

SCIENCE ET VIE

NUMÉRO
HORS SÉRIE
200 F



L'AGE ATOMIQUE

**MÉCANIQUE ONDULATOIRE
DU PHOTON ET THÉORIE
QUANTIQUE DES CHAMPS.**

Broglie (Louis de) 2.500 Frs

**URANIUM 235 ET PLUTO-
NIUM 239**

Comparat (P.) Ecochard (F.) Lafoucrière (J.)
et Thibaud (J.)..... 400 Frs

**NOMENCLATURE GÉNÉRALE
DES ÉLÉMENTS AVEC LEURS
POIDS ATOMIQUES, RAYONS
ATOMIQUES ET ISOTOPES
LIMITÉS.**

Djounkowsky et Kavos..... 100 Frs

GAUTHIER-VILLARS

55, Quai des Grands Augustins
PARIS VI*

Envoi du catalogue sur demande, contenant un
chapitre consacré à la physique et à l'énergie
nucléaire

**RAYONS X - RADIOACTIVITÉ
RADIO-ISOTOPES**

**COMPTEURS DE
GEIGER-MULLER**

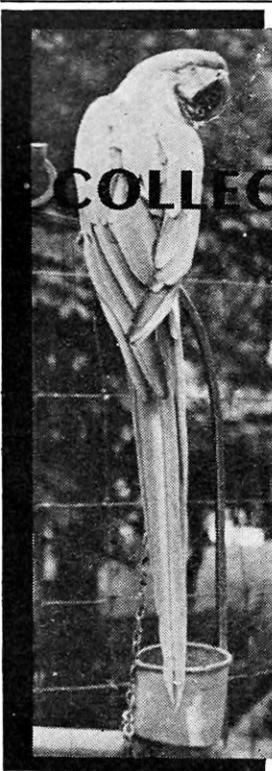
MESURES DE LABORATOIRES
CONTROLES INDUSTRIELS
APPLICATIONS MÉDICALES

Protection du Personnel
Comptage d'impulsions
Mesures d'épaisseur
Mesures de niveaux
Prospection, Dosimétrie, etc.,.

M E S C O

122, av. du G^{al}-Leclerc - Paris-14^e

- Tél. : LEC. 81-87 -



**GRANDS OUVRAGES
SCIENTIFIQUES**

DE LA

COLLECTION IN-4° LAROUSSE

*

LA VIE DES ANIMAUX

DEUX VOLUMES PAR LE
PROFESSEUR BERTIN

LA SCIENCE

SES PROGRÈS, SES Appli-
CATIONS SOUS LA DIRECTION
DE G. URBAIN ET M. BOLL

ASTRONOMIE

LES ASTRES, L'UNIVERS
PAR L. RUDAUX ET G. DE
VAUCOULEURS

*

CHEZ TOUS LES LIBRAIRES

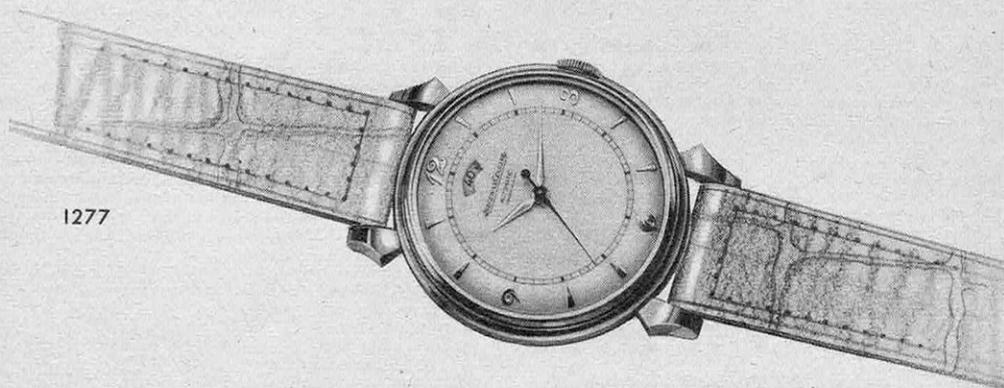


JAEGER-LE COULTRE

HORLOGERIE DE LUXE



1272



1277

Les avantages du remontage automatique sont maintenant indiscutés et assurent à la montre une régularité de marche exceptionnelle. Pour ceux qui aiment contrôler ce remontage, nous avons créé le premier modèle avec indicateur de réserve de marche.

Atomistique
Applications
Vulgarisation

LIBRAIRIE SCIENCE ET VIE

24, RUE CHAUCHAT, PARIS-IX^e - TÉL. : TAITBOUT 72-86

PHYSIQUE MODERNE CHIMIE NUCLÉAIRE

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. 16x25, 130 fig. 3^e édit. 1949, relié. 1.500 »
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. 16x25, 97 fig., 6 pl. relié. 1.880 »

ÉLÉMENTS DE PHYSIQUE MODERNE THÉORIQUE (Guinier G.).

Tome I : Mécanique ondulatoire, 160 p. 15,5x24, 61 fig., 1949 1.050 »
Tome II : Structure de l'atome et du noyau. 310 p. 15,5x24, 63 fig., 8 pl., 1950 1.050 »

TRAITÉ DE CHIMIE PHYSIQUE (Eggert J. et Hock L.).

Traduction française par Boll M.
Tome I : Energétique. Atomistique. Quanta. 106 p. 16x25, 12 fig., nouv. tir. 1947 200 »
Tome II : L'atome. La molécule. Les états de la matière. 374 p. 16x25, 109 fig. nouv. tir. 1947 630 »
Tome III : La réaction chimique. 374 p. 16x25, 54 fig., nouv. tir. 1947 630 »

QUELQUES TECHNIQUES ACTUELLES EN PHYSIQUE NUCLÉAIRE (Thibaud J., Cartan L. et Comparat P.).

Méthode de la tricoïde, électrons positifs, spectrographie de masse, isotopes, compteurs de particules à amplification inéaire, compteurs de Geiger et Muller. 276 p. 16x25, 154 fig., 12 pl., 1938 750 »

PHÉNOMÈNES RADIOACTIFS ET INTRODUCTION A LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE (Gueben G.), 262 p. 16x25, 107 fig. 1947. 1.300 »

ÉLÉMENTS DE MÉCANIQUE ONDULATOIRE (Heitler W.). Bases expérimentales. L'équation d'onde. L'atome d'hydrogène. Moment angulaire. Effet Zeeman. Spin. Le problème des deux électrons. Théorie des perturbations. Classification des éléments. Théorie des liaisons chimiques homopolaires. La valence. 132 p. 14x23, 37 fig., 1949. 400 »

MÉMOIRES SUR LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE (Schrödinger E.). 342 p. 16,5x24, 14 fig., 1933. 360 »

LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE ET LES NOUVELLES THÉORIES QUANTiques (Haas A.). Traduit de l'allemand par Brogros A. 292 p. 14x19, 1937. 500 »

MÉCANIQUE ONDULATOIRE DES SYSTÈMES DE CORPUSCULES (Broglie L. (de)). 220 p. 16,5x25, 2^e édit. 1950 1.650 »

MÉCANIQUE ONDULATOIRE DU PHOTON ET THÉORIE QUANTIQUE DES CHAMPS. (Broglie L. de). 208 p. 16x25, 1949. 2.500 »

THÉORIE GÉNÉRALE DES PARTICULES A SPIN. (Broglie L. de). Méthodes de fusion. 210 p. 16x25, 1943. 420 »

L'ÉLECTRON (Darmon 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. 14,5x19, 92 fig., 1947. 250 »

SPECTRE INFRAROUGE ET STRUCTURE MOLÉCULAIRE (Freyman R.). Etudes des forces intramoléculaires et intermoléculaires par la perturbation des fréquences infrarouges ou raman. 98 p. 16x25, 50 fig., 1947 200 »

URANIUM 235 ET PLUTONIUM 239 (Comparat P., Ecochard F., Lafoucrière J. et Thibaud J.). 112 p. 16x25, 1948 400 »

LE NOYAU ATOMIQUE (Berthelot A.). Les noyaux stables. La radioactivité. La fission du noyau d'uranium. 32 p. 16x25, 6 fig., 1948. 100 »

PROTONS, NEUTRONS, NEUTRINOS (Solomon J.). 228 p. 16x25, 28 fig., 1939. 700 »

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 m. 16x24, nbr fig., 2 pl., 1950. 800 »

STEREOPHYSIQUE (Weckering R.).

Tome I : Nouvelles théories sur la constitution de la matière et l'origine des rayonnements. 662 p. 16x25, 1.070 fig., 43 tabl., 1935 1.950 »
Tome II : Structure dans l'espace des édifices moléculaires des composés de la chimie organique acyclique. 436 p. 16x25, 2.900 fig., 4 dépliants, 1940, relié 1.950 »

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. 16x25, 46 fig., 1 pl. en coul., 1949 1.180 »

VOCABULAIRE DE CHIMIE-PHYSIQUE ET DE CHIMIE NUCLÉAIRE avec applications numériques à l'usage des élèves-ingénieurs (Charles V.). 390 p. 13,5x21,5, 122 fig., 1951 980 »

APPLICATIONS SCIENTIFIQUES

LES ATOMES (Perrin J.). Théorie atomique et chimie. L'agitation moléculaire. Émulsions. Lois du mouvement Brownien. Fluctuations. Réalité moléculaire. Grains d'énergie. Electrons. Structure des atomes. Les noyaux. 296 p. 14,5x19,5, 6 pl., 1948. 300 »

LA PHYSIQUE NOUVELLE ET LES QUANTA (Broglie L. de). 303 p. 13x19,5. 325 »

ONDES, CORPUSCULES, MÉCANIQUE ONDULATOIRE (Broglie L. de). 164 p. 14x19,5, nbr. fig. et illustr. 12 planches hors-texte 270 »

ATOMES, RADIOACTIVITÉ, TRANSMUTATION (Broglie L. de). 290 p. 13x19,5, 15 fig., 2 pl. 300 »

MATIÈRE ET LUMIÈRE (Broglie L. de). 342 p. 14x19. Exposés généraux sur la physique contemporaine. La matière et l'électricité. La lumière et les radiations. La mécanique ondulatoire. Études philosophiques sur la physique quantique. Études philosophiques diverses. 270 »

PHYSIQUE ET MICROPHYSIQUE (Broglie L. de). Science. Philosophie scientifique. Histoire des sciences. 370 p. 14x19, 9 pl., 1947. 270 »

CONTINU ET DISCONTINU EN PHYSIQUE MODERNE (Broglie L. de). La lumière et les électrons. Aspects philosophiques de la physique moderne. Les grains et les champs en physique quantique. Sur deux importantes questions de physique théorique. Une page d'histoire des Sciences. 268 p. 14x19. 300 »

ATOMES, MOLÉCULES ET LUMIÈRE (Daudel P. et R.). Synthèse générale des phénomènes électriques et optiques développée dans le cadre de la nouvelle théorie de la lumière de Louis de Broglie. 175 p. 14x19, 86 fig. 200 »

L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET SES APPLICATIONS (Kahan Th. et Magnan C.). Perspectives et problèmes d'avenir. 261 p. 14x19, 56 fig., 16 pl. 540 »

VOYAGES INTERPLANÉTAIRES ET ÉNERGIE ATOMIQUE (Richard-Foy R.). 78 p. 12x18. 80 »

ATOMISTIQUE ET ELECTRONIQUE MODERNES (Piraux H.)
Tome I : 290 p. 17x23, 187 fig. 1949. 900 »
Tome II : 311 p. 17x23, 245 fig. 1950. 1.000 »

MACHINES ATOMIQUES. Cyclotron et autres accélérateurs, piles atomiques (Nahmias M.). 310 p. 14x22,5, 102 fig., 27 pl., 1950. 1.200 »

L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET UTILISATION MILITAIRE (Nahmias M.). 295 p. 14x22, 13 pl., 1946. 450 »

L'ARME ATOMIQUE (Genaud P.). Bases physiques de l'arme atomique. Effets de l'arme atomique. Protection contre l'arme atomique. Index alphabétique. 416 p. 16x24,5, 155 fig., 1950, relié. 1.450 »

ARTILLERIE ATOMIQUE (Nahmias M.). 201 p. 14,5x23, 2^e édit. 1947, revue et augmentée avec un supplément sur les expériences de Bikini, appendice 147 fig., dont 14 h.T. 250 »

VULGARISATION

POUR COMPRENDRE LA PHYSIQUE MODERNE (Moreux Th. Abbé) La matière et les phénomènes physiques. La pesanteur et l'attraction universelle. L'équilibre dans les liquides. L'équilibre dans les gaz. Le son et les phénomènes vibratoires. La chaleur. Un peu de thermodynamique. La lumière et l'optique. Les instruments d'optique. L'électricité statique et le magnétisme. Le courant électrique et ses effets. 300 p. 11x17,5, 209 fig. 280 »

LES MYSTÈRES DE L'ÉLECTRICITÉ OU L'ACTIVITÉ DES ÉLECTRONS (Daunt J. G.) L'électricité traverse les métaux. L'électricité à travers les liquides et les gaz. L'électricité et le magnétisme sont unis. L'électricité au travail. Production de l'électricité en masse. Les électrons à travers le vide. Radio et détection par radio. Vues récentes et perspectives d'avenir. 177 p. 12,5x19, 22 fig., 1948. 280 »

DE L'ATOME A L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE (Berthelot A.). De la matière à l'atome. Structure de l'atome et de son noyau. La radioactivité naturelle. Les techniques expérimentales en radioactivité. Les rayonnements des corps radioactifs. Transmutations. Radioactivité artificielle. Neutrons. Les techniques de production artificielle de particules transmutantes. La fission de l'uranium et l'énergie nucléaire. 231 p. 14x19, 33 fig., 32 photos, 1947. 270 »

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. 13x19, 1949. 450 »

L'ATOME UNIVERS FANTASTIQUE (Ducrocq A.). Les 98... 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. 190 p. 12x18,5, 30 fig., 1950. 275 »

AU SEUIL DE L'ÈRE ATOMIQUE (Boutaric A.) Premières manifestations de l'énergie atomique dans les désintégrations naturelles. Corpuscules et fragments atomiques. Origine de l'énergie atomique. Les réactions nucléaires sources d'énergie atomique. La bombe atomique. Les étapes d'une invention. Perspectives d'avenir. 207 p. 13x19, 26 fig., 1947. 200 »

PUISSANCE DE L'ATOME (Thibaut J.). De l'utilisation industrielle et du contrôle de l'énergie atomique au Gouvernement mondial. 265 p. 13,5x20, 23 fig., 8 pl., 1949. 480 »

L'ASTRONAUTIQUE (Esnault-Pelterie R.). 247 p. 16x25, 19 fig., 9 pl., 1930. 240 »
Complément. 93 p. 16x24, fig. 3 pl., 1935. 120 »

L'ASTRONAUTIQUE (Ananoff A.). 498 p. 13x20, 155 fig., 1950. 800 »

COLLECTION « QUE SAIS-JE » ? Des mises au point claires, précises, actuelles de toutes les grandes questions. Chaque vol. 11,5x18. 100 »

N° 2. De l'Atome à l'étoile.

N° 7. Histoire de l'électricité.

N° 33. Radium et radio-activité.

N° 37. La relativité.

N° 70. Les rayons X.

N° 175. L'électron et son utilisation industrielle.

N° 243. Electricité, magnétisme.

N° 291. Matière, électricité, énergie.

N° 311. La mécanique ondulatoire.

N° 317. L'énergie atomique.

N° 389. L'état gazeux.

N° 397. L'astronautique.

N° 421. Les étapes de la physique.

Notre catalogue général est paru : un volume de 200 pages, format 13,5x21, contenant 2500 titres d'ouvrages scientifiques et techniques sélectionnés et classés par sujets. Franco, 80 francs C.C.P. Paris 4192-26

Ajoutez 10 % du montant total de votre commande pour frais d'expédition. (avec un minimum de 30 frs) C. C. P. Paris 4192-26. Il n'est fait aucun envoi contre remboursement.

LIBRAIRIE SCIENCE ET VIE, 24, Rue Chauchat, PARIS-9^e

DEUX LIVRES D'ACTUALITÉ

PIERRE ROUSSEAU

HISTOIRE DE L'ATOME

Comment l'infiniment petit
a changé l'univers

Un volume 350 frs

SAMUEL A. GOUDSMIT

LA MISSION ALSOS

L'ALLEMAGNE ET LE SECRET ATOMIQUE

La vérité sur les fameuses armes secrètes
de Hitler.

Un volume..... 250 frs

LIBRAIRIE ARTHÈME FAYARD

Le livre du mois



DESTINS INDUSTRIELS DU MONDE

L'AUTEUR M. Albert DUCROcq,
Président du Centre d'Etudes
Atomiques, est l'un des
spécialistes de l'application
de l'énergie atomique à
l'industrie.

LE LIVRE, DESTINS INDUSTRIELS DU MONDE est d'abord un panorama général du progrès, un bilan de nos ressources énergétiques. C'est une vision du siècle de l'électricité et l'électronique, de l'âge de la chimie et des matières plastiques.

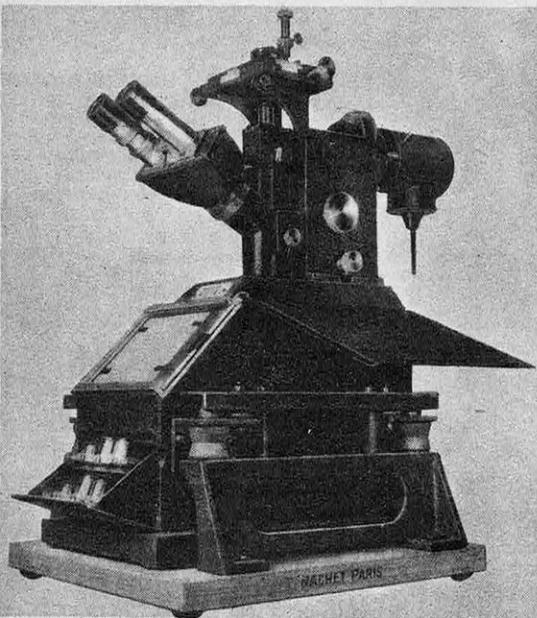
La seconde partie de l'ouvrage est une étude de géographie économique de la terre, au seuil de l'ère nouvelle : l'Amérique capitaliste, la Russie soviétique, l'Afrique encore dans l'enfance, l'Europe divisée, inquiète et meurtrie.

Que sera le monde de demain ?

Du même Auteur et chez le même Editeur : Les Armes Secrètes Allemandes

Retenez dès aujourd'hui chez votre libraire **DESTINS INDUSTRIELS DU MONDE**. Cet important document paraîtra dans la huitaine.

EDITIONS BERGER-LEVRULT 5 rue Auguste-Comte, PARIS



CONCEPTION MODERNE RÉALISATION IMPECCABLE

caractérisent les productions 1951 de



Spécialiste du Microscope depuis plus d'un siècle et qui équipe Laboratoires et Missions du Commissariat à l'Énergie atomique.

MINÉRALOGIE - MÉTALLOGRAPHIE
CONTRASTE DE PHASE
BIOLOGIE - CONTROLES INDUSTRIELS

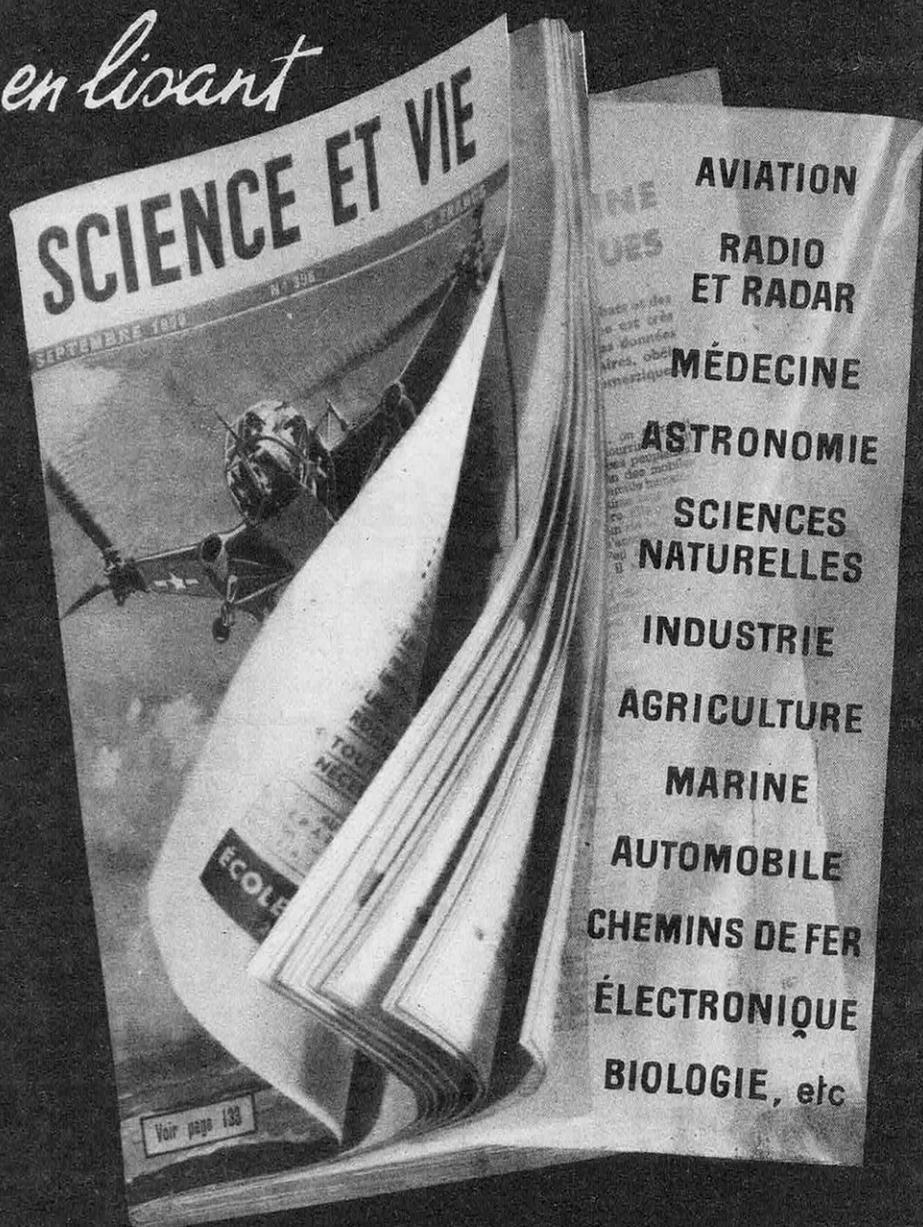
Demandez les catalogues EA 51, en précisant la nature de vos recherches,
17, rue Saint-Séverin PARIS-5^e

Tél. ODÉON 39-26 et 61-26

Tenez vous au courant

TOUS les mois
de **TOUS** les progrès
dans **TOUS** les domaines

en lisant



LE MAGAZINE DES SCIENCES ET DE LEURS APPLICATIONS A LA VIE MODERNE



Age atomique... " PRÉCISION OMEGA "



Quand une diligence faisait Paris-Marseille en 5 jours, on n'en était pas à une heure près! Aujourd'hui, où l'avion Paris-Nice accomplit son trajet en 1 h. 21, chaque minute prend toute sa valeur, chaque seconde compte.

Aussi n'est-il pas étonnant de voir adoptée, par tous ceux qui ne peuvent plus s'accommoder d'approximations, la montre qui a le plus fait pour la précision : Omega.

Avec leur Omega, aviateurs de la R. A. F. ou équipages d'Air-France, techniciens ou hommes d'affaires, sportifs ou voyageurs se savent en sécurité devant les mille contraintes horaires de la vie moderne.

Détenteur depuis dix-sept années consécutives du record international de précision de l'observatoire de Kew-Teddington — le seul ouvert aux chronométriers du monde entier — on peut dire qu'Omega *ennoblit l'horlogerie.*

Momentanément par suite des restrictions d'importation, les montres Omega sont rares: retenez la vôtre chez les concessionnaires de la marque que vous reconnaîtrez à l'emblème ci-dessous figurant dans leurs vitrines.



Production de la Société Suisse pour l'Industrie Horlogère - Genève
Montres Omega Montres Tissot

L'ÂGE ATOMIQUE

SOMMAIRE

★ NAISSANCE DE L'AGE NUCLÉAIRE	3
★ DE QUOI EST FAITE LA MATIÈRE	25
★ LES PILES ATOMIQUES	44
★ LES BOMBES ATOMIQUES	60
★ LES MATIÈRES PREMIÈRES DE L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE	83
★ L'URANIUM EN FRANCE ET DANS L'UNION FRANÇAISE <i>par Marcel Roubault</i>	107
★ LA PROTECTION CONTRE LES RAYONNEMENTS.	110
★ LES MOTEURS NUCLÉAIRES : CENTRALES, NAVIRES, AVIONS, FUSÉES	128
★ LES RADIOISOTOPES DANS L'INDUSTRIE	142
★ LES RADIOISOTOPES EN MÉDECINE ET EN BIO- LOGIE	159
★ QUELQUES APPLICATIONS DES NEUTRONS	166
★ LA GUERRE ATOMIQUE <i>par Camille Rougeron</i>	171
★ PETIT LEXIQUE NUCLÉAIRE	184

Ce numéro a été réalisé avec la collaboration de MAURICE E. NAHMIA, Docteur ès Sciences, Assistant au Collège de France.

SCIENCE ET VIE

FRANCE : Administration et Rédaction : 5, rue de La Baume, Paris-8^e, Tél. : Elysées 26-69 et 66-28. Chèque postal 91-07, Paris. Adresse télégraphique : SIENVIE-PARIS. — Publicité : 2, rue de La Baume, Paris-8^e. Tél. : Elysées 87-46

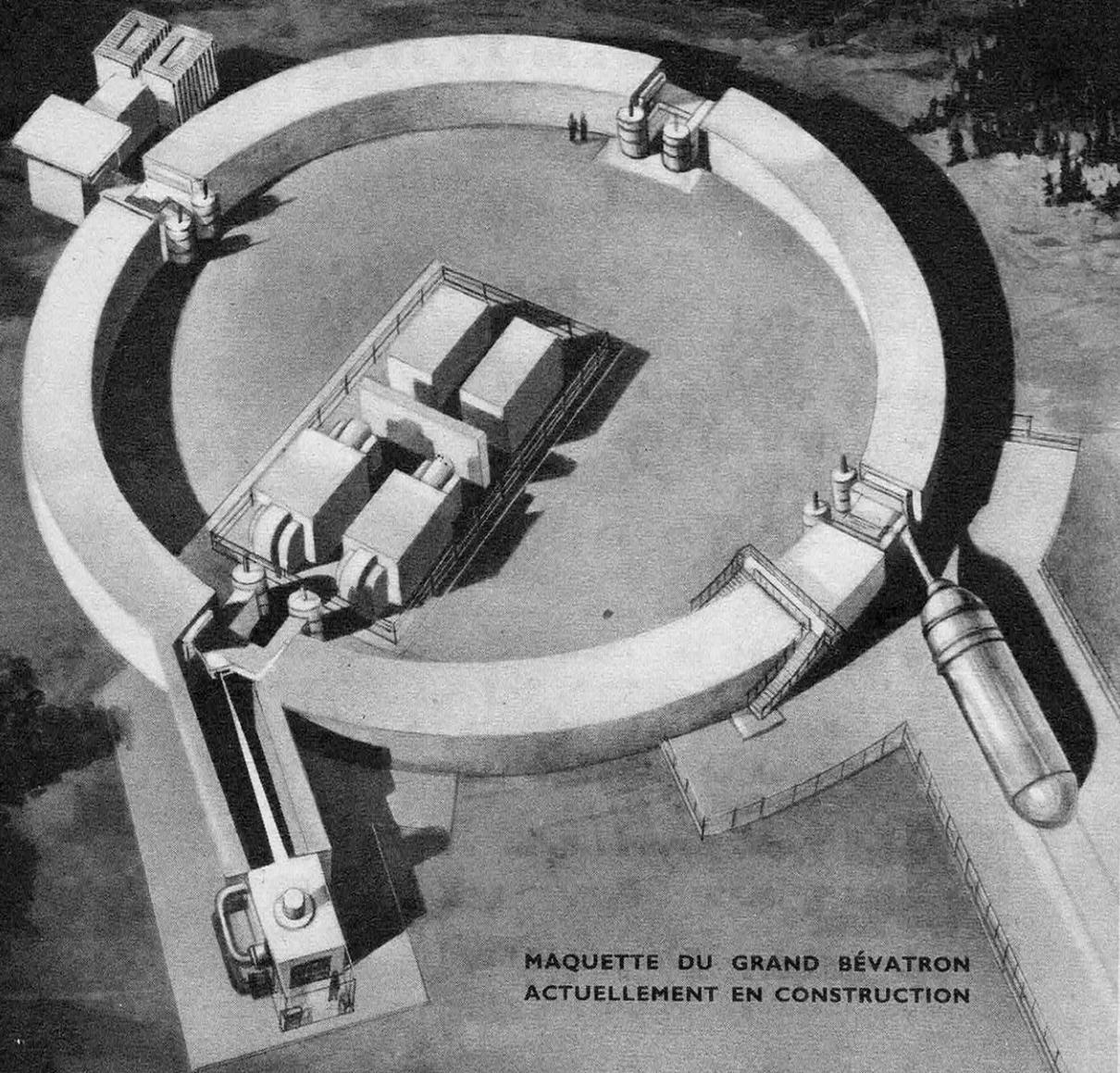
BELGIQUE : Société EDIMONDE, Direction et Administration : 8, Bd de la Sauvenière, Liège, Téléph. : 23.78.79

ITALIE : SCIENZA E VITA, Direzione, Redazione e Amministrazione : 8 Piazza Madama, Roma. Telefono 50919.

SUISSE : INTERPRESS S.A. Administration : 1, rue Beau-Séjour, Lausanne, Téléphone : 26-08-21.

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

Décembre mil neuf cent cinquante.



MAQUETTE DU GRAND BÉVATRON
ACTUELLEMENT EN CONSTRUCTION

L'Age atomique que nous vivons depuis peu est le fruit des conquêtes de la physique de 1930 à 1940. On n'a pas enregistré depuis de "discontinuité" dans la courbe du progrès scientifique comparable à celles qu'ont entraînées la découverte du neutron, de la radioactivité artificielle ou de la fission. Mais des moyens toujours plus puissants vont être fournis aux chercheurs, tel l'accélérateur d'un milliard d'électronvolts (bévatron) dont on voit ici la maquette. Il est probable qu'ils nous révéleront des phénomènes inattendus et ouvriront ainsi une nouvelle période dans l'Age atomique.

NAISSANCE DE L'ÂGE NUCLÉAIRE

L ÉNERGIE nucléaire — que l'on qualifie généralement d'énergie atomique d'une manière tout à fait impropre — est essentiellement une conquête du XX^e siècle. Les progrès de la science au XIX^e siècle avaient conduit les physiciens à ériger en dogme l'impossibilité de diviser les atomes — nous dirions aujourd'hui leurs noyaux. Ces atomes étaient considérés comme les particules fondamentales de la matière, et leurs combinaisons livraient toutes les substances inertes et vivantes présentes sur la terre.

L'ATOME DES PHILOSOPHES GRECS

Déjà, 400 ans environ avant Jésus-Christ, un philosophe grec, Démocrite, développant les idées de son maître Leucippe, avait émis l'hypothèse, absolument gratuite à l'époque, que tout le monde matériel était, en dernière analyse, constitué de particules extrêmement ténues et, par suite, inaccessibles à nos sens ; elles ne différaient pas par leurs poids, mais seulement par leurs formes et leurs dimensions et leurs conjugaisons formaient l'infinie variété des substances palpables. C'étaient là des vues purement métaphysiques dont ces philosophes auraient été bien en peine d'apporter la moindre preuve expérimentale, mais qui rejoignent curieusement par certains côtés les conceptions des savants modernes, fondées, elles, sur des expériences strictement contrôlées. C'est Démocrite qui semble avoir forgé le terme « atome » pour désigner ces éléments de base, ces « briques » qui forment l'édifice du monde matériel ; il signifie exactement **insécable, indivisible**.

On sait que cette conception, parvenue jusqu'à nous grâce au célèbre poème latin de Lucrèce, « De natura rerum », n'eut qu'une faveur éphémère. Les idées d'Aristote (IV^e siècle av. J.-C.) prévalurent, et pendant plus de deux mille ans la plus grande confusion régna.

Il fallut attendre le XIX^e siècle pour que la notion d'indivisibilité revînt en faveur. L'atome, **inaltérable et indestructible**, s'opposa alors à la molécule, facilement modifiable par les méthodes de la chimie et constituée par des groupements d'atomes ; ces derniers demeuraient, eux, toujours semblables à eux-mêmes au cours de toutes les réactions. Il y avait autant d'atomes de masses différentes que d'éléments chimiques, et on en avait recensé un peu moins d'une centaine.

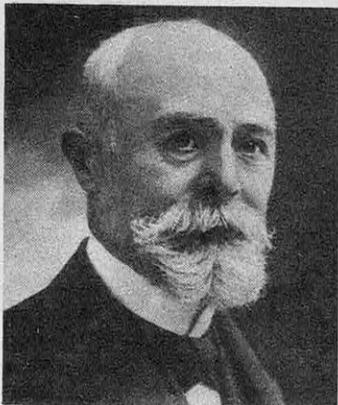
LA RADIOACTIVITÉ

Le fait capital qui devait renverser la notion péniblement acquise d'indestructibilité des atomes, fruit des travaux de plusieurs générations de chimistes et de physiciens, fut la découverte de la radioactivité, le 1^{er} mars 1896, par Henri Becquerel.

L'année précédente, Roentgen avait découvert les rayons X. Le 20 janvier, un lundi, jour de séance à l'Académie des Sciences, Henri Poincaré montra à ses confrères les premières radiographies faites en France par Oudin et Barthélemy. A une question posée par un autre académicien, Henri Becquerel, il répondit qu'incontestablement les rayons X prenaient naissance dans les tubes à décharges électriques à l'endroit où le verre était frappé par les électrons émis par la cathode, ou rayons cathodiques. Henri Becquerel fit alors remarquer à Poincaré que dans cette région le verre était rendu fluorescent, et les deux savants furent d'avis qu'il fallait chercher si certains corps rendus fluorescents ou phosphorescents par la lumière émettaient un rayonnement analogue aux rayons X. Henri Becquerel entreprit de vérifier cette hypothèse sur des cristaux d'un sel remarquablement fluorescent lorsqu'il est exposé à la lumière solaire, le sulfate double d'uranium et de potassium, sel qu'il connaissait bien car la luminescence des sels d'uranyle avait été particulièrement étudiée par son père Edmond, et par lui-même.

Sur un châssis opaque, en papier noir épais, contenant une plaque photographique, deux lamelles de sulfate double d'uranium et de potassium furent fixées par des bandelettes de papier, avec, entre l'une d'elles et le châssis, une pièce d'argent. Le tout fut exposé au soleil pour provoquer la phosphorescence. En développant la plaque, Henri Becquerel constata qu'effectivement des traces apparaissaient, correspondant à l'emplacement des lamelles et de la pièce d'argent qui absorbait partiellement le rayonnement émis par les cristaux. Son hypothèse semblait donc vérifiée. Il prépara une nouvelle expérience, mais pendant les jours qui suivirent le ciel demeura couvert ; dans l'attente d'une occasion propice, il enferma dans un tiroir le châssis contenant la plaque et recouvert des cristaux. Au moment de les exposer au soleil, il eut l'idée, à titre de vérification, de développer la plaque, et il eut la surprise

1896: HENRI BECQUEREL DÉCOUVRE LA RADIOACTIVITÉ



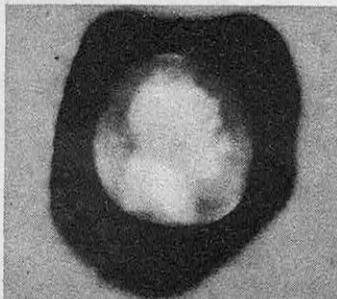
En 1896, alors qu'il était professeur au Muséum National d'Histoire Naturelle, Henri Becquerel cherchait à mettre en évidence des rayonnements pénétrants — comme celui qui venait d'être découvert par Roentgen — émis par des substances fluorescentes. Il obtint des impressions photographiques à travers du papier opaque sur lequel il avait posé des minerais d'uranium. Ses expériences lui ayant montré que cette émission pénétrante n'était nullement liée à la fluorescence des sels d'uranium et que notamment les sels qui n'étaient pas fluorescents im-

pressionnaient également les plaques à travers des écrans, Henri Becquerel en déduisit qu'il s'agissait d'un phénomène particulier qu'il appela « rayonnement uranique ». Il s'agissait en effet de la radioactivité spontanée de l'uranium et de la famille de ses sous-produits.

Henri Becquerel appartenait à une lignée de physiciens. Elle débuta avec Antoine César Becquerel, né en 1788, qui se distingua d'abord dans la Grande Armée avant de devenir le premier titulaire de la Chaire de Physique au Muséum d'Histoire naturelle où ses descendants devaient lui succéder jusqu'à la quatrième génération. Des deux fils d'An-

toine César Becquerel, le premier, Louis Alfred, se consacra brillamment à la médecine tandis que le deuxième, Edmond, né en 1820, succéda à son père au Muséum en 1878. Son fils Henri entra à l'École Polytechnique en 1872 et continua plus tard au Muséum l'œuvre de son père. Tous les deux s'intéressaient aux phénomènes de fluorescence et aux sels d'uranium sans soupçonner, avant les expériences de Roentgen, la merveilleuse puissance de ce métal.

Henri Becquerel mourut en 1908 ; son fils Jean, quatrième de la lignée, succéda à son père au Muséum et est membre de l'Académie des Sciences depuis 1946.



● Premières autoradiographies de minerais d'uranium obtenues par Henri Becquerel en 1896 au Muséum National d'Histoire Naturelle à Paris

de la trouver impressionnée, des ombres dessinant les formes des lamelles et montrant la radiographie d'une croix de cuivre mince placée sous l'une d'elles. Henri Becquerel venait d'obtenir les premières autoradiographies de l'histoire. La conclusion s'imposait : le rayonnement du sel d'uranium s'effectuait aussi bien dans l'obscurité qu'au soleil ; la fluorescence n'y était pour rien.

C'est ce que confirmèrent les expériences suivantes, pour lesquelles Henri Becquerel utilisa d'autres sels d'uranium, les uns fluorescents, comme le sulfate double, les autres non fluorescents. Tous impressionnaient la plaque photographique et cela d'une manière d'autant plus intense que leur teneur en uranium était plus élevée. Dès lors, Henri Becquerel put annoncer le fait essentiel qu'il s'agissait d'une **propriété atomique**, c'est-à-dire indépendante de l'état de combinaison chimique de l'élément uranium. L'uranium métallique se montra plus actif que ses sels. Il se servit ensuite d'un électroscope (7

mars 1896) et montra que les « rayons uraniques » ou « activité radiante » des sels d'uranium déchargeaient la feuille électrisée de cet appareil comme le faisait le rayonnement X (J. J. Thomson, février 1896). En accord avec l'observation faite par la méthode photographique, il reconnut que les composés d'uranium déchargeaient l'appareil d'autant plus vite que leur teneur en uranium était plus grande ; les vitesses de déperdition, qu'on peut prendre pour mesures relatives des activités, sont proportionnelles à la teneur en uranium. Il a, de plus, montré que de larges variations de température, de 80° à -190° C, ne modifient pas l'intensité du rayonnement.

La signification profonde de cette découverte capitale ne fut pas reconnue immédiatement. Quelques physiciens et chimistes ont considéré les « rayons uraniques » comme une curiosité de laboratoire et des savants comme Lord Kelvin exprimèrent même pendant longtemps l'opinion que les subs-

tances radioactives transformaient en rayonnement de l'énergie d'origine externe inconnue, se refusant à voir dans l'uranium même la source de l'énergie.

DÉCOUVERTE DU RADIUM

Une étudiante polonaise, Marie Sklodowska, venait d'épouser en 1895 un physicien français, Pierre Curie, passionné comme elle de recherche scientifique. Elle choisit comme sujet de thèse de doctorat *ès-sciences* l'étude des « rayons uraniques » de Henri Becquerel et commença par passer en revue, patiemment, tous les corps simples connus pour y déceler ceux qui manifestaient la même propriété que l'uranium. Mme Curie découvrit ainsi en 1898 la radioactivité du thorium, en même temps d'ailleurs qu'un chercheur allemand, G. C. Schmidt.

Pour comparer quantitativement les intensités du rayonnement uranique des diverses substances étudiées, Mme Curie mit surtout à profit une des propriétés que le rayonnement uranique avait en commun avec les rayons X, celle de rendre les gaz conducteurs de l'électricité (phénomène connu sous le nom d'ionisation). C'est cette même propriété qui est à la base du fonctionnement de la très grande majorité de tous les appareils utilisés aujourd'hui pour mesurer ou détecter la radioactivité.

Marie Curie et Pierre Curie admirent d'abord, comme Henri Becquerel, que les rayons uraniques étaient des rayons X. Ils en vinrent bientôt à abandonner cette hypothèse et à admettre celle de l'émission de particules chargées positivement et négativement. On sait aujourd'hui que les rayonnements qu'émettent les corps radioactifs peuvent être de trois sortes, de nature fondamentalement différente, que l'on désigne sous les noms de rayons alpha, bêta et gamma. Les deux premiers sont des flux de corpuscules matériels (noyaux d'hélium pour les rayons alpha, électrons pour les rayons bêta); le troisième, seul, est de nature électromagnétique, comme les rayons X, et d'ailleurs comme la lumière ou les ondes de la radio. Or, de ces trois rayonnements, ce sont les rayons alpha qui possèdent le pouvoir ionisant de beaucoup le plus élevé, de sorte que Pierre et Marie Curie, à cette période de leurs travaux, mesuraient en fait surtout l'intensité du rayonnement alpha. C'est d'ailleurs ce qui leur permit de découvrir le polonium, élément radioactif qui n'émet pratiquement que des rayons alpha.

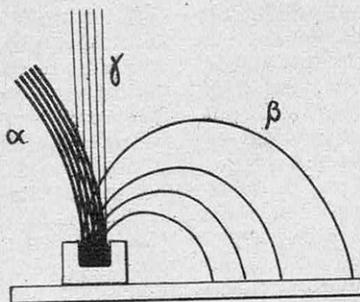
Mme Curie utilisait dans ses mesures de conductibilité des gaz un instrument très sensible, l'électromé-

tre avec quartz piézoélectrique, que son mari, Pierre Curie et le frère de celui-ci, Jacques Curie, avaient mis au point quelques années auparavant. Elle put ainsi, par des comparaisons précises, confirmer que l'intensité du rayonnement est indépendante de la composition chimique du sel étudié ainsi que de son état physique, et est d'autant plus grande que le composé contient une proportion plus grande de métal. Cette conclusion était d'importance capitale, car elle conduisait à rapporter directement aux atomes d'uranium et de thorium l'émission du rayonnement. Connaissant, par des méthodes classiques de dosage chimique, la teneur d'un sel ou d'un minerai en élément radioactif, on pouvait, dès lors, calculer à l'avance l'intensité du rayonnement qu'il devait émettre. Pierre et Marie Curie firent alors une constatation curieuse.

Plusieurs minerais d'uranium et de thorium, en particulier le minerai d'uranium appelé *pechblende*, manifestent une radioactivité jusqu'à quatre fois plus grande que leur teneur en uranium ou thorium ne le laissent prévoir. Pierre et Marie Curie eurent l'intuition géniale que ces minerais contiennent, en quantité impondérable, une « impureté » énormément plus radioactive, constituée par un élément inconnu. Le 18 juillet 1898, Pierre et Marie Curie annonçaient la découverte d'un élément nouveau, appelé « polonium » d'après le pays natal de Mme Curie.

Mais la découverte qui devait immortaliser Mme Curie et aussi Pierre Curie, car il serait injuste et d'ailleurs impossible de dissocier leur œuvre respective, jamais collaboration n'ayant été plus intime entre deux chercheurs attelés à la solution d'un problème entre tous difficile, est celle du **radium**. Elle fut annoncée le 26 décembre 1898 dans une note à l'Académie des Sciences, signée de Pierre et Marie Curie et de leur collaborateur G. Bémont.

Il ne s'agissait cependant toujours que de préparations contenant des quantités très faibles de métal actif, bien qu'enrichies par de nombreuses opérations chimiques et physiques, et insuffisantes pour révéler même au spectroscope les « raies » caractéristiques des éléments nouveaux. La tradition veut que l'« inventeur » d'un tel élément l'isole à l'état pur, photographie son spectre et détermine au moins son poids atomique. La tâche était très difficile à cause des quantités extraordinairement faibles de métal actif présentes dans les minerais naturels. Il fallait en traiter des masses considérables, dont ne disposaient évidem-



● Les radiations émises par les minerais d'uranium sont de trois sortes : alpha, chargées positivement, bêta, négativement, gamma non chargées.

ment pas les chercheurs, dans leur petit laboratoire, incommode et mal équipé, de l'école de Physique et Chimie où professait Pierre Curie.

La pechblende ne pouvait être obtenue en grandes quantités, à cette époque, qu'en Bohême, aux mines de Saint-Joachimsthal. Elles étaient exploitées par le Gouvernement autrichien pour en extraire des sels d'uranium utilisés dans la fabrication de verres et de céramiques opalescentes. Or, le minerai tel qu'il sortait de la mine accusait une radioactivité près de quatre fois supérieure à celle de l'oxyde d'uranium qu'on en extrayait et qu'il contenait dans la proportion de 50 %. On pouvait donc supposer que les résidus de fabrication, sans valeur à cette époque, devaient contenir les impuretés recherchées et pouvaient être acquis à peu de frais. Le Gouvernement autrichien mit gracieusement à la disposition de Pierre et Marie Curie plusieurs tonnes de résidus de pechblende.

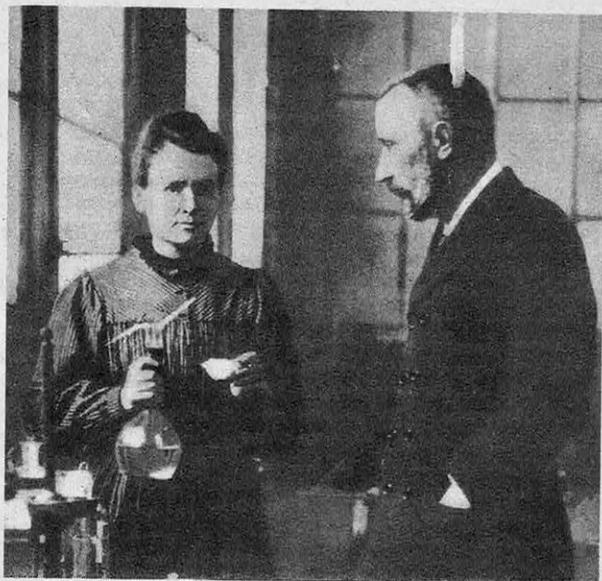
Pendant quatre années de patientes recherches, soutenus par une foi inébranlable, les chercheurs s'appliquèrent à séparer et à concentrer par des procédés chimiques des portions de résidus de pechblende de plus en plus radioactives, puis par des séries de cristallisations fractionnées obtinrent 2 dixièmes de milligramme de chlorure de radium suffisamment pur pour qu'il fût possible de déterminer le spectre de l'élément et son poids atomique, voisin de 226.

Le succès était complet. La preuve absolue était faite de l'existence d'un nouvel élément, dont le rayonnement était un million de fois plus intense que celui de l'uranium. Le prix Nobel, attribué l'année suivante conjointement à Henri Becquerel, Pierre et Marie Curie, vient couronner ces magnifiques recherches dont le retentissement devait être considérable. Quelques années plus tard (1911) Mme Curie obtint une seconde fois le prix Nobel pour ses recherches personnelles en chimie.

L'ÉNERGIE LIBÉRÉE

A l'annonce de la découverte de la radioactivité, puis des éléments nouveaux : polonium, radium, suivis de l'actinium (ce dernier découvert par André Debierne en 1899), les physiciens de nombreux pays se mirent aussitôt au travail pour explorer le domaine que les pionniers français venaient d'ouvrir

1898 : PIERRE ET MARIE



Pierre Curie est né en 1859. Fils d'un médecin aux idées libérales, il ne fréquenta pas le lycée et reçut de ses parents, puis d'un ami de sa famille, une éducation qui développa son goût pour les sciences naturelles. Il entra très jeune, avec son frère Jacques, dans la recherche scientifique. Professeur d'abord à l'Ecole de Physique et Chimie de la Ville de Paris et ensuite à la Sorbonne, il découvrit la piezo-électricité (point de départ des travaux sur les ultrasons)

et entreprit d'importantes recherches sur le magnétisme, aujourd'hui classiques (loi de Curie, point de Curie). La renommée que devait lui valoir sa collaboration avec sa femme dans leurs études sur la radioactivité ne doit pas faire mésestimer les résultats de ses recherches propres, qui jouèrent un rôle capital dans de nombreux domaines de la physique. Il mourut prématurément dans un accident tragique, à Paris, le 19 avril 1906. Marie Sklodowska, née le 7

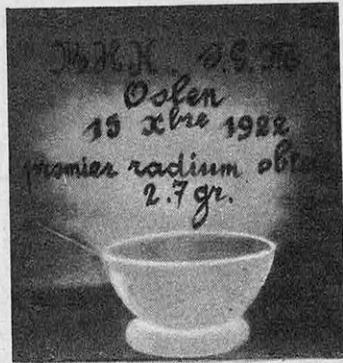
à la recherche scientifique. A Vienne, à Montréal, à Cambridge, à Chicago, partout des chercheurs répètent les expériences, en imaginent d'autres, construisent des appareillages perfectionnés pour analyser le « rayonnement uranique », qui se révèle complexe, et élucider le mécanisme suivant lequel il prend naissance.

La démonstration ayant été faite, dès les premières recherches de Becquerel, que la radioactivité était essentiellement une propriété de l'atome, absolument indépendante des conditions physiques et chimiques, il apparaissait ainsi que les atomes de certains éléments constituaient des sources d'énergie extraordinairement puissantes. Les premières

CURIE DÉCOUVRENT LE RADIUM

novembre 1867 à Varsovie d'une famille de professeurs, vint à Paris en 1891 pour poursuivre ses études en Sorbonne. Elle y obtint ses licences de physique (en 1893) et de mathématiques (en 1894). Elle rencontra cette même année Pierre Curie et leur mariage eut lieu le 25 juillet 1895. Marie Curie, voulant obtenir le grade de docteur ès-sciences, choisit comme sujet de thèse l'étude des « rayons uraniques » que venait de découvrir Henri Becquerel (1896). Elle s'aperçut rapidement que les minerais d'uranium devaient contenir, en très faible proportion, un élément radioactif encore inconnu. Avec l'étroite collaboration de son mari, elle parvint à découvrir au début de 1898, après un travail acharné, une première substance nouvelle qu'ils nommèrent « polonium », puis,

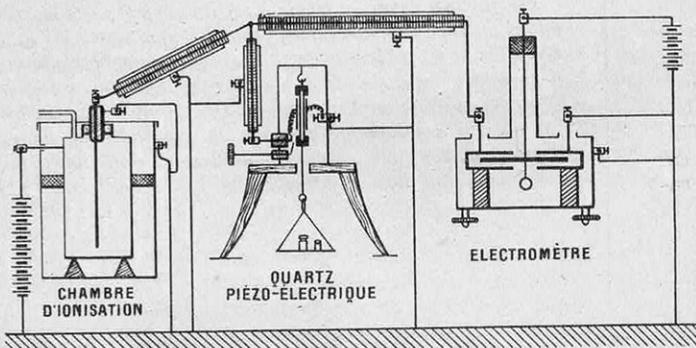
le 26 décembre de la même année, ils annoncèrent la découverte du « radium » avec le concours de G. Bémont. Il fallait traiter des quantités considérables de minerais d'uranium alors qu'ils ne disposaient que d'une place très restreinte pour installer quelques appareils et d'un hangar mal protégé de la pluie et du froid pour effectuer les concentrations chimiques. Les crédits dont ils disposaient étaient insignifiants et leurs ressources personnelles pratiquement nulles. Pierre et Marie Curie ne prirent aucun brevet sur les méthodes d'extraction des radioéléments des minerais d'uranium et de thorium, de sorte que lorsqu'on commença à utiliser le radium dans le traitement du cancer, la nouvelle industrie qui prit naissance en France put utiliser entièrement les procédés qu'ils avaient mis au



● Un sel de radium très concentré provoque la luminescence de l'air.

point. En 1903, les deux chercheurs reçurent, en commun avec Henri Becquerel, le prix Nobel de Physique. Peu après, une chaire de professeur à la Sorbonne fut créée pour Pierre Curie ; elle fut offerte à sa mort à Mme Curie, qui fut ainsi la première femme à accéder à un poste d'enseignement supérieur. Elle poursuivit ses recherches, isola le radium pur et détermina son poids atomique, ce qui lui valut en 1911 le prix Nobel de Chimie. On lui doit la création de l'Institut du Radium qui devait devenir un des grands centres de recherche de renommée internationale. Pendant la première guerre mondiale, elle organisa les services radiologiques aux armées.

Madame Curie est morte le 4 juillet 1934 et repose près de son mari dans le paisible cimetière de Sceaux, non loin de la maison où ils ont vécu.



● Schéma de l'appareillage qui fut utilisé pour la mesure précise de l'intensité des rayonnements ionisants émis par les substances radioactives.

mesures au calorimètre de l'énergie libérée par le radium, effectuées en 1903, indiquèrent un dégagement de 100 calories par gramme de métal pur et par heure (ce chiffre a été révisé et est en réalité voisin de 135). En deux jours, le radium dégage, à poids égal, plus d'énergie que les explosifs les plus puissants. Si les effets de ces derniers sont plus spectaculaires, c'est que leur énergie est libérée en une fraction de seconde. Qui plus est, ce rayonnement d'intensité remarquablement constante semblait devoir se poursuivre indéfiniment à la même cadence. A plusieurs années d'intervalle, on ne notait aucune différence appréciable. On sait aujourd'hui que le rayonnement d'un

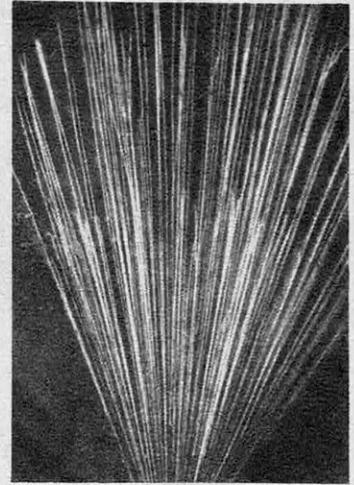
échantillon de radium décroît lentement avec le temps, mais comme il faut 1600 ans environ pour qu'il diminue de moitié, il est difficile de mettre en évidence une variation quelconque sur un faible intervalle de temps. Le dégagement d'énergie pendant la « vie moyenne » d'un échantillon n'en est pas moins remarquable et correspond à plus d'un million de fois celle de l'explosif le plus puissant, à poids égal. Il est sans doute inutile de préciser qu'au début de notre siècle personne n'avait la moindre idée de l'origine de cette énergie. Nous verrons plus loin que bien que la cause première de la radioactivité naturelle soit encore inconnue, la réponse à cette question a été fournie par Einstein.

1919 : RUTHERFORD ET LA PREMIÈRE TRANSMUTATION



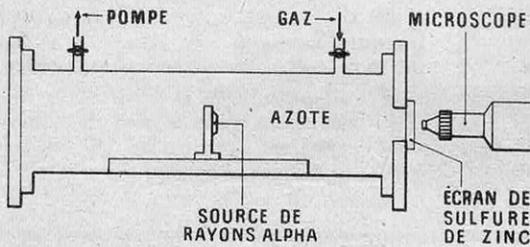
Lord Ernest Rutherford naquit à Nelson (Nouvelle-Zélande) en 1871 et mourut à Cambridge (Grande-Bretagne) en 1938. Il fut, de 1895 à 1898, l'élève de Sir J. J. Thomson à l'Université de Cambridge, puis enseigna quelques années à l'Université McGill de Montréal avant de revenir en Grande-Bretagne, à l'Université de Manchester. Il fut élu professeur à la chaire de Physique Expérimentale de Cambridge en 1919. Il contribua à l'étude des phénomènes radioactifs : émanations, rayonnements alpha, bêta, gamma, lois de désintégration, etc. L'étude de l'in-

teraction des particules élémentaires l'amena à ébaucher une conception de la structure de la matière qui rendit d'énormes services. On doit à Rutherford l'explication de la filiation des corps radioactifs naturels. La figure à droite montre la filiation des divers éléments radioactifs dans la famille de l'uranium. D'autres radioéléments naturels appartenant à deux autres familles radioactives furent, par la suite, mis en évidence : le thorium par G. Schmidt, simultanément avec Mme Curie, le mésothorium et le radiothorium par O. Hahn ; l'actinium par André Debierne, le protactinium par O. Hahn et Lisa Meitner, etc. De nombreux radioéléments se rattachant à ces trois familles radioactives et à une quatrième, celle du plutonium, ont été découverts depuis grâce aux désintégrations provoquées au laboratoire au moyen de particules accélérées au synchro-cyclotron de Berkeley. On en trouvera le tableau plus loin. On doit aussi à Rutherford les premières désintégrations provoquées au laboratoire (1919). Il montra que des particules alpha désintègrent les noyaux d'azote en noyaux d'oxy-

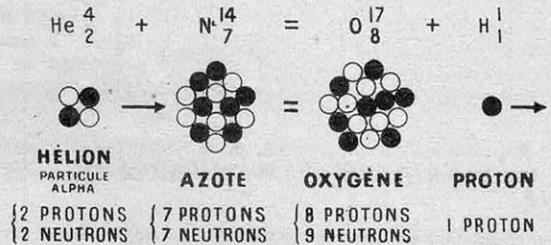


● Confirmation de la transmutation de l'azote en oxygène par photographie en chambre de Wilson.

gène et d'hydrogène. Rutherford forma à Montréal, à Manchester et au Cavendish Laboratory à Cambridge une magnifique pléiade de physiciens dont certains dirigent actuellement les principaux laboratoires de physique nucléaire en Grande-Bretagne et dans les Dominions.



● On observe, au delà du parcours normal des hélions, des scintillations dues aux protons expulsés de l'azote.



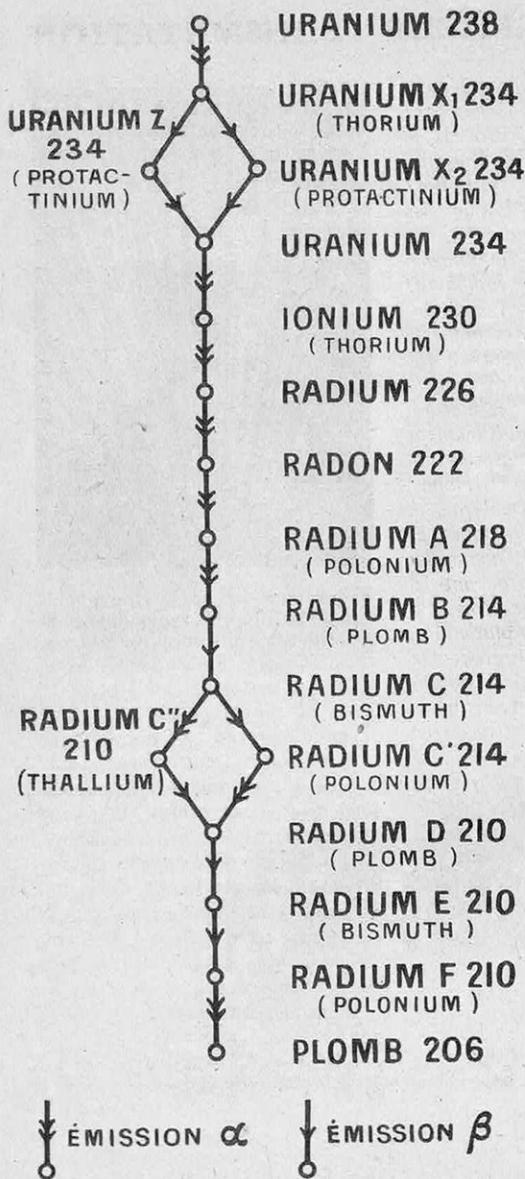
● Schéma de la réaction de transmutation de l'azote en oxygène par bombardement par des particules alpha.

LES FAMILLES RADIOACTIVES

La première étape dans la connaissance de la structure des atomes a été l'œuvre de toute une pléiade de chercheurs, principalement de l'Anglais Rutherford et du Danois Niels Bohr.

Au moment où se faisaient les premières découvertes concernant la radioactivité, Ernest Rutherford, frais émoulu du Canterbury College de Nouvelle Zélande, travaillait à Cambridge sous la direction du grand phy-

sicien Sir J. J. Thomson. C'est là qu'il établit la distinction fondamentale entre les trois sortes de rayonnements émis par les corps radioactifs, montrant que l'uranium émet, outre le rayonnement pénétrant capable de traverser des feuilles métalliques (rayons gamma) et celui qui est constitué par un flux d'électrons (rayons bêta) et qui est responsable de l'effet photographique, un rayonnement non pénétrant, arrêté par de très faibles épaisseurs de matière, une simple feuille de papier, par exemple, mais capable



● Famille radioactive de l'uranium, telle qu'elle put être établie par les travaux d'Ernest Rutherford.

d'ioniser fortement les gaz qu'il traverse, comme nous l'avons dit plus haut (rayons alpha).

Nommé en 1898 professeur de physique à l'université McGill de Montréal, au Canada, il est mis sur la voie d'une nouvelle découverte par une constatation d'apparence triviale, due à un professeur de la même université, travaillant avec lui, R. B. Owens, qui remarqua que la radioactivité du thorium est très sensible aux courants d'air. Il trouve ainsi que le thorium émet un gaz radioactif,

qu'il appelle « émanation » faute de mieux, et dont le rayonnement, constitué seulement de rayons alpha, décroît rapidement jusqu'à devenir inappréciable en moins de dix minutes. Ce gaz est un nouvel élément, gazeux, liquéfiable à très basse température, chimiquement inerte et comparable à un des gaz rares de l'air, l'argon par exemple. Sur les parois de l'ampoule où on le recueille se forment des dépôts eux-mêmes radioactifs, d'éléments encore différents. C'est en élucidant ces phénomènes que Rutherford est conduit au point de vue entièrement nouveau et absolument crucial que la radioactivité est une transmutation, au cours de laquelle un atome d'un élément radioactif expulse des particules électrisées en se transformant en un atome d'un élément différent.

Il put ainsi, au cours des trois années qui suivirent, jeter les bases de la filiation des substances radioactives, l'une résultant de la désintégration de la précédente, et mettre en évidence l'existence des trois familles aujourd'hui classiques : celle de l'uranium celle de l'actinium et celle du thorium.

L'ATOME DE RUTHERFORD-BOHR

En 1907, Rutherford est nommé à la Victoria University de Manchester et le laboratoire qu'il dirige se consacre à l'étude du rayonnement alpha. Frédéric Soddy et Sir William Ramsay avaient, dès 1903, montré que la radioactivité du radium s'accompagne d'un dégagement d'hélium, ce gaz rare de l'atmosphère dont le nom rappelle qu'on a découvert sa présence dans le soleil (à l'aide du spectroscope) avant de l'isoler sur la terre. Rutherford établit définitivement en 1909 l'identité de la particule alpha avec l'atome d'hélium ionisé, c'est-à-dire électrisé positivement par perte de deux électrons.

C'est l'étude de ce qui advient à la particule alpha lorsqu'elle traverse les atomes de la matière qui permit à Rutherford et à son élève danois Niels Bohr d'édifier la théorie nucléaire de la structure de l'atome qui devait se révéler d'une fécondité extraordinaire dans le développement de la physique, bien qu'elle fût reconnue imparfaite une dizaine d'années plus tard. Brièvement résumée, elle considère l'atome comme un système planétaire. Un noyau central contient pratiquement toute sa masse ; autour de lui gravitent des électrons sur diverses orbites. Tous les phénomènes ressortissant de la chimie et de la physique microscopique sont à rapporter au cortège électronique. Tous les phénomènes radioactifs ont pour siège le noyau.

LES TRANSMUTATIONS ARTIFICIELLES

Les désintégrations radioactives correspondant à des transmutations spontanées, que l'on connaissait dès lors suffisamment bien, s'accompagnaient de libération d'éner-

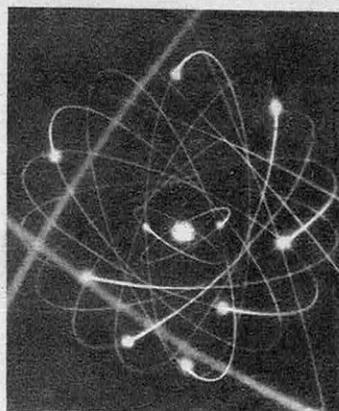
1913 : BOHR DRESSE LE MODÈLE GÉNÉRAL DE L'ATOME



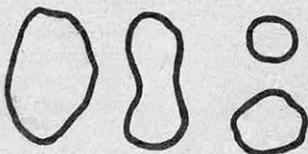
Niels Henrich David Bohr est considéré comme le plus éminent des physiciens actuellement vivants. Il est né à Copenhague le 7 octobre 1885. Après avoir obtenu son doctorat en 1911 il alla faire un stage en Angleterre chez J. J. Thomson à Cambridge, puis chez Ernest Rutherford à Manchester. C'est chez ce dernier qu'il élaborait sa théorie des couches électroniques quantifiées (1913) qui donna une explication du spectre de l'hydrogène et de plusieurs autres phénomènes atomiques. En 1920 il fut nommé directeur de l'Institut de Physique Atomique de Copenhague, devenu depuis un centre d'attraction pour tous les savants du monde. Le prix Nobel lui fut at-

tribué en 1922. Dès 1933 Bohr proposa une théorie des phénomènes de désintégration nucléaire où il introduisit la notion du noyau composé formé par diverses voies expérimentales et indépendamment du mode de formation. En 1939, il attribua la fission de l'uranium à l'isotope 235 et sa théorie, développée en collaboration avec J. A. Wheeler, de Princeton, prédisant que le noyau de charge 94 et de masse 239 devait être aussi fissionnable que l'uranium 235. On découvrit deux ans après cet élément, appelé depuis plutonium, et sa théorie fut brillamment confirmée. Pendant la dernière guerre, Bohr fut sauvé des geôles nazies par l'Intelligence Service qui l'avertit à temps de son arrestation imminente. Le 30 septembre 1943, la résistance danoise le transporta avec sa femme en Suède, dans un bateau de pêche. De là il fut emmené en avion en Angleterre par la R. A. F. Il se rendit alors aux

Etats-Unis, où, sous le pseudonyme de Nicholas Baker, il devint conseiller du laboratoire de Los Alamos au Nouveau Mexique. C'est dans ce laboratoire que furent assemblées les premières bombes atomiques. En 1945, Bohr



● L'atome d'uranium, imaginé suivant ce schéma, aurait 92 électrons.



● La fission de l'uranium assimilée au fractionnement d'une goutte.

retourna à Copenhague et il demeure à Carlsberg, dans la résidence honoraire attribuée à vie à l'homme de science le plus distingué du Danemark. La munificence du célèbre brasseur danois Carlsberg a d'ailleurs doté les laboratoires danois d'appareils et de budgets que peuvent envier des nations bien plus importantes.

gie considérable eu égard aux faibles masses mises en œuvre. Leur ordre de grandeur expliquait pourquoi la chimie avait toujours été impuissante à provoquer des transmutations.

C'est Rutherford, en 1919, qui réussit à effectuer la première transmutation artificielle. La première guerre mondiale avait naturellement désorganisé les laboratoires et ralenti les recherches que Rutherford poursuivait inlassablement. A des ministres de Sa Majesté britannique qui lui reprochaient en 1917 de ne pas consacrer toute son activité aux problèmes de guerre, le grand savant répondait : « Si mes efforts dans le domaine de la désintégration atomique, qui vous semblent inopportuns, sont couronnés de succès, votre guerre sera depuis longtemps oubliée que l'on parlera encore de ces premières expériences ».

Dans le passage des particules alpha à travers l'hydrogène, les noyaux rencontrés

sont projetés vers l'avant suivant les lois du choc parfaitement élastique ; pesant quatre fois moins qu'un noyau d'hélium, ils peuvent aller quatre fois plus loin qu'une particule alpha lorsqu'ils sont frappés de plein fouet par une de ces particules. Le phénomène s'observait facilement en plaçant un écran de sulfure de zinc perpendiculairement à la direction de propagation du rayonnement alpha. Bien au-delà du parcours maximum des rayons alpha, on aperçoit encore sur l'écran des scintillations dues à ce que chaque noyau d'hydrogène projeté provoque à l'impact l'émission d'une petite lueur phosphorescente. Rutherford, en 1919, effectuant la même expérience avec de l'azote au lieu de l'hydrogène, eut la surprise de constater la production d'un flux de particules exactement semblables aux précédentes, mais parcourant des distances bien plus grandes. L'énergie avec laquelle elles avaient été lancées était

1931 : LAWRENCE RÉALISE LE PREMIER CYCLOTRON

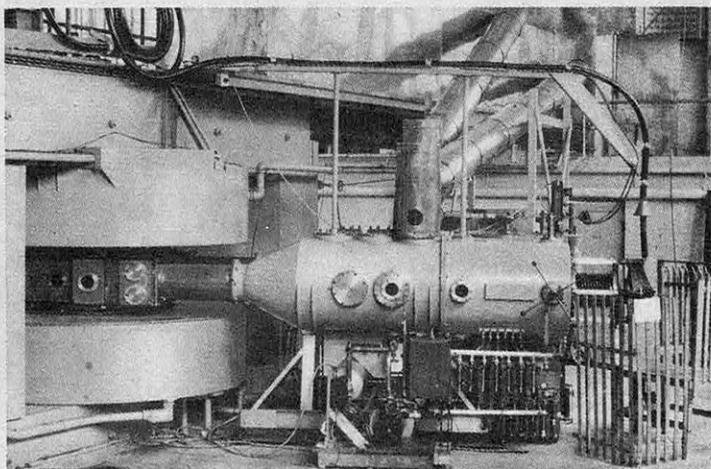


Ernest Orlando Lawrence est né le 8 août 1901 à Canton, dans le Dakota du Sud, aux Etats-Unis. Reçu docteur ès-sciences à Yale en 1925, il occupait une chaire de physique à l'Université de Californie (Berkeley) en 1928. En 1929 il concevait une modification géniale de l'accélérateur de particules atomiques imaginé par Wideröe. Le principe de la méthode est le suivant : Au centre d'une boîte cylindrique vidée constamment par des pompes on injecte des particules atomiques avec une faible énergie. La boîte est placée entre les pièces d'un électroaimant qui produit un champ magnétique intense. Les particules se meuvent sur des cercles

dont le rayon dépend du champ magnétique, de la masse et de la vitesse des particules. Dans leur course circulaire, ces projectiles passent dans des électrodes d'accélération qui sont portées à des potentiels de haute fréquence. A chaque passage dans une électrode, la particule reçoit une impulsion et elle poursuit ainsi sa route en spirale avec une vitesse croissante. Finalement elle est déviée vers une cible contenant la substance à bombarder et à désintégrer. Après les premiers

modèles en verre, le cyclotron de Lawrence évolua rapidement et atteint de nos jours des proportions et des performances vraiment impressionnantes. Les cyclotrons modernes accélèrent des particules à des vitesses proches de celle de la lumière (300 000 km à la seconde) ce qui leur confère des énergies suffisantes pour briser n'importe quel noyau.

La dernière découverte faite à Berkeley est celle de la désintégration de la matière avec production de mésons.



● Le cyclotron de 1,5 m de diamètre de Berkeley, dernier modèle avant la mise au point du synchro-cyclotron en 1945 avec un électroaimant de 4 000 t.

supérieure à celle que possédaient les particules alpha. Une seule explication était possible : c'était l'atome d'azote frappé qui avait fourni à la fois le noyau d'hydrogène et le supplément d'énergie ; il n'avait pu le faire qu'en se désintégrant. La première transmutation artificielle, le vieux rêve des alchimistes, était réalisée : un atome d'azote frappé par une particule alpha se transformait en un atome d'oxygène et un atome d'hydrogène.

De nombreuses autres transmutations furent de même réalisées, celles de l'aluminium, de l'oxygène et d'une foule d'autres éléments, toujours en utilisant les particules alpha émises par les corps radioactifs. Mais on se rendit vite compte que, puisqu'il s'agissait de particules électrisées lancées à grande vitesse, il devait être possible de les fabriquer artificiellement en accélérant à l'aide d'un champ électrique des noyaux d'hélium dépouillés de leur cortège d'électrons. Une

différence de potentiel de 5 millions de volts suffit pour obtenir des particules alpha artificielles de même énergie que les particules naturelles. La technique des « accélérateurs » nucléaires se développa alors rapidement, les générateurs électrostatiques fournirent des tensions de plus en plus élevées ; en Amérique, le cyclotron, entre les mains de E. O. Lawrence, à Berkeley, devient un outil incomparable de transmutation. Dans les laboratoires de nombreux pays, les noyaux des atomes sont ainsi bombardés non seulement par des noyaux d'hélium, mais par des noyaux d'hydrogène ordinaire (proton), d'hydrogène lourd (deutons, dont nous allons parler), et même par des électrons.

C'est le 28 avril 1932, à une séance de la Royal Society, que Lord Rutherford — il avait été fait pair du Royaume — annonça que deux chercheurs du laboratoire Cavendish, J. D. Cockcroft et E. T. S. Walton, étaient

parvenus à désintégrer des noyaux de lithium par des protons accélérés sous 125 000 volts. Des résultats analogues avaient été obtenus, sous des tensions sensiblement plus élevées, avec d'autres éléments légers : le béryllium, le bore, le carbone, le fluor et l'aluminium.

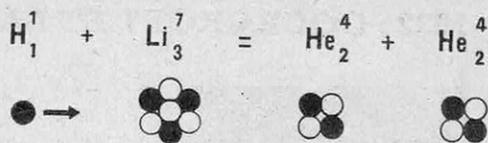
Il est intéressant de signaler que, dans le cas du lithium, la réaction nucléaire consiste en un éclatement du noyau en deux fragments égaux qui sont des noyaux d'hélium, réalisant en fait ce que l'on devait appeler plus tard, dans le cas de l'uranium, une « fission ». Elle s'accompagne d'une émission d'énergie considérable, eu égard aux masses mises en œuvre. C'est ce qui explique que le lithium puisse être regardé comme un « combustible nucléaire » particulièrement intéressant pour constituer des piles ou des bombes atomiques.

