'un rayonnement bêta (c'est le cas du phosphore-32 et du carbone-14), tandis que les autres émettent simultanément les deux types de rayonnements.

Le pouvoir de pénétration de ces rayonnements dans la matière dépend de leur énergie. Par exemple, le phosphore-32 émet un rayonnement bêta d'énergie maximum de 1,69 MeV (rappelons que l'énergie d'un rayonnement bêta se répartit d'une façon continue depuis des valeurs très faibles jusqu'à un maximum caractéristique de l'élément considéré), correspondant à un pouvoir de pénétration maximum de 8 mm dans les tissus. Par contre, le carbone-14 émet un rayonnement bêta d'énergie maximum beaucoup moins élevée, 0,145 MeV, correspondant à un pouvoir de pénétration de seulement 0,3 mm. On dit que le phosphore-32 a un rayonnement « dur » et le carbone-14 un rayonnement « mou ».

A énergie égale, le pouvoir de pénétration des rayons gamma est beaucoup plus considérable. On le caractérise en général par l'épaisseur de matière nécessaire pour réduire de moitié son intensité. Par exemple, un rayonnement gamma de 0,8 MeV est absorbé de moitié par une épaisseur de tissu de 8,6 cm ; un rayonnement bêta de même énergie serait totalement absorbé par 0,4 cm de tissu environ.

Il n'est pas superflu d'ajouter que le pouvoir de pénétration des deux types de rayon-

nements dépend aussi de la nature du matériau absorbant. Il est d'autant plus faible que ce matériau est plus dense. Mis à part les os, les tissus ont une densité voisine de celle de l'eau et, par suite, un comportement analogue.

A côté de la nature et de l'énergie des rayonnements, deux autres facteurs sont à considérer lorsqu'on envisage d'injecter, dans un but diagnostique ou thérapeutique, une certaine quantité d'un radioisotope : l'activité et la période.

## Les « doses » de rayonnement

L'activité représente le nombre d'atomes qui se désintègrent par seconde. L'unité d'activité est le curie, qui correspond à 37 milliards de désintégrations par seconde. Pour la thérapeutique, on compte en général par millicuries, et pour le diagnostic, par microcuries (unités respectivement un millier et un million de fois plus petites). Par suite des désintégrations, le nombre d'atomes radioactifs présents décroît constamment. La période d'un radioélément est le temps nécessaire pour que le nombre d'atomes radioactifs, et donc l'activité, soient tombés à la moitié de leurs valeurs initiales.

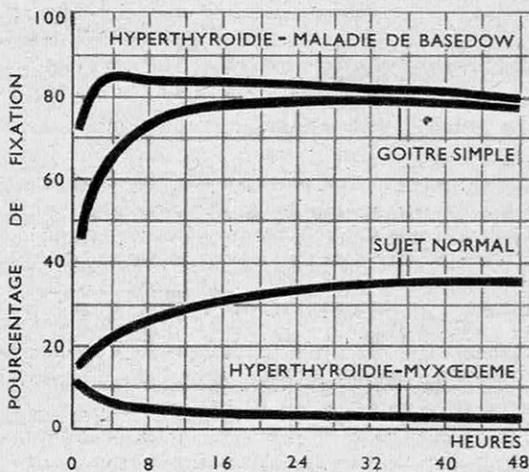
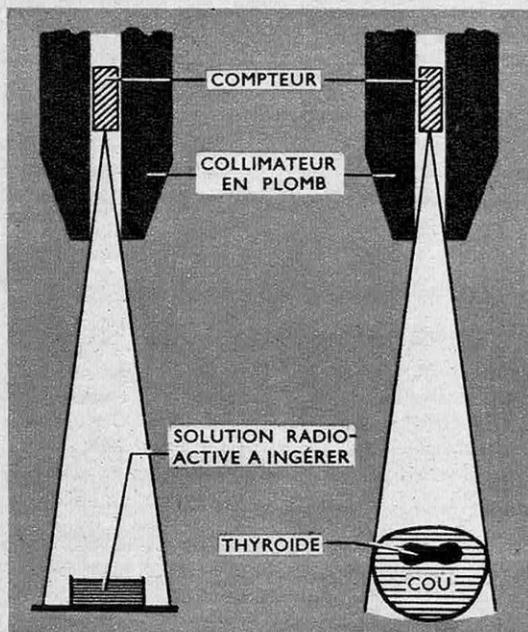
La nature du rayonnement d'un radioisotope et sa période jouent un rôle très important en thérapeutique, comme nous allons le montrer sur un exemple schématique. Ce qui importe dans ce cas, c'est la dose de rayonnement délivrée aux tissus, c'est-à-dire l'énergie qu'ils reçoivent. Si nous injectons un même nombre d'atomes de phosphore-32 et de carbone-14, la dose délivrée après désintégration complète sera beaucoup plus grande pour le premier que pour le second, d'après les chiffres donnés plus haut. Mais le phosphore-32 se désintègre beaucoup plus rapidement que le carbone-14, puisque la période est de 14 jours pour le premier, de 5 000 ans pour le second. Comme les lois de la désintégration radioactive font que la destruction d'un radioélément peut être considérée comme pratique-

# Étude du fonctionnement de la thyroïde

L'ÉTUDE de la fixation de l'iode par la thyroïde s'effectue à l'aide d'iode-131 radioactif, ingéré sous forme d'iodure de sodium marqué. On opère de la façon suivante : un compteur muni d'un « collimateur » en plomb est disposé en regard d'un verre contenant 50 cm<sup>3</sup> environ d'une solution aqueuse d'iodure de sodium radioactif. On mesure le nombre d'« impulsions » ou, comme l'on dit, de « coups » par minute débités par le compteur, nombre qui est proportionnel à l'activité de la solution. On fait boire ensuite au sujet la solution d'iodure radioactif, puis on dispose sa région cervicale, où se trouve la glande thyroïde, en face du compteur, dans les mêmes conditions géométriques que pour la solution. On mesure le débit du compteur, à différents instants après ingestion, en ayant soin d'appliquer chaque

fois un facteur de correction pour tenir compte de la désintégration de l'iode en fonction du temps. Le rapport du nombre de coups/minute ainsi corrigé au nombre de coups/minute fourni par la solution donne à chacun de ces instants la proportion de l'iode ingérée fixée par la thyroïde. Le collimateur permet au compteur de ne recevoir que le rayonnement issu de la thyroïde à l'exclusion de celui provenant de l'iode situé dans d'autres régions de l'organisme au moment de la mesure.

On peut obtenir ainsi schématiquement quatre types de courbes de « fixation thyroïdienne » de l'iode en fonction du temps. Dans le cas des sujets normaux, la fixation atteint 30 % à la 6<sup>e</sup> heure et 35 % à la 24<sup>e</sup> heure, puis amorce une décroissance très lente. On peut observer, également, un maximum de fixation beaucoup plus élevé, de l'ordre de 60 % à 70 % vers la 24<sup>e</sup> heure, suivie d'une décroissance également très lente. Ce cas correspond à ce que l'on appelle un « goitre simple » avide d'iode, état dont le retentissement sur l'état général est relativement léger. La captation de l'iode par la thyroïde est alors anormalement grande, mais la



ment complète au bout d'un temps égal à 5 fois la période, on voit que la dose fournie par désintégration totale sera délivrée par le phosphore-32 en 70 jours et par le carbone-14 en 25 000 ans.

Les deux facteurs jouent également un rôle très important pour le diagnostic. Dans ce cas l'intérêt des radioisotopes réside dans la possibilité de les détecter à l'état de « traces » grâce à leur rayonnement. Si le radioélément émet un rayonnement  $\gamma$ , on peut, grâce au grand pouvoir de pénétration de ce dernier à travers les tissus, le détecter avec des compteurs de l'extérieur de l'organisme. S'il est un pur émetteur  $\beta$ , il faut en général prélever un échantillon du tissu où il se trouve. Si on a

affaire à un rayonnement « dur », il suffit de disposer l'échantillon d'une façon convenable par rapport au compteur. Si le rayonnement est « mou », son absorption dans l'échantillon lui-même et par les parois du compteur sont telles qu'il faut une préparation complexe et délicate et des dispositifs de comptage spéciaux.

D'autre part, avec un radioisotope d'une très longue période, donc à faible activité, il faudra, pour le détecter avec précision, l'injecter dans l'organisme en quantité appréciable, ce qui peut avoir pour effet de perturber le mécanisme physiologique ou pathologique que l'on se propose d'étudier, ou même, si l'élimination par les processus naturels est



**En médecine générale, cet appareil contrôle le fonctionnement de la thyroïde. Un certain temps après l'ingestion de radioiode, il donne par lecture directe le pourcentage d'iode qui s'est localisé dans la thyroïde.**

sécrétion des hormones thyroïdiennes reste normale. Dans un troisième cas, on peut obtenir un maximum de fixation extrêmement élevé, 80 % et plus, obtenu en un temps très court, 2 heures après l'ingestion par exemple. La décroissance à partir du maximum est plus rapide. Dans ce cas, on a affaire à une glande hyperfonctionnelle non seulement à la fixation (partie ascendante), mais également à la sécrétion hormonale (partie descendante). On a alors affaire à une hyperthyroïdie, type maladie de Basedow, avec toutes les conséquences pathologiques que cela implique. Enfin, on peut observer un quatrième type de courbe dans lequel la fixation maximum est

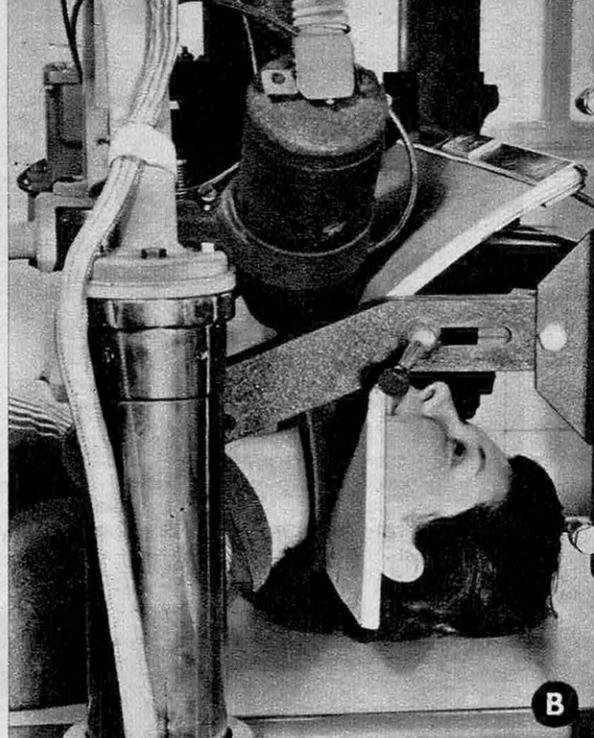
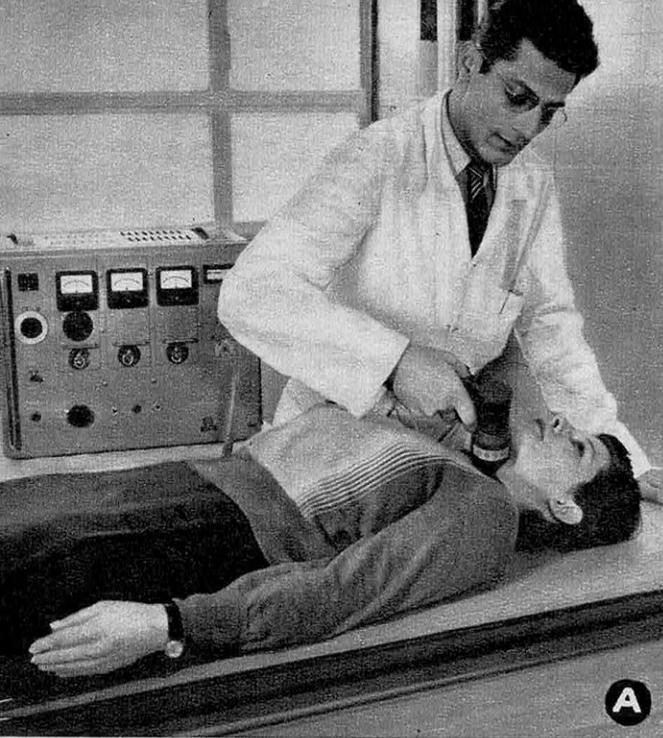
extrêmement faible, 10 % ou moins, obtenue très rapidement après l'ingestion et suivie d'une décroissance régulière. Une telle courbe de fixation est caractéristique d'un hypofonctionnement thyroïdien, correspondant à un état de myxoedème plus ou moins avancé. On voit le parti que l'on peut tirer d'une telle méthode d'examen. Ajoutons que dans le cas où on utilise un compteur de Geiger, l'activité de l'iode-131 ingérée nécessaire pour faire des mesures précises et rapides est de l'ordre de 100 microcuries. Les « compteurs à scintillation », beaucoup plus sensibles au rayonnement gamma ont permis de faire descendre la dose à 5 microcuries.

lente, provoquer des effets pathologiques indésirables. Il ne faut donc pas que la période du radioélément utilisé soit trop longue. Il ne faut pas non plus, pour certaines investigations, qu'elle soit trop courte. Par exemple, si l'on veut mesurer la durée de vie des globules rouges, qui est de l'ordre de 120 jours, on ne peut utiliser un radioisotope dont la période est de quelques heures. Par contre, s'il s'agit d'étudier la vitesse avec laquelle une substance introduite par voie intra-veineuse se répartit uniformément dans l'arbre vasculaire, opération qui se fait en quelques minutes, un radioisotope dont la période est de l'ordre de l'heure peut être parfaitement utilisable. Dans de tels cas où, physiologiquement, un radio-

isotope à vie courte est utilisable, c'est essentiellement la plus ou moins grande proximité du lieu de production du radioisotope qui en limite l'emploi.

### **Radioisotopes et diagnostic**

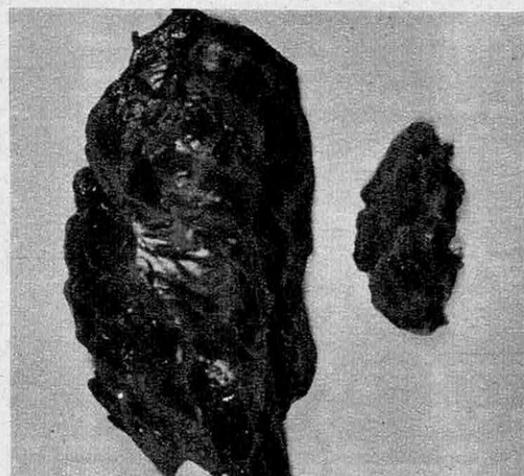
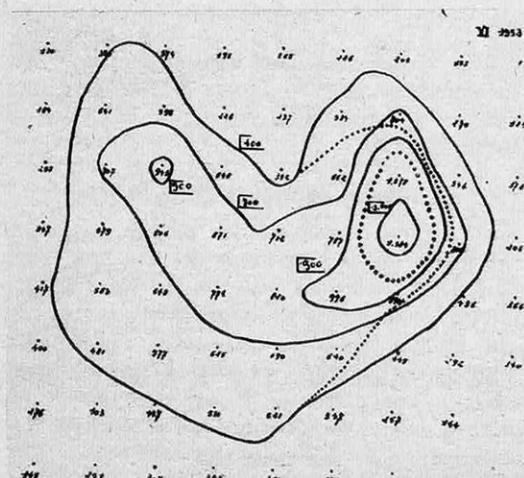
Les radioisotopes ont les mêmes propriétés chimiques et se comportent de la même façon dans les organismes vivants que les éléments stables correspondants. L'avantage majeur de leur emploi pour le diagnostic réside dans l'extrême sensibilité des instruments qui permettent leur détection. Il est possible de les utiliser à l'état de « traces » ne perturbant pas le déroulement des processus vitaux que l'on veut étudier. En voici quelques exemples.



## Étude morphologique de la thyroïde

**E**N utilisant un collimateur de très faible ouverture, on étudie la distribution de l'iode dans la glande. Le patient étant confortablement couché sur le dos, le cou en légère extension forcée, un « quadrillage » est disposé en regard de la région thyroïdienne et on détermine systématiquement l'activité en coups par minute pour chaque nœud du quadrillage. Il est commode de rendre le compteur solidaire d'un bras de pantographe, dont l'autre bras possède une pointe qu'on dispose successivement en chaque nœud d'un réseau quadrillé convenable. On trace ensuite sur le quadrillage, par interpolation, des lignes « iso-coups » ou lignes « iso-actives » s'éteignant,

par exemple, de 10 % en 10 % par rapport à l'activité maximum enregistrée sur le quadrillage. De même que les lignes de niveau sur une carte permettent d'apprécier le relief de la région représentée sur la carte, les lignes iso-coups permettent d'apprécier la distribution spatiale de l'iode dans la thyroïde. Un tel ensemble de lignes iso-actives, associé à la représentation des principaux repères anatomiques, constitue ce que l'on appelle une « carte » de la thyroïde, et la technique correspondante est souvent désignée sous le nom de « cartographie thyroïdienne ». On voit ci-dessous la carte d'une thyroïde et la pièce opératoire correspondante.



Sur cette cartographie thyroïdienne, les lignes iso-actives montrent un gros lobe droit d'activité moyenne et un petit lobe gauche hyperactif. La pièce opératoire, à droite, confirme la morphologie prévue par la carte.

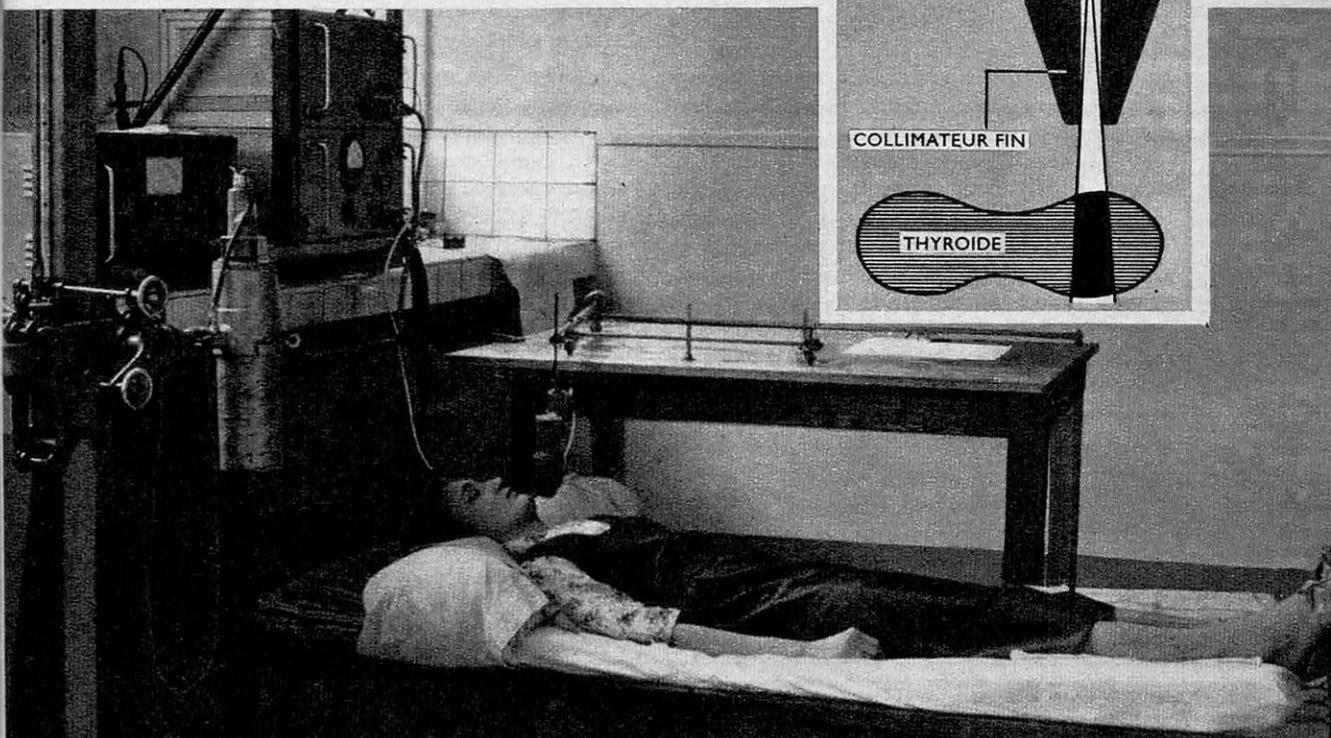
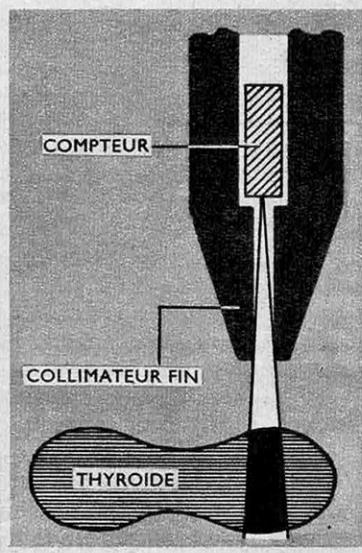
## Examen thyroïdien à l'aide de compteurs



Saphymo.

**A** l'hôpital Beaujon, à Paris, le diagnostic des affections de la glande thyroïde est conduit à l'aide de l'iode radioactif ingéré par le malade et dont on étudie la fixation sur la glande et l'élimination à l'aide d'un compteur de Geiger. En A, le médecin pratique un premier examen rapide avec un compteur tenu à la main. En B, trois compteurs permettent des localisations précises grâce à leurs collimateurs à petite ouverture ; on remarquera le tablier protecteur placé entre la face et le cou pour protéger les compteurs contre les radiations parasites. En C, l'appareillage permet un dosage très précis de la radioactivité d'échantillons biologiques placés à l'intérieur même d'un compteur, dont l'atmosphère est balayée en continu par un courant d'hélium additionné de 1 % d'isobutane, fourni par la bouteille fixée au mur. On lit la mesure de la radioactivité sur les cadrans du compteur d'impulsions.

Dans cette installation pour cartographie thyroïdienne, on distingue le petit compteur directionnel, au-dessus du cou du malade, et le pantographe dont il est solidaire. Sur la paillasse, au-dessus du lit d'examen se trouve le dispositif électronique de numération. On voit également au premier plan un compteur associé à un collimateur large pour la mesure de l'activité globale de la thyroïde. A côté, un « intégrateur » permet l'enregistrement continu de l'activité au niveau de la glande. Ci-contre, principe de la mesure.



# Relevé automatique des cartes thyroïdiennes

**D**ES dispositifs ont été créés pour enregistrer automatiquement une carte thyroïdienne. Le compteur et son collimateur sont solidaires d'un chariot qui peut se déplacer suivant deux directions rectangulaires. Le chariot est mû par deux moteurs électriques, alimentés de telle sorte que le compteur « balaie » à vitesse uniforme, suivant une série de lignes équidistantes, la région thyroïdienne. Un enregistreur à plume, solidaire du chariot, matérialise sur une feuille de papier les lignes de balayage. D'autre part, pour un nombre prédéterminé d'impulsions issues du compteur, la plume inscrit un petit trait perpendiculaire à la ligne de balayage. On conçoit que le nombre de ces traits par unité de longueur est proportionnel, dans une région de la ligne, à l'activité de la région thyroïdienne correspondante. L'ensemble des lignes et des traits perpendiculaires correspondants réalise sur la feuille de papier une sorte d'« image » de répartition de l'activité au sein de la glande.

La photographie ci-contre représente l'un des systèmes usuels.

On enregistre automatiquement la carte de la thyroïde à l'aide d'un gros collimateur en plomb dans lequel se trouve le compteur à scintillation. A la partie supérieure, on voit le capot du « préamplificateur » d'où s'échappent le câble d'alimentation du photomultiplicateur et du préamplificateur, ainsi que le câble de sortie des impulsions. L'ensemble est solidaire d'un double chariot. A gauche, l'« image » représentée est celle d'une thyroïde normale, obtenue par un tel dispositif. Ces images sont fréquemment appelées « scintigrammes » du nom donné par les auteurs américains de la méthode.

Des essais ont été faits pour perfectionner cette méthode et donner l'image sur un écran d'oscillographe cathodique ou mieux sur un écran de télévision. On apprécie ainsi beaucoup plus rapidement la forme et les dimensions de la glande ainsi que les régions plus particulièrement actives.

## SUITE DE LA PAGE 121

On sait que la glande thyroïde capte avec une grande spécificité l'iode minéral introduit dans l'organisme. Pour étudier le fonctionnement de cette glande, on utilise principalement le radioiode-131 dont la période est de 8 jours, assez longue pour permettre cette étude et assez courte pour qu'on puisse le détecter à l'état de traces ; il émet simultanément des rayonnements  $\beta$  et  $\gamma$ , ce dernier rendant possible la détection externe. On détermine ainsi aisément, avec un appareillage relativement simple, la courbe de fixation thyroïdienne de l'iode en fonction du temps, mettant en évidence les anomalies fonctionnelles de la glande dans son ensemble.

On peut, par des techniques voisines, étudier la distribution de l'iode au sein de la glande et dresser une « carte » de la thyroïde, soit point par point ou automatiquement à l'aide d'un compteur, soit même photographiquement. Ainsi apprécie-t-on la forme et les dimensions de la glande, les régions plus particulièrement actives, la présence de masses de tissus aberrant (goîtres plongeant). Tous ces renseignements sont précieux pour guider le chirurgien avant une intervention opératoire.

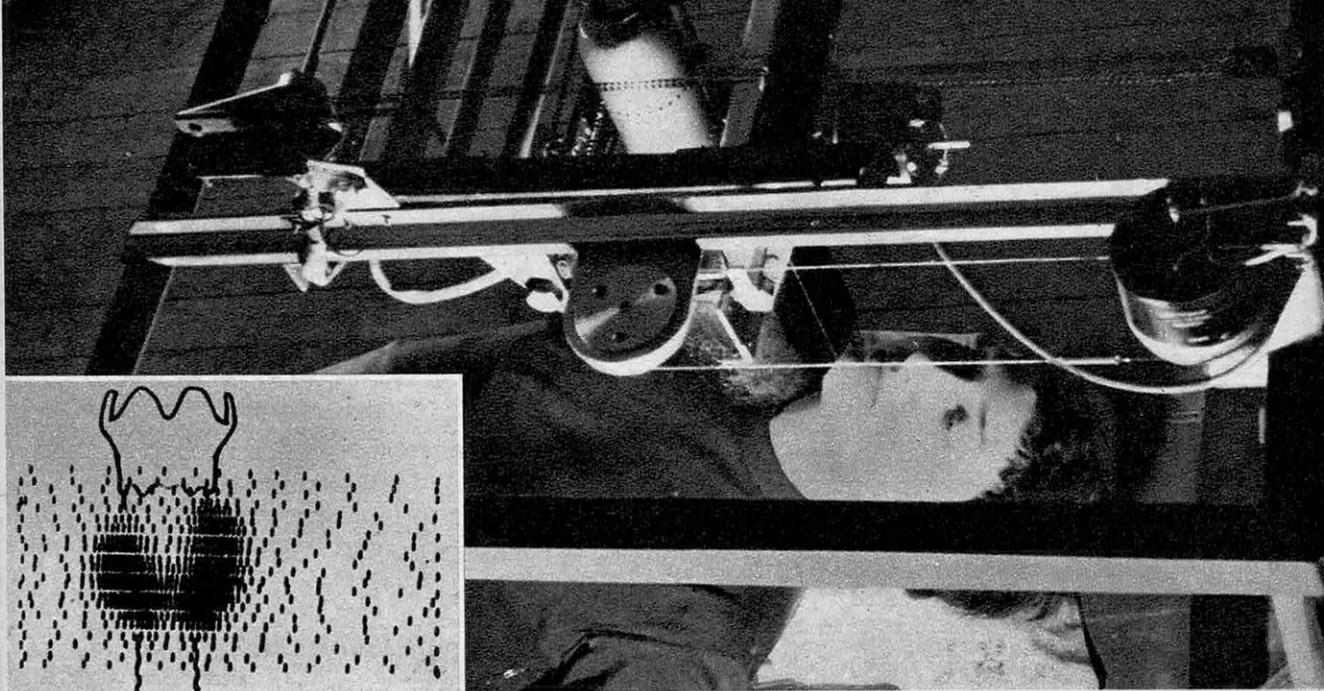
## Détection de tumeurs

S'il existait des radioéléments émetteurs de rayons  $\gamma$ , ou des molécules que l'on puisse « marquer » avec un émetteur  $\gamma$ , se fixant avec une très grande spécificité sur les tissus tumoraux, la détection externe des tumeurs serait assez aisée. Malheureusement, on n'en a

pas encore trouvé. Dans un certain nombre de cas, néanmoins, on peut, suivant ce principe, détecter les tissus tumoraux avec plus ou moins de précision.