LE NEUTRON ET L'EAU LOURDE

Cette même année 1932 a été marquée par deux découvertes d'importance capitale : celles de l'électron positif et du neutron. L'électron positif, ou positon, a été mis en évidence pour la première fois par Carl Anderson, à l'Institut de Technologie de Californie, dans le rayonnement cosmique. Par la suite, Anderson montra qu'il apparaît au laboratoire lors du phénomène de « matérialisation » de l'énergie ou de « production de paires », lorsque des rayons gamma d'énergie suffisante traversent des éléments lourds, donnant naissance à des « paires » : électron négatif et électron positif.

Quant au neutron, la particule élémentaire de matière qui, comme son nom l'indique, ne porte pas de charge électrique, ce projectile subtil qui aujourd'hui libère l'énergie nucléaire au sein des piles et des bombes, l'histoire de sa découverte, que nous ne ferons que résumer, est assez curieuse. Déjà, vers 1920, Rutherford et Harkins en avaient suggéré l'existence, prédisant même avec une remarquable précision ses principales propriétés. Électriquement neutre, il devait traverser la matière sans éprouver de résistance, et il devait donc être impossible de l'enfermer dans un récipient quelconque. De plus, n'étant pas repoussé par les noyaux des atomes, il s'unirait facilement à eux, provoquant des désintégrations.

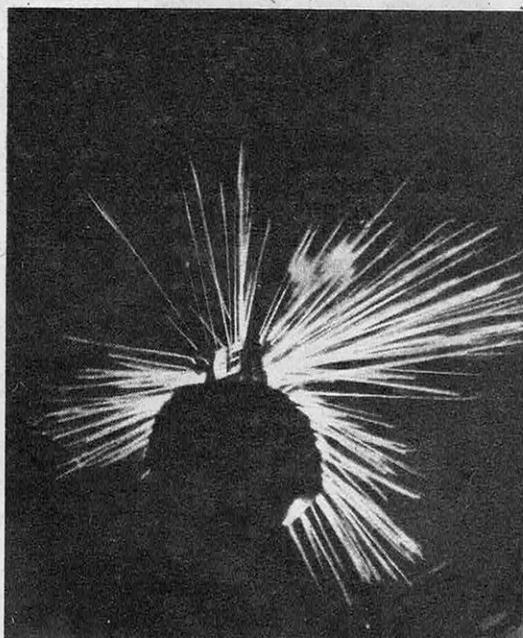
En 1930, deux chercheurs allemands, Bothe et Becker, constatèrent que des éléments comme le béryllium, le bore ou le lithium, frappés par des rayons alpha du polonium, émettaient un rayonnement extraordinairement pénétrant, beaucoup plus que celui de toutes les substances radioactives connues, qu'ils prirent pour des rayons gamma. Répétant ces expériences, Irène Joliot-Curie, fille aînée de Marie Curie, et Frédéric Joliot, son mari, montrèrent que ce rayonnement était facilement absorbé par des substances riches en hydrogène, comme l'eau et la pa-



PROTON LITHIUM HELIUM HÉLIUM

1 PROTON { 3 PROTONS { 2 PROTONS { 2 PROTONS
 4 NEUTRONS { 2 NEUTRONS { 2 NEUTRONS

● Schéma de la désintégration du lithium en deux hélium par des protons accélérés sous 120 000 V.



● Les particules issues de la désintégration du lithium sont rendues visibles dans une chambre de Wilson.

raffine, fait inexplicable s'il s'agissait d'un rayonnement gamma. C'est James Chadwick, à Cambridge, qui trouva la solution correcte du problème : il s'agissait d'un flux de neutrons rapides.

La découverte du neutron amena à réviser profondément les notions admises depuis Rutherford sur la constitution des noyaux atomiques. Désormais on admet qu'il est formé par la réunion d'autant de protons (chargés positivement) qu'il est nécessaire pour donner au noyau sa charge totale, le complément de masse étant fourni par des neutrons. De ce fait se trouve parfaitement expliquée l'existence, pour un même élément chimique, d'atomes de masses différentes : pour un même nombre de protons,

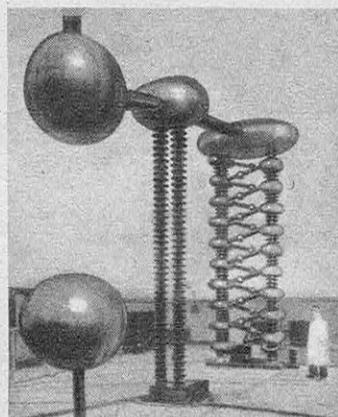
1932 : COCKCROFT ET LA DÉSINTÉGRATION DU LITHIUM



Sir John Cockcroft est né en 1897 à Todmorden, dans le Yorkshire (Grande-Bretagne). Il fit ses premières études à l'Université de Manchester et au St John's College à Cambridge. Après la première guerre mondiale, où il servit dans l'artillerie, il étudia l'électrotechnique au College de Technologie de Manchester et entra au service de la Metropolitan Vickers, qu'il quitta pour terminer ses études à Cambridge. Il collabora là, d'abord avec le professeur Kapitza pour la production de très basses températures et de champs magnétiques de grande intensité, puis, avec E.T.S. Walton, entreprit des recherches de physique nucléaire portant sur les désintégrations de noyaux atomiques par des protons de grande énergie produits par des accélérateurs à très haute tension. Il parvint ainsi, avec E.T.S.

Walton, à désintégrer des noyaux de lithium par des protons accélérés sous 120 000 volts. A la suite de la découverte, par Frédéric Joliot et Irène Joliot-Curie, de la production de radioisotopes artificiels par des particules alpha, il mit en évidence des effets similaires obtenus avec des protons. En 1935, J. Cockcroft devint Directeur du laboratoire Mond, à Cambridge, spécialisé dans les recherches sur les basses températures, et en 1939, Professeur de physique à l'Université de Cambridge. Il prit une part active pendant la guerre au développement du radar au titre de Directeur de l'organisme de recherches de l'Air Defence. Il prit part également, dès 1940, aux premiers travaux concernant les possibilités de réalisation des bombes atomiques et accueillit en Angleterre les collaborateurs du Professeur Joliot, Halban et Kowarski, quand ils quittèrent la France avec le stock d'eau lourde acquis en Norvège. En 1944, J. Cockcroft prit la direction des laboratoires de Montréal, du Conseil National des Recherches du Canada, et des laboratoires de Chalk-River, où étaient concentrées toutes les recherches nucléaires anglo-canadiennes. Il revint en Angleterre en 1946 et fut nommé Directeur du grand centre de recherches atomiques de Harwell. C'est sous sa direction que furent érigées, dans cet ancien centre aéronautique du Berkshire,

les deux piles atomiques GLEEP et BEPO, la première de 100 kW, la seconde de 6 000 kW. Le centre de Harwell possède aussi un synchro-cyclotron et un accélérateur électrostatique du type Van de Graaff. Si l'on admet que l'on peut produire 1 g de plutonium par jour avec une pile de 1 000 kW, la Grande-Bretagne possède actuellement probablement plus de 10 kg de plutonium, soit de quoi faire une bombe atomique. Des radioéléments en grande quantité ont été fournis par les laboratoires de Cockcroft non seulement aux physiciens, aux industriels et aux biologistes du Commonwealth, mais aussi aux Scandinaves. A Harwell même, les recherches physiques et aussi biologiques sont en plein essor.



● Multiplicateur de tension de Gre-nacher-Cockcroft pour 1 500 000 V.

ils possèdent un nombre différent de neutrons ; ce sont ce qu'on appelle des isotopes. Parmi eux, il en est un qui prit aux yeux des physiciens une importance toute particulière, l'hydrogène lourd, isotope de l'hydrogène ordinaire. Son noyau comprend un proton et un neutron. Il donne des composés tout comme l'hydrogène ordinaire ; son oxyde a acquis une célébrité universelle sous le nom d'eau lourde.

RADIOACTIVITÉ ARTIFICIELLE

C'est ici que se place une nouvelle découverte de très grande importance, celle de la radioactivité artificielle, qui valut le Prix Nobel à ses auteurs, Frédéric Joliot et Irène

Joliot-Curie. Bombardant de l'aluminium par les rayons alpha du polonium, ils réalisèrent la transmutation des atomes d'aluminium en phosphore ; alors que l'on croyait jusque-là que tous les atomes obtenus par transmutation étaient des variétés stables et existaient dans la nature, ils observèrent que les atomes ainsi obtenus étaient radioactifs. Leur activité continuait à se manifester par une émission d'électrons positifs lorsque l'on éloignait la source des rayons alpha. Frédéric et Irène Joliot-Curie interprétèrent correctement ce phénomène qui fut le point de départ d'une série de recherches dans de nombreux laboratoires français et étrangers, qui devaient conduire, quelques années plus tard, à la découverte de la fission de l'uranium.

1932 : J. CHADWICK PROUVE L'EXISTENCE DU NEUTRON



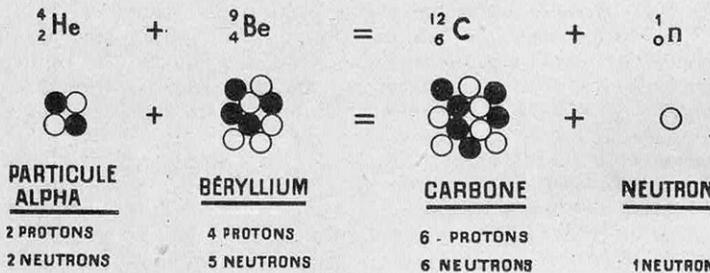
Né en 1891, James Chadwick était appelé à devenir le second de Rutherford au Cavendish Laboratory (1925). Ancien élève de l'Université de Manchester qui semble être le berceau des grands

hommes de Cambridge (J. J. Thomson, Rutherford, Bragg, Cockcroft) Chadwick participa aux recherches effectuées à Manchester par Rutherford sur la déviation subie par les particules alpha lorsqu'elles traversent des feuilles minces de matière. Ce sont ces recherches qui furent à la base de la théorie atomique développée par Rutherford et Bohr. En 1930, un grand problème préoccupait les physiciens. Il avait été signalé par les Allemands Bothe et Becker qui avaient observé que les particules alpha bombardant le béryllium donnaient naissance à un rayonnement excessivement pénétrant. Les Joliot, à Paris, étudièrent le même phénomène et observèrent l'absorption anormale de ce rayonnement énigmatique. C'est alors que Chad-

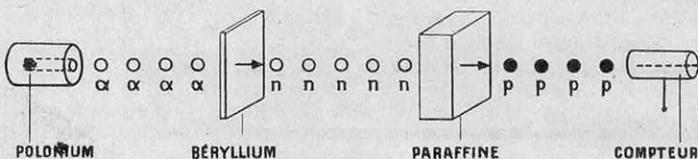
wick émit l'idée que ce rayonnement n'était pas électromagnétique, mais qu'il s'agissait d'une émission de neutrons. L'hypothèse de l'existence probable de cette particule, de masse voisine de celle du proton mais de charge électrique nulle, avait été émise depuis 1922 par Harkins aux Etats-Unis et appuyée par Rutherford, mais aucune expérience



● Trajectoires de protons qui ont été projetés par des neutrons.



● Schéma de la réaction de transmutation du béryllium en carbone sous un bombardement par des particules alpha, avec libération de neutrons.



● Schéma de l'appareillage de Chadwick : les neutrons sont mis en évidence par les protons (noyaux d'hydrogène) chassés du bloc de paraffine.

n'était venue confirmer cette hypothèse. Chadwick apporta à l'appui de son premier travail celui de la désintégration du deutérium par les rayons gamma avec émission de neutrons et de protons et donna la masse du neutron. En 1935, le prix Nobel de Physique lui fut décerné. En 1940, Chadwick fut de ceux qui suggèrent l'emploi de l'uranium 235 pour les bombes atomiques. Il collabora aux recherches entreprises à Los Alamos aux U. S. A.

Les expériences de transmutation avaient établi que lorsqu'un noyau frappé par une particule se désintègre, il extériorise en général une énergie bien supérieure à celle du projectile entrant. Pouvait-on espérer, par cette méthode, libérer de l'énergie atomique utilisable industriellement ? La réponse est négative. Il faut des millions, sinon des milliards de projectiles pour provoquer la désintégration d'un seul noyau, de sorte que le bilan de l'opération se solde par un

déficit. Peu avant la guerre, à une séance de la Société Française des Electriciens, en réponse à une question posée par Georges Claude sur la possibilité d'extension de proche en proche de telles explosions atomiques, Frédéric Joliot précisait que la probabilité d'un choc heureux primaire était déjà bien faible ; la probabilité d'une extension de la démolition à d'autres noyaux était encore incomparablement plus faible. Il fallait chercher dans une autre voie.

LA FISSION DE L'URANIUM

A l'avènement du national-socialisme, de nombreux physiciens d'Europe centrale s'étaient réfugiés en Angleterre. En 1934, à une petite réunion appelée « séminaire » qui se tenait au Birbeck College de Londres, l'un d'eux, le Dr. Szilard, entretint ses collègues des possibilités des réactions nucléaires avec des neutrons rapides et suggérait de rechercher dans quelles conditions un de ces projectiles pourrait arracher au noyau frappé deux neutrons ou, ce qui revient au même, continuer son chemin après lui avoir arraché un neutron. On entrevoyait donc dès cette époque la possibilité de réaliser une réaction « en chaîne », l'absorption d'un neutron correspondant à l'émission de deux neutrons qui iraient frapper d'autres noyaux voisins. La multiplication des neutrons allait hanter l'esprit des chercheurs et aboutir, dix ans plus tard, à la destruction d'Hiroshima.

Dès qu'il eut appris la découverte des radioéléments artificiels, le physicien italien Enrico Fermi entreprit à Rome l'étude systématique des transmutations provoquées par les neutrons. Ces particules, étant dénuées de charge électrique, s'avéraient les plus efficaces pour provoquer des modifications nucléaires, surtout sur des éléments lourds dont la charge nucléaire importante exerce une forte répulsion sur les particules chargées. En opérant sur l'uranium, Fermi et ses collaborateurs observèrent la production d'un mélange compliqué d'éléments radioactifs artificiels. Ils crurent tout naturellement que la capture d'un neutron, suivie de l'émission d'un rayonnement bêta, provoquait la formation d'un atome nouveau encore plus lourd que l'uranium. Ainsi Fermi annonça la découverte des éléments transuraniens. On sait aujourd'hui qu'effectivement les éléments transuraniens se forment de cette façon, en particulier le premier d'entre eux, le neptunium. Mais dans les conditions où opérait Fermi, il s'agissait aussi de bien autre chose.

Toujours est-il que l'annonce faite par Fermi souleva de nombreuses discussions, plusieurs physiciens et chimistes estimant ses preuves insuffisantes. Les propriétés chimiques des produits de la réaction, autant qu'on pouvait s'en rendre compte sur les quantités très faibles que l'on manipulait, différaient sensiblement de celles que l'on pouvait a priori attribuer à des éléments transuraniens. Une chimiste allemande, Mlle Noddack, pour expliquer les anomalies confirmées par d'autres expérimentateurs, Irène Joliot-Curie et Savitch en France, Hahn et Strassmann en Allemagne, suggéra que les noyaux bombardés se scindaient pour former des noyaux de masses sensiblement moitié moindres. Cette idée était si révolutionnaire qu'elle n'eut aucun succès et n'exerça aucune influence sur l'orientation des recherches. Cinq années plus tard, on devait y revenir tout naturellement.

C'est le 6 janvier 1939 que parut dans la revue allemande *Naturwissenschaften* un article de Hahn et Strassmann résumant leurs récentes recherches, où ils suggéraient que les prétendus éléments transuraniens étaient en réalité des éléments de poids atomiques moyens et tiraient de ce fait la conclusion, énoncée avec une grande réserve, car elle était incompatible avec les propriétés alors connues des noyaux, que le noyau d'uranium pouvait se briser en deux fragments radioactifs. Hahn en avait fait part en même temps, par lettre, à son ancienne collègue, le Professeur Lisa Meitner, qui travaillait alors à Copenhague dans le laboratoire de Niels Bohr, lequel se trouvait en visite à l'Université de Princeton, aux Etats-Unis. Avisé par télégramme, Bohr communiqua aussitôt la nouvelle aux chercheurs américains présents à l'Université, qui immédiatement alertèrent par téléphone leurs laboratoires respectifs, de sorte qu'en très peu de temps, les expériences de confirmation furent entreprises par des méthodes variées.

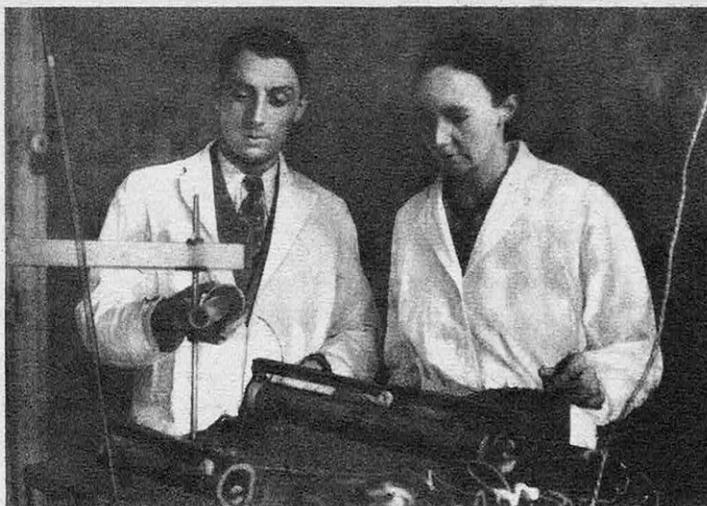
La preuve objective fut apportée quelques semaines plus tard et presque simultanément par Frédéric Joliot au Laboratoire de Chimie Nucléaire du Collège de France à Paris, et par la physicienne autrichienne Lisa Meitner et son neveu Otto Frisch que la politique raciste du national-socialisme avait contraints à chercher refuge au Danemark, où ils travaillaient au laboratoire de Niels Bohr, à Copenhague. A l'Université de Columbia, Enrico Fermi, qui avait fui le régime fasciste, confirme lui aussi la découverte. On jugera de l'intérêt que suscitait la fission de l'uranium dans le monde savant : moins de deux mois plus tard, à la fin de février 1939, plus de quarante mémoires sur la question avaient été publiés.

LA RÉACTION EN CHAÎNE

La fission d'un noyau d'uranium s'accompagne d'un dégagement d'énergie considérable, à l'échelle nucléaire bien entendu, de l'ordre de 50 fois celui que l'on avait coutume de constater avec les transmutations « classiques ». Dans sa note de janvier 1939 à l'Académie des Sciences, Frédéric Joliot signalait que la fragmentation était probablement accompagnée de l'émission de neutrons. Quelques mois plus tard, Joliot et ses élèves, Halban et Kowarski, montrent qu'il y a effectivement multiplication des neutrons au cours de l'opération. A chaque neutron capturé par l'uranium correspondaient en moyenne, d'après ces chercheurs, plus de trois neutrons « secondaires ». Ce chiffre fut reconnu par la suite sensiblement au-dessus de la réalité, mais il suggérait la possibilité pratique d'une réaction « en chaîne », explosive, susceptible, dans une masse convenable, de libérer une énergie prodigieuse. Un brevet fut pris à cette époque (le 1^{er} mai 1940) par les soins du C. N. R. S. et enregistré sous le

1934 : F. JOLIOT ET I. JOLIOT-CURIE DÉCOUVRENT LA

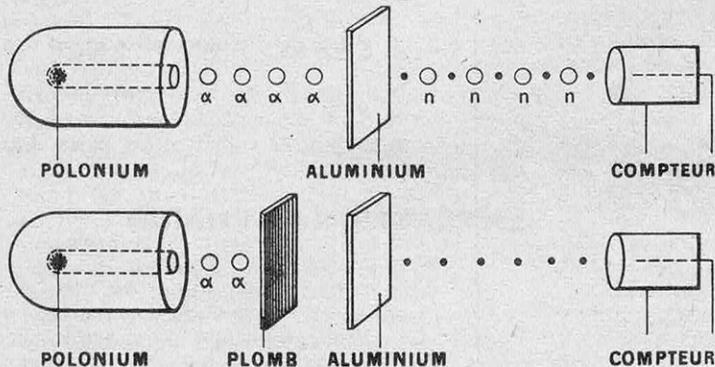
Frédéric Joliot est né à Paris en 1900. Ingénieur de l'École de physique et de chimie industrielle de la Ville de Paris, il devient en 1925 préparateur de Mme Curie à l'Institut du Radium. Il soutient sa thèse de docteur ès-sciences physiques en 1930. Maître de conférences à la Sorbonne, il se voit décerner en 1935, avec Irène Joliot-Curie, qu'il a épousée en 1926, le prix Nobel de Chimie. En 1937, il est élu professeur au Collège de France et, en 1943, membre de l'Académie des Sciences et de l'Académie de Médecine. C'est grâce à lui qu'en 1940, la France put acquérir le stock norvégien d'eau lourde. En 1945, il est chargé de la direction du Centre National de la Recherche Scientifique, puis en 1946 devient Haut-Commissaire à l'Energie Atomique, poste dont il est révoqué le 28 avril 1950. Frédéric Joliot est commandeur de la Légion d'honneur avec Croix de guerre pour faits de résistance. Il est impossible de résumer en quelques lignes son œuvre scientifique ; sa contribution fut capitale dans



● Frédéric Joliot et Irène Joliot-Curie dans leur laboratoire, mesurant une radioactivité à l'aide d'un montage électrométrique (I. du Radium).

diverses branches de la physique nucléaire : neutrons, matérialisation des photons, dématérialisation des électrons, radioactivité artificielle, fission de l'uranium, etc. Irène Joliot-Curie, fille aînée

de Pierre et Marie Curie, est née à Paris en 1897. Elle fit ses études en Sorbonne où elle fut reçue docteur ès-sciences en 1925. Elle fut, de juin à septembre 1936, Sous-Secrétaire d'Etat à la Recherche scientifique. Ses principaux travaux ont porté sur les rayons alpha du polonium, sur la projection de noyaux d'atomes par les neutrons, sur la production d'électrons positifs par les rayons gamma, etc. En collaboration avec son mari, elle découvre la radioactivité artificielle en 1934 et reçoit avec lui le prix Nobel de 1935. Ses recherches sur les radioéléments artificiels formés dans l'uranium par les neutrons ont apporté une contribution importante à la découverte de la fission. Elle est actuellement professeur à la Sorbonne et Commissaire à l'Énergie Atomique.



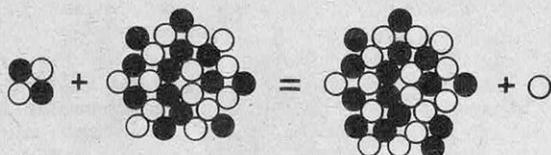
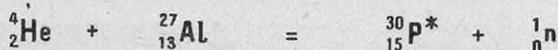
● Ainsi fut découverte la radioactivité artificielle : la feuille d'aluminium continue à émettre des électrons positifs après arrêt des rayons alpha.

n° 3417 aux noms de MM. Joliot, Halban et Kowarski et sous le titre : « perfectionnements apportés aux dispositifs de production d'énergie. »

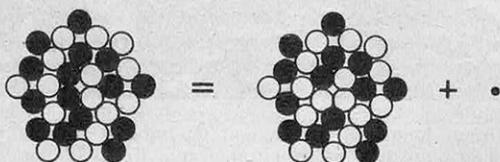
Francis Perrin, fils de Jean Perrin, est le premier à publier dans les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, une évaluation de la masse minimum d'oxyde d'uranium nécessaire à la production d'une réaction en chaîne. Il trouve qu'une réaction explosive ne peut s'amorcer, étant donné le libre par-

cours moyen des neutrons, à l'intérieur d'une masse d'oxyde d'uranium de forme sphérique que lorsque son rayon est supérieur à 1,40 m, ce qui correspond à 40 tonnes d'oxyde, mais il imagine déjà le « réflecteur » de neutrons pour diminuer ce rayon. Avec un réflecteur de fer de 35 cm d'épaisseur, il calcule que la masse sphérique d'oxyde d'uranium peut être ramenée à 12 tonnes. Nous verrons plus loin comment les Américains, en utilisant le plutonium 239 ou l'uranium 235 ont complè-

RADIOACTIVITÉ ARTIFICIELLE

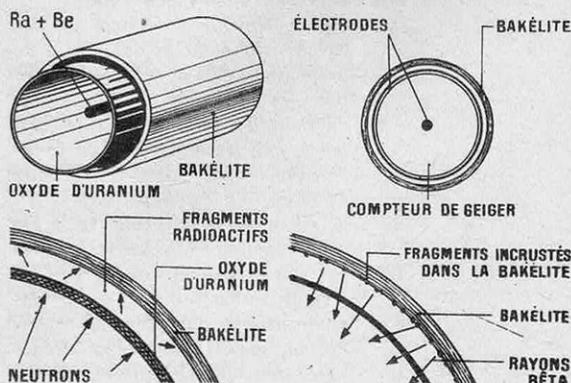


HÉLION (PARTICULE α)	ALUMINIUM	PHOSPHORE*	NEUTRON
2 PROTONS	13 PROTONS	15 PROTONS	
2 NEUTRONS	14 NEUTRONS	15 NEUTRONS	1 NEUTRON



PHOSPHORE*	SILICIUM	POSITON
15 PROTONS	14 PROTONS	
15 NEUTRONS	16 NEUTRONS	

● Réaction nucléaire donnant du phosphore radioactif par bombardement de l'aluminium par des particules alpha.



● F. Joliot prouve la réalité de la fission par les neutrons lents, en recueillant les fragments radioactifs projetés.

tement modifié le problème que s'était posé F. Perrin.

D'autre part, plusieurs physiciens imaginent le « modérateur » qui, ralentissant les neutrons émis à grande vitesse lors d'une fission, favorise leur absorption par d'autres noyaux. Le choix de l'élément modérateur, qui doit nécessairement être un élément léger et absorbant peu les neutrons, se circonscrit rapidement à l'hydrogène lourd (sous forme d'eau lourde) et au carbone (graphite).

Ainsi, dès le milieu de 1939, on voit apparaître les principes fondamentaux et les éléments principaux des bombes et des piles nucléaires.

Les physiciens cependant commençaient à se rendre compte depuis quelque temps qu'en quelque sorte ils « jouaient avec le feu ». Les premières craintes suscitées dans un public incomplètement informé étaient que lors de la première expérience à grande échelle les savants ne transforment la terre en immense brasier, un peu comme une de ces « novae » que l'on voit s'allumer inopinément dans les constellations lointaines, ou au moins comme une « naine blanche ». Elles furent rapidement reconnues sans fondement. Mais il apparaissait bien que la fission de l'uranium pouvait être à la base de moyens nouveaux de destruction d'une puissance inimaginable, et son intérêt militaire était évident. Aussi un certain nombre de physiciens éminents tentèrent-ils, au printemps de 1939, d'obtenir des chercheurs qu'ils limitent volontairement la publication de leurs résultats. En fait, toute publication cessa en France et en Grande-Bretagne en septembre 1939, lorsqu'éclata la deuxième guerre mondiale.

LA DÉBACLE EN FRANCE

S'il paraissait possible, théoriquement, de réaliser une réaction en chaîne, il restait à en faire la démonstration pratique et à évaluer les quantités d'uranium et d'eau lourde nécessaires. C'est dans ce but qu'en pleine guerre, puissamment aidé par le Ministre de l'Armement de l'époque, M. Raoul Dautry, M. Joliot fit venir de Norvège les 165 litres d'eau lourde qui représentaient à cette époque tout le stock existant dans le monde. L'eau lourde ne pouvait être recueillie en quantité appréciable que dans les résidus des bacs d'électrolyse et, seule, l'industrie norvégienne disposait d'énergie électrique à un prix suffisamment bas pour

entreprendre l'opération.

Mais les circonstances n'allèrent pas permettre aux Français de mener à bien leurs expériences, bien qu'ils fussent à ce moment à l'avant-garde des recherches en matière d'énergie nucléaire. Ils n'en jouèrent pas moins un rôle décisif dans les expériences préliminaires entreprises peu après en Grande Bretagne et aux Etats-Unis.

En mai 1940, la « drôle de guerre » prend fin et les Panzerdivisionen déferlent sur la

Belgique et sur la France. A Ivry-sur-Seine, au 67, rue Franklin, le Laboratoire de Synthèse Atomique prépare son repli vers le sud. On remplit fièvreusement des camions militaires avec l'oxyde noir d'uranium et les 165 litres d'eau lourde ramenés de Norvège, que Frédéric Joliot, Halban et Kowarski, « affectés spéciaux » depuis septembre, destinaient à l'étude des conditions d'édification d'une pile atomique. Des brassards bleus avec R. S. (Recherche Scientifique) avaient été prévus pour le personnel scientifique dispensé du service armé.

La caravane arrive à Clermont-Ferrand, elle s'installe dans deux villas de la banlieue et y séjourne à peine trois semaines ; l'eau lourde est mise en sureté dans une cellule de la prison de Riom. Lorsque Paris est débordé par l'avance allemande, il ne reste plus qu'à s'évacuer plus au sud, à Toulouse ou même à Casablanca. Les bidons d'eau lourde suivront. Les Allemands sont à Moulins : plus une minute à perdre. L'eau lourde part pour Bordeaux avec Joliot, Halban et Kowarski. A Bordeaux, M. Joliot décide de rester en France et d'envoyer ses deux collaborateurs avec l'eau lourde à Londres. Ils manquent un des deux derniers bateaux qui se dirigent vers l'Angleterre. Coïncidence ou service de renseignements « cinquième colonne » ? Le bateau est coulé par la Luftwaffe. Dans le suivant, les deux physiciens voyagent avec leur précieuse cargaison et arrivent sans encombre en Angleterre où ils sont reçus et hébergés à Cambridge.

« ALLIAGES POUR TUBES »

Le problème de la libération de l'énergie nucléaire faisait à cette époque l'objet de recherches très poussées en Grande-Bretagne. En avril 1940, un Comité de recherches avait été constitué sous la présidence du physicien G. P. Thomson. Il se consacrait surtout à la détermination systématique au laboratoire (Liverpool et Cambridge) des données numériques nécessaires pour les calculs, et aussi à l'étude des procédés de séparation des isotopes de l'uranium (Oxford). C'est au Cavendish Laboratory de Cambridge, pendant que la bataille aérienne fait rage au dessus du Royaume Uni, que Halban et Kowarski, aidés de leurs collègues britanniques, reprennent le problème des réactions en chaîne et poursuivent les expériences amorcées au Collège de France.

Les résultats furent tels que le rapport du Comité Thomson de juillet 1941 affirmait la possibilité d'utiliser l'énergie atomique comme arme de guerre et la nécessité de poursuivre les recherches avec des moyens considérablement accrus. M. Churchill décida alors de créer une nouvelle section secrète, camouflée sous le nom de « Directorate of Tube Alloys » (Direction des alliages pour tubes), dans laquelle sont enrôlés tous les spécialistes britanniques. Mais l'immensité de la tâche

dépassait les possibilités, et « Tube Alloys » limita son programme à l'étude de la production de l'uranium et de la séparation de ses isotopes, à celle de la production de l'eau lourde, et à la mesure de diverses constantes nucléaires. On commença à s'inquiéter des sources coloniales belges de minerai d'uranium ; les gisements canadiens du Grand Lac de l'Ours furent pourvus de nouveaux équipements et des voies de communication terrestres, maritimes et aériennes vont rapprocher ce lieu désertique et glacial des centres industriels.

En même temps, les contacts se multiplient avec les organismes américains correspondants. Le professeur E. Oliphant est envoyé aux Etats-Unis, tandis que les Américains Urey et Pegram visitent leurs collègues britanniques. Les théoriciens anglais se montrent très affirmatifs quant à la possibilité de réaliser une bombe atomique, mais démontrent que le problème est plus ardu qu'on ne le pensait et que sa solution exigera beaucoup de temps, d'efforts industriels et de spécialistes de toutes sortes. Finalement, la décision est prise de transférer au Canada l'organisation « Tube Alloys » avec tout son personnel technique. Les chercheurs s'installent à Montréal, et des relations plus étroites sont établies avec le groupe américain de Chicago où Enrico Fermi va édifier la pile atomique historique qui sera la première à fonctionner.

PREMIÈRES ORGANISATIONS AMÉRICAINES

Aux Etats-Unis, un certain nombre de savants, surtout d'origine étrangère, en particulier le Hongrois Szilard, avaient, dès la fin de 1939, alerté les autorités officielles. Une lettre d'Einstein, réfugié aux Etats-Unis depuis 1934, fut remise au Président Roosevelt ; elle lui exposait l'immense intérêt des recherches nucléaires et la nécessité de les pousser très activement sous peine d'être devancés par un ennemi éventuel qui s'assurerait ainsi une supériorité écrasante. Les Etats-Unis n'étaient pas encore en guerre, mais il ne faisait pas de doute qu'ils seraient tôt ou tard entraînés dans le conflit.

Le Président Roosevelt institua un Comité Consultatif de l'Uranium qui lui soumit le 1^{er} novembre 1939 un rapport où se trouvaient évoqués aussi bien l'utilisation de l'énergie nucléaire dans des bombes que son emploi comme source de force motrice industrielle.

Le premier transfert de fonds (6 000 dollars) venant de l'Armée et de la Marine pour l'achat de matériaux mentionnés dans les recommandations du rapport du 1^{er} novembre, est fait en date du 20 février 1940.

Le Comité de Recherches de la Défense Nationale, institué en juin 1940, passe un premier contrat de recherches avec l'Université de Columbia. D'autres suivent avec l'Université de Princeton, la Standard Oil,

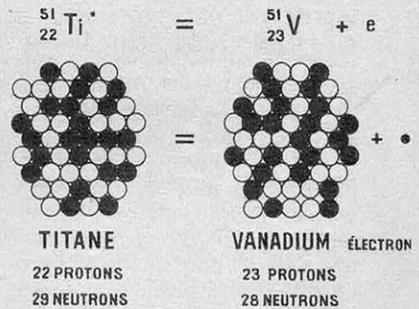
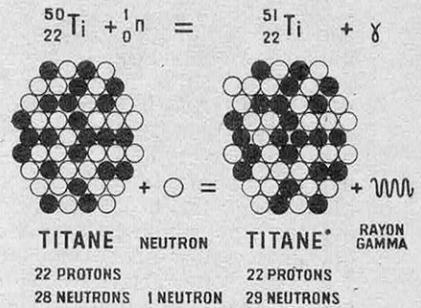
1934 : FERMI ÉTUDIE LA PHYSIQUE DES NEUTRONS



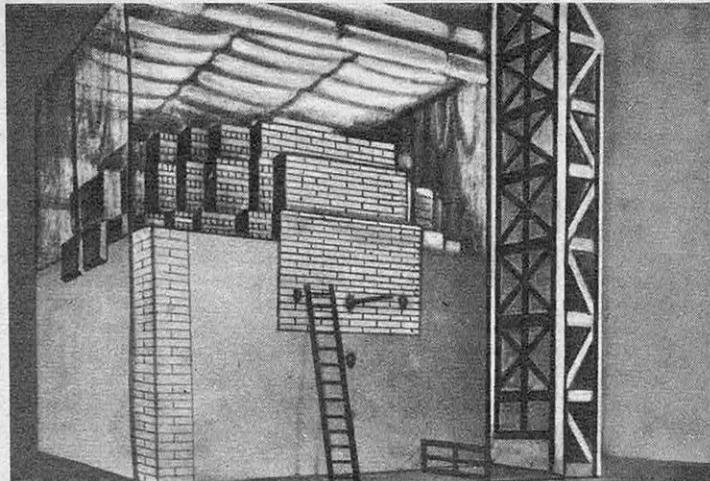
Enrico Fermi est né à Rome en 1901. Il manifesta dès l'âge de treize ans des dispositions exceptionnelles pour les mathématiques et fut reçu docteur en physique théorique à l'Université de Pise en 1922. Fermi est considéré généralement comme un physicien théoricien, mais ses recherches de physique expérimentale n'ont pas été moins remarquables. Il séjourna pendant quelques mois à Göttingen chez Max Born, en compagnie de Heisenberg, à un moment où l'étude et la discussion des théories quantiques étaient à l'ordre du jour et devaient conduire au développement de la mécanique ondulatoire et du principe d'incertitude. Après un séjour à l'Université de Rome, puis à Leyde, Fermi est nommé à l'Université de Florence, où il apporta sa première contribution à la physique théorique en y développant la statistique de « Fermi-Dirac » qui étend aux molécules d'un gaz le fait déjà connu que, dans un atome, il ne peut y avoir deux électrons dans le même état quantique, statistique qui se révéla d'importance particulière dans l'étude des gaz électroniques des métaux. Nommé Professeur de Physique à l'Université de Rome en 1926, il y forma une école de physiciens et

de théoriciens dont certains, maintenant répandus dans le monde entier, sont déjà célèbres.

En 1932, Fermi, centrant son activité sur l'étude théorique et expérimentale du noyau atomique, propose une théorie de la radioactivité bêta et donne des arguments mathématiques en faveur de l'existence du neutrino, ce corpuscule dont aucun expérimentateur n'a pu encore confirmer l'existence. En 1934, il utilise les neutrons ralentis dans la paraffine comme projectiles et montre la formation de noyaux radioactifs. En 1938, il reçoit le prix Nobel pour ses travaux sur la physique du neutron. Fermi s'exile aux Etats-Unis en janvier 1939 avec sa famille. Il accepte un poste à l'Université de Columbia à New York et contribue à attirer l'attention du gouvernement des Etats-Unis sur l'intérêt militaire des problèmes nucléaires. Il part en 1941 pour Chicago où, le 2 décembre 1942, la première pile atomique, construite sous sa direction, entre en fonctionnement.



● Schéma d'une réaction de capture d'un neutron par un noyau produisant un radioélément artificiel.



● La pile à uranium et à graphite édiflée à Chicago sous la direction de Fermi fut la première à prouver la possibilité des réactions en chaîne.

l'Université Cornell, la Carnegie Institution, l'Université de Minnesota, le Iowa State College, l'Université John Hopkins, le Bureau of Standards, les Universités de Virginie, de Chicago et de Californie. Ainsi, en novembre 1941, il y avait 16 programmes en cours, subventionnés par un budget de 300 000 dollars.

Ce chiffre était encore bien loin des sommes consacrées à cette époque aux études électroniques (radar, etc.) et qui atteignaient des millions de dollars. Mais les choses allaient se préciser.

Un jeune physicien de l'Université de Minnesota, Nier, avait, au début de 1940, réussi

1939 : HAHN DÉCOUVRE LA FISSION DE L'URANIUM



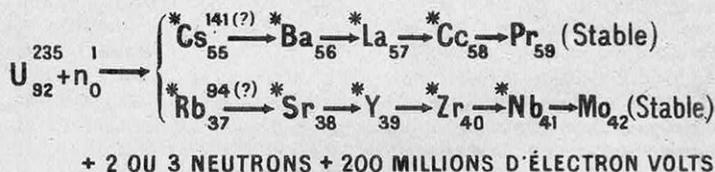
Otto Hahn est né le 8 mars 1879 à Francfort sur le Main. Il étudia la chimie à l'Université de Marburg, où il fut reçu docteur en 1901, avec une thèse portant sur la chimie organique. De 1904 à 1905 il travaille à l'University College à Londres sous la direction de Sir William Ramsay et il découvre une nouvelle substance radioactive : le radiothorium. De 1905 à 1906, il fait un stage au laboratoire du Professeur Ernest Rutherford, à l'Université McGill de Montréal (Canada), et il découvre le radio-

actinium. Ses recherches portent alors principalement, en collaboration avec Rutherford, sur les rayons alpha émis par le radiothorium et le radioactinium. De retour à Berlin, en 1907, il travaille surtout avec le Professeur Lisa Meitner ; ils découvrent le mésothorium. Poursuivant ses travaux sur la chimie des radioéléments, sur le recul des noyaux lors de l'émission des particules alpha, sur les spectres de rayons bêta, il découvre encore en 1918 de nouvelles substances radioactives : le protactinium et l'uranium Z. Ce dernier est un isomère de l'uranium X2 et c'est à Hahn que l'on doit ainsi la découverte du premier cas d'isométrie, phénomène que l'on devait retrouver dans d'autres familles radioactives.

C'est en 1939 qu'il découvrit,

avec Strassmann, la fission de l'uranium en deux noyaux de poids moyens. Amené, en effet, à étudier la nature chimique des éléments transuraniens que, à la suite des travaux de Fermi, on supposait formés par bombardement de l'uranium par les neutrons, il constata que les propriétés chimiques de ces prétendus éléments transuraniens les rapprochaient des éléments de poids moyen : baryum, lanthane, cérium, etc., et en conclut que le noyau d'uranium devait se fendre en deux fragments de dimensions comparables, ce qui fut confirmé quelques semaines plus tard.

Otto Hahn reçut le prix Nobel de chimie en 1944. Il est avec Lisa Meitner, un des derniers survivants des premiers pionniers de la radioactivité.



● La fission d'un noyau d'uranium livre deux fragments radioactifs et deux ou trois neutrons. Ce schéma indique un des couples de fragments.

à séparer quelques millièmes de grammes d'uranium 235 de l'uranium 238. Cet échantillon infime, irradié par des neutrons fournis par le cyclotron de l'Université de Columbia à New York (Dunning et collaborateurs) fournit la preuve définitive que c'est cet isotope de l'uranium naturel qui joue le rôle capital dans le phénomène de fission, confirmant une théorie édictée par le Danois Bohr et l'Américain Wheeler et les résultats des premières expériences françaises de la fin de 1939. On entrevoyait ainsi la possibilité de constituer une bombe, à condition d'obtenir en quantité suffisante de l'uranium 235 à peu près pur. Le problème paraissait encore insurmontable à l'échelle industrielle.

C'est également au printemps de 1940 que Mc Millan, bombardant de l'uranium à l'aide du cyclotron de Berkeley, mit en évidence le premier élément transurannique, le neptunium, lequel, radioactif, donne un deuxième élément transurannique, le plutonium. Ce dernier fut mis en évidence, toujours à Berkeley, par Seaborg, en décembre 1940. Cette découverte était de première importance car, d'une part, le plutonium subit la

fission dans les mêmes conditions que l'uranium 235 et peut donc servir à la fabrication des bombes, et d'autre part, l'uranium 238 se trouvait en quelque sorte réhabilité, puisque c'est lui qui, capturant un neutron, donne naissance successivement au neptunium et au plutonium.

Toutes les idées s'étaient suffisamment précisées à la fin de 1941 pour que le problème de la bombe apparût soluble, à condition d'y mettre le prix. Il était d'ailleurs impossible de ne pas aller de l'avant, avec tous les moyens disponibles, car tout laissait supposer que les Allemands travaillaient la question activement ; ils disposaient de théoriciens de tout premier plan, tels que Heisenberg et von Weizsacker, et la qualité de leurs expérimentateurs et de leurs techniciens ne pouvait se discuter.

LES RECHERCHES NUCLÉAIRES EN ALLEMAGNE

Depuis la découverte de la fission de l'uranium par Otto Hahn et Strassman au Kaiser Wilhelm Institut de Berlin, en décembre 1938, les Alliés étaient dans l'ignorance complète

du développement donné aux recherches nucléaires en Allemagne. Les nombreux réfugiés allemands aux Etats-Unis, physiciens et mathématiciens, étaient absolument certains que leurs anciens collègues ne perdaient pas une minute dans la course à la bombe.

En 1942, il fut question d'envoyer en Suisse un physicien allié à l'occasion d'un Congrès pour tenter de contacter un collègue allemand et le sonder sur l'orientation des recherches dans son pays. Mais le service de contre-espionnage américain avait des idées bien arrêtées sur le manque de savoir-faire des savants en matière d'espionnage. Il fit valoir qu'on apprendrait fort peu de choses et que l'intérêt manifesté par un envoyé inexpérimenté et les questions qu'il poserait risqueraient de mettre l'ennemi sur la bonne voie, s'il n'y était déjà. L'idée dut donc être abandonnée.

Il fallait cependant agir au plus vite et contrecarrer le plus possible les recherches nucléaires en Allemagne: C'est ainsi que naquit le projet « Grouse — Freshman — Gunnerside » qui devait être connu plus tard sous des noms plus évocateurs : Epopée de l'eau lourde (livre du capitaine norvégien Knut Haukelid), ou Bataille de l'eau lourde (film franco-norvégien).

Nous pouvons maintenant, d'une part, reconstituer ces luttes secrètes de la résistance norvégienne qui, si elles ne paralyserent pas complètement la recherche nucléaire nazie, donnèrent courage aux chercheurs alliés, et d'autre part montrer que les craintes anglo-saxonnes n'étaient pas justifiées.

Les Allemands étaient si sûrs d'eux-mêmes et de leur soi-disant incomparable supériorité technique et scientifique qu'ils ne pensèrent pas un seul moment que les Alliés pouvaient les dépasser dans ce domaine, pas plus que dans n'importe quel autre. En fait, le rendement technique et scientifique allemand fut pitoyable et l'aide apportée par les dirigeants du Reich aux savants nucléaires fut très limitée.

Nous apprenons par les rapports américains (« Alsos » par S. Goudsmit) et par les rapports « Fiat » rédigés par les Allemands après la guerre, que la recherche nucléaire en Allemagne, de 1940 à 1945, était divisée en quatre groupes et que 19 essais infructueux de réaction en chaîne furent tentés durant cette période.

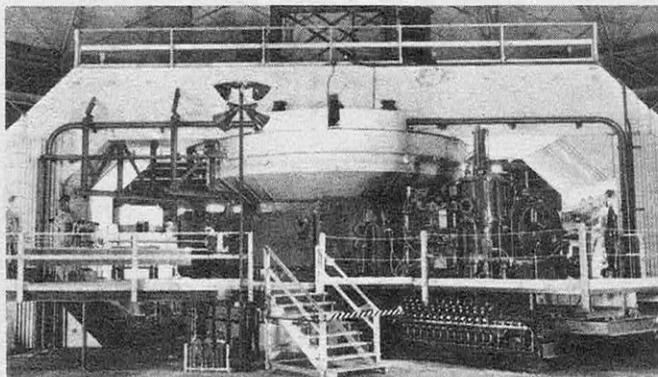
Nulle part on ne put obtenir de résultat positif. C'est seulement en février 1945 (quatre ans après les Américains) que Gerlach et Heisenberg furent convaincus de la possibilité de maintenir une telle réaction. Mais personne en Allemagne, jusqu'à l'explosion sur Hiroshima, n'avait aucune idée précise sur la façon de construire une bombe atomique.

L'office d'espionnage technique allemand, installé dès 1940 à Paris, 20 rue Quentin-Bauchart sous le couvert de la Société hollandaise Cellastic, ne put jamais recueillir de renseignements sur les travaux nucléaires conduits par les Alliés. La société allemande Auer, qui était chargée de la préparation de l'uranium métallique, se doutait si peu des applications futures de ce métal ainsi que du thorium, qu'elle rafla tous les stocks de thurium en France et dans les autres pays conquis à seule fin de les utiliser pour fabriquer

Mc MILLAN TROUVE LE PRINCIPE DU SYNCHROTRON



Edwin McMillan est né en 1907. En 1940, avec P. H. Abelson, il bombarde de l'uranium avec les projectiles du cyclotron de Berkeley et découvre le nep-



tunium dans la cible bombardée. L'année suivante, avec Seaborg, il découvre le plutonium. En 1945, il a l'idée, proposée aussi par Oliphant (G.-B.) et Veksler

(U. R. S. S.), du principe du synchrotron et de transformer le cyclotron de 5 mètres en accélérateur à fréquence variable ou synchro-cyclotron (ci-dessus).

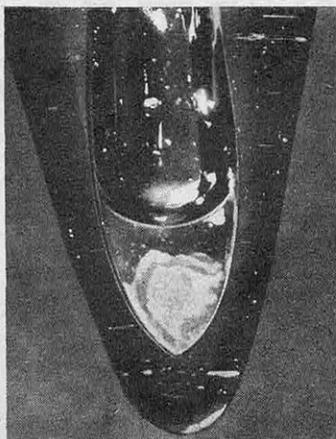
GL. SEABORG ISOLE LES ÉLÉMENTS TRANSURANIENS



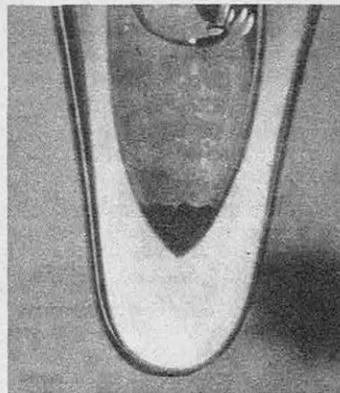
Glenn T. Seaborg est né à Ishpeming, dans le Michigan, en 1912. Il fit ses études à l'Université de Californie à Los Angeles et à Berkeley. Il fut reçu docteur à Berkeley en 1937 et il y enseigna dès cette époque tout en continuant des recherches en chimie et en physique nucléaires. C'est ainsi qu'en collaboration avec d'autres chimistes il participa à la découverte des éléments transuraniens : plutonium, de numéro atomique 94, en 1940 ; américium, de numéro atomique 95, en 1944 ; curium, de numéro atomique 96, également en 1944 ; berkelium, de numéro atomique 97, en 1949 ; californium, de numéro atomique 98, en 1950. Il dirigea également l'équipe qui découvrit les isotopes fissionnables du plutonium, Pu 239, et de l'uranium, U 233, ainsi que

l'isotope de vie longue du neptunium, Np 237, et établit l'existence de la famille radioactive de poids atomique $4n + 1$ du plutonium. On connaissait déjà les familles radioactives naturelles $4n$, $4n + 2$ et $4n + 3$ où n est un nombre entier, et on avait vainement cherché jusque-là les membres de la famille dont les poids atomiques devaient avoir la forme $4n + 1$.

Détaché au Laboratoire Métallurgique de Chicago de 1942 à 1946, il y dirigea les laboratoires de recherches chargés de mettre au point les processus de séparation chimique du plutonium. L'étude portait sur des microgrammes de plutonium et une microchimie spéciale fut mise au point. Les



● Un sel de plutonium (élément 94) grossi vingt fois environ.



● Microphotographie du premier échantillon d'américium (élément 95)

résultats devaient être appliqués à l'échelle industrielle aux usines d'Oak Ridge, dans le Tennessee, et de Hanford, dans l'Etat de Washington.

Seaborg poursuit actuellement, à l'Université de Californie, des recherches sur les éléments transuraniens et sur les diverses réactions nucléaires de grande énergie que permet d'obtenir le synchrocyclotron de 5 mètres de diamètre de Berkeley. C'est à lui que l'on doit l'idée d'une série d'actinides analogue à la série des lanthanides ou terres rares. Cette classification des transuraniens a permis de prédire par analogie avec leurs homologues des lanthanides les propriétés chimiques des éléments synthétiques.

une nouvelle pâte dentifrice thoriée, qui ne vit d'ailleurs jamais le jour !

Les tentatives faites pour séparer les isotopes de l'uranium furent également désastreuses. Les seuls essais tentés à Hambourg et à Celle, dans le nord du Hanovre, par la méthode centrifuge furent tellement décourageants que l'industrie allemande s'avoua vaincue. Pourtant les techniciens allemands auraient pu, s'ils en avaient eu l'idée, construire des bombes nucléaires malgré la pénurie d'eau lourde et malgré leur impuissance à construire des piles convenables. Il suffisait de concentrer l'uranium 235. Il est probable que l'acharnement mis par les Alliés à les frustrer de l'eau lourde norvégienne leur fit croire que cette substance était absolument indispensable.

LA LUTTE POUR L'EAU LOURDE

Les Allemands s'efforcèrent, dès la conquête de la Norvège, d'accroître le rendement des usines de la Norsk Hydro, qui, de 10 litres d'eau lourde par mois jusqu'à 1941, passa d'abord à 120 litres par mois, puis à 300 litres par mois. Ils perdirent, en outre, beaucoup de temps lorsqu'ils s'aperçurent que les saboteurs norvégiens, sur l'ordre de Londres, avaient contaminé les livraisons, ce qui obligea le Kaiser Wilhelm Institut à purifier électrolytiquement le précieux liquide.

Cependant les Alliés avaient décidé de s'attaquer directement aux installations productrices d'eau lourde. Le projet fut minutieusement préparé à Londres par les Anglais

et par le gouvernement exilé de Norvège. Le 5 avril 1942, un contremaître norvégien du nom de Einar Skinnarland fut parachuté à côté des usines d'eau lourde à Rjukan. Il avait pour mission d'acheter du ravitaillement et d'écouter les consignes de Londres afin de préparer l'arrivée du groupe « Grouse ». Ce dernier, composé de quatre Norvégiens, fut parachuté en octobre 1942 sur le plateau de Hardanger avec mission de faciliter la tâche d'un commando de « saboteurs » qui devaient être déposés par planeur (opération « Freshman »). Le but essentiel de l'opération, relate le Journal du Génie Royal britannique, était de détruire les stocks existants d'eau lourde ainsi que les installations électrolytiques nécessaires à sa fabrication. L'usine, appartenant à la Norsk Hydro, est située à Vemork, à 3 km à l'ouest de Rjukan où se trouve la centrale électrique la plus puissante de la Norvège du Sud. Une voie de chemin de fer relie le débarcadère du ferry-boat du lac Tinnisjoe à l'usine.

L'usine d'eau lourde est édiflée au flanc de la montagne, à 300 m au dessus de la rivière. Une des principales tâches de cette centrale étant la fabrication de l'ammoniaque, les Alliés hésitèrent jusqu'en 1943 à bombarder l'usine. Ce gaz stocké pouvait en effet, lors du bombardement, se répandre dans la vallée et asphyxier tous les habitants. On préféra confier la tâche à des saboteurs spécialement entraînés.

Dans la nuit du 19 au 20 novembre 1942, deux bombardiers remorquant chacun un planeur quittèrent l'Angleterre pour la Norvège. Un des planeurs avec 17 hommes s'écrasa à l'atterrissage dans le Fyljesdal. Les deux pilotes, le chef de groupe et sept de ses hommes furent tués sur le coup. Quatre autres soldats furent blessés à l'atterrissage ; on les emmena à l'hôpital de Stavanger où ils furent empoisonnés par un médecin alle-

mand. Les cinq soldats indemnes furent faits prisonniers et fusillés le 18 janvier 1943.

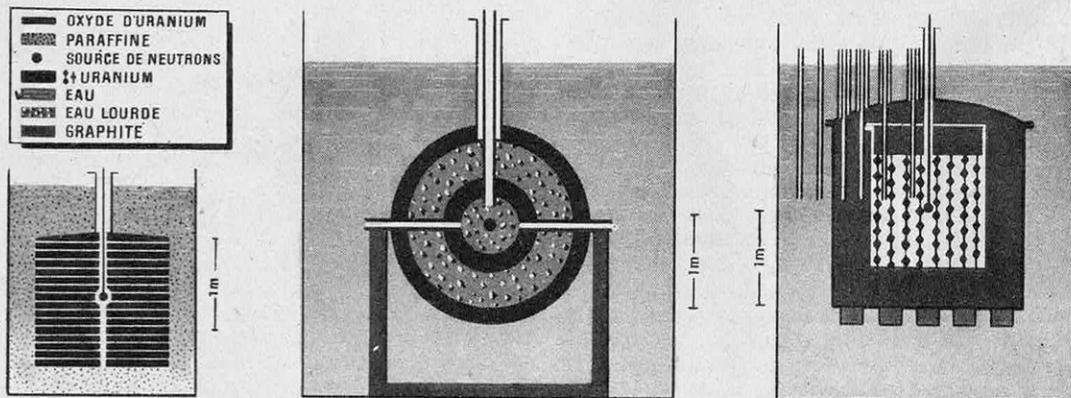
Le planeur et l'avion n° 2 eurent un sort aussi tragique. Ils s'écrasèrent dans les montagnes de l'Helleland. Les 14 survivants furent faits prisonniers et fusillés sur-le-champ. Un malencontreux plafond de nuages sur Rjukan avait fait échouer l'opération « Freshman ».

Le War Office n'abandonna pas le projet. Le professeur norvégien Tronstad qui se trouvait à Londres et qui avait jadis participé à la construction des usines de la Norsk Hydro, fut chargé de préparer l'opération « Gunnerside ». Six Norvégiens, J. Roenneberg, K. Haukelid, K. Idland, H. Storhang, B. Stroemsheim et F. Kayser furent spécialement entraînés pour saboter les usines de Vemork. En février 1943, ce groupe était parachuté en Norvège et quelques jours après il fusionnait avec les quatre hommes du groupe « Grouse » qui les attendaient. Le commando se mit immédiatement à l'œuvre et parvint à détruire les appareils électrolyseurs de l'usine le 23 février 1943. Les Allemands ne purent les poursuivre dans les montagnes, mais ils remirent vite les appareils en marche.

Londres et Washington se résignèrent alors à un bombardement aérien qui eut lieu le 16 novembre 1943.

Les Allemands décidèrent alors de transférer tout le matériel en Allemagne. L'ordre de Londres fut impératif : « Grouse — Gunnerside » devait détruire stock et matériel au départ. Le 20 février 1944, le groupe de sabotage exécuta l'ordre en faisant sauter le ferry-boat avec l'eau lourde au milieu du lac de Tinnisjoe. Le War Office, qui ne fait jamais les choses à demi, avait d'ailleurs chargé un autre groupe à Herøya de détruire la cargaison en cas d'échec de « Gunnerside » et, luxe supplémentaire, une meute de sous-marins attendait dans le Skagerrak.

TROIS TYPES DE « PILES » EXPÉRIMENTÉES EN ALLEMAGNE



● A gauche, disques d'oxyde noyés dans la paraffine ; au centre, sphères concentriques d'uranium contenant de l'eau lourde et plongées dans de l'eau ordinaire ;

à droite, blocs d'uranium dans une enceinte en graphite entourée d'eau. Aucune réaction en chaîne malgré 1,5 tonnes d'uranium dans le dernier montage.

LE « MANHATTAN ENGINEER DISTRICT »

Au printemps de 1942, V. Bush, président de l'Office de Recherches Scientifiques, faisait savoir au Président Roosevelt que la possibilité de réaliser une bombe à l'uranium 235 ou au plutonium était devenue une quasi-certitude, que les délais de fabrication lui permettraient de jouer un rôle effectif dans les opérations militaires, et qu'il fallait envisager un premier crédit d'environ 500 millions de dollars.

Le programme fut approuvé et, sous la direction du Général L. R. Groves du corps des Ingénieurs Militaires, une gigantesque organisation fut mise sur pied, dénommée, pour tromper éventuellement l'espionnage ennemi, « Manhattan Engineer District ».

Recherches et installations marchent de pair. Le Bureau of Standards met au point la purification extrême du graphite. Diverses méthodes de production de l'eau lourde sont appliquées sur une grande échelle, en particulier au Canada.

Dès l'été de 1942, les usines livrent par jour plus d'une tonne d'oxyde d'uranium à un très haut degré de pureté. En novembre, 6 tonnes d'uranium-métal peuvent être utilisées dans la pile que construit Fermi à Chicago.

C'est le 2 décembre 1942, date historique, que cette première pile fonctionnant spontanément entre en action. Développant 0,5 watt le premier jour, elle atteint 200 watts le 12 décembre, niveau que l'on juge prudent de ne pas dépasser, les rayonnements mettant en danger le personnel des bâtiments voisins. Elle est édifiée sous les gradins du stade de foot-ball de l'Université de Chicago et a la forme d'un sphéroïde allongé, assez analogue à un bouton de porte considérablement grossi. Les lingots d'uranium-métal complétés par des lingots d'oxyde d'uranium comprimé étaient répartis suivant un réseau cubique entre des briques de graphite, et on les avait empilés progressivement en surveillant le flux des neutrons dans la pile. Fermi et ses collaborateurs eurent la surprise de voir la réaction s'établir alors que les trois-quarts seulement des dimensions calculées étaient atteintes, ce qui prouvait qu'on avait été trop prudent dans l'estimation des constantes nucléaires.

Une première étape était ainsi franchie victorieusement ; l'expérience acquise allait permettre la construction de piles beaucoup plus puissantes, productrices de plutonium. La première, prévue, pour 1 000 kW, et qui devait fabriquer 1 gramme de plutonium par jour, fut édifiée à Clinton, dans un vaste territoire de 200 km² acquis par le « Manhattan District » dans la vallée du Tennessee. Elle entra en fonctionnement en novembre 1943 et développa dès 1944 près de 1 800 kW. Une installation pour l'extraction de quelques grammes de plutonium par jour lui fut ad-

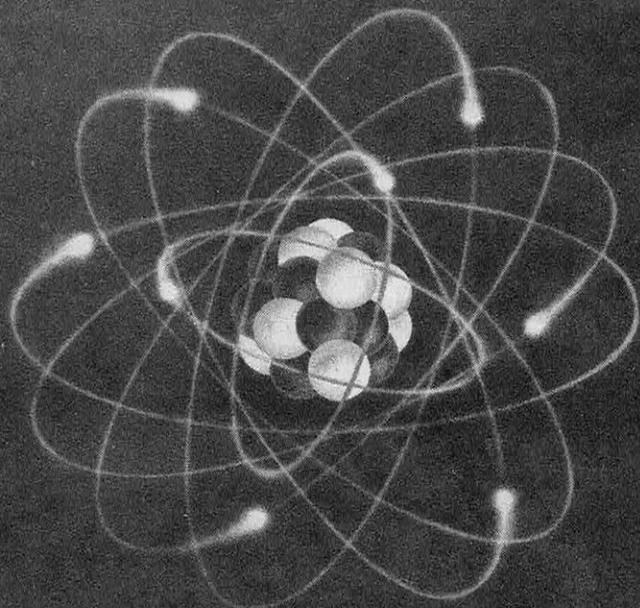
jointe. C'était une extrapolation extrêmement audacieuse des résultats obtenus par Seaborg et son équipe au Laboratoire Métallurgique de Chicago ; alors qu'il n'avait pu opérer que sur un demi-milligramme de plutonium, on devait traiter quotidiennement à Clinton plusieurs tonnes de lingots d'uranium extraits de la pile.

C'est également à Clinton qu'on établit les premières unités de séparation de l'uranium 235 par les procédés de diffusion gazeuse et par le procédé électromagnétique mis au point par Lawrence à l'aide du « calutron » (California Université Cyclotron) de Berkeley. L'usine de séparation des isotopes par diffusion gazeuse est désignée par K-25. Elle comporte 70 bâtiments rangés en U, avec des branches de 2 000 m de long sur 125 de large. L'usine de séparation électromagnétique des isotopes est désignée par Y-12. Elle comporte 170 bâtiments. Pour le bobinage des électroaimants, le cuivre manquant, le Trésor américain prêta 14 000 tonnes d'argent d'une valeur de 500 millions de dollars.

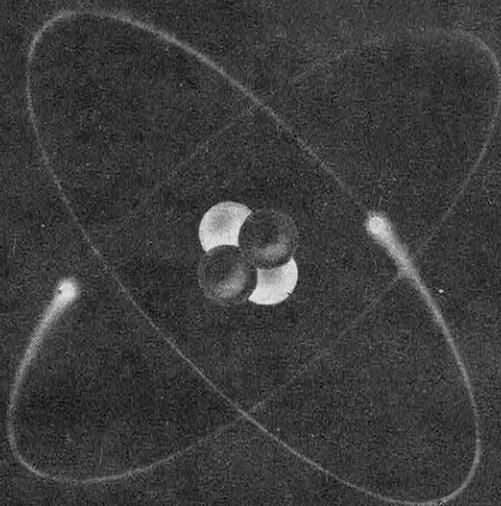
Mais c'est à Hanford que furent réalisées les installations les plus grandioses. Le Manhattan District y choisit un territoire de 600 km², entouré de 3 000 km² de terres incultes qui furent soumises au contrôle militaire. Les premiers travaux y furent entrepris en avril 1943. De véritables villes surgirent comme des champignons pour loger les 60 000 travailleurs qui y furent occupés dans la période de pointe de 1944. Au début de 1945, trois grandes piles y étaient en fonctionnement, livrant régulièrement le plutonium aux usines de traitement chimique des lingots.

Enfin, un laboratoire spécialisé dans l'étude de la bombe elle-même était créé de toutes pièces dans le désert du Nouveau Mexique, à Los Alamos, et placé sous la direction d'un théoricien, le professeur Oppenheimer, de Berkeley, qui avait été détaché à Chicago pour en étudier le problème spécial de la fission par les neutrons rapides, qui est à la base du fonctionnement de la bombe. Les appareillages les plus perfectionnés furent réunis à Los Alamos : cyclotrons, accélérateurs de particules, etc., au point que ce centre passe actuellement pour le laboratoire le mieux équipé du monde. Les physiciens les plus éminents s'y trouvèrent réunis : outre Oppenheimer, les Américains Bethe, et R. R. Wilson, l'Italien Fermi, l'Anglais Chadwick, le Danois Bohr, que l'Intelligence Service avait fait évader du Danemark occupé, etc.

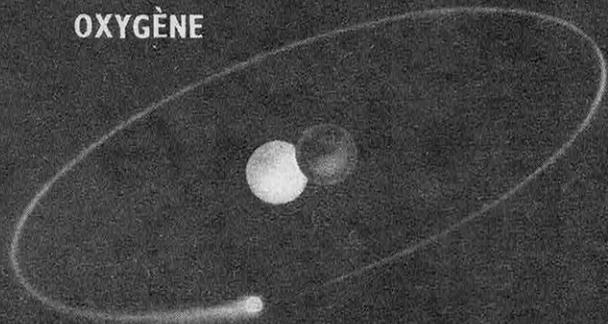
Le résultat de ces efforts colossaux fut la première explosion secrète, le 16 juillet 1945, d'une bombe atomique à Alamogordo, dans le désert du Nouveau Mexique. Peu après, les bombes lâchées sur Hiroshima et Nagasaki, les 6 et 9 août, révélaient au monde entier cette nouvelle conquête de l'homme sur la matière.



OXYGÈNE



HÉLIUM



DEUTÉRIUM



HYDROGÈNE

DE QUOI EST FAITE LA MATIÈRE

LES substances que nous voyons autour de nous sont extrêmement variées. Bien que leur nombre soit pratiquement illimité, les personnes les moins averties savent qu'elles sont formées d'un nombre très limité de corps simples. Dans le laiton comme dans l'or des bijoutiers, il y a du cuivre; dans les innombrables alliages que livre la métallurgie, il y a du fer, de l'étain, de l'aluminium, du carbone, du silicium, etc.; dans la cellulose, les matières plastiques, la chair et les os des animaux on trouve principalement de l'hydrogène, de l'oxygène, du carbone, et, suivant les cas, de l'azote, du soufre, du phosphore, du calcium, du fer, du sodium, etc.

Dans l'édification de tout le monde matériel, les chimistes et les physiiciens s'accordent à reconnaître un peu moins de cent éléments distincts. A la température ambiante sur la

surface de la Terre, voisine de 20° C, ces éléments sont soit gazeux comme l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, l'hélium, l'argon, etc., soit liquides comme le mercure, soit solides comme l'aluminium, le fer, le plomb, etc... Toutes les substances résultent soit du simple mélange de deux ou plusieurs de ces éléments en proportions variables, comme le cuivre et l'étain dans le bronze, ou le cuivre et le zinc dans le laiton; soit beaucoup plus fréquemment de leur combinaison chimique, en proportions bien définies, comme l'hydrogène et l'oxygène dans l'eau, ou le manganèse, l'oxygène et le potassium dans le permanganate; soit enfin des deux à la fois, comme l'air, mélange d'oxygène, d'azote, de gaz carbonique et de vapeur d'eau (plus une faible quantité d'hydrogène, d'hélium, d'argon, etc.), ou le lait, mélange d'eau, de sels

divers, de protéines, de graisses, de sucres, etc. La nature dispose en somme d'une centaine de sortes de « briques » (exactement 92) pour construire tous les édifices matériels minéraux, animaux et végétaux.

L'esprit des physiciens ne pouvait se tenir pour satisfait avec une telle conception, malgré la simplification qu'elle présente déjà : tous leurs efforts ont tendu à trouver à ces 92 corps simples une substance constitutive commune. C'est aujourd'hui chose faite. L'élément constitutif unique de toute la matière est bien une réalité : c'est le **nucléon**.

LE NUCLÉON

On est encore loin d'avoir des idées définitives sur le nucléon. On sait toutefois qu'il existe sous deux formes : la forme électrisée positivement, qui s'appelle **proton**, et celle qui est électriquement neutre, le **neutron**.

Ces deux formes ont pratiquement la même masse (à un millième près). Disons, pour fixer les idées, que la masse d'un proton s'exprime, en grammes, par le nombre

0,000 000 000 000 000 000 000 00167 ;

Il en faudrait donc 600 000 milliards de milliards pour faire un gramme. Au lecteur qui demanderait ce qu'est la masse, ce qu'est la charge électrique et de quelle manière elles est attachée au proton, nous ne pourrions fournir que des réponses embarrassées. Ce sont encore des notions très imprécises sur lesquelles les théoriciens sont loin de s'être mis d'accord. Qu'il nous suffise pour l'instant d'imaginer des boules de même poids, très faible, et de même diamètre, très réduit. Avec ces boules nous allons décrire la constitution de tous les corps simples, appelés d'une manière plus précise « éléments ». Nous ne parlerons d'ailleurs pour l'instant que des noyaux, où se trouve concentrée pratiquement toute la masse, et dont la charge, comme nous le verrons, détermine toutes les propriétés chimiques.

Le noyau le plus simple est évidemment constitué d'une seule boule, un proton. C'est l'hydrogène, de symbole H. Parfois un neutron s'accroche à cet unique proton : c'est encore de l'hydrogène, puisque l'ensemble des deux boules porte la même charge nucléaire 1, mais la masse est doublée ; on a un hydrogène deux fois plus lourd, appelé deutérium, de symbole D. Beaucoup plus rarement, un deuxième neutron s'accroche au proton ; on a de l'hydrogène trois fois plus lourd, appelé tritium. A l'ensemble de ces trois hydrogènes, dont les noyaux contiennent tous un seul proton et qui par conséquent portent tous la charge électrique unité, on attribuera naturellement le numéro 1.

Le numéro 2, dans la classification des éléments, est l'hélium, dont le noyau contient deux boules chargées, deux protons et, le plus fréquemment, deux boules neutres, deux neutrons. L'hélium normal a ainsi un noyau formé de quatre particules ; mais on en connaît

des variétés, beaucoup plus rares, à 1 et 4 neutrons.

Le numéro 3 est le lithium, avec 3 boules chargées, trois protons, et, suivant les cas, 2, 3, 4 ou 5 neutrons. De même, le béryllium porte la charge 4, et contient un nombre de neutrons variant de 2 à 7 ; on lui attribue le numéro 4.

Nous pourrions sans difficulté continuer ainsi à bâtir des noyaux de plus en plus lourds, portant des charges électriques de plus en plus grandes, jusqu'à l'uranium, numéro 92, et même jusqu'aux éléments synthétiques, qui n'existent pas dans la nature, dont le dernier est le californium, numéro 98.

Mais avant d'aller plus loin, il nous paraît nécessaire d'exposer très rapidement le principe de la notation que nous emploierons pour désigner les divers noyaux. Elle est très simple et sa compréhension ne demande qu'un peu d'attention ; elle facilitera considérablement tous les exposés qui vont suivre.

Pour représenter le noyau d'un élément, on ajoute à son symbole, He par exemple pour l'hélium, deux nombres : l'un indique le nombre de protons, ou numéro atomique, c'est-à-dire la charge électrique, 2 pour l'hélium ; l'autre indique le nombre total de nucléons, protons plus neutrons, c'est-à-dire la masse du noyau, 4 en général pour l'hélium. La plus grande confusion règne dans les mémoires scientifiques et dans les ouvrages d'enseignement quant à la disposition de ces deux nombres que l'on écrit tantôt avant, tantôt après le symbole, tantôt en indice, tantôt en exposant. Nous adopterons une des dispositions les plus courantes : le numéro atomique en indice, le nombre de masse en exposant, tous deux avant le sym-

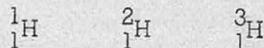
bole. La notation ${}^4_2\text{He}$ montre tout de suite que

l'élément considéré est de l'hélium, que la charge de son noyau (nombre de protons) est 2 et que sa masse (nombre total de nucléons, protons et neutrons) est 4. Il suffit de faire la différence entre ces deux nombres pour trouver le nombre de neutrons : 2.

Pour simplifier la notation, cependant, dans les cas où seule la masse entre en jeu, nous écrirons simplement le nombre de masse après le symbole. Ainsi la notation He 4 suffira pour distinguer l'hélium ordinaire de l'hélium « léger » He 3 (tous deux ont pour numéro atomique 2) ; la notation U 235 pour distinguer l'uranium de la bombe atomique de l'uranium U 238 qui livre, comme nous le verrons, le plutonium dans les piles (ces deux variétés ont pour numéro atomique 92).

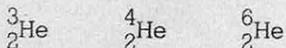
Reprenons maintenant la série des éléments légers dont nous avons parlé plus haut :

On voit facilement que l'hydrogène ordinaire, l'hydrogène lourd et l'hydrogène très lourd auront pour symboles :

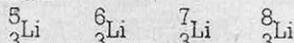


On désigne quelquefois l'hydrogène lourd par ${}^2_1\text{D}$ et l'hydrogène très lourd par ${}^3_1\text{T}$, pour rappeler qu'ils portent des noms particuliers, deutérium et tritium, mais nous éviterons ces notations qui pourraient provoquer des confusions.

Pour les différentes sortes d'hélium, nous aurons :



Pour le lithium :



et ainsi de suite. Quand nous écrirons, par exemple, ${}^{124}_{53}\text{I}$, on saura qu'il s'agit d'un noyau d'iode, constitué de 124 nucléons, dont 53 protons et 71 neutrons (nombre obtenu par différence).

LES ISOTOPES

Comme nous venons de le voir, il existe, pour chaque numéro atomique, un certain nombre de noyaux d'atomes ayant des nombres de masse différents. Ces noyaux contiennent le même nombre de protons et des neutrons en nombre variable. La charge électrique du noyau dépendant seulement du nombre de protons, tous les atomes correspondants ont les mêmes propriétés chimiques. Dans le tableau général des éléments, ils occupent tous la même case qui porte le numéro représentant leur charge nucléaire. C'est ce qu'exprime le mot « isotopes » sous lequel on les désigne et qui, dérivé du grec, signifie « même lieu ». Nous avons vu qu'il existe 3 isotopes de l'hélium, 4 isotopes du lithium ; on en connaît 13 pour l'iode, 6 pour le fer, 6 pour l'uranium, etc.

Tous les isotopes d'un même élément n'ont pas les mêmes propriétés nucléaires. Par exemple, le noyau d'iode contenant 74 neutrons est stable ; tous les autres isotopes de cet élément sont instables et radioactifs. En général, sauf pour les éléments les plus lourds, à partir du numéro 84 (polonium), seuls les isotopes stables existent dans la nature. On en a recensé environ 275 espèces. Les autres sont des **radioisotopes artificiels**, fabriqués au laboratoire suivant des techniques que nous évoquerons plus loin, ou dans les piles atomiques.

Lorsque deux noyaux contiennent le même nombre total de nucléons, avec des répartitions différentes entre protons et neutrons, on dit que l'on a affaire à des **isobares**, atomes de mêmes nombres de masse, mais appartenant à des éléments différents. Tels sont, par exemple, le béryllium ${}^{10}_4\text{Be}$ radioactif et le bore ${}^{10}_5\text{B}$ stable.

Le nombre des protons fixe la charge électrique du noyau, donc le numéro atomique de l'élément, et le nombre total des nucléons son nombre de masse.

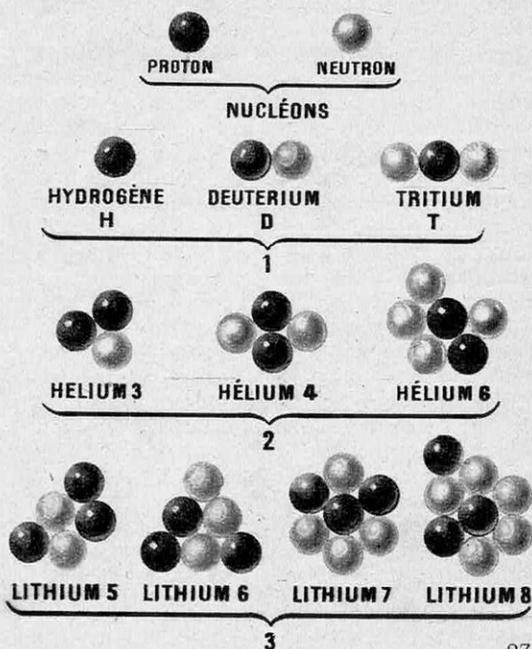
ABONDANCE NATURELLE DES ISOTOPES

Le nombre des isotopes des différents éléments varie de l'un à l'autre d'une manière imprévisible. Il en est de même de leur stabilité et de leur abondance dans la nature. Les hypothèses proposées pour expliquer la formation des éléments et les forces qui régissent les assemblages de nucléons ne sont pas assez précises pour répondre à ces questions. Nous ne pouvons que constater, sans l'expliquer véritablement, que le noyau d'iode contenant 53 protons et 74 neutrons (${}^{127}_{53}\text{I}$) est, parmi

les treize isotopes de l'iode, le seul qui soit stable, alors que les douze autres sont radioactifs. Pourquoi le cadmium 114 est-il deux fois plus abondant dans la nature que le cadmium 111 ? Pourquoi l'uranium 238 se désintègre-t-il à une cadence beaucoup plus lente que le radium ?

Quant aux proportions relatives des divers isotopes d'un même élément, elles se montrent, en première approximation, remarquablement constantes quelle que soit la provenance terrestre et même météorique de l'échantillon. En réalité, cette règle souffre d'assez nombreuses dérogations dues à des causes diverses. Ainsi les familles radioactives de l'uranium et du thorium ont pour termes ultimes deux isotopes du plomb qui ont pour nombre de masse respectifs 206 et 208. Il doit en résulter, et c'est ce que l'on constate effectivement, que le plomb des minerais riches en thorium doit accuser une plus grande proportion de plomb 208 que celui des minerais riches en uranium. De la proportion des isotopes du plomb dans un mine-

NOYAUX DES ÉLÉMENTS LES PLUS LÉGERS



rai, on peut déduire d'autre part son âge géologique.

On a reconnu de même tout récemment que l'argon associé aux minerais de potassium contient trois fois plus d'argon 40 que l'argon présent dans l'atmosphère. C'est que cet isotope de l'argon dérive de l'isotope radioactif du potassium, le potassium 40, toujours présent à l'état de traces.

De même encore, on a constaté que l'hélium qui s'échappe des puits de pétrole contenait 10 fois moins d'hélium 3 que l'hélium atmosphérique, ce que l'on attribue à la radioactivité des roches profondes qui engendre de l'hélium 4.

Des prélèvements d'azote à plus de 40 km d'altitude ont montré une concentration en azote 14 plus grande que celle que l'on observe au niveau de la mer. Cet effet dû à la gravitation, augmente avec l'altitude (0,3 % à 40 km, 4 % à 56 km) moins vite que l'exige le calcul. Ceci serait dû aux remous atmosphériques ; les différences constatées fourniraient un indice utile à la météorologie.

Nous avons indiqué plus haut que, puisque les noyaux des isotopes des divers éléments portent la même charge électrique, les propriétés chimiques de ces isotopes devraient être identiques. Cela n'est vrai qu'en première approximation. L'exception la plus importante à cette règle concerne les isotopes de l'hydrogène. La variation du nombre de masse est considérable quand on passe de l'hydrogène léger (1), à l'hydrogène lourd ou deutérium (2). Elle se traduit par des différences dans les constantes d'équilibre qui régissent les réactions chimiques avec l'un ou l'autre isotope. De plus, les tensions de vapeur de l'eau légère et de l'eau lourde (combinaisons de l'hydrogène léger et de l'hydrogène lourd respectivement avec l'oxygène) différent, ce qui entraîne des différences de concentration

au cours de tous les phénomènes d'évaporation. Effectivement, on a constaté, par des mesures extrêmement précises de densité, des variations de quelques millièmes suivant que l'échantillon d'eau étudié est d'origine animale, végétale, minérale ou même industrielle. L'eau extraite des végétaux, par exemple, est plus lourde d'environ 4 millièmes.

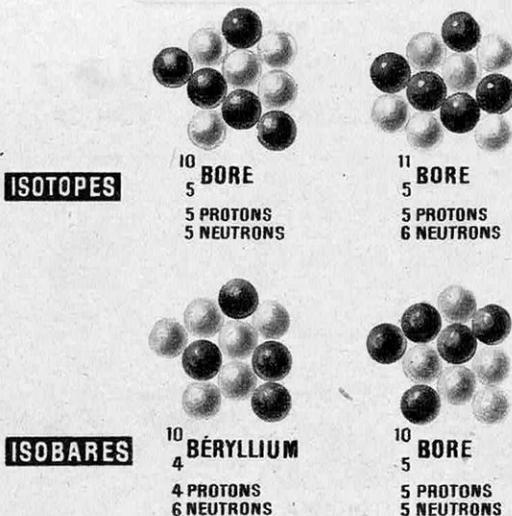
Avec les autres éléments légers, lithium, bore, carbone, oxygène et azote, les différences relatives entre les divers isotopes sont naturellement beaucoup plus faibles, et cependant leur effet est encore décelable. On a pu mettre en évidence une augmentation de 3 à 4 % dans la concentration relative de l'oxygène 16 contenu dans le gaz carbonique par rapport à celle qu'il accuse dans l'eau. D'autre part, le carbone d'origine minérale, celui présent dans le calcaire, contient plus de carbone 13 que le carbone d'origine végétale. Ces constatations n'ont pu être faites que par des méthodes ultrasensibles de mesure des densités ou à l'aide de spectrographes de masse. En fait, ces très faibles variations n'affectent pratiquement pas le comportement chimique des éléments naturels.

SÉPARATION DES ISOTOPES

Puisque les propriétés chimiques sont pratiquement identiques, c'est surtout à des procédés utilisant leurs différences de masses que l'on s'adresse en pratique pour séparer les divers isotopes d'un élément.

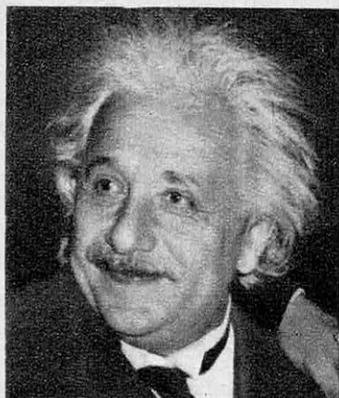
Les nombres des nucléons constituant les noyaux différent d'au moins une unité. Par conséquent, comme nous l'avons vu plus haut, le deutérium est deux fois plus lourd que l'hydrogène léger. Mais au fur et à mesure que l'on progresse dans la classification des éléments, le rapport des masses se rapproche rapidement de l'unité. Ainsi, le lithium 7 est seulement 1,165 fois plus lourd que le lithium 6, l'argent 109 est seulement 1,018 fois plus lourd que l'argent 107, l'uranium 238 seulement 1,012 fois plus lourd que l'uranium 235. Il est bien évident que si l'on comptait seulement sur la pesanteur terrestre pour séparer les molécules des composés contenant les isotopes lourds et celles contenant les isotopes légers, on n'obtiendrait aucun résultat appréciable. Aussi a-t-on pensé à mettre en œuvre les champs de gravitation beaucoup plus intenses que réalisent les ultracentrifugeuses. Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, c'est ce procédé que tentèrent d'utiliser les Allemands pour isoler l'uranium 235, en centrifugeant un composé gazeux, l'hexafluorure d'uranium. Les Américains s'étaient aussi intéressés à cette tech-

NOYAUX ISOTOPES ET NOYAUX ISOBARES



← Les premiers ont même numéro atomique (ici 5) ; les noyaux appartiennent à la même espèce chimique (bore). Les seconds ont même nombre de masse (ici 10) ; ces éléments sont différents (béryllium et bore).

ALBERT EINSTEIN ET LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ



Albert Einstein naquit le 14 mars 1879 à Ulm, dans le Wurtemberg. Il fit ses études à Munich et à Zurich. Malgré d'exceptionnelles aptitudes pour les mathématiques, il ne put obtenir, une fois en possession de ses diplômes, un poste au Polytechnicum de Zurich. A 21 ans, devenu citoyen suisse, il accepte un poste de percepteur à Schaffhouse, puis un emploi au bureau des brevets de Berne. Les soucis matériels écartés, Einstein se plonge dans la recherche mathématique. En 1905, il crée la théorie de la relativité, la théorie des quanta de lumière (photons), la théorie du mouvement brownien et celle de l'équivalence de la matière et de l'énergie. Ces travaux lui ouvrent les portes de l'Université de Prague, puis celles de Zurich et enfin celles de Berlin où on le trouve en 1913. C'est à cette époque qu'il développe sa théorie de la relativité généralisée et de la gravitation et annonce la

déviations de la lumière des étoiles par l'attraction solaire. Pendant la première guerre mondiale, il travaille à des problèmes cosmogoniques qui servent plus tard de base à la théorie de l'Univers

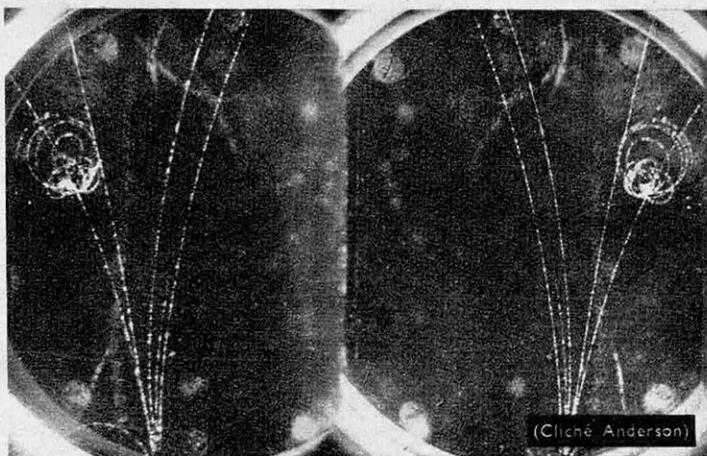
tir à la réalisation des bombes atomiques. Einstein travaille toujours à l'élaboration de sa théorie du champ unitaire, ce système de lois mathématiques qui expliquerait tous les faits électroma-

$$W = mc^2$$

● L'équation d'Einstein exprime l'équivalence de la masse m et de l'énergie W , avec pour facteur le carré de la vitesse de la lumière c .

en expansion. En 1933, il quitte l'Allemagne nazie et s'établit aux Etats-Unis où une chaire lui est offerte à Princeton. En 1940, il arrive à convaincre le Président Roosevelt de la possibilité d'utiliser l'énergie nucléaire, et de la nécessité de pousser activement les recherches qui devaient abou-

gnétiques, mécaniques et nucléaires. Une légende tenace mais erronée veut que les théories d'Einstein ne soient compréhensibles qu'à une dizaine de savants sur la Terre. Une autre, non moins fautive, prétend que ces théories n'ont jamais pu recevoir de vérification expérimentale.



● Les photons gamma (énergie radiante) se matérialisent en paires d'électrons positifs et négatifs qui sont déviés en sens contraires.

nique, mais ils s'étaient rapidement rendu compte qu'elle était impraticable à grande échelle. Pour produire 1 kg d'uranium 235 par jour, il aurait fallu une batterie de 30 000 centrifugeuses actionnées séparément et tournant à très grande vitesse.

Nous exposerons plus loin avec quelques détails les divers procédés de séparation des isotopes, dont nous n'indiquerons ici que les principes. On peut les classer en trois catégories fondées l'une sur la diffusion des molécules gazeuses, la seconde sur l'action des champs électriques et magnétiques sur les atomes et sur les molécules ionisées, la troisième sur les réactions d'échange d'atomes entre les molécules des composés légers et lourds.

MASSE « PHYSIQUE » ET MASSE « CHIMIQUE »

Dans les réactions chimiques, les poids des éléments entrant en combinaison sont dans un rapport constant. On a pu ainsi dresser une échelle des poids atomiques des éléments en adoptant comme élément de référence l'oxygène et lui attribuant la valeur exacte 16. Cette définition de la masse « chimique » d'un élément ne tient pas compte des isotopes.

En fait, on connaît aujourd'hui trois isotopes principaux de l'oxygène, dont les noyaux groupent 16, 17 et 18 nucléons (les autres isotopes sont en proportion tellement faible qu'on peut les négliger). L'isotope de beaucoup le plus abondant est l'oxygène 16

CLASSIFICATION GÉNÉRALE

1 H HYDROGÈNE								
3 Li LITHIUM	4 Be BÉRYLLIUM							
11 Na SODIUM	12 Mg MAGNÉSIIUM							
19 K POTASSIUM	20 Ca CALCIUM	21 Sc SCANDIUM	22 Ti TITANE	23 V VANADIUM	24 Cr CHROME	25 Mn MANGANÈSE	26 Fe FER	27 Co COBALT
37 Rb RUBIDIUM	38 Sr STRONTIUM	39 Y YTRIUM	40 Zr ZIRCONIUM	41 Nb NIOBIUM	42 Mo MOLYBDÈNE	43 Tc TECHNÉTIUM	44 Ru RUTHÉNIUM	45 Rh RHODIUM
55 Cs CÉSIIUM	56 Ba BARYUM	57a71 TERRES RARES SÉRIE DES LANTHANIDES	72 Hf HAFNIUM	73 Ta TANTALE	74 W TUNGSTÈNE	75 Re RHÉNIUM	76 Os OSMIUM	77 Ir IRIDIUM
87 Fr FRANCIUM	88 Ra RADIUM	89a100 ÉLÉMENTS RARES SÉRIE DES ACTINIDES						

La première classification des éléments est due au chimiste russe Mendeleïeff qui, en 1869, eut l'idée de les répartir suivant des lignes horizontales (poids atomiques croissants) et des colonnes verticales (comportement chimique analogue). De nombreuses cases restaient vides ;

elles ont été progressivement remplies et le tableau est aujourd'hui complet, sous la réserve que de nouveaux éléments lourds ne soient pas découverts à la suite du californium. A partir du numéro 93 compris, on a affaire à des éléments synthétisés au laboratoire. Jusqu'à

LANTHANIDES

57 La LANTHANE	58 Ce CÉRIUM	59 Pr PRASÉODYME	60 Nd NÉODYME	61 Pm PROMÉTHIUM	62 Sm SAMARIUM	63 Eu EUROPIUM
-----------------------------	---------------------------	-------------------------------	----------------------------	-------------------------------	-----------------------------	-----------------------------

ACTINIDES

89 Ac ACTINIUM	90 Th THORIUM	91 Pa PROTACTINIUM	92 U URANIUM	93 Np NEPTUNIUM	94 Pu PLUTONIUM	95 Am AMÉRICIUM
-----------------------------	----------------------------	---------------------------------	---------------------------	------------------------------	------------------------------	------------------------------

(99,8 %), puis vient l'oxygène 18 (0,16 %), et enfin l'oxygène 17 (0,03 %). On a ainsi été conduit à dresser une échelle (physique) des masses en attribuant à l'oxygène 16 la masse atomique exacte 16,0000. Toutes les autres masses atomiques en découlent.

ÉNERGIE DE LIAISON DES NUCLÉONS

On trouve ainsi que la masse du noyau d'hydrogène (proton) est de 1,00812 et que celle du neutron est de 1,00893.

Supposons maintenant que nous édifions un noyau d'hélium 4, comme nous l'avons fait précédemment, en groupant deux protons et deux neutrons. Il est facile de calculer sa masse : 4,03410. Or, si l'on mesure directement cette masse, chose que l'on sait faire

aujourd'hui avec une très grande précision, on est surpris de trouver un chiffre différent : 4,00390. Il y a une perte de masse apparente de 0,0302 unités de masse.

Prenons maintenant l'oxygène 16 : nous grouperons 8 protons et 8 neutrons, au total 16 nucléons. Le calcul indique une masse totale de 16,13640 au lieu de 16,000, par définition. La perte de masse est de 0,13640 unités de masse.

L'isotope le plus abondant (77 %) du magnésium est celui de nombre de masse 24 ; sa masse exacte est 23,99198. Le seul isotope stable de l'aluminium possède 13 protons et 14 neutrons et sa masse exacte est 26,99069 au lieu de 27.

Prenons enfin l'uranium 238 (92 protons et 146 neutrons). Le même calcul donne pour la masse 240,06 alors que la mesure directe

DES ÉLÉMENTS

présent on n'a pu dépasser le numéro 98, bien qu'on ait proposé d'appeler centurium le numéro 100. On s'accorde pour ranger les éléments lourds (89 et suivants) dans une série dite des « actinides » analogue à la série des « lanthanides » ou terres rares

									2 He HÉLIUM
			5 B BORE	6 C CARBONE	7 N AZOTE	8 O OXYGÈNE	9 F FLUOR		10 Ne NEON
			13 Al ALUMINIUM	14 Si SILICIUM	15 P PHOSPHORE	16 S SOUFRE	17 Cl CHLORE		18 Ar ARGON
28 Ni NICKEL	29 Cu CUIVRE	30 Zn ZINC	31 Ga GALLIUM	32 Ge GERMANIUM	33 As ARSENIC	34 Se SÉLÉNIUM	35 Br BROME		36 Kr KRYPTON
46 Pd PALLADIUM	47 Ag ARGENT	48 Cd CADMIUM	49 In INDIUM	50 Sn ÉTAIN	51 Sb ANTIMOINE	52 Te TELLURE	53 I IODE		54 Xe XÉNON
78 Pt PLATINE	79 Au OR	80 Hg MERCURE	81 Tl THALLIUM	82 Pb PLOMB	83 Bi BISMUTH	84 Po POLONIUM	85 At ASTATINE		86 Em EMANATIONS

64 Gd GADOLINIUM	65 Tb TERBIUM	66 Dy DYSPROSIUM	67 Ho HOLMIUM	68 Er ERBIUM	69 Tm THULIUM	70 Yb YTTERBIUM	71 Lu LUTÉCIUM
96 Cm CURIUM	97 Bk BERKÉLIUM	98 Cf CALIFORNIUM	99	100 Ct? CENTURIUM			

fournit 238,12. La perte de masse est de 1,94.

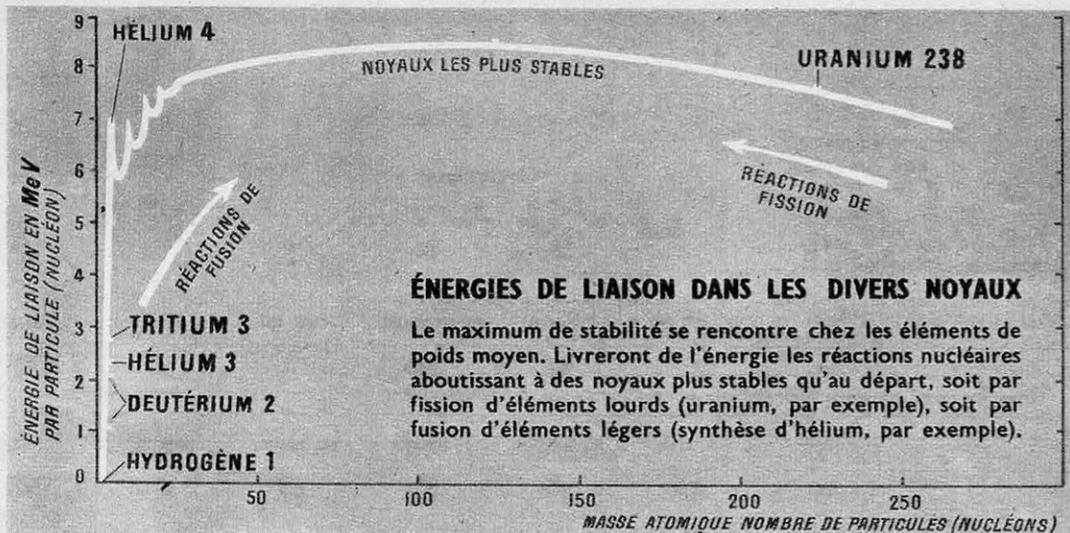
Comment expliquer de telles différences? Leur interprétation est immédiate si l'on recourt à la célèbre équation d'Einstein.

En 1905, Einstein publia sa Théorie de la Relativité qui posait entre autres le principe de l'équivalence de la masse et de l'énergie. Au lieu des deux principes classiques de la conservation de la masse et de la conservation de l'énergie, il affirmait que masse et énergie pouvaient indifféremment se transformer l'une en l'autre. La matière pouvait intégralement disparaître en se transformant en énergie et inversement l'énergie disparaître en se matérialisant. Pour les transformations partielles, la somme des deux devait demeurer constante, à condition de les exprimer avec des unités semblables : 1 gramme correspond à 9×10^{20} ergs, ou encore, en unités calori-

ques, à 20 millions de millions de calories, soit l'énergie que dégagerait la combustion d'environ 3 000 tonnes d'antracite.

La désintégration radioactive de l'uranium aboutissant au plomb et à l'hélium, correspond, en négligeant la masse infime des électrons expulsés, à une perte de masse d'environ 1/5 000. Dans toutes les réactions chimiques, la perte de masse est plusieurs millions de fois plus faible.

La différence que nous avons constatée plus haut entre la masse réelle d'un noyau et celle calculée en additionnant les masses de ses constituants correspond donc à l'énergie libérée lors de la fusion des nucléons pour constituer le noyau. C'est celle qu'il faudrait dépenser pour les dissocier à nouveau. La perte de masse fournit en quelque sorte une mesure de la stabilité des noyaux.



Pour l'évaluer d'une manière plus précise et plus rationnelle, il faut tenir compte du nombre de nucléons présents et par conséquent la diviser par ce nombre. On obtient ainsi « l'énergie de liaison par particule », que les anglo-saxons désignent par « packing fraction ». On peut dresser un tableau de ces énergies de liaison pour les différents éléments, et on constate ainsi que ce sont les éléments de poids moyen, entre 20 et 200 environ, que l'on peut considérer comme les plus stables, parce que les nucléons ont abandonné, pour les former, la fraction la plus forte de leur masse.

Il se forme parfois au cours de réactions nucléaires des noyaux où la différence de masse n'est pas suffisante pour "cimenter" les nucléons. Le noyau instable ainsi formé peut

émettre un neutron et l'isotope qui en résulte est stable. Ainsi l'oxygène 17 qui résulte de la désintégration radioactive de l'azote 17 émet, dès qu'il est formé, un neutron et devient de l'oxygène 16.

Lorsque les isotopes radioactifs sont produits en quantités pondérables, à la pile atomique ou au cyclotron, on peut mesurer leur masse exacte au spectrographe, à condition que leur période radioactive (voir p. 36) soit assez longue. En général, on la déduit du bilan des réactions nucléaires où ils apparaissent.

LES ATOMES ET LES IONS

Nous n'avons jusqu'à présent considéré que les noyaux et leurs constituants, protons et neutrons. Rappelons qu'ils portent une charge électrique égale numériquement au nombre de leurs protons (numéro atomique). Nous allons maintenant présenter le cortège électronique des noyaux.

Grossissons le diamètre d'un noyau dix mille milliards de fois, pour obtenir une petite sphère d'à peine 1 cm de diamètre. Autour de cette sphère tournent des électrons, à la manière des planètes autour du soleil. Les vitesses de ces électrons et les rayons de leurs orbites sont fixés par des lois rigoureuses. La plus proche de ces orbites est déjà très éloignée. À l'échelle où nous décrivons l'atome, si nous plaçons la petite sphère de 1 cm au milieu de la place de la Concorde, à Paris, on ne trouverait les premiers électrons planétaires que dans la grande banlieue. Comme les électrons sont eux-mêmes extrêmement petits, l'atome nous paraît donc constitué essentiellement par du vide. Toute sa masse est pratiquement concentrée dans le noyau (tous les noyaux ont sensiblement la même colossale densité : 10^{14} grammes par cm^3). L'atome est normalement électriquement neutre, les électrons étant en nombre égal à la charge électrique du noyau (numéro

PRINCIPALES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES

NOM	SYMBOLE	MASSE	CHARGE
PHOTON...		0	0
ELECTRON..	e^-	1	-1
POSITON ..	e^+	1	+1
PROTON ..	${}^1_1\text{H}$	1836	+1
NEUTRON..	${}^1_0\text{n}$	1836	0
NEUTRINO	ν		0
MESONS ..	π	320	+1 & -1
	μ	200	+1 & -1
	τ	> 500	+1 & -1
	Mo	> 1000	0

● Les masses sont prises au repos. Celle de l'électron est prise pour unité; elle vaut $9,1 \times 10^{-28}$ grammes. L'unité de charge est égale en valeur absolue à celle de l'électron et vaut $4,7 \times 10^{-10}$ unités électrostatiques.

atomique) et chacun portant une charge égale et de signe contraire à celle d'un proton.

Lorsqu'un atome a perdu un ou plusieurs électrons, il manifeste une charge électrique positive. On dit qu'il est **ionisé**. L'ionisation des atomes est particulièrement recherchée et provoquée lorsqu'on veut les accélérer dans un champ électrique, magnétique ou mixte. Seuls, en effet, les ions, ou atomes ionisés, peuvent subir l'influence de ces champs et y acquérir de grandes vitesses.

Les électrons planétaires sont liés aux noyaux par des forces d'attraction électrostatiques. Leur énergie de liaison est bien inférieure à celle qui lie les nucléons dans le noyau et en général négligeable en physique nucléaire.

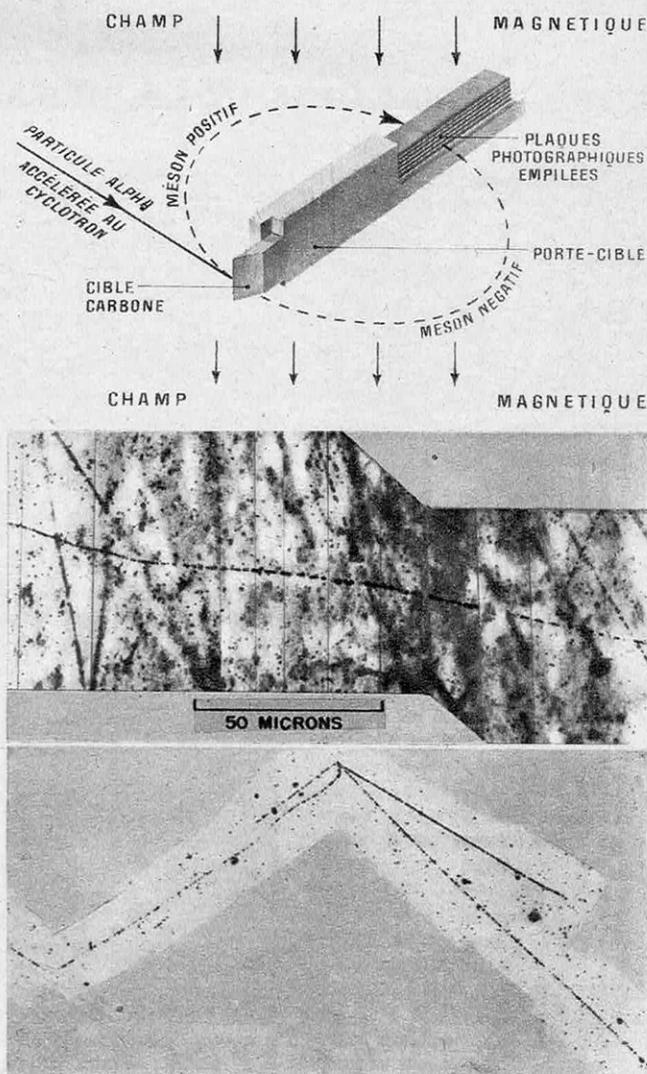
LES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES

En fait de particules élémentaires, nous avons fait connaissance dans ce chapitre avec le proton, le neutron, et l'électron, qui nous ont servi à édifier les atomes. Il y en a d'autres que les expérimentateurs ont pu détecter ou que les théoriciens ont imaginées pour expliquer certains phénomènes. Il faut que nous en disions quelques mots car elles apparaîtront épisodiquement dans ce qui va suivre. Pour que le tableau soit complet, nous reprendrons rapidement les particules déjà présentées.

Les électrons : Ce sont des particules portant une charge électrique négative indivisible, véritable « quantum » d'électricité. Leur masse au repos, ou à faible vitesse, s'exprime, en unités de masse (en prenant celle de l'oxygène 16 égale à 16,0000), par 0,00055, ce qui correspond à $9,1 \times 10^{-28}$ grammes ; autrement dit, il en faudrait cent milliards de milliards de milliards pour faire un gramme, mais ce nombre est tellement grand qu'il ne dit plus rien à l'imagination la plus complaisante. La masse croît avec la vitesse comme le veut la théorie de la relativité ; si l'électron atteignait la vitesse de la lumière dans le vide, sa masse deviendrait infinie. On admet généralement

en France que la preuve de l'existence de l'électron a été fournie par Jean Perrin ; sa découverte est attribuée, dans les pays anglosaxons à l'Anglais J. J. Thomson qui mesura le premier le rapport de sa charge à sa masse (1887). Aujourd'hui les applications de l'électronique ne se comptent plus : ce sont les électrons libres qui sont à la base du fonctionnement des tubes de radio, des cellules photoélectriques, etc. Ce sont des courants d'électrons qui constituent les rayons cathodiques des tubes à décharge. Lorsqu'ils sont émis par des corps radioactifs, les électrons prennent le nom de **particules bêta**.

Les protons : Le proton est le noyau de l'atome d'hydrogène dépouillé de son électron planétaire. Les protons ont été observés pour la première fois (1886) sous la forme de « rayons canaux » dans les tubes à décharge. Le proton est électrisé positivement et sa charge est numériquement égale à celle de l'électron. Sa masse est de 1,00812 unité de



MÉSONS ARTIFICIELS ➔

Les mésons artificiels ont été créés au laboratoire de Berkeley en dirigeant un faisceau de particules alpha accélérées sous 400 millions d'électronvolts sur une cible de carbone. Les mésons lourds émis sont courbés dans un champ magnétique et traversent des émulsions photographiques. En bas, mésons cosmiques, enregistrés à haute altitude.

masse, soit $1,7 \times 10^{-24}$ grammes. Il est 1 836 fois plus lourd que l'électron au repos. C'est, avec le neutron, le principal constituant des noyaux atomiques.

Les neutrons : Ce sont des particules de charge électrique nulle et dont la masse est de très peu supérieure à celle du proton : 1,00893 unités de masse. Leur découverte est due à l'Anglais Chadwick (1932). Ne portant pas de charge électrique, le neutron n'est pas influencé par les noyaux chargés des atomes tant qu'il ne s'en approche pas suffisamment pour qu'entrent en jeu les forces spéciales qui lient entre eux les nucléons. Il peut donc traverser des épaisseurs considérables d'éléments lourds sans grande perte d'énergie. Du fait qu'il ne porte pas de charge électrique, il n'ionise pas les atomes qu'il rencontre et par conséquent il est difficile à détecter directement. Le neutron libre est radioactif : il se désintègre spontanément en un proton, un électron et un neutrino (voir ci-dessous) ; sa vie moyenne est de 20 minutes environ.

Les positons : Ces particules sont identiques aux électrons, la seule différence résidant dans le signe de leur charge électrique qui est positif. Leur existence avait été prévue par le théoricien anglais Dirac. Elles ont été découvertes par l'Américain Anderson en 1932 au cours d'études sur le rayonnement cosmique. Elles sont émises fréquemment au cours de réactions nucléaires et de la désintégration d'éléments radioactifs artificiels. Elles sont très fugaces et leur vie moyenne est inférieure à un millionième de seconde.

Les neutrinos : Il s'agit ici de particules inventées par le théoricien suisse Pauli en 1932 pour expliquer certaines anomalies de l'émission des rayons bêta par des corps radioactifs. Jamais jusqu'à présent on n'a pu le mettre en évidence expérimentalement, ce qui s'explique aisément étant donné les caractères que la théorie lui attribue : charge nulle, masse voisine de zéro. Et pourtant l'hypothèse de Pauli s'est révélée extrêmement fructueuse sur le plan théorique, de

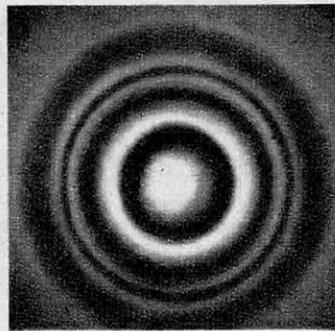
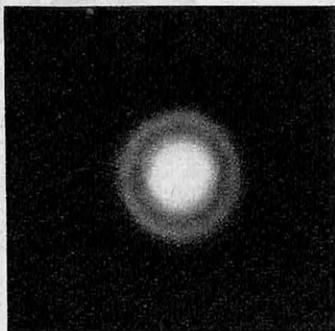
LOUIS DE BROGLIE ET LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE



Louis de Broglie, Professeur à la Faculté des Sciences de Paris, Lauréat du Prix Nobel (1929), est né à Dieppe en 1892. Après avoir fait ses études au lycée Janson de Sailly, il s'orienta d'abord vers les études littéraires et passa sa licence d'histoire en 1910. Puis, le goût des sciences l'emportant en lui, il prépara la licence ès sciences qu'il obtint en 1913. En 1924, il présentait à la Faculté des Sciences de Paris une thèse de doctorat intitulée « Recherches sur la théorie des Quanta », qui rassemblait une suite de résultats importants qu'il avait obtenus depuis deux ans environ. Les idées exposées dans ce travail, qui étonnèrent d'abord

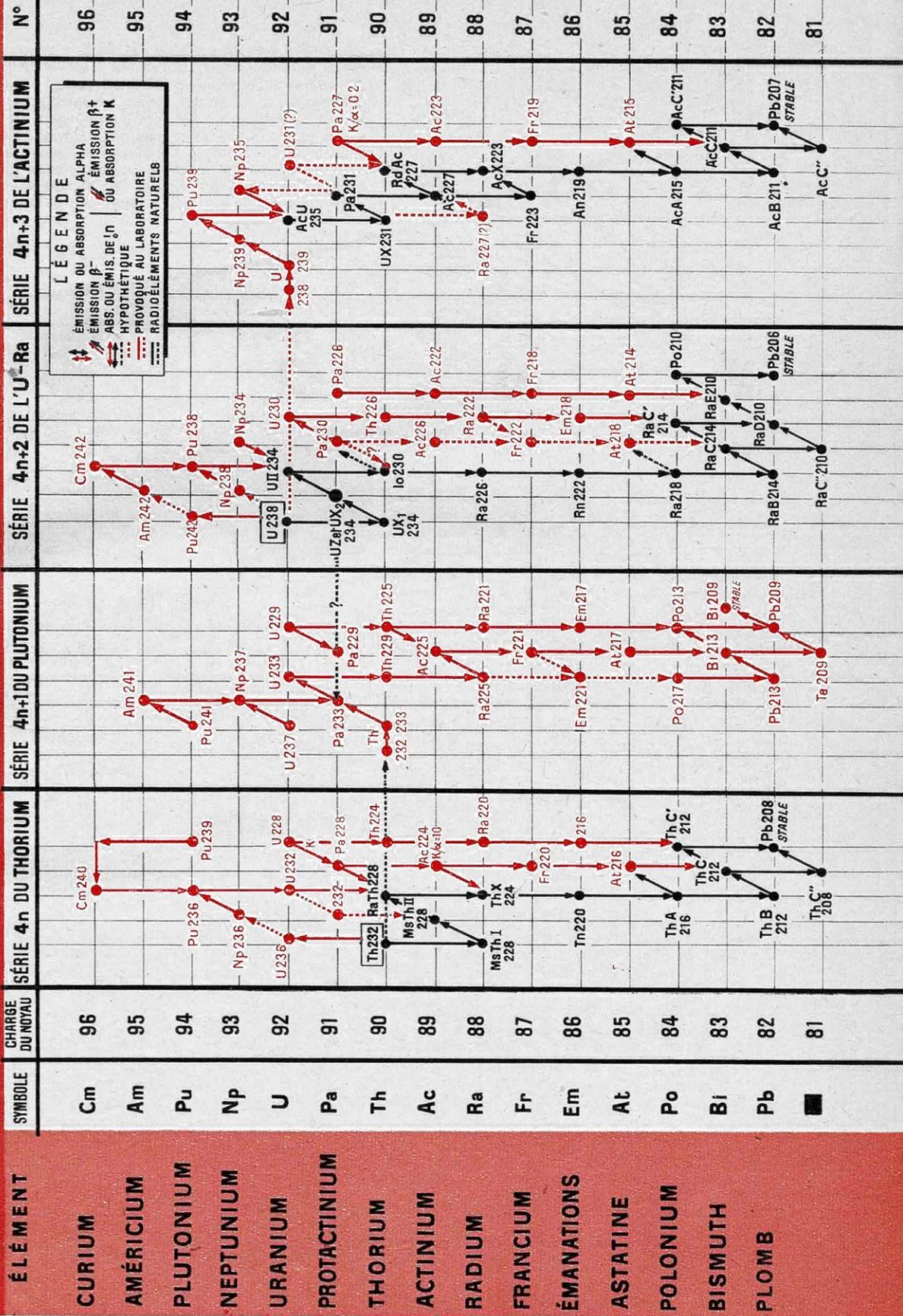
par leur nouveauté, ont été ensuite pleinement confirmées par la diffraction des électrons dans les cristaux effectuée en 1927 par Davisson et Germer ; elles ont servi de base au développement de la théorie générale connue aujourd'hui sous le nom de « Mécanique ondulatoire ». Louis de Broglie fut chargé d'un enseignement de physique théorique à l'Institut Henri Poincaré dès 1932. Dans ces dernières années, son attention s'est tournée principalement vers l'étude de la théorie de l'électron magnétique, de la théorie de la lumière et de la théorie générale des particules à spin avec ses applications au noyau de l'atome. L'Académie des

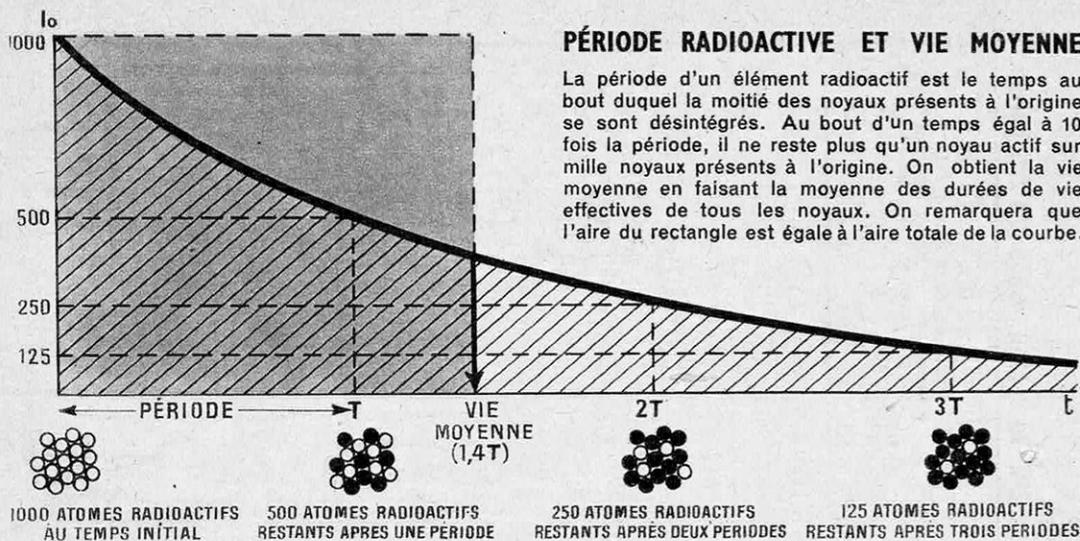
Sciences a couronné plusieurs fois ses travaux et il en a été élu membre en 1933 et Secrétaire perpétuel en 1942 ; il est entré à l'Académie française en 1944. Il est membre de nombreuses académies étrangères et docteur honoris causa des Universités de Varsovie, de Bucarest, d'Athènes, de Lausanne et de Québec. Le prince Louis de Broglie est le frère cadet du duc Maurice de Broglie, Membre de l'Académie française et de l'Académie des Sciences, auteur de nombreux et importants travaux expérimentaux, fondateur d'un beau laboratoire privé où se sont formés un grand nombre de jeunes physiciens français et étrangers.



● L'onde associée aux électrons se diffracte comme la lumière. Voici deux diagrammes de diffraction électronique dans le celluloid et l'or.

TABLEAU GÉNÉRAL DES QUATRE GRANDES FAMILLES RADIOACTIVES





sorte qu'après une période où on n'y croyait plus guère, les physiciens sont de plus en plus persuadés de son existence et s'attendent d'un jour à l'autre à ce qu'un expérimentateur plus adroit en annonce la découverte.

Les mésons : Ces particules ont été également inventées par un théoricien, le Japonais Yukawa, pour expliquer les forces de liaison entre les nucléons (1935). Le méson a été effectivement trouvé par les Américains Anderson et Neddermeyer dans le rayonnement cosmique. Comme leur nom l'indique, ce sont des particules intermédiaires entre l'électron et le proton. On en connaît avec certitude au moins deux sortes : les mésons π (« pi ») et les mésons μ (« mu »), les premiers de masse moyenne égale à 320 fois celle de l'électron, les seconds environ 200 fois plus lourds que l'électron. Tous peuvent porter une charge électrique égale à celle de l'électron, positive ou négative. Ces quatre sortes de mésons ont été obtenus également au laboratoire dans des réactions nucléaires avec des particules de plusieurs centaines de millions d'électronvolts. L'accord n'est pas parfait en ce qui concerne l'existence de mésons neutres ou de mésons de masses supérieures tels que les mésons τ (« tau ») et λ (« lambda ») ou ceux que les chercheurs russes auraient découverts dans le rayonnement cosmique et dont la masse serait de l'ordre de 1 000 fois celle de l'électron.

Nous ne citerons que pour mémoire les particules dont divers physiciens ont suggéré l'existence : proton négatif, antineutron, gravitons, etc.

Dernièrement, le physicien français Jean Thibaud, de Lyon, semble avoir confirmé expérimentalement l'existence de microélectrons, prévue dans la théorie du Portugais Ciaó. La question est pourtant encore assez controversée.

Il faut enfin, parmi les particules élémentaires, considérer les **photons**. Il s'agit là de

rayonnement électromagnétique, mais à bien des points de vue on a été amené à lui attribuer une nature corpusculaire. Les photons gamma émis des réactions nucléaires peuvent posséder de très grandes énergies et à leur passage à travers la matière on observe fréquemment qu'ils disparaissent en donnant naissance à des paires d'électrons, négatifs et positifs. C'est le phénomène de « création de paires » ou de matérialisation qui exige une énergie du photon supérieure à 1 megaélectronvolt.

Le phénomène inverse de la disparition d'une paire avec formation de photons s'appelle l'annihilation.

De même que les photons ont une caractéristique matérielle, de même une caractéristique ondulatoire accompagne les particules matérielles.

Cette dualité d'ondes et de corpuscules est à la base de la théorie ondulatoire due au prince Louis de Broglie.

LA RADIOACTIVITÉ

Prenons, pour illustrer ce phénomène, des noyaux d'iode qui contiennent 124 nucléons : 53 protons et 71 neutrons, c'est-à-dire des noyaux $^{124}_{53}\text{I}$. Nous observons qu'avec le temps,

un certain nombre de ces noyaux changent de nature. Ils se transforment en émettant des particules positives, des positons. Les nouveaux noyaux ainsi formés n'ont pratiquement pas changé de masse, celle du positon émis étant infime, et le nombre de nucléons n'ayant pas varié. On peut considérer qu'à l'intérieur des noyaux un proton s'est transformé en un neutron plus un positon. Les nouveaux noyaux contiendront donc 124 nucléons comme précédemment, mais avec un proton de moins, soit 52 et un neutron de plus, soit 72. En consultant la table des éléments (page 30) on voit qu'on se trouve en

PRINCIPAUX TYPES DE RÉACTIONS NUCLÉAIRES

On a représenté ci-dessous, conventionnellement, les neutrons par des boules blanches et les protons par des boules colorées sans tenir compte des cortèges électroniques des atomes, qui ne jouent pas de rôle dans les réactions. La disposition des protons et des neutrons dans les noyaux est pure-

ment imaginaire, car on ignore en fait comment ils y sont répartis. Il faut souligner que le type de réaction obtenu avec une particule déterminée dépend en grande partie de son énergie, ce qui n'a pu être mis en évidence sur les schémas. Les astérisques indiquent les atomes radioactifs.

AVEC DES PROTONS



PROTON BÉRYLLIUM BÉRYLLIUM DEUTON

$${}^1_1\text{H} + {}^9_4\text{Be} = {}^8_4\text{Be} + {}^2_1\text{H}$$

PROTONS:	1	4	4	1
NEUTRONS:	0	5	4	1



PROTON FLUOR OXYGÈNE HÉLION (α)

$${}^1_1\text{H} + {}^{19}_9\text{F} = {}^{16}_8\text{O} + {}^4_2\text{He}$$

PROTONS:	1	9	8	2
NEUTRONS:	0	10	8	2

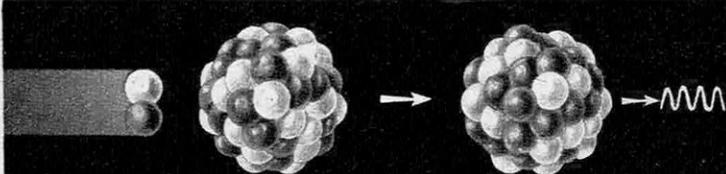


PROTON LITHIUM BÉRYLLIUM PHOTON (γ)

$${}^1_1\text{H} + {}^7_3\text{Li} = {}^8_4\text{Be} + \gamma$$

PROTONS:	1	3	4	
NEUTRONS:	0	4	4	

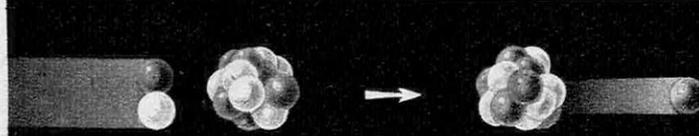
AVEC DES DEUTONS



DEUTON ÉTAIN ANTIMOINE* PHOTON γ

$${}^2_1\text{H} + {}^{122}_{50}\text{Sn} = {}^{124}_{51}\text{Sb}^* + \gamma$$

PROTONS:	1	50	51	
NEUTRONS:	1	72	73	



DEUTON MAGNÉSIUM MAGNÉSIUM* PROTON

$${}^2_1\text{H} + {}^{26}_{12}\text{Mg} = {}^{27}_{12}\text{Mg}^* + {}^1_1\text{H}$$

PROTONS:	1	12	12	1
NEUTRONS:	1	14	15	0



DEUTON SODIUM → MAGNÉSIUM NEUTRON

$${}^2_1\text{H} + {}^{23}_{11}\text{Na} = {}^{24}_{12}\text{Mg} + {}^1_0\text{n}$$

PROTONS :	1	11	12	0
NEUTRONS :	1	12	12	1

DEUTON NÉON → FLUOR* HÉLION(α)

$${}^2_1\text{H} + {}^{20}_{10}\text{Ne} = {}^{18}_9\text{F}^* + {}^4_2\text{He}$$

PROTONS :	1	10	9	2
NEUTRONS :	1	10	9	2

AVEC DES PARTICULES ALPHA

PARTICULE α AZOTE → OXYGÈNE PROTON

$${}^4_2\text{He} + {}^{14}_7\text{N} = {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$$

PROTONS :	2	7	8	1
NEUTRONS :	2	7	9	0

PARTICULE α AZOTE → FLUOR* NEUTRON

$${}^4_2\text{He} + {}^{14}_7\text{N} = {}^{17}_9\text{F}^* + {}^1_0\text{n}$$

PROTONS :	2	7	9	0
NEUTRONS :	2	7	8	1

AVEC DES NEUTRONS

NEUTRON IRIDIUM → IRIDIUM*

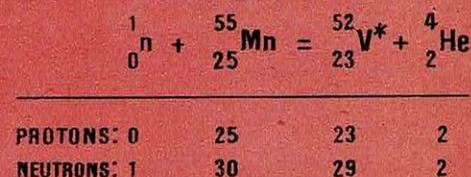
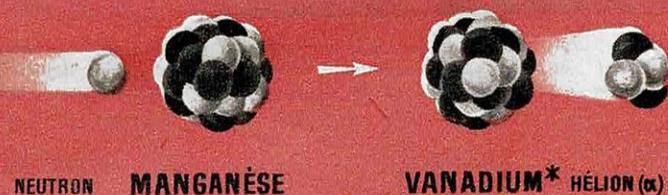
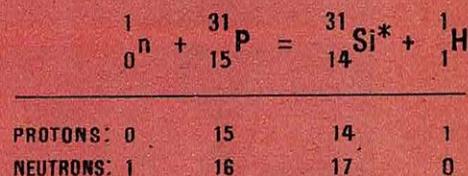
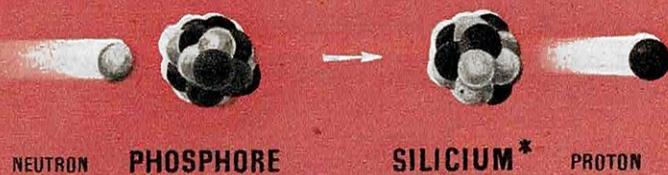
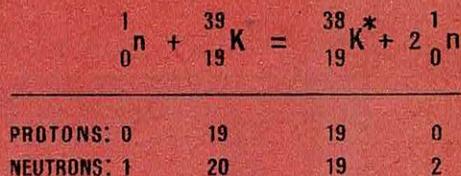
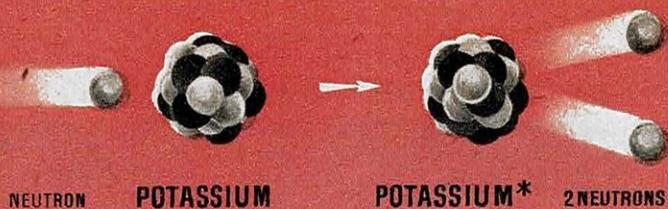
$${}^1_0\text{n} + {}^{193}_{77}\text{Ir} = {}^{194}_{77}\text{Ir}^*$$

PROTONS :	0	77	77
NEUTRONS :	1	116	117

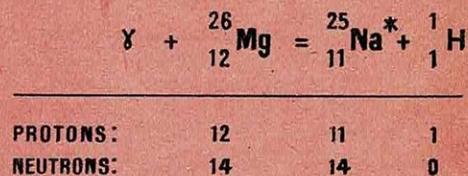
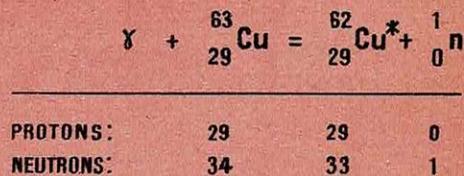
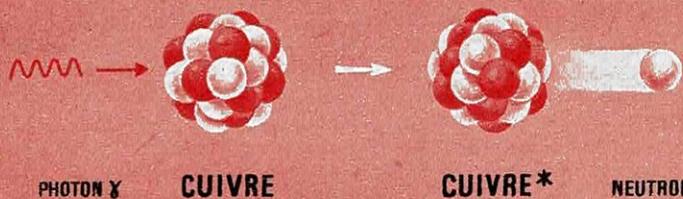
NEUTRON TITANE → TITANE* PHOTON γ

$${}^1_0\text{n} + {}^{50}_{22}\text{Ti} = {}^{51}_{22}\text{Ti}^* + \gamma$$

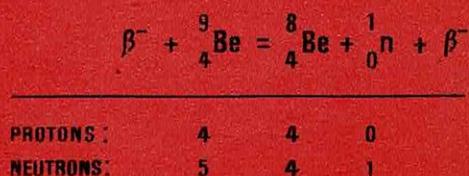
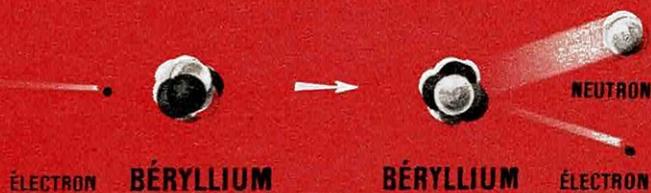
PROTONS :	0	22	22
NEUTRONS :	1	28	29



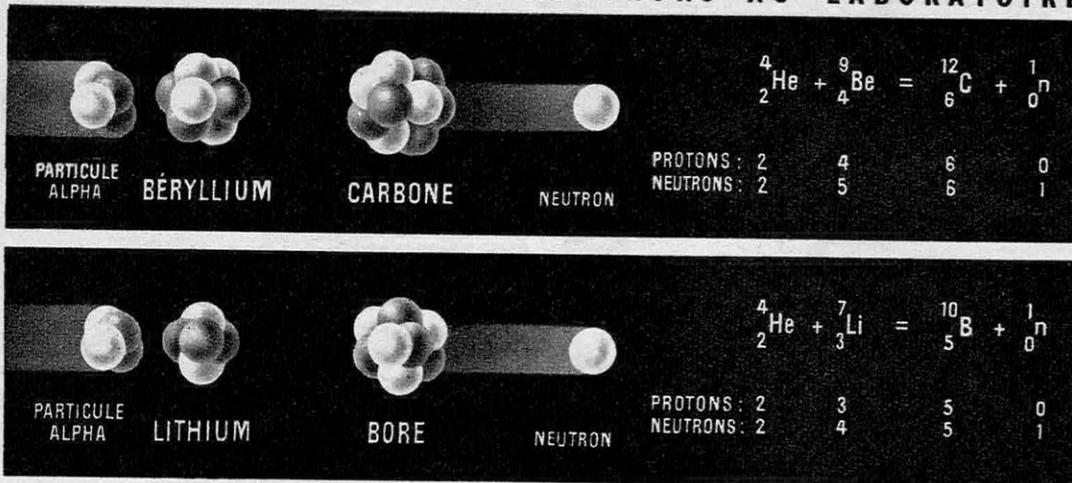
AVEC DES RAYONS GAMMA



AVEC DES ÉLECTRONS



RÉACTIONS LIVRANT DES NEUTRONS AU LABORATOIRE



● Ces deux réactions sont les plus couramment utilisées par les expérimentateurs et s'obtiennent en bombardant le béryllium ou le lithium avec les particules

alpha émises par les radioéléments naturels ou accéléérés artificiellement. L'énergie maximum des neutrons émis dépend de l'énergie des particules incidentes.

présence de noyaux de tellure ${}^{124}_{52}\text{Te}$. Ce type de radioactivité, très fréquent avec les radioisotopes artificiels, est appelé « radioactivité positonique », ou radioactivité β^+ .

Prenons maintenant un autre isotope de l'iode : ${}^{130}_{53}\text{I}$. On constate qu'il émet des particules chargées négativement, des électrons. On admet dans ce cas qu'un des neutrons du noyau s'est transformé en un proton en libérant un électron négatif (ce qui assure l'égalité des charges). Comme précédemment, le nombre de nucléons n'a pas changé, mais il y a un proton de plus et un neutron de moins. Le nouveau noyau est celui du xénon ${}^{130}_{54}\text{Xe}$. Ce type de radioactivité est appelé « radioactivité bêta » ou radioactivité β^- .

Un autre type très important de radioactivité est la « radioactivité alpha ». Elle consiste en l'expulsion hors du noyau d'une particule lourde formée de quatre nucléons : deux neutrons et deux protons, c'est-à-dire un noyau d'hélium 4. De ce fait, le nombre total de nucléons du noyau qui se désintègre diminue de 4 unités, et le nombre de protons de deux unités. Ainsi le radium ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ émettant une particule alpha, devient le radon ${}^{222}_{86}\text{Rn}$.

Il arrive fréquemment que l'élément résultant n'est pas stable et est lui-même radioactif. On a alors une famille radioactive qui peut comporter 2, 3, 4... membres. Ainsi la famille radioactive qui débute avec l'uranium ${}^{238}_{92}\text{U}$ possède 15 membres. Lors de la découverte de plusieurs des éléments intermé-

diaires, on leur a attribué des noms qui, significatifs à l'époque, n'expriment pas leur véritable nature et sont source de confusion. Ainsi l'uranium X1 est en réalité du thorium, l'uranium Z et l'uranium X2 sont du protactinium, le thorium X est du radium, etc., ainsi qu'il est indiqué page 35.

Un autre type de radioactivité, qui peut se rattacher à la radioactivité positonique, est le suivant : certains noyaux peuvent, au lieu d'émettre un positon, capturer un de leurs électrons périphériques appartenant aux couches les plus proches du noyau, que l'on désigne sous le nom de couches K et L. Cet électron « neutralise » un proton du noyau et celui-ci comporte alors le même nombre de nucléons qu'à l'origine, mais avec un neutron de plus et un proton en moins. Par ailleurs, l'électron capturé laisse une place libre dans la couche électronique dont il provient, d'où une émission de rayons X caractéristiques des couches K et L lorsqu'un électron d'une couche plus lointaine vient y tomber. Ce phénomène étant plus fréquent avec les électrons K, plus proches du noyau que les électrons L, a été appelé « capture K ».

PÉRIODE D'UN RADIOÉLÉMENT

La cadence à laquelle un radioélément se désintègre et se transforme en un autre élément mesure en quelque sorte son degré d'instabilité. La vitesse de transformation pourrait être évaluée d'après le nombre d'atomes qui, dans une masse déterminée de l'élément radioactif, se désintègrent par seconde. On a convenu de prendre plutôt comme indice d'instabilité le temps au bout duquel le nombre d'atomes transformés est égal à la moitié du nombre d'atomes présents. Prenons l'exemple du polonium. Si nous par-

tons d'une source contenant 1 milliard d'atomes de polonium, nous constaterons, au bout de 140 jours, qu'il n'en reste plus que 500 millions (les 500 millions d'atomes manquants sont devenus des atomes de plomb). Nous dirons que la « période » du polonium est de 140 jours. Il faut bien se garder de confondre la « période » ainsi définie avec la « vie moyenne » d'un atome, expression imagée que nous avons employée déjà à plusieurs reprises (elle est de 1,4 fois la période). Elle exprime en quelque sorte la probabilité de vie d'un atome isolé. Les désintégrations s'effectuent en effet suivant les seules lois du hasard. Il est impossible, dans une masse radioactive, de reconnaître à l'avance individuellement les noyaux qui vont se désintégrer une minute ou une heure plus tard. On peut seulement prévoir qu'au bout de ce temps une certaine fraction du nombre des atomes présents, pris absolument au hasard, se seront transformés.

TRANSMUTATIONS PAR PROJECTILES ATOMIQUES

Reprenons l'image du noyau atomique disposé place de la Concorde avec le plus proche de ses électrons planétaires gravitant quelque part dans la banlieue. Un artilleur qui voudrait toucher cette cible de 1 cm de diamètre avec des projectiles de dimensions analogues serait sûr de tirer des millions de fois en vain avant d'obtenir un coup au but. Telle est la situation du physicien qui dirige sur un échantillon à transmuter un flux de particules. La plupart traversent les cortèges d'électrons en en déplaçant un de temps à autre, mais ne touchent pas de noyau. Le hasard seul dirige l'opération et un projectile sur un million environ sera efficace. Ceci doit être considéré d'ailleurs comme une très bonne moyenne, car le rapport de la surface apparente du noyau à la surface apparente totale de l'atome est bien inférieur à un millionième. C'est que, pour qu'une action sur le noyau se manifeste, il suffit que le projectile s'en approche d'assez près pour que les forces de cohésion nucléaires entrent en jeu.

De quels projectiles dispose le physicien ? Tout d'abord de ceux qu'émettent spontanément les substances radioactives naturelles, celles de la famille uranium-radium, par exemple. Ces particules sont expulsées par des atomes radioactifs avec des vitesses considérables, de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres par seconde. L'énergie cinétique d'un projectile étant proportionnelle à sa masse et au carré de sa vitesse, nous avons à notre disposition une artillerie naturelle de laboratoire assez importante.

Mais le physicien décida de faire mieux encore. Il lui fallait plus de projectiles par seconde, possédant des vitesses encore supérieures. De là naquirent les engins de transmutation où les particules ionisées sont accélérées vers des cibles qu'elles désin-

tègrent et dont le plus connu est le cyclotron.

Les particules que l'on peut accélérer sont soit des noyaux d'hydrogène (protons), soit des noyaux de deutérium (deutons), soit des noyaux d'hélium (héliions). On peut également accélérer des ions de masse plus grande, tels que du lithium, du carbone ou même du mercure, mais la théorie prédit, et l'expérience confirme que la probabilité de perturber un noyau décroît à mesure que la masse du projectile augmente. Nous nous en tiendrons pour l'instant aux trois projectiles classiques : protons, deutons et héliions. Les tableaux des pages 37, 38 et 39 schématisent les plus importantes de ces réactions.

On y voit que l'entrée d'un proton dans un noyau peut provoquer l'expulsion d'une ou plusieurs particules : neutron ou deuton par exemple, ou simplement porter le noyau à un état d'excitation tel que le retour à l'état normal s'accompagne de l'émission d'une radiation électromagnétique sous la forme d'un photon gamma ; c'est la « capture radiative », qui, par incorporation du proton au noyau, augmente d'une unité à la fois la charge et la masse de ce dernier.

Avec des deutons, on observe également des captures radiatives ou l'expulsion de particules diverses ; assez rarement on peut constater l'expulsion de particules de masse 3 et de charge unité, qui sont des noyaux de tritium (hydrogène de masse 3).

Deux types de réactions avec des particules alpha comme projectiles ont un intérêt historique. Dans l'un, on observe une émission de protons : c'est en bombardant de l'azote par des particules alpha que Rutherford, en 1919, réalisa la première réaction nucléaire au laboratoire, avec production d'oxygène et libération de protons. Dans l'autre, on observe une émission de neutrons. C'est en étudiant une telle réaction que Frédéric Joliot et Irène Joliot-Curie découvrirent en 1934 la radioactivité artificielle. Par exemple, de l'azote bombardé par des particules alpha émet des neutrons et se transforme en un isotope du fluor qui n'existe pas dans la nature et est radioactif.

Le même tableau montre que de nombreuses réactions nucléaires peuvent aussi être provoquées par des neutrons, des rayons gamma ou des électrons.

Les électrons de très grande énergie sont obtenus avec des bêta-trons ou avec des synchrotrons, autres engins de l'arsenal de l'alchimiste moderne. En ce qui concerne les neutrons, la capture simple, la capture radiative, l'émission de deux ou trois neutrons donnent des isotopes stables ou radioactifs de l'élément bombardé. L'émission de protons ou de particules alpha se traduit par la création d'isotopes d'éléments différents.

Les neutrons ne portant pas de charge électrique, ils ne peuvent être accélérés. On les produit soit dans les « piles » nucléaires, comme il sera décrit plus loin, soit par bom-

TABLEAU SERVANT A LA CONVERSION DES UNITÉS USUELLES D'ÉNERGIE

MULTIPLIER	PAR	POUR OBTENIR
MEGAELEC- TRONVOLTS	$4,45 \times 10^{-20}$	Kilowatts-heures
	$1,6 \times 10^{-13}$	Joules
	$1,6 \times 10^{-6}$	Ergs
	$3,83 \times 10^{-14}$	Petites calories
	18×10^{-24}	Grammes
ERGS	10^{-7}	Joules
	$2,39 \times 10^{-8}$	Petites calories
	$2,78 \times 10^{-14}$	Kilowatts-heures
	$6,24 \times 10^5$	Mégaélectronvolts
	$0,11 \times 10^{-20}$	Grammes
JOULES	10^7	Ergs
	0,23	Petites calories
	$0,27 \times 10^{-8}$	Kilowatts-heures
	$0,62 \times 10^{13}$	Mégaélectronvolts
	$0,11 \times 10^{-13}$	Grammes
PETITES CALORIES	$4,18 \times 10^7$	Ergs
	4,10	Joules
	$1,16 \times 10^{-6}$	Kilowatts-heures
	$2,6 \times 10^{13}$	Mégaélectronvolts
	$4,6 \times 10^{-14}$	Grammes
KILOWATTS- HEURES	$3,6 \times 10^{13}$	Ergs
	$3,6 \times 10^6$	Joules
	$8,6 \times 10^5$	Petites calories
	$2,25 \times 10^{19}$	Mégaélectronvolts
	4×10^{-8}	Grammes
GRAMMES	25×10^6	Kilowatts-heures
	$5,6 \times 10^{26}$	Mégaélectronvolts
	$2,1 \times 10^{13}$	Petites Calories
	9×10^{13}	Joules
	9×10^{20}	Ergs

1 grande calorie = 1 000 petites calories = 4,27 kilogrammètres

1 mégaélectronvolt = 1 000 000 électronvolts.

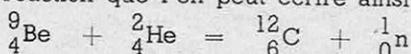
la masse d'un électron ($9,1 \times 10^{-31}$ grammes) équivaut à 9,5 MeV.

la masse d'un nucléon ($1,67 \times 10^{-24}$ grammes en moyenne) équivaut à 930 MeV.

$\times 10^n$ signifie qu'il faut multiplier par 1 suivi de n zéros (exemple : $\times 10^3$ signifie multiplier par 1 000 000).

$\times 10^{-n}$ signifie qu'il faut diviser par 1 suivi de n zéros (exemple : $\times 10^{-6}$ signifie diviser par 100 000 000).

bardement d'éléments tels que le béryllium ou le lithium par des particules alpha, suivant une réaction que l'on peut écrire ainsi :



Elle exprime qu'un noyau de béryllium (9 nucléons dont 4 protons) frappé par un noyau d'hélium (ou particule alpha, 4 nucléons dont 2 protons) donne du carbone (12 nucléons dont 6 protons) en émettant un neutron (l'indice inférieur 0 indique que la charge est nulle, et l'indice supérieur 1 qu'il est formé d'une seule particule).

On remarquera que, dans cette réaction, comme dans toutes les réactions nucléaires représentées précédemment, la somme des indices inférieurs et la somme des indices supérieurs est la même des deux côtés du signe « égale ». L'égalité des sommes des indices inférieurs exprime la conservation rigoureuse de la charge électrique des noyaux. L'égalité des sommes des indices supérieurs exprime la conservation rigoureuse du nombre des nucléons. Elle n'entraîne pas la conservation de la masse, car il faut tenir compte de l'énergie cinétique des particules incidentes, de celle des particules émises, et aussi de l'énergie de liaison des nucléons dans les noyaux ; comme nous l'avons dit, la masse n'est qu'un aspect de l'énergie, et c'est l'énergie totale qui se conserve rigoureusement.

Les neutrons, et aussi d'autres particules, peuvent provoquer des « fissions » nucléaires, c'est-à-dire de véritables éclatements des noyaux en deux ou plusieurs fragments massifs, accompagnés d'une libération d'énergie considérable à l'échelle nucléaire. C'est sur ces fissions par neutrons, qui libèrent elles-mêmes de nouveaux neutrons allant frapper les noyaux voisins, qu'est fondé le principe des piles et des bombes atomiques.

Un autre phénomène s'observe avec les particules de très grande énergie. C'est celui de l'arrachement de noyaux par paquets (« spallation » des Anglo-Saxons) à partir d'un noyau lourd bombardé par des projectiles de 100 millions d'électronvolts et plus.

L'ÉNERGIE

Nous avons, à plusieurs reprises, au cours des pages précédentes, employé le terme « électronvolt » lorsqu'il était question de l'énergie des particules, en particulier de celles utilisées comme projectiles pour les transmutations. L'électronvolt est l'unité d'énergie utilisée en microphysique.

Lorsqu'un électron passe d'un point de faible potentiel à un point de potentiel plus élevé, sa vitesse s'accroît sous l'action de la force électrique qui s'exerce sur lui ; son énergie cinétique augmente proportionnellement à la différence de potentiel. Par définition, l'électronvolt (en abrégé eV) est le gain d'énergie cinétique d'un électron (lequel porte la charge électrique unité) lorsqu'il

franchit une différence de potentiel de 1 volt. Il correspond à $1,6 \times 10^{-19}$ joules, puisque la charge de l'électron est de $1,6 \times 10^{-19}$ coulombs.

On évalue en électronvolts les énergies de toutes les particules de la microphysique, qu'elles soient électrisées ou non, y compris les neutrons et les photons. Dire de l'énergie d'une particule qu'elle est de 100 000 électronvolts, c'est dire qu'elle équivaut à celle qu'acquiert un électron accéléré par une différence de potentiel de 100 000 volts.

Évaluée avec cette unité, la valeur moyenne de l'énergie des molécules d'un gaz à zéro degré C (énergie d'agitation thermique) est de 0,035 eV. Elle atteint seulement 1 eV à 10 000° C, de sorte qu'à la surface du Soleil, dont on estime la température à 6 000° C, l'énergie moyenne thermique des atomes est encore inférieure à 1 eV.

L'énergie de liaison des électrons périphériques des atomes est de quelques électronvolts. Ils sont donc assez facilement arrachés (ionisation). L'énergie mise en jeu lors des réactions chimiques est du même ordre. Ainsi la combustion du carbone dans l'oxygène dégage, par atome de carbone, environ 4 eV.

En physique nucléaire, les énergies se chiffrent par millions d'électronvolts. Aussi utilise-t-on alors comme unité le mégaelectronvolt, ou MeV, qui vaut un million d'électronvolts. Ainsi les particules alpha émises par le radium ont une énergie de 4,8 MeV. La fission d'un atome d'uranium libère 200 MeV.

Exprimés avec les unités de la vie quotidienne, le kilowatt-heure ou la calorie, l'énergie correspondant à 1 eV ou même à 1 MeV est infime. Ainsi un kilowatt-heure vaut $2,25 \times 10^{19}$ MeV. Mais comme les valeurs se rapportent à une seule particule ou, dans le cas de la fission, à un petit nombre de particules, elles traduisent une concentration d'énergie considérable. Le tableau de la page précédente donne les facteurs de conversion pour les différentes unités mentionnées.

Ainsi que nous l'avons vu, la théorie de la relativité établit l'équivalence entre l'énergie et la masse. Toute libération d'énergie est compensée par une diminution de la masse. Ce fait peut sembler en contradiction avec la loi de conservation de la masse dans les transformations physiques ou chimiques de la vie quotidienne ; jamais on n'a pu déceler pra-

tiquement de variation de masse supérieure aux erreurs d'expérience. C'est qu'en fait ces variations de masse sont bien inférieures aux erreurs d'expérience ; dans la combinaison de l'hydrogène et de l'oxygène, elles ne dépassent pas quelques millièmes de milligramme par gramme d'eau formé. La loi demeure donc de portée générale.

Il faut mettre ici le lecteur en garde contre une application inconsidérée de la formule d'Einstein. Elle nous dit que l'énergie correspondant à une certaine masse est égale au produit de cette masse par le carré de la vitesse de la lumière.

Ainsi la désintégration complète d'un gramme de matière libérerait 25 millions de kWh. Cela est incontestable. On en conclut généralement que la matière constitue une réserve prodigieuse d'énergie que l'homme pourra mettre à profit lorsqu'il aura appris à provoquer la disparition de noyaux atomiques entiers et la conversion intégrale de leur masse en énergie. Comme l'a fait remarquer H.-A. Bethe, cette conclusion est entièrement erronée. Il est vrai que l'on connaît des processus au cours desquels diverses petites particules, électrons, positons ou mésons, sont annihilées. Ainsi, dans la conjonction d'un électron et d'un positon, les charges et les masses disparaissent et on constate l'émission d'un photon gamma de plus de 1 MeV. Il en est de même dans la désintégration des mésons positifs et négatifs et il est probable, si les hypothèses concernant l'existence du proton négatif sont vérifiées, qu'on constatera des annihilations de protons. Mais tous ces phénomènes ne se produisent que lorsqu'une de ces particules est mise en présence de la particule « complémentaire », et pour les provoquer il faut tout d'abord créer artificiellement cette dernière et pour cela dépenser autant d'énergie qu'il en sera libéré par la suite. Pratiquement, le gain est nul.

En fait, les seules réactions nucléaires exploitables par l'homme sont celles où les combinaisons de nucléons (protons et neutrons) se modifient de telle manière qu'il en résulte un dégagement d'énergie, le nombre total de nucléons demeurant inchangé. C'est, à l'échelle nucléaire, l'équivalent des réactions chimiques où les atomes se combinent entre eux pour donner des molécules différentes de celles qui sont mises en présence, sans que les atomes eux-mêmes soient modifiés.

1 kg d'antracite (combustion avec oxygène).	7 500 grandes calories
1 kg de trinitrotoluène (explosion)	1 016 »
1 litre d'essence (combustion avec oxygène)..	1 100 »
1 kg d'uranium 235 (fission)	40 000 000 000 »

KRYPTON 91 { 36 PROTONS
55 NEUTRONS



URANIUM 235 { 92 PROTONS
143 NEUTRONS



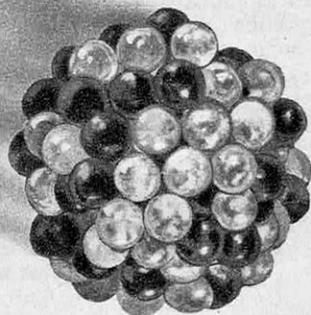
NEUTRON
INCIDENT



3 NEUTRONS
EMIS



BARYUM 142 { 56 PROTONS
86 NEUTRONS



LES PILES ATOMIQUES

TOUTE l'exploitation de l'énergie nucléaire, sur le plan pratique, repose sur une réaction fondamentale : la fission de l'isotope de l'uranium dont le noyau-groupe 235 particules.