On sait depuis longtemps, par exemple, que toutes les cellules jeunes, notamment celles des tissus cancéreux, sont avides de phosphore. On peut donc songer à utiliser le radiophosphore-32 dont deux inconvénients majeurs limitent malheureusement l'emploi. D'une part, il existe dans l'organisme des tissus jeunes où se forment en permanence les cellules sanguines (foie, rate, et surtout moelle osseuse) et qu'une ingestion tant soit peu importante de radiophosphore pourrait léser. D'autre part, le phosphore-32 est un émetteur  $\beta$  pur qui ne permet pratiquement pas de détection externe. Cependant il se fixe de façon relativement importante dans le tissu cérébral, surtout sur les tumeurs intracrâniennes dans lesquelles on peut le détecter, au cours de l'intervention chirurgicale, avec des compteurs de Geiger spéciaux en forme de trocarts que le chirurgien enfonce dans la matière cérébrale.

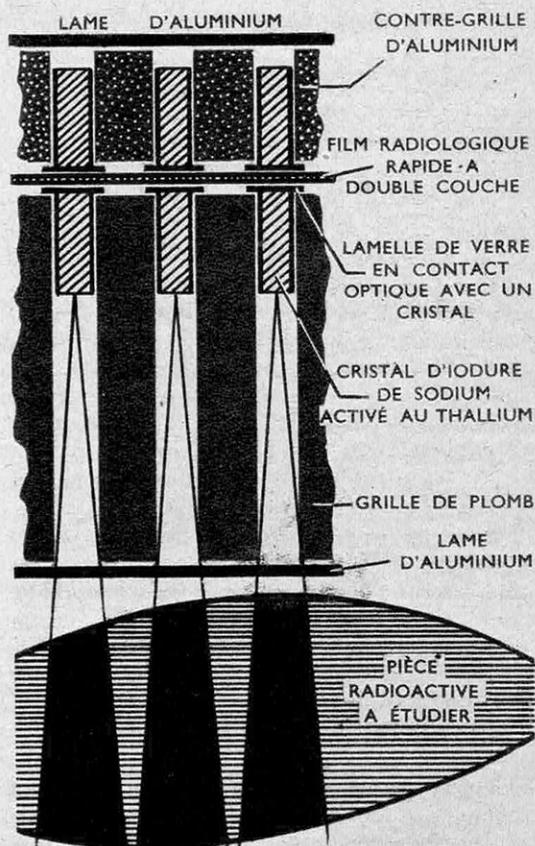
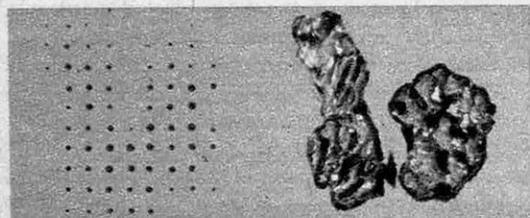
D'autre part, certains pigments comme la fluorescéine, injectés par voie intraveineuse, viennent imprégner le tissu cérébral tumoral en plus grande quantité que le tissu sain. L'albumine du sérum humain se comporte de la même façon. On peut « marquer » ces corps avec de l'iode-131 qui permet la détection externe. La spécificité de la concentration dans le tissu tumoral n'étant pas très élevée, les mesures manquent de précision, surtout quand il s'agit de localiser des tumeurs pro-

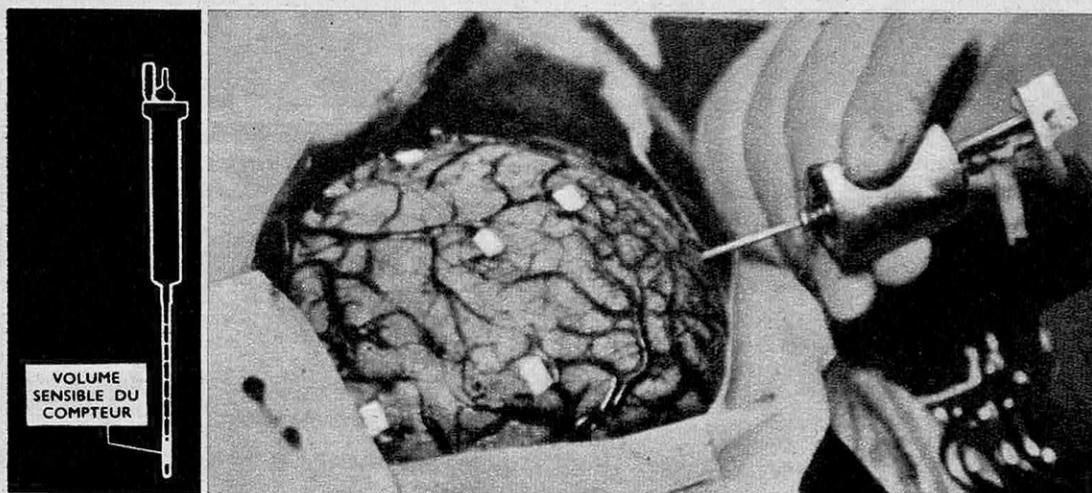


## Autogammagraphie d'une thyroïde

**D**ES dispositifs photographiques ont également été imaginés pour enregistrer les cartes thyroïdiennes. Par exemple, on utilise une grille de plomb, constituant un réseau régulier de canaux cylindriques. Chaque canal se comporte comme un petit collimateur isolant un pinceau de rayons issus d'un élément de volume de la glande. A l'extrémité de chaque canal, un cristal d'iodure de sodium activé au thallium transforme par fluorescence une partie des photons  $\gamma$  en un nombre beaucoup plus grand de photons appartenant au domaine du violet et du proche ultraviolet. Ces derniers impressionnent un film radiologique très sensible. Avec un temps de pose de l'ordre de 10 à 20 mn, on obtient, pour des activités ingérées tolérables, des images discontinues de la thyroïde. Ces méthodes peuvent être utilisées pour mettre en lumière la répartition de l'activité dans toute collection radioactive émettrice de rayons gamma au sein d'un organisme.

L'autogammagraphie ci-dessous, à gauche, a permis de prévoir la différence morphologique des deux lobes de thyroïde que montre la photographie ↓ jointe (en particulier étranglement du lobe droit).





## Phosphore-32 et chirurgie crânienne

**L**e phosphore-32, qui se fixe avec une spécificité élevée sur les tumeurs, est utilisé pour leur détection en cours d'intervention chirurgicale. On utilise pour cela des compteurs de Geiger spéciaux en forme de trocart, de 2 mm de diamètre environ, et dont seule l'extrémité est sensible au rayonnement bêta du phosphore. Il est souvent très difficile pour le chirurgien de distinguer à l'œil nu le tissu tumoral cérébral du tissu sain. En enfonçant le compteur-trocart dans la matière cérébrale, il est à même, suivant le niveau de l'activité enregistrée, de savoir

s'il est en tissu tumoral ou en tissu sain. La méthode est également très précieuse pour préciser, au cours de l'extraction, les limites de la tumeur. On obtient des mesures suffisamment précises en injectant par la voie intraveineuse des activités de radiophosphore de l'ordre de quelques centaines de microcuries. Cette dose est suffisamment faible pour ne pas faire courir grand risque de dommage aux organes élaborant les éléments du sang (foie, rate et surtout moelle osseuse), formés de tissus physiologiquement jeunes donc sensibles au radiophosphore.

### SUITE DE LA PAGE 124

fondes. On parvient cependant à dépister les tumeurs dans 65 % des cas, résultat inférieur à celui obtenu par ventriculographie (radiographie après injection d'air dans les ventricules cérébraux), mais équivalent à celui fourni par l'électroencéphalographie (étude des courants électriques cérébraux). L'avantage de la méthode est qu'elle ne fait subir au patient aucun traumatisme. Comme toujours en matière de diagnostic, on a avantage à combiner plusieurs méthodes et, dans ces conditions, étant donné son caractère inoffensif, l'encéphalométrie par radioisotopes peut rendre de grands services.

Signalons que l'iode lui-même se fixe davantage sur le tissu tumoral cérébral que sur le tissu sain, la simple ingestion d'iode de sodium radioactif permet de faire l'encéphalométrie, à condition de « bloquer » le fonctionnement de la thyroïde pour qu'elle ne devienne pas une source radioactive intense qui fausserait les mesures. Le résultat semble moins bon qu'avec les corps précédents.

Une autre méthode, enfin, est actuellement en cours de développement pour la recherche des tumeurs cérébrales. C'est la méthode dite

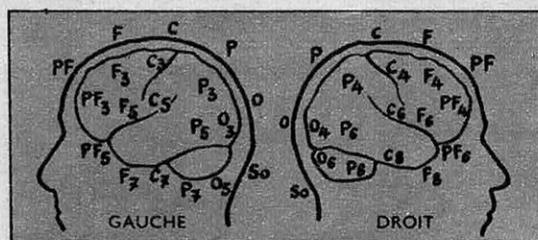
des « émetteurs de positons » qui permet une localisation très précise en utilisant en particulier l'arsenic-74.

Pour les tumeurs oculaires, la détection externe est possible dans certains cas avec le phosphore-32 et des compteurs convenables. Dans les tissus, le parcours maximum des électrons qu'il émet est de 8 mm environ et certaines tumeurs de l'hémisphère postérieur de l'œil sont à moins de 8 mm de la sclérotique. La comparaison de l'activité de la région douteuse et de la région symétrique de l'autre œil, après injection intraveineuse de phosphore-32, permet de savoir si on a affaire à une formation cancéreuse ou non et évite quelquefois de pratiquer une énucléation inutile.

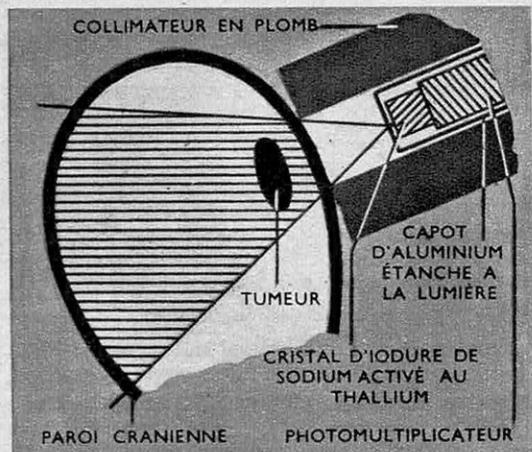
Une technique similaire peut être appliquée à la détection de certains cancers du sein situés à une distance de la peau inférieure à 8 mm.

Pour les tumeurs osseuses, on emploie le gallium-67 et le gallium-72 qui se fixent avec prédilection sur le tissu osseux et, étant émetteurs  $\gamma$ , sont détectables par voie externe. Une augmentation anormale d'activité peut faire suspecter une tumeur osseuse maligne.

# Détection des tumeurs à travers le crâne



**P** : zones pariétales      **PF** : zones préfrontales  
**O** : zones occipitales      **F** : zones frontales  
**SO** : zone sous-occipitale      **C** : zones centrales  
**Chiffres pairs** : côté droit  
**Chiffres impairs** : côté gauche



**O**n peut détecter extérieurement des tumeurs intracrâniennes à l'aide de fluorescéine ou de sérum-albumine marquées avec l'iode radioactif I-131 et injectées par voie intraveineuse. Si on dispose un compteur à scintillation, à grande sensibilité au rayonnement gamma et convenablement collimé, contre la paroi crânienne, de telle façon que la tumeur soit dans le champ du compteur, ce dernier embrasse non seulement le tissu tumoral mais également un volume de tissus sains, moins radioactif, mais beaucoup plus grand. Or la spécificité de la concentration au niveau du tissu tumoral, par rapport aux tissus sains, n'est pas extrêmement élevée et varie, suivant la nature du tissu tumoral, de 1 à 10 environ. Il en résulte que lorsqu'on déplace le compteur et que la région tumorale entre dans son champ, l'augmentation de l'activité enregistrée est relativement faible. On peut dire en quelque sorte que le « contraste » est médiocre. L'augmentation du nombre de coups est de 10 % à 50 % au maximum, dans le cas où la tumeur est le plus favorablement disposée par rapport au compteur. En pratique, on divise la surface crânienne en un certain nombre de régions symétriques et on fait un grand nombre de mesures successives sur chaque région. Quand la tumeur est située franchement dans l'un des hémisphères cérébraux, on obtient une dissymétrie dans les activités enregistrées au niveau des régions symétriques étudiées. Cette méthode ne permet que difficilement de localiser des tumeurs centrales profondes, situées à cheval sur les deux hémisphères. Elle exige un opérateur entraîné faisant des mesures systématiques et sachant interpréter les résultats.

## Le fonctionnement du foie

Les cellules du foie ont la propriété de fixer un pigment, le Rose Bengale, et de l'excréter dans les voies biliaires. Comme il contient des atomes d'iode, il est facile de le « marquer » avec de l'iode-131, détectable par voie externe. Après une injection de Rose Bengale marqué, l'enregistrement de l'activité au niveau du foie fournit des renseignements précieux sur le taux de la circulation hépatique, les fonctions fixatrices et excrétrices des cellules et la perméabilité des voies biliaires.

Cette méthode très élégante d'exploration fonctionnelle est absolument inoffensive et n'exige pas la moindre ponction. Elle peut être effectuée même chez des malades présentant un état d'ictère aigu.

## L'appareil circulatoire

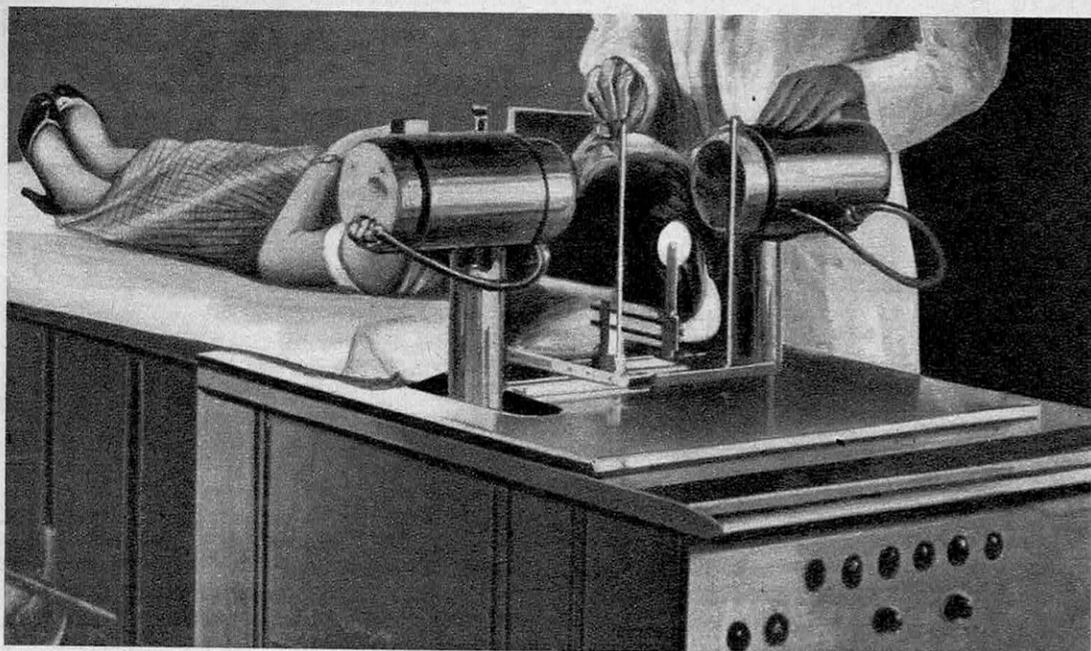
La plupart des études de dynamique circulatoire étaient faites auparavant à l'aide de colorants. Les radioisotopes présentent l'avantage d'être détectés avec une beaucoup plus grande précision et, dans le cas d'émetteurs  $\gamma$ , d'autoriser des examens par voie externe ; on

peut aussi les utiliser pour « marquer » les globules rouges.

Le « marquage » des globules rouges par un radioisotope convenable permet la mesure, par la méthode de dilution, du volume globulaire ; celui de la sérum-albumine donne par la même méthode le volume du plasma. Le volume globulaire, le volume plasmatique et leur somme, la masse sanguine, varient dans de nombreux états pathologiques et leur mesure précise peut être un appoint important pour le diagnostic.

La mesure de la vitesse de circulation entre deux points du système circulatoire s'effectue très simplement à l'aide de substances marquées (radiosodium-24 en solution saline, sérum-albumine marqué à l'iode-131, globules rouges marqués au chrome-51). On peut ainsi mettre en évidence des stases veineuses, des insuffisances cardiaques, des artérites. Les mêmes substances servent à la mesure du débit cardiaque et à l'étude de l'irrigation sanguine des extrémités et de divers organes. On a l'espoir, dans un proche avenir, de pouvoir étudier ainsi l'irrigation cérébrale, l'irrigation sanguine des poumons (par inhalation de gaz radioactif ou injection de substances mar-

SUITE PAGE 129

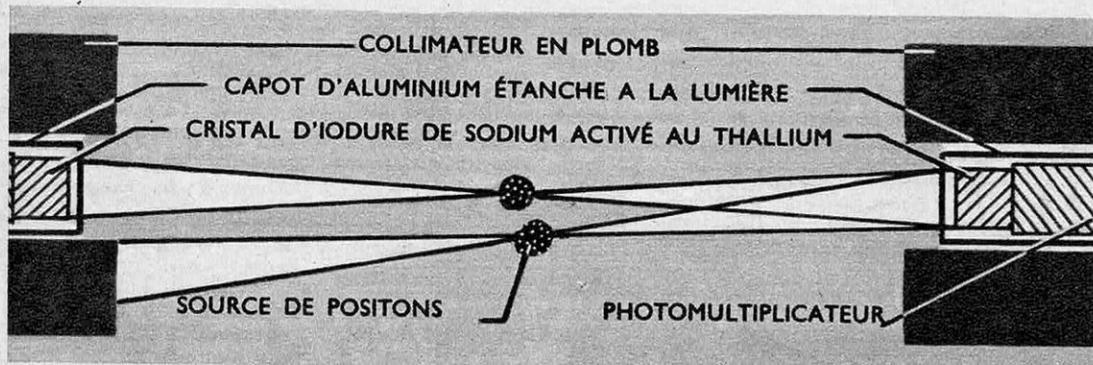


## Tumeurs décelées par les positons

**C**ERTAINS radioéléments émettent au cours de leur désintégration des électrons positifs ou positons. Ces corpuscules, identiques aux électrons ordinaires mais de charge électrique opposée, ont une vie éphémère. Ils s'unissent très rapidement avec des électrons négatifs libres, tels qu'il s'en trouve dans toute matière, et cette union est suivie d'une « dématérialisation » de la masse des deux corpuscules réunis, c'est-à-dire d'une transformation de leur masse en énergie rayonnante. Cette émission d'énergie rayonnante se fait sous la forme de deux photons d'énergie voisine, mais dont les trajectoires sont opposées à 180°. Donc, tout matériau renfermant un émetteur de positons se comporte comme une source de photons émis simultanément par paires suivant des trajectoires opposées. Si, maintenant, on utilise (photo ci-dessus) deux compteurs

à scintillation de même axe, montés en « coïncidence », c'est-à-dire que les circuits électroniques associés aux deux compteurs ne fournissent une impulsion que quand les deux compteurs sont « déclenchés » simultanément, on voit que des impulsions ne seront obtenues que quand la source d'émetteur de positons se trouve au voisinage du milieu de l'axe des deux compteurs. Il y a là une méthode de localisation extrêmement fine, qui est en cours d'étude pour la détection des tumeurs cérébrales. Comme émetteur de positons, on utilise principalement l'arsenic-74 dont on observe les concentrations anormales, qui sont alors des indices de tumeur crânienne. Il est probable que cette méthode ingénieuse, qui permet une bonne « focalisation » du dispositif détecteur, pourra également servir pour de nombreux autres types d'investigations.

Les deux compteurs à scintillation se font face. Le montage électronique est tel qu'on n'obtient d'impulsion que lorsqu'ils reçoivent des photons au même instant. Ceux-ci étant émis par paires dans des directions opposées, la source doit se trouver sur l'axe pour être détectée, comme on le voit sur ce schéma de principe.



quées), l'irrigation du foie, de la rate, de la moelle osseuse, etc. Les globules rouges marqués au phosphore-32 ont déjà été utilisés pour l'étude de la perméabilité placentaire.

Le fer radioactif permet de juger du taux de production des globules par l'organisme et de mesurer la durée de vie des globules, normalement de 120 jours environ, mais qui peut être notablement modifiée dans certaines maladies. Avec le sodium-24, on mesure, par dilution, le volume des liquides extracellulaires qui subit des perturbations caractéristiques dans certaines maladies, notamment les troubles du métabolisme de l'eau.

### La radiographie par les radioisotopes

Certains radioéléments artificiels comme le thulium-170 (période 127 jours) et le xénon-123 (période 54 jours) émettent un rayonnement  $\gamma$  dont l'énergie est voisine de 80 kilovolts, c'est-à-dire du voltage utilisé pour la radiographie par rayons X. Il a été possible de préparer ces éléments avec une activité suffisamment élevée pour prendre des radiographies. Les temps de pose, quoique beaucoup plus longs qu'avec les tubes à rayons X, sont encore acceptables. L'intérêt de telles sources est qu'elles n'exigent aucune installation électrique complexe et surtout qu'étant de très

faible encombrement, elles peuvent être introduites dans les cavités naturelles de l'organisme, permettant des radiographies sous des incidences souvent très instructives pour un diagnostic.

### La thérapeutique

Quand on soumet des tissus vivants au rayonnement de corps radioactifs, l'énergie qu'ils absorbent, si elle est suffisante, déclenche une série de processus encore mal connus, qui aboutissent à la mort des cellules et à la destruction des tissus et, avec des doses plus faibles, à une diminution de leur activité fonctionnelle. On obtiendra donc un effet thérapeutique intéressant chaque fois qu'il s'agira de détruire un tissu (tumeur cancéreuse, par exemple) ou de ralentir l'activité d'un tissu pathologiquement hyperfonctionnel (hyperactivité de la glande thyroïde, par exemple).

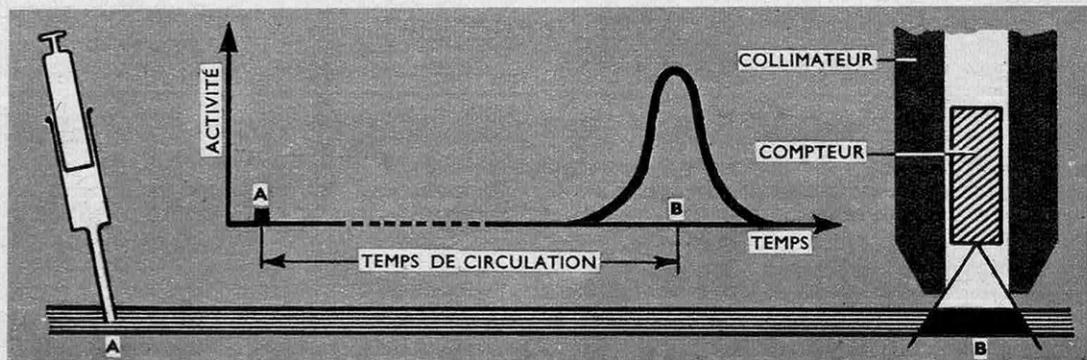
Il existe deux modes d'applications thérapeutiques des radioéléments. Dans l'un, la source radioactive est à l'extérieur de l'organisme, et alors le rayonnement  $\gamma$  compte pratiquement seul : c'est la curiethérapie externe. Dans l'autre, par divers procédés, le radioélément est mis en contact intime avec le tissu sur lequel on veut agir, et l'énergie

SUITE PAGE 131

## Mesure du temps de circulation du sang

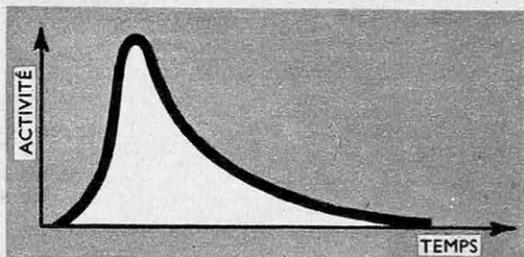
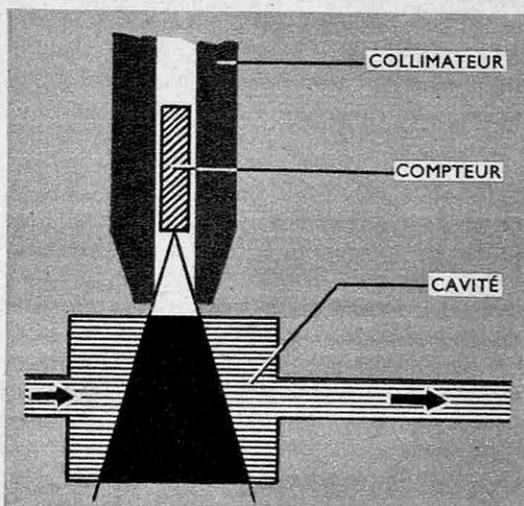
La mesure du temps de circulation du sang dans les vaisseaux s'effectue très simplement en injectant rapidement (des dispositifs spéciaux d'injection rapide ont été réalisés) une substance marquée, émettrice de rayons gamma, en un des points du système circulatoire. On dispose ensuite, sur la peau, en un autre point, un compteur relié à un intégrateur associé à un galvanomètre enregistreur. Le temps qui s'écoule entre l'injection au premier point et l'apparition de l'activité au second permet d'apprécier la vitesse de la circulation entre les deux points. Les substances marquées les plus employées sont le sodium-24 radioactif (période 14,8 h) en solution

saline et la sérum-albumine marquée à l'iode-131. Les globules rouges marqués au chrome-51 peuvent être également utilisés. On mesure ainsi avec une grande précision la vitesse veine saphène-cœur, réduite en cas de stase veineuse ; la vitesse cœur-artère fémorale, réduite en cas d'insuffisance cardiaque gauche ou globale ; la vitesse artère fémorale-artère pédieuse, réduite dans les artérites ; la vitesse rate-foie, réduite dans l'hypertension portale. Dans certains cas, on a avantage à faire une injection intraveineuse ordinaire à la veine du pli du coude et à utiliser deux compteurs situés aux deux points entre lesquels on veut prendre la mesure.