Comme nous avons vu, la découverte de la fission a été faite peu avant la deuxième guerre mondiale. Un noyau d'uranium 235, capturant un neutron, peut se scinder en deux fragments de masses presque égales, plus rarement en trois fragments ou davantage. Cet éclatement suit les lois du hasard, de sorte que les couples de noyaux de poids moyen qui en résultent ne sont pas toujours les mêmes ; on a pu en identifier une quarantaine qui se situent tous vers le milieu de la classification générale des éléments. Si l'on fait la somme des masses des deux noyaux et des neutrons résultant d'une fission, on trouve un nombre inférieur à la masse du noyau d'uranium 235. La masse disparue correspond à l'énergie libérée lors de la fission et se retrouve sous forme de rayons gamma et d'énergie cinétique des fragments de fission. Ces fragments sont eux-mêmes très instables : radioactifs,

ils émettent des particules diverses et de l'énergie jusqu'à ce qu'ils parviennent à une forme stable, au bout d'un temps plus ou moins long. Au total, l'énergie libérée est considérable, bien supérieure à celle que dégagent les désintégrations radioactives classiques : pour un seul atome d'uranium 235, on l'évalue à 200 millions d'électronvolts, ce qui représente, par gramme d'uranium, environ 20 000 kilowatts-heure. Le point le plus important est que la fission s'accompagne de l'émission de nouveaux neutrons, 2,5 en moyenne, qui peuvent, si les circonstances sont favorables, amorcer de nouvelles ruptures de noyaux et assurer ainsi, de proche en proche, par une « réaction en chaîne », la fission plus ou moins complète des atomes présents.

Bien qu'on ne la connaisse que depuis très peu de temps, une dizaine d'années, la fission est un phénomène qui se produit très fréquemment dans la nature. Il existe de l'uranium 235, en faible proportion il est vrai, dans tous les minerais d'uranium. De temps en temps un neutron erratique, comme il s'en trouve

partout qui sillonnent l'atmosphère ou la croûte terrestre, provenant d'une transmutation (sous l'action d'un rayon cosmique ou d'un rayon alpha ou gamma émis par un élément radioactif) ou encore d'une fission spontanée d'un noyau (phénomène dont la probabilité est faible, mais non nulle), un tel neutron erratique est absorbé par un noyau d'uranium 235 qui éclate, libérant de l'énergie et émettant de nouveaux neutrons. Mais toujours ces derniers disparaissent sans effet notable. La probabilité pour qu'ils aillent frapper précisément d'autres noyaux d'uranium 235 est extrêmement faible, pratiquement nulle. Il ne peut s'établir de réaction en chaîne. En réalité, comme nous allons le voir, il est très difficile de réaliser les conditions indispensables pour que prenne naissance une réaction en chaîne, seule capable de livrer de l'énergie à l'échelle humaine.

LES NEUTRONS DANS L'URANIUM

Dans un bloc de minerai d'uranium, très chargé d'impuretés, celles-ci sont en telle quantité que, pratiquement, elles absorbent tous les neutrons que pourraient libérer des fissions occasionnelles. La première tâche est donc de purifier à l'extrême l'uranium pour en éliminer tous les autres éléments. Si, comme nous le verrons plus loin, on peut constituer des piles avec des blocs d'oxyde d'uranium très pur, c'est que l'oxygène absorbe peu les neutrons.

Supposons qu'après de multiples traitements chimiques, nous disposions d'un bloc d'uranium métallique. Peut-il s'y établir une réaction en chaîne? La réponse est non, quelles que soient les dimensions du bloc. Pour en comprendre la raison, il nous faut analyser, au moins grossièrement, les phénomènes dont un tel bloc est le siège, et qui sont assez complexes.

L'uranium naturel est un mélange de trois isotopes ayant respectivement pour nombres de masse 234, 235 et 238. L'isotope 234 est en proportion pratiquement négligeable et nous n'en parlerons pas. L'uranium 235 est cent quarante fois moins abondant que l'uranium 238. Ce dernier, dans certaines conditions, est tellement avide de neutrons qu'il arrête toute velléité de constitution de réaction en chaîne.

Voici les principales réactions qui se produisent au sein d'un bloc d'uranium soumis à un bombardement de neutrons :

a) les **neutrons lents**, ceux dont l'énergie est à peine supérieure à l'énergie cinétique moyenne provenant de l'agitation thermique des molécules, rencontrant des noyaux d'uranium 235 provoquent, quatre fois sur cinq, leur fission, et une fois sur cinq les transforment en noyaux d'uranium 236, non fissionables ; l'uranium 238 ne subit pas de fission ;

b) les **neutrons rapides** peuvent provoquer

la fission aussi bien de l'uranium 235 que de l'uranium 238, mais avec une très faible probabilité, nettement plus faible, en particulier, que celle de la capture des neutrons lents par l'uranium 235 ;

c) les **neutrons intermédiaires**, dont l'énergie est comprise entre celle des neutrons lents et celle des neutrons rapides, peuvent, pour certaines valeurs particulières de cette énergie, être captés avec une très forte probabilité par l'uranium 238. On les appelle neutrons de **résonance**. Le noyau d'uranium 238 qui a absorbé un tel neutron de résonance ne subit pas la fission. Son nombre de masse augmente d'une unité, puisque son noyau compte maintenant une particule supplémentaire : il devient de l'uranium 239 ; or, cet isotope nouveau est lui aussi radioactif et se désintègre assez rapidement en émettant un électron négatif (particule bêta), d'où un nouveau noyau dont la masse n'a pas varié : 239, mais dont la charge positive s'est accrue d'une unité : 93. C'est un nouvel élément isobare 239, le neptunium 239.

⁹³Np. Radioactif lui aussi, le neptunium émet encore un électron pour donner le plutonium 239.

⁹⁴Pu. Remarquons dès maintenant que le plutonium 239 peut subir la fission dans les mêmes conditions que l'uranium 235, c'est-à-dire avec des neutrons lents (piles) ou des neutrons rapides (bombes).

On saisit dès lors ce qui se passe dans un bloc d'uranium naturel. Les neutrons provenant d'une fission occasionnelle, qui libère beaucoup d'énergie, sont émis à grande vitesse ; leur probabilité de capture est très faible. Quand ils n'échappent pas hors du milieu, ils rebondissent sur les noyaux d'uranium 238 qui sont les plus nombreux en perdant progressivement de l'énergie jusqu'au moment où ils atteignent une des valeurs de résonance (quelques électronvolts) et, à ce moment, ils sont rapidement absorbés **sans provoquer de fission** par les noyaux d'uranium 238. Aucun, en pratique, ne peut parvenir à l'état de neutron lent (ou « thermique », quelques centièmes d'électronvolts) pour provoquer la fission d'un autre noyau d'uranium 235 et entretenir ainsi une réaction en chaîne.

SECTIONS DE CHOC

Dans un système contenant de l'uranium, un neutron libre a une certaine probabilité de finir sa carrière par l'une des réactions que nous avons énumérées : fissions d'uranium 235 et d'uranium 238, capture de résonance par uranium 238 conduisant à la synthèse du plutonium 239, capture par une impureté, ou par uranium 235 sans fission à moins qu'il ne sorte de la masse en s'échappant par sa surface. Ces probabilités sont fonction d'un grand nombre de facteurs : proportions relatives des divers atomes constituants, dimensions et forme géo-

métrique du système, et aussi énergies des neutrons.

Toutes choses égales d'ailleurs, à chaque valeur de l'énergie du neutron, ses chances d'être capturé par une catégorie d'atomes plutôt que par une autre varient, ce qu'on exprime numériquement en attribuant à ces atomes une « section efficace » plus ou moins grande.

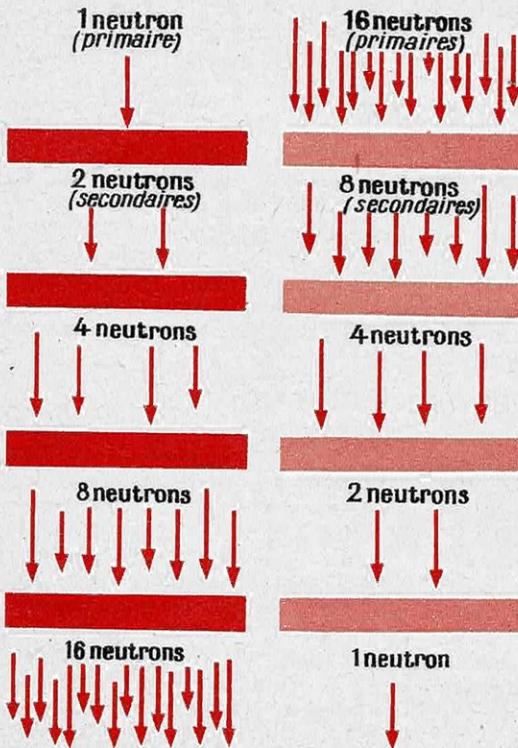
En effet, la probabilité d'atteindre une cible à l'aide d'un projectile augmente avec la surface de cette cible. Pour la commodité des calculs, on assimile les noyaux à des cibles de contour apparent plus ou moins étendu. On dira, par exemple, que pour des neutrons rapides (de l'ordre de 1 mégaelectron-volt), la section efficace de l'uranium 235 est de 3×10^{-24} cm². Cette surface n'a évidemment pas de réalité physique. Elle traduit seulement la probabilité pour que le phénomène que l'on considère se produise. Ainsi, pour l'uranium 235, la section de choc efficace pour la fission par les neutrons lents est de 545×10^{-24} cm². Pour l'uranium 238, la section efficace pour la fission par les neutrons rapides (1 MeV) est de $0,5 \times 10^{-24}$ cm², tandis que pour la capture sans fission des neutrons de résonance, elle est beaucoup plus importante. Ainsi la mesure des sections efficaces pour les diverses valeurs de l'énergie des neutrons a montré que celle correspondant à la fission de l'uranium 235 par les neutrons lents était très supérieure à celle de l'isotope 238 avec des neutrons rapides. C'est la première de ces réactions qui, bien que l'isotope 235 soit

beaucoup moins abondant que l'isotope 238, offre le plus de chances de fournir une réaction en chaîne. Au contraire, pour les valeurs de résonance de l'énergie du neutron avec l'uranium 238, correspondant, comme nous l'avons vu, à la synthèse du plutonium, la section efficace de l'uranium 238 augmente brusquement et les neutrons possédant cette énergie (5 électronvolts) ont les plus grandes chances d'être capturés par les noyaux 238.

LE « MODÉRATEUR » OU « RALENTISSEUR » DE NEUTRONS

Puisque l'uranium 238 joue un rôle si néfaste, la première idée qui vient à l'esprit est de l'éliminer. Dans un bloc d'uranium 235 pur, les neutrons provenant d'une fission iront frapper directement d'autres noyaux 235, et bien que leur probabilité d'action soit relativement faible, car il s'agit de neutrons rapides, ils provoqueront d'autres fissions. Aucun noyau 238 n'étant là pour les faire disparaître, la réaction en chaîne se développera rapidement, trop rapidement même, car nous n'aurons pas réalisé autre chose qu'une bombe atomique, ce qui, d'un point de vue industriel, est assez gênant. En outre, il est très difficile de séparer l'uranium 235 de l'uranium 238, car ce sont deux isotopes et, à ce titre, ils possèdent les mêmes propriétés chimiques. On doit recourir à des procédés complexes, extrêmement coûteux, sur lesquels nous reviendrons plus loin.

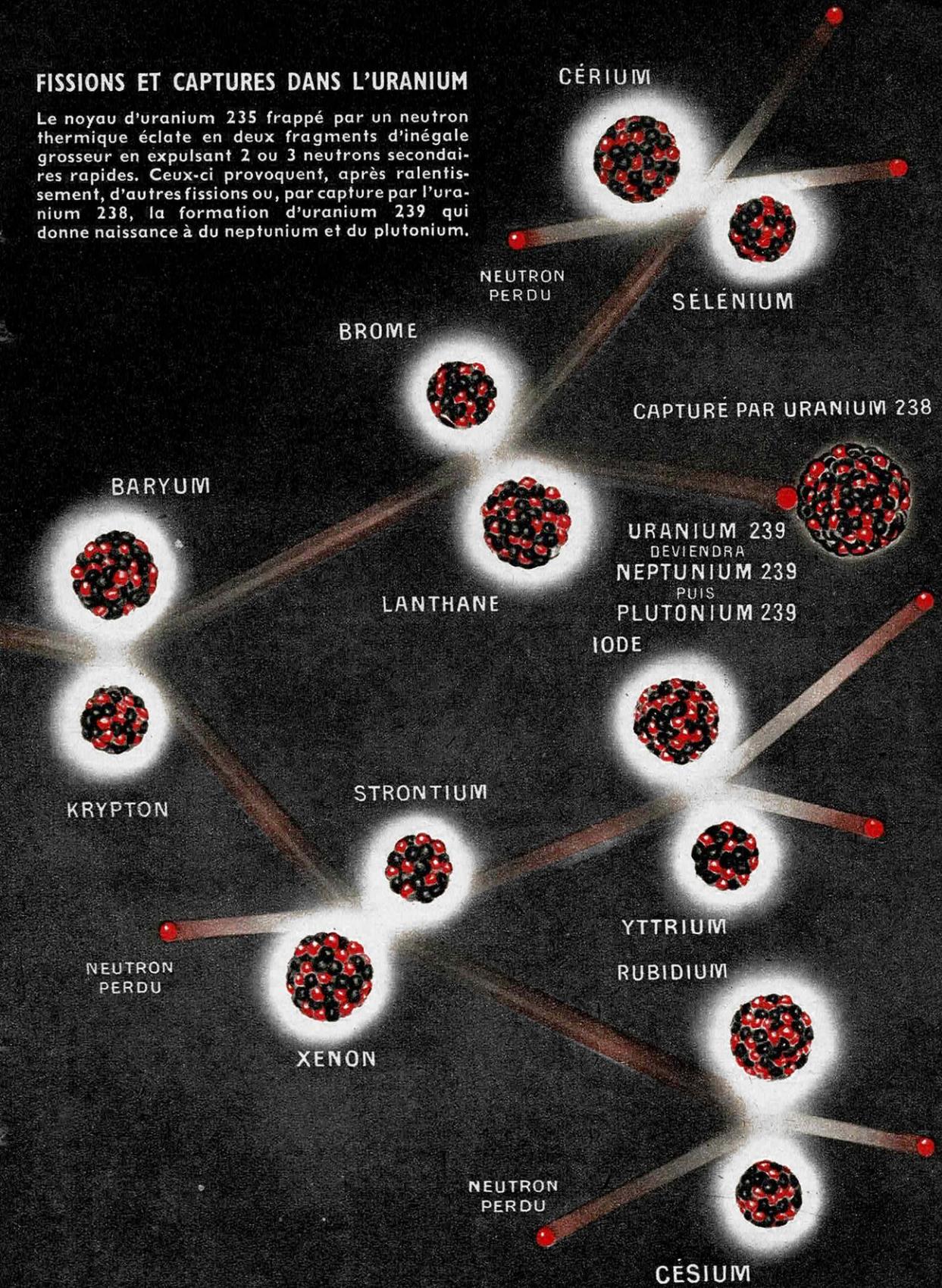
Mais il n'est pas indispensable d'éliminer l'uranium 238. Si, par un montage approprié, un nombre suffisant de neutrons peuvent être soustraits à son action au moment où leur vitesse passe par une valeur de résonance, ils parviennent alors à l'état de neutrons lents sans avoir été absorbés par l'uranium 238 et peuvent agir sur l'uranium 235 et en provoquer la fission. On est ainsi conduit à introduire dans une masse d'uranium naturel un « modérateur » à travers lequel les neutrons rapides produits par les fissions perdront rapidement leur énergie dans une série de chocs élastiques sans réaction nucléaire, autrement dit par rebondissement sur des noyaux d'atomes qui ne les absorbent pas. Le terme « modérateur » est assez mal choisi, car 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.



◀ Chaînes divergentes et convergentes de neutrons. A gauche, un neutron primaire donne naissance à deux neutrons secondaires d'où multiplication par deux à chaque génération. A droite, au contraire, le flux de neutrons primaires émis par la source est constamment appauvri : la chaîne est convergente.

FISSIONS ET CAPTURES DANS L'URANIUM

Le noyau d'uranium 235 frappé par un neutron thermique éclate en deux fragments d'inégale grosseur en expulsant 2 ou 3 neutrons secondaires rapides. Ceux-ci provoquent, après ralentissement, d'autres fissions ou, par capture par l'uranium 238, la formation d'uranium 239 qui donne naissance à du neptunium et du plutonium.



Il serait plus rationnel de parler de « ralentisseur » de neutrons, mais le terme modérateur est maintenant d'usage courant.

Les corps susceptibles d'être employés le plus avantageusement comme modérateurs sont ceux de masse atomique faible, à condition bien entendu qu'ils absorbent peu les neutrons. La masse de leur atome doit être faible, car dans les chocs élastiques, les échanges d'énergie sont les plus importants lorsque les masses sont voisines. Ainsi une balle qui frappe un objet volumineux rebondit sans perdre pratiquement de vitesse ; si elle heurte une balle de mêmes dimensions, 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 pratiquement égale à la sienne, il peut perdre en quelques chocs la presque totalité de son énergie.

On ne peut cependant songer à utiliser de l'hydrogène (dont le noyau est le proton) comme modérateur, car il absorbe trop les neutrons, proton et neutron ayant tendance à s'unir pour former un noyau d'hydrogène lourd ou deutérium.

Les deux éléments qui sont employés de préférence pour constituer le modérateur sont le deutérium (sous forme d'eau lourde) et le carbone (sous forme de graphite). Lors d'un choc élastique avec un noyau de deutérium, un neutron perd en moyenne une fraction de son énergie (0,444) plus grande que celle (0,142) qu'il perd lorsqu'il rencontre un noyau de carbone. Il faut donc, pour obtenir le même effet de ralentissement, moins d'eau lourde que de graphite. D'autre part, l'eau lourde contient moins d'impuretés que le graphite et le deutérium absorbe moins les neutrons que le carbone (0,00065 contre 0,0045). Même en tenant compte de l'absorption des neutrons par l'oxygène contenu dans l'eau lourde (0,0016), on est encore loin de celle du carbone (0,0045). L'eau lourde est donc théoriquement plus avantageuse que le graphite. Mais sa fabrication est onéreuse et c'est au graphite que l'on s'adresse pour les piles volumineuses.

Le béryllium, autre élément léger susceptible d'être employé comme modérateur, a été abandonné provisoirement parce que sa purification revient très cher. Sa manipulation est en outre assez dangereuse ; les poussières de béryllium attaquent violemment les voies respiratoires. Son emploi éventuel reste cependant à l'étude pour certaines « piles » nucléaires industrielles. Le lithium a été également abandonné car il s'enflamme très facilement au contact de l'air humide.

D'une manière générale, les impuretés doivent être éliminées de façon extrêmement sévère, non seulement dans l'uranium, mais aussi dans le modérateur et dans tous les accessoires du système ; en particulier, la proportion de bore admissible doit être infé-

rieure à un millionième, soit moins de un gramme de bore au total pour une « pile » dont la masse est voisine d'une tonne.

SCHÉMA DE PRINCIPE D'UNE « PILE » NUCLÉAIRE

En pratique, un « réacteur » nucléaire avec modérateur en graphite pourra être constitué de la manière suivante : des barres, des blocs ou des pastilles d'uranium naturel ou d'oxyde d'uranium comprimé, dont on aura éliminé aussi parfaitement que possible toutes les impuretés, seront enfermées dans des boîtes d'aluminium étanches pour les préserver de l'oxydation et insérées entre des blocs de graphite. Les neutrons rapides libérés par les fissions dans un des blocs s'en échappent aussitôt, franchissent sans difficulté l'enveloppe d'aluminium, qui absorbe peu les neutrons, et pénètrent dans un bloc de graphite voisin. Là, ils rebondissent sur les atomes de carbone, abandonnant leur énergie et, ressortant à l'état de neutrons lents (ou thermiques), pénètrent dans un des blocs d'uranium voisins, où ils sont captés par les premiers atomes d'uranium 235 qu'ils rencontrent, provoquant éventuellement leur fission. À un tel réacteur, constitué par un entassement de blocs d'uranium alternant avec des blocs de graphite convient effectivement le nom de « pile ». On l'emploie cependant encore pour désigner les réacteurs à eau lourde, bien qu'il n'y ait plus alors d'empilement, les barres d'uranium étant simplement noyées dans l'eau lourde. Leur fonctionnement est analogue à celui des piles à graphite.

La manière dont évolue un système dans lequel des masses d'uranium sont bombardées par des neutrons dépend de la balance entre les réactions productrices de neutrons et celles qui les font disparaître. Si les neutrons sont absorbés ou perdus plus rapidement qu'ils ne sont libérés, les fissions n'auront aucune tendance à se propager en chaîne. Si c'est le contraire qui a lieu, le nombre de fissions ira en croissant rapidement et le phénomène pourra même devenir explosif si on ne freine la réaction. La croissance ou la décroissance plus ou moins rapide du nombre des neutrons libres se traduit par un coefficient caractéristique du système : son « facteur de multiplication ». Si, par exemple, celui-ci est égal à 2, cent neutrons primaires donneront naissance à deux cents neutrons secondaires ; s'il est 0,5, ils ne feront apparaître que cinquante neutrons secondaires.

Dans un bloc d'uranium naturel, le facteur de multiplication est toujours inférieur à 1 pour un grand nombre de raisons et, en particulier, à cause de la présence des impuretés, ce qui explique que les « fissions » spontanées de certains atomes ou celles provoquées par des neutrons erratiques, bien que très nombreuses, restent des phénomènes isolés, sans aucune tendance à se propager.

LE RÉFLECTEUR DE NEUTRONS

Pour accroître le « facteur de multiplication » d'une pile, il faut réduire les pertes de neutrons par la surface.

Pour cela, deux méthodes peuvent être employées séparément ou conjointement : augmenter la masse du système, l'entourer d'un revêtement réfléchissant le plus grand nombre possible de neutrons et les renvoyant dans la masse. Dans le premier cas, le volume du système et, par conséquent, le nombre total des neutrons libres augmente comme le cube des dimensions linéaires, tandis que la surface et, par conséquent, le nombre de neutrons qui s'échappent augmente seulement comme leur carré, donc beaucoup moins vite. En valeur relative, les pertes diminuent lorsque les dimensions de la pile augmentent.

On peut aussi diminuer les pertes de la surface en renvoyant vers l'intérieur de la pile un certain nombre de neutrons qui tendent à s'échapper.

Pour cela, on l'entoure d'un « réflecteur », terme qui ne signifie pas que les neutrons vont se réfléchir sur lui comme sur un miroir. Ils rebondissent sur les noyaux des atomes qui le constituent, suivant les lois du hasard, de sorte qu'après un certain nombre de collisions, il peut arriver que quelques neutrons soient renvoyés en arrière par ce carambolage multiple. C'est autant de récupéré pour les réactions de fissions. La couche « réfléchissante » idéale serait constituée par du béryllium qui, bombardé par un neutron rapide émet à son tour deux neutrons. En moyenne, un nombre appréciable de ces neutrons secondaires serait renvoyé dans la pile. Malheureusement, le béryllium est, comme nous l'avons dit, difficile à produire en grande quantité et suffisamment pur. Aussi est-ce le plus souvent par l'augmentation des

dimensions ou par un réflecteur en graphite (1) que l'on réussit à réduire l'importance relative des pertes par la surface.

LE RÉGLAGE DE LA RÉACTION

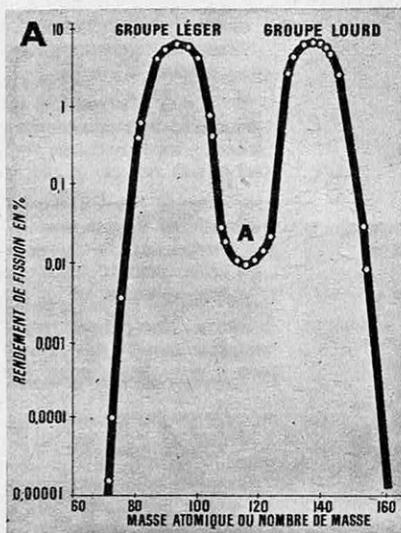
Dans une pile à l'eau lourde ou au graphite, il est inutile de prévoir une source spéciale de neutrons pour amorcer les réactions en chaîne. L'atmosphère terrestre, du fait du rayonnement cosmique ou des désintégrations des corps radioactifs toujours présents à l'état de traces dans les matériaux de la croûte terrestre, renferme suffisamment de neutrons libres pour provoquer les premières fissions ; en outre, dans la masse d'uranium se produisent toujours quelques fissions spontanées engendrant les premiers neutrons.

Il est plutôt nécessaire de freiner la réaction. En effet, pour qu'une réaction en chaîne s'établisse, il faut, dans le cas d'un réacteur au graphite, empiler des blocs d'uranium et de graphite jusqu'à ce que, par l'augmentation des dimensions, le facteur de multiplication devienne supérieur à l'unité. La pile est alors « divergente ». Mais il est évident qu'un facteur de multiplication supérieur à 1 donne une réaction qui, assez rapidement, prend une allure explosive, donc incontrôlable. Si le facteur de multiplication est seulement de 1,001, comme les générations de neutrons se succèdent très rapidement dans la pile, environ à un millième de seconde d'intervalle, on voit qu'en dix secondes la puissance se trouverait multipliée par 10 000. On parvient cependant à contrôler la réaction par suite de l'existence de ce qu'on appelle les « neutrons retardés ».

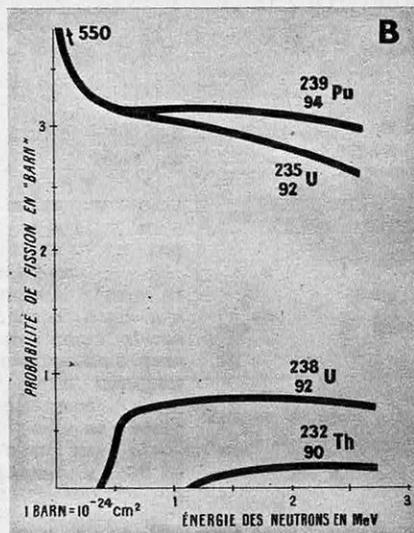
Lors de la fission, on observe en effet deux

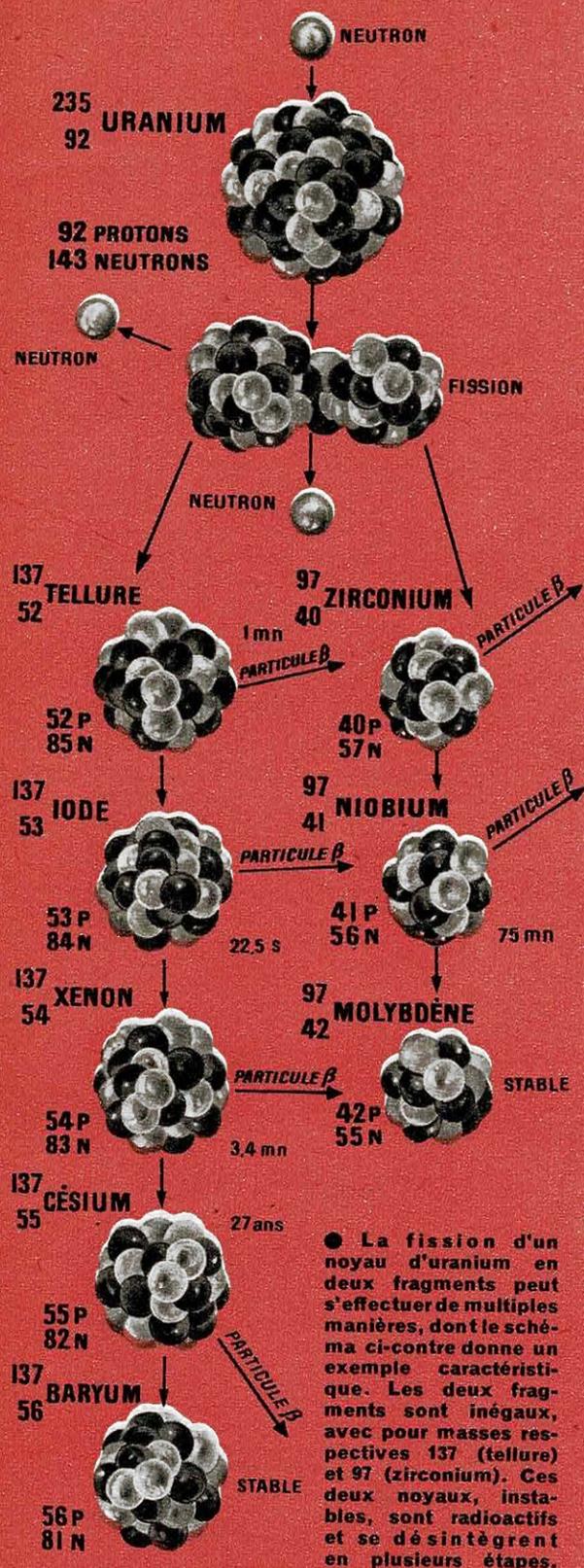
(1) Des réflecteurs d'uranium auraient été employés avec succès dans les piles et dans les bombes atomiques.

A La courbe montre que les fissions des noyaux d'uranium 235 en deux fragments égaux (région A) sont mille fois moins fréquentes que celles qui donnent un fragment lourd et un fragment léger (les masses sont alors de l'ordre de 140 et de 95).



B La probabilité de fission d'un noyau dépend de sa structure et de l'énergie des neutrons. On voit qu'avec des neutrons lents, elle atteint des valeurs très élevées pour les noyaux d'uranium 235 et de plutonium 239.





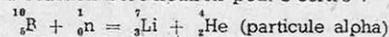
sortes de neutrons secondaires : les « neutrons immédiats » émis pendant la fission même, soit un millième de milliardième de seconde après la capture du neutron primaire, représentant 99 % du total ; les « neutrons retardés », représentant 1 %, sont émis par les fragments de fission avec un retard qui peut aller de 0,0001 seconde à 1 minute après la capture du neutron primaire. Par exemple, si on arrête brusquement une pile en y introduisant des corps absorbant puissamment les neutrons, on observe encore une émission de neutrons secondaires pendant 0,15 seconde, des neutrons retardés pendant près d'une minute et même, pendant plusieurs heures, des neutrons dits « photoneutrons » provenant de réactions nucléaires provoquées par les rayons gamma de la pile, ces derniers surtout avec les piles à eau lourde, le deutérium étant scindé en un proton et un neutron par les rayons gamma de grande énergie.

Les neutrons retardés sont d'une importance capitale pour le fonctionnement de la pile, car on met facilement ce retard à l'émission à profit pour ramener rapidement le facteur de multiplication à une valeur inférieure. Pratiquement, on loge dans la pile des bandes ou barres mobiles de cadmium ou d'acier au bore ; le cadmium et le bore sont de puissants absorbants de neutrons (1). La pile de Chicago, par exemple, avait, tous absorbants de neutrons éloignés, un facteur de multiplication de 1,0006. Lorsqu'une des barres était extraite de 1 cm à partir de sa position correspondant au facteur de multiplication égal à 1, le rayonnement émis mettait environ quatre heures pour doubler d'intensité. On voit que l'on disposait d'un délai amplement suffisant pour faire les corrections convenables.

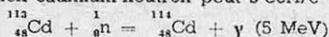
Dans la pratique, le réglage se fait automatiquement. Une chambre d'ionisation permet de mesurer à chaque instant le flux de neutrons à un endroit déterminé de la pile. Il faut naturellement utiliser une chambre d'ionisation spéciale, car les neutrons, ne portant pas de charge, n'ionisent pas les gaz. Cette chambre d'ionisation contient du trifluorure de bore ; le bore 10 frappé par un neutron se transforme en lithium 7 et en une particule alpha, et c'est cette dernière qui ionise le gaz. Le courant qui traverse la chambre est convenablement amplifié et est utilisé pour commander la mise en marche de moteurs électriques qui enfouiront plus ou moins dans la pile les barres de réglage.

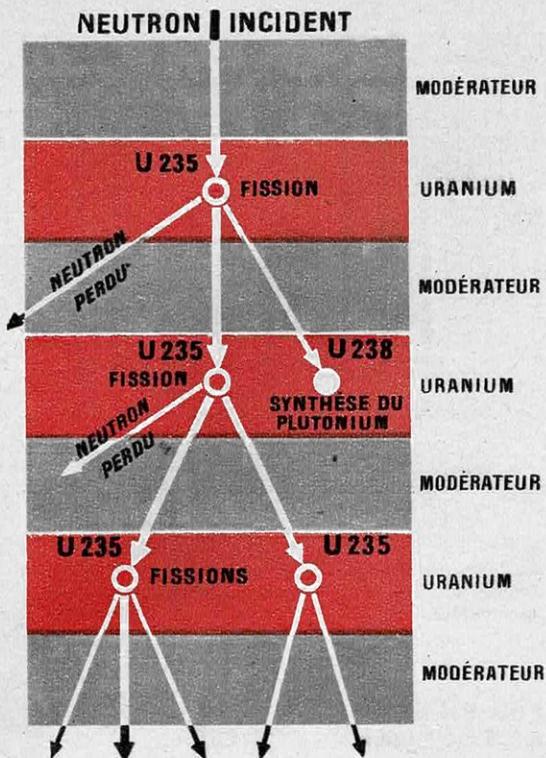
La marche d'une pile peut être réglée d'une manière extraordinairement précise, au millième près, car elle est extrêmement sensible à toutes les causes qui peuvent modifier son facteur de multiplication. C'est ainsi, par exemple, que, lorsqu'une pile est refroidie

(1) La réaction bore-neutron peut s'écrire :



La réaction cadmium-neutron peut s'écrire :





« Ce schéma, très simplifié, montre que, dans une « pile » atomique, les neutrons rapides, émis lors d'une fission, traversent un « modérateur » ou « ralentisseur » dans lequel ils perdent leur vitesse avant d'aller provoquer de nouvelles fissions dans l'uranium.

les calories. Dans les piles au graphite, il faut prévoir un refroidissement auxiliaire, soit par un liquide, soit par un gaz. L'uranium doit en outre être protégé contre la corrosion par une « enveloppe » en aluminium. Ce problème d'apparence anodine a cependant longtemps tenu en échec les techniciens.

Les radioactivités provoquées par les neutrons dans l'aluminium (de périodes 2,3 minutes et 14,8 heures), ainsi que d'autres phénomènes de perturbation cristalline rendent le métal poreux à la longue.

C'est pourquoi l'eau de refroidissement d'une pile ne peut être rejetée dans un cours d'eau qu'après examen de sa radioactivité.

Lorsque la pile est refroidie à l'air, l'argon présent à l'état de traces dans l'air est transformé par les neutrons en gaz radioactif. Il est alors indispensable d'évacuer cet air par de très hautes cheminées.

Le refroidissement peut se faire aussi par du bismuth ou du plomb fondus.

Pour les piles de grande puissance on prévoit un système de condensation des vapeurs d'eau lourde et un autre de recombinaison de l'hydrogène lourd et de l'oxygène de l'eau lourde. Les radiations dissocient l'eau en ses éléments et la recom-

avec de l'air, les variations de la pression barométrique entraînent des différences appréciables dans l'absorption des neutrons par l'azote de l'atmosphère ; une telle pile constitue en fait un baromètre très sensible.

L'ÉNERGIE DES PILES ET LEUR REFROIDISSEMENT

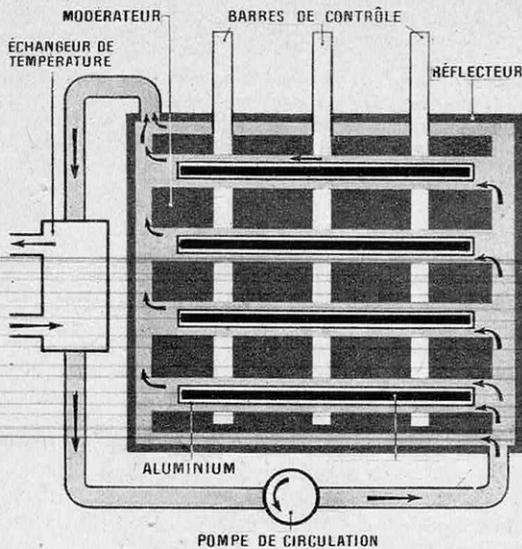
L'énergie dégagée par les réactions nucléaires est libérée sous les formes suivantes : rayons gamma, énergie cinétique des fragments de rupture, énergie des particules bêta émises par ces fragments radioactifs au cours de leurs désintégrations successives. Elle se retrouve sous forme calorifique à la suite des chocs successifs de ces rayons, particules et fragments sur les atomes de la masse.

La température de la pile s'élève donc. Il faut la refroidir, d'une part pour ne pas endommager les matériaux qui la constituent, d'autre part pour que la vitesse des neutrons thermiques ne dépasse pas, par suite de l'agitation thermique, la valeur optimum (inférieure à 1'électron-volt) pour la réaction de fission de l'uranium 235.

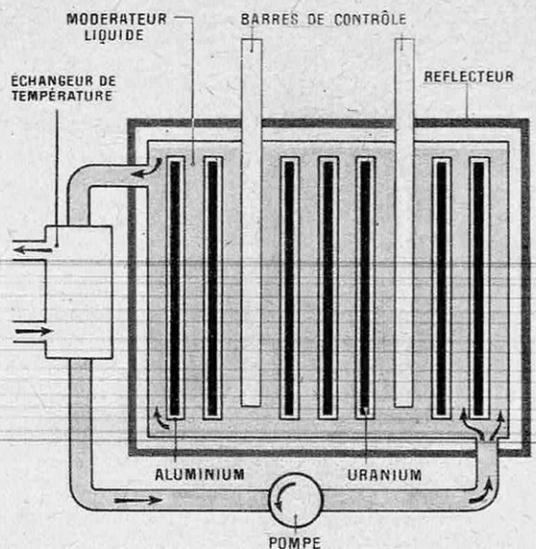
Dans les piles où l'eau lourde est employée comme modérateur, on peut se servir d'elle, par une circulation appropriée, pour évacuer

Le neutron venant de gauche provoque la fission d'un noyau d'uranium et l'émission de deux neutrons rapides. Ils subissent de nombreux chocs dans le ralentisseur avant de pénétrer dans un bloc voisin pour y provoquer de nouvelles fissions d'uranium.





● Pile hétérogène à modérateur solide au graphite ou au béryllium refroidie avec un gaz, air ou hélium, en circuit fermé, sous pression, transportant les calories de la pile à un échangeur de température.



● Pile hétérogène à modérateur liquide (eau lourde ou bismuth fondu) utilisé en circuit fermé comme liquide de refroidissement assurant le transport des calories à un échangeur de température.

binasion accidentelle d'une grande quantité d'hydrogène et d'oxygène provoquerait une explosion.

La puissance qu'une pile est susceptible de développer est uniquement fonction de son système de refroidissement. C'est une des particularités de la pile nucléaire considérée comme source d'énergie. En effet, cette puissance instantanée est déterminée par le nombre d'atomes qui subissent la fission en une seconde. Avec une pile quelconque, il suffit d'extraire les barres de réglage pour laisser la réaction en chaîne se développer, et de ne les réintroduire pour la stabiliser que lorsqu'un certain niveau a été atteint. Cela suppose naturellement que les matériaux de la pile peuvent supporter la température à laquelle elle va se trouver portée, et qui dépend uniquement de l'efficacité de son système de refroidissement.

Précisons que si, pour une raison ou pour une autre, le système de réglage et de sécurité ne fonctionnait pas, la pile ne pourrait en aucun cas exploser comme une bombe atomique. La température s'élevant, l'eau lourde, s'il s'agit d'une pile à eau lourde, se mettrait à bouillir, les chemises d'aluminium entourant l'uranium deviendraient poreuses, mettant ainsi le combustible nucléaire en contact avec l'eau bouillante. Le facteur de multiplication tomberait vite au dessous de l'unité et les fissions n'alimenteraient plus la réaction en chaîne. S'il s'agit d'un réacteur au graphite de grande puissance, les matériaux de soutien se mettraient à fondre et la structure s'effondrerait, provoquant là encore l'arrêt de la réaction. Les dégâts pour la pile seraient considérables, mais resteraient strictement localisés.

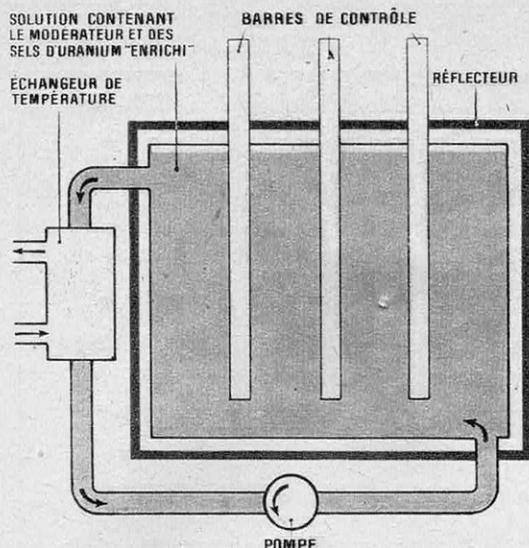
LES PILES AUTORÉGÉNÉRATRICES

Après une certaine durée de fonctionnement, la composition des matériaux de la pile se modifie. Les fissions font apparaître des impuretés, de l'uranium 235 est transformé en uranium 236, tandis que du plutonium se forme aux dépens de l'uranium 238. Le facteur de multiplication varie donc. Les impuretés tendent à l'abaisser et il faut les éliminer.

L'apparition du plutonium compense dans une certaine mesure la disparition de l'uranium 235 et tend à enrichir la pile en produits fissionables, donc à élever le facteur de multiplication. Si l'on parvenait à éliminer les impuretés dues aux fragments et à produire au moins autant de plutonium qu'il disparaît d'uranium 235, on aurait réalisé une pile autorégénératrice. L'intérêt d'une telle pile (breeder), c'est qu'au lieu de « brûler » seulement la petite quantité d'uranium 235 qui accompagne l'uranium 238, elle consommerait la totalité de l'uranium, l'isotope 235 ne jouant en quelque sorte qu'un rôle un peu analogue à celui d'un démarreur de la réaction.

Au bout d'un certain temps de fonctionnement, on doit traiter une partie des matériaux en réaction dans un double but : 1° débarrasser la pile des impuretés qui s'y sont accumulées par suite des fissions et qui absorbent des neutrons ; 2° purifier et récupérer les produits fissionables, uranium 235 et plutonium 239, qui pourront être employés dans d'autres piles, ou pour fabriquer des bombes.

Il n'est pas déraisonnable d'espérer que l'on pourra faire jouer au thorium le même rôle qu'à l'uranium 238. Le thorium 232, bombardé par des neutrons, est en effet capable de capter un neutron et, par deux



● Pile homogène à mélange liquide contenant à la fois le modérateur et les sels de matière fissible, uranium ou plutonium, en solution. C'est cette solution même qui est utilisée pour le refroidissement.

émissions de particules bêta, de donner un élément fissible : l'uranium 233. Les recherches dans cette voie semblent avoir été particulièrement poussées au Canada.

LE RAYONNEMENT DE LA PILE

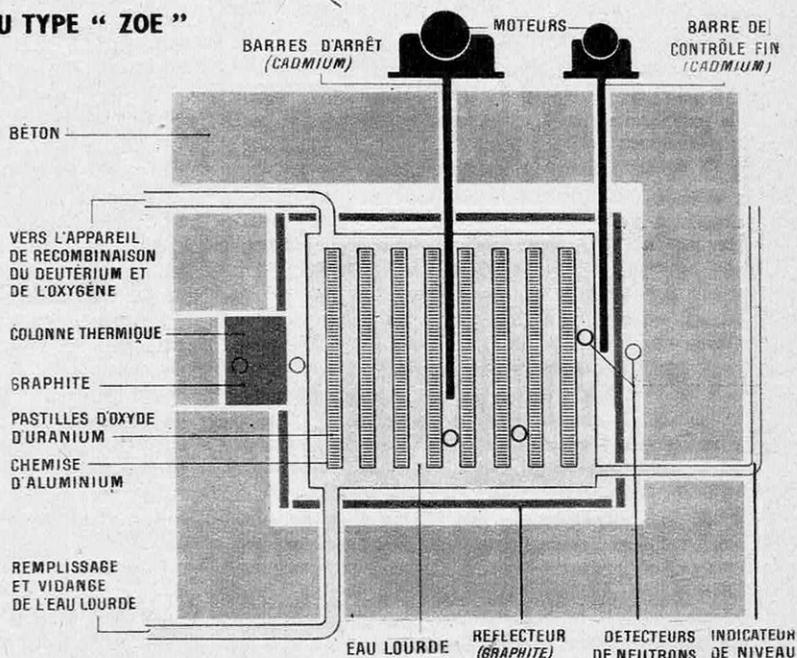
Les réactions nucléaires de tous ordres qui ont lieu dans la pile font apparaître des produits radioactifs dont certains sont gazeux. Il est nécessaire d'assurer l'étanchéité abs-

lue du système, car ces produits sont extrêmement dangereux pour l'homme, les animaux, et les plantes, même à doses infinitésimales. De plus, les réactions nucléaires s'accompagnent d'émission de rayons gamma extrêmement pénétrants et dangereux, au-dessus d'une certaine dose, pour tous les tissus vivants. Une pile d'une puissance de 1 000 kW est équivalente de ce point de vue à 2 tonnes de radium.

On doit arrêter ces radiations par des écrans contenant le plus possible d'éléments lourds, opaques aux rayons gamma. La pile elle-même est entourée d'une carapace de ciment armé (dont 1 m d'épaisseur réduit dans la proportion de 1 000 à 1 l'intensité des radiations) et elle est souvent aux trois quarts enterrée. Même arrêtée, la pile reste longtemps dangereuse ; après un an, les produits de fission peuvent encore avoir une radioactivité équivalant à celle de plusieurs kilogrammes de radium. De multiples précautions sont prises, et des appareils détecteurs signalent instantanément toute dose de radiation dangereuse, toute trace de corps radioactif dans les zones occupées par le personnel. Des dispositifs de télécommande ont permis de réduire au minimum le risque couru par les opérateurs. Enfin des services médicaux surveillent constamment ce personnel et le pourcentage d'accidentés de toutes sortes n'est pas supérieur dans l'industrie atomique de ce qu'il est dans d'autres industries électriques, hydrauliques, etc. ; aussi les primes d'assurance y sont-elles les mêmes que dans les autres branches de l'industrie.

UNE PILE A EAU LOURDE DU TYPE "ZOE"

● Des pastilles d'oxyde d'uranium comprimé sont empilées dans un tube d'aluminium rendu étanche par sertissage. Ces tubes sont plongés dans une cuve remplie d'eau lourde. Une ou plusieurs barres de cadmium actionnées par des moteurs couissent dans des cylindres en aluminium qui plongent dans la cuve et servent à absorber les neutrons et contrôler ainsi la puissance de la pile. Une barre de réglage fin absorbe à volonté les neutrons entre la pile et le réflecteur. Des détecteurs de neutrons placés en divers points de la pile indiquent le flux de neutrons par centimètre carré et actionnent automatiquement les dispositifs de contrôle de puissance. Une paroi d'absorbant escamotable permet d'utiliser les neutrons à l'extérieur de la pile. S'il en est besoin, l'eau lourde évaporée ou décomposée est récupérée.



LES PILES ATOMIQUES CONSTRUITES JUSQU'EN 1951

EMPLACEMENT	DATE	« COMBUSTIBLE »	MODERATEUR	REFROIDISSEMENT	PUISSANCE
CHICAGO	2-12-42	Uranium + oxyde d'uranium	graphite	aucun	200 W
OAK RIDGE I	4-11-43	Uranium	graphite	air	plus de 2 000 kW
OAK RIDGE II	1947	Uranium	graphite	?	plus de 250 000 kW
ARGONNE	1943	Uranium + oxyde d'uranium	graphite	aucun	quelques kW
HANFORD 3 piles	1944-1945	Uranium	graphite	eau	beaucoup plus de 250.000 kW
ARGONNE	15-5-44	Uranium	eau lourde	eau lourde	plus de 300 kW
LOS ALAMOS (Lopo)	1944	Uranium enrichi	eau ordinaire	aucun	50 mW
LOS ALAMOS (Hypo)	1944	Uranium enrichi	eau ordinaire	eau ordinaire	6 kW
LOS ALAMOS	1945	Plutonium	aucun		
BROOKHAVEN	1950	Uranium	graphite	air	3 000 kW
Chalk River (ZEEP)	1945	Uranium	eau lourde	eau lourde	quelques kW
Chalk River (WRX)	1949	Uranium	eau lourde	eau lourde	quelques milliers de kw
Harwell (GLEEP)	15-8-47	Uranium + Oxyde d'uranium	graphite + eau lourde	air	100 kW
Harwell (BEPO)	7-48	Uranium + Oxyde d'uranium	graphite + eau lourde	air	6 000 kW
Châtillon (ZOÉ)	15-12-48	Oxyde d'uranium	eau lourde	aucun	5 kW

LES PILES AMÉRICAINES

Un certain nombre de piles ont été construites jusqu'à aujourd'hui aux Etats-Unis, au Canada, en Angleterre et en France. D'autres sont en construction ou en projet dans divers pays, en Norvège et en Suède, par exemple. On ne possède pratiquement aucun renseignement valable sur l'état de l'industrie atomique en U.R.S.S.

Les piles américaines sont au nombre d'une dizaine. La plus ancienne, celle qui fut la première historiquement à entrer en fonctionnement (1942) est la pile de Chicago. Elle fut à l'origine édifée sous les gradins du stade de foot-ball de l'Université de Chicago et démontée et transportée en 1943 à 50 km de Chicago, au Laboratoire National d'Argonne. Elle contenait 10 tonnes d'uranium métallique et 40 tonnes d'oxyde d'uranium, en blocs cylindriques de 2,7 kg, logés dans des briques de graphite. Le poids total du graphite atteint 472 tonnes. La pile est entourée d'une muraille de béton de 1,5 m d'épaisseur qui lui donne une forme rectangulaire de 9 m de côté et 6 m de hauteur. Elle pèse au total 1 400 tonnes. Les barres de contrôle, en bronze recouvert de cadmium, sont au nombre de dix. Trois d'entre elles sont lestées de masses de 50 kg pour que leur chute rapide arrête la réaction en cas d'urgence. On a aménagé à la partie supérieure un petit laboratoire pour des expériences sur les neutrons ; son plancher est

constitué de 15 cm de plomb et 1,2 m de bois dur.

A Argonne se trouve également un réacteur à uranium et eau lourde, en service depuis le 15 mai 1944. Il comporte un tank cylindrique en aluminium de 1,8 m de diamètre et 2,5 m de hauteur, contenant 6,5 t d'eau lourde, où plongent verticalement 120 tiges d'uranium métallique, de 27,5 mm de diamètre, chemisées d'aluminium. L'eau lourde elle-même sert au refroidissement. A sa partie supérieure, la cuve est remplie d'hélium qui circule à travers un réfrigérant et une chambre où s'effectue la recombinaison du deutérium et de l'oxygène provenant de la dissociation de l'eau lourde sous l'effet du rayonnement. Il a été prévu 7 barres de contrôle en cadmium. Autour du réflecteur de graphite, on trouve un écran de 10 cm d'un alliage de plomb et de cadmium et une muraille de béton de 2,4 m d'épaisseur. Les échantillons à irradier sont envoyés dans la pile par un tube pneumatique à hélium sous pression.

La pile de Clinton (Oak Ridge, Etat de Tennessee, 1943) est considérablement plus grande que celle de Chicago. Elle est constituée par un cube de graphite avec des canaux remplis d'uranium métallique. L'uranium métallique se présente sous formes de barres entourées par des chemises d'aluminium parfaitement étanches aux gaz. La puissance de la pile a atteint et même dépassé parfois 1 800 kW et sa température 500° C. Elle était destinée à la fabrication du plutonium. En

février 1944, près de 300 kg d'uranium étaient enlevés quotidiennement de la pile et envoyés à l'usine de séparation pour en extraire le plutonium et les produits de fission. L'uranium ainsi débarrassé revenait à la pile. Elle est utilisée actuellement pour des recherches et pour la fabrication d'isotopes radioactifs.

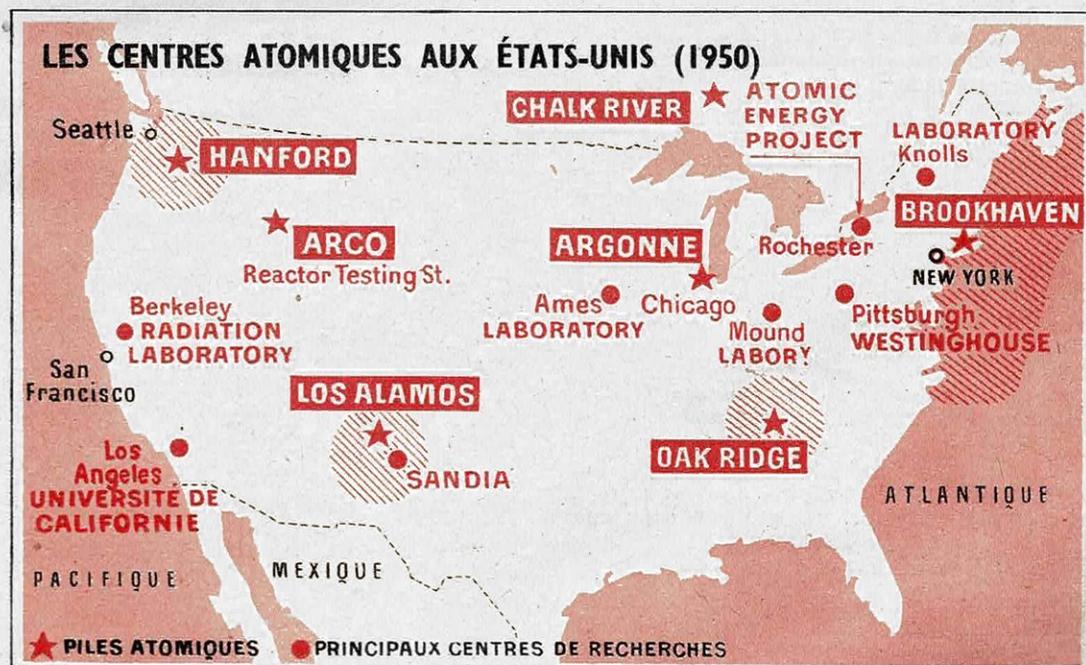
Trois piles identiques à celle de Clinton ont été construites à Hanford (Etat de Washington, sur la côte du Pacifique). Elles ont été récemment remises entièrement à neuf. Elles sont refroidies par un courant d'eau emprunté à la rivière Columbia. On estime que ces piles dissipent plusieurs centaines de milliers de kilowatts. Le chiffre précis n'a pas été divulgué, mais on estime qu'il est certainement supérieur à 250 000 kW pour chacune d'elles. Les piles fournissent des centaines de grammes de plutonium par jour. La production de 1 kg de plutonium par jour correspondrait à une puissance d'environ un million de kW. La construction de deux piles nouvelles est très avancée. Une troisième est prévue ; elle sera probablement utilisée pour la fabrication du tritium destiné aux superbombes (voir le chapitre suivant).

D'autres piles ont un caractère expérimental, tel le bouilleur de Los Alamos. Il s'agit d'un réacteur de type homogène, où la matière réagissante est un sel d'uranium enrichi, en solution dans l'eau ordinaire servant de ralentisseur. Un premier modèle en fut réalisé en mai 1944. Baptisé « Lopo » il contenait 540 g d'uranium 235 et développait

50 milliwatts. Sur le même modèle, perfectionné, on construisit dès décembre de la même année, un réacteur « Hypo » contenant 810 g d'uranium 235 et développant 6 kW. Il est constitué par une sphère de 30 cm de diamètre en acier inoxydable entourée d'un réflecteur d'oxyde de béryllium, lui-même dans du graphite formant un cube de 1,5 m de côté. Le blindage protecteur comporte 12 cm de plomb, 0,8 mm de cadmium et 1,5 m de béton. La sphère contient, en solution dans l'eau, du nitrate d'uranyle où le rapport de l'uranium 235 à l'uranium 238 est de 1/6, contre 1/140 dans l'uranium naturel. Il y a quatre barres de réglages en cadmium. Le refroidissement est assuré par de l'eau qui traverse un serpentin. Un tube de 25 mm de diamètre permet d'introduire des échantillons à irradier dans la sphère, où le flux de neutrons atteint 300 milliards de particules par centimètre carré et par seconde dans la région centrale. La dissociation de l'eau par le rayonnement libère par heure 5 litres d'hydrogène et d'oxygène que l'on évacue par un courant d'air permanent.

Un autre réacteur expérimental est en fonctionnement à Los Alamos. Son « combustible » est du plutonium et il n'y a pas de modérateur. Il utilise ainsi des neutrons rapides, comme dans une bombe, mais on parvient, par des absorbants convenables, à maintenir son niveau de fonctionnement suffisamment bas.

A Brookhaven (Etat de New York), on a réalisé une pile pilote au graphite et à l'ura-



● Les surfaces hachurées sont interdites à la circulation aérienne, sauf autorisation spéciale. Les côtes sont couvertes d'un réseau de radars cons-

tamment en éveil et la région de Los Alamos, où sont installés les laboratoires de mise au point des bombes, est patrouillée par des avions à réaction.



LE CENTRE DE BROOKHAVEN, dans l'île de Long Island, près de New York, est dirigé pour le compte de la Commission de l'énergie atomique amé-

ricaine par neuf universités de la côte est. Il occupe les baraquements de l'ancien camp militaire de Upton. Une pile de 30 000 kW vient d'y être installée.

mium métallique analogue à celle de Clinton, qui est surtout destinée à servir de source de neutrons et de produits radioactifs artificiels.

Elle a été calculée pour développer une puissance maximum de 30 000 kW et est refroidie par air. Elle forme un énorme cube, où 60 000 blocs de graphite de formes variées sont assemblés en ménageant des passages pour l'introduction des blocs d'uranium et la circulation de l'air. Ce dernier traverse la pile à raison de 10 000 m³ par minute et est rejeté dans l'atmosphère au sommet d'une cheminée de 96 m de haut.

Un certain nombre de réacteurs sont en projet ou en construction. C'est ainsi qu'on doit construire à Arco (Idaho) un réacteur qui utilisera un « combustible » enrichi en uranium 235 ou en plutonium 239 de manière à obtenir un flux de neutrons très intense : la pile doit, en effet, servir à étudier le comportement de divers matériaux sous l'action des neutrons (les neutrons rapides déplacent les atomes des positions qu'ils occupent dans les microcristaux des matériaux et modifient ainsi leurs propriétés mécaniques, électriques et thermiques) et il ne faut pas que l'introduction de tels échantillons dans la pile interrompe la réaction en chaîne.

Un autre réacteur en projet à Arco doit servir à élucider le problème des piles autorégénératrices. Il doit comporter très peu de modérateur et fonctionnera ainsi avec des neutrons de vitesse moyenne, dits « intermédiaires ». Ainsi se trouvera facilitée la synthèse du plutonium.

Le laboratoire d'Oak Ridge a également en projet un réacteur homogène de faible puissance.

Enfin, nous ne ferons que citer ici les piles en cours de construction ou d'étude pour équiper les sous-marins ; nous aurons l'occasion d'y revenir dans un chapitre suivant.

LES PILES CANADIENNES

Au Canada, il existe deux piles à eau lourde. La première, Z E P (Zero Energy Experimental Pile) est de faible puissance, à peine quelques watts. Elle fut mise en opération à Chalk River (Ontario) en septembre 1945. Elle n'est utilisée que pour des recherches et des essais de matériaux. La seconde, W R X, est beaucoup plus volumineuse et met en jeu des flux de neutrons de très grande intensité. Elle est de forme générale cylindrique et de nombreuses ouvertures y sont pratiquées pour des expériences sur les neutrons et la production d'isotopes radioactifs.

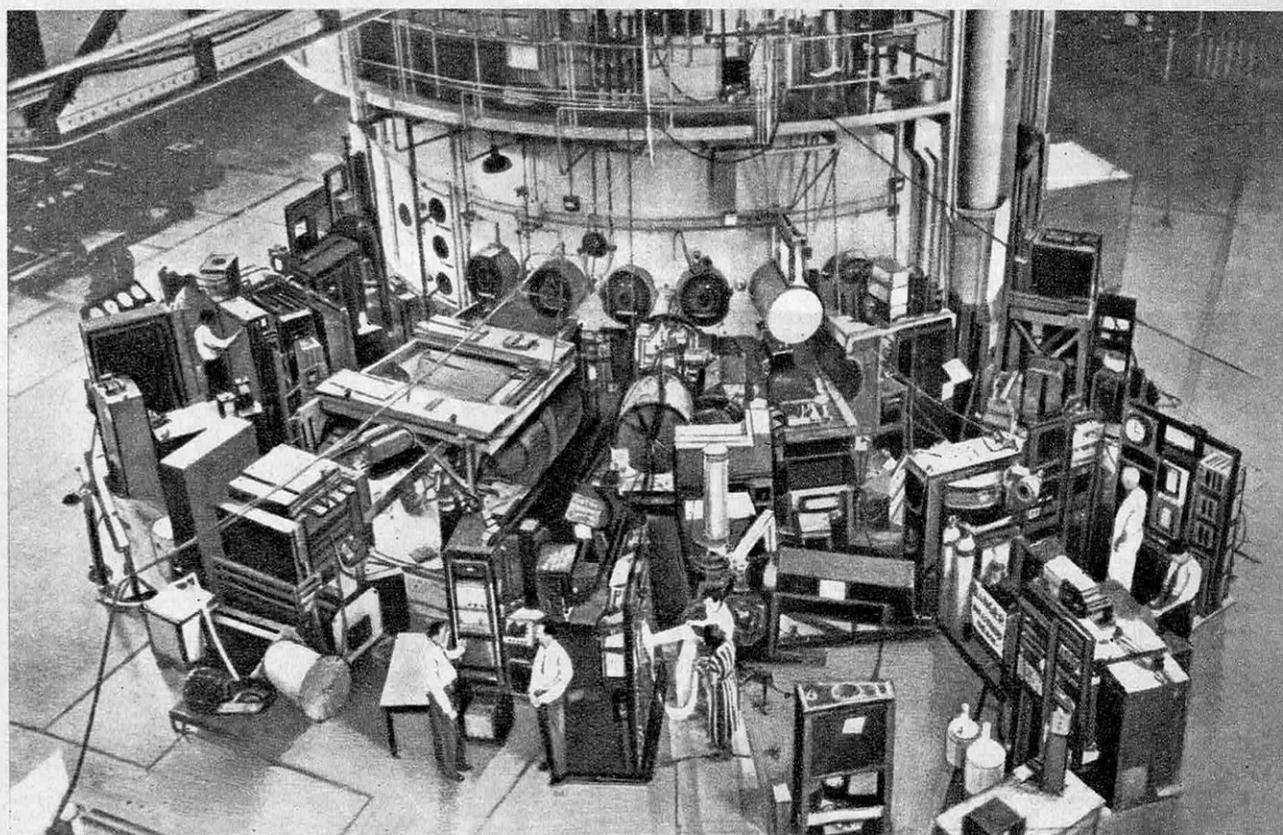
LES PILES BRITANNIQUES

En Grande-Bretagne, sous l'impulsion du professeur J. D. Cockcroft, les Anglais s'emploient à combler le retard qu'ils ont pris entre 1943 et 1945, période à laquelle leurs savants étaient employés aux Etats-Unis et au Canada dans l'organisation appelée « Manhattan Engineer District ». Deux piles au graphite sont en service au centre de recherches atomiques de Harwell,



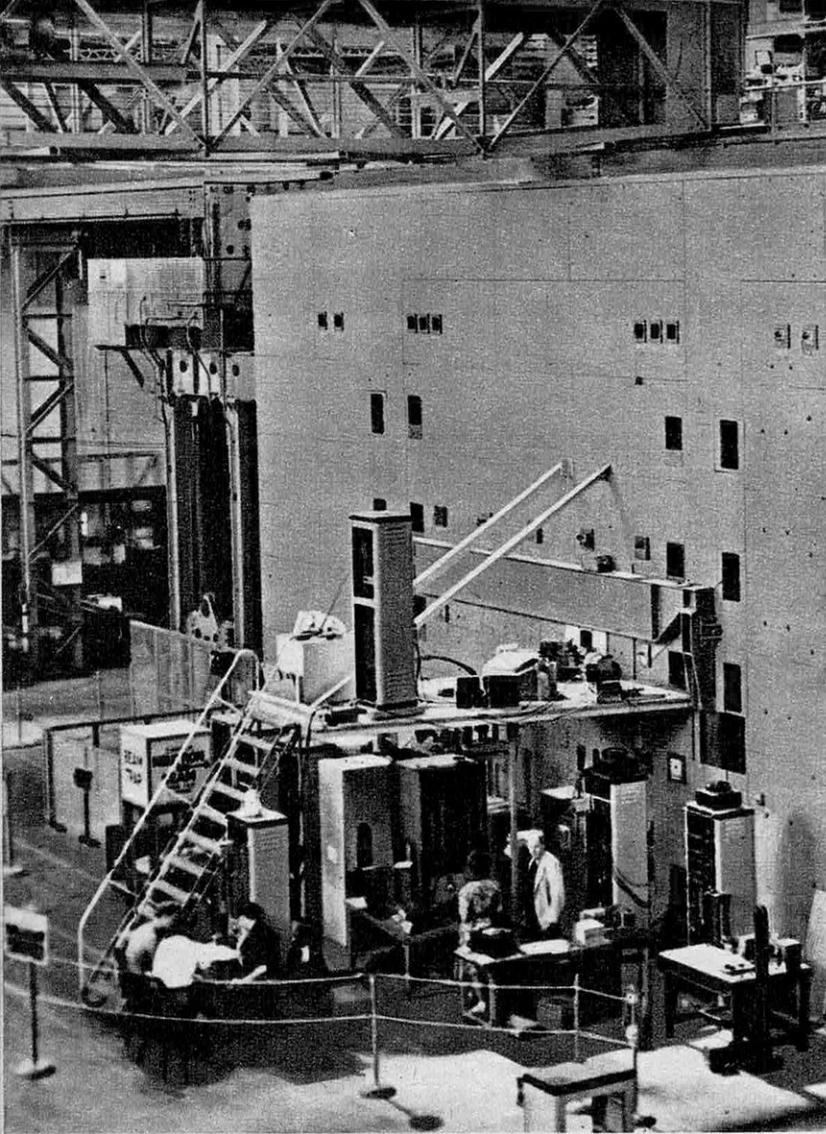
AU CENTRE DE RICHLAND, voisin des grandes piles de Hanford, s'est élevé depuis 1947 une ville champignon sur les rives du fleuve Columbia, dans

l'Etat de Washington, au N.-O. des Etats-Unis. On voit à droite l'espace réservé à 2 000 roulottes, ce qui laisse supposer un plan d'évacuation rapide.



A CHALK RIVER, AU CANADA, se trouve la plus puissante pile atomique à eau lourde du monde. Le nombre impressionnant d'appareils qui l'entou-

rent montre que les Canadiens l'utilisent au maximum pour des recherches sur les neutrons. Elle sert aussi à fabriquer de nombreux isotopes radioactifs.



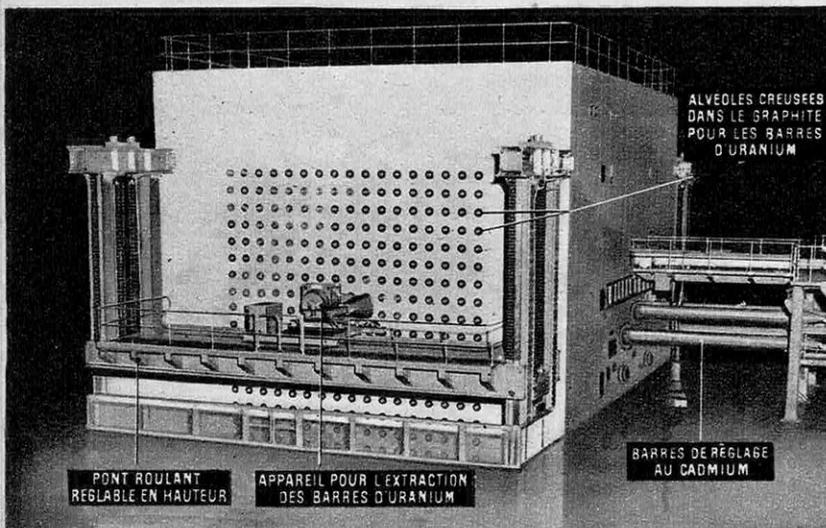
pres d'Oxford. La première appelée **Gleep** (Graphite Low Energy. Experimental Pile : pile expérimentale de faible énergie au graphite), fonctionne depuis août 1947 ; bien que son refroidissement soit rudimentaire, elle marche aisément à une puissance moyenne de 100 kW ; la seconde, **B.E.P.O.** (British Experimental Pile Oxide), en fonctionnement depuis 1948, est refroidie par l'air et développe une énergie thermique équivalant à plusieurs milliers de kilowatts. Elle est utilisée depuis février 1949 pour des recherches et pour la production d'isotopes radioactifs.

LA PILE FRANÇAISE

En France, le Commissariat à l'Energie Atomique a entrepris, sous la direction du professeur Joliot, en même temps que la prospection des gisements d'uranium sur le territoire de l'Union française, la réalisation d'une première pile à eau lourde de quelques watts, qui est installée à Châtillon près de Paris. Une seconde pile à uranium métal et à eau lourde est à l'étude et sera édifiée à Saclay.

La pile de Châtillon, ZOE (Z pour zéro énergie, la pile étant expérimentale ; O pour oxyde ; E pour eau lourde), édifée sous la direction de M. L. Kowarski, est cylindrique. La cuve à réaction est entourée par un réflecteur en graphite et l'ensemble par une protection en béton.

La cuve à réaction, d'environ 1,8 m de hauteur, contient 6 tonnes d'eau lourde dans laquelle plongent des barreaux verticaux d'oxyde d'uranium gainés d'aluminium. Ces barreaux sont constitués par des pastilles comprimées d'oxyde d'uranium (UO_2) d'une densité comprise entre 8 et 9. Des canaux horizontaux traversent le béton et le graphite radialement ou tangentiellement par rapport à la cuve. Ces canaux, où peuvent être engagées les substances à irradier, sont généralement obturés. Une colonne diffusante en graphite (colonne thermique) est encastrée dans le béton sur l'un des côtés de la pile ; elle est destinée aux expériences avec les neutrons thermiques.



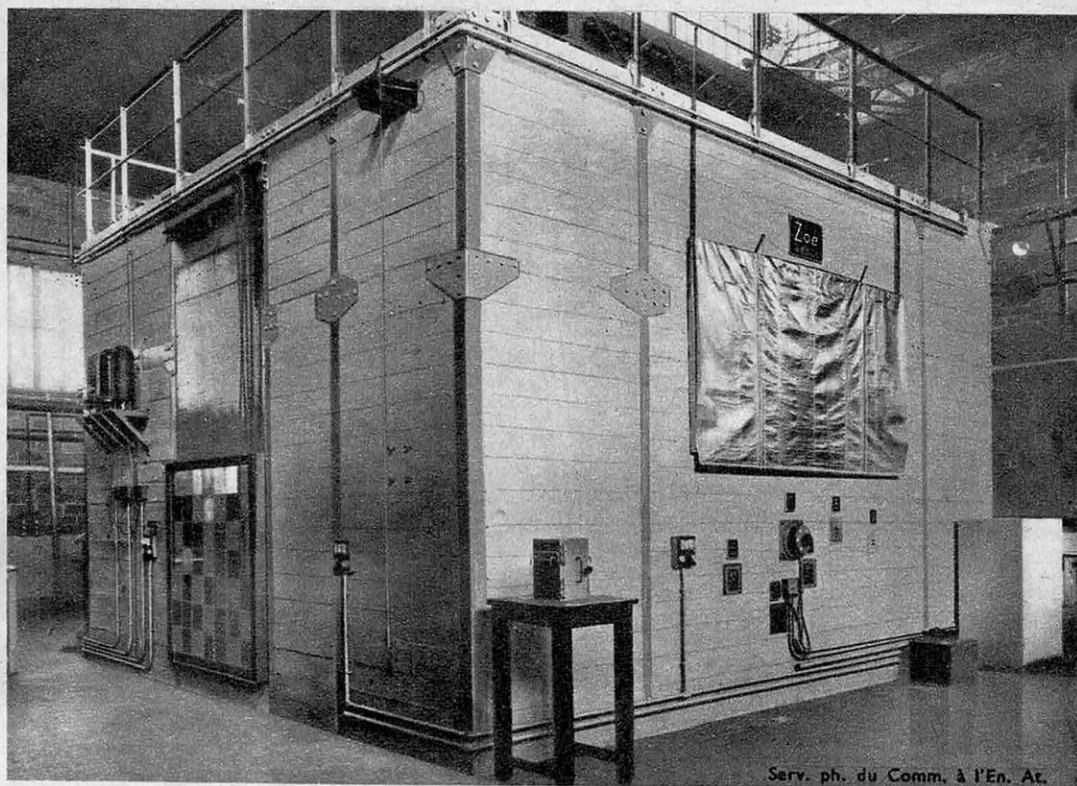
ALVÉOLES CREUSÉES
DANS LE GRAPHITE
POUR LES BARRES
D'URANIUM

BARRES DE RÉGLAGE
AU CADMIUM

PONT ROULANT
RÉGLABLE EN HAUTEUR

APPAREIL POUR L'EXTRACTION
DES BARRES D'URANIUM

AU CENTRE DE HARWELL, vue d'ensemble et maquette de BEPO, deuxième pile atomique expérimentale britannique, à refroidissement par air, capable de développer 6 000 kilowatts.



Serv. ph. du Comm. à l'En. At.

« ZOE », AU FORT DE CHATILLON, près de Paris, est la première pile atomique française. A droite, on voit le tableau central de commande à partir duquel un seul opérateur démarre et arrête la pile et règle la puissance qu'elle doit développer.

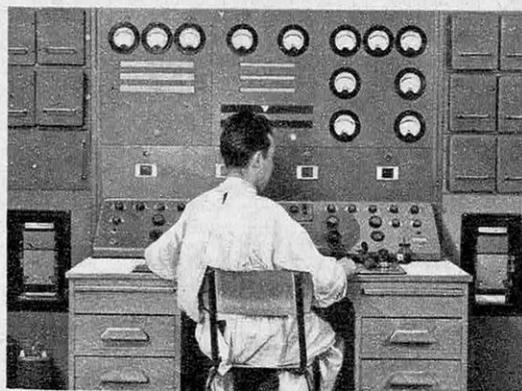
Le refroidissement de la cuve s'effectue par rayonnement, par le haut et le bas de celle-ci, ainsi que par un courant d'air entretenu par deux ventilateurs entre la cuve et le réflecteur. Le régime de marche est un peu fonction de la température ambiante. On arrive ainsi à un maximum d'échauffement toléré avec une puissance de 10 kW pour une marche de nuit. La moyenne de marche continue est de 5 kW.