# Mesure du débit cardiaque

**Le principe de la mesure d'un débit à travers une cavité, à l'aide de produits radioactifs, est le suivant :** on injecte dans le courant, en amont de la cavité, une substance radioactive et on mesure l'activité qui se manifeste dans la cavité à partir de ce moment. La substance se répand progressivement à mesure qu'elle pénètre dans la cavité ; en même temps elle est peu à peu entraînée hors d'elle. Sa concentration y varie en fonction du temps. Elle commencera par croître, passera par un maximum, puis décroîtra pour devenir nulle lorsque la totalité de la substance injectée aura traversé la cavité. L'activité enregistrée par un compteur traduira ces variations sous la forme d'une courbe comme celle qui est tracée ci-contre. Un raisonnement extrêmement simple montre que la quantité de substance injectée peut se calculer en faisant le produit du débit et de la surface limitée par cette courbe, à un facteur de proportionnalité près, facile à déterminer expérimentalement. Inversement, si l'on injecte une quantité connue de produit radioactif et si l'on mesure la surface de la courbe enregistrée, on obtient facilement le débit que l'on désire connaître. On utilise en pratique une substance marquée dont on a mesuré au préalable l'activité ; l'élément doit être un émetteur de rayons gamma car les particules bêta, beaucoup moins pénétrantes, seraient absorbées dans le liquide même de la cavité.

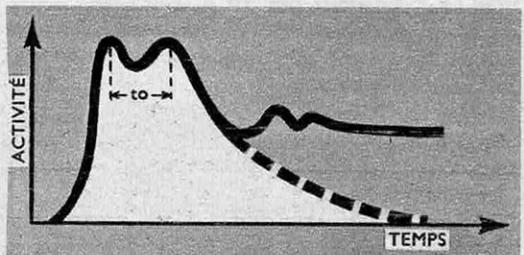
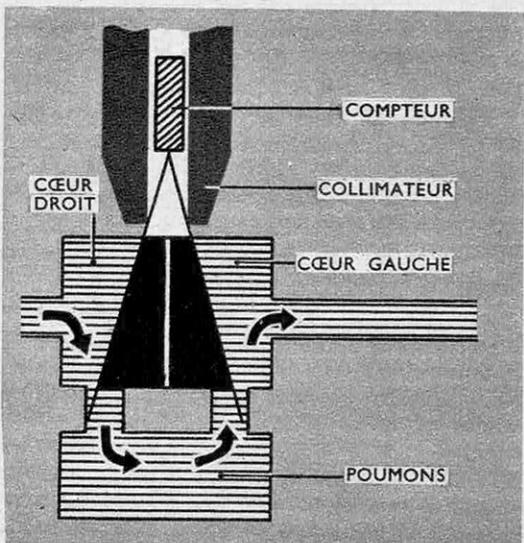


**Pour l'étude du cœur, les meilleures conditions sont obtenues en disposant le compteur en regard de la poitrine du sujet, à la hauteur des ventricules et à cheval sur eux, comme on l'a représenté schématiquement.** La courbe obtenue par enregistrement de la radioactivité présente deux maximum, cela pour des raisons évidentes. On enregistre même un troisième et un quatrième maximum plus faibles, représentant le phénomène de recirculation, dû au fait qu'après une révolution circulatoire, la substance radioactive n'est pas encore uniformément répartie dans le sang. D'autre part, l'activité ne retombe pas à zéro, puisque le système circulatoire est un système fermé. Quoiqu'il en soit, il est facile de prolonger jusqu'au zéro la partie descendante de la courbe, ainsi qu'on l'a fait sur la figure, pour limiter l'aire qui servira au calcul du débit, compte tenu de l'activité du produit injecté.

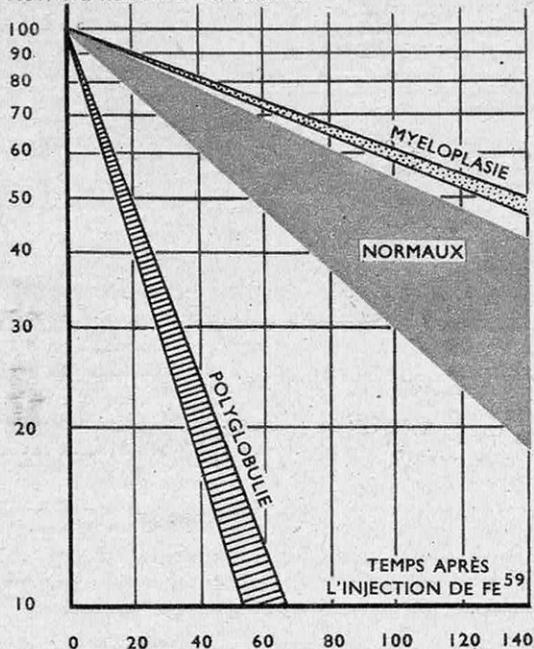
Les substances marquées utilisées peuvent être le chlorure de sodium-24 ou, de préférence, la sérumalbumine marquée à l'iode radioactif et les globules rouges marqués au chrome-51.

Il est inutile d'insister sur l'importance diagnostique que présente la mesure du débit cardiaque dans de nombreux états pathologiques. On se rendra compte de l'intérêt de la méthode en apprenant que la précision obtenue est voisine de celle de la seule méthode sûre jusqu'ici connue et qui exige la mise en place d'une sonde dans la cavité du cœur.

Notons que, pour des raisons évidentes, l'intervalle de temps qui sépare les deux maximum de la courbe représente le temps de circulation pulmonaire ( $t_0$ ).



## ACTIVITÉ RELATIVE DU PLASMA

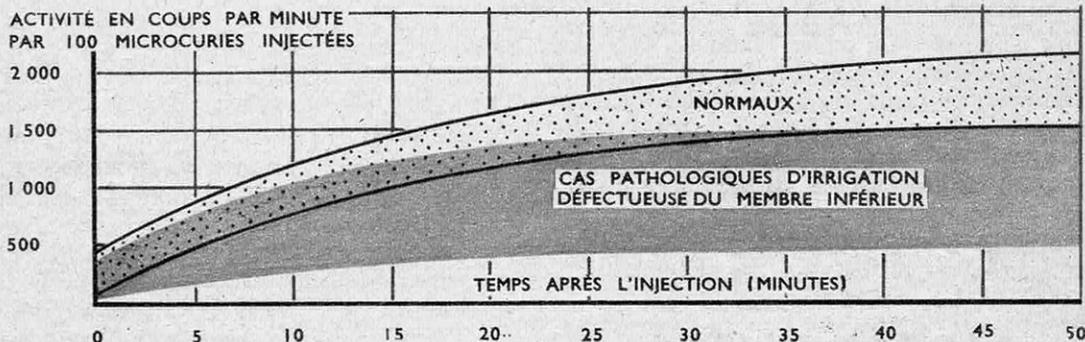


## ← PRODUCTION DES GLOBULES ROUGES

Si on injecte du fer radioactif dans le plasma sanguin, ce fer disparaîtra du plasma d'autant plus vite que la production des globules rouges sera plus rapide. Le taux de disparition du fer sera d'autre part proportionnel à la chute de l'activité du sang en fonction du temps. Les courbes montrent, par rapport à la normale, le taux de disparition du fer, accru dans la polyglobulie, hyperproduction de globules rouges, ou diminué dans l'hypoplasie de la moelle.

## IRRIGATION SANGUINE DES EXTRÉMITÉS

Pour évaluer l'irrigation sanguine de l'extrémité d'un membre, on injecte un radioisotope, émetteur de rayons gamma, dans la veine du pli du coude et on dispose un compteur à l'extrémité du membre (à la plante du pied, par exemple); on déduit le taux d'irrigation de la variation de l'activité en fonction du temps. Les radioisotopes employés pour cette étude sont le sodium-24, en solution saline, ou mieux la sérum-albumine marquée à l'iode-131.



## SUITE DE LA PAGE 129

délivrée au tissu, la « dose », est alors, dans la majorité des cas, essentiellement fournie par le rayonnement  $\beta$  (sauf dans le cas où le radioélément est contenu dans une enveloppe absorbant le rayonnement  $\beta$ ): c'est la curi-thérapie interne.

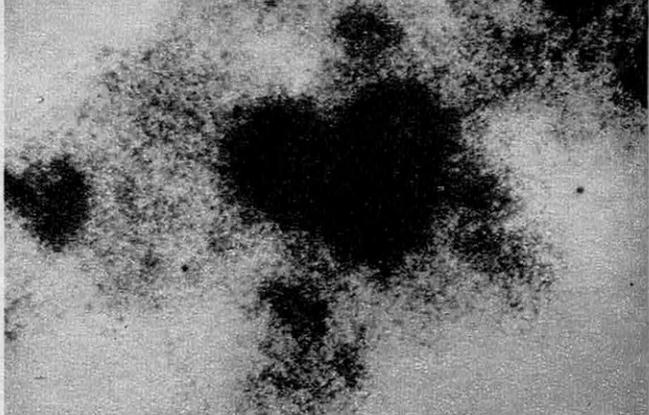
La possibilité d'obtenir des radioisotopes de la quasi-totalité des éléments chimiques connus a fait naître de grands espoirs pour la radiothérapie du cancer. On pouvait envisager, en effet, la réalisation de substances à fixation élective sur le tissu cancéreux et dans la composition desquelles on aurait pu faire entrer un radioisotope convenable. Une telle substance, injectée dans l'organisme, aurait déterminé par son rayonnement  $\beta$  une irradiation locale du tissu cancéreux. Il y avait là, enfin, une solution au problème du traitement des « métastases », ces colonies cancéreuses de la tumeur mère, de détection difficile, évoluant à l'insu du médecin, et dont la mul-

tiplicité même peut rendre impossible toute autre forme de traitement. Malheureusement, on n'a pas encore pu trouver de telles substances et le problème reste pratiquement entier. Il n'existe que deux cas de fixation spécifique: celui de l'iode pour le tissu thyroïdien et, à un moindre degré, celui du phosphore pour le tissu réticulo-endothélial engendrant les globules rouges (foie, rate, et surtout moelle osseuse).

## L'hyperthyroïdie

Pour le traitement de l'hyperthyroïdie, l'iode-131 est fourni au patient, soit par voie buccale, soit par voie intraveineuse.

On réduit ainsi l'activité du tissu thyroïdien et on la ramène à la normale. Les activités nécessaires sont de l'ordre de quelques millicuries et les résultats excellents, équivalents, quoique plus longs à obtenir, à ceux de l'intervention chirurgicale. La méthode est parti-



**Autohistoradiographie** d'une coupe histologique prélevée sur la thyroïde d'un malade atteint de maladie de Basedow (à droite) et microphotographie correspondante (à gauche). L'iode radioactif est

concentré au niveau des vésicules thyroïdiennes. On peut voir que la grosse vésicule centrale, dont la cavité est pleine de « substance colloïde », se superpose bien à son image autohistoradiographique.

culièrement précieuse dans les cas de complications cardiaques graves, conséquences de la maladie, et où l'intervention chirurgicale présente des risques importants. D'autre part, le traitement a l'avantage de permettre au patient de ne pas cesser ses activités.

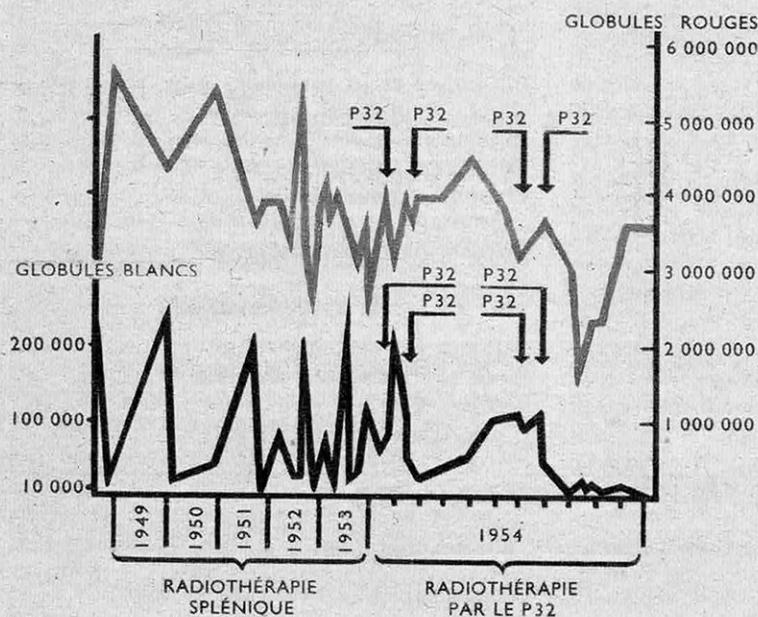
Le cancer de la thyroïde se présente sous un jour beaucoup moins favorable, car dans la très grande majorité des cas, les métastases, formées de tissus thyroïdiens embryonnaires non fonctionnels, ne fixent pas l'iode et ne peuvent donc être détruites. Dans certains cas, en commençant par détruire le tissu sain, on arrive à rendre les métastases fonctionnelles et par conséquent sensibles au traitement.

### Les maladies du sang

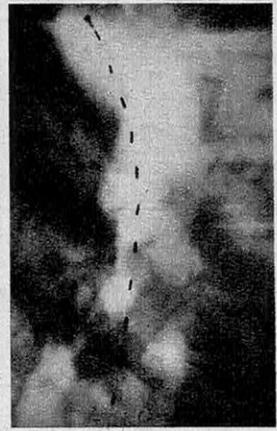
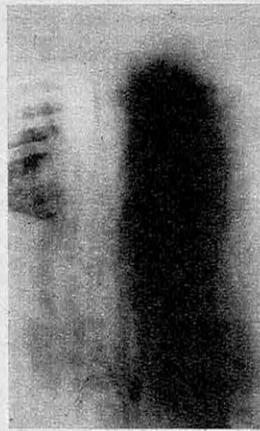
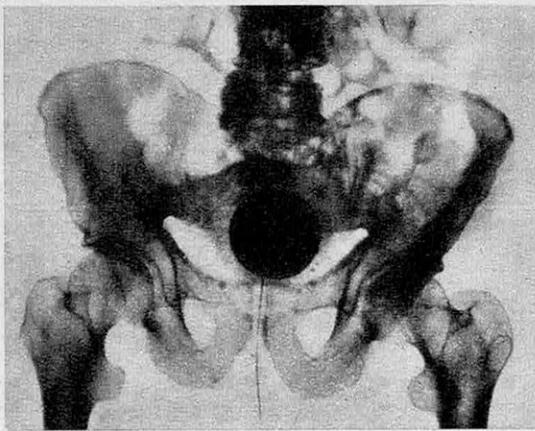
Certaines maladies sont caractérisées par une hyperactivité des organes sangui-forma-

teurs (foie, rate et surtout moelle osseuse) et se traduisent par une augmentation importante, par rapport à la normale, du taux des globules rouges et des globules blancs dans le sang. Le phosphore se fixant, avec une relativement grande spécificité, sur les tissus sangui-formateurs, on peut l'employer pour délivrer à ces derniers une dose suffisante pour ramener leur activité à la normale. Le phosphore peut être donné au patient par voie buccale ou intraveineuse.

La polyglobulie est une maladie caractérisée par une augmentation du nombre des globules rouges (10 à 12 millions par millimètre cube par exemple, au lieu de 5 millions pour la normale), entraînant une augmentation de la viscosité du sang suivie de désordres divers. Le phosphore-32 est actuellement considéré comme le meilleur agent thérapeutique contre



**Action thérapeutique du phosphore-32 dans un cas de leucémie myéloïde.** Il s'agit d'un malade atteint de leucémie myéloïde, traité pendant 4 ans par irradiation de la rate aux rayons X (radiothérapie splénique). Le malade étant devenu radiorésistant aux rayons X, la poursuite du traitement a été tentée par le phosphore-32. On voit que ce dernier a permis de ramener le nombre de globules blancs à une valeur proche de la normale.



**Trois exemples de thérapie intracavitaire.** A gauche : traitement d'une tumeur de la vessie. On fait pénétrer par l'urètre un ballon en plastique dans la vessie et on l'empli d'une solution d'un radioisotope. On irradie ainsi les parois de la vessie. La méthode permet d'obtenir des effets palliatifs importants, surtout en ce qui concerne les hémorragies vésicales dont les conséquences sont très graves. Les isotopes les plus employés pour cette technique sont le cobalt-60, le sodium-24 et le brome-82 (d'après Müller). Au centre : traitement d'un épanchement pleural. Le liquide ponctionné

a été remplacé par une solution colloïdale d'or radioactif dont les radiations, directement à la surface de la plèvre, vont entraîner l'assèchement de la sécrétion. On voit ici l'autoradiographie due au rayonnement gamma de l'or radioactif, superposée à la radiographie du thorax (d'après Müller). A droite : traitement d'un carcinome de l'œsophage. Dans le conduit œsophagien, directement en regard de la tumeur, on a suspendu un mince tube de nylon contenant des grains d'or-198 radioactif qui apparaissent en chapelet sur cette radiographie (d'après Henschke). On aurait pu employer le cobalt-60.

la polyglobulie. Les activités nécessaires sont de l'ordre de quelques millicuries.

Les leucémies sont caractérisées par une augmentation considérable du nombre des globules blancs (jusqu'à 100 000 ou 200 000 par millimètre-cube au lieu de 8 000 pour la normale). Ce sont des maladies extrêmement graves. Le phosphore-32 permet de ramener les globules blancs à un taux raisonnable. Il est donné à la dose de 1 à 2 millicuries tous les trois ou quatre jours jusqu'à ce que le taux des globules blancs ait suffisamment baissé. Son effet thérapeutique se vérifie, en général, à chacune des premières rechutes, jusqu'à ce que le malade devienne « radiorésistant ». Son effet ne se fait sentir que dans les formes chroniques de la maladie. Les résultats sont équivalents à ceux obtenus par l'irradiation externe de la rate par les rayons X. Les avantages du radiophosphore sont les suivants : d'une part, le traitement est très simple et n'exige que l'ingestion d'une solution de phosphate radioactif. D'autre part, le phosphore-32 étant émetteur  $\beta$  pur, l'irradiation est strictement localisée aux tissus malades sur lesquels il se fixe. Les tissus sains ne recevant pas de radiation, le patient n'a pas à craindre le « mal des rayons » dû à l'absorption de doses excessives de radiations par des régions saines de l'organisme.

En dehors des deux exceptions que nous venons de traiter, l'impuissance où l'on est,

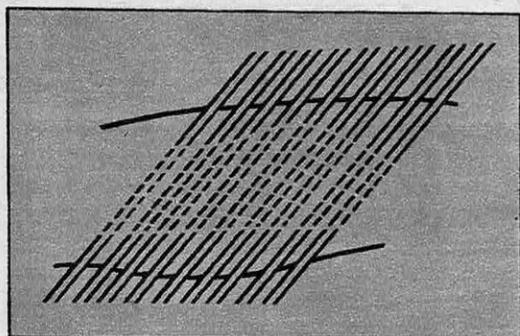
à trouver des substances se fixant électivement sur les tissus malades, amène à chercher à déposer ces substances en leur sein par des voies plus ou moins chirurgicales. Déjà, avant l'apparition des radioisotopes artificiels, on traitait certaines tumeurs en enfonçant des « aiguilles » renfermant des sels de radium dans la masse même des tissus à irradier. Les radioisotopes ont permis de faire faire à cette technique des progrès importants.

### Les radioisotopes au contact du mal

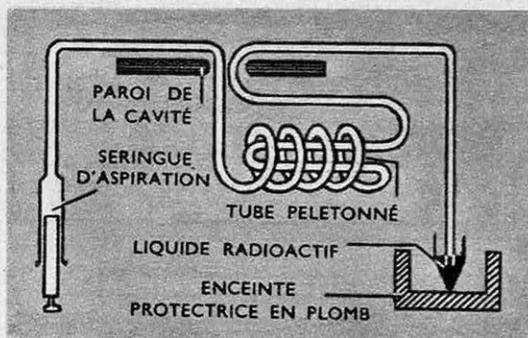
Le radium a une période très longue (1500 ans), ce qui fait qu'une fois la dose utile délivrée, il faut enlever le radium des tissus. Au contraire, nombre de radioisotopes artificiels ont une période suffisamment courte pour que la dose soit délivrée, en un temps assez court, par la désintégration totale du produit. Il n'est donc plus nécessaire de le retirer.

Les parois des aiguilles de radium, d'autre part, absorbent les particules  $\beta$  ; la dose est donc délivrée par les rayons  $\gamma$  et, par suite, imparfaitement localisée. Au contraire, certains radioisotopes peuvent être mis sous une forme physique telle (infiltration du tissu par une solution colloïdale, par exemple), que la dose est essentiellement fournie par le rayonnement  $\beta$  et, par suite, bien localisée.

Certains radioisotopes enfin, le cobalt-60



**Deux exemples de radiothérapie par implants :** A gauche, on a utilisé un fin tube de nylon préalablement rempli de substance radioactive et que l'on a passé à travers le tissu à irradier avec une aiguille, comme du fil dans une étoffe. On obtient une meil-



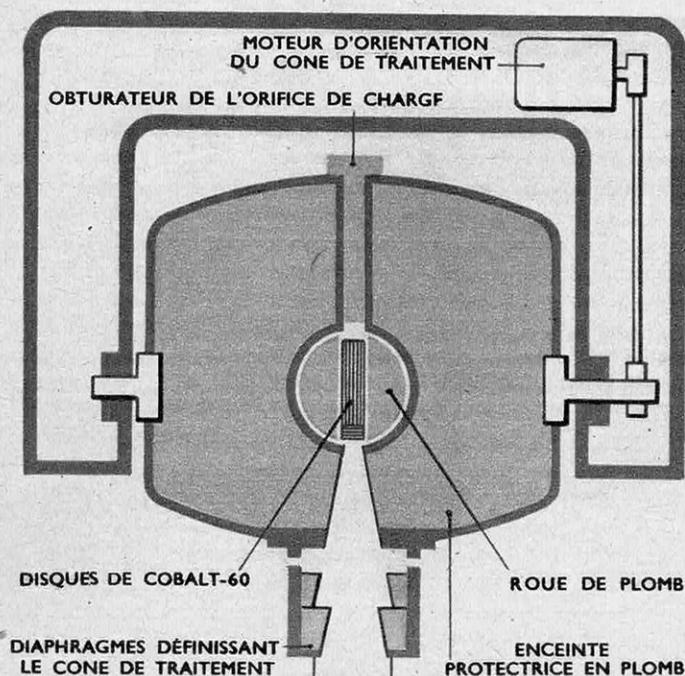
leur répartition de la dose que lorsque l'on plante simplement dans les tissus à irradier des aiguilles de radium ou de radon. A droite, le tube de nylon a été pelotonné dans une cavité naturelle et on le remplit par aspiration d'une solution d'un radioisotope.

notamment (période 5,3 ans) ont un rayonnement voisin de celui du radium et peuvent rendre les mêmes services, tout en étant infiniment moins chers, ce qui permet de multiplier le nombre de malades traités.

Plusieurs techniques peuvent être mises en œuvre. La thérapie intracavitaire consiste à faire pénétrer, par différents dispositifs, le radioisotope dans une cavité naturelle, pour irradier une tumeur des parois de la cavité elle-même ou dans son voisinage.

Dans les tumeurs de la vessie, par exemple, on fait pénétrer un ballon en plastique dans la vessie et on le remplit d'une solution d'un radioisotope. Les isotopes les plus employés pour cette technique sont le cobalt-60, le sodium-24 et le brome-82.

Certaines tumeurs se traduisent par la production de liquide dans les séreuses, plèvre ou péritoine, d'où des phénomènes de compression très douloureux pour le patient, et qui nécessitent des ponctions souvent répétées. On a pu obtenir des effets palliatifs en remplaçant le liquide ponctionné par une solution colloïdale d'une substance marquée par un radioisotope. Les particules colloïdales sont absorbées par les macrophages, cellules phagocytes fixes de grandes dimensions, et se trouvent ainsi déposées à la surface de la séreuse. L'action de leurs radiations entraîne un assèchement de la sécrétion liquidienne. Les ponctions sont donc moins fréquemment nécessaires. Mais une partie des particules est résorbée et passe dans la circulation sanguine



## Un schéma de la bombe au cobalt

**ETANT** donné les énormes activités en jeu, le cobalt, sous forme de disques empilés, est enfermé dans une enceinte en plomb épaisse et volumineuse qui a valu à cet appareil son nom de « bombe ». Un collimateur associé à des diaphragmes permet de limiter le faisceau. Des dispositifs de télécommande donnent la possibilité de mouvoir la bombe et d'orienter le faisceau dans toutes les directions désirables pour le traitement. Enfin, des obturateurs épais, en matériau absorbant lourd, occultent le faisceau après usage pour éviter les irradiations accidentelles du personnel.

pour se fixer sur le tissu réticulo-endothélial. L'action sur ce tissu représente un des dangers de cette thérapeutique. Les substances les plus utilisées sont l'or colloïdal radioactif et le phosphate de chrome en solution colloïdale marqué au phosphore-32.

Dans certaines tumeurs de l'œsophage, il est possible de suspendre en regard de la tumeur des « perles » de cobalt-60 ou des grains d'or-198.

Puisqu'il n'est plus nécessaire de retirer le radioélément après l'avoir mis en contact intime avec les tissus, il est possible de l'administrer sous une forme très diffuse, permettant une irradiation homogène du tissu attaqué.

### Infiltrations de radioéléments

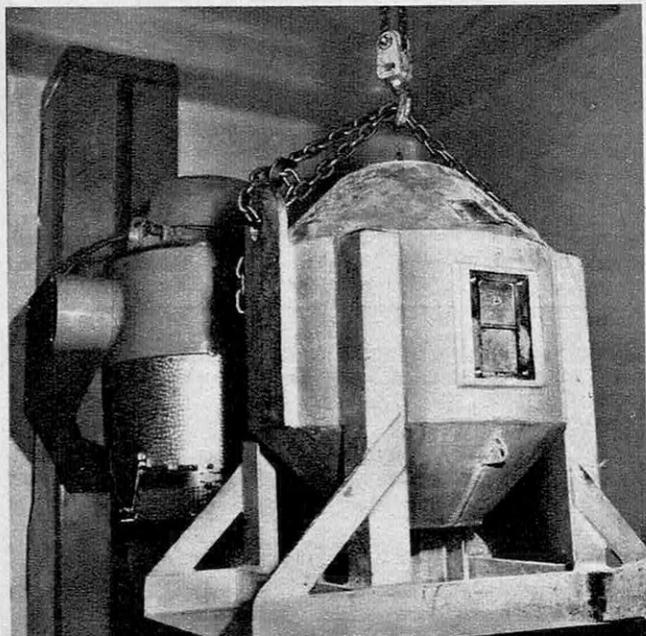
Lorsque le radioisotope est infiltré sous forme de solution colloïdale, il entre en contact intime avec les tissus et la dose, délivrée sous forme de radiations  $\beta$ , est bien localisée. Si la dimension des granules colloïdaux est convenable, ils restent situés en leur point d'injection, tout au moins en partie. L'autre est « phagocytée » par les cellules du système réticuloendothélial et transportée, le long des voies lymphatiques, dans les ganglions qui se trouvent donc recevoir une dose locale d'irradiation. Or, on sait que c'est par les voies lymphatiques que les cellules cancéreuses se propagent pour donner à distance des métastases de la tumeur primaire, complication redoutable et pratiquement sans appel. L'irradiation locale des voies lymphatiques par ce mécanisme semble pouvoir agir préventive-

ment contre la formation des métastases.