Le flux de neutrons le plus important est obtenu à mi-hauteur du tube creux central. Il atteint 3.10^{10} neutrons par cm^2 par seconde. Il est de 22 000 par cm^2 sur la face extérieure de la colonne diffusante.

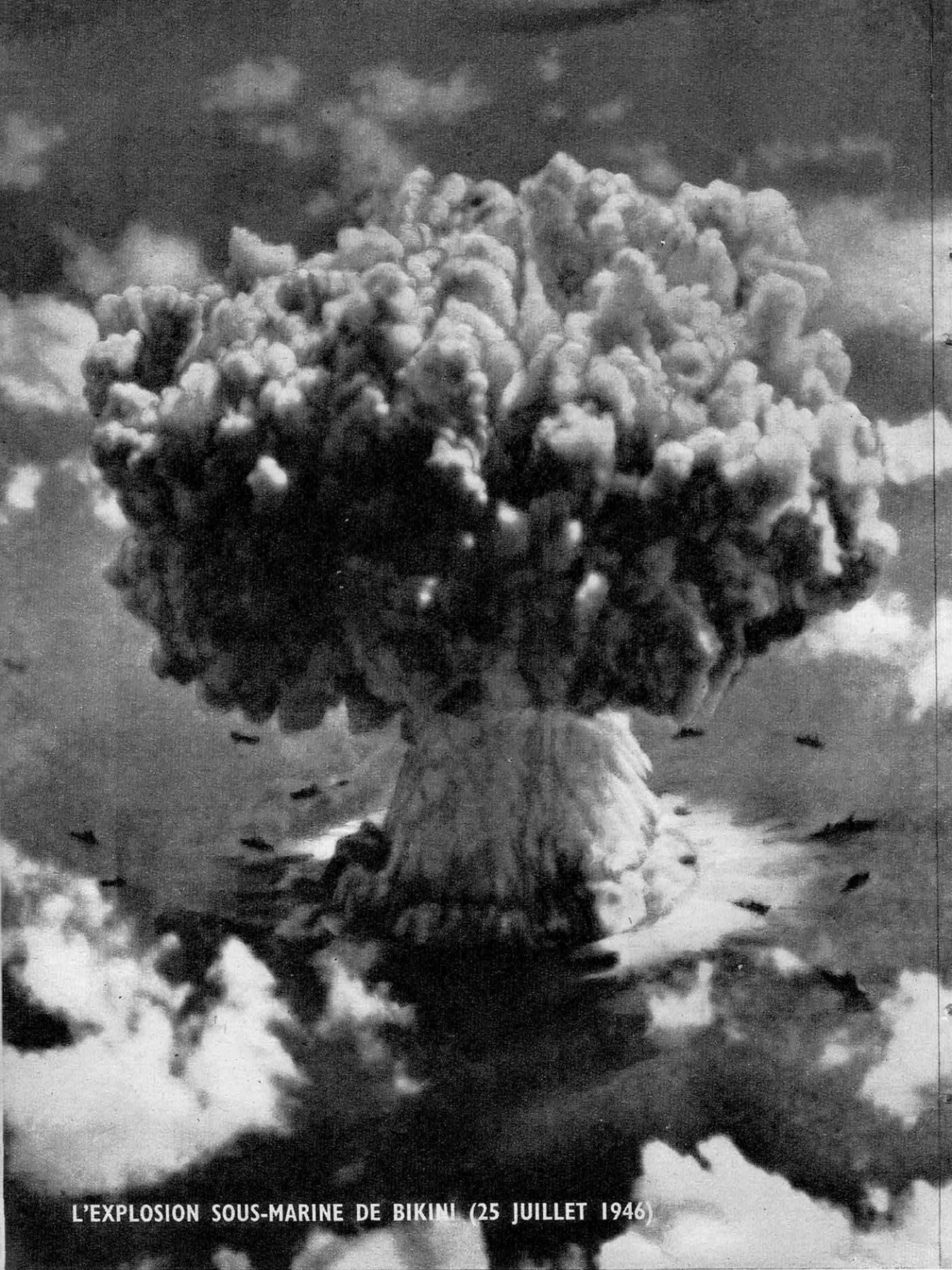
Le contrôle de la pile est assuré par deux jeux de barres en cadmium. Les barres de sécurité plongent dans l'eau lourde à l'arrêt et sont complètement sorties pour la marche. Les plaques de réglage se trouvent à l'extérieur de la cuve, entre celle-ci et le réflecteur de graphite. Leur position peut être réglée à un demi-millimètre près par des servomoteurs commandés à partir d'un tableau central.

De nombreux radioéléments artificiels ont déjà été produits par cette pile et distribués à divers centres de recherches.

Le traitement chimique d'une fraction de



l'oxyde d'uranium de la pile a permis d'extraire une quantité pondérable de plutonium, ce qui permettra aux techniciens français de se perfectionner dans la manipulation de cet élément afin d'atteindre un rendement d'extraction de 100 %. Le rendement actuel est de l'ordre de 80 % bien qu'il soit difficile d'affirmer qu'il n'est pas supérieur, vu que le calcul du nombre d'atomes de plutonium formés au bout d'un certain temps dans une pile n'est pas chose aisée. L'usine de purification des minerais et d'extraction du plutonium se trouve au Bouchet. Le département de la chimie au Commissariat à l'Energie Atomique est placé sous la direction de M. Bertrand Goldschmidt, secondé par MM. C. Eichner et P. Vertès.



L'EXPLOSION SOUS-MARINE DE BIKINI (25 JUILLET 1946)

LES BOMBES ATOMIQUES

ENTRE un « combustible » et un « explosif » nucléaires, il y a en gros la même différence qu'entre un combustible et un explosif chimiques. Tout est affaire de vitesse de réaction.

Le « combustible » d'une pile libère lentement son énergie, évacuée au fur et à mesure de sa production par le système de refroidissement. La réaction se propage lentement d'un atome à un autre, d'une part parce que les barres de réglage au cadmium ou au bore absorbent beaucoup de neutrons libérés et réduisent ainsi la probabilité pour qu'ils engendrent de nouvelles fissions, d'autre part parce que les atomes d'uranium 238 et certains atomes d'uranium 235 absorbent également des neutrons sans éprouver de fission, enfin parce que les fissions d'uranium 235 sont provoquées en presque totalité par des neutrons lents. Dans une bombe atomique, il est indispensable que la réaction se propage à très grande vitesse, afin qu'elle puisse intéresser une fraction importante de la masse avant que l'énergie énorme libérée par les premières fissions ait provoqué la destruction de la bombe en arrêtant la réaction. Il faut donc tout d'abord choisir l'élément fissible de telle manière qu'il subisse la fission avec une grande probabilité et qu'il n'absorbe pas en pure perte les neutrons : ce sera de l'uranium 235 très concentré ou du plutonium 239; de plus, il ne faudra compter pour les fissions que sur les neutrons rapides, ce qui exclut l'emploi de tout modérateur, et que sur les neutrons « immédiats », émis lors même de la fission, et non sur les neutrons « retardés » qui jouent au contraire un rôle important dans le fonctionnement des piles.

FISSIONS PAR NEUTRONS RAPIDES

Au cours de ces dernières années, de nombreux travaux de laboratoire ont porté sur les fissions obtenues à l'aide de particules rapides. A l'aide du grand synchro-cyclotron de Berkeley, on est parvenu à provoquer la fission de noyaux de bismuth, de plomb, d'or et d'autres éléments. L'étude des fragments de fission a montré une répartition anormale du nombre des neutrons entre les noyaux résultants. Lorsqu'un noyau d'uranium 235 subit la fission sous l'action d'un neutron lent, les deux fragments inégaux, instables, présentent des neutrons en excès d'une manière sensiblement proportionnelle à leur masse,

comme si les nucléons avaient eu le temps de se répartir de la même manière entre les fragments avant que le noyau éclate. On a remarqué au contraire, dans le cas de la fission du bismuth sous l'action de particules rapides, que les neutrons sont répartis très inégalement entre les fragments, comme si le noyau avait été coupé brutalement avec un couteau avant que les nucléons aient pu se répartir également. La fission par les particules rapides doit donc être plus rapide que par les particules lentes. De plus, tous les neutrons qui assureront la réaction en chaîne sont émis pratiquement lors même de l'éclatement du noyau. Il n'y aurait pas de neutrons « retardés ». Tous ces phénomènes favorisent le fonctionnement de la bombe.

LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES DANS L'EXPLOSION

Le problème de la bombe et l'étude des réactions nucléaires qui peuvent se produire lors de son explosion ont fait l'objet de nombreuses recherches théoriques qui n'ont pas été divulguées. Contrairement à ce qu'on pourrait supposer, les physiciens connaissent mieux ces réactions que celles d'apparence plus simple qui ont lieu dans les explosifs chimiques.

En effet, l'explosion d'une bombe atomique produit des températures extrêmement élevées, de l'ordre de plusieurs millions de degrés. A ces températures, les atomes de tous les éléments sont complètement ionisés, décomposés en noyaux et électrons libres. On a donc affaire à des entités relativement simples, et leur comportement peut être étudié par le calcul beaucoup plus facilement que celui des molécules complexes de la chimie.

La situation du physicien nucléaire est semblable à celle de l'astrophysicien, qui est mieux renseigné sur les propriétés de la matière dans les régions centrales du soleil ou des étoiles que sur celles des matériaux formant le noyau central de la Terre. C'est que celui-ci n'est qu'à quelques milliers de degrés, et que la matière s'y trouve à l'état moléculaire, alors que dans l'intérieur des étoiles, les atomes sont décomposés en noyaux et électrons libres.

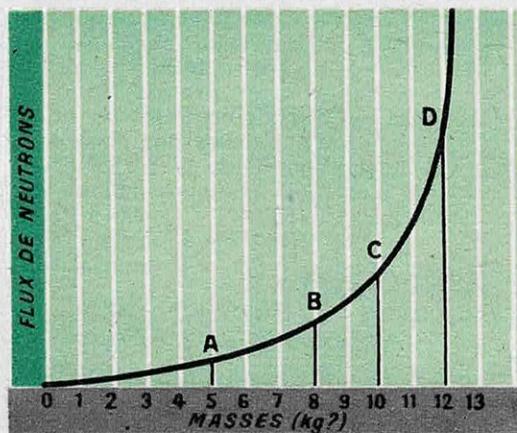
La température dans la bombe en explosion est du même ordre que celle de l'intérieur des étoiles et les physiciens peuvent utiliser les mêmes méthodes mathématiques pour interpréter les phénomènes.

EXPÉRIENCE DANGEREUSE : LA « QUEUE DU DRAGON »

Tout ne peut cependant être traité par le calcul, et l'expérimentation demeure indispensable quand il s'agit de passer aux réalisations pratiques. Elle seule, en particulier, permet de déterminer avec précision quelle masse de matière fissible il faut rassembler pour qu'une réaction en chaîne rapide s'y établisse. Cette « masse critique » dépend d'un grand nombre de facteurs : nature de l'« explosif » nucléaire, forme géométrique, matériaux entourant la bombe, etc. On opère en assemblant progressivement les matériaux et en mesurant à chaque addition le flux de neutrons en un point donné. Ce flux croît d'abord lentement puis de plus en plus rapidement. On arrête naturellement le montage avant d'atteindre la masse critique que l'on détermine par extrapolation.

En 1944, au laboratoire de Los Alamos, dans le Nouveau Mexique, un tel montage presque critique a été réalisé. On l'appelait le « dragon ». On opérait de la manière suivante : un bloc d'uranium enrichi était projeté à grande vitesse à travers un trou pratiqué dans un autre bloc d'uranium enrichi plus volumineux. Pendant le très court instant où les deux pièces étaient en présence, la quantité de matière fissible approchait de la masse critique au point que les neutrons rapides suffisaient presque à eux seuls à entretenir une réaction en chaîne. Cette expérience, que ceux qui la pratiquaient appelaient pittoresquement « taquiner la queue du dragon », était très dangereuse, car on s'exposait à provoquer une petite explosion nucléaire.

A cette époque, l'Amérique étant en guerre, on pouvait, vu l'urgence des recherches, accepter de tels risques. Actuellement les expériences de cet ordre sont faites en prenant toutes les précautions. Les montages sont effectués par des servo-moteurs commandés à distance et des dispositifs automatiques sont prévus pour démonter rapidement les assemblages de matière fissible lorsque la réaction



s'établit trop vite. Le personnel est maintenu à 350 m au moins du laboratoire et les observations sont faites d'une manière continue par télévision.

Aucune indication officielle n'a précisé la valeur de la masse critique. Les précisions théoriques pour l'uranium 235 la situaient entre 1 kg et 100 kg. On a toute raison de supposer qu'elle est en fait d'une douzaine de kilogrammes.

RÉALISATION DE LA BOMBE

On est aussi réduit aux hypothèses en ce qui concerne la réalisation pratique de la bombe. On peut imaginer au moins deux manières de résoudre le problème.

La première serait de diviser la masse critique en deux parties. Pour chacune d'elles, le rapport du volume à la surface serait tel que les neutrons pourraient s'échapper par la surface plus rapidement qu'ils ne sont engendrés dans la masse. Aucune réaction en chaîne ne pourrait ainsi s'y maintenir. En assemblant brusquement les deux fragments, on réaliserait un bloc unique de masse supérieure à la masse critique, où l'explosion serait instantanée.

La difficulté réside dans l'assemblage qui doit être assez rapide pour que la bombe ait pris sa forme la plus compacte au moment où commence l'explosion, sinon celle-ci manquerait d'efficacité.

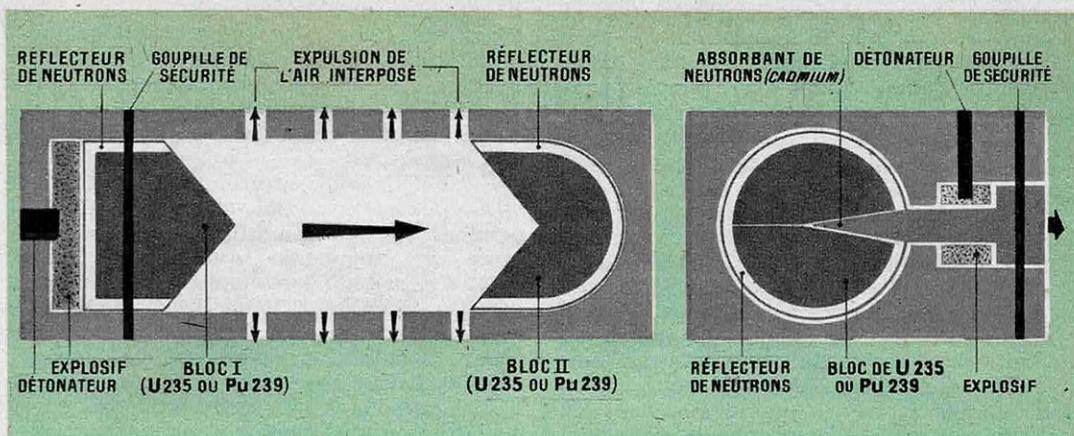
C'est cette difficulté qui exclut que l'on envisage la réunion brusque de plus de deux fragments, car il serait difficile d'assurer un synchronisme rigoureux dans l'assemblage de masses multiples.

Pratiquement, un des fragments subcritiques pourrait être projeté contre l'autre à grande vitesse par une espèce de canon installé dans la bombe.

Une autre solution pourrait être de constituer un bloc d'uranium 235 ou de plutonium 239 de masse supérieure à la masse critique, mais où un noyau d'un corps absorbant des neutrons empêcherait l'explosion. Un détonateur chassant brusquement ce noyau la déclencherait.

De toute façon, il faut prévoir une enveloppe dont la mission serait double : d'une part réfléchir une partie de neutrons qui tendent à s'échapper, d'autre part retarder la dilatation de la matière réagissante, ce qui rend l'explosion moins brève, plus énergétique et donc plus efficace. Ce réflecteur-retardateur agit surtout par son inertie, plutôt que par sa résistance mécanique. On choisira des matériaux lourds pour le constituer, du plomb ou même de l'uranium.

◀ La détermination de la masse critique pour une bombe atomique se fait en mesurant le flux de neutrons pour des masses croissantes et en extrapolant les résultats obtenus au-delà du dernier point de la courbe D.



● Modèles possibles de bombes atomiques : le premier comporte deux blocs qui viennent brusquement au contact pour constituer une masse supérieure à la

masse critique ; dans le second, l'expulsion d'un absorbant de neutrons permet à la masse critique réalisée au préalable de regagner ses propriétés explosives.

ALAMOGORDO : 16 JUILLET 1945

La première expérience atomique eut lieu dans le désert du Nouveau Mexique, sur une section abandonnée d'une base aérienne, à Alamogordo, à 200 km d'Albuquerque. C'était l'aboutissement d'une somme énorme de travaux théoriques et expérimentaux poursuivis, du point de vue particulier de la bombe, au laboratoire de Los Alamos sous la direction du Dr Oppenheimer. Malgré la collaboration des savants les plus éminents, un échec était encore à craindre, soit qu'aucune explosion n'ait lieu, soit au contraire que cette nouvelle arme se révèle incontrôlable.

L'assemblage de la bombe commença le 12 juillet, non sans quelques difficultés bien que l'ensemble des pièces eût été usiné avec la plus grande précision. Certaines pièces se dilatèrent, dilataées sans doute sous l'effet de l'énergie dégagée par les constituants radioactifs. Il y fut rapidement remédié, et le 14 juillet le dispositif fut élevé au sommet d'une tour d'acier.

Le point d'observation le plus proche était situé à environ 10 km, dans un abri bétonné, où étaient assemblés les dispositifs de commande. Les conditions météorologiques étaient particulièrement mauvaises et les dernières dispositions furent prises dans la nuit sous des pluies torrentielles, parmi les éclairs et le bruit du tonnerre qui contribuèrent à accroître la tension nerveuse des assistants. L'explosion, prévue pour 4 heures du matin, fut retardée jusqu'à 5 h 30 par suite du mauvais temps.

Les observateurs officiels, parmi lesquels se trouvaient le Général Groves, directeur du Manhattan Engineer District, le Dr Vannevar Bush, directeur de l'Office de Recherche Scientifique et le Dr Conant, président de l'Université de Harvard, se groupèrent à 17 km de la tour. Tous les assistants reçurent

l'ordre de s'étendre sur le sol face contre terre, et la tête dans la direction opposée à celle d'où viendrait l'explosion. Tous les points d'observation étaient reliés par radio à la chambre de commande.

A l'heure fixée, un éclair d'une intensité extraordinaire illumina toute la région. Une détonation effroyable et soutenue et une onde de choc qui renversa deux hommes à l'intérieur du centre de contrôle suivirent cet éclair. Immédiatement, un nuage multicolore issu de la tour s'éleva jusqu'à près de 13 000 mètres. Il semble qu'il y ait eu, peu après l'explosion principale, deux petites explosions supplémentaires dans le nuage, mais ce point n'a pu être précisé.

Les observateurs se dirigèrent alors rapidement vers le lieu de l'explosion pour évaluer la puissance de la nouvelle arme. La tour avait été presque entièrement volatilisée, seuls subsistaient quelques tronçons à sa base. Jusqu'à une certaine distance du pied de la tour, le sable avait été vitrifié.

Il est difficile de décrire l'émotion des assistants qui voyaient le succès couronner des efforts gigantesques. La bombe atomique était devenue une réalité et le Japon n'allait pas tarder à en éprouver les effets désastreux.

BOMBES ATOMIQUES SUR LE JAPON : 6 ET 9 AOUT 1945

Depuis plusieurs mois, alors même que l'on doutait que la réalisation de la bombe atomique fût possible, plusieurs équipages de bombardiers lourds, triés sur le volet, étaient à l'entraînement à Wendover Field, dans l'Utah, sous le commandement du colonel Paul W. Tibbets. Au début de 1945, le groupe fut transféré dans l'île de Tinian, dans le Pacifique où, à 3000 km des côtes japonaises, avait été aménagé un immense aéroport

à l'usage des « Superfortress » B-29. Le 6 août 1945, à 3 h 45 (heure locale) trois « Superfortress » prenaient le départ : objectif Hiroshima. L'une, l'**Enola Gay**, pilotée par le colonel Tibbets, emportait une bombe atomique. Les deux autres avaient pour mission, l'une de larguer divers instruments de mesure, l'autre de prendre des photographies. Les conditions météorologiques étaient parfaites et le voyage aller et retour fut sans histoire. La bombe fut lancée à 8 h 15 (heure locale) d'une altitude de 10 000 m et fit explosion après une chute de 60 secondes. C'est le président Truman lui-même qui révéla au monde l'existence de la nouvelle arme dans un communiqué radiodiffusé 16 heures plus tard, depuis le navire qui le ramenait aux Etats-Unis après la Conférence de Potsdam.

La deuxième bombe fut lancée trois jours plus tard, le 9 août, par une des « Superfortress » qui avaient pris part à la première expédition, le **Grand Artiste**, pilotée par le major Sweeney.

Les conditions météorologiques étaient beaucoup moins favorables, et le groupe de bombardiers, après avoir décollé de Tinian, fut dispersé par la tempête et les orages, de sorte que le **Grand Artiste** perdit du temps et consuma un carburant précieux à attendre ses coéquipiers au-dessus de l'île de Yakushima. Un seul parvint au rendez-vous, et c'est un groupe de deux avions qui se dirigea vers l'objectif n° 1, assigné par le commandement : Kokura. Des instructions très strictes prescrivaient le lancement par vision directe et non par radar. Or, bien que des appareils de reconnaissance eussent annoncé quelques heures plus tôt un ciel dégagé, l'objectif était couvert de nuages et plusieurs passages furent faits en vain sans que l'occasion se présentât d'effectuer le lancement dans les conditions fixées. Le carburant s'épuisait et les chasseurs japonais se faisant menaçants, les bombardiers américains abandonnèrent Kokura et se dirigèrent vers leur objectif n° 2 : Nagasaki, où la bombe « Fat Boy » (la première avait été baptisée « Little Boy ») fut larguée à 11 heures 01 (heure locale). Les bombardiers poursuivirent leur route et se posèrent de justesse sur l'aérodrome d'Okinawa d'où, après ravitaillement, ils regagnèrent l'île de Tinian quelques heures plus tard.

HIROSHIMA

La ville de Hiroshima est située par 34° de latitude nord et 133° de longitude est. Elle est bâtie sur le large delta du fleuve Otagawa qui se jette dans la mer Intérieure et dont les sept branches divisent la ville en six îles. L'agglomération est absolument plate et peu élevée au-dessus du niveau de la mer. Un ensemble de ponts — au nombre de 81 — relie les différentes îles. Au centre de la ville, il existait un certain nombre de buildings industriels en ciment armé appartenant aux

banques, assurances, grands magasins, journaux, etc., mais leur construction manquait d'uniformité. Certains seulement étaient construits pour résister aux tremblements de terre. Tous les autres bâtiments et maisons d'habitation étaient en matériaux légers, la plupart en bois.

Avant la guerre, Hiroshima était la septième ville japonaise et constituait le principal centre administratif et commercial du sud-ouest du pays. Sa population s'élevait à 345 000 habitants en 1940, mais une évacuation systématique, décidée en mars 1945 à la suite des raids incendiaires sur Tokio et sur d'autres cités japonaises, avait abaissé ce chiffre à 245 000. Il faut cependant y ajouter près de 75 000 personnes non recensées, soldats et main-d'œuvre de passage car de nouvelles usines avaient été construites pendant la guerre, disséminées dans la banlieue. Au total, 320 000 personnes étaient réparties sur une surface de 16 kilomètres carrés.

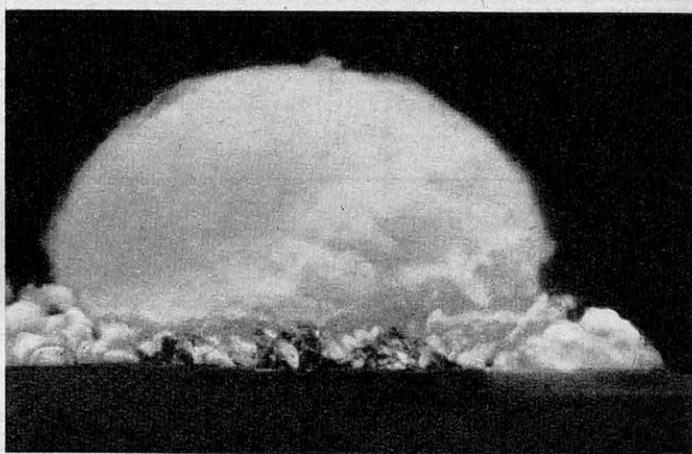
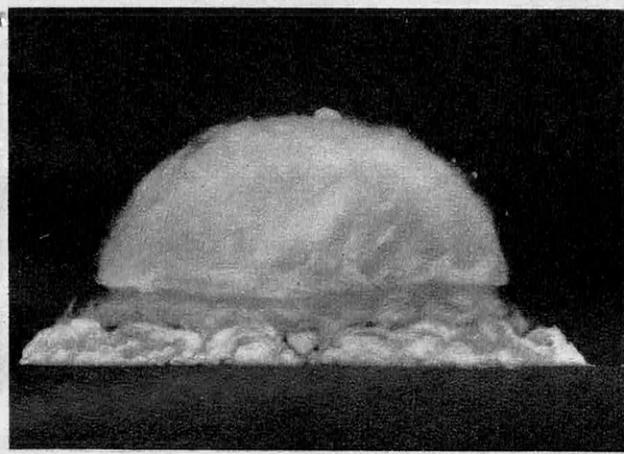
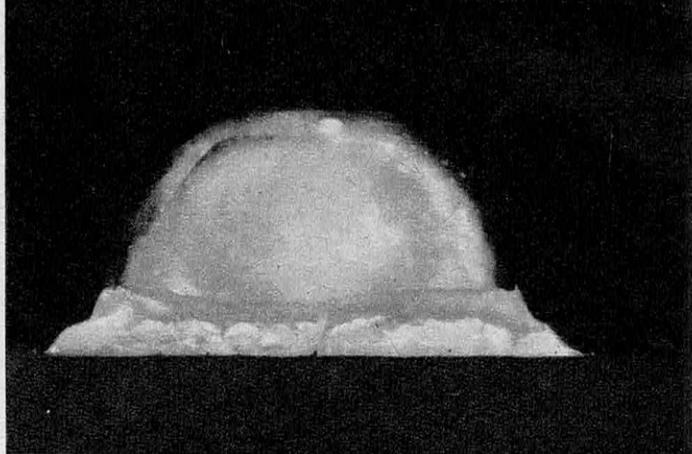
Du point de vue militaire, c'était un centre très important, quartier général de la 2^e Armée et d'une armée régionale, port d'embarquement pour les troupes et le ravitaillement.

NAGASAKI

Nagasaki, par 33° nord et 130° est, constitue le meilleur port naturel de la côte occidentale de l'île Kiou Siou. La ville s'étend sur plusieurs kilomètres le long de la côte étroite et des vallées qui s'ouvrent vers l'intérieur. Deux fleuves, séparés par un éperon montagneux, coulent dans les deux vallées principales : l'Urakami, dans le bassin duquel tomba la bombe atomique, et le Nakashima. Cet éperon montagneux de 350 m de hauteur et la construction irrégulière de la ville ont en fait réduit la zone de destruction. Les principaux quartiers résidentiels et commerciaux se trouvent répartis dans les deux bassins fluviaux. Les installations industrielles les plus importantes, usines d'armement et chantiers navals (trust Mitsubishi) sont situés sur la côte ouest de la baie et dans la vallée de l'Urakami. Bien que la ville s'étende officiellement sur 50 km² et atteigne assez loin l'arrière-pays, la zone de constructions solides était limitée à 6 km² environ. La population au 9 août 1945 s'élevait à 260 000 habitants.

L'EXPLOSION DE HIROSHIMA

Dans les deux cités, la surprise fut complète. A Hiroshima, à 8 h 15 du matin, la plus grande partie des ouvriers, des employés et les enfants des écoles étaient déjà au travail. Un peu avant l'attaque, les sirènes avaient annoncé la fin d'une alerte précédente. Les autorités n'avaient pas jugé nécessaire de sonner une nouvelle alerte pour le petit groupe de trois avions dont l'approche était signalée, et de ce fait il n'y avait pratiquement personne dans les abris. La bombe explosa au-dessus du centre de la ville; le terrain



● Ces quatre photographies de l'explosion de la première bombe atomique à Alamogordo, dans le Nouveau Mexique (16 juillet 1945), ont été prises à près de dix

kilomètres de distance par une caméra automatique. En un millième de seconde, le diamètre de la boule de feu à très haute température atteignit plus de 100 m.

étant plat, Hiroshima fut dévastée de façon uniforme. L'ensemble des quartiers où se trouvaient le plus de bâtiments fut soufflé. Des incendies se déclarèrent presque simultanément dans le centre et dans tous les quartiers avoisinants. Pendant les deux ou trois heures suivantes, un « vent de feu » souffla en tempête. Par suite de la symétrie de la ville, une zone à peu près circulaire de 7 km² fut presque totalement détruite par l'incendie.

Les pertes dans la population furent effroyables. On évalue le nombre des morts à 80 000 et celui des blessés à 40 000. Tous les groupements qui auraient paré aux conséquences du désastre furent totalement désorganisés. Sur 200 médecins présents à Hiroshima, 30 seulement purent remplir leur office. 1 654 infirmières sur 1 780 furent tuées ou blessées. On ne put utiliser que 3 hôpitaux civils sur 45. La destruction des canalisations entraîna l'arrêt de la distribution de l'eau bien que le réservoir en béton armé, à plus de 3 km du point de chute, n'eût pas été endommagé.

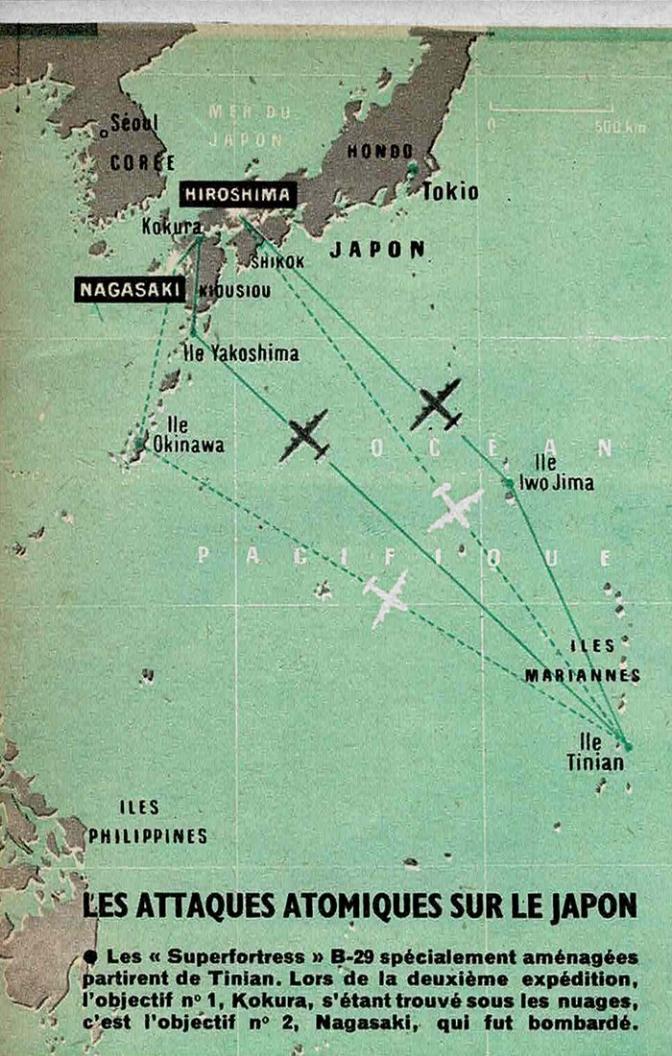
Les bureaux, gares et entrepôts des entreprises de transport et le matériel de chemin de fer subirent d'importants dommages. Le centre industriel de la ville fut entièrement détruit, mais il ne représentait que le quart du potentiel de production. Les entreprises

les plus importantes de la banlieue étaient intactes et leur main-d'œuvre indemne dans la proportion de 94 %. Les chiffres officiels japonais indiquent 62 000 bâtiments détruits sur un total de 90 000, soit 65 %.

En dépit de l'absence de mesures sanitaires, aucune épidémie ne se déclencha, ce que l'on a tenté d'expliquer par l'action désinfectante des très nombreux incendies.

L'EXPLOSION DE NAGASAKI

À Nagasaki, trois jours plus tard, bien que les journaux eussent fait quelques allusions au désastre de Hiroshima, aucune mesure spéciale n'avait été prise. La chaleur de l'été et la tension provoquée par les attaques aériennes continues (Nagasaki avait déjà reçu 270 tonnes de bombes explosives et 53 tonnes de bombes incendiaires) avaient entraîné un relâchement des précautions. Une alerte générale avait été donnée à 7 h 48 et une alerte de raid à 7 h 50. La cité restait en état d'alerte d'avertissement, mais lorsqu'on vit s'approcher de nouveau deux B-29, le signal de raid ne fut pas donné aussitôt, mais seulement quelques minutes après l'explosion. C'est pourquoi il ne se trouvait guère que 400 personnes dans les tunnels aménagés



● Les « Superfortress » B-29 spécialement aménagées partirent de Tinian. Lors de la deuxième expédition, l'objectif n° 1, Kokura, s'étant trouvé sous les nuages, c'est l'objectif n° 2, Nagasaki, qui fut bombardé.

aveuglant, que certains ont comparé à un énorme éclair de magnésium. Une grosse boule de feu apparaît, se dilatant rapidement et changeant de couleur, passant du pourpre à l'orangé à mesure qu'elle s'élance vers le haut. Un immense nuage couleur de neige s'élève de la terre pour suivre sa trace, formant une colonne géante qui dessine bientôt un gigantesque champignon culminant entre 10 000 et 12 000 m, tandis que le sol est obscurci par un brouillard bleuté, puis par un brouillard brun-rouge de poussière et de fumée.

Lors de l'explosion, la température au centre de la bombe atteint 20 millions de degrés au moins. Toutes les substances avoisinantes sont volatilisées. L'air ambiant, porté à une énorme pression, se dilate brusquement, engendrant une onde de choc possédant une très grande énergie et exerçant un effet de souffle destructeur à des distances considérables.

Une partie de l'énergie libérée est émise sous forme de rayonnements divers : infra-rouge, lumière visible, ultraviolet, rayons X, rayons encore plus pénétrants analogues aux rayons gamma des radioéléments, neutrons. Enfin, les radioéléments de fission émettent des rayons bêta (électrons) et les fragments de matière fissible non désintégrés des rayons alpha. Nous allons examiner plus en détail les différents effets dus à l'onde de choc, à la température et aux radiations, constatés à Hiroshima et à Nagasaki.

LE SOUFFLE DE LA BOMBE

Les effets de souffle dus aux explosions atomiques ont été semblables à ceux des bombes explosives, mais avec une intensité beaucoup plus grande.

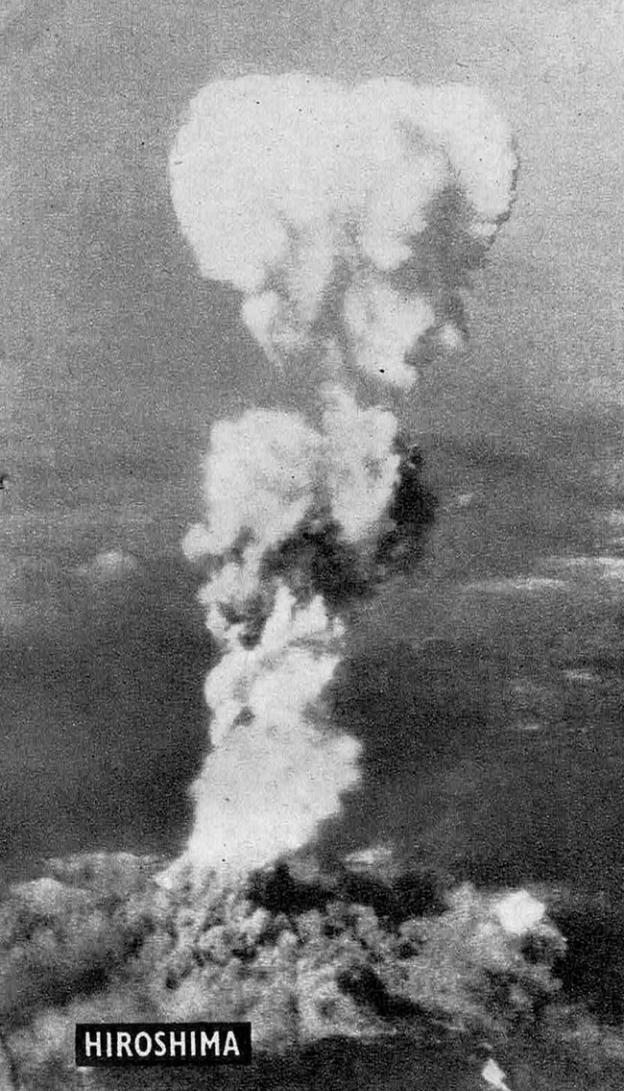
L'onde de choc, due à la brusque compression de l'air environnant le centre de l'explosion, se propage à grande vitesse dans toutes les directions. À son passage, chaque point de l'espace se trouve d'abord soumis, pendant un court instant, à une très forte pression. Puis la pression devient inférieure à la pression atmosphérique pendant un laps de temps trois fois plus long environ que celui pendant lequel elle lui était supérieure. La plupart des destructions ont eu lieu pendant la phase positive, mais dans certains cas la phase de dépression a pu jeter à la rue des fenêtres ou des cloisons enfoncées pendant la courte phase de surpression. Les dommages les plus grands ont été infligés aux murs ou aux toits qui faisaient face au souffle. Près du lieu de chute, du fait que les bombes éclatèrent avant d'atteindre le sol, le souffle s'exerça presque verticalement. On trouva ainsi de nombreux toits en « assiette » ; les poteaux télégraphiques et autres objets semblables restèrent intacts à l'aplomb de l'explosion alors qu'ils furent abattus jusqu'à des distances parfois très grandes lorsque le souffle les frappa par le travers ; de même, les troncs des

en abris où pouvait se réfugier 30 % de la population. Il n'y eut pas de tempête de feu. L'éperon rocheux que nous avons signalé limita les dommages à la vallée où la bombe fit explosion, de sorte que la zone de dévastation complète fut moins étendue qu'à Hiroshima : 3 kilomètres carrés environ. Les pertes de vies humaines furent moins considérables, bien qu'encore très élevées : 40 000 morts, avec un nombre de blessés d'environ 25 000. Le personnel médical et les installations sanitaires étaient très touchés (80 % des lits d'hôpitaux rendus indisponibles). Les services publics, gaz et eau, furent aussi désorganisés.

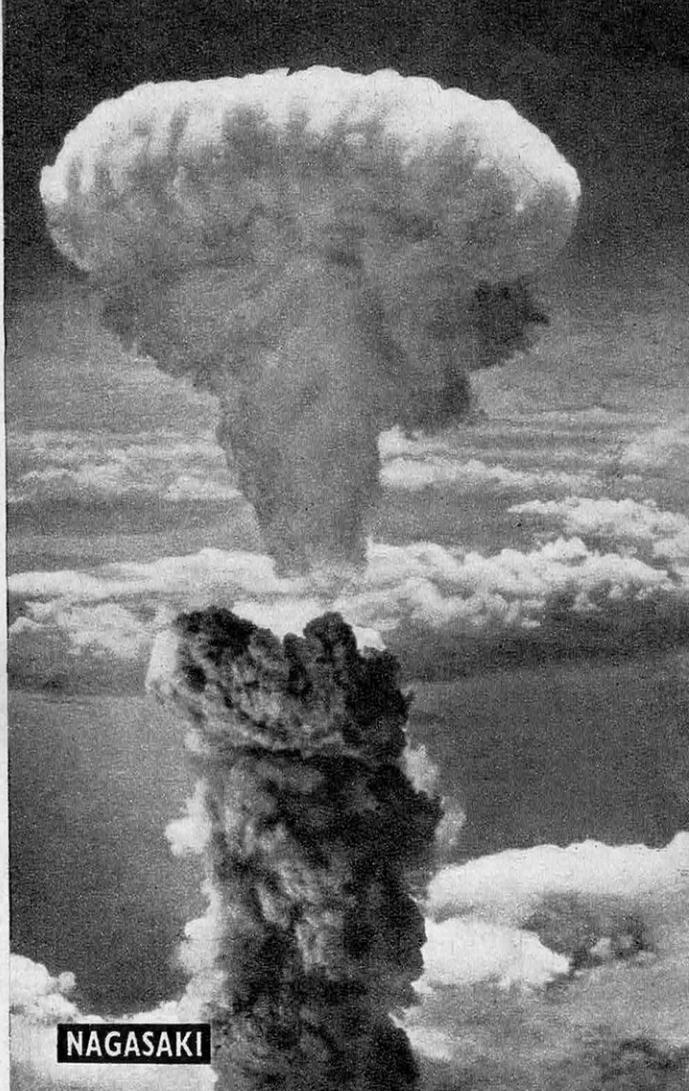
Bien que la zone de destruction ait été moins étendue qu'à Hiroshima, les dommages aux installations industrielles furent plus considérables.

L'EXPLOSION D'UNE BOMBE ATOMIQUE

Les spectateurs de l'expérience du Nouveau Mexique, les survivants de Hiroshima et de Nagasaki ont décrit de façon sensiblement identique l'explosion d'une bombe atomique. C'est tout d'abord un éclair intense, bleuté,



HIROSHIMA



NAGASAKI

arbres subsistèrent au voisinage de l'explosion, mais privés de leurs branches rabattues vers le sol.

Des effets de réflexion et de diffraction ont été observés. L'éperon rocheux qui séparait les deux vallées principales de Nagasaki protégea bien l'une d'elles, mais réfléchissant l'onde de choc sur l'autre augmenta les effets destructeurs sur les bâtiments qui s'y trouvaient, détruisant les murs du côté qui ne faisait pas face à l'explosion.

D'une manière générale, les bâtiments en béton armé semblent avoir bien résisté à partir de 600 m du centre de l'explosion, au moins extérieurement. Les cloisons intérieures se sont généralement abattues à cette distance. Il n'existait pas de gratte-ciel à Hiroshima ni à Nagasaki, et il est donc difficile de prévoir les effets d'une explosion atomique sur une ville comme New York, par exemple.

Les toits en béton de 25 cm d'épaisseur ont résisté au-dessous du centre de l'explosion. Ceux dont l'épaisseur était de l'ordre de 15 cm sont devenus concaves, et ceux plus minces se sont effondrés à l'intérieur des bâtiments, disloquant souvent les façades.

A Nagasaki, les structures métalliques des usines furent tordues par l'onde de choc, mais les incendies furent rares, et si les ateliers avaient pu être protégés contre les intempéries au lendemain de l'attaque, un fort pourcentage de machinerie aurait pu être sauvé.

La gravité des dommages diminue évidemment lorsqu'on s'éloigne du centre, elle dépend en grande partie de la nature des cloisons et des couvertures. Des cloisons constituées par un mélange de ciment et d'amiante, fragiles et ininflammables, se brisèrent sous le choc et ne transmirent à l'ossature métallique qu'une faible fraction de la pression. Par contre, la présence de cloisons métalliques résistantes augmenta la distorsion de la charpente.

On a évidemment constaté que les dégâts avaient été démesurément amplifiés par les incendies, notamment à Hiroshima où de nombreuses constructions étaient en bois. Celles-ci ont été écrasées jusqu'à près de 3 kilomètres du centre.

Si la bombe avait explosé sur une ville européenne, on aurait probablement observé :

1° la destruction totale de toutes les habitations dans un rayon de 1 km à partir du centre de l'explosion ;

2° la destruction irréparable jusqu'à 1 700 mètres ;

3° la destruction partielle jusqu'à 2 500 m ;

4° des immeubles endommagés jusqu'à 5 km.

Les abris rudimentaires construits par les communautés japonaises ou par les particuliers semblent avoir bien résisté à l'explosion. Ceux qui étaient au-dessous du centre s'effondrèrent ; à plus de 300 m déjà la plupart de ces abris restèrent intacts. Il est donc prouvé que les abris en béton ou les souterrains de métro, par exemple, résisteraient à une explosion atomique aérienne.

Les effets des explosions de Hiroshima et de Nagasaki sur les canalisations souterraines de gaz et d'eau furent négligeables, sauf lorsque ces canalisations traversaient un cours d'eau sur un pont qui fut déplacé par l'explosion.

Les réseaux électriques aériens furent détruits jusqu'à 1,5 km du centre. La grande dispersion du système électrique japonais permit un rétablissement rapide du courant dans les deux villes sinistrées, malgré les dommages qu'éprouvèrent plusieurs sous-stations.

Le système ferroviaire local n'eut pas beaucoup à souffrir, et trois jours après l'attaque, les trains arrivaient à Nagasaki en suivant une ligne située à 100 m seulement du centre de l'explosion.

Les postes d'essence furent tous détruits jusqu'à 2 km du centre.

Les ponts résistèrent passablement. Sur 49 ponts situés à moins de 3 km du centre de

l'explosion, à Hiroshima, un seul, en bois, et un autre en fer, mais en très mauvais état, furent détruits par l'explosion. Neuf autres ponts en bois furent la proie des flammes. Sept autres ponts endommagés furent emportés quelques semaines après l'attaque par deux crues importantes.

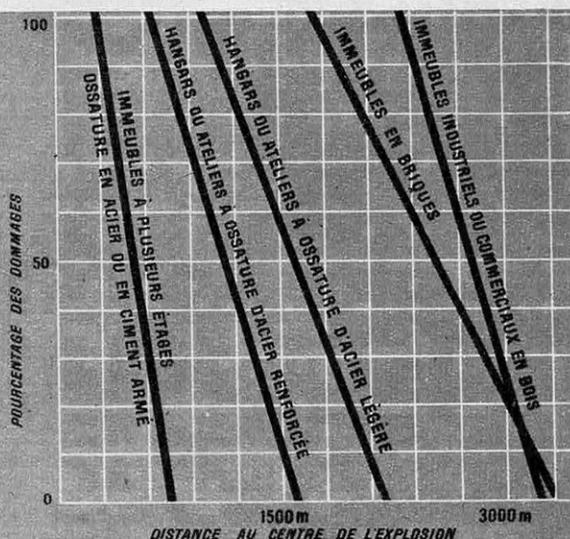
À Nagasaki, tous les ponts à l'intérieur d'un cercle de 800 m de rayon subirent des déplacements, sérieux pour les petits ouvrages. Ils furent dans certains cas imputables à l'onde réfléchiée sur le fond de la rivière et qui souleva le pont.

Les bombes de Hiroshima et de Nagasaki ayant fait explosion à plusieurs centaines de mètres d'altitude, l'effet direct du souffle sur les habitants ne fut pas très important. Par contre, l'effondrement des habitations et la projection de matériaux divers, surtout d'éclats de verre, causèrent de nombreux morts et blessés.

LA CHALEUR

Au centre de l'explosion se forme, comme nous l'avons dit, une boule de feu dont la température centrale atteint plusieurs millions de degrés. Pendant le très court instant que subsiste cette boule, la chaleur rayonnée est considérable ; le phénomène est si rapide que les corps qui reçoivent ce rayonnement n'ont pas le temps de la disperser par conduction : leur surface est portée d'un seul coup à une température très élevée sans que l'intérieur soit affecté. De ce fait, les effets observés furent parfois curieux.

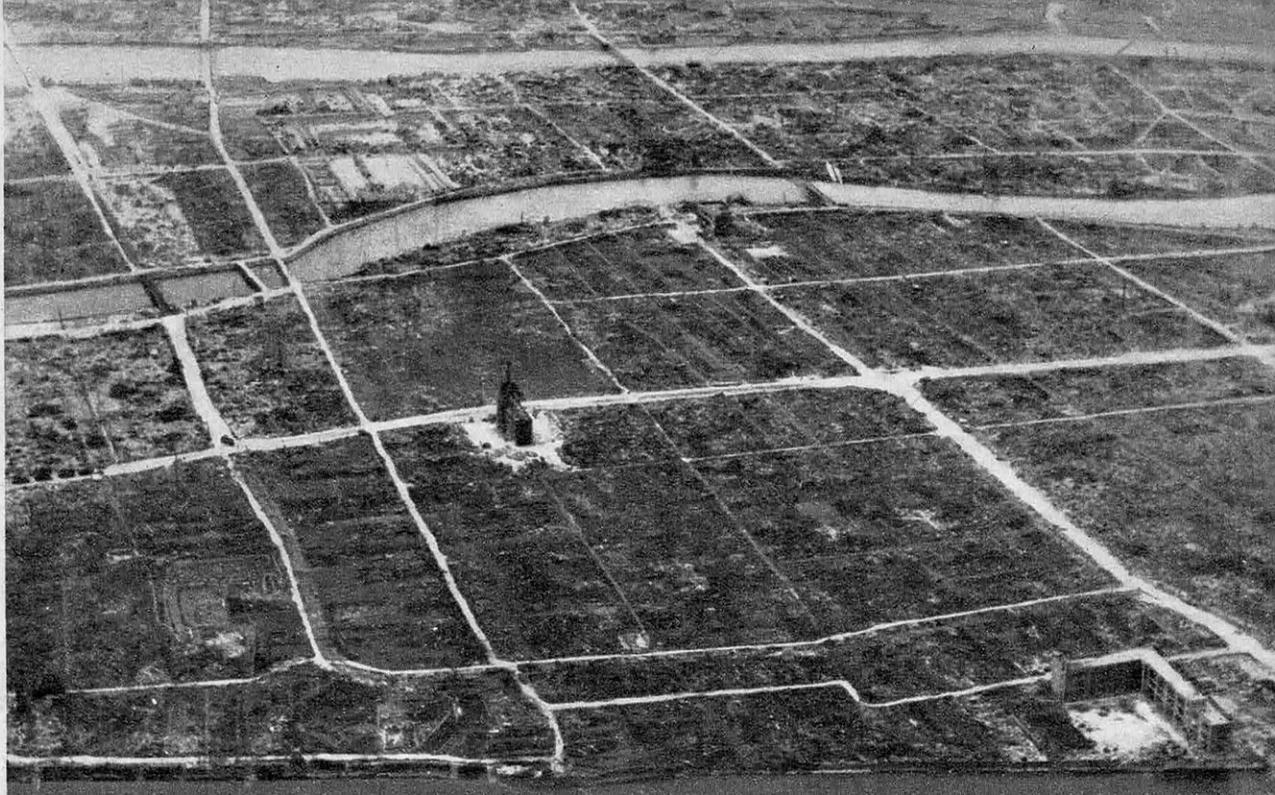
C'est ainsi que, jusqu'à 2 500 m du centre de l'explosion, les pierres en granit poli furent rendues rugueuses par la chaleur, excepté aux endroits protégés par un objet interposé qui a pu même être volatilisé. Cette rugosité est due aux différences entre les



Tenue des immeubles au Japon, dans les attaques atomiques, suivant leur distance au point de chute.



Ce qui restait du théâtre d'Hiroshima, parmi les ruines, quand les Américains occupèrent la ville.



VUE AÉRIENNE DE LA VILLE DE HIROSHIMA APRÈS L'EXPLOSION DE LA BOMBE ATOMIQUE.

coefficients de dilatation des divers cristaux de la pierre. Pour les composés cristallisés de la silice, cette rugosité est provoquée par des températures de l'ordre de 600°C .

L'asphalte des routes conserva l'empreinte des pieds des passants qui furent littéralement volatilisés et dont il ne restait plus aucune autre trace ! Le bois, suivant son exposition et la nature de la peinture protectrice, présenta différents degrés de brûlure. Les peintures noires des réservoirs à gaz furent très sensibles au rayonnement.

De la position des ombres portées par des objets interposés on a pu déterminer la position exacte du centre de l'explosion ou plutôt de la boule de feu. La netteté de ces ombres montre surtout que cette boule ne devait pas avoir de grandes dimensions. Le fait que certains objets inflammables, comme les feuilles d'un arbre, ont porté ombre, prouve en outre que le rayonnement de la boule de feu n'a pas duré assez longtemps pour que ces menus objets fussent volatilisés, sinon aucune ombre portée n'aurait été observée.



Restes d'un immeuble en béton armé à 200 m du centre de l'explosion qui se trouvait vers la droite.



Déformation typique d'une charpente métallique sous l'effet du souffle à 400 m du centre de l'explosion.

Par ailleurs, les survivants eurent le temps de fermer instinctivement les yeux avant que l'intensité maximum fût atteinte. Ceci est confirmé par le fait que parmi eux on n'observa pratiquement pas de cas d'éblouissements purulents ou larmoyants.

Parmi les manifestations curieuses, il faut citer celles observées à grande distance sur les tissus colorés. Ainsi, à plus de 1 600 m du centre, une blouse blanche résista à la chaleur, sauf en différents points colorés en rouge. La peau de la personne portant ce kimono présentait des brûlures aux emplacements correspondants du tissu brûlé, tandis qu'elle fut suffisamment protégée par le tissu blanc. Du papier imprimé a été endommagé seulement aux endroits portant des caractères noirs, ceci à une distance de 2 500 m.

Malheureusement il y eut des effets plus désastreux et en nombre considérable. Les êtres qui furent exposés, dans un rayon de 1 500 m, aux radiations gamma et aux neutrons émis par la bombe, s'ils ne furent pas victimes de l'onde thermique, moururent quelques minutes ou quelques heures après l'explosion. On observa des brûlures sérieuses dues aux radiations visibles et ultraviolettes sur des personnes exposées à plus de 2 500 m du centre et de légères brûlures sur celles se trouvant entre 2 500 et 4 500 m.

Au moment de l'explosion, à Hiroshima, un groupe de 580 ouvriers traversait un pont à 2 500 m du centre. Tous furent atteints de brûlures graves, mortelles dans 9 cas. Trois ouvriers protégés par un mur demeurèrent indemnes. A côté de ces « brûlures par l'éclair », quasi instantanées, on déplora à Hiroshima comme à Nagasaki, mais surtout dans la première des deux cités, de très nombreuses brûlures, la plupart mortelles, provoquées par les incendies. Ces derniers ont été allumés soit directement par le rayonnement, soit indirectement par la chute de matières inflammables sur des foyers domes-

tiques ou industriels, par des court-circuits, ou des ruptures de canalisations de gaz lors de l'effondrement des bâtiments.

Les corps très combustibles, comme la paille, le bois sec, le papier, furent enflammés par l'onde thermique dans un rayon de 1 500 m. Projetés ensuite par le souffle à des distances plus ou moins grandes, ils contribuèrent à propager l'incendie. Les personnes brûlées vives se comptèrent par milliers.

LES RADIATIONS

Le souffle et l'onde thermique sont des effets courants des explosions ; dans le cas d'une bombe atomique, il y a seulement une différence d'échelle, à vrai dire colossale. Par contre, les radiations pénétrantes sont des éléments entièrement nouveaux. On peut schématiser de la manière suivante les différents phénomènes :

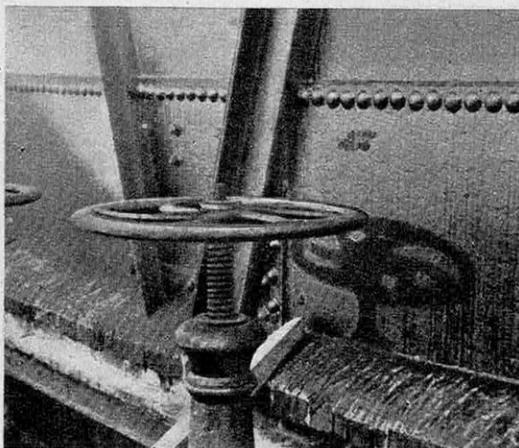
1° émission quasi-instantanée, lors de la fission, d'un flux énorme de neutrons et de rayons gamma très pénétrants ;

2° ces rayonnements, en particulier les neutrons, provoquent dans la plupart des substances qu'ils traversent la formation d'éléments radioactifs ;

3° les produits de la fission des noyaux d'uranium 235 et de plutonium 239 sont radioactifs et émettent avec des périodes diverses (de quelques secondes à quelques mois), des rayons gamma et des rayons bêta (électrons) ;

4° moins de un dixième de la masse de la bombe subit la fission avant que l'explosion éparpille le reste en fragments inférieurs à la masse critique, et par conséquent inoffensifs du point de vue de la réaction en chaîne explosive ; ces fragments sont radioactifs, particulièrement le plutonium qui émet des rayons alpha à une cadence beaucoup plus rapide que l'uranium 235.

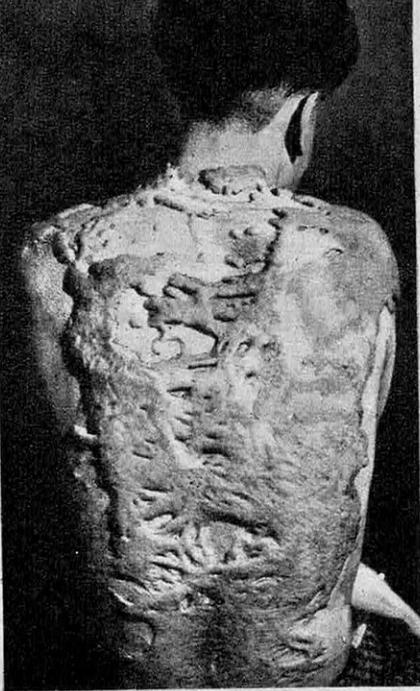
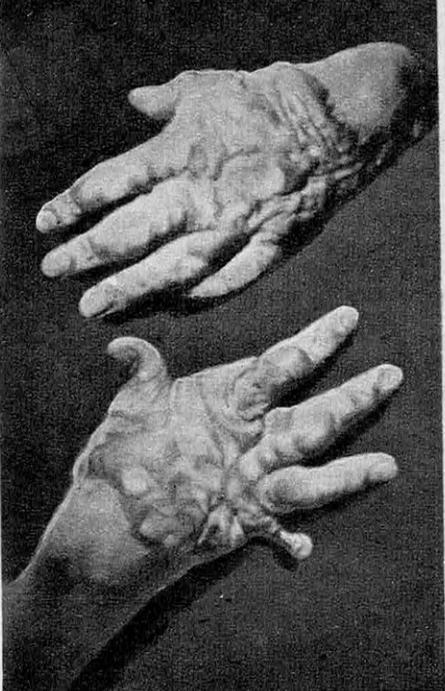
L'éparpillement des produits de fission et des matières fissibles non désintégrées est susceptible de contaminer des zones plus ou



● La peinture au bitume des tôles de réservoirs a été boursoufflée par l'onde thermique, sauf lorsqu'un objet projetait son « ombre », comme ici ce volant et son axe.



● C'est ici l'ombre de deux personnes volatilisées par l'éclair et celle des moules qui, à 200 m de l'explosion, ont protégé le granit rendu rugueux par ailleurs.



● Les deux premières photographies montrent des cicatrices de brûlures : à gauche, mains brûlées lors du bombardement incendiaire sur Tokio ; au centre,

brûlures du dos à 1 500 m de l'explosion de Nagasaki. A droite, un des effets attribués aux radiations gamma : épilation localisée à la partie exposée aux rayons.

moins éloignées du centre de l'explosion. En fait, on a bien repéré dans les deux villes japonaises des zones où la radioactivité était dix à vingt fois supérieure à la normale, mais bien inférieure à la dose de tolérance. C'est que, dans une explosion aérienne, tous les produits sont entraînés par le courant d'air ascendant et sont emportés ensuite par les vents à des distances parfois considérables. Ils ne peuvent produire d'action biologique notable, sauf lorsqu'une pluie les rabat vers le sol. C'est sans doute ce qui se produisit à Nagasaki où un échantillon de sol prélevé au-dessous du centre de l'explosion accusa une radioactivité 2 000 fois supérieure à la normale et qui décru d'ailleurs rapidement.

Les effets directs ou indirects des neutrons furent relativement peu importants. Le rayon d'action des neutrons est de l'ordre de 700 m. Les radioéléments qu'ils engendrent dans les tissus vivants qu'ils traversent sont peu abondants et pratiquement sans danger. On trouva bien dans les squelettes du radio-phosphore, mais en quantité négligeable. L'or de certains appareils dentaires était devenu très faiblement radioactif et son rayonnement était inoffensif. Il ne semble pas non plus que les radioactivités induites dans les matériaux des bâtiments, en particulier dans la silice et le fer, aient eu d'effet nocif ; leur intensité décroît d'ailleurs très rapidement.

L'action la plus importante est celle des rayons gamma pénétrants dont la portée est de l'ordre de 2 000 m. On peut considérer que tous les sujets non abrités se trouvant à moins de 1 000 m du centre de l'explosion reçurent une dose mortelle de rayonnement. Ils moururent pour la plupart rapidement de

brûlures ou d'autres blessures, mais de toute façon leur mort, pour être retardée de quelques jours, aurait été inévitable. Les personnes se trouvant dans les maisons éprouvèrent des atteintes moins sévères, mais cependant souvent très graves, les murs légers absorbant peu les rayons gamma. C'est ainsi qu'un rapport anglais mentionne le cas de 23 personnes se trouvant lors de l'explosion dans un immeuble en ciment armé à 250 m du centre de l'explosion, immeuble qui résista mécaniquement. Entre le 6^e et 17^e jour qui suivirent, 21 personnes moururent. Les deux survivants avaient été atteints moins gravement, leur travail les ayant retenus au rez-de-chaussée de l'immeuble au moment de l'explosion.

Entre 1 000 et 1 250 m, la mort eut lieu en moyenne une fois sur deux, au bout de quelques semaines. Au delà de 1 250 m, les accidents mortels furent plus rares.

Les différences constatées dans l'évolution des lésions s'expliquent par le fait que les tissus vivants sont d'autant plus sensibles aux radiations que leur activité reproductrice est plus grande. Ainsi les tissus nerveux et musculaires sont relativement radiorésistants, car ils ne se multiplient pas, tandis que la moelle osseuse où s'élaborent les globules rouges et blancs et les ovaires et testicules qui engendrent ovules et spermatozoïdes sont beaucoup plus radiosensibles.

Jusqu'à 1 000 m du centre de l'explosion, tous les tissus indistinctement étaient lésés. Les premiers symptômes apparurent dès le premier jour et la mort suivit sans rémission entre le 4^e et le 10^e jour.

Entre 1 000 et 1 250 m, seuls les tissus élaborant des cellules nouvelles étaient très gravement lésés. Les premiers symptômes

de nausées et de vomissements sont alors dûs à la destruction d'un certain nombre de cellules adultes : ils s'atténuent passagèrement, puis reprennent en se compliquant de diarrhée et d'hémorragies multiples, et la mort survient entre trois et six semaines si les cellules germinatives n'ont pu entre temps réparer leurs lésions. Les globules rouges du sang n'étant plus remplacés, l'anémie s'installe et la diminution du nombre et de l'activité des globules blancs laisse l'organisme sans défense contre tous les agents d'infection.

Au delà de 1 250 m, les symptômes généraux du début sont les mêmes, mais leur gravité est moindre. Les cellules germinatives réparent plus rapidement leurs lésions et, sauf accident, le malade pourra être considéré comme sauvé au bout de six à dix semaines.

Les observations ne sont pas encore suffisantes pour qu'il soit possible de se prononcer sur les effets à longue échéance de l'irradiation. On a pu constater que les lésions cutanées se traduisant par une épilation souvent complète se sont réparées en deux ou trois mois. Des lésions oculaires plus ou moins graves ont été observées chez quelques Japonais soumis aux rayonnements de la bombe. Ces lésions ont regressé au fur et à mesure que la formule sanguine redevenait normale. On a toutefois enregistré des troubles visuels sans troubles sanguins et il n'est pas rare de voir des travailleurs atomiciens présenter de telles lésions alors que leur formule sanguine est normale. Ces curieuses constatations biologiques ne sont pas encore expliquées et il est possible que d'autres lésions insoupçonnées se révèlent dans l'avenir. Quarante cas de cataracte ont pu être rapportés aux effets du rayonnement. Les troubles de la menstruation chez les femmes ne semblent pas avoir duré plus d'un an. Les femmes enceintes se trouvant à moins de 2 km du centre ont généralement avorté ; mais il faudra attendre peut-être plusieurs générations pour connaître les effets de l'irradiation des parents sur leur descendance future. Il a pu se produire un nombre relativement élevé de « mutations », mais comme celles-ci ont généralement un caractère récessif et qu'elles intéressent le plus souvent des caractères peu frappants, il sera très difficile de les mettre en évidence.

BIKINI

L'expérience d'Alamogordo avait démontré que la bombe atomique était une arme nouvelle d'une puissance extraordinaire. Les attaques de Hiroshima et de Nagasaki avaient prouvé son efficacité contre des villes à densité de population élevée. Il restait à la mettre en évidence contre du matériel de guerre, en particulier contre les différents types de navires de combat. Tel fut essentiellement le but des deux expériences de Bikini, qui eurent lieu en juillet 1946, sous le nom symbolique d'« Opération Crossroads » (« Opé-

ration Carrefour »), dirigée par l'amiral Blandy, de la section des armes spéciales de la Marine. Ce fut, de l'avis de tous les observateurs, un chef-d'œuvre d'organisation. 250 navires de toutes sortes et 42 000 hommes y prirent part. On n'eut à déplorer aucune perte de vie humaine, si l'on excepte la mort d'un ivrogne invétéré qui s'intoxiqua avec de l'alcool à brûler.

L'atoll de Bikini, dans les îles Marshall, à 6 000 km de San Francisco, est un récif corallien en fer à cheval, de 35 km de long et 18 km de large. Il encadre une lagune constituant une magnifique rade naturelle, profonde de 40 à 60 m. Les navires cibles de toutes catégories (87 au total), depuis les cuirassés jusqu'aux transports de troupe et aux navires de débarquement, avaient été ancrés en des emplacements soigneusement choisis pour que leurs avaries éventuelles fournissent le maximum de renseignements. Pour la première expérience, les sous-marins étaient en surface, et pour la deuxième en plongée. Des caméras automatiques avaient été installées au sommet de tours métalliques dressées sur le rivage de l'île pour filmer les phases des explosions. Sur tous les navires se trouvaient de nombreux appareils de mesure enregistreurs, ainsi qu'une multitude d'animaux répartis sur les ponts, les passerelles, dans les cabines, les chambres des machines et les tourelles d'artillerie. Pour la première explosion, on comptait 3 030 rats, 176 chèvres, 147 porcs, 109 souris, 57 cochons d'inde. Des canots automobiles sans pilotes mesurèrent la radioactivité de l'eau de la lagune avant que les équipes d'inspection et de sauvetage y pénétrassent ; des hélicoptères y effectuèrent des prélèvements. Des avions sans pilotes, venus de l'île de Kwajalein, à 300 km, Boeing B-17 « Fortress » et Gruman F-6 « Avenger », explorèrent le nuage radioactif ; ils étaient suivis chacun à 15 km par un avion guideur, les pilotes observant les tableaux de bord par télévision et réglant les évolutions par télécommande. Sur les navires était entassé du matériel de toute sorte : chars, avions, vêtements, vivres, munitions.

La première explosion, « Test Able », fut aérienne. La bombe fut lancée le 1^{er} juillet 1946, à 9 heures, par une Superforteresse B-29 « Dave's Dream ». Le but fixé était le cuirassé américain Nevada, dont la coque avait été peinte en vermillon et les tourelles en blanc pour qu'il fût bien visible. Par suite d'une erreur de visée, la bombe explosa à 600 m de là, entre le porte-avions américain **Independance** et le croiseur japonais **Sakawa**, à l'altitude prévue de 300 m. Elle donna lieu aux mêmes phénomènes que les trois explosions précédentes : éclair insoutenable, boule de feu, nuage en champignon grimpant rapidement à plus de 10 000 mètres et entraînant la plupart des produits radioactifs de fission.

Cinq navires furent coulés : deux transports et un torpilleur immédiatement, le croiseur

japonais **Sakawa** et un autre torpilleur 24 heures après. Un sous-marin fut gravement endommagé et le porte-avions **Independence** fut ravagé par les incendies. De nombreux autres navires eurent leurs mâts et leurs passerelles arrachés, leurs cheminées écrasées.

L'action d'une explosion atomique aérienne peut, d'après les constatations faites, se résumer ainsi :

— dans un rayon de 500 m autour du point de chute, tous les navires de guerre sont coulés ;

— dans un rayon de 1 000 m, tous sont gravement endommagés ;

— dans un rayon de 1 500 m, les dommages, parfois graves, sont limités aux superstructures.

Il ne s'agit là que des actions mécaniques sur le matériel ; celles des rayonnements sur le personnel seraient loin d'être négligeables. Les observations faites sur les animaux d'expérience n'ont pas été publiées. On cite seulement le cas d'une chèvre, placée dans une tourelle du cuirassé **Nevada**, que l'épaisseur du blindage ne protégea pas contre les rayons gamma et qui mourut quatre jours après l'explosion. En gros, la moitié des animaux périrent. Il est probable que si les navires faiblement endommagés avaient possédé leurs équipages normaux, ceux-ci n'auraient pas été mis immédiatement hors de combat (les munitions restaient indemnes), mais auraient péri dans un délai de quelques jours du fait de l'irradiation.

La deuxième expérience, « Test Baker », fut une explosion sous-marine à faible profondeur, c'est-à-dire dans des conditions entièrement nouvelles. Les rumeurs les plus fantaisistes et les plus alarmantes circulèrent avant l'opération, prédisant de gigantesques cataclysmes qui résulteraient de l'amorçage d'une réaction en chaîne dans les océans. Il n'en fut heureusement rien.

La bombe avait été logée dans un caisson en ciment



L'EXPLOSION AÉRIENNE DE BIKINI

accroché à une dizaine de mètres de profondeur sous un navire de débarquement, le LSM-60. L'explosion eut lieu à 8 h 35 le 25 juillet. Elle provoqua la brève apparition d'un dôme liquide lumineux qui disparut sous une nuée légère. Celle-ci se dissipa rapidement, révélant une énorme colonne d'eau de 700 m de diamètre, qui s'éleva à plus de 1 500 m de haut, surmontée d'un champignon de vapeur, et retomba en cataracte sur les navires avoisinants. A sa base prit naissance une énorme vague turbulente, en forme d'anneau, de plus de 300 m de hauteur. Elle progressa en s'élargissant à partir du centre, tandis que sa hauteur décroissait. A 400 m elle dépassait encore 30 m de haut.

Neuf navires furent coulés ; le cuirassé américain **Arkansas** (26 000 t), pris dans la colonne d'eau, disparut ; les photographies montrèrent une tache noire sur cette colonne, due probablement au mazout échappé de la coque éclatée. Trois bâtiments plus petits et trois sous-marins coulèrent immédiatement. Le porte-avions **Saratoga** (33 000 t), à 600 m du centre de l'explosion, coula 8 heures plus tard. Le cuirassé japonais **Nagato**, de 40 000 tonnes, sombra après cinq jours.

Il est probable que certains des navires endommagés auraient pu être maintenus à flot si les équipes de sauvetage avaient pu y monter. Mais la radioactivité l'interdisait.

En effet, contrairement à ce qui se passe dans une explosion aérienne où les produits de fission sont entraînés en presque totalité dans la très haute atmosphère, tous les corps radioactifs dangereux demeurent dans l'eau. De plus, l'énorme flux de neutrons émis lors de la fission est absorbé par le sodium, le chlore et les autres constituants de l'eau de mer pour former des isotopes radioactifs qui s'ajoutent aux produits de fission. Comme l'eau ruisselle sur les navires quand la vague géante les atteint, ils se trouvent gravement contaminés, souvent en des endroits difficilement accessibles : manches à air, prises d'eau des condenseurs, tuyauteries diverses, etc. Dans les premières heures qui suivent l'explosion, les produits de fission livrés par l'explosion équivalent au total, du point de vue radioactivité, à des centaines et peut être à des milliers de tonnes de radium. Leur activité décroît en général rapidement, mais il ne fut pas possible, à Bikini, d'approcher la zone centrale avant quatre jours. Sur certains navires, huit jours après l'explosion, il n'était pas prudent de demeurer plus de quelques minutes. Quelques navires, malgré le travail des équipes de décontamination (enlèvement des peintures à l'acide et au jet de sable), demeurent encore radioactifs.

En résumé, on peut dire qu'une explosion sous-marine coule tous les navires dans un rayon de 1 000 m et les endommage gravement dans un rayon de 1 500 m. Jusqu'à 4 km environ, la radioactivité, par son action lente, menace gravement les équipages.



DISPOSITION DES NAVI 1^{er} JUILLET 1946 A

Dans un rayon de 800 m :

1. NEVADA	29 000 t	cuirassé
2. INDEPENDENCE	10 000 t	porte-avions
3. NAGATO	32 720 t	cuirassé
4. SKATE	1 825 t	sous-marin
5. SAKAWA	6 000 t	croiseur
6. GILLIAM	7 050 t	croiseur
7. CARLYLE	6 000 t	croiseur
8. ANDERSON	1 570 t	torpilleur
9. PENSACOLA	9 100 t	croiseur
10. LAMSON	1 480 t	contre-torpilleur

Dans un rayon de 1 600 m :

11. ARKANSAS	26 100 t	cuirassé
12. NEW-YORK	27 000 t	cuirassé
13. SALT LAKE CITY	9 100 t	croiseur

Dans un rayon de 2 600 m :

14. PRINZ EUGEN	10 000 t	croiseur
15. PENNSYLVANIA	33 100 t	cuirassé
16. SARATOGA	33 000 t	porte-avions

ENIWETOK

La bombe de Hiroshima était à base d'uranium 235 ; celle d'Alomogordo aussi, très probablement, bien que, d'après certaines informations elle ait pu être à base de plutonium 239 ; celles de Nagasaki et de Bikini étaient sûrement à base de plutonium 239. Aucune information n'a été publiée sur la nature des explosifs qui furent expérimentés dans le plus grand secret sur l'atoll d'Eniwetok, récif désert qui se trouve, comme celui de Bikini, dans les îles Marshall. C'est là que l'Atomic Energy Commission des Etats-Unis a installé son terrain d'essais des armes atomiques. Il semble que toute une série d'essais aient eu lieu à partir du printemps de 1948 et qu'en particulier trois nouveaux types de bombes aient été essayés. Il s'agissait très vraisemblablement de bombes utilisant les explosifs nucléaires classiques, uranium 235 et plutonium 239, mais perfectionnées pour en augmenter le rendement, c'est-à-dire la proportion de matière fissible désintégrée

● Dans le tableau ci-dessous, les numéros indiquent la position des navires d'après le croquis de droite. On voit sur la carte de gauche que l'avion qui portait la bombe décolla de l'île de Kwajalein ainsi que certains avions de la marine. Les avions sans pilote, dirigés à distance par radio, s'envolèrent de l'île d'E niwetok pour explorer le nuage radioactif résultant de l'explosion avant qu'il soit dispersé par les vents.