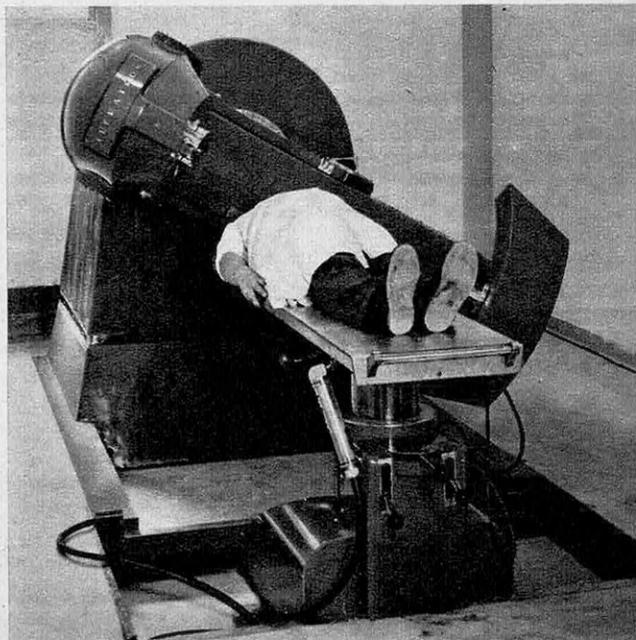
Les substances colloïdales employées sont essentiellement l'or radioactif colloïdal et le radiophosphate de chrome colloïdal. Ce dernier semble avoir l'avantage de permettre une répartition plus uniforme, et surtout d'être un émetteur  $\beta$  pur, ce qui donne une dose mieux localisée. Avec l'or, une partie relativement faible de la dose est délivrée sous forme de rayons  $\gamma$ , entraînant une irradiation des tissus sains dans le voisinage de la tumeur et souvent une réaction de ceux-ci. On a utilisé le phosphate de chrome colloïdal incorporé à des plaques de gélatine que l'on peut découper de façon à convenir à la forme de la partie malade. La gélatine fond à la température de l'organisme et les granules colloïdaux restent incorporés aux tissus. Les activités administrées sont, pour l'or, de l'ordre de 1 millicurie par  $\text{cm}^3$  de solution. Le phosphore ayant un rayonnement  $\beta$  plus dur et une période plus longue, la dose thérapeutique est obtenue avec des activités moindres, 150 microcuries par  $\text{cm}^3$  environ. On traite ainsi des lymphomes malins, le cancer de la prostate, le cancer du poumon par instillation dans les bronches ou injection dans l'artère pulmonaire, les tumeurs de la vessie, du sein, etc. La meilleure utilisation de cette technique consiste à l'associer avec la chirurgie. On fait une exérèse chirurgicale, la plus large possible, et on infiltre toute la région autour de l'exérèse pour nettoyer ce qui peut avoir échappé à l'acte chirurgical et diminuer les chances de propagation par les voies lymphatiques.

**Le cobalt destiné à la bombe est transporté dans un lourd container en plomb ; le transbordement de la charge radioactive exige de strictes précautions.**

Compagnie Générale de Radiologie.



**Le Théatron, source de radiations de cobalt, permet de laisser le malade immobile en position allongée. C'est l'appareil qui se déplace au-dessus.**



Pour les implantations, au lieu d'aiguilles de radium ou de radon dans les tissus, on a pu, depuis l'apparition des radioisotopes, utiliser des tubes de polythène ou de nylon que l'on passe et repasse à travers le tissu à irradier avec une aiguille, comme du fil dans une étoffe. Ils sont préalablement remplis de petits grains métalliques d'or-198 ou, mieux, d'iridium-92, ou encore d'une solution d'un radioisotope (iode-231 par exemple). On peut les pelotonner dans une cavité naturelle. La dose est ainsi beaucoup mieux répartie.

Il est aussi possible d'utiliser des grains d'or radioactif, soit en les projetant, à travers la peau, à une profondeur plus ou moins grande, que l'on peut régler, au moyen de pistolets spéciaux, soit en les déposant localement par voie chirurgicale. On a traité par cette méthode des tumeurs cérébrales profondes inopérables. Les grains d'or ainsi implantés doivent être laissés à demeure, ce qui est sans inconvénient, la période de l'or étant courte.

Signalons enfin que les aiguilles de radium peuvent être avantageusement remplacées, au point de vue prix de revient, par des aiguilles de radiocobalt-60.

### Curiethérapie de contact

Elle concerne les lésions superficielles et c'est le rayonnement  $\beta$  qui agit. Deux radioisotopes sont essentiellement employés.

Avec le phosphore-32, émetteur  $\beta$  pur, une technique simple consiste à utiliser du papier buvard imprégné et appliqué sur la région à irradier. On peut également utiliser des applicateurs, de formes et de dimensions variables. Les épithéliomas cutanés, les angiomes capillaires, les eczémas cutanés sont justiciables de cette thérapeutique.

Le strontium-90 est également un émetteur  $\beta$  pur. La faible pénétration de son rayonnement limite son utilisation aux lésions les plus superficielles. Par contre, sa longue période de 25 ans permet de le monter à demeure sur des applicateurs convenables. Il est utilisé avec un grand succès en ophtalmologie, notamment pour le traitement de l'épithélioma cornéen.

### Télécuriethérapie

La curiethérapie à distance consiste à utiliser le rayonnement de certains radioisotopes de la même manière qu'en radiothérapie le rayonnement d'un tube à rayons X. Le seul radioisotope employé actuellement dans ce but est le cobalt-60 (le césium-137 est actuellement à l'étude).

Le cobalt-60 émet deux radiations  $\gamma$  de 1,16 et 1,32 MeV respectivement. A ces hautes

énergies, la dose maximum n'est pas délivrée à la peau, mais en profondeur, et les doses délivrées aux tissus osseux sont sensiblement égales à celles délivrées aux parties molles, alors que, avec un tube à rayon X conventionnel de 200 kV, elles sont trois fois supérieures.

Il en résulte que le rayonnement du cobalt permet d'irradier des tumeurs profondes en ne délivrant à la peau et aux tissus sains que des doses beaucoup plus faibles que sous 200 kilovolts. Le danger d'accidents cutanés, de radionécrose et de mal des rayons est fortement diminué.

Le développement des piles atomiques à haut flux de neutrons permet de produire du radiocobalt à l'activité spécifique élevée de 60 curies par gramme avec des temps d'irradiation raisonnables. Ceci a rendu possible la réalisation de sources de 1 000 curies de cobalt-60. La période étant de 5,3 ans, la source est utilisable pendant un laps de temps relativement long. Il suffit d'appliquer un coefficient d'augmentation des temps d'irradiation de 1,5 % par mois, pour tenir compte de la désintégration radioactive.

Quand la source est tombée à un niveau trop bas, elle peut être réactivée à la pile.

Enfin, le radiocobalt présente sur les appareils producteurs de rayons X l'avantage d'être affranchi des servitudes de tout appareillage électrique complexe.

La bombe au cobalt est principalement utilisée pour le traitement des tumeurs profondes : bronchopulmonaires, médiastinales, génitales, digestives, etc.

### Les progrès futurs

Nous donnerons à cet exposé les conclusions brèves suivantes :

L'utilisation des radioisotopes a permis déjà de gros progrès dans nos moyens d'investigation diagnostique. Mais surtout on peut dire que, dans ce domaine, les applications en puissance des radioisotopes sont considérables. Constamment de nouvelles applications surgissent pour l'étude des mécanismes physiologiques et pathologiques.

Par contre, dans le domaine thérapeutique, l'apparition des radioisotopes, qui avait fait naître de grands espoirs, n'a pas modifié profondément les possibilités de la radiothérapie. Ils ont surtout permis une plus grande souplesse d'application de cette dernière, sans apporter de changements révolutionnaires. Néanmoins, les chercheurs n'ont pas dit leur dernier mot et des travaux récents, tendant à associer la radioactivité de radioisotopes et la spécificité de substances immunologiques, autorisent l'espoir de progrès futurs.

Dr CLAUDE KELLERSHOHN

# LA BIOLOGIE ADOPTE LES INDICATEURS NUCLÉAIRES

Les éléments chimiques qui entrent dans la constitution des êtres vivants, tels que l'azote, le carbone, l'hydrogène et l'oxygène, se rencontrent dans la nature à l'état de mélanges de divers isotopes stables qui, on l'a vu, ont des propriétés chimiques identiques alors que leur masse atomique est différente. Ainsi, l'azote de l'air est constitué par un mélange d'azote de masse 15 et d'azote de masse 14 dans les proportions de 37 molécules de masse 15 pour 10 000 de masse 14. Or les protéines des êtres vivants contiennent dans leurs molécules des atomes d'azote parmi lesquels on retrouve exactement la même proportion d'azote lourd que dans l'atmosphère. Il semble donc que la cellule ne fasse pas de distinction entre les divers isotopes. C'est sur ce principe que repose l'emploi des isotopes comme « indicateurs » ou « traceurs » en biologie, que ces isotopes soient stables ou instables.

## « Espions » radioactifs

C'est G. Hevesy qui eut, le premier, dès 1923, l'idée des indicateurs. Pendant plusieurs années, il s'était efforcé de séparer chimiquement le radium D et son isotope, le plomb, qui se trouvent réunis dans les mêmes gisements. Ne pouvant y parvenir, il se dit que la cellule vivante, qui n'est qu'un laboratoire chimique en miniature, ne devait, pas plus que le chimiste, faire de distinction entre ces deux isotopes. Ainsi, si nous voulions suivre dans une plante les aventures du plomb, il nous suffirait d'ajouter à celui-ci une trace infinitésimale de radium D : les cheminements du plomb seraient infailliblement repérés par la radioactivité du radium D. Celui-ci servirait en quelque sorte d'espion ou d'indicateur.

Dix ans plus tard, la découverte des radioéléments artificiels par M. et Mme Joliot-Curie devait donner une impulsion prodigieuse à cette méthode d'investigation parce qu'enfin les biologistes allaient pouvoir « doubler » la plupart des éléments. M. Joliot en comprit

immédiatement l'intérêt et il fit installer, dès cette époque, des laboratoires destinés à la biologie dans la station de synthèse atomique d'Ivry.

La méthode des indicateurs a été appliquée aux questions les plus diverses. Le nombre de publications à ce sujet doit se chiffrer actuellement par dizaines de milliers. Il serait vain de tenter de dresser un bilan complet des recherches entreprises, et nous nous bornerons à quelques exemples précis. Ils nous permettront de comprendre comment les isotopes ont permis de faire avancer des problèmes fondamentaux de la biologie là où les méthodes conventionnelles piétinaient sans espoir.

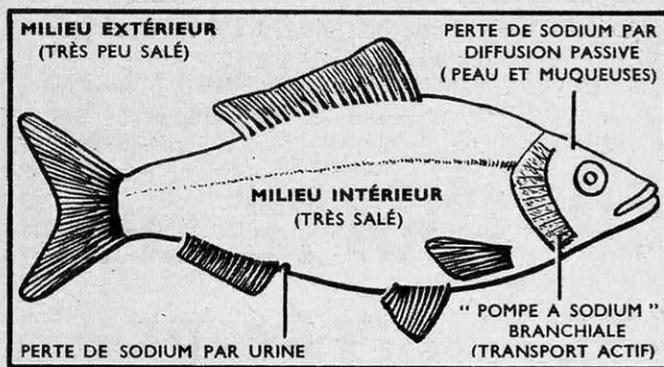
## La pénétration des substances dans l'organisme

Les isotopes permettent de suivre les aventures de toute substance introduite dans un organisme. La voie d'introduction la plus naturelle étant le tube digestif, nous commencerons cette étude par celle de l'absorption intestinale.

A quelle vitesse et avec quel rendement les aliments sont-ils absorbés ? Nous en avons une vague idée lorsque nous avalons un comprimé d'aspirine et en attendons les effets. Seuls les traceurs nous permettent de connaître exactement la vitesse et le taux de l'absorption intestinale.

Dans le cas du sel de cuisine (chlorure de sodium), il suffit de faire avaler au sujet d'expérience un peu de sel marqué avec du radiosodium. Au préalable, un compteur de Geiger, bien protégé pour éviter les radiations parasites, est mis dans la main du sujet. On s'aperçoit que l'on peut déjà détecter les atomes radioactifs 3 minutes après l'ingestion et que l'absorption est complète après 3 heures.

Par des méthodes basées sur le même principe, quoique plus complexes dans le détail, on a pu étudier l'absorption d'autres éléments primordiaux pour l'organisme.



La pompe à sodium du poisson rouge lui permet de compenser ses pertes continues en sodium par diffusion passive, car le milieu intérieur de ce poisson doit demeurer aussi salé que le nôtre bien qu'il vive dans un milieu presque dépourvu de sel. Pour étudier une telle « pompe » il est nécessaire de marquer le sodium par du radiosodium. Des mécanismes analogues existent et fonctionnent continuellement dans nos muscles et notre système nerveux ainsi que dans notre glande thyroïde.

On sait, en particulier, l'importance du calcium dans la constitution du squelette, notamment au cours de la croissance et chez la femme enceinte. Or certains cas, caractérisés par une déficience de l'ossification, proviennent aussi bien d'une mauvaise fixation du calcium sur la trame osseuse que d'une mauvaise absorption intestinale. On a pu montrer, avec le radiocalcium, que la vitamine D, vitamine antirachitique de l'huile de foie de morue, non seulement hâte la fixation osseuse du calcium, mais aussi augmente la vitesse et le rendement de l'absorption calcique de l'intestin.

### La « pompe à sodium »

Dans certains cas, l'absorption des sels ne se fait pas uniquement par la voie digestive. Chez certains animaux vivant dans l'eau douce — tels le poisson rouge de nos aquariums ou la grenouille — elle se fait dans des conditions assez extraordinaires. Ces animaux présentent en effet un milieu intérieur aussi riche en sel que le nôtre, avec 3 mg de sodium par  $\text{cm}^3$  environ, alors qu'ils sont en contact avec un milieu extérieur en contenant tout au plus 10 millièmes de mg. Aussi perdent-ils constamment des sels par diffusion passive du milieu intérieur vers le milieu extérieur. Or ce « flux de sortie » n'est pas compensé seulement par les sels ingérés avec la nourriture, puisque grenouilles ou poissons peuvent rester des semaines sans alimentation. On sait maintenant que cette compensation est réalisée par une véritable « pompe à sodium » située au niveau des branchies pour le poisson, ou de la peau pour la grenouille. Cette « pompe » prélève les ions dans le milieu extérieur et les transporte dans le milieu intérieur au prix d'une dépense d'énergie considérable. On commence à peine à aborder l'étude expérimentale de son mécanisme intime, ce qui n'a été possible qu'à l'aide des radioéléments utilisés comme traceurs. Sans eux, on ne peut connaître que le bilan net des quantités de sodium gagnées ou perdues par l'animal, différence entre le flux de sortie et le flux d'entrée. Pour

évaluer le flux d'entrée et le travail de la « pompe », il suffit de marquer le sodium extérieur par un peu de radiosodium. La diminution de la radioactivité du milieu extérieur permet de calculer le flux d'entrée.

Cet exemple pourra paraître au lecteur non naturaliste dénué de tout intérêt pratique et sans connexion avec la physiologie humaine. Il n'en est rien. Notre organisme recèle un certain nombre de « pompes » ioniques tout aussi mystérieuses. Nous en verrons d'autres exemples.

### La distribution des substances à travers l'organisme

Lorsqu'une substance a pénétré dans l'organisme, le problème qui se pose est de savoir comment, où, et à quelle vitesse elle se répartit à travers l'organisme. Autrement dit, dans quelles conditions elle quitte l'appareil circulatoire pour traverser les capillaires, passer dans les liquides interstitiels et finalement pénétrer dans les cellules. La distribution des substances est donc un problème lié, d'une part à la vitesse circulatoire, d'autre part à l'intensité des échanges capillaires. L'utilisation des traceurs permet de répondre avec élégance à l'une et à l'autre de ces questions.

La mesure de la vitesse circulatoire est possible par des moyens autres que les traceurs. On peut, par exemple, injecter dans une veine une substance opaque aux rayons X, telle que la diodraste, et la suivre par radioscopie ou radiographie. Il est plus simple de placer un compteur à l'endroit voulu et d'injecter une substance radioactive telle que le radiosodium à une certaine distance. On a pu ainsi mesurer, chez l'homme, le temps de circulation entre le pied et la main et comparer les vitesses observées chez le sujet normal à celles obtenues dans divers cas de maladies de la circulation (artériosclérose, insuffisances cardiaques, etc.). C'est ainsi qu'il faut 45 secondes en moyenne au sang pour circuler de la saignée du bras au pied ; ce temps est réduit à 27 secondes dans certains cas d'artériosclérose.

Comment apprécier maintenant la diffusion des substances du sang vers les liquides interstitiels, ou encore, comment mesurer la perméabilité capillaire? Une telle mesure est à peu près impossible sans l'utilisation des radioisotopes.

### Les échanges capillaires

Pour apprécier, par exemple, la diffusion des ions sodium du sang vers les liquides interstitiels, le plus simple serait d'injecter un excès de chlorure de sodium dans le sang et d'étudier comment cet excès disparaît de la circulation. Mais l'introduction de grandes quantités de sel dans l'organisme perturberait l'équilibre physiologique qui y règne et provoquerait notamment un gros afflux d'eau des liquides interstitiels dans le sang, de sorte que la disparition de l'excès de sel résulterait d'un mouvement d'eau aussi bien que d'une fuite du sodium. Quant à introduire de faibles quantités de sels, il ne faut pas y songer car les difficultés analytiques deviendraient insurmontables. Toutes ces difficultés peuvent être évitées en injectant une quantité négligeable de chlorure de sodium marqué dans la circulation et en mesurant le taux de disparition des ions actifs du plasma sanguin, c'est-à-dire la décroissance de sa radioactivité.

Le principe de la mesure est très simple : il suffit de faire circuler le sang artériel dans un tube de plastique enroulé autour d'un compteur de Geiger et d'enregistrer automatiquement les variations de la radioactivité grâce à un intégrateur-enregistreur mécanique ou électronique. L'analyse de la courbe obtenue donne des renseignements extrêmement importants. Après des accidents initiaux, elle décroît progressivement et tend vers un équilibre. Connaissant la quantité de radiosodium injectée et sa concentration dans le plasma lorsque l'état d'équilibre est atteint (la concentration est alors la même que dans le liquide interstitiel), nous pouvons calculer le volume dans lequel le radiosodium s'est dilué par suite des échanges capillaires, il représente environ 30 % du volume du corps, soit, en première approximation, tous les liquides extracellulaires, c'est-à-dire la somme du volume du plasma sanguin, 5 %, et des liquides interstitiels, 25 % (on admet, en effet, que le sodium est un ion essentiellement extracellulaire ; le raisonnement ne serait plus valable pour le potassium, ion surtout intracellulaire).

D'autre part, la courbe de décroissance de la concentration du radiosodium permet de calculer le taux des échanges capillaires. On conçoit aisément que plus la décroissance est rapide, plus grande est la quantité de sodium marqué qui diffuse en un temps donné vers les territoires extra-vasculaires. Or, les chiffres

fournis par l'analyse des courbes dépassent l'imagination : 50 % du sodium sont échangés à chaque minute à travers les parois des capillaires ! En une journée, le sodium du sang se renouvelle plus de 400 fois, soit, pour un homme d'un poids de 70 kg, un transport de 5 kg de sodium dans chaque sens. Ce chiffre est particulièrement impressionnant si l'on songe que le plasma contient à peine 12 g de sodium.

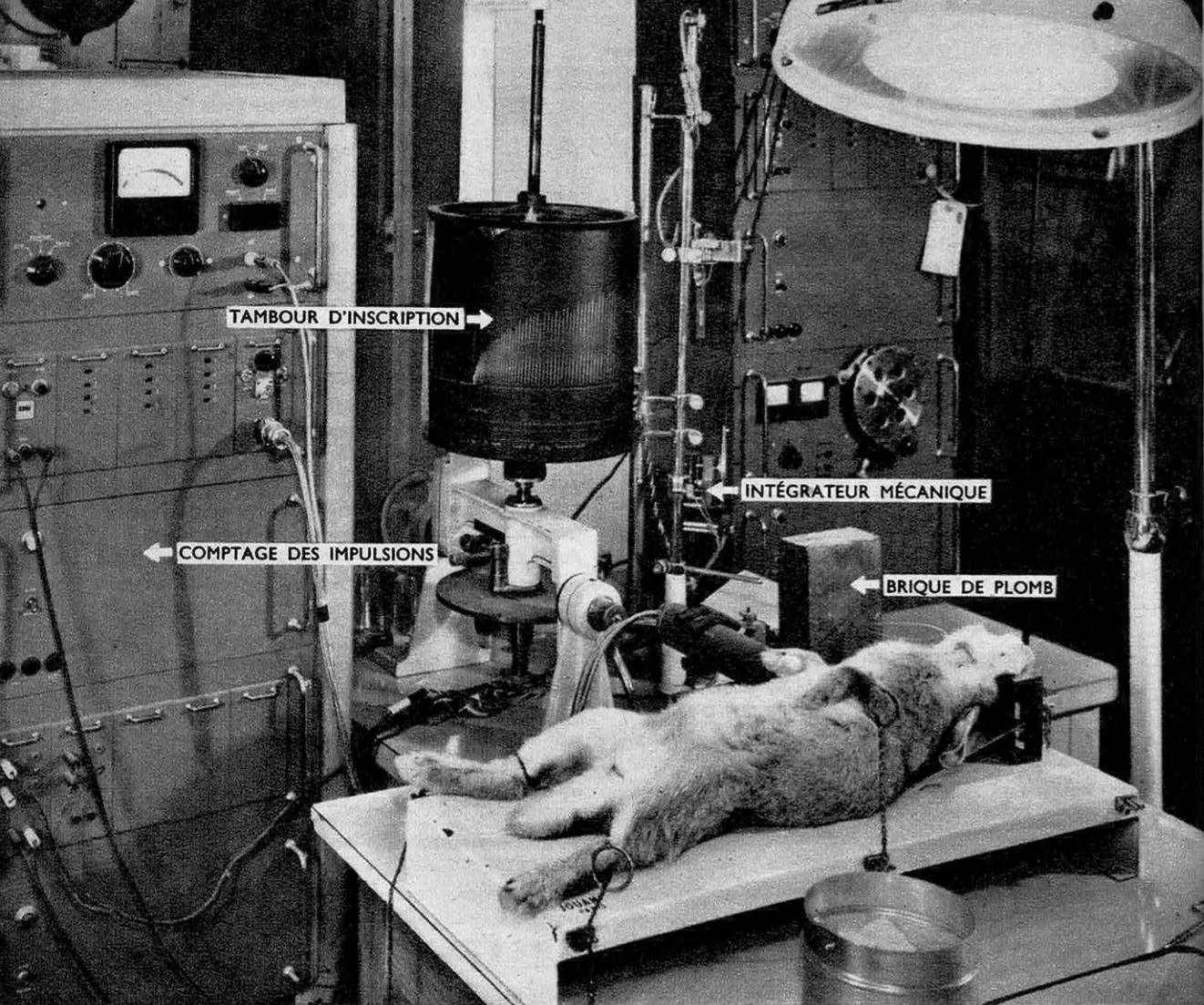
Ainsi l'emploi des traceurs nous permet pour la première fois de mettre en évidence les échanges incessants dont l'organisme est le siège et d'en dégager l'importante notion de « vitesse de renouvellement ». Grâce au radio-sodium, par exemple, nous pouvons montrer que le sodium du plasma n'est pas seulement entraîné paresseusement par le flot circulaire ; cet ion s'échappe à chaque instant de la nappe sanguine pour être remplacé un peu plus tard, en un chassé-croisé incessant. Or, cet échange perpétuel, qui ne cesse qu'avec la mort, n'est pas seulement l'apanage du sodium. Les autres ions du plasma, chlore, iode, potassium, calcium, etc., les molécules d'eau, les substances nutritives et les déchets, les gaz respiratoires sont également en mouvement continu entre le sang et les liquides interstitiels.

Chez les plantes, les mouvements de la sève et la distribution des substances minérales et organiques à travers les organes ont également pu être suivis grâce aux radioéléments.

### Le métabolisme des substances dans les tissus

Jusqu'à présent, nous avons suivi la pénétration et la distribution des substances jusque dans les liquides extra-cellulaires. Dans l'intimité des tissus, elles pénètrent dans les cellules où elles entrent dans les cycles du métabolisme, ce mot désignant l'ensemble des phénomènes d'assimilation et de désassimilation. Les traceurs permettent encore de suivre à l'échelle cellulaire les molécules ou les ions.

Parfois, le métabolisme d'une substance particulière s'effectue dans des territoires bien déterminés. Ces territoires sont facilement détectés par l'augmentation de la radioactivité qui, en ces points, suit l'administration de la substance marquée. C'est le cas de l'iode qui s'accumule dans la glande thyroïde au point qu'on peut le déceler de l'extérieur avec un compteur. On peut aussi utiliser une méthode entièrement différente : la technique autoradiographique. Moins précise quantitativement, du moins à l'heure actuelle, que la méthode de comptage, elle permet une localisation beaucoup plus précise du radio-élément dans les tissus. Voici son principe :



on place une coupe histologique très fine de l'organe étudié ou de l'animal entier au contact d'une émulsion photographique, dans l'obscurité ; l'ionisation due aux rayonnements radioactifs impressionne l'émulsion aux endroits précis où l'isotope s'est fixé ; la coupe et l'émulsion restent accolées pour la coloration histologique, le développement photographique et l'examen microscopique : on obtient ainsi une « autohistoradiographie » :

C'est un Français, le Dr Lacassagne, qui a eu, le premier, l'idée de réaliser de telles préparations. Dès 1925, il administra du polonium, radioélément naturel, à des lapins et a montré, à l'échelon microscopique, qu'il était surtout capté par certaines des cellules du foie.

Dans de nombreux cas, la détection de la radioactivité fixée par un tissu n'est pas possible par la technique autoradiographique. On peut toujours alors comparer l'activité du tissu et celle du sang à l'aide d'un compteur. On

admet que plus le rapport tissu-plasma est élevé, à poids égal, plus certaine est la pénétration du radioélément dans le tissu.

Il reste au biologiste à préciser le sort de la substance étudiée dans les rouages du métabolisme tissulaire. Là encore, les traceurs permettent au biochimiste de ne pas se perdre dans le dédale des réactions chimiques dont la cellule est le siège.

### **L'utilisation du soufre minéral par les animaux supérieurs**

On pensait jusqu'ici que seuls les végétaux étaient capables d'effectuer la synthèse de substances organiques à partir de substances minérales, les animaux en étant incapables. Cette différence est à ce point fondamentale qu'elle entre encore dans la définition même du règne animal et végétal.

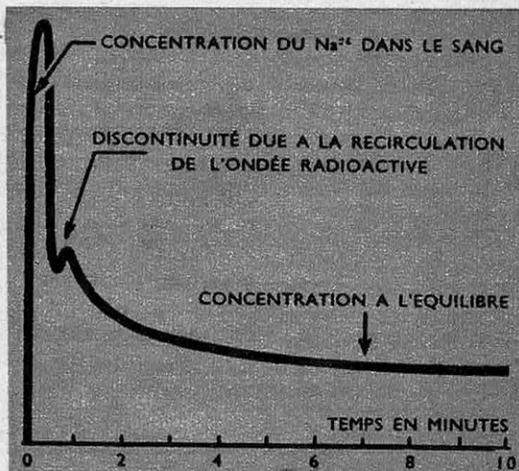
Or, tout récemment, un groupe de cher-

## Les échanges capillaires du sodium chez le lapin

**C**ETTE expérience a pour but l'étude de la diffusion du sodium du sang vers les liquides interstitiels, c'est-à-dire la mesure de la perméabilité des capillaires pour le sodium. Une telle mesure serait pratiquement impossible sans l'utilisation du radiosodium. On injecte du chlorure de sodium « marqué » dans la circulation et il est aisé de mesurer le taux des échanges entre le plasma sanguin et les liquides extra-vasculaires en enregistrant la décroissance de la radioactivité du sang. La photographie ci-contre, prise au Service de Biologie du Commissariat à l'Energie Atomique de Saclay, montre le montage expérimental utilisé dans cette recherche sur le lapin. L'animal est endormi au nembutal et son cou est préparé pour dégager les vaisseaux intéressants.