RES LE BIKINI

incendié
incendié
endommagé
endommagé
coulé
coulé
coulé
endommagé
coulé

endommagé
incendié
endommagé

peu touché
peu touché
incendié



lors de l'explosion. Il n'est cependant pas exclu que les essais préliminaires de bombes à hydrogène y aient déjà eu lieu.

LES SUPERBOMBES

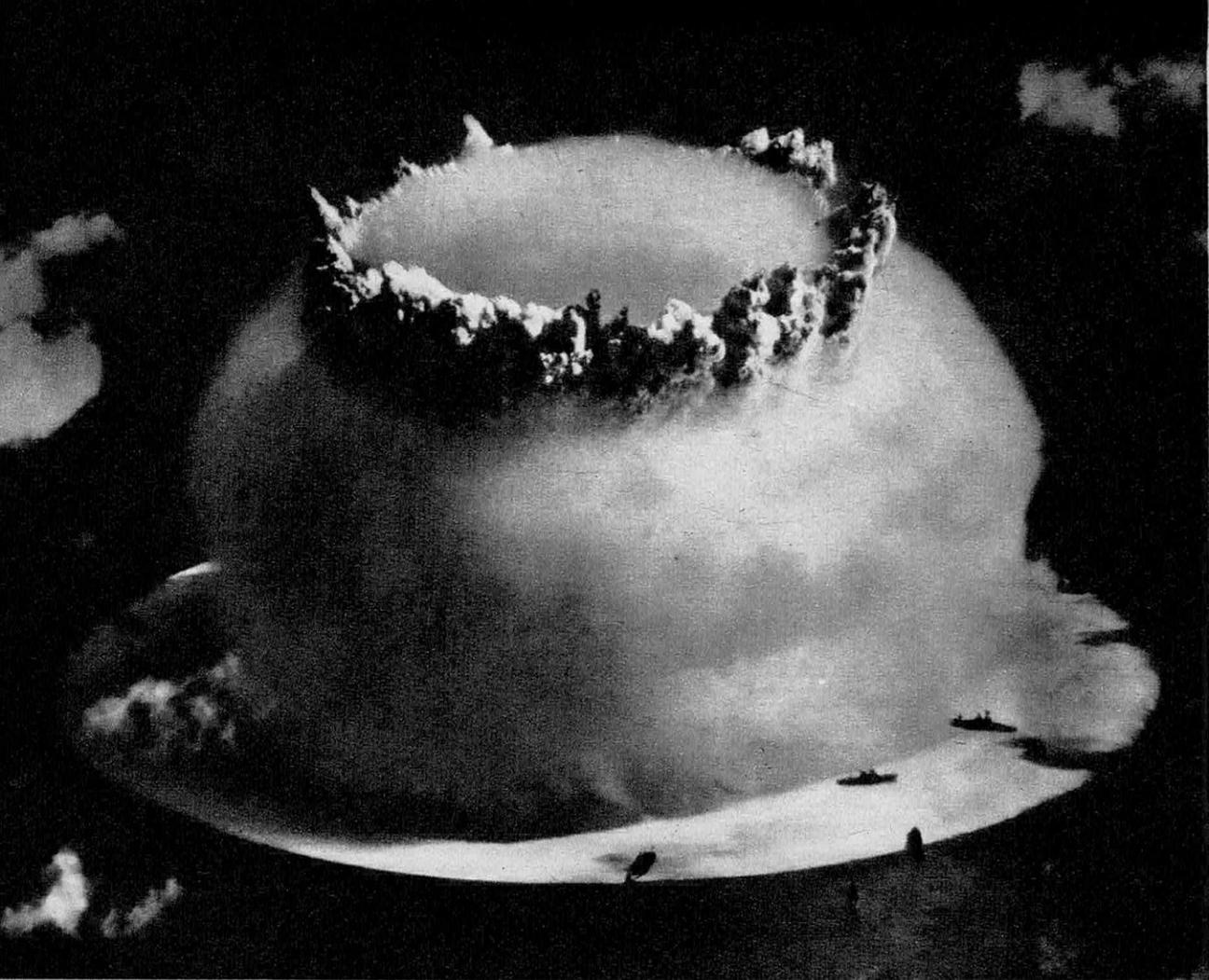
Le 31 janvier 1950, le Président Truman fit connaître officiellement qu'il avait ordonné à la Commission de l'Energie atomique « de poursuivre ses travaux sur toutes les formes d'armes atomiques, y compris la bombe dite à l'hydrogène ou superbombe ». Au début de l'été dernier, des informations de presse apprirent que la firme Dupont de Nemours avait été chargée, dans les mêmes conditions où elle avait déjà travaillé à la réalisation des piles atomiques américaines, c'est-à-dire avec la rémunération symbolique de 1 dollar, de construire les installations nucléaires permettant la fabrication en série des superbombes.

Bien que depuis plusieurs années il ait été fait allusion à des bombes dix fois et même mille fois plus puissantes que les bombes « A »,

on ne possède aucune indication officielle, même sommaire, sur le principe de cette arme nouvelle et la nature de son explosif. Comme nous allons le voir, cependant, des considérations simples permettent, non de les préciser avec certitude, mais au moins de les déterminer avec une probabilité satisfaisante.

Remarquons tout d'abord qu'aucun perfectionnement de la « bombe A » ne peut accroître notablement sa puissance. Cela tient à son principe même.

Avec de l'uranium ou du plutonium, l'explosion se produit en un temps très court, de l'ordre du millionième de seconde, dès que la « masse critique » est atteinte. Il faut donc constituer la bombe au moment précis où on s'en sert, c'est-à-dire assembler très rapidement un bloc de matière fissible dépassant cette masse critique. La difficulté réside dans l'inertie des matériaux. Il est probable que l'assemblage est réalisé, comme on l'a dit plus haut, en projetant l'un contre l'autre, à



PREMIERE PHASE de l'explosion atomique sous-marine de Bikini, du 25 juillet 1946. Cette vue a été prise par un avion sans pilote et montre l'immense

dôme de vapeur d'eau qui englobera les navires les plus rapprochés avant de se dissiper. On jugera de ses dimensions d'après celles des navires visibles.

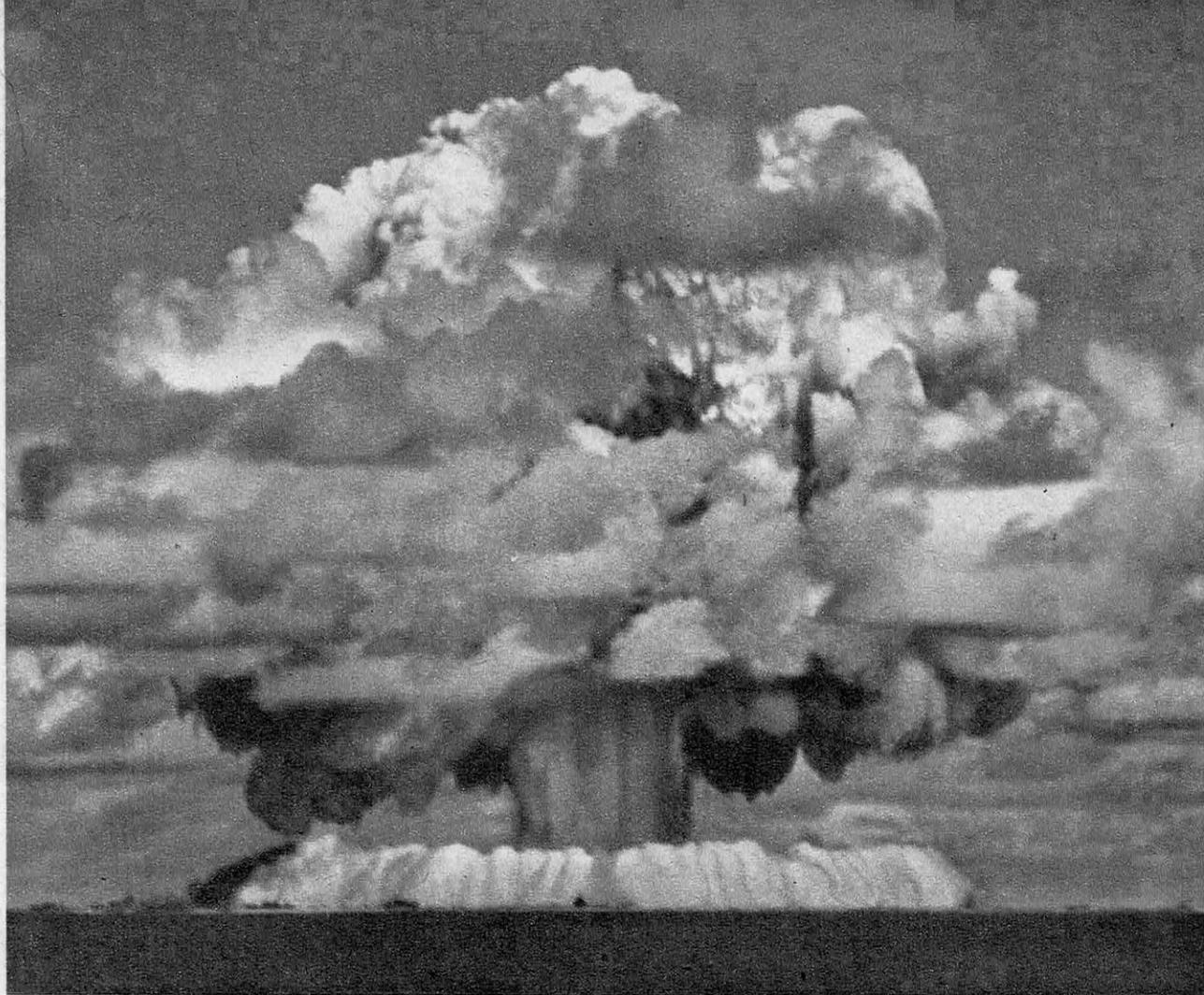
grande vitesse, au moyen d'une charge d'explosif, par exemple, deux blocs métalliques dont chacun doit évidemment avoir une masse largement inférieure à la masse critique. Savants et ingénieurs ont dû développer beaucoup d'ingéniosité pour mettre au point un tel dispositif, relativement simple dans son principe. Si l'on voulait constituer un bloc dont la masse soit seulement deux ou trois fois plus grande que la masse critique, il faudrait assembler quatre ou six blocs avec un synchronisme rigoureux, absolument irréalisable puisqu'il faudrait l'obtenir à moins d'une fraction de milliardième de seconde près.

Nous allons voir comment l'on peut concevoir des superbombes dont la puissance, théoriquement illimitée, ne dépend que de la quantité d'« explosif » rassemblée à l'avance et que l'on fera réagir au moyen d'un détonateur approprié, détonateur qui ne sera autre d'ailleurs qu'une bombe atomique « classique ».

LA « FUSION » DES NOYAUX LÉGERS

Nous avons vu précédemment que l'origine de l'énergie libérée lors de la fission d'un noyau lourd, tel que celui de l'uranium 235 ou de plutonium 239, se trouve dans la perte de masse observée lorsqu'on passe d'un de ces éléments lourds aux produits de fission. C'est une application directe de la loi d'équivalence de la masse et de l'énergie formulée par Einstein. La masse perdue se retrouve sous forme d'énergie, et de même, inversement, toutes les fois qu'une réaction dégage de l'énergie, il y a perte de masse. La loi est absolument générale.

Les noyaux les plus lourds, comme ceux de l'uranium, libèrent de l'énergie lorsqu'ils subissent la fission, donnant des noyaux de poids moyens. Environ 0,1 % de la masse disparaît dans l'opération. Au contraire, les noyaux légers libèrent de l'énergie lorsqu'ils fusionnent pour donner des noyaux plus



DEUXIÈME PHASE de l'explosion sous-marine. A la base de l'énorme colonne d'eau de 700 m de diamètre, on voit se former une vague annulaire de 200 à

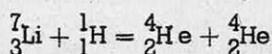
300 m de hauteur devant laquelle apparaissent quelques silhouettes de navires. Elle déferlera sur eux, les laissant fortement contaminés par sa radioactivité.

lourds. Mais la quantité d'énergie n'est vraiment considérable, proportionnellement, que lorsqu'il s'agit des noyaux les plus légers. Ainsi, lorsque quatre noyaux d'hydrogène fusionnent pour former de l'hélium, 0,7 % de la masse est transformé en énergie. Si quatre noyaux d'hélium fusionnaient pour former un noyau d'oxygène, la masse diminuerait seulement de 0,1 %. La proportion serait encore moindre si l'on parvenait à réaliser la fusion de noyaux plus compliqués. Les éléments de poids moyen, tels que le fer, sont les plus stables : on ne peut en extraire de l'énergie, ni en les combinant pour donner des noyaux plus lourds, ni en les fissionnant en noyaux plus légers.

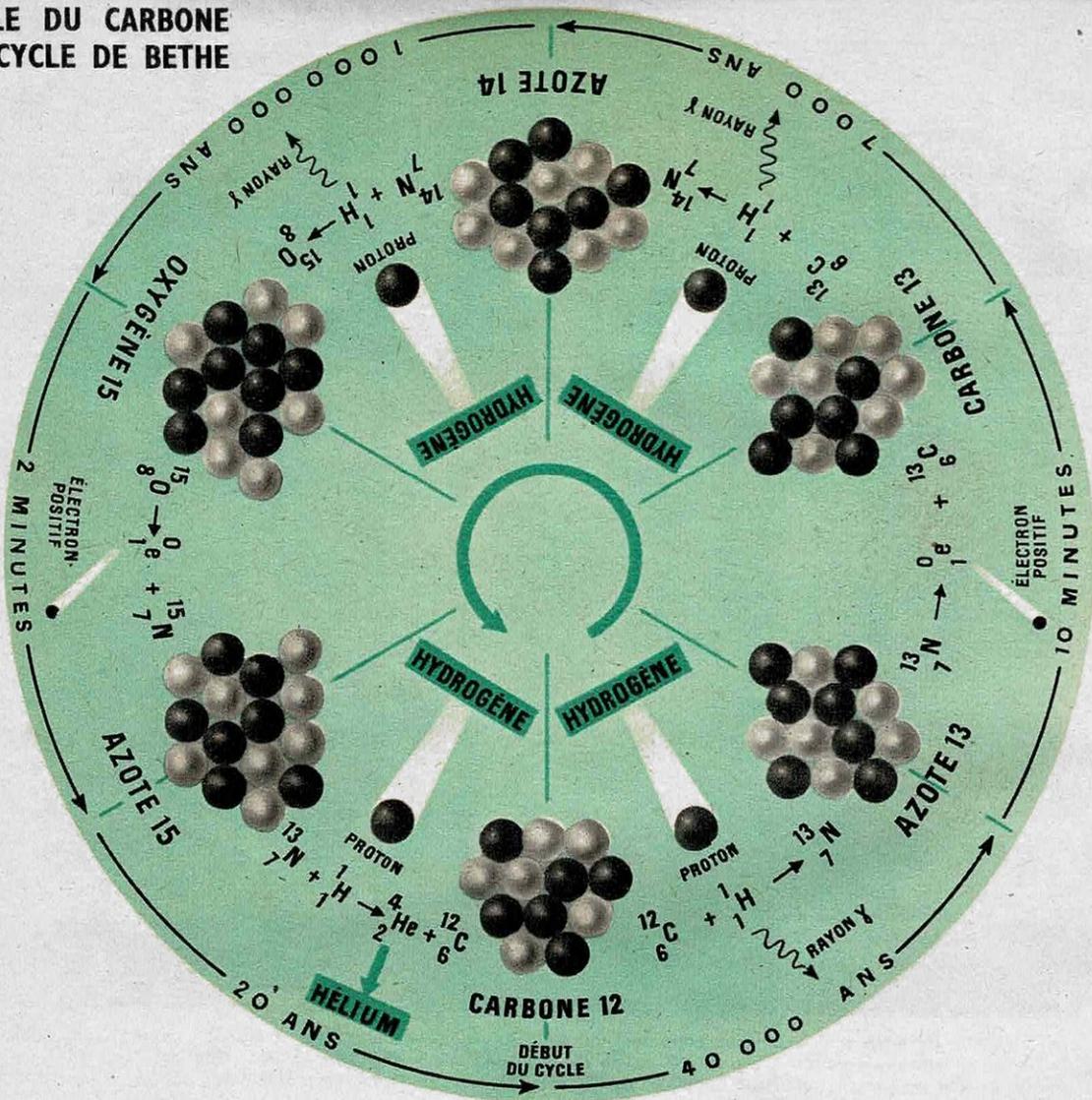
Les deux phénomènes exploitables pratiquement du point de vue énergétique, fission des noyaux lourds et fusion des noyaux légers se produisent dans des conditions fondamentalement différentes. La fission est due à la capture d'un neutron par le noyau ; or le neutron, ne portant pas de charge élec-

trique, n'est pas repoussé par le noyau ; même un neutron lent pourra être capturé. La fusion, au contraire, suppose que les deux noyaux sont parvenus au contact ; or, chargés tous deux positivement, ils se repoussent d'autant plus violemment que leur distance diminue et, pour qu'ils se rejoignent, il faut qu'ils aient été lancés l'un vers l'autre à très grande vitesse. C'est ce que l'on réalise couramment au laboratoire à l'aide des accélérateurs de particules.

Nous rappellerons seulement ici la réaction de désintégration du lithium par les protons, obtenue par Cockcroft et Walton en 1932, réaction historique puisque ce fut la première réalisée avec des particules artificiellement accélérées. Un noyau de lithium frappé par un proton donne deux noyaux d'hélium. Symboliquement, cette réaction nucléaire s'écrit :



CYCLE DU CARBONE OU CYCLE DE BETHE



● Un atome de carbone fixe successivement trois protons en se transformant finalement en un isotope de l'azote de masse 15 qui fixe un quatrième proton

tout en redonnant le carbone initial. Au total, les quatre protons ont fusionné en un noyau d'hélium, en expulsant deux positons, le carbone ayant servi de catalyseur.

Si l'on fait avec précision le décompte des masses, on trouve dans le premier membre 7,01822 pour le lithium et 1,00812 pour l'hydrogène, soit au total 8,02634 ; dans le second membre, deux fois 4,00390 pour l'hélium, soit 8,00780. On met ainsi en évidence une différence de 0,01854 qui représente l'énergie libérée. Elle est considérable, puisque 7 g de lithium ainsi désintégrés libéreraient 400 000 kWh. En fait, il faut lancer plusieurs millions de projectiles pour obtenir une seule désintégration, de sorte que l'énergie que l'on peut recueillir est toujours bien inférieure à celle que l'on est obligé de dépenser.

Il en est de même pour toutes les réactions de fusion de noyaux provoquées par des méthodes de laboratoire. Leur faible rendement s'explique par le fait qu'un nombre relativement infime de projectiles est lancé à

travers un nombre énorme d'atomes au repos qui les ralentissent par des chocs multiples sur leurs électrons planétaires ; rares sont ceux qui ont la chance de rencontrer un noyau avant d'avoir gaspillé leur énergie. Les conditions seraient évidemment beaucoup plus favorables si tous les noyaux présents étaient animés de grandes vitesses, car les chocs mutuels ne provoqueraient alors aucun ralentissement. Accroître simultanément l'énergie cinétique de tous les atomes d'une masse de matière donnée, c'est en fait augmenter sa température, et nous voyons ainsi que les réactions de fusion des noyaux légers susceptibles de livrer de l'énergie exploitable sont celles qui se produisent spontanément à haute température, celles que Hans Bethe appelle des réactions « thermonucléaires ».

Nous en trouvons des exemples au sein des

étoiles. La plus connue est celle qui, partant de quatre atomes d'hydrogène, aboutit à un atome d'hélium. C'est celle que, sous le nom de « cycle de Bethe », les astrophysiciens admettent pour expliquer la production d'énergie à l'intérieur des étoiles. La perte de masse est de 0,02858 unité de masse par atome d'hélium formé. A la température de 20 millions de degrés, que l'on admet généralement pour la région centrale des étoiles, l'énergie moyenne des atomes, due à leur agitation thermique, est de 1 700 électronvolts environ, valeur relativement modeste. Mais il s'agit seulement d'une moyenne ; certains noyaux possèdent des énergies bien plus grandes, et comme les collisions sont très fréquentes, les fusions d'atomes se produisent en nombre appréciable.

Sur le Soleil, 4 millions de tonnes sont transformées par seconde en rayonnement, mais en tenant compte de la masse énorme du Soleil, on a pu calculer qu'il faut un milliard d'années pour que 1 % de l'hydrogène présent soit transformé en hélium. La fusion suivant le cycle de Bethe est donc un phénomène très lent. Elle comporte en fait la fixation successive de quatre protons sur un noyau de carbone avec émission finale d'un noyau d'hélium ; l'opération, régie par le jeu des probabilités de rencontres, prend un temps appréciable que l'on a pu évaluer à plus d'un million d'années. Elle ne peut se poursuivre que parce que la température se maintient à 20 millions de degrés ; c'est la masse énorme du Soleil qui freine l'émission de l'énergie libérée dans sa région centrale et permet à la température de se stabiliser à sa valeur. Bethe a fait remarquer que, même sur la plus grosse des planètes du système solaire, Jupiter, aucune réaction thermonucléaire ne pourrait se maintenir. Sur la Terre, a fortiori, il n'y a aucun danger qu'une super-bombe à l'hydrogène amorce une telle réaction, ni dans l'atmosphère, ni dans les océans, ni dans la croûte terrestre. L'énergie serait rayonnée plus rapidement qu'elle ne serait libérée, la température au lieu de l'explosion s'abaisserait rapidement et la réaction s'arrêterait.

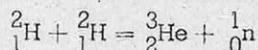
Il ne nous est donc pas possible de maintenir pendant un temps appréciable, sur la Terre, des températures de l'ordre des températures stellaires, et le cycle de Bethe, beaucoup trop lent, est inutilisable. Par contre, la bombe atomique nous permet de les réaliser pendant un temps très court, de l'ordre du millionième de seconde, et nous pourrions les utiliser si nous découvrons des réactions thermonucléaires suffisamment rapides.

Il est évident que les vitesses de réaction

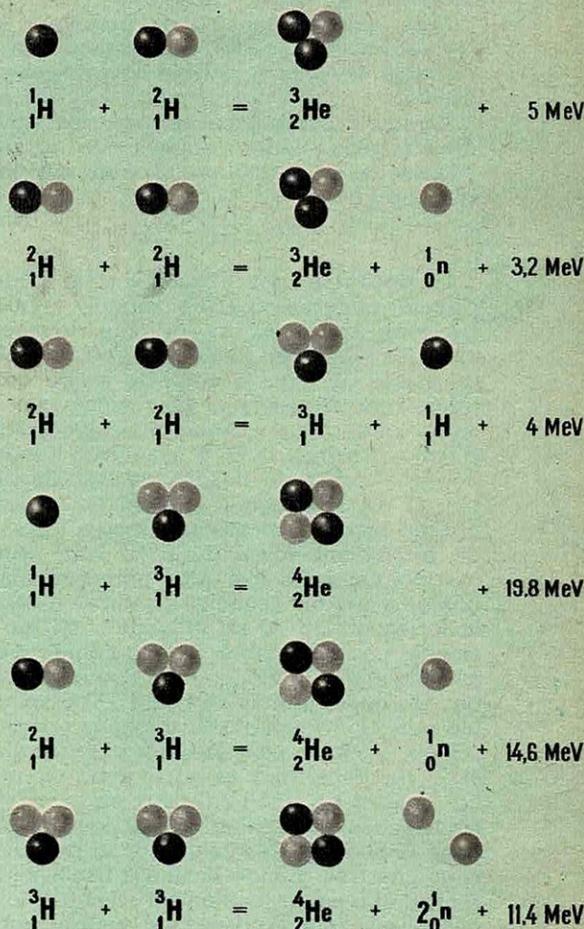
seront d'autant plus grandes que les forces à vaincre pour provoquer la fusion de deux noyaux seront moindres et par conséquent que nous ferons réagir des noyaux portant des charges moins élevées. Ce sont les noyaux des divers isotopes de l'hydrogène qui ont la charge minimum.

Le tableau ci-dessous indique les diverses réactions observées au laboratoire et qui combinent de toutes les manières possibles les trois isotopes de l'hydrogène : hydrogène léger, deutérium et tritium.

La fusion d'un noyau d'hydrogène léger et d'un noyau de deutérium, ou réaction proton-deuton n'est pas assez rapide pour être utilisable dans les conditions où on opère. Par contre, la fusion de deux noyaux de deutérium, ou réaction deuton-deuton, pourrait être utilisée : les deux noyaux se combinent pour donner un noyau d'hélium léger avec émission d'un neutron suivant l'équation :



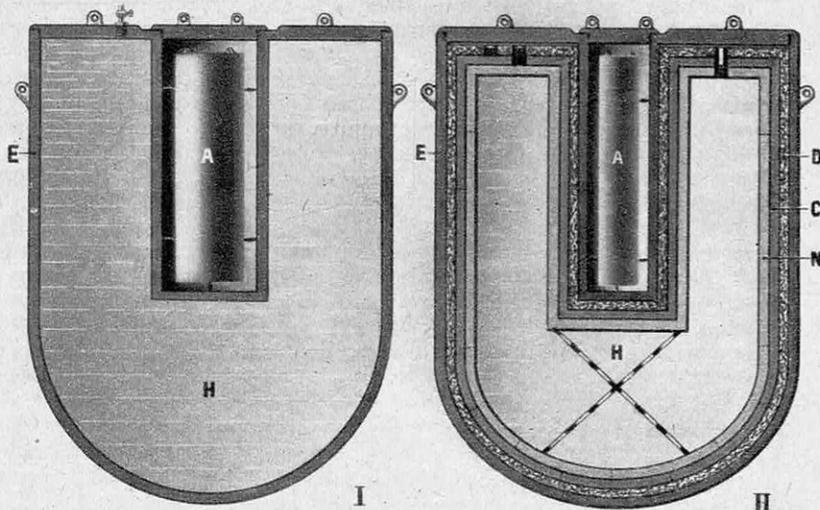
RÉACTIONS DES DIVERS HYDROGÈNES



Les réactions les plus intéressantes pour la constitution d'une superbombe semblent être celles où intervient le tritium, isotope le plus lourd de l'hydrogène. Elles se produisent toutes à très haute température.

En attendant que les modèles de bombes A et H soient exposés dans les grands magasins de New-York comme l'annonçait plaisamment la grande presse, nous donnons ici sans aucune prétention deux schémas I et II possibles de bombes H. En I, la bombe atomique A est entourée par un grand réservoir E plein d'hydrogène H₂ et H₂ comprimé. En II, le réservoir E est soigneusement calorifugé par un mélange solide D, une couche de neige carbonique dans l'enceinte C et une couche d'azote liquide en N. Ces différents produits servent à maintenir le plus longtemps possible à l'état liquide l'hydrogène lourd dans le réservoir central H.

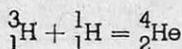
SCHÉMAS DE BOMBES A HYDROGÈNE



Chaque fusion livre une énergie de 3,2 millions d'électronvolts, et la réaction, pour se produire, exige une température d'au moins 800 000°.

Mais les réactions qui paraissent les plus favorables sont celles qui mettent en jeu l'isotope le plus lourd de l'hydrogène, le tritium.

Lorsqu'il est bombardé par des noyaux d'hydrogène léger animés de grandes vitesses, il se forme de l'hélium suivant la réaction :



Le décompte des masses donne, pour le premier membre : 3,01704 (tritium) + 1,00812 (proton), soit 4,02516 ; et pour le second membre : 4,00390 (hélium), d'où une perte de masse de 0,02126 unité de masse qui se transforme en énergie. On calcule sur ces bases que, pour chaque molécule-gramme d'hélium formée, soit 4 grammes, l'énergie dégagée serait de l'ordre de 500 000 kWh, ce qui est le dixième environ de l'énergie libérée par une bombe atomique à l'uranium de rendement voisin de 5 %. Pour obtenir une bombe mille fois plus puissante que la bombe atomique actuelle, il suffirait d'obtenir la formation de 40 kg d'hélium, ce qui ne semble pas impossible. Si l'on admet encore un rendement de 5 % pour ce nouvel explosif, on voit qu'il suffirait de 800 à 1 000 kg d'un mélange de tritium et d'hydrogène ordinaire.

Mais le tritium peut également se combiner avec du deutérium et aussi avec lui-même en donnant de l'hélium, avec émission d'un neutron dans le premier cas, de deux neutrons dans le second. Ces réactions se produisent avec une très grande facilité à haute température, et c'est probablement elles qui seront mises en œuvre dans les futures super-bombes.

Bien qu'il soit sans doute imprudent d'essayer d'imaginer le mécanisme d'une telle superbombe, voici comment on pourrait le concevoir.

Le tritium mélangé de deutérium serait liquéfié à basse température et introduit dans un récipient soigneusement calorifugé, entourant le point où deux blocs d'uranium ou de plutonium doivent se rencontrer (bombe atomique « A » classique). La température de plusieurs dizaines de millions de degrés atteinte lors de l'explosion des blocs parvenus au contact imprimerait aux noyaux de deutérium et de tritium des vitesses suffisantes pour qu'ils se pénètrent en dégageant de l'énergie.

La puissance d'une telle bombe, en admettant qu'elle puisse être réalisée pratiquement, dépendrait uniquement de la quantité d'hydrogène lourd et très lourd que l'on aurait préalablement rassemblée. Elle serait théoriquement illimitée.

Une dernière remarque doit être faite : alors qu'il est possible de contrôler les réactions de fission des atomes lourds pour des applications pacifiques, par exemple à des centrales nucléaires, on ne connaît actuellement aucun moyen pour utiliser les réactions de fusion autrement que dans des explosions.

Leurs applications seraient d'ordre exclusivement militaire ou à la rigueur de caractère géologique.

LE TRITIUM

Le tritium, isotope le plus lourd de l'hydrogène, n'existe pas dans la nature, ou du moins existe en proportion tellement faible dans l'eau qu'il doit être fabriqué en bombardant certains noyaux atomiques avec des particules convenables. Par exemple, on bombardera avec des deutons (noyaux d'hydrogène

De ces quatre réactions, réalisables au laboratoire. ➔ les plus faciles à mettre en œuvre pour des fabrications en grande quantité sont la première et surtout la troisième en utilisant les neutrons fournis par les piles.

lourd) du deutérium, du béryllium ou de l'azote 14 ; ou encore, avec des neutrons, du lithium, du bore, ou de l'azote 15. Mais ce ne sont là que des procédés de laboratoire dont le rendement est très mauvais.

La réaction la plus économique est le bombardement du deutérium (sous forme d'eau lourde) ou du lithium par des neutrons, opération qui peut s'effectuer très facilement dans une pile atomique. Il faut pourtant considérer que tout neutron d'une pile absorbé pour cette fabrication est perdu pour la production du plutonium. Donc la confection d'une superbombe non seulement nécessite une bombe atomique pour provoquer, par l'élévation de température, les réactions de fusion, mais empêche la fabrication de plusieurs bombes au plutonium.

Le tritium est radioactif, avec une période de l'ordre de 12 ans. On peut donc envisager sa fabrication à l'avance et son stockage.

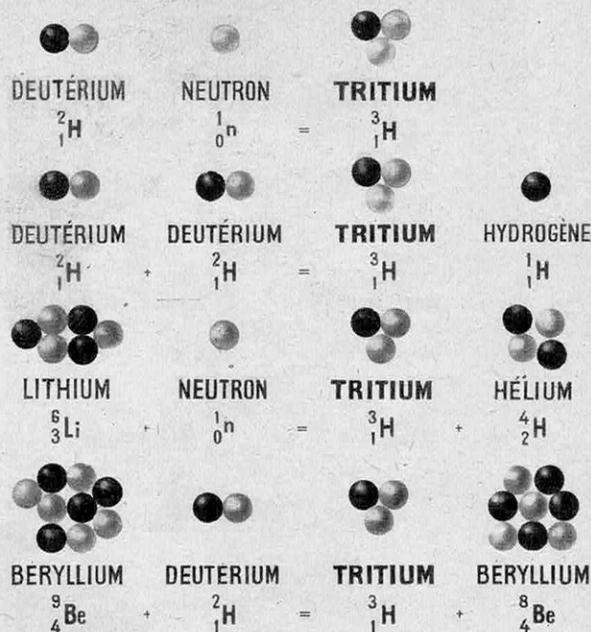
LES EFFETS DE LA SUPERBOMBE

Lorsque le Président Truman, en 1945, annonça l'explosion de la bombe atomique sur Hiroshima, il évalua sa puissance à celle de 20 000 tonnes de trinitrotoluène (TNT). La superbombe à hydrogène, d'après les déclarations du sénateur E. C. Johnson du 1^{er} novembre 1949, doit être 1 000 fois plus puissante. Elle équivaldrait ainsi à 20 millions de tonnes de TNT. Inutile de dire que l'extrapolation des effets connus des explosifs classiques à de pareilles masses serait absolument dénuée de sens. Nous nous contenterons de quelques considérations schématiques.

L'explosion d'une bombe atomique provoque des destructions quasi totales dans un rayon de 1 500 m. Celle d'une superbombe mille fois plus puissante aurait des effets destructifs analogues dans un rayon 10 fois plus grand (10 est la racine cubique de 1 000) soit 15 km. Une seule superbombe suffirait pour raser entièrement une ville comme Paris. L'onde de chaleur provoquerait des brûlures mortelles dans un rayon beaucoup plus étendu. Son intensité croît en effet plus rapidement que celle de l'onde de choc, comme la racine carrée de la puissance, au lieu de la racine cubique. Les brûlures s'étendraient ainsi 30 fois plus loin que sur les villes japonaises, soit jusqu'à près de 40 km.

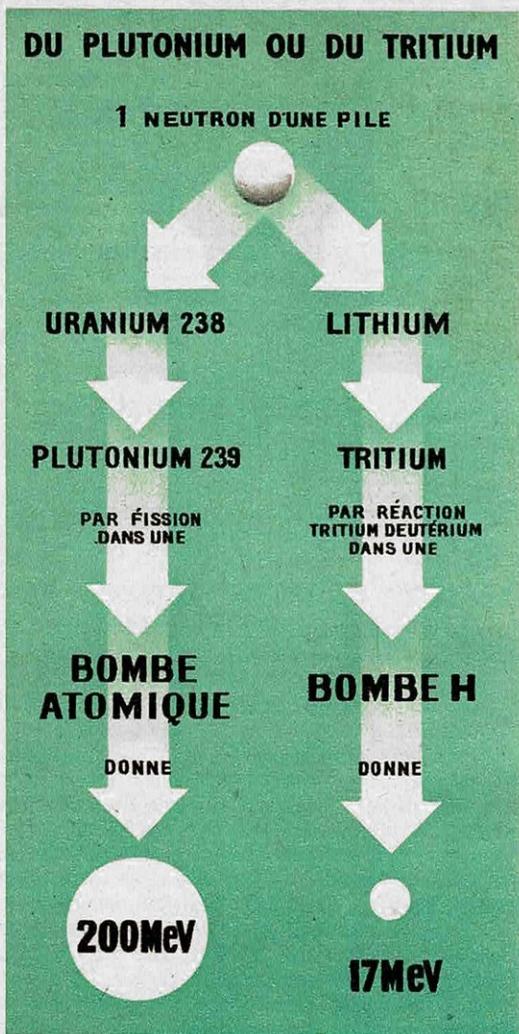
Il est difficile d'évaluer les effets des autres radiations, rayons gamma et neutrons. Il est probable que toutes les personnes qui se trouveraient suffisamment près de l'explosion pour en recevoir une dose mortelle, mourraient de toute façon, soit de leurs brû-

RÉACTIONS PRODUISANT DU TRITIUM



lures, soit écrasées sous les décombres des immeubles.

Reste la radioactivité. Le flux des neutrons provoquerait sur de vastes espaces la formation de radioéléments artificiels au sein des roches et des matériaux divers. Ces radioéléments ont en général une vie courte de sorte que la zone de l'explosion ne serait pas contaminée de leur fait pendant longtemps. Les neutrons sont d'autre part absorbés dans l'air par des noyaux d'azote qui donnent du carbone 14 radioactif. Ce carbone 14 a une longue période d'environ 5 000 ans. Il se désintègre donc lentement et sa radioactivité est faible. Il ne semble pas qu'il puisse devenir dangereux. Beaucoup plus gênants seraient les produits de fission de la bombe atomique servant de détonateur, et le tritium résiduel qui n'aurait pas eu le temps de fusionner avec d'autres atomes d'hydrogène. Entraînés dans le courant d'air ascendant, dans le cas d'une explosion aérienne, ces produits radioactifs pourraient contaminer de vastes espaces dans la région bombardée, et il est difficile d'en prévoir la portée. Rappelons que le physicien Herzog a observé à Houston, dans le Texas, le 5 juillet 1946, une anomalie de 100 % dans le rayonnement gamma de l'atmosphère locale. L'augmentation a débuté le 4 juillet à 20 heures pour atteindre son maximum le 5 juillet à 3 heures ; tout était rentré dans la normale le même jour à 19 heures. Le maximum s'est donc produit 108 heures après l'explosion aérienne de Bikini (30 juin 1946), à 10 000 km de Houston. Les nuages radioactifs ont donc parcouru cette distance à la vitesse moyenne de 90 km/h. Malgré l'augmentation de la radioactivité locale, l'effet physiologique était négligeable.



L'ÉNERGIE ATOMIQUE EN U.R.S.S.

Suivant les révélations des autorités américaines une explosion atomique aurait eu lieu le 14 juillet 1949 sur le territoire de l'U. R. S. S.

Les Russes n'ont ni confirmé ni infirmé d'une façon nette cette nouvelle. Ils ont admis que de grands travaux sont entrepris en U. R. S. S., nécessitant parfois l'emploi de très fortes charges explosives dont les déflagrations ont pu être perçues au delà des frontières. Ils ont ensuite affirmé qu'il n'y avait plus depuis longtemps de secret atomique pour les savants russes.

C'est en effet assez probable. En réalité, il serait plus exact de parler de secrets d'ordre technique, beaucoup plus importants pour la fabrication industrielle de la bombe que le principe même de la fusion ou de la séparation électromagnétique, par exemple. Bien que des « fuites » nombreuses se soient produites malgré l'activité des services contre-

■ Avec un neutron d'une pile, on fabrique un atome de plutonium ou de tritium. L'énergie par atome de tritium est moins grande dans une bombe H, mais il n'y a pas de limite à la masse qu'on peut y rassembler.

espionnage, il n'est pas sûr qu'ils soient tous entre les mains des Russes.

En tout cas, dès 1945, ils étaient au courant des réalisations américaines, au moins dans leurs grandes lignes.

Lors du procès du Dr Allan Nunn May, physicien anglais qui prenait part aux recherches atomiques au laboratoire de Montréal, on a révélé l'existence d'un télégramme envoyé à Moscou par le colonel Zabotin qui avait organisé un réseau d'espionnage en Amérique. Ce télégramme est daté du 9 août 1945 et May y est désigné sous le pseudonyme Alek. Sa teneur était la suivante :

« Faits indiqués par Alek : (1) L'essai de la bombe atomique a été effectué dans le Nouveau Mexique (avec « 49 »). La bombe lancée sur le Japon était faite d'uranium 235. On sait que la production d'uranium 235 s'élève à 400 grammes par jour à l'usine de séparation magnétique de Clinton. La production de « 49 » est probablement deux fois plus grande (quelques unités au graphite sont prévues pour 250 mégawatts, soit 250 g chacune par jour). Le travail de recherche scientifique dans ce domaine doit être publié, mais sans détails techniques. Les Américains ont déjà publié un livre sur ce sujet.

« (2) Alek nous a remis une platine avec 162 microgrammes d'uranium 233 sous forme d'oxyde en couche mince. »

On remarquera que dans le télégramme ci-dessus le nombre « 49 » désigne le plutonium, 4 étant le dernier chiffre de 94, numéro atomique du plutonium, et 9 celui de 239, nombre de masse de son isotope fissionnable.

Ainsi, dès cette époque, tout de suite après Hiroshima, les savants russes avaient pu savoir dans quelles directions orienter les recherches et il est probable qu'ils n'ont pas perdu de temps.

Il est pratiquement impossible de fournir la moindre précision sur les installations atomiques en U.R.S.S. Les savants russes, qui ne le cèdent pas en valeur, sinon en nombre, aux physiciens américains, disposent de laboratoires parfaitement équipés en engins de transmutation. Mais on ignore jusqu'au nombre des centres de recherches et on n'a que de vagues indications sur l'emplacement des principaux, qui seraient installés dans des territoires isolés au delà de l'Oural. On sait seulement que la prospection de l'uranium est menée très activement et que plusieurs gisements sont en exploitation intensive, tel celui de Jachymov (Joachimsthal), en Tchécoslovaquie. D'après certaines informations, les Russes produiraient des bombes atomiques à la cadence de quatre par mois.



URANIUM ET THORIUM DANS LE MONDE

LES MATIÈRES PREMIÈRES DE L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE

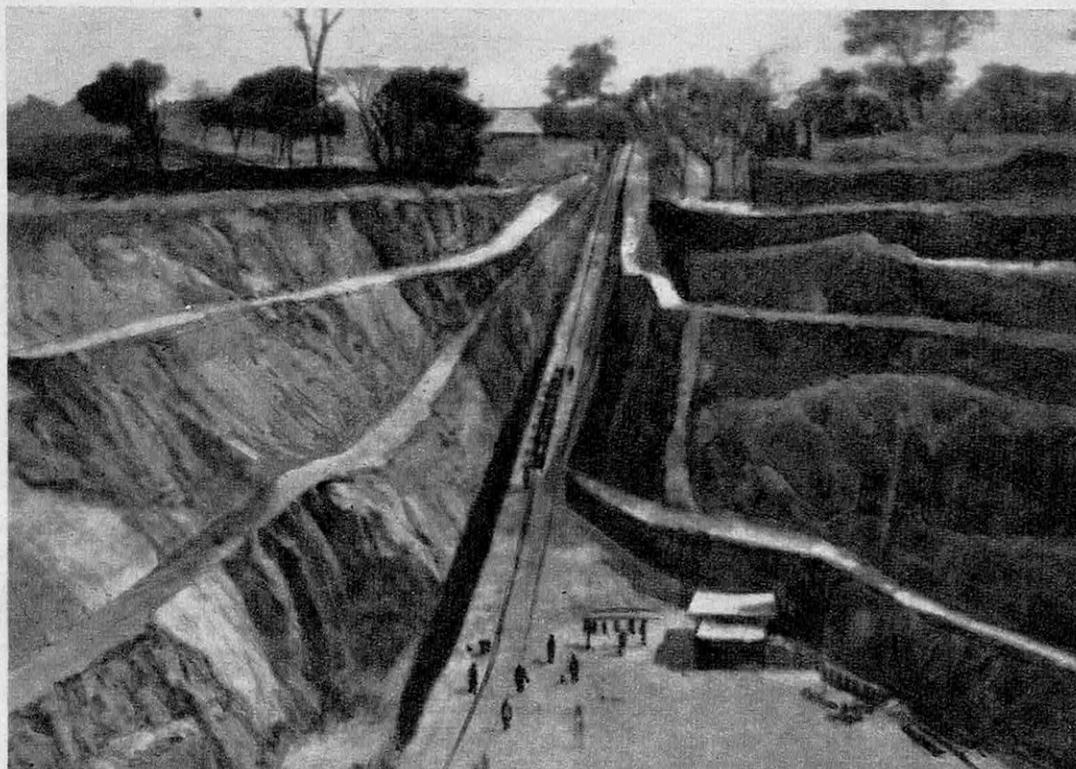
L'INDUSTRIE nucléaire n'en est encore qu'aux tout premiers stades de son développement. Elle a moins de dix ans d'âge. Non seulement elle met en œuvre des matières premières presque totalement ignorées jusqu'à présent, mais elle exige des techniques existantes d'extraordinaires raffinements, sinon une rénovation complète. C'est par tonnes qu'il lui faut de l'uranium ultra-pur, alors qu'on ignorait il y a dix ans la température de fusion de ce métal, de l'eau lourde, simple curiosité de laboratoire jusqu'en 1939, du béryllium et du graphite à un degré de pureté qui aurait découragé métallurgistes et chimistes les plus éminents de l'école classique. Elle manie les produits les plus corrosifs, comme l'acide fluorhydrique, les plus toxiques, comme le plutonium, les plus dangereux, comme les produits de fission, dont la radioactivité équivaut à celle de kilogrammes de radium au sortir des piles. Pratiquement, tous les problèmes sont nouveaux, dans tous les domaines, minéralogique, métallurgique, chimique, physiologique. Les solutions apportées à un grand nombre d'entre eux sont soigneusement

tenues secrètes, de sorte que la revue que nous allons en faire offrira de nombreuses lacunes. Elle doit suffire cependant pour situer leur ordre de grandeur et montrer les voies dans lesquelles se sont engagés les techniciens de l'ère nucléaire.

LES ÉLÉMENTS FISSIONNABLES

Dans l'état présent des recherches nucléaires, trois sortes de « combustibles » seulement paraissent susceptibles d'être utilisés pratiquement pour libérer par fission de l'énergie dans des « piles » nucléaires. Ce sont l'uranium 235, le plutonium 239 et l'uranium 233. Le premier seul existe dans la nature, les deux autres doivent être fabriqués, et cette fabrication ne peut avoir lieu que dans des piles sous l'action de neutrons libérés par la fission de l'uranium 235. Celui-ci est donc à la base de toute l'industrie nucléaire.

L'uranium naturel est constitué pour 99,3 % de l'isotope 238 et pour 0,7 % seulement de l'isotope 235 (un autre isotope, l'uranium 234 est présent en si faible proportion 0,0006 %,

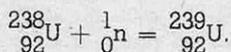


A SHINKOLOBWE DANS LE KATANGA BELGE, l'une des carrières de la mine de pechblende. Près d'ici, le premier filon de minéral d'uranium fut découvert par hasard par un prospecteur en quête de minéral

de cuivre, en 1913. Cette mine appartient à la société belge : Union Minière du Haut-Katanga, où la participation anglaise est très importante, et sa production est exclusivement réservée aux Anglais et aux Américains.

que son rôle est négligeable). Comme nous l'avons vu, on peut réaliser une pile nucléaire avec de l'uranium naturel, enrichi éventuellement, bien que cela ne soit pas indispensable, en isotope fissionnable 235. Le premier problème qui se pose est donc la prospection de gisements d'uranium économiquement exploitables ; le second, d'ordre métallurgique, est le traitement des minerais pour obtenir de l'uranium aussi pur que possible, en éliminant tous les éléments dont la présence empêcherait l'établissement de la réaction en chaîne par absorption de neutrons. Enfin, si l'on envisage la construction d'une pile « enrichie », il faut isoler une certaine quantité d'uranium 235 ; c'est un problème de séparation d'isotopes, particulièrement ardu, comme nous le verrons.

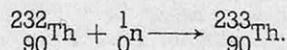
Le plutonium 239 est un isotope fissionnable au même titre que l'uranium 235. Il se forme dans les piles par capture des neutrons par les noyaux d'uranium 238. La réaction peut s'écrire :



L'isotope 239 de l'uranium ainsi formé est radioactif et émet, avec une période de 23 minutes, un électron (radioactivité bêta)

en donnant du neptunium $({}_{93}^{239}\text{Np})$ lequel, à son tour, émet un nouvel électron et livre, avec une période de 2,3 jours, du plutonium 239 $({}_{94}^{239}\text{Pu})$. Ainsi, après un certain temps de fonctionnement d'une pile à uranium, il existe dans la masse de métal du plutonium à une très faible concentration. On l'en extrait chimiquement, mais les difficultés sont grandes à cause de l'énorme radioactivité de la matière traitée, due à la présence des produits de fission de l'uranium 235, et de la toxicité du plutonium.

Quant à l'uranium 233, il ne semble pas qu'il ait encore été utilisé pratiquement, mais on fonde sur lui de grands espoirs pour le développement industriel futur de l'énergie nucléaire. Il est obtenu, en effet, à partir du thorium dont les gisements apparaissent plus abondants et plus facilement exploitables que ceux d'uranium. Irradié par des neutrons, l'isotope 232 du thorium donne la réaction :



L'isotope 233 du thorium ainsi obtenu émet un électron (radioactivité bêta) en se transformant, avec une période de 23 minutes, en



PORT RADIUM sur le Grand Lac de l'Ours dans le nord-ouest de l'Arctique canadien. L'explorateur Gilbert La Bine y trouva de la pechblende en 1930, mais chercha en vain un commanditaire pendant six ans.

Après quatre ans d'exploitation, sa mine Eldorado fut fermée en 1940, les exportations étant interrompues par la guerre. En 1942, elle devint source de matière stratégique n° 1 et centre industriel florissant.

protactinium (${}_{97}^{233}\text{Pa}$) lequel, émettant un second électron, livre, avec une période de 27 jours, de l'uranium 233 (${}_{92}^{233}\text{U}$). Cet uranium pourra être isolé par voie chimique, mais comme, après irradiation, le thorium ne le contient qu'en très faible proportion (quelques grammes par tonne) il faut que le thorium ait été préalablement débarrassé de l'uranium qui l'accompagne toujours dans ses minerais, si l'on ne veut pas que le produit final soit contaminé par d'autres isotopes de l'uranium. D'où un nouveau problème chimique délicat.

L'URANIUM

Avant la dernière guerre mondiale, on ne s'intéressait à l'uranium que pour la très petite quantité de radium que recèlent ses minerais, 1 gramme pour 3 tonnes, et dont l'extraction exigeait des opérations compliquées et coûteuses.

Depuis la découverte du radium par Pierre et Marie Curie, on avait isolé environ 1 kilogramme de radium au total, dont le prix s'élevait à quelque 25 000 dollars le gramme. Aujourd'hui, l'uranium a cessé d'être consi-

déré comme un sous-produit sans grande valeur de l'industrie du radium pour devenir la matière première essentielle de l'industrie nucléaire qui en exige des milliers de tonnes. L'exploitation des mines d'uranium et la prospection de nouveaux gisements n'ont jamais été aussi actives et, grâce à la mise au point d'une métallurgie entièrement nouvelle, non seulement l'uranium a cessé d'être un métal rare, mais le coût de sa préparation est relativement peu élevé.

C'est dans la pechblende que l'Allemand Klapproth découvrit en 1789 une substance qu'il appela uranium en l'honneur de la planète Uranus, découverte peu de temps auparavant par Herschel. En 1847, le chimiste français Péligot isola le métal de son minerai. Il dissolvait la pechblende pulvérisée dans l'acide sulfurique concentré et convertissait ainsi l'uranium en sulfate d'uranium soluble dans l'eau. En 1914, Billy réussit à obtenir l'uranium métallique en réduisant le chlorure d'uranium par le sodium.

Jusqu'en 1941, l'extraction de l'uranium de ses composés n'avait pas fait l'objet d'études approfondies. On se bornait généralement à le stocker sous forme d'oxyde noir pour les besoins métallurgiques et sous forme de sels verts ou jaunes pour la céramique. On était

arrivé toutefois à produire quelques grammes de poudre métallique d'uranium dans divers laboratoires en réduisant l'oxyde d'uranium par l'hydrure de calcium. Cette poudre était tellement chargée d'impuretés que la température de fusion de l'uranium n'avait pu être déterminée qu'avec une incertitude de près de 200°. La raison de cette relative négligence à étudier les propriétés de l'uranium était que ses applications n'exigeaient pas de produits de grande pureté.

L'uranium ainsi grossièrement purifié avait quelques débouchés. On l'utilise, concurremment avec le thorium, pour fabriquer notamment des manchons de becs à gaz. En verrerie, il sert à colorer certains verres soit en vert, soit en jaune, et donne, incorporé à certains verres basiques à forte teneur de plomb, un produit doué d'une fluorescence extrêmement vive.

Avec le nickel, il fournit un alliage (66 % d'uranium et 33 % de nickel) fondant à 1 200°C et dont la propriété la plus intéressante est sa résistance remarquable aux acides et même à l'eau régale (mélange d'acide nitrique et d'acide chlorhydrique). De même, l'addition d'une faible quantité d'uranium aux aciers accroît de façon remarquable leur résistance aux acides : elle augmente aussi leur dureté sans pour cela les rendre fragiles. Enfin, les sels d'uranium ont été employés comme catalyseurs de certaines réactions telles que l'oxydation des hydrocarbures aromatiques, la déshydratation des huiles et, en photographie, pour virer au brun des épreuves sur papier.

EXTRACTION DU RADIUM

Jusqu'à ces dernières années, le seul produit de valeur extrait des minerais d'uranium était le résidu insoluble obtenu en pilant de la pechblende avec du carbonate de sodium et en le plongeant ensuite dans de l'acide sulfurique dilué. L'uranium reste en solution, et c'est le résidu que l'on traite pour en extraire le radium.

La séparation du radium est une opération complexe qui fait intervenir une suite de dissolutions et de précipitations au cours desquelles sont isolés le polonium (en très faible quantité, puisque une tonne de pechblende ne donne pas plus de quelques centièmes de milligramme de polonium), l'actinium et toutes les autres impuretés, ne laissant en présence que le baryum et le radium, dont les propriétés chimiques sont voisines. Ce baryum radifère est dissous à l'état de bromure sur lequel s'opèrent les opérations de cristallisation fractionnée qui permettent d'enrichir peu à peu les cristaux de bromure en radium, enrichissement suivi avec facilité par la mesure de leur radioactivité à l'aide d'un électromètre.

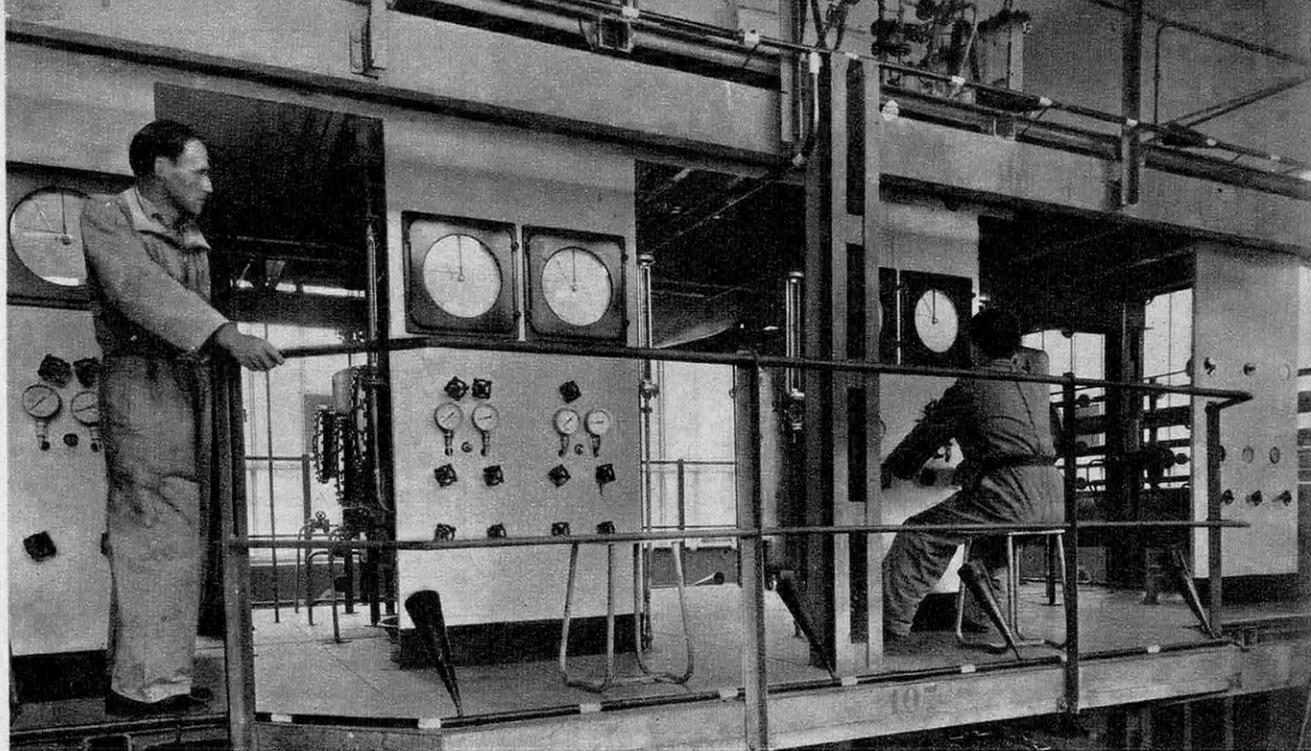
Les deux sels de baryum et de radium sont isomorphes, et donnent par évaporation de leur solution des cristaux mixtes de bro-

mure de radium et de baryum dans lesquels la teneur en radium est légèrement plus forte que dans la solution restante, le bromure de baryum étant un peu plus soluble que le bromure de radium. Ces cristaux sont redissous et la solution ainsi obtenue soumise à une nouvelle évaporation. L'opération est répétée avec des modalités variables jusqu'à une soixantaine de fois. Les cristaux et les solutions sont toujours manipulés mécaniquement et les récipients émaillés de fractionnement sont de plus en plus petits. Lorsque la fraction de cristaux anhydres ne pèse plus que quelques millièmes de la masse initiale, on passe du stade industriel au stade de purification ultime au laboratoire.

Le mode de fractionnement est identique, mais les précautions prises sont de plus en plus minutieuses. Les récipients sont en porcelaine ou en quartz et d'un diamètre de l'ordre de 5 cm. Les manipulations se font derrière des blocs de plomb, dans des hottes étanches et à travers des ouvertures portant des gants de caoutchouc. La teneur en radium s'élève ainsi progressivement de 0,05 % à 98 % environ. Le produit est alors logé dans des tubes capillaires, après avoir été soigneusement séché, car toute trace de vapeur d'eau aurait pour résultat de faire éclater le tube-aiguille. En effet, l'eau est décomposée sous l'influence des rayonnements émis par les sels de radium et la recombinaison soudaine de l'oxygène et de l'hydrogène est explosive.

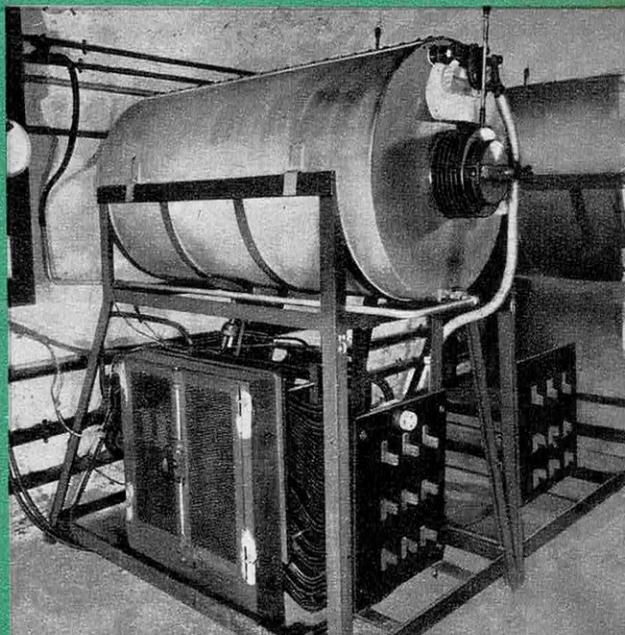
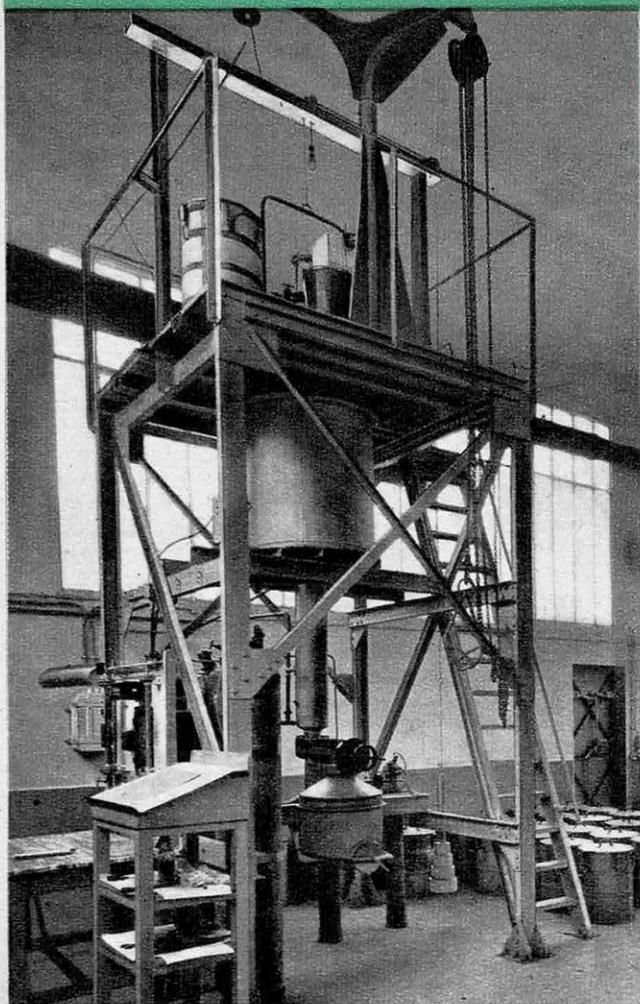
C'est sous forme d'aiguilles contenant entre 0,1 mg et 100 mg de radium que cet élément est livré aux radiologistes. Ces sources sont pratiquement inusables, c'est-à-dire qu'elles ont un rayonnement sensiblement constant, attendu que la « période » du radium (temps au bout duquel la moitié des atomes présents à l'origine se sont décomposés) est de l'ordre de 1 600 ans. Autrement dit, il faut attendre 1 600 ans pour voir une source de radium perdre la moitié de son activité. Les radiations utilisées en thérapeutique (curiethérapie) sont en réalité les rayons gamma émis, non par le radium lui-même, mais par un de ses descendants, le radium C, qui se forme au fur et à mesure que les noyaux du radium se désintègrent.

On peut aussi bien loger dans les aiguilles un descendant intermédiaire du radium, le radon (ou émanation du radium), gaz inerte radioactif que l'on extrait d'une solution de sel de radium par une technique appropriée et que l'on condense dans les aiguilles en les plongeant dans de l'air liquide (- 180° C). Dans ces petits tubes en verre scellé s'accumule progressivement du radium C au fur et à mesure que le radon se désintègre (période 3,8 jours). L'intensité en rayons gamma est donc variable en fonction du temps, mais cette manière de procéder offre certains avantages, notamment en cas de perte ou de vol d'une aiguille, car une aiguille de radium est beaucoup plus pré-



A L'USINE DU BOUCHET

La purification des matériaux destinés aux piles françaises s'effectue dans une annexe de la poudrerie du Bouchet, à 40 km au sud de Paris. On voit en haut un atelier de traitement du nitrate d'uranium par des solvants organiques (éther, par exemple). Les manipulateurs règlent, par un gaz inerte sous pression, la vitesse de passage des liquides, vitesse indiquée par des rotamètres. A gauche, four à hydrogène pour réduire les oxydes d'uranium en bioxyde UO_2 . Ci-dessous, four à hydrogène où la poudre de bioxyde est comprimée en pastilles. (S. photo du C. E. A.)





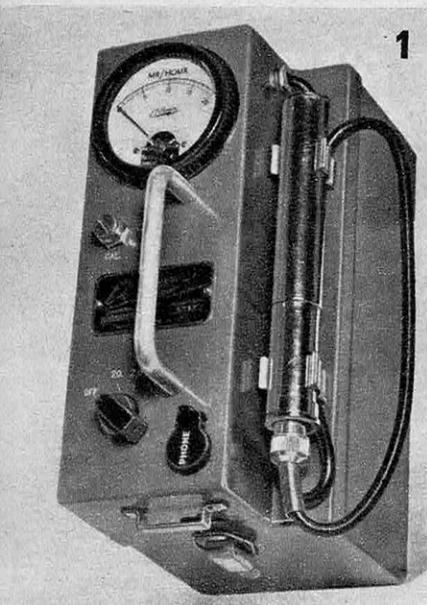
● La prospection de l'uranium n'intéresse pas seulement aux Etats-Unis les prospecteurs professionnels, mais aussi le grand public.

cieuse qu'un tube de radon. Les tubes de radon sont par ailleurs soigneusement conservés pendant des années pour permettre l'extraction du polonium. Signalons que c'est grâce à la patiente accumulation de ces aiguilles envoyées par plusieurs hôpitaux que le laboratoire Curie disposait, en 1934, de sources suffisamment intenses de rayons alpha du polonium, ce qui permit à Frédéric Joliot et Irène Joliot-Curie de découvrir la radioactivité artificielle, en bombardant certains éléments avec ces particules.

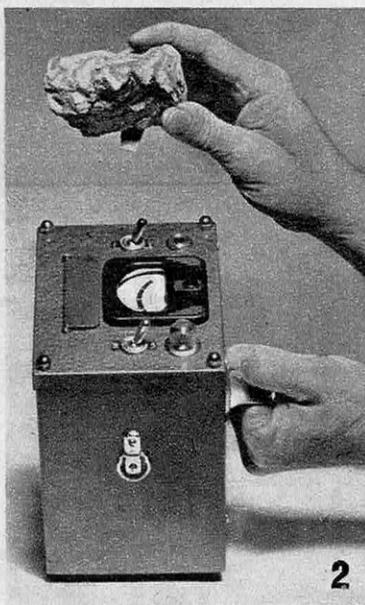
LA NOUVELLE MÉTALLURGIE DE L'URANIUM

De nos jours, le radium tend à perdre de sa valeur commerciale, qui était d'ailleurs maintenue, avant la guerre, à un niveau élevé par limitation de la production. Il est avantageusement remplacé par des radioéléments artificiels produits principalement dans les piles nucléaires. Au contraire, les stocks d'uranium accumulés au cours de la préparation du radium ont acquis une valeur considérable comme matière première de la nouvelle métallurgie de l'uranium ; ils constituèrent en Amérique la première réserve d'uranium pour la mise en train du « Manhattan Engineer District ». Si le radium continue à être extrait du minerai d'uranium destiné aux « piles », il deviendra un sous-produit de l'industrie atomique.

Vers 1941, les besoins des laboratoires nucléaires donnèrent une grande impulsion aux recherches sur la métallurgie de l'uranium. Les procédés de préparation du métal pur sont allés en se perfectionnant et en se simplifiant, tandis que le prix de revient de ce métal s'abaissait progressivement. On mit au point industriellement le procédé de dissolution du nitrate d'uranyle dans l'éther, qui permet d'éliminer aisé-



1



2

1 Fonctionnant sur batteries, cet appareil pèse seulement 4 kg. Il comporte un tube de Geiger fixé à l'extrémité d'un câble et permet la lecture directe (El-Tronics).

2 Un fragment de roche renfermant des traces de minerai radioactif provoque, lorsqu'on l'approche de l'appareil, la déviation de l'aiguille du microampèremètre.

3 Appareil de prospection ultraléger (2 kg), le « sniffer » (renifleur) comporte un tube de Geiger qui allume une lampe ou actionne des écouteurs. (Nuclear Corp.)



3

ment les impuretés et de préparer un oxyde pur destiné à la production du métal. L'ancien procédé de réduction de l'oxyde fut abandonné au profit des méthodes électrolytiques.

Le minerai concentré est traité par un mélange d'acide nitrique et d'acide sulfurique ; l'uranium passe ainsi dans la solution tandis que les sulfates et les silicates restent insolubles. Un excès de carbonate de soude provoque la précipitation, sous forme de carbonates ou d'hydroxydes insolubles, de tous les métaux connus : fer, aluminium, cuivre, chrome, etc. Une nouvelle addition d'acide nitrique donne du nitrate d'uranyle soluble dans l'éther diéthylique, ce qui permet l'élimination de toutes les autres impuretés : terres rares, indium, bore, cadmium qui sont de puissants absorbants de neutrons. On a donc, dès ce stade de la fabrication, un produit assez pur, dont il reste à isoler l'uranium sous forme de métal. Le nitrate d'uranyle chauffé donne de l'oxyde d'uranium lequel, après réduction par l'hydrogène à haute température et action de l'acide fluorhydrique anhydre, est transformé en tétrafluorure d'uranium (sel vert). C'est ce dernier que l'on électrolyse pour obtenir le métal. On peut également le réduire en présence de magnésium ou de calcium, ce qui constitue une opération très spectaculaire, la réaction dégageant beaucoup de chaleur. Le lingot d'uranium est ensuite refroidi en atmosphère neutre (argon) pour éviter son oxydation.

En 1943, la Compagnie Westinghouse fournissait quotidiennement au Manhattan District près de 250 kg d'uranium, au prix de 45 dollars le kilogramme. Depuis, un procédé encore secret, découvert à l'Iowa State College, permet de l'obtenir plus facilement et à un prix encore inférieur.

L'uranium métallique, obtenu par Moissan sous forme de lingots qui peuvent être polis, limés et laminés, a une densité voisine de 18,5. C'est le métal le plus lourd que l'on connaisse. Il est un peu moins dur que le fer. Son point de fusion varie, suivant les impuretés, entre 1 300 et 1 900°C. Il présente la particularité de posséder deux points de transformation bien au-dessous de son point de fusion, où s'opère un réarrangement des atomes et un changement de structure interne (le fer n'a qu'un point de transformation et le cuivre, par exemple, n'en a pas), d'où la possibilité de lui faire subir des traitements thermiques pour améliorer ses caractéristiques mécaniques. Il donne des alliages avec l'aluminium, le fer, le calcium, le magnésium, etc. La surface fraîchement polie de l'uranium est blanche, mais brunit fortement au contact de l'oxygène de l'air avec lequel il forme des oxydes. Le métal en poudre s'oxyde très vite et cet oxyde s'enflamme et devient de l'oxyde vert vers 610°C. En raison de sa grande affinité pour l'oxygène, le métal ne peut être fondu et coulé que dans le vide et doit être travaillé dans une atmosphère inerte et à basse température. Nous

avons dit que, pour éviter la corrosion, les barres d'uranium des piles doivent être enfermées dans des boîtes d'aluminium étanches. L'uranium réagit violemment avec le fluor, le chlore, le brome et l'iode. Il s'enflamme dans le chlore vers 150°.

Les composés d'uranium sont des poisons violents et agissent spécialement sur les reins (apparition de glycosurie puis de néphrite et d'albuminurie). A doses très faibles, ils semblent avoir une action biologique favorable, mise à profit dans un grand nombre de sources thermales radioactives.

LA PROSPECTION DE L'URANIUM

Contrairement à l'opinion communément admise, la prospection des minerais d'uranium est très délicate et demande beaucoup d'attention : lorsqu'ils ont été séparés de leur gangue, les minéraux présentent des aspects ou des couleurs caractéristiques, mais en place, dans leur gangue, ils sont difficiles à discerner. Ils se confondent en effet avec tous les produits d'altération argilo-ferrugineux, si fréquents dans les terrains cristallins qui constituent les zones privilégiées des gisements d'uranium.

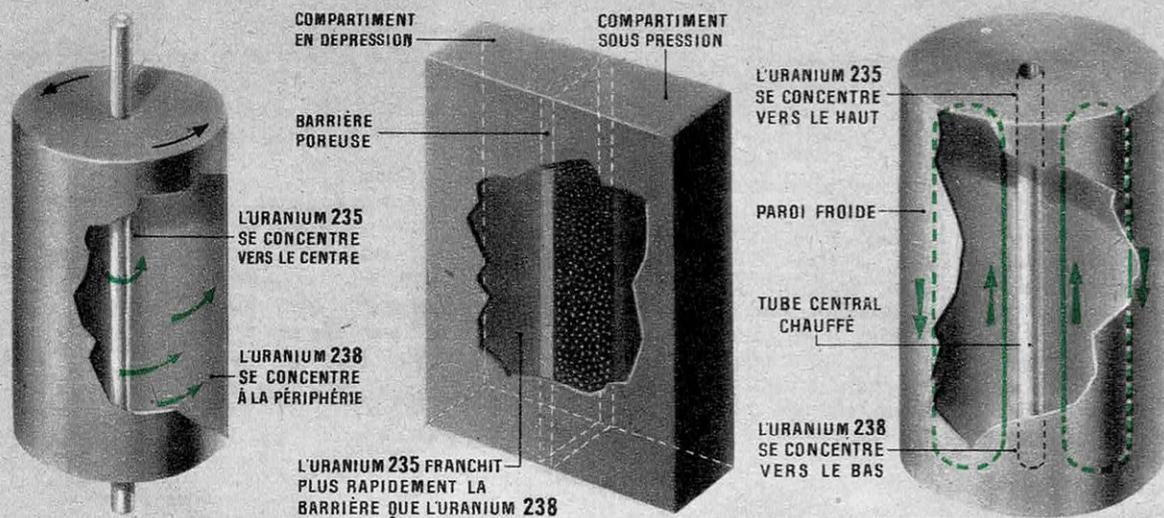
La prospection profite par contre largement de la radioactivité des minerais d'uranium.

La mesure des rayonnements se fait sur le terrain uniquement à l'aide de compteurs Geiger-Müller, reliés à des amplificateurs qui actionnent des appareils visuels ou acoustiques.

Quand l'étude géologique de détail a défini les régions ou les zones favorables à des minéralisations uranifères, la prospection systématique par compteur Geiger-Müller est entreprise : les mesures sont effectuées à des intervalles variables de 2 à 10 m, suivant le terrain et l'intérêt de la région étudiée.

Ces mesures une fois effectuées, intervient l'interprétation des résultats en fonction des caractères géologiques, compte tenu de l'épaisseur des terrains de couverture, etc...

Récemment on a fait appel à l'avion pour prospecter des territoires très étendus et peu accessibles. L'air prélevé à l'avant de l'appareil est conduit à un appareil de mesure de sa conductibilité où il passe entre les armatures d'un condensateur cylindrique relié à un électromètre ; on enregistre ainsi d'une manière continue son ionisation et on décele la présence de radon émis éventuellement par les matières radioactives du sol. L'avion est suivi par radar pour déterminer à chaque instant sa position. Cette méthode ne donne que des indications sommaires et ne peut être mise en œuvre que par des organismes puissamment équipés. L'appareillage emporté par l'avion est très pesant car il doit être protégé contre le rayonnement cosmique : 600 kg environ, sans compter les sources de tension.



L'URANIUM DANS LE MONDE

L'uranium est un élément très répandu dans l'écorce terrestre. Tous les terrains renferment des substances radioactives à l'état de traces. Des gaz radioactifs émis par ces substances se dégagent constamment par des cheminées naturelles et sont présents dans de nombreuses sources. Certaines cavernes, grottes, certains tunnels accusent une forte radioactivité.

On estime que la croûte terrestre contient en moyenne 0,0004 % d'uranium, c'est-à-dire qu'il y aurait en moyenne 4 tonnes d'uranium par million de tonnes de roches diverses. L'uranium serait ainsi presque aussi abondant que le cuivre, le plomb ou le zinc, cent fois plus que l'argent, mille fois plus que l'or. Mais on ne le trouve jamais, comme c'est souvent le cas pour l'or, à l'état pur. Dans ses combinaisons avec les autres éléments, on le trouve rarement à l'état concentré.

On a jusqu'ici recensé une centaine de minerais d'uranium. Ce sont principalement des oxydes dans lesquels l'uranium se trouve associé à divers éléments et en particulier au thorium, aux terres rares et à divers métaux. Les plus importants de ces oxydes sont les uranites, leur variété amorphe est la pechblende noire, dont la cassure a l'aspect de la poix, d'où son nom, « pech » voulant dire poix en allemand. On la trouve en Tchécoslovaquie (Saint Joachimsthal), au Congo belge, au Canada, en Angleterre, aux Etats-Unis.

Vient ensuite des composés d'uranium avec le niobium, le titane et le tantale, parmi lesquels se rangent les bétafites de Madagascar.

Dans la même catégorie, citons des minerais moins riches : la samarskite, niobate et tantate de terres rares et d'uranium (Inde, Madagascar, U. R. S. S., U. S. A.) ; l'euxénite, niobate et titanate de terres rares et d'uranium (Norvège, U. S. A., Madagascar).

Enfin des minerais pauvres proviennent de

l'altération des minerais plus riches par les agents atmosphériques et par des minéraux du sol : carbonates, sulfates, silicates, phosphates, etc. Citons :

- la broggérite, la cléveite, oxydes d'uranium associés souvent au thorium ou aux terres rares (Norvège) ;

- les thorianites, minerais d'oxydes de thorium et d'uranium (Ceylan) ;

- la becquerélite (Congo belge) ;

- l'orangite, contenant peu d'uranium et beaucoup de thorium (Norvège) ;

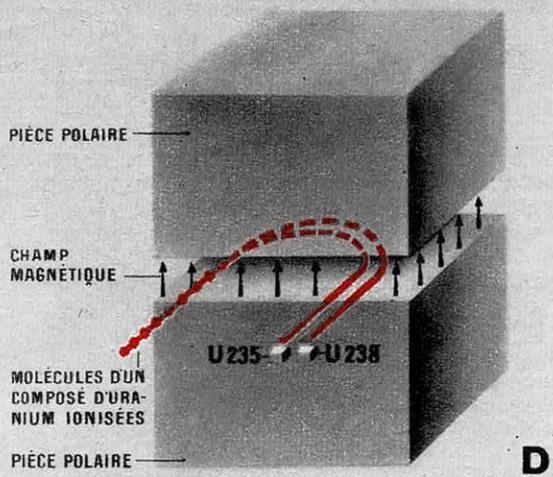
- l'autunite, phosphate de calcium et d'uranium (France, Portugal, Tonkin, Tchécoslovaquie, Autriche, U. S. A.) ;

- la chalcélite ou torbernite, phosphate d'uranium et de cuivre (Angleterre, Tchécoslovaquie, Australie) ;

- la monazite, contenant surtout du thorium et des terres rares (Indes, Brésil, U. S. A., Madagascar, Afrique du Sud, etc.) ;

- la carnotite, vanadate de potassium et d'uranium (U. S. A.).

Cette énumération pourrait laisser croire qu'on trouve de puissants gisements de minerais d'uranium dans le monde entier, ce qui est loin d'être le cas. Ces minerais sont en règle générale extrêmement dispersés et les gisements suffisamment riches pour valoir la peine d'être exploités sont très rares. Du moins en était-il ainsi avant la guerre, à une époque où on s'intéressait peu à l'uranium pour lui-même. Depuis, un gigantesque effort de prospection a été accompli, dans tous les pays du monde, en même temps que les informations sur les résultats se faisaient de plus en plus rares. Il est impossible de déterminer avec précision les chiffres de production et de distinguer, dans le cas où de nouvelles trouvailles sont annoncées, s'il s'agit seulement d'indices plus ou moins intéressants ou de gisements justifiant une exploitation à l'échelle industrielle. On sait, par exemple, que depuis la fin de la guerre, plus de 40 000 « claims » ou demandes d'auto-



SÉPARATEURS D'ISOTOPES

A Ces quatre dessins illustrent le mécanisme des principales méthodes de séparation des isotopes. Ici, dans un cylindre tournant, c'est la force centrifuge qui va entraîner vers la périphérie les particules lourdes.

B La méthode de diffusion gazeuse met en œuvre une barrière poreuse. Un des compartiments est mis en dépression ; les particules légères diffusent plus rapidement à travers les pores de la barrière que les lourdes.

C Ici un tube central chauffé entretient un mouvement ascendant et descendant d'un mélange gazeux. Par diffusion thermique entre les deux courants, les particules lourdes se concentrent vers le bas du récipient.

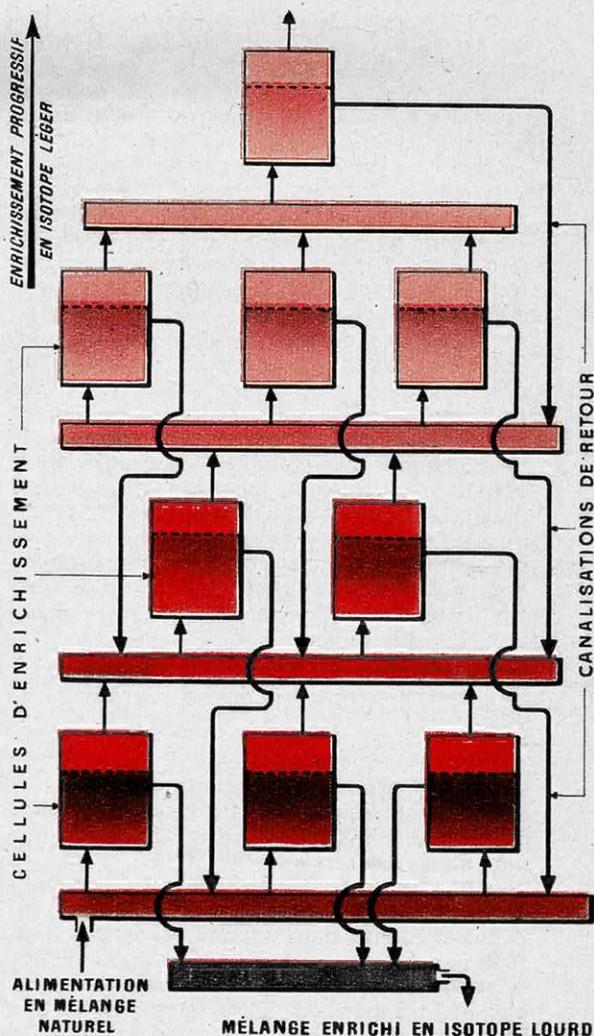
D Dans la méthode électromagnétique, on imprime aux particules ionisées une vitesse donnée, puis on courbe leurs trajectoires dans un champ magnétique fixe. Le rayon de courbure est proportionnel à la masse.

risations de prospector sur des terrains déterminés ont été déposés pour les seules provinces du Saskatchewan et de l'Ontario au Canada. La plupart sans doute ont été abandonnés. Bien entendu, on ignore totalement ce que la prospection a pu donner de l'autre côté du « rideau de fer » et à quel rythme s'y effectue l'exploitation des gisements reconnus.

Si l'on fait état seulement des renseignements de source officielle, sous réserve de découvertes qui seraient tenues secrètes et en laissant de côté l'U. R. S., voici comment se présente la situation mondiale. Il y aurait actuellement, quatre grands centres de production : au Canada, la région du Grand Lac de l'Ours ; au Congo belge, celle du Haut-Katanga ; aux Etats-Unis, le plateau du Colorado ; en Tchécoslovaquie, Saint Joachimsthal (Jachymov) dans l'Erzgebirge.

C'est en 1930 que le prospecteur Gilbert La Bine, cherchant du cobalt et de l'argent, découvrit accidentellement au Canada, dans les Territoires glacés du Nord-Ouest, à l'est du Grand Lac de l'Ours, un des gisements de pechblende les plus riches que l'on connaisse. La mine Eldorado fut la première à être équipée d'installations modernes pour le concassage et l'enrichissement du minerai, qui était envoyé à la raffinerie de Port Hope, sur le lac Ontario. Exploitée pour le radium et aussi pour l'argent, le cobalt et les autres métaux qui accompagnent le radium, elle produisait pour 300 000 dollars par mois en 1939. On estime qu'en 1948, tant à Eldorado qu'à Contact Lake, il a été produit en uranium seul pour plus d'un million de dollars. En 1938, on estimait les réserves d'Eldorado à 55 000 tonnes, chiffre certainement bien au-dessous de la réalité puisqu'il ne représentait guère que deux années d'exploitation. Le minerai au sortir de la mine contient un peu plus de 1 % d'oxyde d'uranium (U_3O_8).

Le gisement de Shinkolobwe, dans le Haut Katanga, au Congo belge, a été découvert



● La méthode de diffusion gazeuse est ici illustrée par une chaîne simplifiée de neuf appareils en quatre étages en « cascade ». Un tel montage est indispensable pour obtenir un enrichissement appréciable, le facteur de séparation de chaque étage individuel étant très faible.

par le major Sharp, qui cherchait du cuivre. On le considère encore actuellement comme le plus important du monde. La richesse des minerais permit à l'Union Minière du Haut Katanga, qui les exploite depuis 1921, de dominer longtemps le marché mondial du radium. Son monopole de fait ne prit fin que lorsque la mine Eldorado fut mise en exploitation au Canada. On estime que le Congo belge a produit jusqu'à aujourd'hui environ 350 grammes de radium. Il existe actuellement trois exploitations importantes : à Shinkolobwe, à Lumbumbashi et à Jadotville-Panda. Les exportations de minerai se seraient élevées à 10 000 t en 1945.

La source principale de l'uranium des Etats-Unis est constituée par des gisements de carnotite, bien inférieurs aux pechblendes des autres pays. Ils sont dispersés sur une centaine de milliers de kilomètres carrés sur le plateau du Colorado, à cheval sur le Colorado et l'Utah. Dans le minerai, l'uranium est accompagné de vanadium, dont la valeur marchande est grande, ce qui améliore la rentabilité des exploitations qui sont en général de faible importance. La teneur est en général de 0,1 à 0,3 % d'oxyde d'uranium (U_3O_8) et de 0,5 à 2,5 % d'oxyde de vanadium (V_2O_5), parfois très supérieure. La carnotite a été exploitée pour le radium jusque vers 1923, puis de nouveau à partir de 1936 pour le vanadium. Il y aurait actuellement près de 300 petites mines en exploitation. La Commission de l'Energie Atomique acquiert les sous-produits des mines extrayant le vanadium et, pour encourager la prospection, a fixé un prix minimum avantageux valable 10 ans pour les minerais et concentrés de teneur suffisante, et des primes pour la découverte de nouveaux gisements. Elle surveille étroitement la production, toute opération sur les minerais d'uranium et de thorium étant soumise à l'octroi d'une licence. Récemment, des gisements d'uranium et de cuivre, dont on ignore l'importance, auraient été découverts sur les bords sud-ouest et ouest du plateau du Colorado qui fait l'objet d'une prospection très active tant des services officiels que des particuliers. La Commission a reçu, en 1949, des prospecteurs particuliers, 1 200 échantillons de terres à analyser par mois, contre 400 en 1948. Elle a vendu 40 000 exemplaires d'un « Guide du prospecteur » qu'elle a édité ; en moyenne, les fabricants spécialisés ont vendu 100 compteurs de Geiger-Müller par mois. Des gisements dont on ignore encore l'importance pratique ont été découverts en 1943 à la Sunshine Mine, district de Cœur d'Alène, dans l'Idaho, et à la fin de 1949 par la Jones and Laughlin Ore Co, dans la partie supérieure de la péninsule du Michigan. Malgré tous ces efforts, la production des Etats-Unis est encore très insuffisante et la plus grande partie de l'uranium nécessaire au développement du programme atomique doit être importée.

Dans l'Erzgebirge, les gisements de Saint-

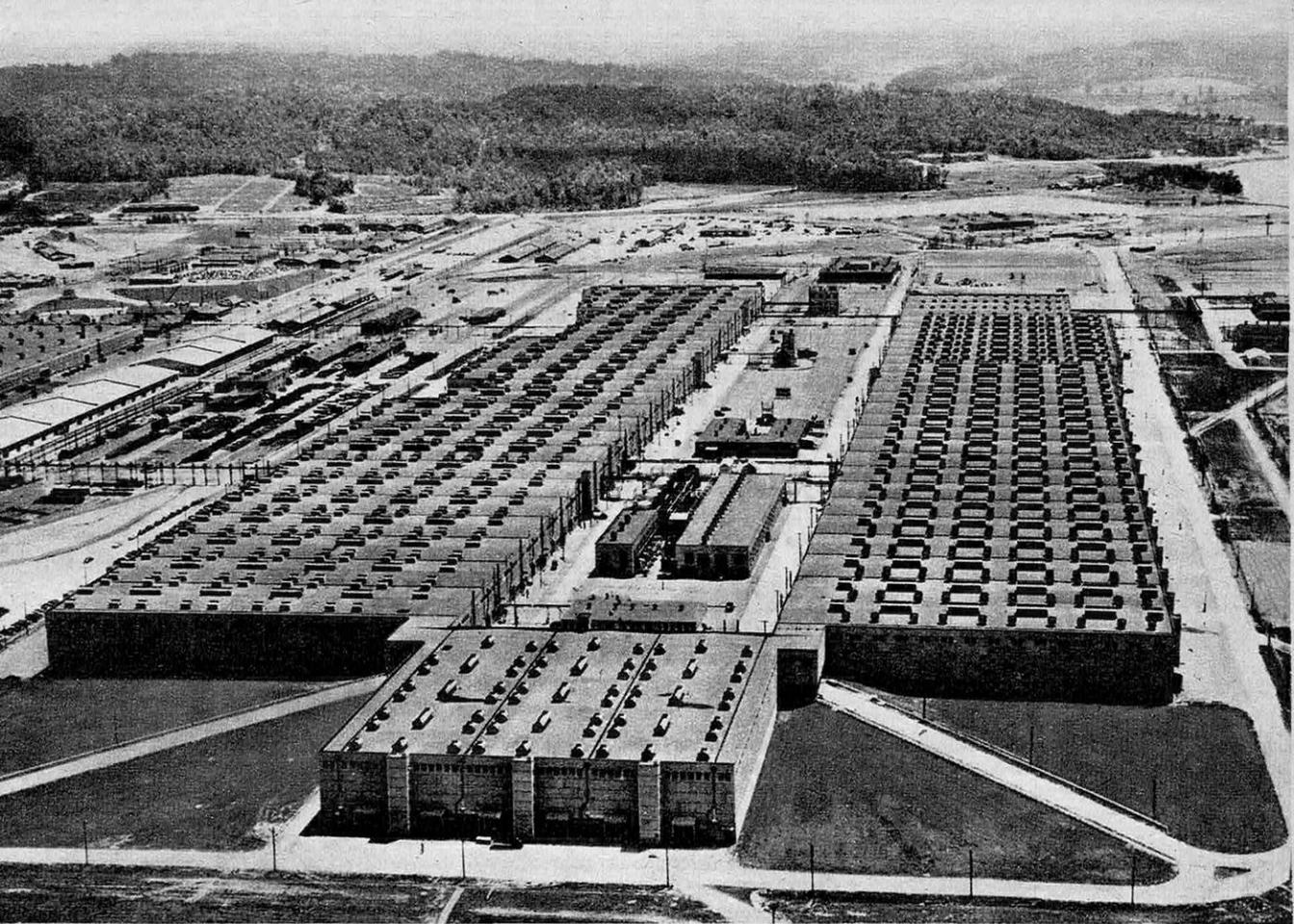
Joachimsthal furent les premiers historiquement à être exploités. Depuis le XII^e siècle on y extrayait de l'étain, puis de l'argent et du cobalt, et enfin de la pechblende pour colorer les céramiques. On sait que ce sont ces mines qui fournirent à Pierre et Marie Curie les matières premières pour leurs recherches. A partir de 1928, elles furent exploitées pour le radium, mais elles furent reléguées au second plan par les gisements du Congo belge et du Canada. Elles font actuellement l'objet d'une exploitation intensive, sur laquelle aucun chiffre n'est publié.

Outre ces quatre grands centres de production, des gisements de moindre importance existent un peu partout. Nous nous bornerons à les énumérer. En Europe, on trouve de petites exploitations en Grande-Bretagne (Cornouailles), au Portugal (Urgeirica), en Saxe (Schneeberg), en Bulgarie (Goten, à une vingtaine de kilomètres au nord-est de Sofia), en France (Autun, Limoges) ; le chapitre suivant précisera l'état actuel des recherches en France et dans l'Union française. Des gisements intéressants ont été signalés à Madagascar, en Australie (Mount Painter et Radium Hill), au Brésil (Minas Geraes et Paraiba), au Mexique, en Colombie, aux Indes, au Japon. Certains n'étaient pas assez riches pour justifier leur exploitation en vue d'en extraire le radium. Mais l'augmentation de la demande d'uranium et les progrès de la technique permettront sans doute de s'intéresser à des gisements à faible teneur qui représentent des tonnages considérables. C'est ainsi que certains sédiments marins contiennent de l'uranium en faible concentration (0,01 à 0,02 % d'oxyde d'uranium) ; c'est de tels schistes que la Suède extrait l'uranium destiné à la pile dont elle a annoncé la construction ; ils contiennent des nodules et des lentilles d'un bitume appelé « kolm », qui contiendrait jusqu'à 0,5 % d'oxyde d'uranium. Ces formations géologiques, dont il existe d'analogues en plusieurs régions du monde, représenteraient en Suède plusieurs millions de tonnes et s'étendraient à travers l'Esthonie et jusqu'à Leningrad.

D'autre part, des études sont en cours pour utiliser les sous-produits des mines d'or de l'Afrique du Sud. On savait que les conglomerats aurifères du Witwatersrand contenaient de l'oxyde d'uranium (uraninite) et on a reconnu depuis peu qu'il était possible d'en retirer de l'uranium. Le ministre de la Production Industrielle de l'Union Sud-africaine a même déclaré que l'Union serait à même de produire plus d'uranium que n'importe quel pays.

L'URANIUM 235

L'isotope 235 se trouve en faible proportion dans l'uranium tel qu'il se présente dans la nature. Pour 140 noyaux d'uranium 238, il n'y a qu'un seul noyau 235. Si on admet que la masse critique, pour une bombe atomique,



L'USINE K-25 D'OAK RIDGE, dans le Tennessee, au sud-est des Etats-Unis, comporte des milliers d'appareils de diffusion gazeuse en cascade. On y produit

plus de 250 g d'uranium 235 par jour. Il existe aussi à Oak Ridge un séparateur magnétique monstre (calutron) et au moins une pile atomique puissante.

est de l'ordre de 20 kg, on voit que le métal brut d'où cet isotope 235 a dû être extrait représentait au moins 20 x 140, soit 2 800 kg, en pratique près de 3 tonnes. La difficulté de la séparation ne tient pas à la faible teneur ; s'il s'agissait d'éléments différents, les chimistes la résoudre facilement. Mais ici les méthodes de la chimie sont inopérantes, car uranium 238 et 235 ont les mêmes propriétés chimiques. Le problème qui se pose est un problème de séparation d'isotopes que nous envisagerons d'abord sous son aspect le plus général, car il intervient, dans l'industrie nucléaire, non seulement pour l'uranium 235, mais aussi pour le deutérium et pour d'autres éléments qu'elle utilise.

Les isotopes d'un même élément ne diffèrent, comme nous l'avons vu dans les premiers chapitres, que par le nombre de neutrons présents dans le noyau. Les électrons planétaires des atomes ont une disposition identique et, par suite, les propriétés chimiques sont les mêmes, au moins en première approximation.

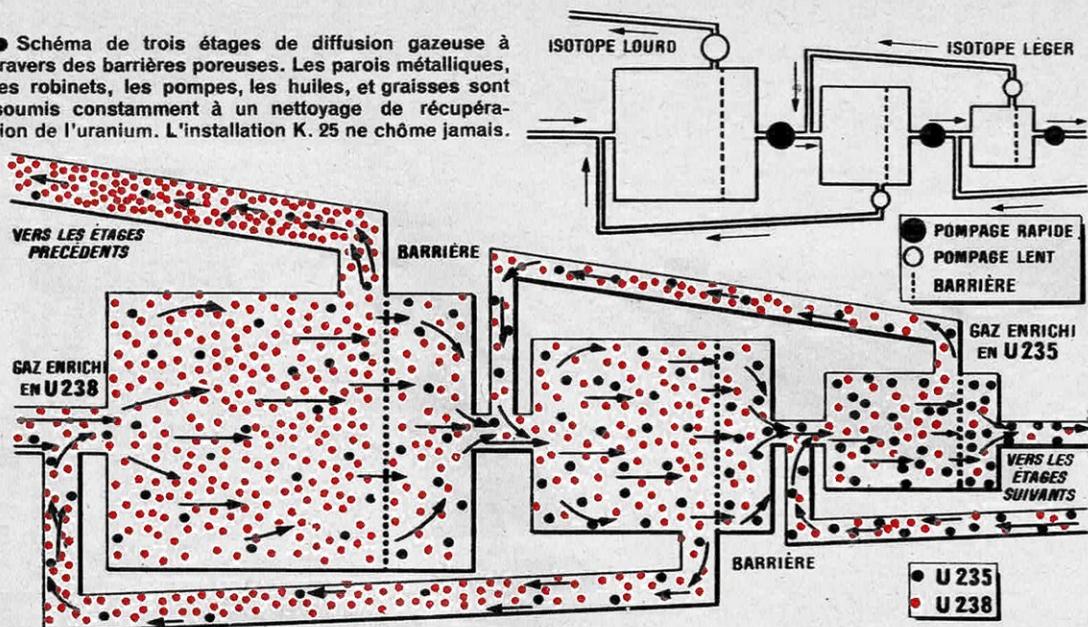
Pour séparer les isotopes, on ne peut faire appel en général qu'à des méthodes qui font intervenir les masses.

LA CENTRIFUGATION

Sous l'action de la pesanteur, les éléments lourds d'un mélange tendent naturellement à tomber vers le bas et les éléments légers à monter vers le haut. Il serait vain d'attendre que de l'uranium 235 et de l'uranium 238 en mélange se séparent, même partiellement, de cette manière. La vitesse de diffusion est considérablement supérieure à la vitesse de sédimentation, de sorte qu'en pratique le mélange reste parfaitement homogène. Cependant, en mettant en œuvre des champs de gravitation beaucoup plus intenses que celui de la pesanteur, comme on sait le faire avec les ultracentrifugeuses, on doit arriver à un résultat.

La force centrifuge a été mise en œuvre dans la séparation de certains isotopes grâce aux perfectionnements apportés par Beams aux centrifugeuses à grande vitesse et aux suggestions de Urey, préconisant l'emploi de centrifugeuses cylindriques verticales à contre-courant. Dans ces appareils, un jet de vapeur descend dans la partie externe du cylindre et un autre jet monte dans la partie centrale. Dans l'espace intermédiaire, les

● Schéma de trois étages de diffusion gazeuse à travers des barrières poreuses. Les parois métalliques, les robinets, les pompes, les huiles, et graisses sont soumis constamment à un nettoyage de récupération de l'uranium. L'installation K. 25 ne chôme jamais.



molécules diffusent constamment d'un jet dans l'autre, mais la force centrifuge radiale s'exerce plus fortement sur les molécules lourdes de sorte que la concentration de celles-ci s'accroît dans la région périphérique et décroît dans la région axiale. Le fonctionnement est continu, et en disposant une série de tels appareils en cascade, on pourrait obtenir une concentration de plus en plus grande. En fait, le calcul a montré que pour obtenir une production journalière appréciable il faudrait un nombre extrêmement élevé de centrifugeuses, de sorte que la méthode n'a pas été retenue jusqu'ici pour l'uranium.

LA DIFFUSION GAZEUSE

On sait que les molécules d'un gaz ou d'un liquide sont en agitation continue et que leur énergie cinétique moyenne dépend uniquement de la température. Cette énergie cinétique est égale à la moitié du produit de la masse de la molécule par le carré de sa vitesse. Nous voyons tout de suite qu'en moyenne la vitesse d'une molécule légère sera plus élevée que celle d'une molécule lourde à énergie cinétique égale, pour compenser la différence de masse qui existe entre elles. En principe donc, tout processus fondé sur les vitesses moyennes des molécules peut être utilisé pour séparer des isotopes.

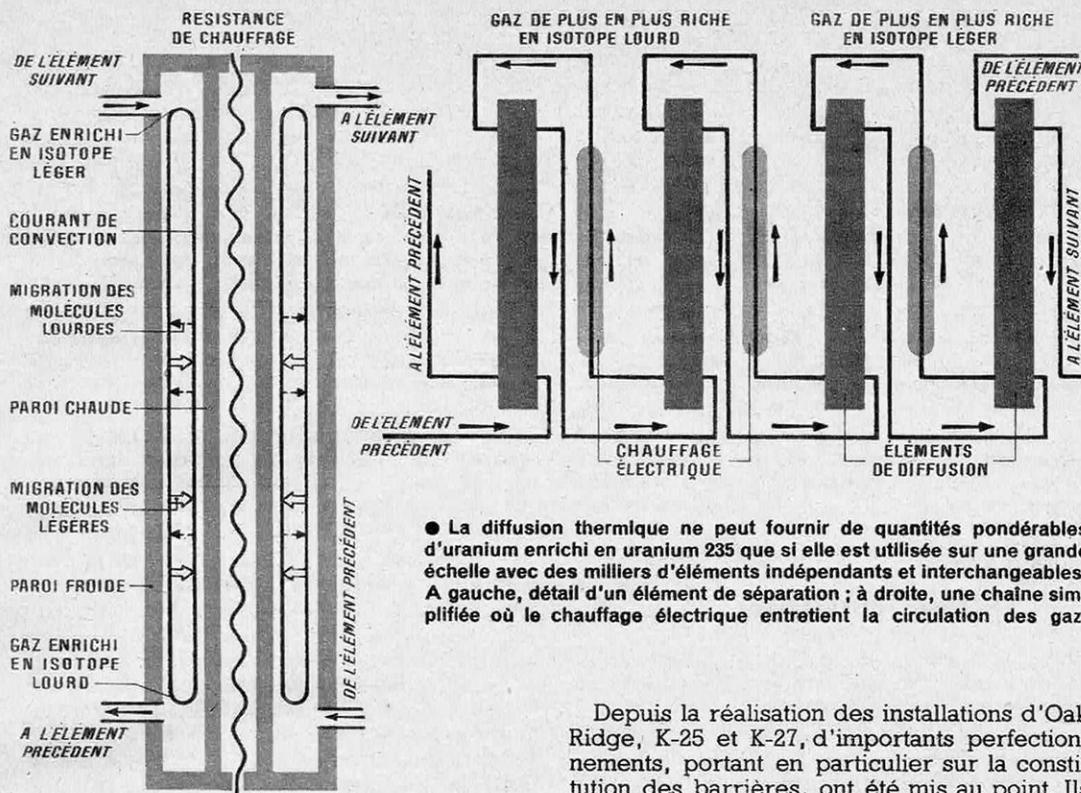
Malheureusement, quand on a affaire à des isotopes d'éléments lourds, les différences de vitesses moyennes sont très faibles, celles-ci étant inversement proportionnelles à la racine carrée de la masse. De plus, il s'agit seulement de vitesses moyennes, c'est-à-dire qu'en réalité les vitesses des molécules prises individuellement peuvent s'en écarter sensiblement, de sorte qu'il y a un chevauchement inévitable. Il faudra toujours prévoir une

cascade d'appareils pour réaliser un enrichissement progressif.

Dans le procédé par diffusion gazeuse, un composé gazeux diffuse sous pression réduite à travers une barrière poreuse. Possédant une vitesse moyenne plus élevée, les molécules légères diffusent plus vite à travers la barrière que les molécules lourdes, de sorte que le mélange qui, à un instant donné, n'a pas encore traversé la barrière s'est concentré en élément lourd. Bien entendu, si le processus de diffusion est poursuivi trop longtemps, l'enrichissement du gaz diffusé en élément léger diminue graduellement, et il faut s'arrêter à temps. Il est plus commode d'opérer d'une manière continue en envoyant au fur et à mesure le gaz diffusé dans une nouvelle chambre de diffusion.

La méthode a été appliquée avec succès à la séparation des isotopes du néon, de l'argon, de l'azote, de l'oxygène et du carbone.

Dans le cas de l'uranium, le seul composé gazeux utilisable est l'hexafluorure d'uranium, très oxydant et corrosif, dont le maniement exige de grandes précautions. La réalisation des installations de diffusion gazeuse d'Oak Ridge (désignées par K-25 et K-27), opérant sur une grande échelle, a posé de nombreux problèmes techniques dont les solutions sont encore tenues secrètes, en particulier en ce qui concerne la constitution des barrières. À la pression atmosphérique, le libre parcours moyen d'une molécule c'est-à-dire le chemin qu'elle parcourt avant de rebondir sur une autre molécule, est de l'ordre du dixième de micron. Pour permettre une concentration par diffusion, le diamètre des milliards de petits trous dont est percée la barrière doit être inférieur au dixième du libre parcours moyen, soit un centième de micron. Les trous ne doivent ni se bou-



● La diffusion thermique ne peut fournir de quantités pondérables d'uranium enrichi en uranium 235 que si elle est utilisée sur une grande échelle avec des milliers d'éléments indépendants et interchangeables. A gauche, détail d'un élément de séparation ; à droite, une chaîne simplifiée où le chauffage électrique entretient la circulation des gaz.

cher ni s'agrandir sous l'effet de la corrosion. Mécaniquement, les barrières doivent pouvoir supporter une certaine différence de pression entre leurs deux faces. Elles doivent pouvoir être fabriquées en grandes quantités (plusieurs hectares de surface totale) et être de qualité uniforme. L'étanchéité de tous les joints doit être parfaite car on opère à pression réduite et l'hexafluorure d'uranium est très sensible à la moindre trace d'humidité, qui provoque la formation d'une poudre non volatile. Cette poudre non seulement représente une perte d'uranium retiré de la circulation, et donc une baisse de rendement de l'installation, mais bouche également les trous microscopiques des barrières. Aussi tout le système est-il enfermé dans une atmosphère déshydratée et l'étanchéité des joints est telle que lorsqu'on fait le vide dans l'appareillage, la pression y augmente de moins de 2 microns de mercure par heure, résultat considérablement supérieur à celui obtenu dans les meilleurs appareils de distillation sous vide que met en œuvre l'industrie pétrolière.

L'hexafluorure d'uranium étant très corrosif, il a fallu mettre au point toute une gamme de composés nouveaux, à base de fluor et de carbone, les fluorocarbures, analogues aux hydrocarbures. Ils sont destinés à servir de lubrifiants, de liquides de refroidissement et de matériaux plastiques dans les installations de diffusion.

A tous les étages des cascades, des spectrographes de masse enregistreurs permettent de contrôler le degré d'enrichissement.

Depuis la réalisation des installations d'Oak Ridge, K-25 et K-27, d'importants perfectionnements, portant en particulier sur la constitution des barrières, ont été mis au point. Ils sont naturellement tenus secrets, mais on sait qu'ils seront appliqués dans une nouvelle installation en cours de réalisation (K-29), tandis qu'une autre (K-31) est en projet. Ils doivent permettre d'abaisser considérablement les prix de revient et d'augmenter très substantiellement la production quotidienne d'uranium 235.

LA DIFFUSION THERMIQUE

La théorie cinétique des gaz prédit une différence dans les taux de diffusion des gaz de masses moléculaires différentes sous l'action de la température. Les études théoriques faites à ce sujet dès 1920 furent pour la première fois mises en pratique en Allemagne, par Clusius et Dickel, en 1938. Ils construisirent un tube vertical refroidi à l'extérieur, dans lequel un fil axial chauffé électriquement produisait une différence de température de près de 600° C entre l'axe et la périphérie. Les isotopes lourds se concentraient sur les parois froides et avaient tendance à descendre vers la partie inférieure du tube, tandis que les gaz chauds, plus riches en isotopes légers, tendaient à gagner la partie supérieure.

La diffusion thermique dans les liquides est un processus assez compliqué où interviennent non seulement les différences de masse, mais aussi des forces intermoléculaires complexes. Il a pu cependant être étudié théoriquement et a été utilisé avec de l'hexafluorure d'uranium liquide sous pression, avant la construction des usines de diffusion gazeuse, pour obtenir un produit enrichi destiné aux installations de séparation d'isotopes par le procédé

électromagnétique. Il exige lui aussi de nombreuses cellules en cascade et son principal inconvénient est qu'il consomme beaucoup d'énergie.

La méthode de diffusion thermique, abandonnée dans le cas de l'uranium, est la méthode la plus en faveur pour la séparation des isotopes de certains éléments légers soit gazeux, soit possédant des composés gazeux dans un intervalle convenable de température (carbone, chlore, néon, argon, etc.). C'est ainsi que l'Université de Yale perfectionne le procédé de séparation thermique de l'hélium 3 en opérant sur de l'hélium naturel sous pression. Elle prépare également de l'argon 36 et du néon 22 concentré à 93,4 % contre 10 % dans le néon naturel.

SÉPARATION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Les installations de séparation électromagnétique des isotopes de l'uranium furent les premières à fournir des quantités appréciables d'isotope fissionnable pour les recherches expérimentales sur la bombe atomique, poursuivies au laboratoire de Los Alamos. Leur principe est le même que celui du spectrographe de masse.

Cet appareil de laboratoire permet, en déviant les atomes ionisés à l'aide d'un champ magnétique associé à un champ électrique, d'isoler en un seul stade des isotopes définitivement séparés. Son débit est en général très faible et ne dépasse pas en général quelques fractions de microgramme (millionième de gramme) par heure. Il fallut 16 heures à Nier, à l'aide d'un appareil perfectionné par lui, pour isoler le premier microgramme d'uranium 235. Lawrence, en 1941, avait porté le débit à 1 microgramme par heure. On n'a que des renseignements assez vagues sur les perfectionnements apportés par la suite et qui permirent d'utiliser la méthode à l'échelle industrielle à Oak Ridge, dans les installations désignées par Y-12. On sait seu-

lement que des électroaimants monstres, dont certains ont 75 mètres de long, furent construits, comportant des milliers de tonnes d'acier de la perméabilité maximum. Ils furent baptisés « Calutrons » en l'honneur de l'Université de Californie dont l'électroaimant du cyclotron de 4000 tonnes servit de modèle aux séparateurs magnétiques multiples. Pour les enroulements des électroaimants, des milliers de tonnes d'argent (le métal qui a la plus faible résistance électrique) furent prêtées par le Trésor américain.

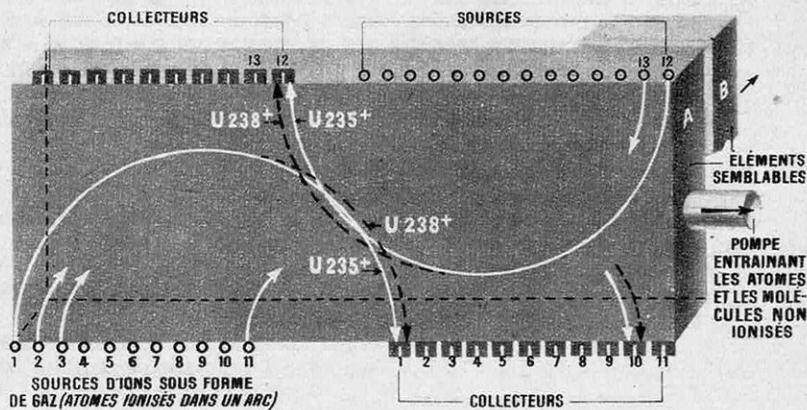
Voici comment fonctionne un spectrographe de masse.

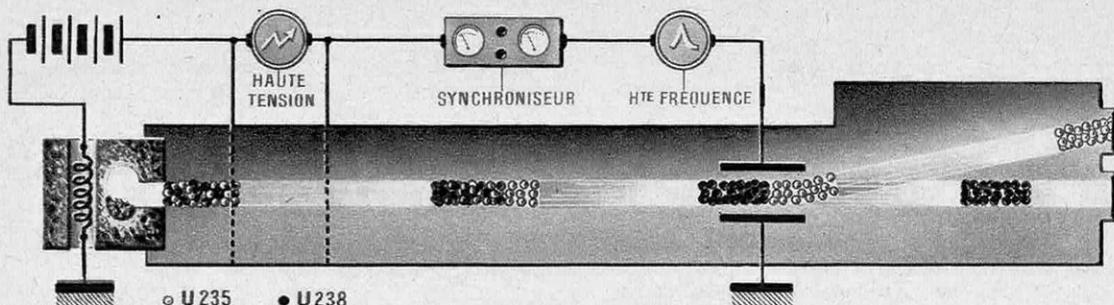
Le composé gazeux dont il s'agit de séparer les éléments est introduit dans une petite enceinte où il est ionisé au moyen d'une décharge électrique. Les ions traversent successivement deux fentes entre lesquelles ils sont accélérés par un champ électrique. Ils acquièrent pratiquement tous la même énergie cinétique (si l'on néglige les variations dues à l'agitation thermique) déterminée par leur charge et la valeur du potentiel accélérateur. La vitesse des ions légers est très peu supérieure à celle des ions lourds, car l'énergie cinétique est fonction du carré de la vitesse, de sorte que les faibles différences de masse entre les isotopes sont compensées par une très minime différence de vitesse. Il en résulte que le produit de la masse par la vitesse, qui intervient dans la déviation magnétique qui suit, est en définitive plus petit pour les ions légers que pour les ions lourds. En sortant de la deuxième fente, les ions pénètrent dans le champ magnétique où ils vont décrire des demi-cercles dans un plan perpendiculaire à la direction du champ. Les rayons de ces trajectoires sont proportionnels aux produits de la masse par la vitesse ; les ions légers se trouvent sur des cercles de rayon plus petit que ceux des ions lourds. Des collecteurs appropriés les recueilleront séparément.

La mise en œuvre pratique de cette méthode sur une grande échelle soulève de nombreuses difficultés.

Il est difficile tout d'abord de produire de grandes quantités d'ions à l'état gazeux.

● Le séparateur magnétique utilise plusieurs éléments ou boîtes vidées A, B, ... représentés ici verticalement. Le champ magnétique est perpendiculaire au plan de la figure. Dans chaque boîte, il y a une dizaine de « canons » à ions et un nombre double de collecteurs d'isotopes. Les charges spatiales positives sont neutralisées par des électrons suivant un procédé secret qui permet d'atteindre de meilleurs rendements. Cet appareil a été mis au point, à petite échelle, avec l'électroaimant du cyclotron de 4 000 t de l'Université de Californie à Berkeley.





● Le dispositif de séparation des isotopes préconisé par R. Wilson et dénommé « isotron » accélère des paquets d'atome ionisés qui se propagent à des

vitesse différentes suivant leur masse et sont séparés par un champ de haute fréquence. On sait peu de chose sur le rendement de cet appareil à l'étude.

En outre, une trop grande densité ionique dans un faisceau provoque la formation d'une charge d'espace qui gêne l'action séparatrice. On compense cette charge spatiale par des filaments incandescents qui émettent des électrons. La disposition de ces filaments, leur teneur en éléments de la série des terres rares ou autres substances émettant de grandes quantités d'électrons à moyenne température, sont encore tenues secrètes. Les documents les concernant n'ont pas été "déclassifiés" par la Commission de l'Energie Atomique pour publication.

Si on utilise d'autre part des fentes fines, on obtiendra une bonne séparation, mais le débit sera faible. Avec des fentes larges, il se produira un chevauchement des zones où se déposent les isotopes qui se mélangeront en partie.

Tout compte fait, on a intérêt à utiliser des fentes assez larges, quitté à reprendre à nouveau, dans un autre appareil, les produits enrichis par une première opération. On pourra constituer ainsi une cascade d'unités de séparation qui livreront finalement des isotopes très concentrés.

En pratique, il faut, pour une production journalière appréciable, un appareillage extrêmement important, en particulier des pompes à vide très puissantes et très nombreuses. Les enceintes étanches où s'effectue la séparation doivent pouvoir être ouvertes périodiquement pour leur chargement et leur déchargement ; il faut y refaire le vide rapidement et « dégazer » leurs surfaces pour en éliminer l'air et l'humidité. Une partie seulement des produits parvient aux collecteurs. Le reste se dépose sur les parois et sur tous les accessoires, parfois en s'y incrustant en les frappant à grande vitesse, et il faut les récupérer car ils ont une valeur d'autant plus grande qu'ils sont plus concentrés. Les collecteurs doivent avoir une grande résistance à la chaleur et une grande conductibilité thermique, car un faisceau de particules rapides équivaut à un jet de gaz à plusieurs milliers de degrés. Toutes ces difficultés semblent avoir été surmontées d'une manière très satisfaisante dans les usines de séparation d'Oak Ridge.

L'ISOTRON

L'isotron, imaginé par R. R. Wilson à Princeton, est un des derniers nés parmi les appareils de séparation des isotopes. La source ionique est assez large et fournit en grande quantité des ions qu'on accélère d'abord par un champ électrique constant et ensuite par un champ électrique variable à haute fréquence en dents de scie. L'effet du champ électrique constant est de projeter un faisceau intense d'ions dans le tube avec une énergie cinétique uniforme, et par conséquent avec des vitesses inversement proportionnelles à la racine carrée des masses des ions présents dans le faisceau.

Le champ électrique variable introduit de petites variations périodiques dans la vitesse de l'ion et provoque un certain « groupage » dans une région du tube (modulation en vitesse). Les paquets d'ions de différentes masses voyagent avec différentes vitesses et se séparent par conséquent sur place dans un « analyseur » perpendiculairement au faisceau en certaines positions dans le tube.

On applique sur cet analyseur un champ électrique focalisateur, ayant une composante de fréquence synchronisée avec l'arrivée des paquets d'ions. La synchronisation est telle que la composante variable du champ transversal est nulle lorsque les paquets d'ions d'uranium 238 arrivent à l'analyseur et au contraire maximum au passage à ce point des paquets d'ions d'uranium 235. On peut de cette façon dévier les paquets d'ions 235 et focaliser l'isotope 238 sur un collecteur.

Cette méthode, qui a le grand avantage de ne pas faire appel à des champs magnétiques, fut appliquée d'abord avec succès aux isotopes du lithium et ensuite à ceux de l'uranium.

On ne sait pas actuellement son rôle dans l'industrie atomique. Il est probable que la séparation des isotopes du lithium, dont l'isotope 6 est nécessaire pour fabriquer le tritium des « superbombes H », a mis cette méthode au premier plan.

MÉTHODE D'ÉQUILIBRE CHIMIQUE

Les différents isotopes d'un même élément ont des propriétés chimiques identiques, mais seulement en première approximation. Dans certaines réactions chimiques réversibles, les molécules ne réagissent pas d'une manière identique.

Ainsi dans la réaction d'échange entre l'oxygène et l'eau, l'isotope de l'oxygène de masse 16 déplace un peu plus rapidement l'isotope de masse 18 de l'eau que l'isotope de masse 18 ne déplace celui de masse 16. Il en résulte que si on fait passer d'une façon continue de l'oxygène gazeux à travers de l'eau liquide, le gaz s'enrichit de plus en plus en isotope 18. On verra un peu plus loin

un autre exemple de réaction d'échange mettant en jeu les isotopes de l'hydrogène et l'eau et pouvant servir à la fabrication de l'eau lourde.

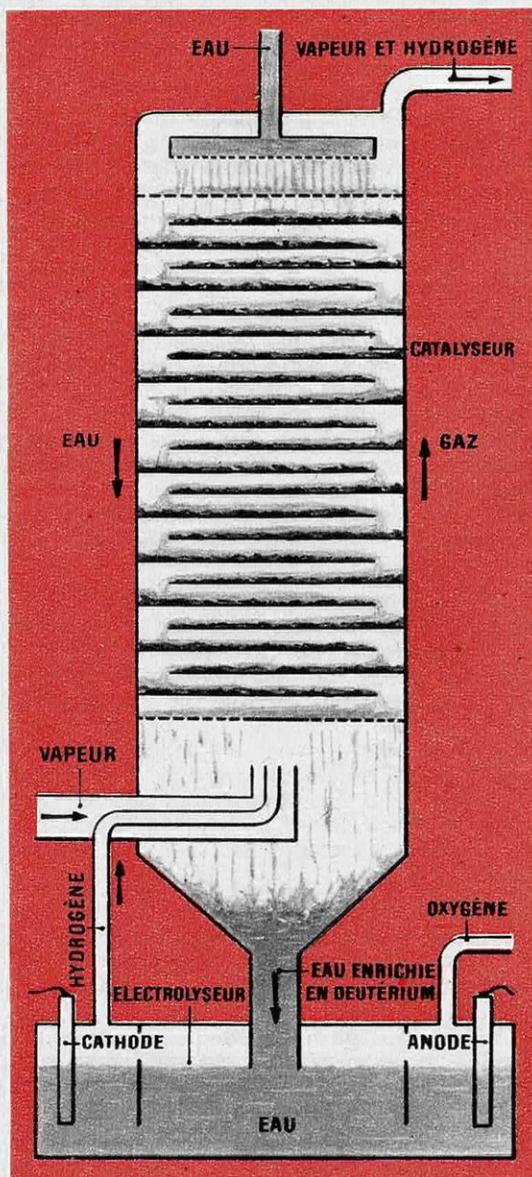
La méthode a pu être appliquée avec succès à la séparation de l'azote 15 et du carbone 13.

L'EAU LOURDE

Les différences de masse entre les divers isotopes d'un même élément affectent leur comportement dans un grand nombre de processus où interviennent des forces interatomiques ou intermoléculaires : évaporation, réactions chimiques, échanges d'ions, etc. Ces forces dépendent surtout de la configuration des dernières couches électroniques des atomes ; mais l'effet de masse, en général négligeable avec les éléments moyens ou lourds, peut devenir appréciable avec les éléments légers et servir à leur séparation.

C'est ainsi qu'exceptionnellement des différences dans les propriétés physiques des isotopes peuvent être mises à profit pour les séparer. On a reconnu, par exemple, qu'à une température de 2,19° K (degrés absolus) l'hélium 4 manifeste des propriétés remarquables de fluidité. Ayant perdu toute viscosité, il s'étale sur les parois du récipient qui le contient, les gravit et peut de cette manière se transvaser tout seul. L'hélium 3 ne possède pas cette propriété, ce qui permet de séparer les deux isotopes.

Un autre exemple est celui de l'eau lourde. La masse atomique de l'hydrogène est 1, celle du deutérium (hydrogène lourd) est 2 : la masse moléculaire de l'eau ordinaire (H_2O) est donc 18 ($2 \times 1 + 16$), et celle de l'eau lourde (D_2O) est 20 ($2 \times 2 + 16$). La différence est appréciable et se traduit en particulier dans la valeur de la température d'ébullition, de 1,4° C supérieure pour l'eau lourde. On pourra donc séparer l'eau lourde de l'eau ordinaire par distillation fractionnée. Cette opération, familière aux industriels et aux « bouilleurs de cru », est rendue ici très difficile par le fait que la proportion d'eau lourde dans l'eau légère est très faible ; de multiples opérations seraient nécessaires pour obtenir un produit progressivement enrichi. On opère en pratique d'une manière continue dans des tours de fractionnement : à la partie inférieure on envoie de la vapeur tandis que du liquide se déverse à la partie supérieure. Entre la vapeur et le liquide, des molécules s'échangent. Celles de la fraction qui a le point d'ébullition le plus bas ont une tendance plus grande à entrer dans la vapeur et vice versa.



← Pour la préparation de l'eau lourde, cet appareil combine l'électrolyse de l'eau avec la réaction d'échange de l'hydrogène gazeux avec celui combiné dans l'eau. Celle-ci s'enrichit en deutérium en ruisselant de haut en bas à travers des lits de catalyseurs.



● L'usine de nitrate et d'eau lourde de Rjukan en Norvège. Cette vue a été prise pendant un raid de l'aviation anglo-américaine en 1943. C'est ici que des

commandos de troupes aéroportées sabotèrent les installations d'eau lourde, afin de freiner le développement des recherches nucléaires en Allemagne.

La méthode de distillation fractionnée a pu être appliquée directement à l'hydrogène liquide, avec un rendement assez favorable, mais il ne semble pas que cette technique ait dépassé le stade de laboratoire.

Une autre méthode de séparation peut mettre à profit les échanges de molécules d'hydrogène entre du gaz hydrogène et de l'eau. Dans ce cas, on a trouvé que l'eau contient entre 3 et 4 fois plus de deutérium que le gaz hydrogène en équilibre avec elle.

Enfin, lorsqu'on électrolyse de l'eau ordinaire, on constate que l'hydrogène de masse 1 se dégage au pôle négatif plus rapidement que le deutérium. Le résidu de l'électrolyse contient donc plus de deutérium que l'eau initiale.

En répétant l'opération, on obtient ainsi de l'eau de plus en plus « lourde ». Il serait possible d'atteindre une concentration de 99 %. Cette méthode fut la première utilisée à l'échelle industrielle, notamment en Norvège, pour séparer l'eau lourde. Il faut compter 35000 ampères-heures par gramme d'eau lourde.

L'eau lourde a des propriétés nettement différentes de celles de l'eau ordinaire. La glace d'eau lourde ne fond pas à zéro degré, mais à 3,8° C. Elle commence à bouillir à 101,4° C et sa densité est de 1,10764 à 25° C.

La vitesse du son dans l'eau lourde est de 1398 m/s alors qu'elle est de 1498 m/s dans l'eau ordinaire. Son indice de réfraction, sa constante diélectrique, sa susceptibilité magnétique et sa constante d'ionisation sont plus faibles.

Dans l'eau lourde, un neutron thermique, dont la vitesse est de l'ordre de 2500 m/s,

est l'objet de près de 18000 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). Un tel neutron parcourt à peine 17 centimètres dans l'eau ordinaire avant d'être capturé par l'hydrogène pour donner du deutérium. Cet exemple explique pourquoi on emploie l'eau lourde comme ralentisseur de neutrons de fission dans les piles atomiques.

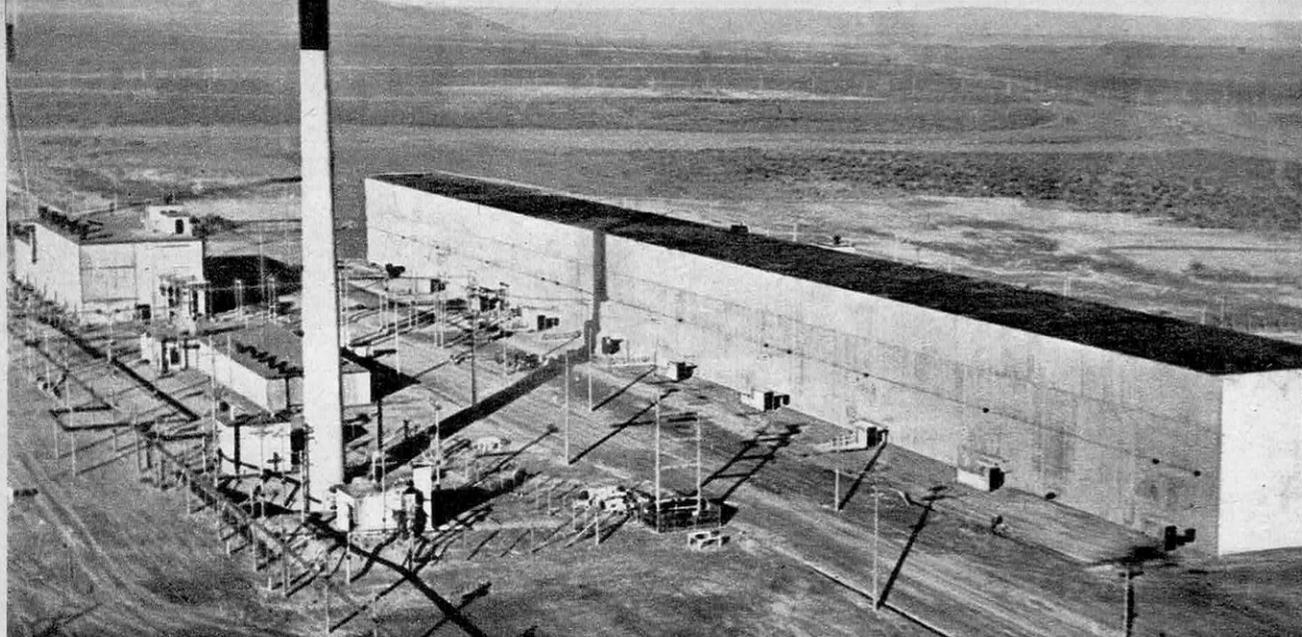
LE PLUTONIUM ET LES AUTRES ÉLÉMENTS TRANSURANIENS

On connaît aujourd'hui six éléments lourds de numéros atomiques supérieurs à celui de l'uranium. Ce sont : le neptunium (93), le plutonium (94), l'américium (95), le curium (96), le berkélium (97), et le californium (98). Seul jusqu'à présent le plutonium a été fabriqué en quantités importantes. Son isotope 239 constitue un explosif nucléaire aussi puissant que l'uranium 235. Il subit la fission sensiblement dans les mêmes conditions, et il présente sur lui l'avantage qu'il est beaucoup plus aisé de le fabriquer dans les piles atomiques et de l'en extraire que d'isoler l'uranium 235 de l'uranium naturel.

Nous allons voir comment furent découverts et étudiés les six éléments transuraniens.

LE NEPTUNIUM

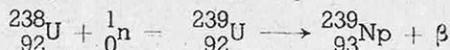
La découverte du neptunium est due à E. M. McMillan et P. H. Abelson, de l'Université de Californie. Des recherches précédentes, portant sur la fission de l'uranium sous l'action des neutrons et au cours des-



LES USINES DE HANFORD près de Richland dans l'Etat de Washington. Plusieurs piles de grande puissance fonctionnent ici sur le bord du fleuve Columbia.

Le plutonium est extrait sur place dans les usines chimiques qui traitent les lingots des piles. La production de plutonium dépasserait un kilogramme par jour.

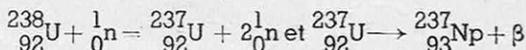
quelles on s'efforçait à mesurer l'énergie dégagée en observant les parcours des deux principaux fragments de fission, avaient montré l'existence d'un élément radioactif, de période 2, 3 jours, que l'on ne pouvait identifier. Utilisant, au début de 1940, les neutrons du cyclotron de Lawrence à Berkeley, Mc Millan et Abelson bombardèrent de l'uranium, et grâce à l'intensité de la source de neutrons dont ils disposaient, ils purent expérimenter sur des quantités de produits beaucoup plus importantes que leurs prédécesseurs. Ils établirent ainsi avec certitude, par des méthodes chimiques, qu'il se formait sous l'action du bombardement par neutrons un isotope de l'uranium, de masse 239, lequel, radioactif, se désintégraît en émettant un électron (rayon bêta), avec une période de 23 minutes, et en se transformant en un élément de numéro atomique 93 et de masse inchangée 239. La réaction peut s'écrire :



Cet élément nouveau reçut le nom de neptunium, car il fait suite à l'uranium comme, dans le système solaire, la planète Neptune fait suite à la planète Uranus. Comme nous le rappellerons plus loin, le neptunium 239 est lui-même radioactif émetteur bêta et se transforme, avec une période de 2, 3 jours, en plutonium 239.

Un autre isotope du neptunium fut découvert en 1942 par A. C. Wahl et G. T. Seaborg, de l'Université de Californie. En bombardant de l'uranium avec des neutrons rapides, on réalise un autre type de réaction nucléaire, dans laquelle la capture d'un neutron est suivie de l'expulsion de deux neutrons. L'uranium 238 donne ainsi de l'uranium 237 qui, émettant des rayons bêta se transforme,

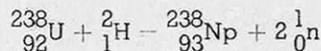
avec une période de 7 jours, en neptunium 237. Les réactions peuvent s'écrire :



Le neptunium 237 est radioactif et émet des particules alpha ; mais sa période est très longue, de l'ordre de 2,5 millions d'années, de sorte que cet élément est pratiquement stable et peut être manié sans précautions spéciales. Il se forme peu à peu dans les piles atomiques, en faible quantité, mais on peut l'accumuler. La pile d'Oak Ridge a fourni ainsi plus de 100 mg de neptunium avec lesquels les chimistes de l'Université de Chicago ont pu étudier en détails les propriétés chimiques de cet élément.

LE PLUTONIUM

C'est également à Berkeley, fin 1940, que Seaborg, McMillan, Wahl et Kennedy découvrirent le plutonium en bombardant de l'uranium avec des deutons (noyaux de deutérium accélérés par le cyclotron). Ils montrèrent que l'uranium 238 captait le deuton et émettait 2 neutrons, ce qui a pour effet de former un noyau de neptunium 238.



Ce radioélément émet des rayons bêta avec une période de 2 jours et devient du plutonium ${}_{94}^{238}\text{Pu}$ qui, lui-même, est radioactif émetteur alpha, avec une période de 60 ans. Le nom de ce nouvel élément, suivant la même convention que pour le neptunium, dérive de Pluton, la plus éloignée des planètes solaires, qui fait suite à Neptune.

Presque en même temps, les recherches

entreprises sur le neptunium montraient l'existence d'un isotope du plutonium : $^{239}_{94}\text{Pu}$ formé à partir du neptunium $^{239}_{93}\text{Np}$ par émission bêta. Le plutonium 239 est un émetteur alpha de période voisine de 24000 ans et il devient de l'uranium 235.

C'est au laboratoire métallurgique de Chicago que Cunningham et Werner obtinrent, après de multiples efforts, un composé pur de plutonium, le 18 août 1942. C'était la première fois que l'homme obtenait un radioélément artificiel en quantité pondérable. Les savants firent appel à des méthodes jusque là inusitées pour établir, sur des quantités extrêmement petites, 2 microgrammes pour commencer, puis, à la fin de 1942, 500 microgrammes, obtenues en bombardant pendant plusieurs mois des kilogrammes d'uranium avec les cyclotrons de Berkeley et de Saint-Louis, une chimie du plutonium assez précise pour qu'on pût préparer sans perdre de temps la technique de séparation du plutonium que produiraient les piles alors en construction. On appliqua ainsi, sans transition, les résultats obtenus sur des traces infimes à des quantités dix milliards de fois plus importantes.

L'ULTRAMICROCHIMIE DU PLUTONIUM

Elle fait intervenir un matériel (récipients, burettes, balances) qui est à l'échelle des quantités que l'on manipule. Les opérations s'effectuent sous un microscope de faible grossissement à l'aide de vis micrométriques.

APPAREIL D'EXTRACTION DU PLUTONIUM (FRANCE)

C'est ici que fut extrait de l'uranium de la pile de Chatillon le premier microgramme de plutonium. Le tube d'aluminium contenant les pastilles d'oxyde d'uranium est mis dans une gouttière en acier inoxydable et plongé dans la soude qui dissout la chemise d'aluminium. Les pastilles d'oxyde d'uranium restent dans la gouttière. Elles sont prises avec des pinces et plongées dans des cuves à droite de la figure et dissoutes dans l'acide nitrique. Le liquide est refoulé vers l'appareillage central où se trouvent les solvants. Le nitrate d'uranium est extrait en premier lieu, puis le plutonium est isolé des produits de fission. Le tableau de commande au premier plan comprend des télécommandes de vannes qui règlent le débit du solvant et des diverses solutions aqueuses.

Le tube à essais classique des laboratoires de chimie est remplacé par un petit cône de verre creux appelé microcône, dans la pointe duquel s'accumulent les faibles quantités de liquides sur lesquelles on opère. Les burettes destinées aux titrages sont des tubes capillaires dans lesquels le liquide est refoulé par une vis, car une goutte de liquide d'une burette ordinaire représenterait à cette échelle une quantité énorme. Les précipités sont le plus souvent séparés des liquides par centrifugation. Les balances sont de petits dynamomètres dans lesquels le poids des corps à doser est équilibré par la torsion ou la flexion d'un fil de quartz. L'une d'elles donne une précision de 0,02 microgrammes pour des pesées allant jusqu'à 300 microgrammes et supporte une charge de 20 mg, ce qui, en valeur relative, est comparable à une balance qui serait capable d'effectuer des pesées de 1,5 g à 0,1 mg près, le produit à peser étant placé dans un récipient pouvant peser jusqu'à 100 g.

Grâce à l'ingéniosité des chercheurs américains, le passage de cette ultramicrochimie aux processus industriels s'effectua avec succès, et les résultats quantitatifs obtenus sous l'objectif du microscope se révélèrent d'une précision très satisfaisante.

Le plutonium qui a été formé dans les blocs d'uranium d'une pile y est toujours en très faible quantité et accompagné de produits de fission dont la radioactivité est intense et équivaut pour les piles de grande puissance à celle de plusieurs centaines de kilogrammes de radium. Leur présence générerait considérablement les traitements chimiques ulté-

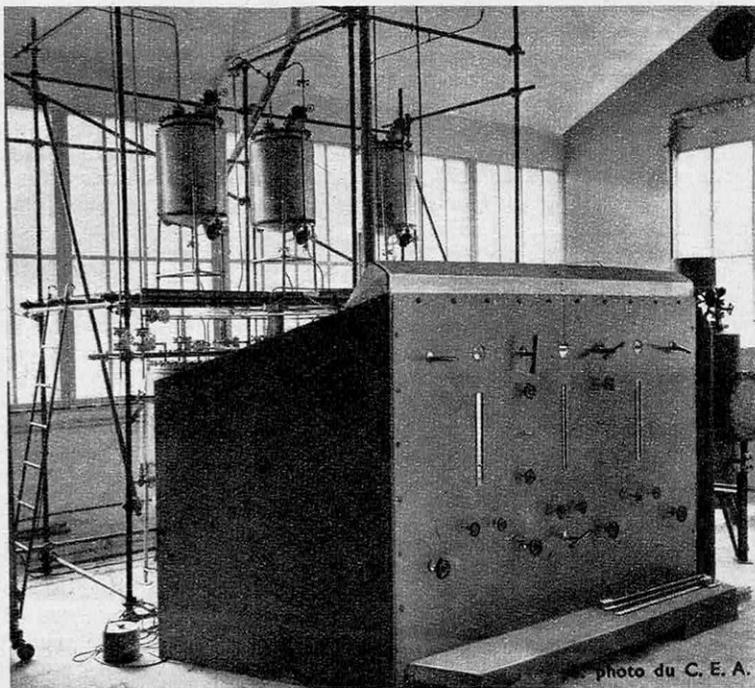


photo du C. E. A.

rieurs car leur rayonnement ionisant accélérerait la corrosion de l'appareillage et provoquerait la formation d'eau oxygénée dans les solutions, ainsi que la dissociation ou la polymérisation des produits organiques utilisés comme solvants. Heureusement, ils ont pour la plupart une vie moyenne assez courte ; au bout de quelques heures, le rayonnement tombe à un dixième du rayonnement initial, et au bout d'un mois à un centième. Des récipients en plomb absorbent le rayonnement restant au bout de quelques semaines et le transport à l'usine de purification ne présente plus de danger. Pour les piles de plus de 10 000 kW, le transport des lingots se fait par des canalisations souterraines.

A l'usine, le tube contenant le lingot est mis dans une gouttière en acier inoxydable et plongé dans la soude qui dissout le revêtement d'aluminium en respectant l'uranium. L'uranium et tous les éléments qu'il contient, y compris le plutonium, sont ensuite dissous dans l'acide nitrique. Le nitrate d'uranium est entraîné par un solvant, puis le plutonium est isolé des produits de fission. Ces derniers sont ensuite séparés au moyen d'échangeurs ioniques à base de résine (amberlite).

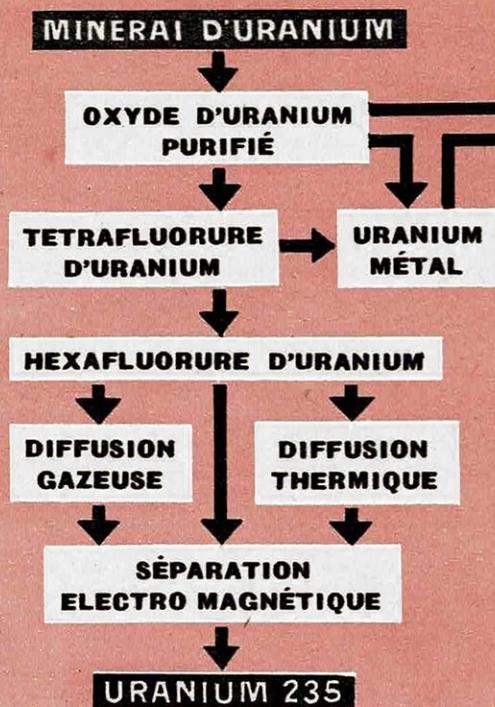
Pour séparer le plutonium de la solution obtenue, on met à profit sa propriété de posséder plusieurs valences, en particulier les valences 4 et 6. Par l'action d'un oxydant fort, on fait apparaître la valence 6. Le plutonium reste alors en solution, tandis qu'une partie des produits de fission sont précipités avec un entraîneur constitué de trifluorure de cérium ou de lanthane. On réduit alors le plutonium à la valence 4, et il précipite à l'état de fluorure. Pour l'obtenir à un degré de pureté suffisant, il ne faut pas moins d'une trentaine de ces opérations de précipitation et de redissolution qui sont naturellement commandées à distance en raison de la nocivité des produits manipulés. Plus récemment ont été mis au point des procédés de séparation par solvants organiques qui sont tenus secrets.

Le plutonium est un élément extrêmement toxique. C'est un poison chimique au sens ordinaire du mot, comme l'arsenic, par exemple, mais à un degré bien supérieur. C'est en outre un poison radioactif très dangereux par les particules alpha qu'il émet et qui détruisent les tissus lorsqu'il a pénétré dans un organisme vivant. Il ne peut être éliminé et entraîne inévitablement la mort à une dose supérieure à un demi-microgramme. Il faut prendre les plus grandes précautions pour supprimer en particulier les poussières qui contamineraient les voies respiratoires, tant du personnel que des populations du voisinage si elles étaient entraînées dans l'atmosphère.

L'AMÉRICIUM ET LE CURIUM

Aujourd'hui, les savants atomiciens connaissent la chimie des composés du plutonium aussi bien et même mieux que celle

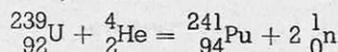
SCHEMA DE FABRICATION



des éléments comme l'argent ou le cuivre. Leurs résultats sont malheureusement tenus secrets. Cependant les renseignements qui ont été publiés ont amené à concevoir que les éléments transuraniens formeraient une série analogue à la série des terres rares qui commence dans la classification de Mendeleïeff avec le lanthane. Elle débiterait avec l'actinium et tous ces éléments nouveaux ont reçu le nom générique d'« actinides ».

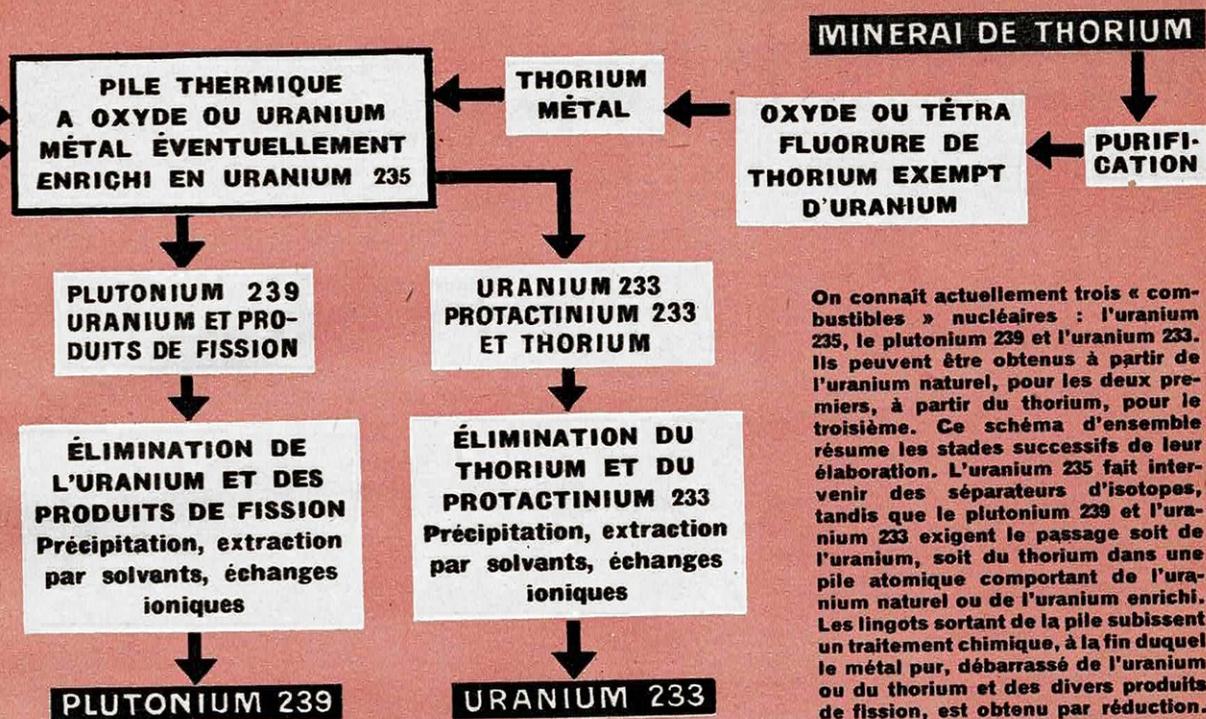
Cette hypothèse s'est trouvée confirmée par la découverte à Berkeley, par Seaborg et ses collaborateurs, des éléments 95 et 96. Le premier a reçu le nom d'américium (par analogie avec son homologue de la série du lanthane, l'euporium 63) et le second le nom de curium (en l'honneur des Curie et par analogie avec son homologue, le gadolinium 64, qui porte le nom du chimiste finlandais Gadolin).

L'américium fut obtenu au début de 1945 par Seaborg, James et Ghiorso en bombardant l'uranium par des particules alpha accélérées sous 40 millions d'électronvolts à l'aide du cyclotron de Berkeley. Une des réactions nucléaires ainsi provoquées, avec l'isotope 239, s'écrit :



Le plutonium 241 ainsi obtenu est instable et se transforme en américium Am241 par émission d'une particule bêta (période de 10 ans).

DES ISOTOPES FISSIBLES DE L'URANIUM ET DU PLUTONIUM

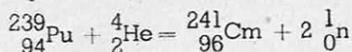


On connaît actuellement trois « combustibles » nucléaires : l'uranium 235, le plutonium 239 et l'uranium 233. Ils peuvent être obtenus à partir de l'uranium naturel, pour les deux premiers, à partir du thorium, pour le troisième. Ce schéma d'ensemble résume les stades successifs de leur élaboration. L'uranium 235 fait intervenir des séparateurs d'isotopes, tandis que le plutonium 239 et l'uranium 233 exigent le passage soit de l'uranium, soit du thorium dans une pile atomique comportant de l'uranium naturel ou de l'uranium enrichi. Les lingots sortant de la pile subissent un traitement chimique, à la fin duquel le métal pur, débarrassé de l'uranium ou du thorium et des divers produits de fission, est obtenu par réduction.

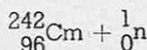
L'isolement de l'américium à l'état pur a été réalisé par Cunningham qui opérait, selon les procédés de l'ultramicrochimie, sur des quantités encore plus faibles que celles qui ont permis de préparer le plutonium ou le neptunium.

L'américium est beaucoup plus radioactif que le plutonium 239 : sa période est de 50 ans ; celle du plutonium de 24 000 ans. Il est environ trois fois plus radioactif que le radium et bien que son rayonnement gamma soit moins pénétrant, il doit être manipulé avec précaution.

Le curium fut obtenu fin 1941 par Seaborg, James et Morgan par bombardement de plutonium 239 par des particules alpha.



ou encore



Ce dernier isotope du curium s'obtient aussi par capture d'un neutron par l'américium 241, ce qui donne l'américium 242 qui se transforme en curium 242 par émission bêta. C'est le procédé actuellement employé au laboratoire de Los Alamos. L'américium 241 peut se fabriquer par capture successive de 2 neutrons par le plutonium 239, ce qui donne le plutonium 241 qui, par émission bêta, donne l'américium 241. On voit que ces réactions peuvent s'effectuer dans les piles nucléaires

dont on peut ainsi extraire des quantités pondérables d'américium et de curium. La manipulation du curium est très dangereuse étant donné son intense radioactivité alpha : 1 gramme équivaut à 15 kg de radium.

BERKÉLIUM ET CALIFORNIUM

L'élément 97, berkélium, a été obtenu au début de 1950 à Berkeley (Université de Californie), par Thompson, Ghiorso et Seaborg, en bombardant de l'américium par des particules alpha de plusieurs dizaines de millions d'électronvolts.

L'élément 98, californium, a été de même fabriqué en avril 1950 à Berkeley par Seaborg, Thompson, Ghiorso et Street, en bombardant du curium par des particules alpha.

La californium et le berkélium sont radioactifs alpha, le premier avec une période de 4,6 heures.

La séparation chimique de ces deux nouveaux éléments, les plus lourds que l'on connaisse, a été possible grâce aux prévisions sur leurs propriétés chimiques, déduites de celles de leurs homologues dans la série des terres rares.