Le radiosodium est injecté dans la veine jugulaire gauche. La carotide externe droite envoie son sang dans un tube en polythène qui traverse une brique de plomb et fait trois tours autour d'un compteur de Geiger cylindrique. La brique de plomb protège le compteur contre toutes les radiations parasites émises par le lapin lorsque l'injection a été faite. Le sang retourne dans le corps de l'animal par la veine jugulaire droite. Le compteur est raccordé à l'installation de comptage à gauche, elle-même reliée à l'intégrateur mécanique où s'inscrit sur un tambour la courbe des inverses de la concentration du radiosodium dans le sang. Après des variations au début, elle tend vers un équilibre. La concentration est alors la même que dans les liquides interstitiels.

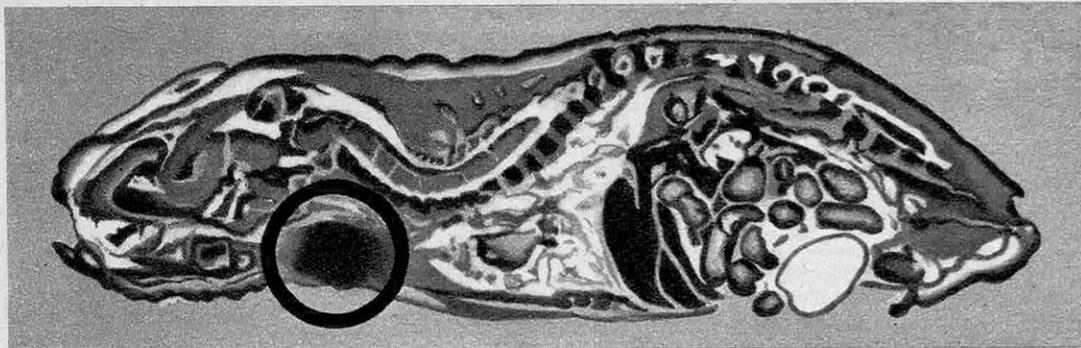
La concentration du radiosodium dans le plasma artériel est ici enregistrée en fonction du temps. Cette courbe est la traduction quantitative de celle inscrite sur le tambour à noir de fumée de la photographie ci-contre. Le radiosodium a été injecté au temps zéro dans la veine jugulaire gauche. Quelques secondes après, on reçoit l'« ondé radioactif » dans le sang de la carotide droite. Elle reparait atténuée 20 secondes plus tard. Puis la concentration du radiosodium diminue rapidement pour atteindre en une dizaine de minutes une valeur d'équilibre constante. La disparition du radiosodium est due à son échange très rapide avec du sodium non marqué provenant des liquides interstitiels. Cet échange a lieu à travers les capillaires, 50% du sodium plasmatique étant ainsi renouvelé par minute. Une telle vitesse de renouvellement impose l'enregistrement automatique pour l'étude des phénomènes.



cheurs français vient de montrer que les animaux supérieurs, tels que le lapin ou le poulet, étaient capables d'utiliser le soufre minéral pour faire la synthèse de substances organiques soufrées, en excluant naturellement toute intervention possible des bactéries que les animaux hébergent dans leur tube digestif. Une des méthodes les plus élégantes consiste à injecter du sulfate ou du sulfite marqués dans un œuf de poule conservé dans une couveuse. Or, l'œuf de poule est parfaitement aseptique et, de plus, il représente, à un stade très jeune, une immense cellule dans laquelle le soufre peut être introduit directement. Si on broie l'œuf entier quelques heures après l'injection, ou un organe tel que le rein ou le foie si le poussin est déjà suffisamment développé, on peut isoler les protéines et libérer leurs acides organiques constitutifs. L'extrait obtenu est le mélange d'un grand nombre de substances organiques simples. Pour trier ce mélange,

deux méthodes modernes s'offrent au biochimiste : l'électrophorèse et la chromatographie. Ayant concentré l'extrait en un point d'un papier-filtre spécial, on place, dans le premier cas, la bande de papier imprégnée d'un solvant approprié dans un champ électrique : les diverses substances migrent chacune à une vitesse donnée qui dépend du rapport de leur charge électrique à leur poids moléculaire. Dans le cas de la chromatographie, la vitesse de migration des substances ne dépend que du pouvoir absorbant du papier vis-à-vis de chacune des substances. On obtient ainsi une succession de taches colorables par des réactifs chimiques convenables. Parmi ces taches, un certain nombre représentent les substances organiques soufrées extraites du tissu.

Mais comment reconnaître si le soufre minéral est ou n'est pas à l'origine de ces corps organiques ? La méthode classique aurait consisté à injecter à l'animal un gros excès de



*Un souriceau de trois jours a reçu une injection de radioiode un jour avant que soit faite cette préparation sur une coupe fine de l'animal entier. Elle a été colorée suivant les techniques histologiques courantes pour mettre en évidence la colonne vertébrale, le foie, les intestins que l'on retrouve aisément.*

*De plus, un film très mince de gélatine photographique a été coulé sur la préparation. La région que l'on a encerclée et qui se trouve au niveau du cou est la seule qui ait noirci le film photographique. Ce noircissement est dû aux radiations émises par le radioiode qui s'est fixé principalement sur la glande thyroïde.*

sulfates ou de sulfites et à vérifier ensuite si la quantité de tel ou tel acide organique soufré était augmentée par rapport au tissu normal. Une telle procédure est décevante, car elle entraîne inévitablement la rupture de l'équilibre normal qui règne au sein de la minuscule usine chimique qu'est la cellule vivante. Nous nous trouvons donc, à l'échelle près, dans la même situation que le physiologiste cherchant à évaluer les échanges capillaires du sodium.

Si, par contre, le biologiste a injecté une petite quantité de soufre minéral marqué par du soufre radioactif (S-35), il lui suffira de vérifier sur le papier-filtre obtenu après électrophorèse ou chromatographie si une ou plusieurs taches correspondant aux acides organiques soufrés est radioactive. Pour cela, il « déroulera » la bande de papier à proximité d'un compteur de Geiger. Une méthode encore plus simple et plus élégante, sinon plus rapide, consiste à placer dans l'obscurité la bande de papier au contact d'un film photographique. Toute région radioactive sera mise en évidence sous forme d'un noircissement correspondant à l'impression de la gélatine par les radiations.

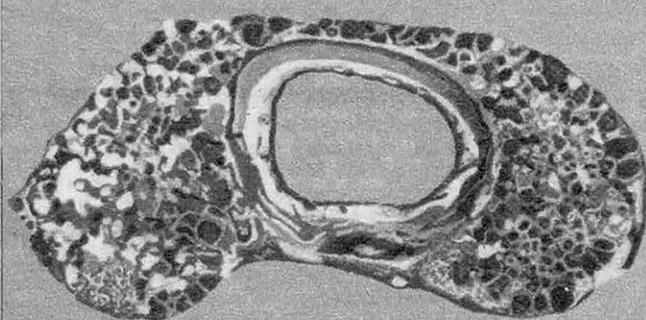
Grâce aux traceurs, nous pouvons donc suivre les destinées du soufre minéral dans l'organisme animal et démontrer, sans perturber le métabolisme normal des tissus, que les animaux, à l'instar des plantes, peuvent utiliser des substances minérales pour faire la synthèse de composés organiques. On a pu montrer de même que les animaux étaient, dans une certaine mesure, capables de fixer le gaz carbonique pour faire la synthèse des sucres et notamment celle du glycogène mis en réserve dans le foie. Bien sûr, ces capacités de synthèse restent limitées et exceptionnelles, d'autant plus qu'elles nécessitent une dépense d'énergie considérable. Les plantes vertes restent de toute évidence les êtres vivants chez

lesquels la synthèse des sucres à partir du gaz carbonique atteint les rendements les plus élevés, l'énergie nécessaire étant l'énergie lumineuse captée par le pigment vert contenu dans les feuilles, la chlorophylle.

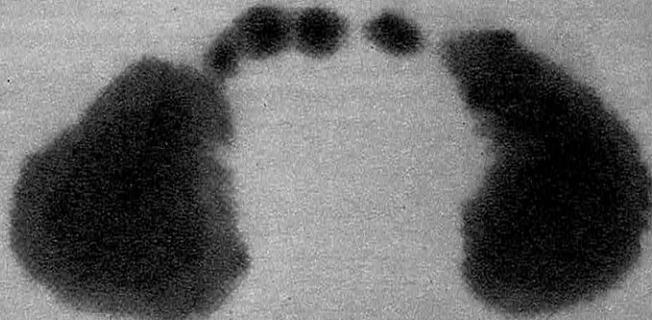
### L'utilisation du gaz carbonique par les plantes vertes

Que les plantes vertes soient ainsi capables d'effectuer la synthèse des sucres et de l'amidon est connu depuis plus d'un siècle. En effet, la concentration du gaz carbonique dans l'atmosphère est infime et les botanistes se sont très vite aperçu que l'enrichissement artificiel de l'air en gaz carbonique pouvait considérablement augmenter la quantité de sucres mis en réserve par la plante. Mais le fait d'introduire un excès d'une substance *A* et d'observer l'augmentation de la production d'une autre substance *B* n'est pas une preuve formelle que *B* provienne de *A*. *A* peut tout simplement créer des conditions favorables à la synthèse de *B*. C'est le cas, par exemple, de l'insuline, l'hormone dont l'absence provoque le diabète sucré. L'injection de cette hormone produit une augmentation de la mise en réserve du glycogène hépatique (le glycogène est, chez l'animal, l'équivalent de l'amidon végétal). Et pourtant, il ne vient à l'esprit de personne de soupçonner que l'insuline puisse être transformée en glycogène.

Si une plante est mise à la lumière en présence d'air dont le gaz carbonique a été marqué par du carbone radioactif (C-14), l'extraction chimique de l'amidon ou des sucres contenus dans les feuilles, révèle que ces substances sont devenues radioactives et nous fournit la preuve directe et péremptoire que le gaz carbonique marqué a été intégré dans les sucres produits par la photosynthèse. L'utilisation du carbone marqué permet en



**La glande thyroïde** d'une jeune souris ayant reçu 24 heures auparavant une injection de radioiode a été coupée transversalement. A gauche, la coupe a été colorée par les techniques histologiques : on voit au centre la coupe de la trachée-artère autour de laquelle est placée la glande. A droite, une coupe



voisine n'a pas été colorée et on ne voit que le noircissement du film photographique qui couvre la préparation. Il correspond exactement à la région glandulaire qui a fixé l'iode radioactif. Le grossissement est ici faible, mais la même technique est applicable avec des grossissements 100 fois supérieurs.

outre de préciser les étapes de la fixation du gaz carbonique et de trouver la plupart des corps intermédiaires conduisant à la formation des sucres. Ces corps intermédiaires n'existent qu'en toute petite quantité dans les cellules car ces réactions chimiques sont incroyablement rapides. Pour les « saisir sur le vif » la technique expérimentale doit être adaptée à la vitesse de ces réactions.

### Les étapes de la photosynthèse

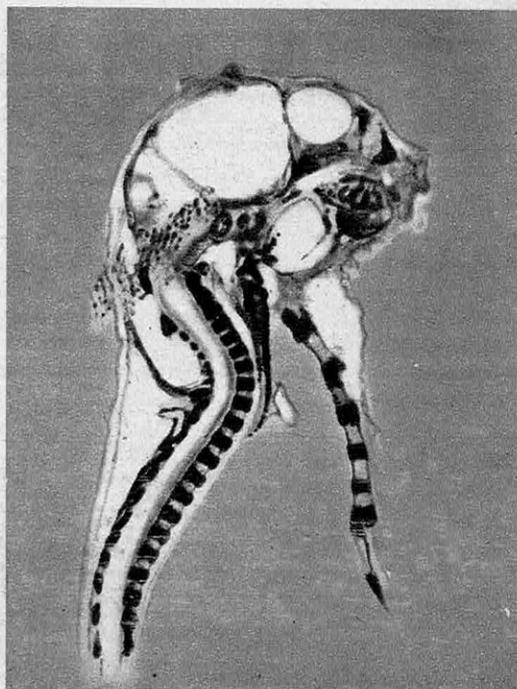
L'une des expériences se présente comme suit : une feuille fraîche est suspendue dans l'obscurité dans une atmosphère dont le gaz carbonique est marqué. Après un éclair d'une durée de 5 secondes, la feuille est tuée par plongée dans l'alcool bouillant et on extrait par chromatographie les substances organiques contenues dans les cellules. Le papier-filtre révèle alors toute une série de substances. Certaines sont des sucres à chaîne hydrocarbonée à 6, 5 ou 3 carbones. D'autres sont des acides aminés tels que l'alanine ayant une chaîne carbonée à 3 carbones. D'autres sont des acides organiques, tel l'acide glycérique

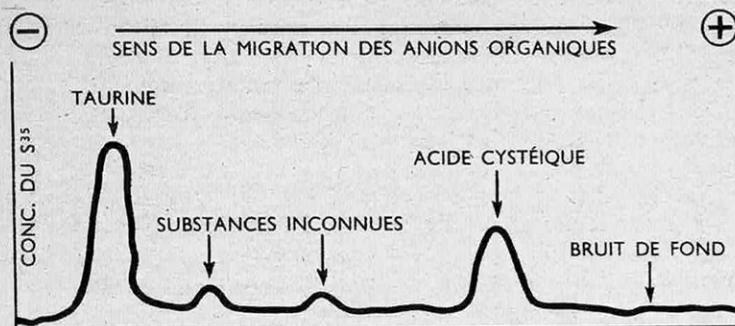
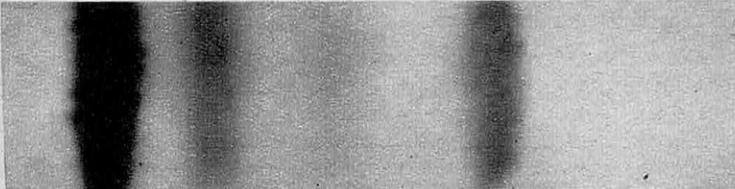
à chaîne tricarbonée. Or, parmi toutes ces substances, seule cette dernière est radioactive de façon appréciable.

Lorsque l'éclairage est plus long (30 à 90 s), on voit apparaître la radioactivité dans d'autres taches, notamment dans les sucres à 3, 5 et 6 carbones et dans l'alanine. L'acide glycérique est donc un intermédiaire de la fixation du gaz carbonique.

Il ne nous est malheureusement pas possible de détailler plus avant les recherches actuelles dans ce domaine, notamment pour mettre en évidence les précurseurs de l'acide glycérique lui-même. Dans certains cas, les éclairages sont fournis par des « flash », ce

**C'est du radiosoufre (S-35) qu'a reçu, sous forme de sulfate, un raton de 7 jours, quelques heures avant d'être sacrifié.** Cette coupe de la tête et du thorax n'a pas été colorée par les techniques histologiques, et le noircissement correspond exclusivement aux régions où le radiosoufre s'est fixé. On le trouve sur cette autoradiographie dans toutes les parties cartilagineuses : anneaux de la trachée-artère, vertèbres, sternum, base de l'encéphale et cornets du nez. Le radiosoufre s'est également fixé, quoique à un moindre degré, dans tout le tégument. A titre indicatif, signalons que le temps de pose (à l'obscurité totale) nécessaire à l'impression de l'émulsion photographique, a été de vingt et un jours.





**Autoradiographie** d'une électrophorèse d'extrait d'embryon de poulet sacrifié 3 minutes après avoir reçu une injection de radiosulfate. Les substances à séparer ont été placées à gauche et, sous l'action d'un champ électrique créé par une différence de potentiel de 160 volts, elles ont migré de gauche à droite. Le nombre des substances migrantes est supérieur à celui des taches. Seules celles contenant du radiosoufre ont impressionné la gélatine placée sur le papier filtre une fois l'opération terminée. On voit, au-dessous, la courbe obtenue en faisant défiler l'électrophorogramme devant un compteur de Geiger-Muller (Photo du Service de Biologie du C.E.N. à Saclay).

qui donne une idée de la vitesse incroyable de certaines réactions chimiques.

Nous voyons qu'en biochimie comme en physiologie, les indicateurs permettent d'aborder de nombreux problèmes dynamiques, et plus spécialement ici des problèmes de cinétique chimique : de vitesse de synthèse ou de vitesse de dégradation. Dans ces domaines, l'utilisation des indicateurs nucléaires a souvent permis de renouveler totalement les connaissances acquises.

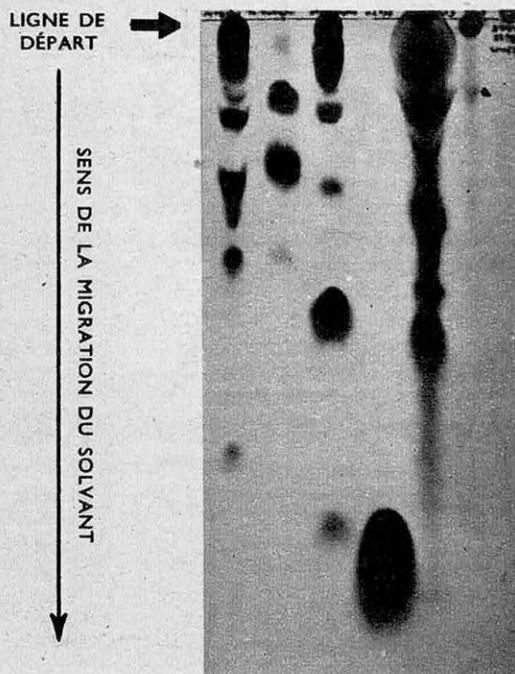
### La biochimie de la thyroïde

On sait que la glande thyroïde est une glande à sécrétion interne, qui élabore des hormones, notamment la thyroxine, très im-

portantes dans le maintien de nombreuses fonctions de l'organisme, et qui jouent entre autres un rôle dans la croissance. Tout le monde a vu les photos de ces grenouilles naines, métamorphosées « avant l'âge », un biologiste malicieux leur ayant donné à manger de la glande thyroïde.

Or la molécule de thyroxine renferme 4 atomes d'iode, si bien que la glande thyroïde, qui pourtant, en poids, ne représente qu'une infime fraction du corps, constitue le principal organe d'accumulation de l'iode. Comme nous l'avons déjà vu plus haut, l'iode radioactif, injecté à dose infinitésimale dans l'organisme, se précipite littéralement dans cette glande, et après quelques heures, la presque totalité de la dose s'y trouve localisée. La thyroïde fonctionne donc comme une véritable « pompe à iode ». Que devient l'iode ainsi fixé, comment se fait la synthèse de l'hormone thyroïdienne, quelles sont les étapes intermédiaires et les vitesses de réaction ? Voilà des problèmes qui tous ont été précisés grâce à l'utilisation de l'iode marqué comme indicateur.

Lorsqu'on effectue la chromatographie des substances iodées contenues dans la thyroïde, on observe trois sortes de substances : de l'iode minéral ; de l'iode combiné à un acide



← **Un radiochromatogramme** d'extraits d'embryons de poulets sacrifiés après des temps variables après une injection de radiosulfate. Les substances à séparer ont été placées le long de la ligne supérieure et ont migré de haut en bas (chromatographie unidimensionnelle). Les taches les plus proches de la ligne de départ correspondent au radiosulfate non transformé contenu dans le tissu. Les taches plus éloignées correspondent à des acides organiques soufrés qui ont migré plus ou moins loin. La durée d'une telle chromatographie peut être de 24 ou 48 heures. (Service de Biologie du C.E.N. à Saclay).

aminé, la tyrosine, qui contient un cycle benzénique dans sa molécule ; de l'iode lié aux thyronines provenant de la combinaison de deux molécules de tyrosines et contenant donc deux cycles benzéniques. C'est dans cette dernière fraction que l'on trouve la thyroxine qui est une tétra-iodo-thyronine, ainsi qu'une tri-iodo-thyronine qui s'avère de plus en plus comme étant l'hormone thyroïdienne la plus efficace. On avait toujours admis que la synthèse des thyronines se faisait par l'intermédiaire des tyrosines iodées. L'utilisation de l'iode-131 en a fourni la preuve formelle et a apporté en même temps de précieuses indications sur la vitesse des transformations. La figure page 146 donne schématiquement le principe des expériences.

Quant au mécanisme, un certain nombre de renseignements ont pu être recueillis, également avec l'aide de l'iode-131. Ainsi, le sulfocyanure de sodium, qui bloque les fonctions thyroïdiennes, agit au niveau de la « pompe à iode » et empêche la glande d'absorber les iodures du plasma. D'autres corps « antithyroïdiens », notamment ceux utilisés en médecine, le thiouracile ou la sulfaguanine, n'empêchent pas l'absorption des iodures, mais agissent directement sur la fixation de l'iode par les tyrosines et thyronines.

### Le métabolisme des protéines

Un dernier exemple, celui du métabolisme des protéines, va nous montrer à quel point l'introduction de la technique des indicateurs a bouleversé nos conceptions sur le fonctionnement de l'organisme.

Si nous ouvrons un livre de physiologie datant seulement d'il y a une quinzaine d'années, nous y verrons exposés deux types de métabolisme des protéines :

1° le métabolisme « endogène ». Il concerne les protéines structurales de nos tissus qui sont

considérées comme immuables ; seule une toute petite fraction est dégradée et resynthétisée par suite de leur « usure » inévitable ;

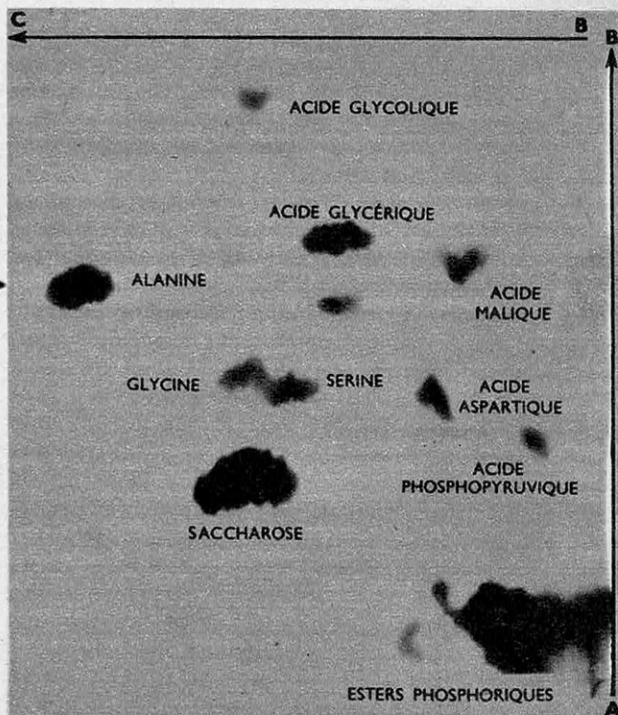
2° le métabolisme « exogène » des protéines que nous ingérons dans les aliments. Ces protéines donnent, après digestion, des acides aminés qui sont rapidement dégradés et qui aboutissent à la formation de l'urée excrétée dans l'urine. De ces acides aminés, une infime fraction sert à réparer l'usure des tissus signalée plus haut.

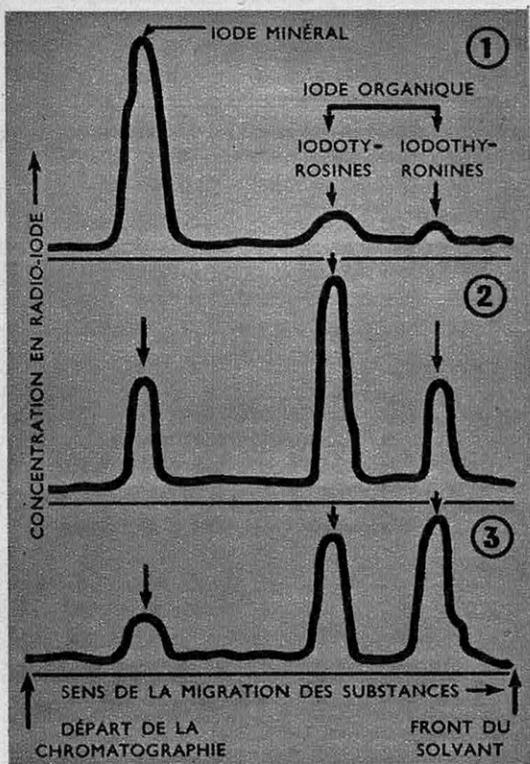
Cette conception simple, plaçant entre les deux types de métabolisme une ligne de démarcation très nette, a été totalement bouleversée par deux chercheurs américains, Schoenheimer et Rittenberg, dont les premiers travaux datent de 1938.

Ces chercheurs eurent l'idée d'introduire dans l'alimentation des acides aminés marqués par de l'azote-15, isotope stable non radioactif qui doit être dosé, non pas avec un compteur de Geiger, mais un spectrographe de masse, ce qui rend l'expérimentation plus délicate. Examinant la concentration de l'azote-15 dans l'azote excrété, Schoenheimer et Rittenberg eurent la surprise d'y constater son absence presque totale, ce qui était en contradiction formelle avec les théories classiques qui voulaient que les protéines ingérées soient rapidement dégradées.

Par contre, en recherchant la présence de l'isotope lourd dans les tissus, ils constatèrent que plus de la moitié de l'azote-15 administré se retrouvait dans la fraction protéique. Bien

**La fixation du gaz carbonique par les végétaux** → a été étudiée à l'aide du radiocarbone. On voit ici un radiochromatogramme d'extraits de jeunes pousses d'orge qui ont fixé pendant 60 secondes du gaz carbonique marqué par du carbone-14. L'extrait a été placé, au départ, dans le coin inférieur droit et la chromatographie a eu lieu en deux temps (chromatographie bidimensionnelle). Les substances ont d'abord migré de bas en haut et se sont réparties le long de l'axe AB. Puis, on a fait migrer les substances de droite à gauche, dans le sens BC, pour obtenir une séparation plus complète. L'autoradiographie du chromatogramme terminé révèle le grand nombre de substances organiques qui, après une minute seulement d'exposition des feuilles à la lumière, ont fixé déjà le gaz carbonique marqué par le carbone-14. Après une exposition de cinq secondes, une seule substance, l'acide glycérique, serait marquée.





**La synthèse de la thyroxine, hormone de la glande thyroïde, se fait par étapes comme le montrent ces autoradiographies de chromatogrammes d'extraits thyroïdiens de rats sacrifiés 1 h (courbe 1), 48 h (courbe 2) et 96 h (courbe 3) après l'injection de radioiode.** Le sens de la migration des substances est de gauche à droite. Les chromatogrammes ont défilé devant un compteur relié à un intégrateur électronique qui a enregistré la concentration du radioiode en chaque point. La comparaison des trois chromatogrammes montre que la synthèse de la thyroxine implique d'abord une étape de fixation de l'iode minéral dans la glande, puis la fixation sur la tyrosine, puis l'accouplement des deux molécules de tyrosine pour donner les thyronines.

mieux, cet azote, administré dans un seul acide aminé alimentaire (le glycofolle) se trouvait incorporé dans un grand nombre d'autres acides aminés des protéines tissulaires. Force était donc d'admettre que, contrairement aux idées reçues, celles-ci étaient en constant remaniement et que les protéines alimentaires servaient de pierres de taille à cette perpétuelle reconstruction. D'où la notion nouvelle d'« état dynamique » des protéines, constamment reconstituées à partir d'un « pool métabolique », sorte de « caisse commune » où se trouvent mêlés les acides aminés d'origine alimentaire et les produits de dégradation. Chez l'homme, l'azote protidique se renouvelle chaque jour à un taux de près de 1 % pour l'ensemble de l'organisme

et de 7 % pour les protéines du foie. Chez le rat, ces chiffres sont respectivement de 4 et de 12 %.

Cette notion de vitesse de renouvellement, qui traduit le flux et le reflux perpétuel de la vie, a été étendue à d'autres substances métaboliques et en particulier aux graisses; celles-ci se renouvellent chez l'homme à un taux de 10 % par jour, y compris les réserves de graisses situées dans le panicule adipeux de la peau, réserves que d'aucuns pensaient n'être utilisées qu'en période de disette!

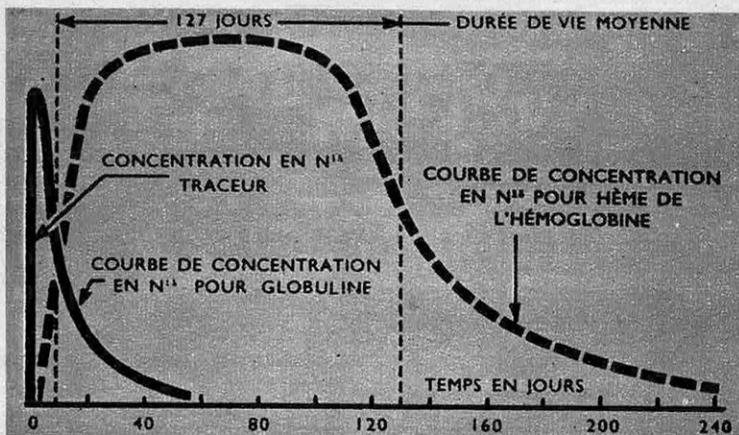
Parmi les protéines dont la vitesse de renouvellement est la plus intense, il faut citer celles du plasma sanguin, albumines, globulines et anticorps. L'étude précise du taux de décroissance de la radioactivité de ces diverses fractions plasmatiques après ingestion d'acides aminés marqués par le carbone radioactif, a montré que 50 % des albumines sont renouvelées tous les 10 jours; la même proportion des globulines est renouvelée tous les 5 à 6 jours et, pour les anticorps, tous les 7 jours. A l'Institut Pasteur, on a démontré que les anticorps marqués, extraits du sang d'un lapin et injectés à un deuxième lapin, conservent pendant plusieurs semaines la même concentration en carbone marqué, alors que les anticorps fabriqués par le lapin lui-même ont une vie beaucoup plus courte.

### La vie des globules rouges

Parfois, la destruction de certaines molécules ne suit pas les mêmes lois que celle des protéines hépatiques ou plasmatiques. C'est le cas particulièrement instructif de la molécule d'hémoglobine, protéine qui constitue l'essentiel du protoplasma de nos globules rouges. Elle est formée de l'association d'une fraction protéique, la globine, et d'une fraction pigmentaire, appelée hème, qui contient un atome de fer et qui est responsable du transport de l'oxygène respiratoire. L'hème, dont la structure est complexe, est fabriquée à partir d'un acide aminé très simple, le glycofolle. En effet, si on administre du glycofolle marqué par l'azote-15, ou le carbone-14, il s'incorpore en partie dans l'hème de l'hémoglobine des jeunes globules rouges, en formation dans la moelle osseuse. Si l'on étudie, en fonction du temps, la concentration de l'azote-15 ou celle du carbone-14 dans les globules rouges en circulation, on obtient une courbe fort différente de celle que l'on aurait pour les protéines plasmatiques. C'est une courbe en plateau qui témoigne du fait que, pendant un certain temps, l'hème ne se détruit pas. L'analyse de la courbe montre une durée de vie de 127 jours chez l'homme.

Il est aussi possible de marquer des glo-

L'azote lourd N-15 fourni dans l'alimentation permet d'évaluer la durée de « vie » des globulines du plasma sanguin et des globules rouges. La courbe en traits pleins est celle de concentration de l'azote-15 dans les globulines d'un lapin nourri pendant 2 jours de valine marquée : la moitié des globulines sont renouvelées en 5 ou 6 jours. L'autre courbe montre que chez l'homme nourri de glycocolle marqué pendant 2 jours, l'excès d'azote-15 dans l'hémoglobine subsiste plus de 4 mois.



bules rouges en les incubant dans du plasma contenant du phosphore marqué (phosphore-32) ou même du fer ou du chrome radioactifs. L'injection de ces globules étiquetés permet de connaître la durée de survie des globules introduits, renseignements extrêmement précieux pour un centre de transfusion sanguine, par exemple. D'autre part, connaissant la radioactivité totale de la substance injectée et celle d'une prise de sang de 1 cm<sup>3</sup>, il est possible de calculer le volume de la masse sanguine circulante, grâce à une simple règle de trois.

### Une méthode pleine de promesses

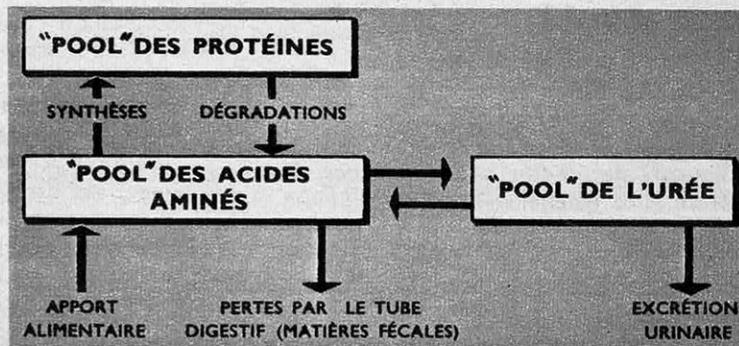
Nous avons passé sous silence de nombreuses et brillantes applications des isotopes, notamment celles qui ont permis de mieux comprendre le fonctionnement de la cellule nerveuse. Nous n'avons pas fait allusion aux travaux actuels sur les mécanismes du fonctionnement rénal qui conduisent à remettre en cause les données classiques. Nous avons vu surtout les difficultés et les déceptions qu'a entraînées l'utilisation des traceurs. Qu'il nous suffise aujourd'hui de contempler avec émerveillement le bilan des résultats accumulés

en vingt ans grâce à ce puissant instrument de recherche.

Les isotopes employés comme indicateurs n'ont nullement déterminé l'apparition en biologie d'une nouvelle discipline bien définie, mais d'une nouvelle méthode d'investigation, riche déjà de résultats, pleine surtout de promesses, et qui a permis d'aborder de nombreux problèmes. Parfois, l'isotope est employé pour l'unique raison que son identification dans les tissus est plus aisée que le dosage de l'isotope naturel ; la recherche biologique ne reçoit pas alors d'impulsion originale. Employés dans un autre esprit, les indicateurs ont permis d'aborder l'étude de toute une cinétique biologique. C'est là leur application majeure. La biochimie et la physiologie classiques dressent des bilans : les indicateurs seuls permettent la mesure des phénomènes dynamiques qui accompagnent les états d'équilibre.

Ils ont permis de montrer que toutes les structures qui composent un être vivant, jusqu'aux plus inertes d'apparence, sont l'objet d'un remaniement continu. Cette plasticité des parties contraste avec l'organisation et la stabilité de l'individu dans son ensemble. En fait, elle en est la condition nécessaire.

Le métabolisme des protéines est figuré schématiquement. La notion de « caisse commune » ou « pool » a été introduite grâce à l'utilisation des traceurs. Les protéines sont en renouvellement constant à partir du pool des acides aminés. L'urée est une étape (terminale chez l'homme) de la dégradation des acides aminés. Une partie peut du reste resservir pour la synthèse de ces acides.



**Dans 10 ou 100 ans?**

## LE RÉACTEUR A « FUSION »

IL y a une vingtaine d'années que l'on sait que l'énergie des étoiles, et de notre soleil en particulier, est engendrée par des réactions nucléaires particulières que l'on désigne sous le nom de « réactions thermonucléaires » parce qu'elles exigent, pour se produire, des températures extrêmement élevées. Ces réactions dites de « fusion » sont en quelque sorte l'inverse de réactions de « fission » dont il a été parlé jusqu'ici.

Dans les deux cas, la libération de l'énergie résulte d'une perte de masse entre les éléments initiaux et finaux.

On sait que tous les noyaux atomiques sont formés de protons et de neutrons. Si on calcule la masse d'un noyau déterminé en additionnant celles des protons et des neutrons, on arrive toujours à un total supérieur à la masse effective du noyau. La différence est appelée « défaut de masse » et représente l'énergie qu'il faudrait dépenser pour dissocier les constituants. Ce « défaut de masse » fournit en quelque sorte une mesure de la stabilité du noyau.

Pour l'évaluer d'une manière plus précise et pouvoir comparer les noyaux entre eux, il faut tenir compte du nombre de particules élémentaires présentes, et par conséquent diviser ce défaut de masse par ce nombre. On obtient ainsi « l'énergie de liaison par particule » qui varie suivant les noyaux. On voit sur le graphique que ce sont les éléments moyens qui sont les plus stables car les particules élémentaires ont abandonné, pour les former, la fraction la plus forte de leur masse. L'examen de cette courbe fournit l'explication du dégagement d'énergie par la « fission » comme par la « fusion ».

Dans la fission d'un noyau d'uranium, par exemple, il se forme deux noyaux d'éléments de poids moyen. Dans ces nouveaux noyaux, l'énergie de liaison par particule est supérieure à ce qu'elle était dans l'uranium et le nouvel arrangement des neutrons et des protons a entraîné un dégagement d'énergie qui représente à peu près le millième de la masse de l'uranium.

A l'autre bout de la courbe, imaginons que

l'on rapproche deux noyaux de deutérium (hydrogène lourd) comportant chacun un proton et un neutron pour constituer un noyau d'hélium à deux protons et deux neutrons. La différence dans les énergies de liaison est alors bien plus considérable que tout à l'heure. Ici c'est le centième de la masse qui disparaît pour donner de l'énergie. On voit l'intérêt pratique que peuvent présenter de semblables processus.

### Centaines de millions de degrés

Seule la fission a fait jusqu'ici l'objet d'applications industrielles parce qu'elle se maîtrise aisément. Il n'en est pas de même de la fusion ; pour que deux noyaux d'éléments légers se rapprochent suffisamment pour réagir, il faut qu'ils soient animés de vitesses considérables, afin que, en se heurtant, ils surmontent les forces de répulsion de leurs charges électriques. Accélérer des particules par des machines électriques revient beaucoup trop cher et à un rendement déplorable. La seule solution est de porter les éléments à très haute température pour que l'agitation thermique communique aux noyaux une vitesse élevée. A l'intérieur des étoiles règnent normalement de telles températures. Sur Terre, on ne sait encore les obtenir que par des déflagrations atomiques, réactions incontrôlables.

Cela ne veut pas dire que les explosions de bombes H, jusqu'ici purement destructrices, ne seraient pas capables de rendre des services appréciables pour des travaux de génie civil de grande envergure, creusant des lacs, ouvrant des isthmes, disloquant des banquises, aménageant la planète pour une exploitation plus complète de ses ressources naturelles (1). Mais, sans doute, avant qu'on entreprenne de tels travaux serons-nous parvenus à domestiquer les réactions thermonucléaires pour l'exploitation contrôlée de l'énergie qu'elles délivrent ; c'est dans cette voie que travaillent activement les laboratoires de plusieurs pays.

(1) Voir : Les applications de l'explosion thermonucléaire par Camille Rougeron (Berger-Levrault, éditeur).

Le problème est ardu, car il faut opérer à des températures de plusieurs millions de degrés, peut-être plusieurs centaines de millions, et pouvoir maintenir ces températures pendant un temps suffisamment long pour que les noyaux réagissent en grand nombre et libèrent au moins autant d'énergie qu'on en a dépensé pour les chauffer. L'excitation de réactions thermonucléaires dans les isotopes lourds de l'hydrogène, c'est-à-dire dans le deutérium ou dans un mélange de deutérium et de tritium, théoriquement la moins difficile à obtenir, exige au moins un million de degrés. Or, au laboratoire, les parois de l'enceinte contenant le gaz seraient volatilisées bien avant qu'on ait pu dépasser quelques dizaines de milliers de degrés. Il faut trouver le moyen de chauffer du deutérium de telle manière que lorsque les particules acquièrent de la vitesse, elles n'aillent pas communiquer leur énergie thermique aux parois du récipient.

### Expériences russes

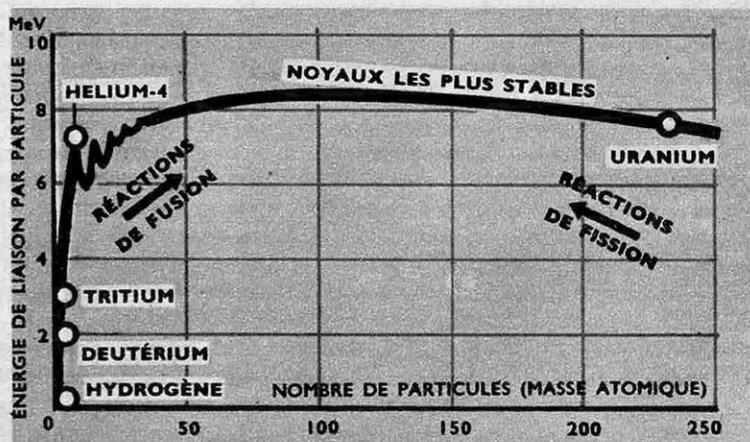
Dans une conférence faite en avril dernier, lors d'une visite au centre britannique de Harwell, par le physicien russe Igor Kurchatov, celui-ci a décrit certaines expériences originales effectuées en U.R.S.S. avec l'espoir d'amorcer des réactions thermonucléaires. Elles consistaient essentiellement à faire passer dans le gaz raréfié étudié une puissante décharge électrique pour que le champ magnétique ainsi créé constitue une sorte de barrière au mouvement des noyaux vers les parois du récipient. Effectivement, pendant l'établissement de la décharge, la colonne ionisée se concentre dans l'axe du tube (effet de « pincement ») de sorte que l'élévation de température qui se produit alors n'intéresse plus les parois pendant un temps très court. Les savants russes ont utilisé des intensités allant jusqu'à 2 millions d'ampères

et des puissances instantanées maximum atteignant parfois 40 millions de kilowatts. Il semble qu'ils aient pu obtenir ainsi des températures de l'ordre du million de degrés, les plus élevées qui aient été réalisées jusqu'ici au laboratoire. Des émissions de neutrons ont été constatées ; elles auraient pu être l'indice de réactions thermonucléaires, mais une étude serrée des conditions de leur production a montré qu'il fallait les attribuer à d'autres phénomènes mal connus.

Bien que ces expériences, qui sont les seules sur lesquelles on ait jusqu'ici fourni une relation détaillée, se soldent par un bilan négatif, il semble qu'il y ait là une voie d'attaque prometteuse du problème de la libération contrôlée de l'énergie thermonucléaire. L'idée d'utiliser un champ magnétique intense pour « envelopper » les éléments que l'on veut faire réagir et éliminer les pertes thermiques semble avoir été retenue par plusieurs groupes de chercheurs dès avant la publication des travaux russes. Pourra-t-on avec eux obtenir des réactions stationnaires ou seulement transitoires comme le voulaient les Russes ? Personne ne peut le dire, pas plus que l'on ne peut encore dire si le « réacteur à fusion » sera réalisé dans dix ans ou dans cent ans, s'il est à notre portée avec nos connaissances actuelles, ou s'il faudra d'autres découvertes fondamentales dans le domaine de la physique pour qu'il devienne une réalité.

Les matières premières des réactions thermonucléaires apparaissent inépuisables sur terre : le tritium peut être fabriqué à partir du lithium-6 bombardé par des neutrons rapides ; le deutérium se trouve en quantité considérable dans l'eau des océans. Avec l'uranium et le thorium, les besoins énergétiques du monde se trouvent déjà couverts pour un millier d'années. Les réactions thermonucléaires résoudreont le problème de l'énergie pour nos plus lointains descendants.

Les réactions nucléaires qui livrent de l'énergie sont celles qui aboutissent à des noyaux plus stables qu'au départ. Les éléments de poids moyen étant les plus stables, on voit donc qu'il est possible d'obtenir de l'énergie non seulement par « fission » d'éléments lourds comme l'uranium, mais aussi par « fusion » d'éléments légers, par exemple en produisant de l'hélium à partir du deutérium et du tritium.





*Ces mains mécaniques très précises → sont utilisées pour manipuler à distance les produits fortement radioactifs. Dans la pratique, l'opérateur est abrité par un mur et ne voit ses pinces que dans un miroir ou sur un écran de télévision.*

*← Cet accoutrement futuriste permet de faire des mesures de radioactivité dans des zones particulièrement dangereuses. Les antennes frontales sont celles d'un poste émetteur à l'aide duquel le technicien transmet ses observations à distance.*

# L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE METTRA-T-ELLE

**L**E contrôle de l'action biologique des radiations pose des problèmes graves qui conditionnent le développement de l'utilisation de l'énergie atomique. Au cours de ces dernières années, les sources de radiations se sont multipliées et leur nombre, aussi bien que leur puissance, ira en s'accroissant au cours des prochaines décades. Dès les premiers emplois des rayons X, il était apparu que les radiations avaient une action nocive sur les tissus vivants et qu'une exposition non contrôlée aux rayons X, ou à ceux émis par les substances radioactives, pouvait entraîner des lésions graves, brûlures cutanées et altérations sanguines. A la suite d'expositions répétées pendant de longues périodes, on pouvait voir apparaître des cancers.

Ce n'est qu'au cours de ces dernières années que le grand public a commencé à entrevoir les dangers nouveaux auxquels il risque d'être exposé. Il apprenait en même temps la construction d'un nombre sans cesse croissant



# L'HUMANITÉ EN PÉRIL ?

de réacteurs de puissance, la production en quantité pratiquement illimitée de radioisotopes, la réalisation d'explosifs nucléaires et d'expériences connexes en diverses régions du monde. Simultanément, la grande presse portait à sa connaissance, souvent en les exagérant, les menaces qui en résultaient.

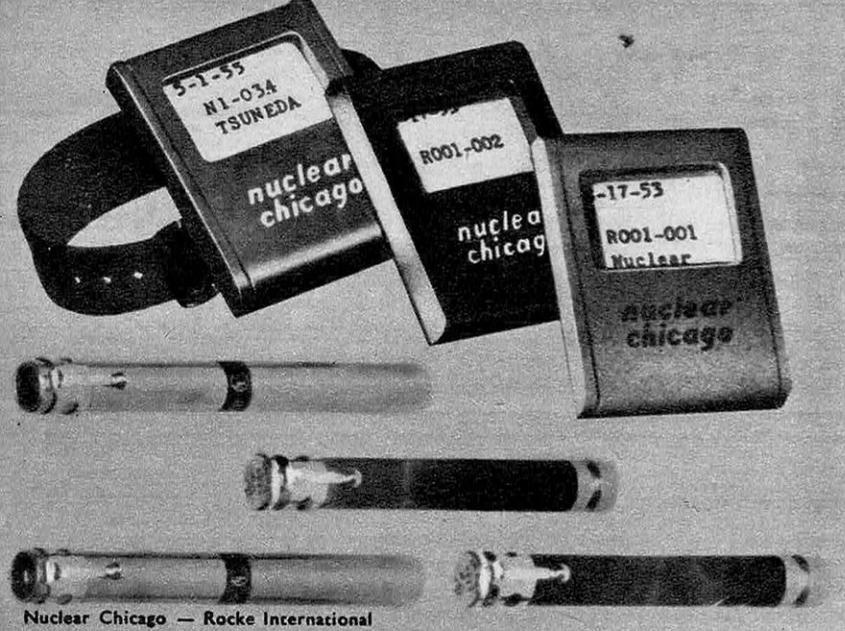
Les effets biologiques des radiations ont fait l'objet de nombreux travaux. Il faut reconnaître que la compréhension du mécanisme des actions immédiates et tardives des rayonnements sur les tissus vivants n'a pas progressé aussi rapidement que nos connaissances de l'atome. Il semble cependant que nous soyons déjà à même de prévenir les périls et d'envisager l'utilisation de l'énergie atomique sans danger pour l'homme et sa descendance.

## **Les radiations agissent par ionisation**

Les radiations ne peuvent agir sur les tissus qu'elles traversent qu'en leur abandonnant une partie de l'énergie qu'elles transportent, et

cette absorption d'énergie se fait essentiellement par le mécanisme de l'ionisation : un atome frappé par une radiation perd un ou plusieurs électrons, qui ne tardent pas à se fixer sur les atomes voisins. Il en résulte ce que l'on appelle des « ions » portant des charges positive et négative. Comme l'état d'ionisation des molécules au sein du protoplasme cellulaire conditionne dans une large mesure les phénomènes chimiques qui sont à la base même de la vie de la cellule, il est aisé de comprendre que, suivant le nombre et la densité des paires d'ions formées, et suivant leur localisation dans le protoplasme, le noyau ou les chromosomes cellulaires, ainsi que les fonctions de la cellule puissent être plus ou moins profondément altérés, jusqu'à entraîner parfois sa mort.

Il est malheureusement très difficile de suivre le devenir des ions créés au sein des cellules vivantes et de déterminer leur rôle dans les altérations fonctionnelles observées. A la



← Les doses reçues par le personnel se mesurent à l'aide de ces stylos ou de ces plaquettes. Les stylos sont de petites chambres d'ionisation dont on lit la décharge. Les plaquettes contiennent des films photographiques que les radiations  $\gamma$  impressionnent.

« Contrôleurs » de radio-activité utilisés aux usines de Windscale (Angleterre). Dans les centres nucléaires, ils servent à s'assurer que les employés n'emportent pas de traces de radioactivité sur leurs mains, chaussures ou habits en quittant les ateliers. →

réaction primaire, qui constitue l'ionisation, fait suite une série de réactions secondaires : modification des mécanismes enzymatiques, libération de substances toxiques, etc. Suivant la nature des radiations, corpusculaires ou électromagnétiques, les effets de l'ionisation sont dispersés ou condensés et les conséquences sur le devenir de la cellule très diverses : mort, lésions passagères, lésions définitives qui ne se manifestent parfois que très tardivement, en particulier lorsque les éléments du noyau qui portent les propriétés héréditaires sont atteints.

Lorsqu'il s'agit d'organismes pluricellulaires, les réactions secondaires peuvent supprimer la fonction d'un organe essentiel ou aboutir à la formation de produits toxiques qui passent dans la circulation générale et entraînent la mort.

Généralement, la mort d'un mammifère soumis à une irradiation intense ne se produit qu'après plusieurs jours, suivant un mécanisme complexe. C'est ainsi qu'après des expositions portant sur l'ensemble du corps, la destruction des cellules du revêtement intestinal, qui sont particulièrement sensibles aux radiations ionisantes, peut entraîner des ulcérations de la muqueuse avec hémorragies, et permettre aux bactéries du contenu intestinal de passer dans le sang, ce qui fait apparaître des septicémies fatales.

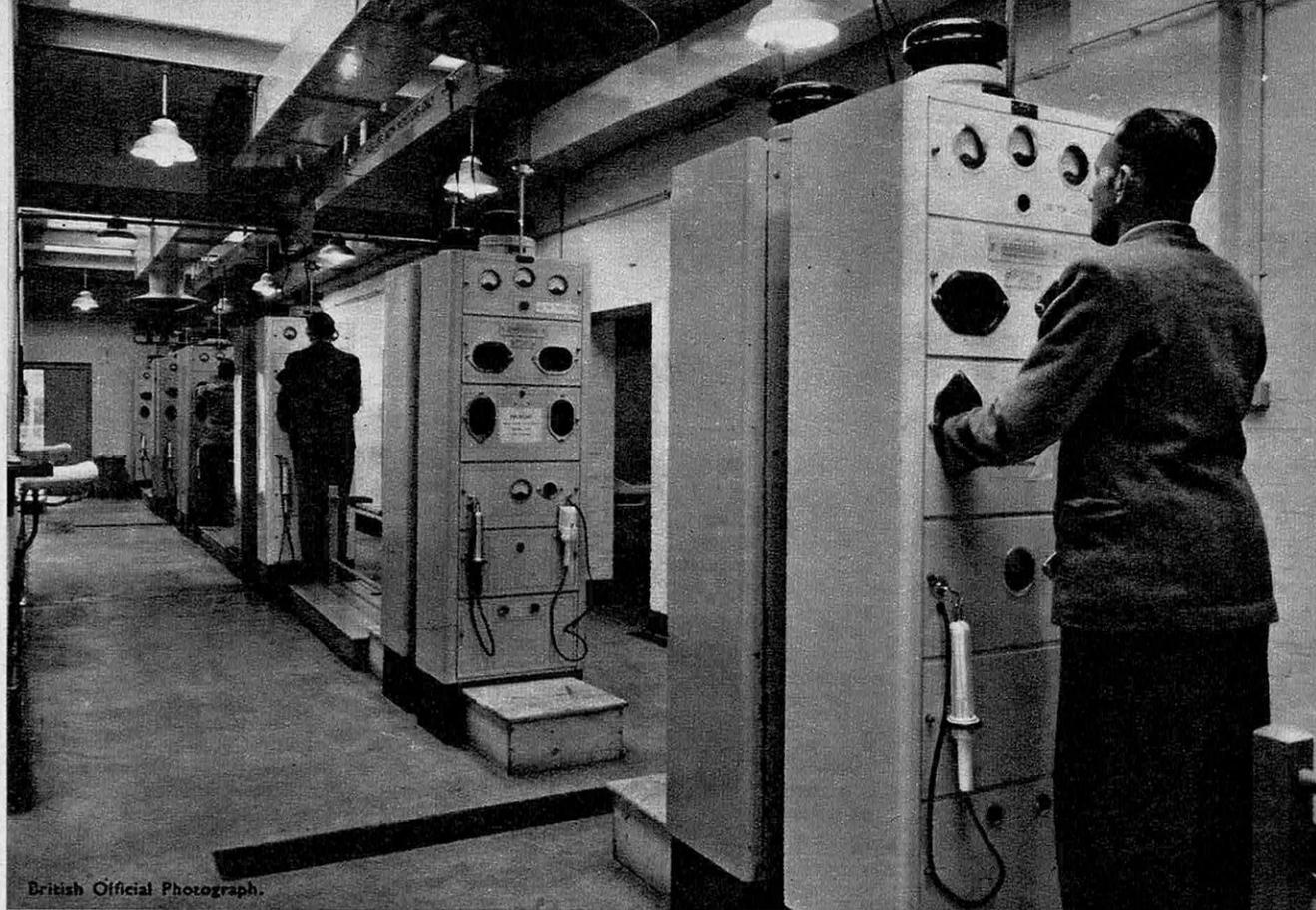
### L'irradiation des gènes provoque des mutations

Lorsque l'irradiation est localisée, ses effets sont liés à la nature et à la radiosensibilité des tissus. Les glandes sexuelles et les gamètes sont

parmi ceux qui sont le plus facilement et le plus dangereusement lésés. Le matériel héréditaire, contenu à l'intérieur des noyaux des cellules reproductrices, peut subir des modifications plus ou moins profondes. La brisure des chromosomes entraîne généralement la mort prochaine de la cellule. Les lésions peuvent être plus discrètes tout en étant encore plus graves dans leurs effets et ne comporter que la modification d'un gène. Cette modification n'apparaîtra qu'au moment de la reproduction cellulaire : il y aura eu une « mutation », dont les effets n'apparaîtront que chez les descendants.

Les radiations ionisantes sont actuellement le meilleur moyen dont nous disposons pour produire expérimentalement des mutations, et c'est grâce à elles que des progrès rapides ont pu être réalisés en génétique au cours des trente dernières années. Les recherches ont d'abord porté sur la mouche *Drosophile*. Elles ont été poursuivies récemment chez la souris. Nos connaissances en génétique humaine sont encore assez réduites, l'expérimentation étant irréalisable et la durée de vie d'une génération beaucoup trop longue, mais le mécanisme des conséquences génétiques de l'action des radiations ne peut être très différent chez l'homme de ce qu'il est dans la série animale. Il convient donc d'être particulièrement soucieux de ce péril.

Un fait important résulte du mécanisme même de la production de mutations par les radiations ionisantes. Lorsque la radiation a modifié la structure du gène, l'altération produite est définitive et ne peut être réparée. Dans ces conditions, on conçoit que les effets héréditaires des radiations soient cumulatifs,



British Official Photograph.

c'est-à-dire que toute dose reçue s'ajoute, dans son action, aux doses antérieures. Il n'est pas possible d'établir une dose limite au-dessous de laquelle aucune action nocive des radiations ne se manifesterait.

### Où est le seuil du danger ?

Il en va autrement avec les effets des radiations sur la partie périssable du corps (ou soma). La réparation des lésions causées au matériel cellulaire protoplasmique est possible, et on peut concevoir une dose limite au-dessous de laquelle l'irradiation n'entraîne pas de conséquences graves. Cette dose limite est d'ailleurs difficile à établir de façon précise, car un grand nombre de facteurs interviennent dans l'évolution des lésions et nous n'avons pas actuellement une expérience complète des effets tardifs, chez l'homme, d'une exposition ou d'une série d'expositions aux radiations.

Dans les cellules au repos, les lésions peuvent rester inapparentes pendant des années et ne donner lieu à des effets perceptibles qu'au moment où la cellule, pour des raisons qui, la plupart du temps, nous échappent, entre en voie de division. C'est alors que peut se manifester une multiplication anarchique de la cellule et l'apparition d'un cancer. Par contre,

les cellules en voie de division sont très sensibles à l'action des radiations, et cette sensibilité est utilisée pour des fins thérapeutiques. Au lieu de provoquer le cancer, les radiations servent ici à son traitement, des doses convenables de radiations tuant les cellules en voie de multiplication rapide, sans léser les cellules saines du tissu.

### Le danger de contamination se généralise

Les sources de radiations sont de deux sortes :

- celles qui agissent par voie externe ; elles comprennent les appareils générateurs de rayons X, les accélérateurs de particules, les réacteurs nucléaires, enfin les substances radioactives ; l'irradiation peut être soit totale, soit localisée ;
- celles qui donnent lieu à une irradiation par voie interne : ce sont des substances radioactives fixées à l'intérieur du corps, soit comme constituants normaux de l'organisme, soit à la suite de leur pénétration par voie pulmonaire, digestive ou cutanée ; elles provoquent généralement des irradiations localisées et limitées aux organes où sont fixés les éléments nocifs. Le danger, pratiquement limité, avant 1939,

aux médecins radiologistes et à leurs assistants ainsi qu'aux chercheurs des laboratoires, se trouve maintenant très largement étendu : personnel travaillant au voisinage des réacteurs ou dans les usines chimiques préparant ou traitant le combustible nucléaire, utilisateurs de radioisotopes, mineurs exposés à l'absorption par inhalation, ou ingestion, de substances radioactives naturelles accompagnant l'uranium dans ses gisements. Déjà, avant la dernière guerre, le nombre élevé des cancers du poumon constaté chez les mineurs de Joachimsthal avait montré le danger de semblables exploitations.

### Les déchets radioactifs

L'élimination des déchets (produits de fission ou d'irradiation des matériaux) résultant du fonctionnement des réacteurs nucléaires est une autre source de dangers pour l'ensemble de la population. Cette élimination pose des problèmes très difficiles, non encore entièrement résolus, surtout si l'on envisage la masse dont il faudra se débarrasser lorsque l'utilisation de l'énergie atomique aura atteint son plein développement. Pour les produits de fission à période très brève, on les stocke jusqu'à ce qu'ils deviennent inoffensifs ; les produits de longue période, particulièrement dangereux, sont rejetés dans les océans, enfermés dans des récipients étanches. Plus récemment, on a cherché à enfouir ces derniers dans les failles naturelles profondes de sols capables de les fixer chimiquement, ce qui évite leur diffusion dans les eaux souterraines. Quels que soient les procédés utilisés, il est pratiquement impossible d'empêcher une certaine pollution des eaux ainsi que de l'atmosphère au voisinage des lieux où des produits radioactifs sont manipulés. Il peut en résulter une contamination des rivières, du sol, des aliments, qui constitue un danger d'irradiation pour l'ensemble de la population.

Un péril analogue existe du fait des explosions atomiques expérimentales. Chassées dans la troposphère et dans la stratosphère, les poussières chargées d'atomes radioactifs retombent lentement, au gré de circonstances atmosphériques. Les mesures faites dans le monde entier ont heureusement montré qu'en dehors d'une zone voisine du point d'éclatement, l'accroissement de la radioactivité et ses dangers génétiques pour la population du monde sont jusqu'à présent négligeables.

Tout récemment, l'attention du corps médical a été attirée sur les conséquences que la multiplicité des examens radiologiques pouvait avoir sur la dose de radiations reçues par la population dans son ensemble. En ce qui concerne les dangers génétiques, seule est à retenir la dose qui parvient aux organes

génitaux. Elle peut être assez importante s'il s'agit d'examen du bassin ou de l'abdomen, elle est bien moindre pour les examens du thorax ou de la tête. Les recherches effectuées en Angleterre ont montré que les examens par rayons X augmentaient au minimum de 22 % la dose normalement reçue du fait des radiations naturelles.

### Nous vivons dans un flux de radiations naturelles

Le progrès de nos connaissances en matière de radiations ionisantes a en effet permis de montrer que l'atmosphère, au voisinage du sol, est continuellement traversée par un flux de radiations au sein duquel nous vivons. Elles proviennent des rayons cosmiques, des substances radioactives naturelles contenues dans la croûte terrestre et dans l'atmosphère (radon). Le flux total est variable d'un point à l'autre en fonction de l'altitude (accroissement du rayonnement cosmique) et de la composition du sol (roches granitiques) : il peut parfois être accru dans certains bâtiments, particulièrement dans ceux construits en granite. D'autre part, à l'intérieur du corps humain existent certains éléments radioactifs naturels, tels que le potassium-40 (émetteur de rayons  $\gamma$ ), le carbone-14, de provenance atmosphérique (émetteur de radiations  $\beta$  de faible énergie) et, en très faibles quantités, les éléments de la famille du radium, généralement fixés dans le squelette.

### La dose maximum admissible

Pour les travailleurs professionnels exposés, qui ne constituent qu'une très faible partie de la population, le danger génétique s'efface devant celui des lésions somatiques. Le problème est de déterminer la « dose maximum admissible », celle qui ne ferait courir aucun risque à leur santé pendant toute leur vie.

Deux commissions internationales travaillant en liaison avec les congrès internationaux de Radiologie se sont penchées sur les divers aspects du problème : la Commission internationale de protection contre les radiations et la Commission internationale des unités radiologiques. La dose adoptée en 1953, maintenue en 1956, mais toujours susceptible de révision, est de 0,3 r (röntgen) débités en 7 jours consécutifs. Pour bien marquer qu'il s'agit d'une dose maximum, la Commission a indiqué qu'il convenait de ne pas dépasser une dose totale de 50 r jusqu'à l'âge de 30 ans, puis des doses additionnelles de 50 r par dizaines d'années, aboutissant ainsi à une dose cumulative de 200 r à l'âge de 60 ans.

Rappelons, pour fixer les idées, que les

Ce scaphandre alimenté en air pur à l'aide du tube visible à droite, est porté à Harwell par les ouvriers usinant des métaux radioactifs et toxiques.

radiations naturelles correspondent à une dose annuelle variable entre 0,1 et 0,2 r suivant les régions.

Soulignons bien que cette notion de dose maximum admissible n'est valable que lorsqu'on considère un nombre relativement faible d'individus, ceux qui sont exposés de par leur profession. L'absence de données scientifiques sur le nombre de mutations produites chez l'homme par une dose déterminée de radiations rend impossible l'évaluation exacte du danger qui résulterait, pour l'espèce humaine, d'une augmentation de l'irradiation de l'ensemble de la population. Il est certain, puisque, comme nous l'avons dit, aucune restauration du matériel héréditaire n'est possible, que toute dose s'ajoutant pour l'ensemble de la population à celle liée au fond inéluctable des radiations naturelles, est héréditairement nocive. Généticiens et médecins, s'efforcent néanmoins de déterminer dans quelle mesure on peut admettre sans danger pour l'homme et sa descendance une élévation du taux des radiations. C'est ainsi que la Commission internationale de protection contre les radiations a été amenée à émettre l'avis provisoire que, réduites au 1/10 de leur valeur, les normes admises pour les sujets professionnellement exposés pourraient s'appliquer sans dommage important à une fraction de la population n'excédant pas 1/50 de sa valeur totale, située au voisinage des zones dangereuses et soumise à un contrôle sanitaire. Pour l'ensemble de la population, la dose reçue ne devrait pas dépasser 1/100 de cette même dose maximum. Cette dose complémentaire serait, pour la durée d'une vie humaine, du même ordre de grandeur que celle reçue du fait des radiations naturelles.

### Les remèdes actifs

On a cherché à prévenir et à guérir les lésions. Les travaux se divisent en deux catégories : les unes tendent à remédier à la lésion directe cellulaire ; les autres cherchent à stimuler les processus de réparation, en particulier au niveau des organes formant les globules sanguins.

Dans le premier groupe rentre l'utilisation de substances très diverses comme le cyanure et ses dérivés, les substances sulfhydrylées, comme la cystéine, le glutathion, la cystéamine. Malheureusement, ces corps n'agissent que s'ils sont présents au moment de l'irradiation et leur administration doit être préventive.



Dans le deuxième groupe, l'action se produit soit en cours d'irradiation, soit immédiatement après. Il s'agit soit d'une protection de la rate pendant l'exposition aux radiations, soit d'injections, après l'irradiation, de tissu splénique et de moelle osseuse.

Pour lutter contre l'infection qui fait souvent suite aux irradiations massives, les antibiotiques se sont montrés efficaces et ont permis des survies suivies de récupération complète.

Bien que poursuivies très activement, ces recherches ne sont pas encore sorties du cadre expérimental. Les difficultés d'application ne permettent pas d'apprécier exactement les services que pourraient rendre les remèdes proposés en cas d'irradiation massive d'une fraction notable de la population. Leur intérêt ne peut cependant être nié.

## Les remèdes passifs

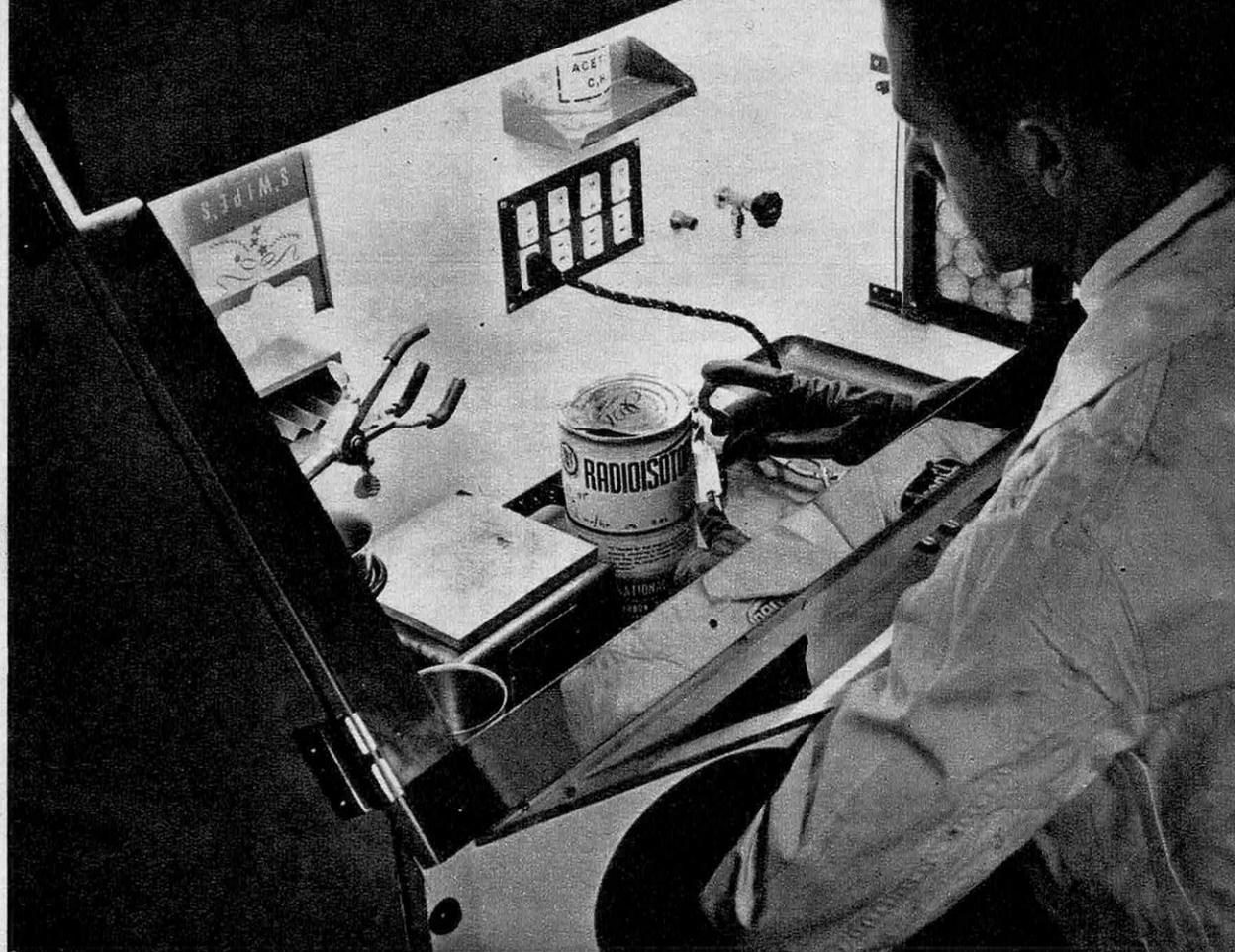
Pour ceux que leur profession expose aux radiations, la protection comporte en premier lieu un contrôle des conditions de travail. Toute radiation inutile doit être supprimée. Suivant la qualité des radiations, les blindages absorbants seront soit du béton, dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs mètres, soit des écrans de métaux lourds, plomb et autres. Les substances radioactives que l'on stocke doivent être enfermées dans des récipients étanches. Celles que l'on est amené à manipuler doivent, sauf exception, l'être à distance, à l'aide d'appareillages automatiques ou manuels. Dans les mines d'uranium, une ventilation énergique est indispensable pour diminuer la concentration du radon dans l'atmosphère et pour supprimer les poussières dangereuses. Enfin, dans tous les endroits où les radiations peuvent causer un danger, leur existence doit être clairement signalée. Un service de dépistage et de mesure doit être constamment en alerte.

Par ailleurs, toutes les doses reçues par les personnes professionnellement exposées doivent être mesurées. On utilise pour cela des films photographiques portés par les sujets au cours de leur travail. Les films sont développés à la fin de chaque semaine et leur noircissement permet de chiffrer la dose qui est inscrite sur une fiche personnelle faisant connaître la quantité totale des radiations reçues à toute époque. Des ionomètres de poche sont utilisés pour des mesures précises pendant les périodes plus brèves.

Il est également recommandé de procéder à un examen d'embauche très sérieux, comportant particulièrement un examen du sang et de ses éléments figurés, globules et plaquettes. Cet examen sanguin complet doit être répété tous les six mois pour dépister un éventuel dépassement de la dose maximum. Normalement, on ne doit pas constater de modifications de la formule sanguine ; elles ne peuvent apparaître que chez des sujets particulièrement sensibles qu'il faut repérer et éliminer.



**Le transport des radioisotopes** se fait souvent par avion car certains ont une vie tellement courte qu'il faut réduire au maximum les délais de livraison pour pouvoir les utiliser à temps. Il va sans dire que leur emballage est soumis à des exigences très strictes : aucune radiation ne doit s'en dégager et il doit être rigoureusement étanche. La nature et l'importance du revêtement protecteur utilisé dépendent des radiations émises, de leur nature et de leur pouvoir de pénétration. On ne saurait en effet exiger les mêmes précautions pour les corps qui émettent des rayons  $\gamma$  très pénétrants et ceux qui n'émettent que des particules  $\beta$  qu'une simple feuille d'aluminium arrête.



*Les boîtes à gants sont utilisées pour manipuler des radioisotopes toxiques par radiation ou chimiquement. La dépression qui y règne évite toute sortie de poussière radioactive dangereuse pour le personnel.*

La protection des populations dans leur ensemble comporte le contrôle de la contamination éventuelle du milieu ambiant. Le problème de la pollution de l'eau de boisson et des rivières utilisée pour l'irrigation des terres cultivées, celui de la pollution de l'atmosphère et des retombées radioactives constituant un danger de contamination du sol et des aliments, sont à étudier sérieusement. Des mesures périodiques de la radioactivité de l'eau, de l'atmosphère sont indispensables. Elles seules permettent de fixer les conditions du déversement de résidus radioactifs.

Une attention particulière doit être accordée à toutes les possibilités statistiquement significatives d'irradiation de la population. En particulier, il convient d'éviter soigneusement les répétitions inutiles des examens radiologiques et, pour les traitements par les radiations, de réduire au minimum les temps et les doses.

La mise en œuvre des moyens de protection exige la formation d'un personnel technique

et sanitaire spécialisé, et des réalisations matérielles souvent coûteuses, mais indispensables. Les dangers de contamination de l'atmosphère, des océans, des fleuves internationaux et la possibilité de modifications génétiques intéressant la race humaine entière, posent le problème sur le plan international. Aussi, l'Organisation Mondiale de la Santé, l'Organisation Internationale du Travail, l'UNESCO, l'Organisme de Météorologie Internationale s'en préoccupent-ils. Diverses commissions internationales, comme le Comité Scientifique pour l'étude de l'action biologique des radiations ionisantes créé par l'Assemblée Générale des Nations Unies, des groupes de travail en liaison avec l'Union Européenne occidentale et l'Euratom, s'efforcent de faire adopter des réglementations communes. Elles sont indispensables pour permettre à l'humanité de profiter, dans les meilleures conditions de sécurité et de bien-être, des larges voies ouvertes par l'exploitation de l'énergie atomique.

**Professeur Louis BUGNARD**

Cette bibliographie, établie d'après le stock d'ouvrages sélectionnés de notre librairie, ne représente qu'une partie des ouvrages figurant dans notre catalogue général.

## OUVRAGES SCIENTIFIQUES

**A PHYSIQUE (Encyclopédie française)**, publiée sous la direction de Louis de Broglie. La méthode en physique et l'histoire. Les instruments de la recherche. Concepts de base de la physique mathématique. La mécanique classique. Electro-magnétisme et optique. Thermodynamique. Atomistique. La relativité. La mécanique ondulatoire. Applications de la physique quantique. La physique nucléaire. Constantes fondamentales. Aperçus des méthodes de mesures et résultats. 508 p. 25 x 30, 240 fig., 16 pl. hors texte. Reliure mobile. 1956 ..... 7.380 »

**LA PHYSIQUE MODERNE. (Castelfranchi G.) Tome I :** Les molécules dans les gaz. Fluctuations. Le mouvement brownien. La relativité. L'électron et les métaux. L'isotopie. Les rayons X et la structure cristalline. La radioactivité et la charge nucléaire. Théorie des quanta et niveaux d'énergie. 400 p. 16 x 25, 130 fig., 3<sup>e</sup> édit., 1949, relié..... 1.730 »

**Tome II :** Effet Zeeman. Spin. Structure atomique. Chaleurs spécifiques. Photo-électricité. Effet Compton. Le magnétisme atomique. Mécanique ondulatoire et statistiques. Physique nucléaire et bombe atomique. Rayons cosmiques. Astrophysique. 422 p. 16 x 25, 97 fig., 6 pl., 1949 relié 1.870 »

**ÉLÉMENTS DE PHYSIQUE MODERNE THÉORIQUE. (Guinier G.) Tome I :** Mécanique ondulatoire. 160 p. 15,5 x 24, 61 fig., 1949..... 1.200 »

**Tome II :** Structure de l'atome et du noyau. 148 p. 15,5 x 24, 63 fig., 8 pl., 1950..... 1.200 »

**Tome III :** Statistiques quantiques. 173 p. 15,5 x 24, 43 fig., 1951..... 1.200 »

**PHÉNOMÈNES RADIOACTIFS ET INTRODUCTION A LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE. (Gueben G.)** Introduction. Ionisation des gaz. Les méthodes d'observation de la radioactivité. Le rayonnement  $\alpha$ . Le rayonnement  $\beta$ . Le rayonnement  $\gamma$ . Conséquences de l'étude des rayons  $\beta$ , et  $\gamma$ . Les rayons secondaires. L'évolution radioactive. Caractères particuliers de la chimie des radioéléments. Isotopie des radioéléments. Loi de déplacement. Tableau des radioéléments naturels. Généralisation de la notion d'isotopie. Séparation des isotopes. Etude particulière des radioéléments naturels. Actions du rayonnement des corps radioactifs. Chocs nucléaires. Champ de force autour du noyau. Théorie de Gamow. Désintégration artificielle des éléments. Les faits fondamentaux. Les accélérateurs de particules. Les neutrons. Désintégration artificielle des éléments. Résultats. Désintégration de l'uranium et du thorium par les neutrons. Les fissions nucléaires. Réactions en chaîne et réacteurs. Les éléments transuraniens. Quelques applications des radioisotopes. Relations entre la radioactivité, la géologie et la physique du globe. Le rayonnement cosmique. Quelques propriétés des noyaux atomiques. Les constituants nucléaires. Structure nucléaire. Techniques de mesure des rayonnements. 311 p. 16 x 25, 135 fig., 5 tabl., 2<sup>e</sup> édit. 1956... 4.200 »

**INTRODUCTION A LA PHYSIQUE ATOMIQUE. (Oidemberg O.)** Structure de la matière révélée par la chimie. Gaz. Structure de l'électricité. Structure électronique des atomes. Structure nucléaire. Nature ondulatoire de la matière. 468 p. 16,5 x 24, nbr. fig., 1951, relié..... 4.320 »

**PHYSIQUE ATOMIQUE (Coll. A.C. N° 302). (Rouault M.)** Structure granulaire de la matière et constituants de l'atome. Quanta et photons. Éléments de théorie de Bohr. Mécanique ondulatoire. Structure électronique des atomes et émission des raies spectrales. Les atomes complexes. 220 p. 11 x 16,5 56 fig., 1955..... 300. »

**ÉLÉMENTS DE MÉCANIQUE ONDULATOIRE. (Mott N.-F. et Y. Cauchois.)** Les équations différentielles de la mécanique ondulatoire. L'équation d'onde de Schrödinger. Groupes d'ondes et principe d'incertitude. Etats stationnaires. Le problème de plusieurs corps. Probabilités de transition. Développements relativistes et problèmes nucléaires. 152 p. 14 x 22, 30 fig., 1953, relié..... 1.000 »

**LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE ET LES NOUVELLES THÉORIES QUANTIQUES. (Haas A.)** Traduit de l'allemand par Bogros A. 292 p., 14x19, 1937..... 720. »

**MÉCANIQUE ONDULATOIRE DES SYSTÈMES DE CORPUSCULES. (Broglie L. de.)** Rappel des résultats classiques de la mécanique rationnelle. La mécanique ondulatoire. Principes généraux, la théorie du centre de gravité. Exemples de problèmes, aperçu sur les méthodes de perturbation. Systèmes contenant des particules de nature identique. Systèmes contenant des particules de même nature, applications et compléments. 220 p. 16,5x25, 2<sup>e</sup> édit., 1950..... 1.730 »

**LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE (Coll. A.C. N° 268). (Kahan Th. et Kwal B.)** 220 p. 11 x 16,5, 18 fig., 1953..... 300 »

**LES APPLICATIONS DE LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE à l'étude de la structure des molécules.** Réunions d'études et de mises au point tenues sous la présidence de Louis de Broglie. Divers auteurs. 223 p. 15,5 x 24. Nbr. fig. et 2 pl. hors texte, 1953..... 1.600 »

**LES ACCÉLÉRATEURS DE PARTICULES.** Réunions d'études et de mises au point de différents auteurs tenues sous la présidence de Louis de Broglie. Le générateur électrostatique moderne du type Van de Graaf. Accélérateurs de particules système Greinacher. Les accélérateurs à champ magnétique. Les accélérateurs linéaires. Sur les pertes par rayonnement dans les accélérateurs à induction électromagnétique. Accélérateurs du type « synchrotron ». Le cyclotron. Le bétaatron. Les accélérateurs linéaires. Principes et réalisations. Applications. 324 p. 13,5 x 21,5, nbr. fig., 1950..... 1.600 »

**PHYSIQUE NUCLÉAIRE (Coll. A.C. N° 290). (Kahan T.)** 220 p. 11 x 17, 61 fig., 1954..... 300 »

**RAYONNEMENTS DE PARTICULES ATOMIQUES, ÉLECTRONS ET PHOTONS. (Berthelot A.)** Généralités. Théorie des chocs corpusculaires élastiques. Généralités sur les atomes en mouvement. Variation de l'état de charge des atomes légers en mouvement. Ralentissement des particules atomiques légères. Ionisation par les particules en mouvement. Le parcours des particules atomiques légères. Interaction coulombienne des particules atomiques légères avec les noyaux. Ralentissement des fragments de fissions. Les électrons : considérations générales et résultats théoriques; aspects expérimentaux. Les photons. 192 p., 17x25,5, 101 fig., 1956..... 1.800 »

**THÉORIE GÉNÉRALE DES PARTICULES A SPIN (Méthode de fusion). (Broglie L. de.)** 209 p. 16 x 25, 7 fig., 2<sup>e</sup> édit. revue et corrigée, 1954..... 2.500 »

**LA PHYSIQUE NOUVELLE ET LES QUANTA. (Broglie L. de.)** 303 p. 13 x 19,5..... 325 »

**ONDES, CORPUSCULES, MÉCANIQUE ONDULATOIRE. (Broglie L. de.)** 164 p. 14 x 19,5, n. n. fig. et illust ..... 259 »

**NOUVELLES PERSPECTIVES EN MICROPHYSIQUE. (Broglie L. de.)** Questions scientifiques indépendantes de l'interprétation de la mécanique ondulatoire. Exposés se rapportant à l'interprétation de la mécanique ondulatoire. Exposés sur des questions d'ordre général. Exposés se rapportant à l'histoire des sciences. 356 p., 14 x 19, 2 fig., 1 photo hors texte, 1956..... 780 »

**CONTINU ET DISCONTINU EN PHYSIQUE MODERNE.** (Broglie L. de.) 268 p. 14 × 19..... 432 »

**MATIÈRE ET LUMIÈRE.** (Broglie L. de.) 342 p. 14 × 19..... 461 »

**PHYSIQUE ET MICROPHYSIQUE.** (Broglie L. de.) 370 p. 14 × 19, 8 pl. .... 547 »

**LES ATOMES.** (Perrin J.) 296 p. 14,5 × 19,5, 17 fig., 3<sup>e</sup> édit. 1948..... 432 »

**VIE ET TRANSMUTATION DES ATOMES.** (Thibaud J.) 312 p. 14 × 19, 24 pl., 66 fig., 4<sup>e</sup> édit. révisée, 1952. 1.094 »

**ÉNERGIE ATOMIQUE ET UNIVERS.** (Thibaud J.) 342 p. 14 × 19, 93 fig., 20 pl. Nouvelle édition 1946..... 570 »

**NOTIONS MODERNES SUR L'ATOME ET LA VALENCE.** (Travers A.) Introduction à la théorie électronique de l'atome. Théorie électronique de l'atome. Classification périodique des éléments. La détermination des niveaux d'énergie. La valence et la théorie électronique de l'atome. Le noyau de l'atome. 205 p. 16 × 24, nbr. fig., 2 pl., 1950..... 864 »

**ATOMES, SPECTRES, MATIÈRE.** (Cauchois Y.) Propriétés et structure de la matière. Les particules. Spectres optiques d'atomes et quanta. Notions élémentaires de mécanique ondulatoire appliquées aux électrons atomiques. Les spectres de rayons X et la structure de la matière. 636 p. 14 × 19, 119 fig., 8 pl., 1952..... 1.728 »

**L'ÉLECTRON.** (Darmois E.) Electrons libres et électrons liés. Microscope électronique. Théorie électronique des métaux. Production de la lumière. Propriétés magnétiques et électriques de la matière. 235 p. 14,5 × 19, 92 fig., 1947..... 348 »

**PROTONS, NEUTRONS, NEUTRINOS.** (Solomon J.) 228 p. 16 × 25, 28 fig., 1939..... 960 »

**LA PHYSIQUE DU NOYAU ATOMIQUE.** (Heisenberg W.) Traduit de l'allemand par Peyrou Ch. La théorie atomique de l'antiquité jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Molécule et atomes. La radioactivité et les constituants du noyau. Les états normaux des noyaux atomiques. Les forces nucléaires. Les processus nucléaires. Technique expérimentale de la physique nucléaire. Applications pratiques de la physique nucléaire. 224 p. 14 × 19, 40 fig., 5 tableaux, 1954..... 720 »

**LE NOYAU ATOMIQUE.** (Berthelot A.) Conférences-rapports sur les recherches récentes en physique. 38 p. 16 × 25, 6 fig., 1948..... 95 »

**THÉORIE ÉLECTRONIQUE DES CORPUSCULES ET exposé synthétique de ses conséquences.** (Filloux L.) 42 p. 16 × 25, 6 fig., 1947..... 210 »

## CHIMIE NUCLÉAIRE

**NOTIONS ÉLÉMENTAIRES DE CHIMIE GÉNÉRALE, A LA LUMIÈRE DES THÉORIES MODERNES.** (Pascal P.) Evolution des idées sur la nature de la matière. La structure lacunaire et discontinue des choses. Structure de l'atome matériel. Modification de la structure nucléaire. Structures moléculaires et ioniques. Macrostructures. Mécanisme du groupement des atomes et des ions. La cinétique chimique. Evolution et équilibre des systèmes chimiques. Représentation graphique des systèmes. Etude particulière des solutions liquides. Systèmes dispersés. 550 p. 16 × 24, 243 fig., 7 pl. hors texte documents fotogr., 1953..... 3.600 »

**CHIMIE PHYSIQUE.** (Emschwiller G.) :

**Tome I :** Thermodynamique chimique. Equilibres gazeux. L'affinité chimique. Notions de thermodynamique statistique. 440 p. 14 × 19,5, 35 fig., 1951..... 1.152 »

**Tome II :** Etude des solutions. Les solutions d'électrolytes. Thermodynamique des cellules électrochimiques. Phénomènes de surface. Les solutions colloïdales. 519 p. 14 × 19, 65 fig., 1951..... 1.260 »

**Tome III :** Cinétique chimique. Structure des molécules et liaisons chimiques. 53 p. 14 × 19, 66 fig., 1951.... 1.728 »

**CHIMIE THÉORIQUE.** (Renault R.) Structure discontinue de la matière. Constitution des atomes. L'affinité chimique. 276 p. 13,5 × 21,5, 52 fig., 1952..... 860 »

**CHIMIE NUCLÉAIRE.** (Renault R.) Le nombre d'Avogadro. Les nouvelles mécaniques. Les corpuscules électrisés. L'atome nucléaire. La radioactivité. Transmutations. Radioactivité artificielle. Le noyau atomique. Chimie physique nucléaire et mécanique ondulatoire. Applications. 208 p. 16 × 25, 46 fig., 1 pl. en coul., 1949..... 1.300 »

**CHIMIE PHYSIQUE NUCLÉAIRE APPLIQUÉE.** (Errera J.) Généralités. Réactions nucléaires. Réactions de fission en chaîne. Réactions de fusion (réactions thermo-nucléaires). Applications militaires de l'énergie nucléaire. Méthodes de détection des radiations nucléaires. Préparation des radioisotopes. Utilisation

des isotopes stables et radioactifs. Mesure de précaution à prendre en manipulant des matériaux radioactifs. Applications de méthodes de chimie physique nucléaire en science pure et appliquée. 226 p. 16,5 × 25, 69 fig., 1955..... 2.100 »

**MÉCANIQUE ONDULATOIRE ET CINÉTIQUE CHIMIQUE** (Réunions d'études et de mises au point tenues sous la présidence de L. de Broglie). Divers auteurs. Vitesse de réaction et collisions moléculaires. Complexe activé. Les radicaux libres dans les flammes et explosions. Calcul et estimation de la hauteur des barrières de potentiel. Les bases de la cinétique électrochimique. Structure moléculaire et réactivité chimique des hydrocarbures organiques conjugués. Les facteurs de la cinétique des réactions dans l'état solide. Etude de réactions chimiques par diffraction électronique. Sur le problème de la vitesse des réactions chimiques. Cinétique des échanges isotopiques homogènes et hétérogènes. Le processus élémentaire de la réaction organique hétérolytique en phase liquide. L'isomérisation des spiranes thermochromes. 204 p. 16 × 24, très nbr. fig., 1955..... 1.500 »

**VOCABULAIRE DE CHIMIE-PHYSIQUE ET DE CHIMIE NUCLÉAIRE.** (Charles V.) Avec applications numériques à l'usage des élèves-ingénieurs. 394 p. 14 × 22, 123 fig., 185 applications numériques entièrement résolues, 1951. 940 »

## THÉORIE DE LA RELATIVITÉ

**LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE ET GÉNÉRALE.** Exposé élémentaire. La relativité et le problème de l'espace. (Einstein A.) Traduit de l'allemand par Solovine M. 180 p. 14,5 × 22, 1954..... 1.300 »

**QUATRE CONFÉRENCES SUR LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ** (faites à l'Université de Princeton). (Einstein A.) Traduit de l'allemand par Solovine M. Espace et temps dans la physique prérelativiste. Théorie de la relativité restreinte. Théorie de la relativité générale (1<sup>re</sup> et 2<sup>e</sup> parties). 100 p. 15,5 × 24, 1955..... 600 »

**SUR L'ÉLECTRODYNAMIQUE DES CORPS EN MOUVEMENT.** (Einstein A.) Traduit de l'allemand par Solovine M. Introduction. Partie cinématique. Partie électrodynamique. L'inertie d'un corps dépend-elle de sa capacité d'énergie ? 60 p. 11,5 × 18, 1955..... 300 »

**L'ÉTHÉR ET LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ.** La géométrie et l'expérience. (Einstein A.) Traduit de l'allemand par Solovine M. 30 p. 14 × 22, 3<sup>e</sup> édition revue, 1953..... 300 »

**MONSIEUR TOMPKINS AU PAYS DES MERVEILLES.** (Gamow G.) 108 p. 16 × 22, 29 illustr. 1954..... 460 »

**MONSIEUR TOMPKINS S'EXPLORE LUI-MÊME.** (Gamow G.) Traduit de l'américain par Moles A. 130 p. 16 × 22, 24 illustr., 1955..... 480 »

**MONSIEUR TOMPKINS EXPLORE L'ATOME** (Gamow G.) 120 p. 16 × 22, 24 illustr..... 440 »

**UN, DEUX, TROIS... L'INFINI.** (Gamow G.) Traduit de l'américain par Gauzit M. En jonglant avec les nombres. Einstein, l'espace et le temps. Le microcosme. Macrocosme. 282 p. 16 × 22, 116 illustr., 1955..... 780 »

**LA CRÉATION DE L'UNIVERS.** (Gamow G.) Evolution ou permanence. La grande expansion. La fabrication des atomes. La hiérarchie des condensations. Vie privée des étoiles. 165 p. 16 × 22, 40 fig. 1956..... 540 »

## OUVRAGES TECHNIQUES

**L'ONDE ÉLECTRIQUE.** Numéro spécial consacré à l'énergie nucléaire.

**Tome I.** Piles atomiques et radioisotopes. 170 p. 21 × 31, nbr. fig. Photos et plans 1955..... 600 »

**Tome II.** Accélérateurs de particules et appareils de physique nucléaire. 166 p. 21 × 31, nbr. fig. Photos et plans 1955 600 »

**QUELQUES TECHNIQUES ACTUELLES EN PHYSIQUE NUCLÉAIRE.** (Thibaud J., Cartan L. et Comparaat P.) Méthode de la trochoïde, électrons positifs, spectrographie de masse, isotopes, compteurs de particules à amplification linéaire, compteurs de Geiger et Muller. 276 p. 16 × 25, 154 fig., 12 pl., 1938..... 1.100 »

**MACHINES ATOMIQUES.** Cyclotrons et autres accélérateurs. Piles atomiques. (Nahmias M.E.) 310 p. 14 × 22, 28 h.t., 102 fig., 1 dépliant, 1950, cart..... 1.500 »

**COUCHES MOLÉCULAIRES. CYCLOTRON ET NOUVELLE BIOLOGIE.** (Taylor, Lawrence et Langmuir.) Traduit par Nageotte E. 196 p. 12 × 19, 16 hors-texte, 2<sup>e</sup> édit. augmentée d'une note sur le cyclotron 1948..... 315 »

**L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET SES APPLICATIONS.** (Kahan T.) 261 p. 14 × 19, 58 fig., 16 pl 1949..... 518 »

**LA THÉORIE ÉLÉMENTAIRE DES PILES ATOMIQUES.** (Ducrocq A.) Facteur de multiplication. Côté critique. Puissance d'une pile. Production de plutonium. Pile enrichie. Calcul d'une bombe atomique. Le problème de l'énergie atomique léger. 32 p. 16 x 25, 1950..... 140 »

**LA RADIOACTIVITÉ AU SERVICE DE LA CHIMIE ET DE L'INDUSTRIE.** (Daudel P.) Généralités sur la méthode des indicateurs radioactifs. Application de la méthode des isotopes à l'étude des mécanismes des réactions chimiques. Les réactions d'échange. L'emploi de la méthode des indicateurs radioactifs en analyse chimique. Les radioindicateurs dans l'industrie. 216 p. 12 x 19, nomb. fig. 1955..... 800 »

**LES APPLICATIONS DE L'EXPLOSION THERMONUCLÉAIRE.** (Rougeron C.) La naissance de la bombe. Ses effets. L'hydraulique thermonucléaire. La climatologie thermonucléaire. L'industrie chimique et extractive. La guerre terrestre. La guerre navale. La guerre aérienne. Economie et puissance. 308 p. 14 x 19, 1956..... 600 »

**LES ISOTOPES RADIOACTIFS. AGENTS THÉRAPEUTIQUES ET PRODIGIEUX « ESPIONS ».** (Lot F.) Zoé et la production des isotopes. Les isotopes en médecine et chirurgie. Investigations biologiques. La lutte contre les insectes. Les applications industrielles des radio indicateurs. De la toxicologie à l'archéologie. Dangers des radioisotopes et mesures de protection. Présent et avenir des isotopes. 187 p. 12 x 19, 21 fig., 1952..... 480 »

**TABLES NUMÉRIQUES DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE.** (Martin Ch.-N.) Textes français-anglais, anglais-français. 258 p. 15,5 x 24, 3 fig., 14 tables, 1954..... 1.800 »

**MAPPEMONDE DES ATOMES RÉUNIS.** (Morosoff N.) Nouveau mode inédit de présentation de la structure individuelle de l'atome par l'ensemble structural de tous les éléments de la classification périodique. Contenant une documentation atomistique moderne très étendue. La carte 43 x 43, 2 couleurs, sur papier plastifié, 1955..... 960 »

**NOMENCLATURE GÉNÉRALE DES ÉLÉMENTS avec leurs poids atomiques. Rayons atomiques et isotopes limités.** (Djounkovsky et Davos.) In-8°, avec 23 fig., en dépliant, 1947..... 145 »

## OUVRAGES DE VULGARISATION

**LES CONQUÊTES DE LA PENSÉE SCIENTIFIQUE.** (Cahen G.) L'évolution des théories scientifiques. Les théories de la relativité. L'électromagnétisme classique. La gravitation universelle. Structure atomique de la matière. Energie, chaleur et travail. Le hasard et ses lois. Théorie cinétique. Matière et électricité. Radioactivité. Théorie des quanta. L'architecture de l'atome. La mécanique ondulatoire. Principe d'incertitude. L'alchimie moderne. L'univers. Le déterminisme. L'homme devant la science. 296 p. 14 x 22, 10 fig., 1953... 880 »

**L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE. Libération et exploitation.** (Nahmias M.-E.) Structure et constitution de la matière. Projectiles et engins de transmutation. La fission nucléaire. Les piles atomiques. Les bombes atomiques. Matières premières de l'industrie atomique. Centrales et propulseurs nucléaires. Applications des radioéléments. Recherches atomiques. 302 p. 13,5 x 19,5, 203 fig., 1954..... 840 »

**HISTOIRE DE L'ATOME.** (Feinberg J.-G.) Traduit par Stephen Spriell. 314 p. 14,5 x 19, 18 fig., 1954..... 690 »

**ÉNERGIE ATOMIQUE ET UNIVERS.** (Thibaud J.) Enquête sur le réel, L'apparence de l'univers. Le fond des choses. 344 p. 14 x 19,5, 93 fig., 20 pl. photos. Nouvelle édition augmentée d'un chapitre complémentaire, 1955..... 570 »

**LES HORIZONS DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE.** (Ducrocq A.) Notre chimie classique. Le noyau et ses constituants. Les métaux fissibles. Piles à uranium. La fabrication du plutonium. Vers la centrale électrique atomique. Locomotives atomiques. La propulsion atomique dans la marine. Fusées utilisant l'énergie atomique. Moteurs à réaction. L'énergie atomique et l'aviation. La bombe atomique. Applications médicales de l'énergie atomique. L'énergie atomique dans l'univers. Age atomique. 279 p. 13 x 19, 1949..... 430 »

**L'ATOME, UNIVERS FANTASTIQUE.** (Ducrocq A.) Les 101 éléments. Structure du noyau. La radioactivité. La genèse du noyau. L'électron sur sa trajectoire. L'atome d'hydrogène. La quantification magnétique. Un panorama général de tous les atomes. L'atome devant la chimie. L'atome et la lumière. Vers une théorie complète. 192 p. 12 x 18,5, 30 fig., 16 pl., photos hors texte. Nouvelle édit. 1956..... 575 »

**LA SCIENCE A LA CONQUÊTE DU PASSÉ.** (Dubrocq A.) Rien n'efface rien. La datation par le carbone 14. Premier bilan du carbone 14. Le calendrier géologique. L'eau, vivant univers radioactif. Le langage des atomes. Une science passionnante : la dendrochronologie. Les traces de l'homme. 286 p. 14,5 x 20,5, 44 fig., 17 photos hors texte, 1955..... 900 »

**CIVILISATION DE L'ATOME.** (Dietz D.) (Coll. « Découvertes ».) Traduit et adapté de l'américain par Texier M. 242 p. 16 x 21,5, 27 fig., 36 photos hors texte. 1955 690 »

**L'ATOME, MAÎTRE DU MONDE.** (Martin Ch.-N.) 222 p. 14 x 20, 8 photos hors texte. Cartonné, 1956..... 780 »

**ÈRE ATOMIQUE AN 12.** (Gordon Dean.) Traduit de l'anglais par Lafaurie S. Naissance de l'industrie atomique aux États-Unis et dans le monde. 274 p. 14 x 20, 8 photos hors texte, 1954..... 690 »

**LE ROMAN DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE.** (Fortier M.) 126 p. 11,5 x 17,5, 34 fig., 8 pl. photos couleurs hors texte, 1955, cartonné..... 270 »

**L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE.** (Prévoit V.) (Coll. « Connaître ») Naissance de l'âge atomique. De la mine au kilowatt. L'équipement thermonucléaire des quatre grands. Note documentaire. 32 p. 14 x 17,5, 11 fig., 1955..... 190 »

**LA PROTECTION CONTRE LES RADIOÉLÉMENTS.** (Genaud P.) Le danger. Interaction des radiations avec la matière. Effets biologiques des radiations ionisantes. Les doses de tolérance. Mesures de protection. 88 p. 14 x 22, 25 fig., 16 pl., 1951..... 580 »

## PROSPECTION DE L'URANIUM

**MINÉRAUX RADIOACTIFS ET TERRES RARES.** (Bruet Ed.) Radioactivité naturelle. Uranium. Gisements mondiaux. Minéraux et roches. Détection de la radioactivité. Moyens pratiques de prospection. Terres rares. Séparations des éléments. Analyses. 250 p. 14 x 23, 19 croquis, 1952..... 1.000 »

**LA PROSPECTION DE L'URANIUM. Manuel pratique à l'usage de tous.** (Commissariat à l'Énergie Atomique.) Méthodes générales de prospection. La prospection de l'uranium. Ses particularités. Description sommaire des principaux minéraux contenant de l'uranium. Détection des minerais d'uranium à l'aide du compteur de Geiger-Müller. Caractères essentiels des gisements d'uranium. 62 p. 16,5 x 24, 13 fig., 3 pl. dont 2 hors texte, en couleurs, 1955..... 450 »

**A LA RECHERCHE DE L'URANIUM.** (Brosses R.) Les composants de l'univers : géologie, minerais d'uranium, régions favorables en France. Le détecteur de radioactivité : compteur Geiger. La réalisation d'un détecteur (gammaphone) compléments. 48 p. 15 x 21, nbr. fig., 6 schémas, 1956..... 300 »

## UNE DOCUMENTATION INDISPENSABLE

Notre catalogue général (4<sup>e</sup> édition), 4.500 titres d'ouvrages techniques et scientifiques sélectionnés, 400 pages, 13,5 x 21 : Franco : 200 francs

Les commandes doivent être adressées à la **LIBRAIRIE SCIENCE ET VIE**, 24, rue Chauchat, Paris (9<sup>e</sup>). Elles doivent être accompagnées de leur montant, soit sous forme de mandat-poste (mandat-carte ou mandat-lettre), soit sous forme de virement ou de versement au **Compte Chèque Postal de la Librairie : Paris 4192-26**. Au montant de la commande doivent être ajoutés les frais d'expédition, soit 10 % (avec un minimum de 30 fr.). Envoi recommandé : 25 fr. de supplément. (Étranger, 45 fr.).

**Il n'est fait aucun envoi contre remboursement.**

**LIBRAIRIE SCIENCE ET VIE, 24, rue Chauchat, PARIS-9<sup>e</sup>**

# IL N'EST PAS TROP TARD

*pour commencer chez vous*

## les études les plus profitables

grâce à l'enseignement par correspondance de l'École Universelle, la plus importante du monde, qui vous permet de faire chez vous, en toutes résidences, à tout âge, aux moindres frais, des études complètes dans toutes les branches, de vaincre avec une aisance surprenante les difficultés qui vous ont jusqu'à présent arrêté, de conquérir en un temps record le diplôme ou la situation dont vous rêvez. L'enseignement étant individuel, vous avez intérêt à commencer vos études dès maintenant.

**Demandez l'envoi gratuit de la brochure qui vous intéresse :**

- Br. 68.600 : Les premières classes : 1<sup>er</sup> degré, 1<sup>er</sup> cycle : Cours préparatoire (Cl. de 11<sup>e</sup>), Cours élémentaire (Cl. de 10<sup>e</sup> et 9<sup>e</sup>), Cours moyen (Cl. de 8<sup>e</sup> et 7<sup>e</sup>). Admission en 6<sup>e</sup>.
- Br. 68.605 : Toutes les classes, tous les examens : 1<sup>er</sup> degré, 2<sup>e</sup> cycle : Cl. de fin d'études, Cours Complémentaire, C.E.P., Brevets, C.A.P. — 2<sup>e</sup> degré : de la 6<sup>e</sup> aux Cl. de Lettres sup. et de Math. spéc., Baccalauréats, B.E.P.C., Bourses. — Cl. des Collèges techniques, Brevets d'ens. Industr. et commerc., Bacc. techn.
- Br. 68.602 : Les études de Droit : Capacité, Licence. — Carrières juridiques (Magistrature, Barreau, etc.).
- Br. 68.614 : Les études supérieures de Sciences : P.C.B., Certificats d'études sup. (Math. gén., M.P.C., S.P.C.N., etc.), Agrégation et C.A.P.E.S. de Math.
- Br. 68.623 : Les études supérieures de Lettres : Propédeutique, Licence, Agrégation, C.A.P.E.S.
- Br. 68.627 : Grandes Ecoles et Ecoles spéciales : Polytechnique, Ecoles normales sup., Chartes, Ecoles d'Ingénieurs, militaire (Terre, Air, Mer), d'Agriculture, de Commerce, Beaux-Arts, Administration (E.N.A., France d'Outre-Mer), Ecoles professionnelles, Ecoles spéciales d'Assistants sociaux, Infirmières, Sages-Femmes.
- Br. 68.604 : Carrières de l'Agriculture (Régiisseur, Directeur d'exploitation, Chef de culture, Assistant, Aviculteur, Apiculteur, etc.), des Industries agricoles (Laiterie, Sucrerie, Meunerie, etc.), du Génie rural (Entrepreneur, conducteur-Chef de chantier, Radiesthésiste), de la Topographie (Géomètre expert).
- Br. 68.615 : Carrières de l'Industrie et des Travaux publics : Electricité, Mécanique, Automobile, Aviation, Métallurgie, Mines, Travaux publics, Architecture, Métier, Béton armé, Chauffage, Froid, Chimie, Dessin industriel, etc. ; C.A.P. et B.P. ; Préparations aux fonctions d'ouvrier spécialisé, Agent de Maîtrise, Contramaître, Dessinateur, Sous-Ingénieur.
- Br. 68.603 : Carrière du Commerce : Employé de bureau, Sténodactylo, Employé de Banque, Publicitaire, Secrétaire, Secrétaire de Direction, etc. ; Prép. aux C.A.P. et B.P. ; Publicité, Banque, Bourse, Assurances, Hôtellerie.
- Br. 68.616 : Carrières de la Comptabilité : Caissier, Chef Magasinier, teneur de livres, Comptable, etc., Préparation aux C.A.P. d'Alde-Comptable ; au C.P. de Comptable, au diplôme d'Expert-Comptable.
- Br. 68.607 : Pour devenir Fonctionnaire (France et Outre-Mer : jeunes gens et jeunes filles, sans diplôme ou diplômés) dans les P.T.T., les Finances, les Travaux publics, les Banques, la S.N.C.F., la Police, le Travail et la Sécurité Sociale, les Préfectures, les Justices de Paix, la Magistrature, etc. ; Ecole Nationale d'Administration.
- Br. 68.617 : Les emplois réservés aux militaires, aux victimes de guerre et aux veuves de guerre : examens de 1<sup>er</sup>, de 2<sup>e</sup> et de 3<sup>e</sup> catégories ; examens d'aptitude technique spéciale.
- Br. 68.610 : Orthographe, Rédaction, Versification, Calcul, Dessin, Ecriture.
- Br. 68.619 : Calcul extra-rapide et calcul mental.
- Br. 68.606 : Carrières de la Marine marchande : Admiss. dans les Ec. nat. de la Mar. march. ; Elève-Officier au long cours ; Lieutenant au cabotage ; Capitaine de la Marine Marchande ; Patron au bornage ; Capitaine et Patron de Pêche ; Officier Mécanicien de 2<sup>e</sup> ou 3<sup>e</sup> classe ; Certificats Internationaux de Radio de 1<sup>er</sup> ou de 2<sup>e</sup> classe (P.T.T.).
- Br. 68.624 : Carrières de la Marine de Guerre : Ecole Navale ; Ecole des Elèves Officiers ; Ecole des Elèves Ingénieurs mécaniciens ; Ecole du Service de Santé ; Commissariat et Administration ; Ecole de Maistrance ; Ecole d'Apprentis marins ; Ecoles de Pupilles ; Ecoles techniques de la Marine ; Ecole d'application du Génie maritime.
- Br. 68.618 : Carrières de l'Aviation : Ecoles et carrières militaires ; Ec. de l'Air, Ec. de Sous-Offic., élèves-Offic., personnel navigant ; Mécaniciens et Télémécaniciens ; — Aéronautique civile ; — Carrières administratives ; Industrie aéronautique. — Hôtesse de l'Air.
- Br. 68.601 : Radio : Certificats Internationaux ; Construction, dépannage.
- Br. 68.626 : Langues vivantes : Anglais, Espagnol, Allemand, Russe, Italien, Arabe. — Tourisme.
- Br. 68.608 : Etudes musicales : Solfège, Harmonie, Composition, Direction d'orchestre ; Piano, Violon, Flûte, Clarinette, Accordéon, Guitare, Instruments de Jazz ; Chant ; Professorats publics et privés.
- Br. 68.620 : Arts du Dessin : Dessin pratique, Cours universel de Dessin, Anatomie artistique, Illustration, Figurines de mode, Composition décorative, Aquarelle, Gravure, Peinture, Pastel, Pansin ; Professorats.
- Br. 68.625 : Carrières de la Couture et de la Mode : Coupe, Couture (Flou et Tailleur), Lingerie, Corset, Broderie ; C.A.P., B.P., professorats officiels ; Préparations aux fonctions de Seconde Main, Première Main, Vendeuse-Retoucheuse, Modiste, Coupeur hommes, Chemisier, etc. — Enseignement Ménager : Monitorat et Professorat.
- Br. 68.611 : Secrétariats (Secrétaire de direction, Secrétaire particulier, Secrétaire de médecin, d'avocat, d'homme de lettres, Secrétaire technique) ; Journalisme ; l'Art d'écrire (Rédaction littéraire) et l'Art de parler en public (Eloquence usuelle).
- Br. 68.621 : Cinéma : Technique générale, Décoration, Maquillage, Photographie, Prise de vues, Prise de son.
- Br. 68.609 : Coiffure et soins de beauté.
- Br. 68.628 : Carrières féminines.

La liste ci-dessus ne comprend qu'une partie de nos enseignements. N'hésitez pas à nous écrire. Nous vous donnerons gratuitement tous les renseignements et conseils qu'il vous plaira de nous demander.

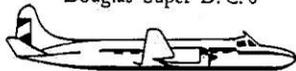
**DES MILLIERS D'INÉGALABLES SUCCÈS**

remportés chaque année par nos élèves dans les examens et concours officiels prouvent l'efficacité de l'enseignement par correspondance de

**L'ÉCOLE UNIVERSELLE, 59, bd Exelmans, PARIS-XVI<sup>e</sup>**  
Chemin de Fabron, NICE - II, Place Jules-Ferry, LYON



Douglas Super D. C. 6



D. H. 110 Héron,



Nord 2501 Noratlas

## Quelques heures vous séparent de l'Afrique

L'Afrique, cette inconnue... où le charme insolite des paysages demeurés vierges et sauvages voisine avec les réalisations les plus modernes de l'urbanisme et de l'industrie.

Dans ce continent d'avenir dont la prodigieuse évolution constituera le fait dominant du XX<sup>e</sup> siècle, d'innombrables possibilités se révéleront à vous :

- ★ Homme d'affaires, vous y nouerez de fructueux contacts et y découvrirez de nouveaux marchés à conquérir.
- ★ Touriste, les plaisirs les plus rares vous y attendent : nature tourmentée, site d'une beauté fascinante, coloris somptueux et inhabituels, territoires de grande chasse où le gibier abonde.

Pour votre voyage en Afrique, un choix s'impose : Utilisez l'U. A. T., la C<sup>ie</sup> de transports aériens qui a spécialisé ses services sur ce continent. Équipée des quadrimoteurs les plus modernes, l'U. A. T. vous fera voyager sous le signe de la perfection

# U. A. T.



AÉROMARITIME

3, Boulevard Malesherbes. Paris 8<sup>e</sup>. Tel : Anjou 78-04  
RENSEIGNEMENTS ET BILLETS DANS TOUTES AGENCES DE VOYAGES AGRÉÉES.

*la plus importante compagnie privée française de transport aérien*