Comme nous l'avons vu, dans le choix des noms des nouveaux éléments on s'est laissé guider par l'analogie entre la série des actinides et celle des terres rares (série des lanthanides) : ainsi l'américium correspond à l'euporium, le curium au gadolinium. De même le berkélium, produit à Berkeley,

ÉLÉMENTS RADIOACTIFS DATES DE DÉCOUVERTE

ÉLÉMENT RADIOACTIF	DÉCOUVERT PAR	EN
URANIUM	Henri Becquerel	1896
THORIUM	P. et M. Curie Schmidt	1898
POLONIUM	P. et M. Curie	1898
RADIUM	P. et M. Curie G. Bémont	1898
ACTINIUM	A. Debierne	1899
RADON	Rutherford et Soddy	1899
MESOTHORIUM	O. Hahn	1907
RADIOTHORIUM	O. Hahn	1907
IONIUM	Boltwood	1907
PROTACTINIUM	Hahn et Meitner	1914
FRANCIUM	M ^{lle} Perey	1939
NEPTUNIUM	Mc Millan et Abelson	1941
PLUTONIUM	Seaborg, Kennedy et Wahl	1942
ASTATINE	Karlik et Bernert	1943
AMERICIUM	Seaborg, James et Morgan	1945
CURIUM	Seaborg, James et Ghiorso	1945
BERKELIUM	Seaborg, James, Morgan et Ghiorso	1950
CALIFORNIUM	Seaborg, James, Morgan et Ghiorso	1950

● Les indications concernant l'uranium et le thorium se rapportent uniquement à la découverte de leurs propriétés radioactives. Ces éléments étaient connus depuis longtemps, l'uranium ayant été découvert par le chimiste allemand Klaproth en 1789 et le thorium par le chimiste suédois Berzélius en 1828. Le neptunium, le plutonium, l'américium, le curium, le berkelium et le californium sont des éléments transuraniens fabriqués au laboratoire ou dans les piles.

correspond au terbium, découvert dans des minerais de terres rares provenant d'Ytterby en Suède. L'homologue du californium est le dysprosium, dont le nom, tiré du grec signifie « difficile à atteindre » ; on ne peut considérer que la règle a été suivie qu'avec quelque complaisance, en considérant, avec Seaborg, que la Californie a été

la région que les pionniers américains venus de l'est ont éprouvé le plus de difficultés à atteindre dans les temps héroïques de la marche vers l'ouest

LES TRANSURANIENS DANS LA NATURE

A mesure qu'on connaîtra mieux les propriétés des éléments transuraniens obtenus artificiellement dans les laboratoires atomiques, il est vraisemblable qu'on retrouvera certains d'entre eux à très faible dose dans la nature. Déjà Seaborg et Perlmann ont montré en 1942 que la pechblende contient du plutonium (une partie de plutonium pour 10^{14} ou 100 000 milliards de parties de minerai).

La présence sur la terre de ce radioélément de vie relativement courte (24 000 ans) peut s'expliquer par sa formation continue à partir de l'uranium 238 bombardé par les neutrons « parasites » qui existent dans les matériaux terrestres, dans la radiation cosmique, ou qui sont émis lors des fissions spontanées. Cet uranium 238 capturerait un neutron en donnant de l'uranium 239 lequel, après émission de deux particules bêtas successives, se transformerait en plutonium 239.

Sera-t-il possible de faire la synthèse d'atomes encore plus lourds et plus complexes que ceux des transuraniens déjà obtenus, ou existe-t-il une limite théorique à ces synthèses ?

D'après ce qu'on savait de la structure des noyaux atomiques et de leur stabilité, les théoriciens avaient été amenés à fixer la limite au numéro atomique 137. Des théories plus récentes ramenaient cette limite à 96 et la liste des éléments aurait dû être close avec le curium. Nous venons de voir que les numéros 97 et 98 existent réellement. Seule l'expérience montrera si d'autres éléments lourds comme le numéro 100, pour lequel on a déjà proposé le nom de « centurium », peuvent être fabriqués.

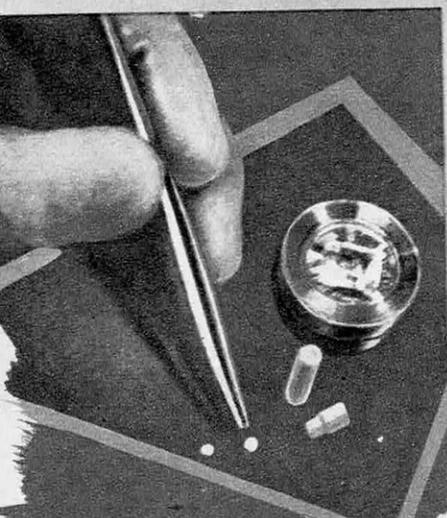
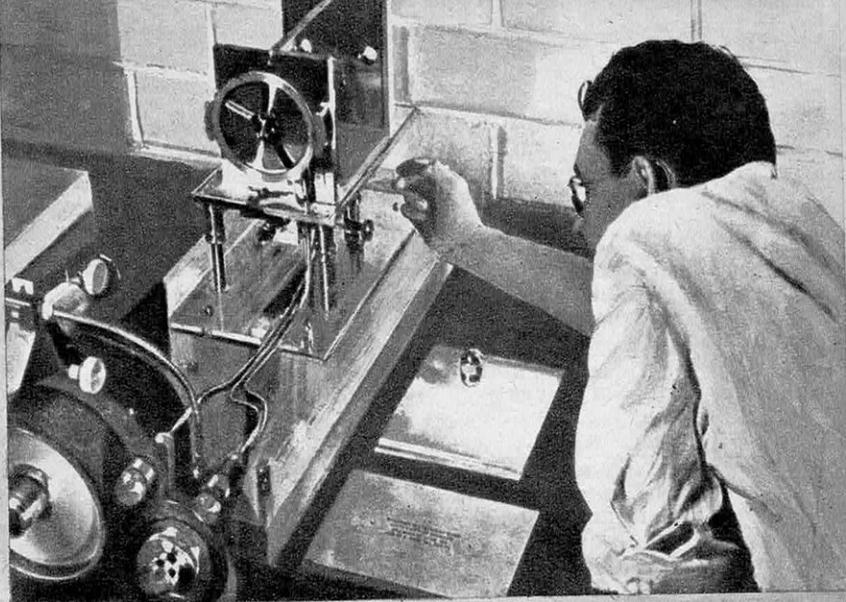
THORIUM ET URANIUM 233

Le thorium, découvert en 1829 par Berzélius est probablement une matière première de grand avenir pour l'industrie atomique car il permet de fabriquer un isotope fissionnable d'uranium, l'uranium 233.

Le thorium existe en quantités importantes dans la nature. Il est trois fois plus abondant que l'uranium dans l'écorce terrestre et il présente sur l'uranium l'avantage d'avoir été concentré par l'érosion naturelle en gisements facilement exploitables et bien distribués géographiquement. Les principaux minerais de thorium sont la thorite (silicate de thorium et d'uranium) et la thorianite (oxydes de thorium et d'uranium) que l'on trouve surtout dans l'île de Ceylan et aussi dans le Texas, en Norvège et à Madagascar. Jusqu'à présent la seule source commerciale de tho-

MICROCHIMIE

La manipulation de radioéléments en quantités à peine pondérables a fait naître une série de techniques nouvelles en chimie. A droite, une balance à fil de torsion utilisée pour peser les minimes quantités sur lesquelles opère l'ultramicrochimie. Le fléau de la balance est fixé à un fil de quartz qui va de l'arrière de la balance à la roue que l'on voit de face. Quand une légère coupelle de platine, servant de plateau à la balance, est suspendue au fléau, celui-ci pivote, tordant le fil de quartz. Le poids de la coupelle contenant est alors déterminé d'après la valeur de l'angle dont il faut faire tourner la roue pour ramener le fléau à sa position d'équilibre primitive.



● Un chimiste introduit dans un microcreuset un composé à réduire par chauffage dans un gaz.



● Dosage d'une solution à l'aide d'une pipette capillaire qui permet de manipuler des microgouttes.



● Le microcreuset est placé dans un four électrique alimenté en courant de haute fréquence.

rium a été la monazite, phosphate complexe de terres rares qui contient jusqu'à 5 à 8 % et parfois plus d'oxyde de thorium.

Les principaux gisements se trouvent aux Indes, sur la côte, à l'ouest de la pointe sud, à Travancore, où ils s'étendent sur plus de 100 km, du cap Comorin à Quilon. On estimait, en 1925, les réserves à 2 millions de tonnes de monazite contenant 6 à 8 % d'oxyde de thorium. On trouve également des monazites sur la côte est près de la pointe sud, et plus au nord, dans la région de Bihar et Ocrissa, mais ces gisements ne sont pas exploités.

Les gisements du Brésil sont probablement d'importance comparable à ceux de l'Inde. Ils s'étendent sur 400 km environ sur les côtes des Etats d'Espirito Santo et de Bahia ; on en trouve aussi à l'intérieur des terres et sous des dunes. Leur teneur moyenne est de 0,5 % d'oxyde de thorium.

Les gisements de Ceylan, sur les côtes ouest et nord, sont beaucoup moins étendus, mais très riches. On en trouve encore aux Indes néerlandaises (Billiton), en Australie (sur la côte est, dans les Etats de Queensland et de Nouvelles Galles du Sud), dans les Etats Malais (sous-produit de l'extraction de l'étain), en Russie, à Madagascar, en Afrique et aux Etats-Unis.

L'extraction du minerai s'effectue par des méthodes primitives, la main-d'œuvre indigène le chargeant dans des paniers et le transportant ainsi à l'usine de traitement qui opère par séparation magnétique après tamisage et enrichissement.

Les monazites sont les seules sources de terres rares actuellement exploitées. Certaines ont des applications industrielles, comme le cérium, le lanthane, le néodyme et le praséodyme. D'autres, comme le samarium,

l'euporium, le terbium, l'erbium ne servent qu'à des recherches de laboratoire. Les terres rares sont utilisées dans la fabrication des noyaux d'électrodes en charbon pour arcs électriques. Leurs oxydes peuvent servir au polissage des verres d'optique. Avec le lanthane on fabrique certains verres spéciaux et des filtres pour la photographie aérienne.

Le thorium naturel se compose de 7 isotopes, dont le plus abondant est le thorium 232. Ce dernier, absorbant un neutron, donne du thorium 233, radioactif, qui, par émission bêta, avec une période de 23 minutes, se transforme en protactinium 233. Une deuxième émission bêta, avec une période de 27 jours donne l'isotope fissionnable 233 de l'uranium. Ces opérations peuvent s'effectuer à l'échelle industrielle dans les piles, où les neutrons peuvent irradier le thorium sous forme de carbonate ou de tétrafluorure. L'uranium 233 pourra être extrait par des solvants organiques, après une période d'attente de 4 à 6 mois, nécessaire pour que la presque totalité du protactinium ait eu le temps de se désintégrer (ce délai correspond à cinq à six fois la période de désintégration du protactinium) ; on assure par cela même la disparition des produits de fission les plus gênants, dont la période est courte. Néanmoins, toutes les opérations de traitement doivent être conduites à distance et avec de grandes précautions, tous les produits étant fortement radioactifs. On trouve en particulier toujours présent dans la masse du mésothorium 228, produit de désintégration du thorium, beaucoup plus actif que ce dernier (période 6,7 ans au lieu de 13 milliards d'années).

L'uranium 233 étant toujours formé en faible quantité dans le thorium, il faut traiter ce dernier avant irradiation pour en éliminer toute trace appréciable d'uranium naturel qui se mélangerait à l'isotope que l'on veut obtenir. On pourrait aussi, dès la sortie du thorium irradié de la pile, en extraire très rapidement le protactinium qui, en se désintégrant lentement par la suite, livrerait de l'uranium 233 très pur.

LES MATÉRIAUX DES PILES

Les éléments fissionnables jouent dans une centrale nucléaire un rôle analogue à celui du charbon dans les centrales thermiques classiques. Dans les deux cas, il ne suffit pas de disposer du « combustible » pour récolter de l'énergie utilisable. Il faut encore et surtout mettre en œuvre de nombreux matériaux spécialement adaptés au service que l'on en attend.

On a pu calculer que, pour construire une pile capable de développer 100 000 kW, il faut, pour le modérateur et le réflecteur de neutrons, environ 100 tonnes de béryllium et 400 tonnes de graphite, l'un pouvant d'ailleurs, dans une certaine mesure, remplacer l'autre. Pour le contrôle de la réaction et le

réglage du « niveau » de fonctionnement de la pile, il faut une cinquantaine de kilogrammes de bore ou de cadmium. Pour l'évacuation de la chaleur dégagée par la fission, il faut, si le refroidissement s'effectue par de l'hélium, environ 30 mètres cubes de ce gaz, ou s'il est obtenu par un métal en fusion, plusieurs tonnes de bismuth ou de plomb.

Tous ces matériaux doivent être de la plus grande pureté. Le graphite, en particulier, ne doit pas contenir plus de un millionième de bore, qui absorberait en pure perte les neutrons. L'industrie nucléaire pose donc au chimiste et au métallurgique des problèmes ardu de fabrication. Du point de vue de l'approvisionnement en matières premières, seul le béryllium est à considérer. Nous passerons rapidement en revue quelques-uns de ces matériaux.

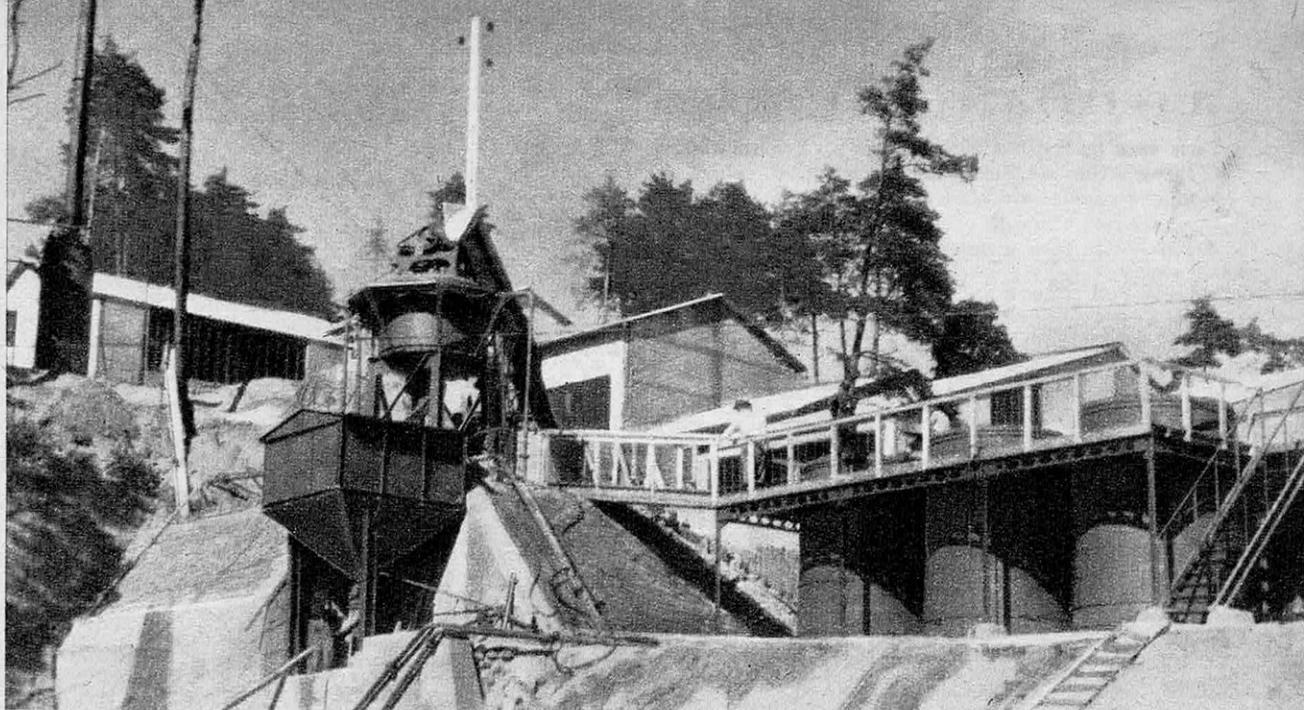
Le **graphite** utilisé par l'industrie nucléaire n'est pas le graphite naturel, mais celui obtenu à partir du coke de pétrole, résidu de sa distillation. Ce coke de pétrole est couramment utilisé pour la confection des électrodes servant à la fabrication de l'aluminium. Les Etats-Unis en consomment environ 1 500 000 tonnes par an. La matière première ne manque donc pas. Encore faut-il le purifier au maximum.

Le principal producteur mondial de **bore** est les Etats-Unis, où il est extrait des eaux saumâtres de Searles et Owens Lake, près de Death Valley, en Californie et des mines voisines de kernite et de colemanite (borates de sodium et de calcium). La production peut être évaluée à 100 000 t d'oxyde de bore par an.

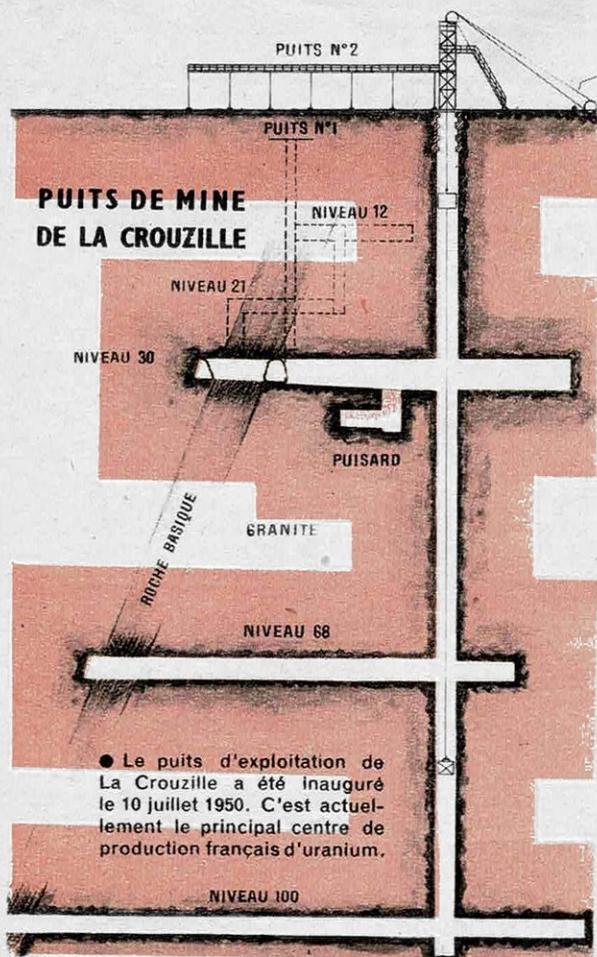
Les Etats-Unis sont pratiquement les seuls producteurs d'**hélium**, retiré des gaz naturels abondants dans le Texas et l'Oklahoma. Le gisement d'Amarillo, dans le Texas, livrait avant guerre à lui seul 250 000 m³ de gaz. L'hélium à 98,2 % de pureté est très bon marché, un demi-dollar le mètre cube, mais son exportation est interdite.

Reste le **béryllium**. Le seul minerai exploitable à l'heure actuelle est le béryl, dont les gisements principaux se trouvent au Brésil, en Argentine, aux Indes, aux Etats-Unis et en U. R. S. S. Il en existe probablement en Chine, en Colombie au Venezuela et dans l'Angola, mais les gisements n'y ont pas encore été suffisamment prospectés. La teneur en oxyde de béryllium est assez faible et ne dépasse pas en général 11 %. Il faut, pour préparer 100 tonnes de béryllium métal, traiter environ 2000 tonnes de béryl, ce que le Brésil produit en un an. La république Argentine produit à peu près autant, les Indes 800 t par an et les Etats-Unis seulement 350 tonnes. Les réserves de minerais paraissent assez faibles.

L'usinage des lingots de béryllium est une opération très dangereuse, les poussières de béryllium étant extrêmement toxiques. Le prix de revient actuel du béryllium est par ailleurs plus élevé que celui de l'eau lourde.



L'USINE DE CONCENTRATION DES MINERAIS D'URANIUM DE LACHAUX, DANS LE PUY-DE-DOME



L'URANIUM EN FRANCE ET DANS L'UNION FRANÇAISE

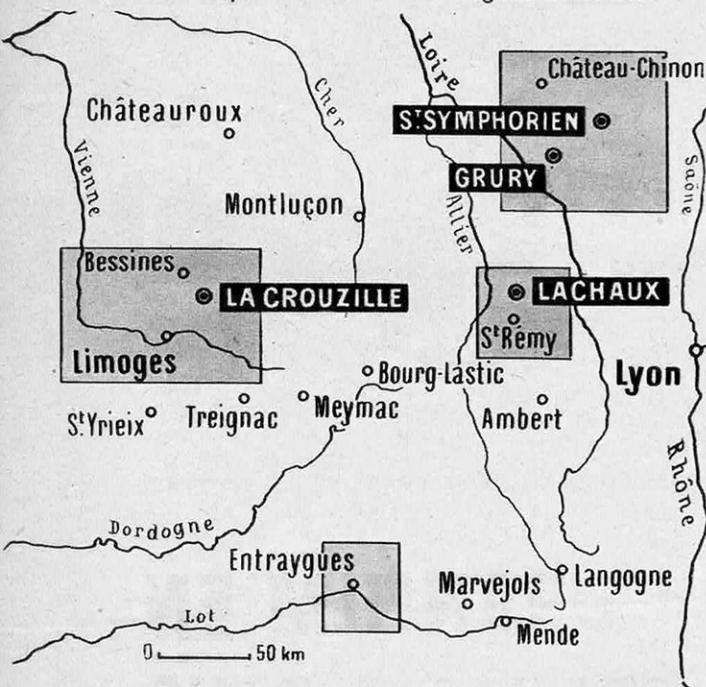
LES premières recherches de minerais d'uranium exploitables, sur le territoire français, remontent au début du siècle. La découverte du radium par Pierre et Marie Curie, en 1898, avait mis la question à l'ordre du jour. On s'orienta tout naturellement vers le Massif Central où les études minéralogiques avaient fait connaître de nombreux indices.

La région d'Autun attira particulièrement les prospecteurs. C'est elle, en effet, qui a donné son nom à l'autunite, phosphate d'uranium et de chaux, découverte à Saint-Symphorien-de-Marmagne par de Champeaux dès 1800. De là, les recherches s'étendirent bientôt à tout le Morvan, et bien avant la première guerre mondiale, on connaissait plusieurs points intéressants dont les principaux étaient Grury en Saône-et-Loire et Lachaux dans le Puy-de-Dôme.

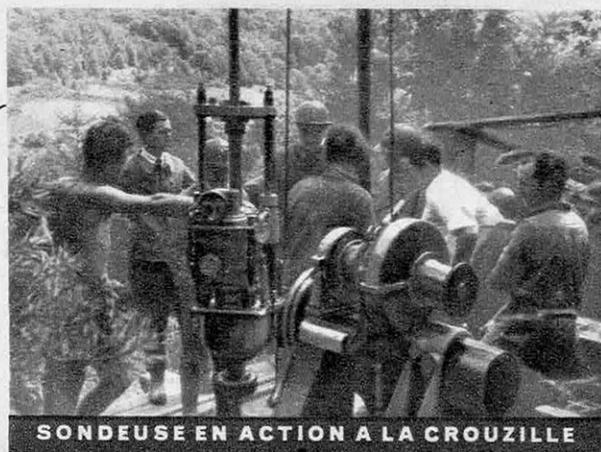
Le célèbre minéralogiste français Alfred Lacroix avait d'autre part attiré l'attention sur l'existence, dans les pegmatites de Madagascar, de niobotantalates d'uranium, et l'étude géologique des territoires d'Outre-Mer avait révélé l'existence d'autunite en Côte d'Ivoire.

GISEMENTS FRANÇAIS D'URANIUM

C'est vers le Massif Central que s'est orienté l'effort de prospection de l'uranium. Le principal centre de production actuel est à la Crouzille. Puis vient Lachaux où existe une usine de concentration du minerai. Des recherches se poursuivent dans les régions encadrées.



PROSPECTION PRÈS D'ISSY-L'ÉVÊQUE



SONDEUSE EN ACTION À LA CROUZILLE

Un début d'exploitation à petite échelle fut entrepris dans la région d'Autun, dans le Puy-de-Dôme, et à Madagascar, mais tout fut abandonné lorsque les minerais du Nord canadien et surtout du Haut Katanga belge apparurent sur le marché. La concurrence était imbattable.

Le Commissariat à l'Énergie Atomique, créé en 1945, mit à profit les résultats de ces recherches préliminaires et fragmentaires. Il comprenait dès l'origine une Direction des Recherches et Exploitations minières consacrée aux minerais susceptibles d'intéresser l'énergie atomique, plus spécialement aux minerais d'uranium.

Cet organisme dispose aujourd'hui d'un budget propre de l'ordre du milliard ; il occupe 56 ingénieurs, 170 agents de maîtrise ou prospecteurs, 410 ouvriers européens et environ 1 200 indigènes. Son activité s'exerce non seulement en France et à Madagascar, mais aussi en Afrique Equatoriale et en Afrique Occidentale française.

LES GISEMENTS DE LA MÉTROPOLÉ :

Il existe actuellement en France trois centres principaux, Grury, Lachaux et La Crouzille.

Les deux premiers, déjà cités, étaient connus avant 1945. Le troisième est dû aux

efforts de prospection poursuivis depuis cette date.

À Grury, en Saône-et-Loire, plusieurs centaines de mètres de galeries ont permis de mettre en évidence un tonnage assez notable de minerai à faible ou moyenne teneur. Depuis six mois, les recherches s'orientent vers des indices plus prometteurs, près d'Issy-l'Évêque.

À Lachaux, dans le Puy-de-Dôme, on a reconnu l'existence d'un tonnage important de minerai à faible teneur justifiant la construction d'une usine de concentration mécanique, à laquelle a été adjoindue récemment une usine de concentration chimique. D'autres points de minéralisation jusqu'ici inconnus ont été repérés dans la région.

C'est à La Crouzille, à 20 km au nord de Limoges, que se trouve actuellement le centre essentiel de production ; il faut le mettre entièrement à l'actif du Commissariat à l'Énergie Atomique, ainsi que plusieurs autres points de la même région où des indices intéressants ont été découverts.

Le premier puits d'exploitation, de 100 m de profondeur, y a été inauguré et mis en service l'été dernier.

D'autres travaux de prospection sont en cours en France, en particulier dans la région d'Entraygues, dans l'Aveyron, où de nombreux affleurements ont été soigneusement repérés.



● A Madagascar où des indices de minerai d'uranium avaient été signalés depuis longtemps, la prospection se poursuit activement depuis 1946. Ci-dessus

chantier de recherche de niobotantalates à Ambatofokikely. Un gisement d'autunite exploitable a été également mis en évidence récemment à Madagascar.

LES GISEMENTS DE LA FRANCE D'OUTRE-MER

En Afrique Equatoriale, le bassin du Niari (Moyen Congo), dont les terrains rappellent les formations uranifères du Congo belge, a fait l'objet d'une prospection extensive

qui s'est concentrée actuellement dans le secteur de Boko-Songo.

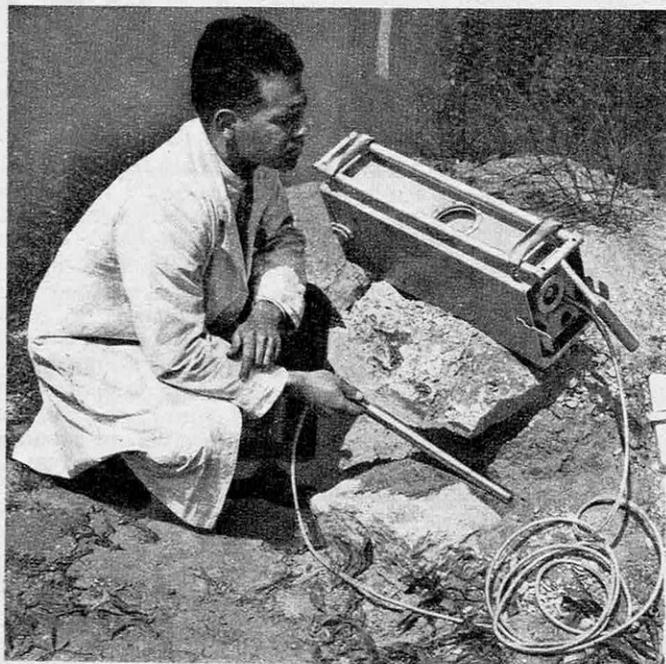
En Afrique Occidentale, une mission de moindre importance a trouvé de nouveaux indices de minerais d'uranium ainsi que de thorium (monazite).

Mais c'est surtout à Madagascar que de très importants travaux de prospection ont été entrepris depuis 1946. Ils ont démontré l'existence près d'Antsirabe d'un gisement d'autunite exploitable et aussi la présence de pechblende dans la région de Malakialina.

Des aujourd'hui, en présence de ces résultats, il est permis de se montrer optimiste. La France, tant dans son territoire métropolitain que dans les territoires d'Outre-Mer, dispose de gisements d'uranium exploitables.

Prof. Marcel Roubault.

Directeur des Recherches et Exploitations minières au Commissariat à l'Énergie atomique.



◀ Cet appareil (AVP - 300, réalisé par le Service des Constructions Électriques du Commissariat à l'Énergie Atomique) permet la prospection de l'uranium dans les sondages et les fissures du sol grâce au compteur de Geiger adapté à l'extrémité d'un câble.

LA PROTECTION CONTRE LES RAYONNEMENTS

HYGIÈNE DU TRAVAIL « ATOMIQUE »

La pollution de l'atmosphère des villes par les fumées industrielles préoccupe depuis longtemps les hygiénistes. Des mesures plus ou moins efficaces ont dû être prises pour atténuer la nocivité des produits rejetés dans l'air, lorsqu'il n'était pas possible, pour des raisons d'approvisionnement en matières premières ou de ressources en main-d'œuvre, d'en éloigner la source des agglomérations. De même, il a été nécessaire de régler les conditions dans lesquelles pouvaient être stockés ou évacués les résidus de fabrication de nature toxique, ou devaient être purifiées les eaux résiduaires avant d'être rejetées dans une rivière. L'hygiène du travail, dans les industries où sont manipulés, aux différents stades des fabrications, des produits plus ou moins toxiques, a fait l'objet de nombreuses études et est strictement réglementée dans tous les pays.

Un danger beaucoup plus grave est apparu avec la construction des piles atomiques et des usines pour l'isolement du plutonium et l'élimination des produits de fission des lingots extraits de ces piles. Les quantités de matières radioactives qui y sont manipulées sont des milliers de fois plus importantes que dans les hôpitaux. Les radiations qu'elles émettent ont sur l'organisme une action comparable à celle des rayons X ou du rayonnement du radium. Les effets sont d'autant plus graves qu'ils sont insidieux. Nos organes des sens ne nous révèlent pas le danger, et des lésions sérieuses peuvent être provoquées par de très faibles intensités réparties sur de très longues périodes. On sait le tribut payé depuis le début du siècle par les chercheurs et les médecins qui ont manipulé les produits radioactifs avant qu'on eût appris à se protéger efficacement.

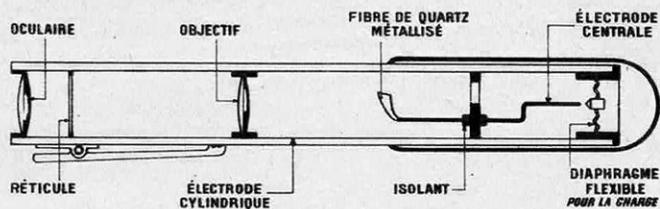
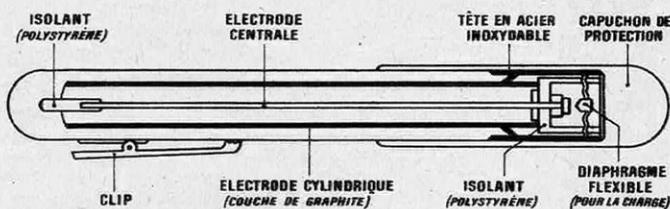
Dans le cas qui nous occupe, la menace ne porte pas seulement sur le personnel des



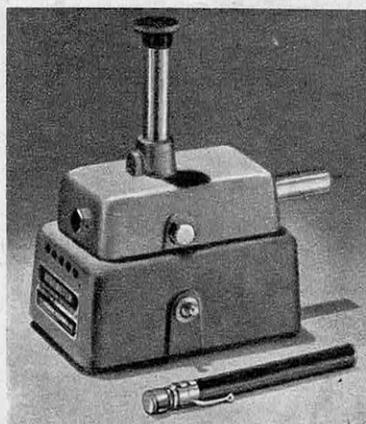
piles ou des usines nucléaires, mais aussi sur les habitants du voisinage, voire même la population de très larges territoires. Aussi des études extrêmement poussées ont-elles été faites pour dépister et combattre le risque.

Dès que fut décidée, en Amérique, la construction des premières installations pour la fabrication industrielle de l'uranium 235 et du plutonium 239 destinés aux bombes atomiques, plusieurs laboratoires, notamment à l'Université de Chicago, furent chargés de mettre au point tout un dispositif de sécurité repérant les zones dangereuses et signalant toute contamination des objets, outils, instruments, vêtements, par des produits radioactifs. En même temps, les biologistes déterminaient, par des expériences sur les animaux, quelles étaient les doses de radiations que l'on devait considérer comme dangereuses.

Des règles de sécurité étaient édictées et



● Chambres d'ionisation portatives, de la dimension d'un stylo, qui mesurent le rayonnement reçu. La décharge de l'appareil est mesurée par l'appareil en haut, à droite (Victoreen); on lit directement la décharge s'il s'agit d'une chambre d'ionisation contenant une fibre de quartz et un système optique inclus dans la monture.



enseignées au personnel approchant de près ou de loin les piles. Enfin, la surveillance des abords des usines, puis des régions éloignées, s'organisait.

Les résultats, dans l'ensemble, peuvent être considérés comme très satisfaisants : de 1942 à 1946, le Manhattan Engineer District n'eut à déplorer que deux morts par radiations (l'un d'eux avait ingéré une quantité infime de plutonium) et huit accidents provoqués par de trop fortes doses de rayons gamma et de neutrons lors d'expériences sur les masses critiques à Los Alamos. Depuis 1947, on a enregistré seulement cinq brûlures à Eniwetok par maniement imprudent de matériaux contaminés par des fragments de fission émetteurs de rayons bêta. Partout où les mesures de sécurité sont strictement appliquées, aucun danger n'est plus à craindre.

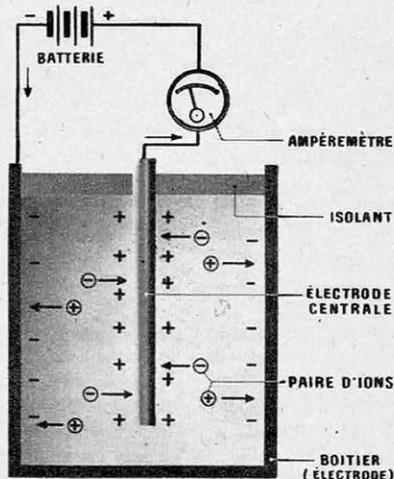
Si l'on fait la moyenne des doses de rayonnement reçues pendant l'année 1949 par l'ensemble des travailleurs de Hanford et de Oak Ridge, on trouve seulement 0,2 roentgen, alors que la Commission de l'Energie Atomique fixe à 15 roentgens la dose annuelle de parfaite sécurité.

LES RAYONNEMENTS

Les rayonnements d'origine nucléaire n'exercent aucune action directe sur aucun de nos sens. Ils ne peuvent ni être vus ni être sentis. Ils peuvent être constitués soit de particules matérielles, neutrons, particules alpha ou bêta, soit d'ondes électromagnétiques de même nature que la lumière visible, mais de beaucoup plus courte longueur d'onde, rayons X ou rayons gamma.

Les particules alpha, relativement très pesantes, sont arrêtées par de très faibles épaisseurs de matière. Elles ne franchissent pas normalement la première couche de l'épiderme; elles peuvent cependant provoquer de graves dommages lorsqu'elles sont émises par des substances qui ont pénétré dans l'organisme et se sont déposées dans des organes vitaux.

Les particules bêta, qui sont des électrons, sont un peu plus pénétrantes; comme elles franchissent



➡ Dans une chambre d'ionisation, le passage d'une radiation libère des ions qui vont réduire la différence de potentiel établie entre fil et armature.

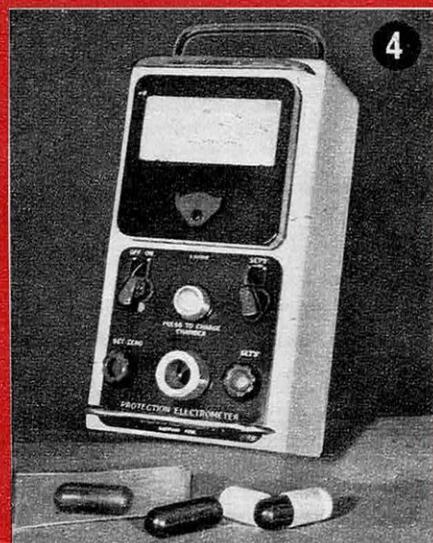
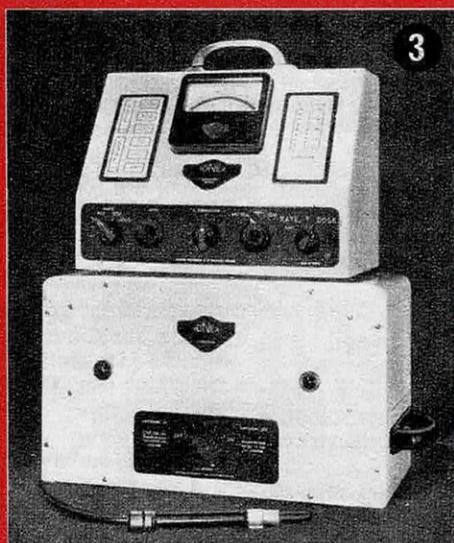
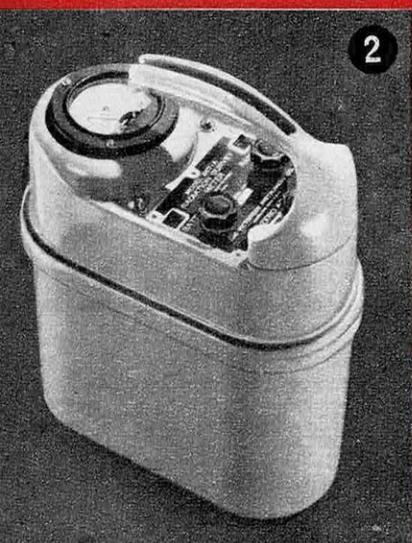


1 Cet appareil portable indique en roentgens par minute les intensités des rayonnements X et gamma. Il comporte des chambres d'ionisation interchangeables, de diverses sensibilités, adaptables à l'extrémité du tube pour des applications et mesures variées (Victoreen).

2 Appareil de mesure portable et étanche pour le rayonnement gamma, à lecture directe. Il permet d'évaluer jusqu'à 2,5 milliroentgens par heure et convient pour la surveillance de l'intensité du rayonnement dans des locaux voisins de sources radioactives (Victoreen).

3 Comportant une chambre d'ionisation à l'extrémité d'un tube flexible, cet appareil permet la mesure précise des doses de rayonnement reçues en des points bien déterminés du corps. Il peut servir à contrôler des traitements thérapeutiques (Baldwin Instrum. Co).

4 Les chambres d'ionisation au premier plan se portent dans la poche. On les charge en les pressant dans l'un des trous de l'appareil, et on mesure leur décharge en les insérant dans le second trou. On déduit de la valeur de la décharge la dose de rayonnement reçue (Baldwin).



rarement plus de 5 ou 6 millimètres dans les tissus, les dommages qu'elles provoquent restent assez limités.

Les neutrons, au contraire, suivant leur vitesse, peuvent traverser jusqu'à 1 mètre et plus de tissu vivant et sont particulièrement dangereux, d'autant plus qu'ils sont très facilement absorbés avec émission de rayons gamma par l'hydrogène toujours présent en abondance dans le corps humain, dont l'eau est le constituant de beaucoup le plus abondant.

Les rayons gamma enfin sont extrêmement pénétrants et, pour cela, et aussi parce qu'ils sont émis en particulière abondance par les corps radioactifs et au cours de la plupart des réactions nucléaires, ils constituent le risque majeur de l'industrie atomique.

Tous ces rayonnements exercent leur action nocive par ionisation, c'est-à-dire par le fait qu'ils arrachent des électrons aux atomes et aux molécules qu'ils frappent et dissocient ces dernières. Les cellules de l'organisme peuvent être ainsi lésées ou tuées.

LA DÉTECTION DES RAYONNEMENTS

C'est également leur action ionisante qui est mise à profit pour détecter les rayonnements.

Une particule électrisée traversant un gaz laisse sur son passage des paires d'ions des deux signes, formés par arrachement d'électrons aux atomes et molécules rencontrées.

Un électron (particule bêta) produit dans l'air à la pression atmosphérique entre 30 et 300 paires d'ions par centimètre, suivant son énergie.

Une particule alpha émise par un corps radioactif en libère entre 40 000 et 100 000, et un fragment de fission un nombre encore beaucoup plus grand.

Les rayonnements neutres, rayons gamma et neutrons, sont également détectés grâce à leur action ionisante indirecte. L'interaction des rayons gamma avec la matière s'accompagne de projection d'électrons de grande énergie, provoquant l'ionisation sur leurs parcours.

Les neutrons rapides, frappant des noyaux d'hydrogène, les projettent à grande vitesse sous forme de protons ionisants. La capture des neutrons lents par du bore provoque la formation d'ions lithium et de particules alpha qui sont tous deux ionisants.

CHAMBRES D'IONISATION

Un des détecteurs les plus simples est la « chambre d'ionisation », constituée par une boîte avec deux électrodes entre lesquelles on établit une différence de potentiel. Les ions formés au passage du rayonnement, attirés par les électrodes, les déchargent partiellement.

Sur ce principe sont construits des appareils divers, en particulier des chambres d'ionisation de poche, de la dimension d'un stylographe, que portent constamment sur eux, en Amérique, les membres du personnel des usines et des laboratoires nucléaires. Un fil central constitue une des électrodes et un revêtement de graphite sur la paroi intérieure constitue l'autre. L'appareil est chargé au début de la journée à un potentiel connu ; la « fuite », mesurée à la fin du travail à l'aide d'un électromètre, indique la dose de rayonnement qui a traversé l'appareil. Un modèle un peu différent comporte, fixé sur le fil central, une fibre de quartz métallisée formant ressort et qui diverge plus ou moins par répulsion électrostatique, suivant la charge de l'appareil : il n'est plus besoin d'un électromètre pour la mesure, car la fibre peut être observée à tout instant à l'aide d'un petit microscope monté à demeure dans l'axe de l'appareil.

En alimentant constamment les électrodes d'une chambre d'ionisation par une batterie, on peut mesurer avec un milliampèremètre le courant d'ionisation, convenablement amplifié par des tubes à vide, car il est toujours très faible.

Si la paroi de la chambre d'ionisation a une

épaisseur supérieure à 1 mm, elle ne sera sensible qu'aux rayonnements gamma capables de traverser une telle épaisseur. Pour mesurer les sources de rayons alpha ou bêta, on les placera soit à l'intérieur de la chambre, soit à l'extérieur, devant une fenêtre pratiquée dans la paroi de la chambre et recouverte d'une feuille très mince d'aluminium ou de mica.

Pour mesurer un faisceau de neutrons, la chambre peut être remplie de trifluorure de bore, ou sa surface interne sera tapissée de bore. Si le bore est enrichi en isotope B10, la chambre sera d'autant plus sensible ; cet isotope capturant surtout les neutrons lents, ou entourera la chambre d'un produit hydrogéné, eau ou paraffine (5 cm au moins, 10 cm au plus).

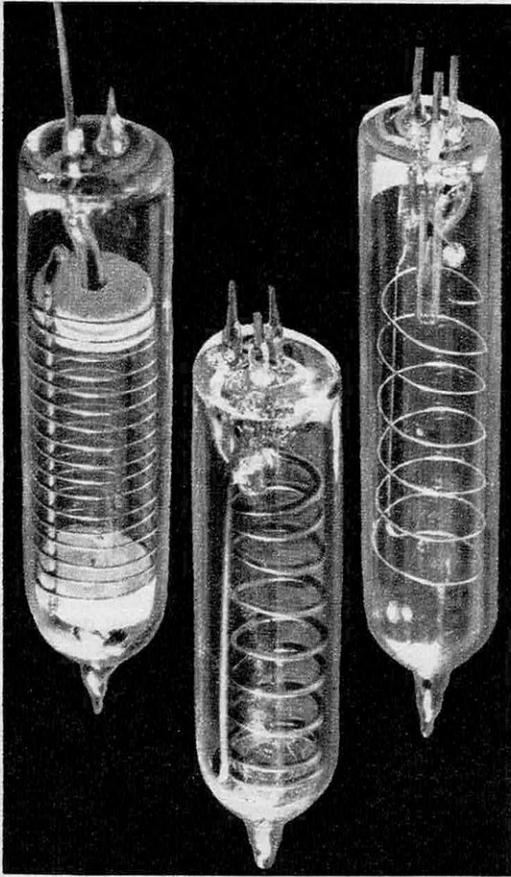
Un autre procédé de dosage des neutrons consiste à remplir la chambre d'hydrogène ou à la tapisser avec un sel d'uranium. Dans le premier cas, on mesure l'ionisation provoquée par les protons projetés par les neutrons rapides ; dans le second, on mesure, sur un fond continu dû à la radioactivité de l'uranium, l'ionisation provoquée par les produits de fission lorsque l'uranium 235 capte un neutron.

COMPTEURS DE GEIGER

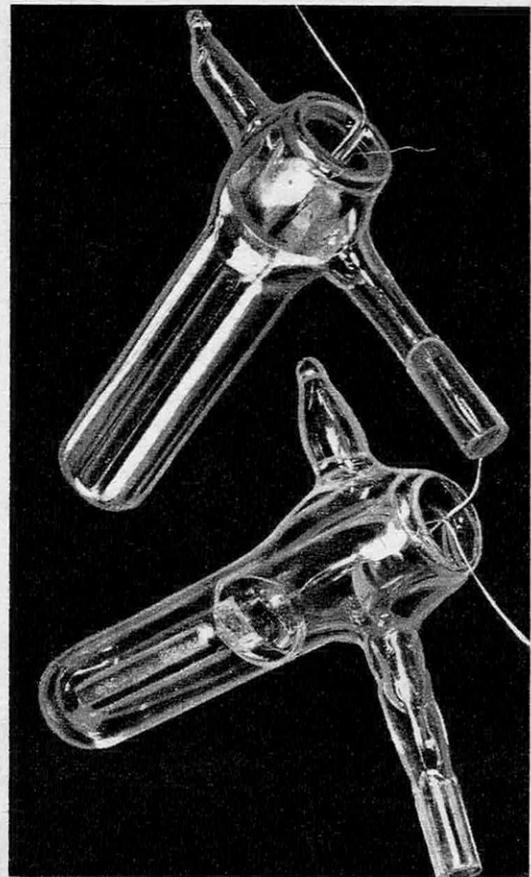
Le compteur de Geiger se distingue de la chambre d'ionisation par le fait que la tension entre les électrodes est très élevée (de l'ordre de 1 000 volts), de sorte que les ions formés au passage d'un rayon acquièrent une grande vitesse et ionisent eux-mêmes le gaz traversé ; il se produit à chaque passage une véritable avalanche d'électrons. Pour limiter la durée de la décharge ainsi déclenchée, l'atmosphère du tube, sous pression réduite, contient des vapeurs d'un produit organique



Le canon de ce pistolet est une chambre d'ionisation sensible aux rayons X, gamma et bêta. La lecture directe du milliampèremètre peut renseigner sur la distance minimum à respecter dans la manipulation d'une substance radioactive (Ionomètre Sophymo).



● Compteurs de Geiger-Muller à paroi de verre mince permettant de compter des particules de faible énergie dans des solutions radioactives où les tubes sont plongés. (Service des Constr. Electr. C.E.A. Chatillon).



● Chambres d'ionisation à trifluorure de bore non enrichi en isotope B10 et à basse pression pour comptage de neutrons lents. Longueur 20 mm, diamètre 8 mm. (Service des Constr. Electr. C.E.A. Chatillon)

qui l'étouffent (cette atmosphère est généralement constituée d'un mélange d'air, d'argon et d'alcool).

On obtient ainsi des impulsions de l'ordre du millionième de seconde, que l'on utilise soit pour l'écoute directe par écouteurs ou haut-parleurs, soit pour actionner le le numérateur d'un compteur par l'intermédiaire d'un amplificateur à lampes.

Il est évident que lorsque la cadence des particules est très élevée, certaines d'entre elles ne seront pas comptées, car les avalanches s'enchevêtrèrent si elles sont, par exemple, espacées de moins de un millionième de seconde.

Par ailleurs, le numérateur du compteur a une certaine inertie mécanique ; il n'aura pas encore terminé son va-et-vient qu'une ou plusieurs particules auront déjà actionné l'amplificateur.

Les numérateurs les plus perfectionnés que l'on ait fabriqués jusqu'ici peuvent compter deux impulsions distantes d'au moins un centième de seconde. Ils peuvent, autrement dit, compter 6 000 impulsions par minute

sans erreur appréciable. Pour compter au dessus de ce chiffre, il faut, soit faire subir des corrections aux nombres observés au numérateur, corrections acceptables jusqu'à une cadence double, c'est-à-dire 12 000 par minute, soit, pour les cadences plus élevées, faire intervenir des « échelles » démultiplicatrices. Ces échelles dites de 2, de 4, de 8, de 10, etc., sont capables d'accumuler 2, 4, 8, 10, etc. impulsions électriques avant de transmettre un signal au numérateur.

On parvient par cet artifice à éviter l'inertie mécanique.

Le rendement d'un compteur de Geiger-Muller aux particules bêta est supérieur à 95 %.

Si on veut mesurer un flux de rayons gamma, on doit entourer la coque par un cylindre d'un métal lourd (cuivre ou plomb) de plus de 1 mm d'épaisseur. Les rayons gamma arrachent des électrons à ce cylindre et ces électrons traversent ensuite le tube et actionnent le compteur. Le rendement en gamma est de l'ordre de 0,30 %, autrement dit, sur 1 000 rayons gamma qui traversent un comp-

teur, on enregistre en moyenne 3 impulsions. On fabrique aussi des compteurs sensibles aux neutrons en les remplissant avec du trifluorure de bore. Leur rendement est de l'ordre de 1 sur 10 000.

Les compteurs de Geiger sont extrêmement répandus aux Etats-Unis. La demande ayant considérablement augmenté depuis 1945, la fabrication en série a été rendue possible et les prix sont constamment en baisse. On y trouve des tubes à 3 dollars la pièce, soit à peine 1 000 francs, alors que ceux fabriqués en France sont vendus plus de 10 000 francs.

LES PHOTOMULTIPLICATEURS ET LES ÉMULSIONS PHOTOGRAPHIQUES

Lorsque les rayonnements traversent non plus des gaz, mais des solides ou des liquides, les phénomènes sont tout à fait analogues, quoique plus compliqués. Les charges libérées provoquent une augmentation de la conductibilité électrique et on peut mettre ce phénomène à profit pour réaliser des détecteurs très sensibles.

Les rayonnements peuvent aussi être décelés et mesurés grâce à la fluorescence qu'ils excitent. Certains cristaux, en particulier, ont une fluorescence particulièrement vive. On les monte entre la source de rayonnement et la première électrode d'un photomultiplicateur (dispositif combinant une cellule photoélectrique avec un multiplicateur d'électrons). De tels compteurs ont une très grande sensibilité ; ils sont de création récente et utilisent des cristaux de chlorure d'argent, d'iodure de potassium, de diamant, de tungstate de calcium, d'iodure de sodium, de naphthalène ou d'anthracène.

Nous rappellerons enfin que les rayonnements sont capables de provoquer des modifications d'ordre chimique comme con-

séquence de l'ionisation ou de l'excitation des molécules qu'ils rencontrent. Ils provoquent en particulier la formation d'images latentes dans les émulsions photographiques. Nous avons dit le rôle qu'a joué la plaque photographique dans la découverte de la radioactivité par Henri Becquerel. Les émulsions photographiques sont utilisées sur une grande échelle pour le contrôle des doses de rayonnement reçues par le personnel des laboratoires. Par ailleurs, de nombreux laboratoires de recherche se sont spécialisés dans l'emploi d'émulsions spéciales pour l'étude des rayonnements, en particulier du rayonnement cosmique.

D'OU VIENT LE DANGER ?

Les radiations nocives mettant en danger les tissus vivants peuvent être d'origine externe ou interne.

Il s'agit surtout, dans le premier cas, de rayons gamma émis soit par des sources plus ou moins importantes, comme des échantillons de laboratoire, des accélérateurs de particules ou des piles atomiques, soit plus insidieusement par des appareils ou objets « contaminés » par des matières radioactives ; il s'agit plus rarement en pratique de neutrons, car ceux-ci ne s'échappent de certaines installations qu'en quelques points bien localisés.

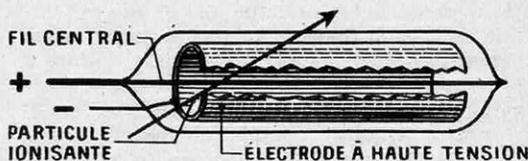
Dans le second cas, la nature et l'origine des radiations nocives sont beaucoup plus variées. Il peut s'agir, par exemple, de gaz radioactifs, de poussières ou de brouillards entraînés dans les poumons par la respiration et passant dans la circulation générale, ou de produits radioactifs souillant des aliments, ou encore d'isotopes radioactifs créés dans des tissus qui ont été traversés par un flux de neutrons, et se désintégrant en tuant les cellules qui les contiennent ou les cellules voisines.

LE ROENTGEN

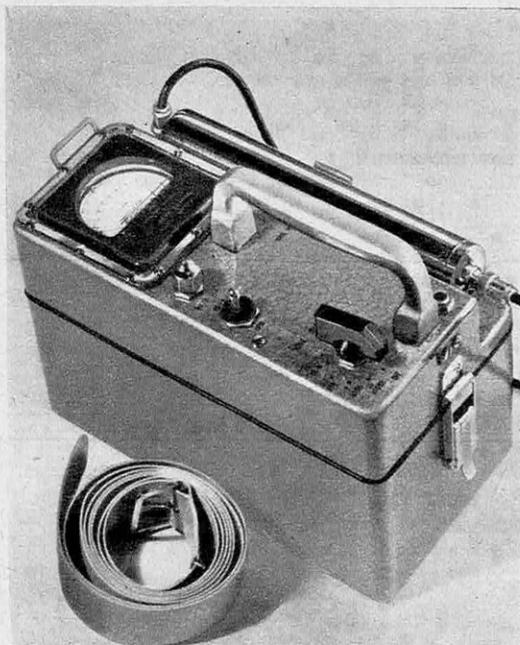
Notre organisme est constamment soumis à des radiations de même nature que celles qui sont engendrées par les piles atomiques



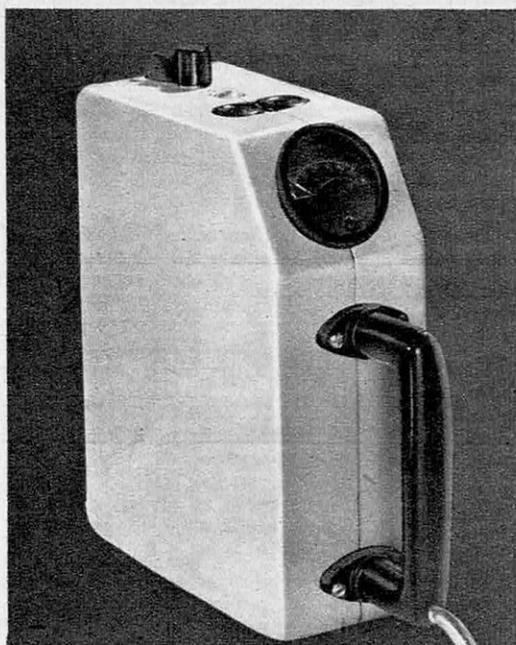
COMPTEURS DE GEIGER-MULLER



● Ce croquis représente très schématiquement un compteur de Geiger-Muller. Suivant la nature des particules à détecter, le tube peut être mince ou épais, en cuivre, aluminium, ou verre métallisé, et rempli d'un gaz approprié. On peut lui donner des formes variées. A gauche, tubes à fenêtre mince (Tracerlab).



● Compteur à tube de Geiger à parois minces pour la détection et le dosage des rayons gamma et bêta. Il peut servir à contrôler la radioactivité des mains, des vêtements, etc. dans les laboratoires (Tracerlab).



● Détecteur de rayonnement de grande sensibilité utilisable pour la mesure des fuites d'un blindage de protection contre les rayons gamma ou le contrôle de petites sources radioactives (Philips-Metalix).

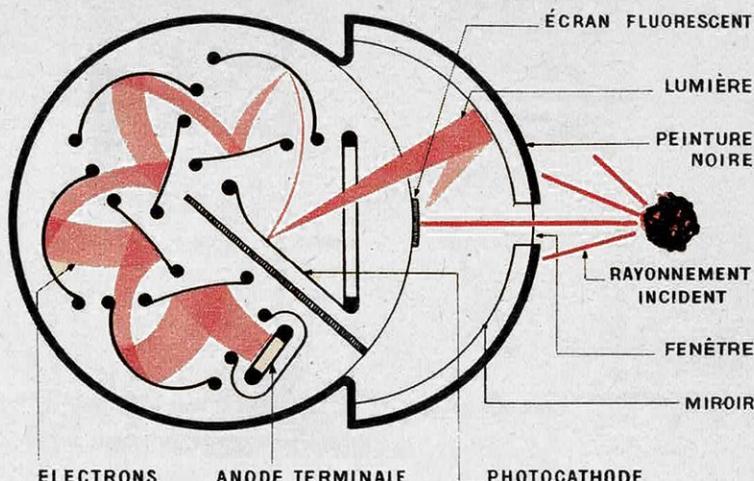
ou par les éléments radioactifs qui s'y forment. Il existe toujours, en effet, de faibles traces de produits radioactifs dans l'air et dans le sol ; le potassium, par exemple, qui se trouve en quantité appréciable dans les tissus végétaux, est faiblement radioactif. Tous les corps terrestres sont constamment traversés, à la cadence de 1 particule par minute et par centimètre carré de surface, par le rayonnement cosmique dans lequel se trouvent neutrons, photons et autres particules de grande énergie. Enfin tous, y compris notre organisme, renferment normalement des traces d'éléments radioactifs. Les doses de rayonnement que nous recevons ainsi d'une manière permanente sont sans effets nocifs appréciables, du moins est-il naturel de l'admettre. La première tâche des chercheurs a donc consisté à déterminer dans quelle mesure on peut admettre sans inconvénient une augmentation de cette dose.

Pour comparer entre elles les « doses » des divers rayonnements, on a adopté une unité commune, bien connue des radiologues, le **roentgen**, désigné en abrégé par la lettre **r**. Un roentgen est par définition la quantité de rayons gamma ou X qui produit 2 milliards de paires d'ions, positifs et négatifs dans un centimètre cube d'air à pression et température standard ; la formation d'une paire d'ions exigeant 35 électronvolts, un roentgen correspond à une énergie de 83 ergs libérée dans le centimètre cube d'air en question. Cette définition a été étendue aux

milieux autres que l'air, les tissus vivants par exemple, et aux rayonnements autres que les rayons gamma : le roentgen est la quantité de rayonnement qui, traversant 1 gramme de tissu, y libère 83 ergs (cette unité est quelquefois désignée par **rep**, ou « roentgen équivalent physique »). En outre, comme les dommages causés aux cellules diffèrent, à égalité des doses ainsi définies, suivant la nature des rayonnements, on utilise parfois une autre unité, le **rem** ou « roentgen équivalent man (homme) », qui mesure l'action biologique des rayonnements : 1 roentgen de rayons gamma ou bêta équivaut à 1 **rem**, alors que 1 roentgen de protons ou de neutrons équivaut à 10 **rem**. A doses égales, les protons et neutrons sont 10 fois plus actifs sur les tissus vivants que les rayons gamma, et les particules alpha 20 fois plus. Par ailleurs, la mesure d'une dose en **r** effectuée avec une chambre remplie d'air, à 76 cm de pression, est traduite en dose absorbée par du tissu, de densité voisine de 1, en la multipliant par le rapport des densités de l'eau et de l'air qui est d'environ 800.

Ces chiffres ronds, adoptés pour la commodité des mesures, sont évidemment très approximatifs. La susceptibilité des tissus varie dans de très larges limites suivant leur nature ; en outre, l'effet biologique d'une même dose n'est pas le même suivant qu'il s'agit d'une irradiation intense de courte durée ou d'une irradiation de faible intensité étalée sur plusieurs mois ou plusieurs années.

● En combinant la méthode de scintillations avec une cellule photoélectrique et un multiplicateur d'électrons, on a réalisé des détecteurs de particules ionisantes d'une extrême sensibilité, supérieure même à celle des tubes de Geiger. L'arrivée d'une particule alpha ou bêta ou d'un photon gamma sur l'écran fluorescent provoque une faible lueur dont un miroir renvoie la lumière sur une photocathode qui émet des électrons. Le nombre de ces derniers est multiplié par près d'un million par les plaques du multiplicateur. On peut détecter des neutrons lents en mélangeant du bore au produit fluorescent.



Certaines actions sont difficilement chiffrables telles celles que les rayonnements exercent sur les organes de la reproduction et qui peuvent se traduire par des mutations dont la mise en évidence par l'expérimentation sur les mammifères est très délicate et incertaine.

Enfin, il importe de faire remarquer que le roentgen, d'après sa définition, mesure l'énergie de 83 ergs absorbée par centimètre cube de tissu irradié. Un faisceau de rayon X concentré sur un anthrax pourra le guérir en lui délivrant 1 000 r, tandis qu'une dose de 1 000 r fournie à tout le corps entraînera la mort.

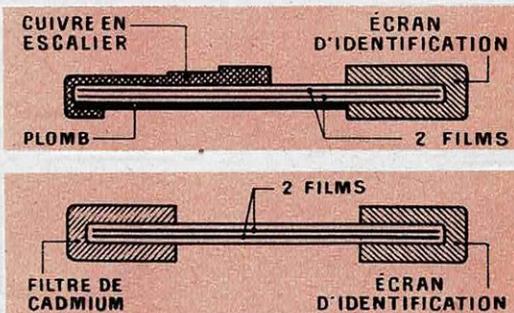
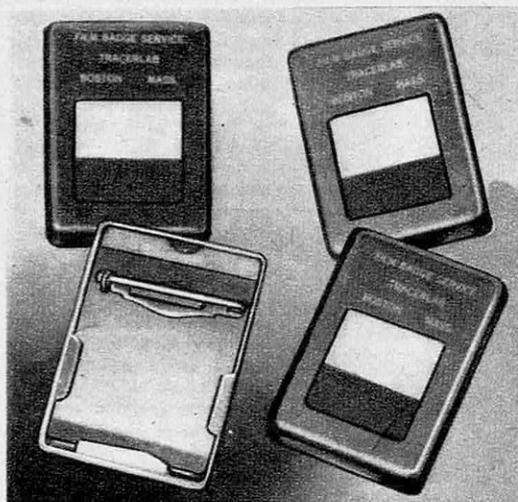
LES DOSES ADMISSIBLES

Évaluée en roentgens, la dose de rayonnement d'origine cosmique que reçoit tout être humain au niveau de la mer représente 0,1 r pour toute une année et pour chaque cm²

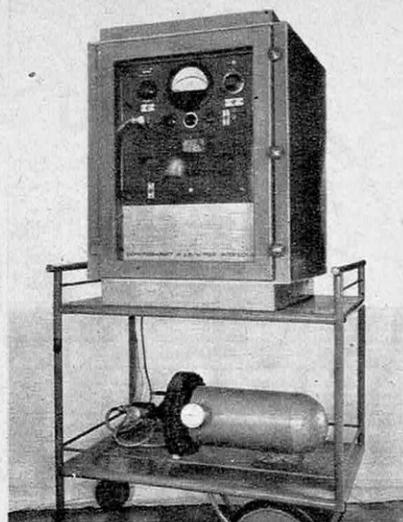
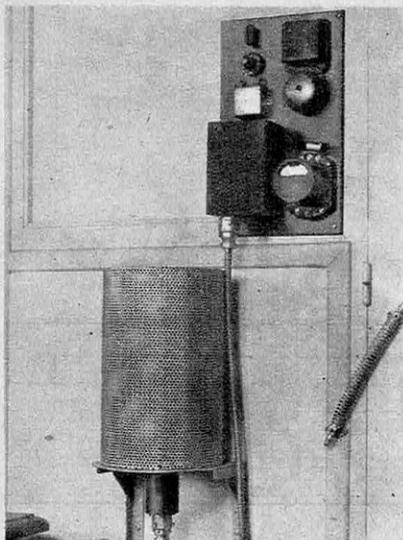
du corps. Une radiographie entraîne une irradiation pratiquement instantanée de 0,5 à 5 r par cliché, et une radioscopie une irradiation de 10 à 20 r par minute, toutes deux localisées sur une partie du corps seulement, suivant les organes examinés. Comme nous l'avons dit plus haut, la dose moyenne reçue par les travailleurs des centres nucléaires d'Oak Ridge et de Hanford est de 0,2 r par an ; les plus exposés ne reçoivent pas plus de 4,2 r par an. La dose limite de parfaite sécurité adoptée par la Commission de l'Énergie atomique américaine est de 0,3 r par semaine.

Ce chiffre s'entend pour des doses réparties sur tout le corps et pour une exposition ininterrompue au rayonnement.

Il est beaucoup plus difficile de fixer des limites de sécurité pour les doses de produits radioactifs susceptibles de pénétrer dans l'organisme. On a introduit une notion nou-



● Enfermés dans des boîtes qui se portent accrochées à la pochette du veston, des films de sensibilité différente mesurent, par noircissement des émulsions, la dose de rayonnement reçue. Un filtre de cadmium arrêtant les neutrons lents et un écran de cuivre absorbant une partie des rayons X ou gamma font distinguer entre elles les diverses radiations reçues (Tracerlab).

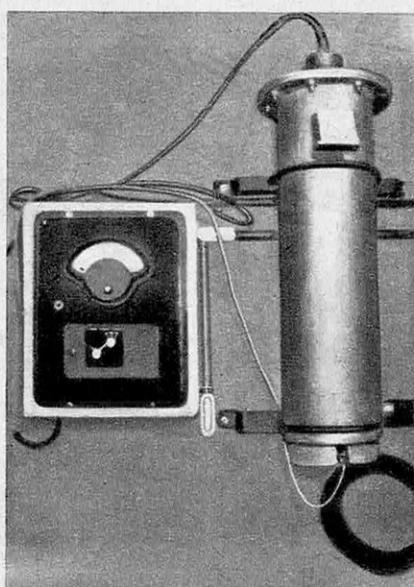
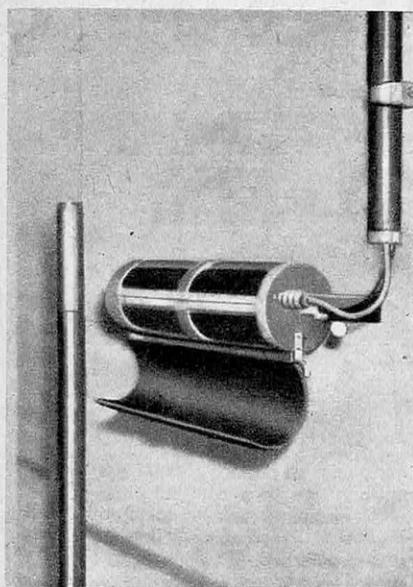


● Deux groupes de protection contre les rayonnements nocifs construits et utilisés à Chatillon (C.E.A.); celui de gauche alerte automatiquement le personnel de la présence de gaz ou de poussières radioactives dans l'air ambiant. L'appareil représenté à droite est, comme on le voit, mobile et comprend une chambre à ionisation sous pression, très sensible aux rayons gamma, et un amplificateur de courant muni d'un microampère-mètre étalonné au préalable en doses de roentgens au moyen d'une source connue de radium ou un tube produisant des rayons X.

velle, celle de **période biologique** d'un radioélément, qui tient compte à la fois de sa **période radioactive**, telle que nous l'avons définie dans un chapitre précédent, et de la vitesse avec laquelle l'organisme l'élimine : c'est le temps au bout duquel il ne reste plus dans l'organisme que la moitié des produits radioactifs présents à l'origine. C'est ainsi que la période biologique du césium 137 est d'environ 15 jours, alors que sa période radioactive est de 37 ans ; c'est que l'organisme l'élimine rapidement. Le problème est en réalité beaucoup plus complexe parce que, suivant leur nature, les radioéléments se fixent de préférence sur des tissus différents ou, dans un même tissu, sur certaines cellules plus ou moins biologiquement actives, ou même, dans les cellules, entrent dans des composés localisés

dans certains organites cellulaires tels que les noyaux. Il faudrait en pratique prévoir des doses limites pour chaque radioélément.

Le radiocarbone, par exemple, peut exister, comme le carbone stable, dans pratiquement tous les composés chimiques présents dans l'organisme. Il émet des rayons bêta de faible énergie, mais comme sa vie est très longue (période : 6 000 ans), les quantités non excrétées irradieront le sujet pendant toute son existence. Le radiophosphore, (période 15 jours) qui émet des rayons bêta plus énergiques, l'énergie étant plus grande pour les périodes courtes), mais qui s'élimine beaucoup plus rapidement que le carbone provoquera moins de lésions. Le radioiode se concentre presque exclusivement dans la glande thyroïde et ses rayons bêta et gamma très énergiques lèseront les tissus



● Ces chambres d'ionisation fixées à demeure sur les murs enregistrent d'une manière continue la radioactivité de l'air dans les locaux des usines atomiques. L'appareil de gauche est installé derrière le mur de béton protecteur d'un centre de traitement des lingots d'uranium, à un endroit où des ouvriers peuvent être appelés à intervenir pour des réparations. Celui de droite pompe l'air à travers la chambre d'ionisation, indique directement le résultat des mesures sur un cadran et le transmet au poste central de commande de l'usine nucléaire qui connaît ainsi aussitôt les fuites de l'appareillage à l'endroit considéré.

de la glande et provoqueront indirectement des troubles généraux graves. Le plutonium, qui se fixe en particulier dans les os et s'élimine extrêmement lentement, a une vie très longue ; ses rayons alpha seront extrêmement dangereux. Bien qu'il émette environ 50 fois moins de rayons alpha que le radium, il est pratiquement aussi dangereux que ce dernier dont on a évalué la dose limite de sécurité dans le corps à un dix-millionième de gramme. Il semble, en effet, qu'il se localise dans les parties des os les plus voisines des cellules qui élaborent les globules sanguins.

L'ABSORPTION DES RAYONNEMENTS

Les particules électrisées, protons, électrons, positons, particules alpha, que l'on rencontre en physique nucléaire, sont facilement absorbables car elles ont des parcours bien délimités dans la matière, fonction de leur énergie. Une feuille de papier de quelques microns d'épaisseur arrête les rayons alpha les plus énergiques. Un centimètre d'aluminium arrête tous les électrons et positons émis par les radioéléments ainsi que les protons projetés des substances hydrogénées traversées par des neutrons.

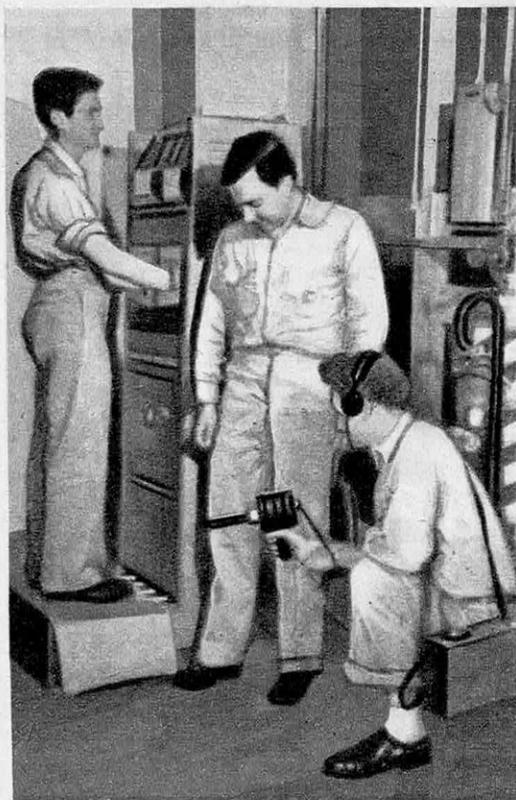
Les rayonnements X et gamma sont plus difficiles à absorber, car ils n'ont pas de parcours bien défini dans la matière. Leur absorption suit une loi « exponentielle » ; supposons qu'il faille une certaine épaisseur d'une matière donnée pour réduire de moitié l'intensité d'un rayonnement gamma ; pour absorber la moitié du rayonnement restant, il faut encore la même épaisseur. On voit qu'en doublant l'épaisseur on laisse subsister encore 25 % du rayonnement initial ; même si on augmentait indéfiniment l'épaisseur de l'écran, il en resterait toujours un certain pourcentage. Dans la pratique, on doit se borner à réduire l'intensité à une valeur inférieure à celle de tolérance. Disons, à titre d'indication, que pour réduire au dixième l'intensité d'un rayonnement gamma d'une énergie de 2 MeV, il faut 48 cm d'eau, ou 25 cm de béton, ou 6,7 cm de fer, ou 4,3 cm de plomb.

Les neutrons suivent des lois d'absorption particulières où interviennent leur énergie et la nature du milieu qu'ils traversent. Ce qui distingue ces lois de celles qui régissent l'absorption des autres rayonnements, c'est qu'elles éprouvent des variations brusques. On peut absorber complètement les neutrons par **capture** et on peut aussi les **ralentir** en leur faisant traverser un milieu

convenable, par exemple des substances hydrogénées.

La capture peut s'accompagner de l'émission d'un rayon gamma et provoquer ou non la formation dans l'écran absorbant d'un radioélément émetteur de particules bêta et de rayons gamma ; il faudra donc se protéger contre ce rayonnement secondaire par des écrans appropriés. Dans le cas du ralentissement, les neutrons perdent leur énergie par chocs successifs sur les atomes qu'ils rencontrent ; les noyaux heurtés seront projetés et constitueront des particules ionisantes qui pourront léser gravement, par exemple, les tissus biologiques.

L'eau, qui contient de l'hydrogène en abondance, ralentit bien les neutrons, mais la capture d'un neutron par un noyau d'hydrogène, donnant un noyau de deutérium, s'accompagne de l'émission d'un rayon gamma. Il faudra se protéger contre ce rayonnement avec un écran de plomb. Si on a, au contraire, fait dissoudre du borax dans l'eau, le bore absorbera les neutrons sans émission de rayons gamma. Dans certains cas, des écrans solides contenant du bore sous forme de borax ou de carbure de bore seront très efficaces, à condition de ralentir d'abord les neutrons dans l'eau ou toute autre substance hydrogénée, de façon à ramener leur énergie à une valeur pour laquelle le bore est extrêmement avide de neutrons.



Détection de la contamination radioactive des pieds, des mains et des vêtements des travailleurs dans un laboratoire américain au moyen de compteurs actionnant directement des écouteurs ou des haut-parleurs.

TECHNIQUES DE PROTECTION

La protection des mineurs qui extraient les minerais d'uranium et celle des manœuvres qui en assurent la manutention et l'expédition aux centres de traitement ne posent pas de problèmes essentiellement différents de ceux que rencontre l'industrie minière classique. Tout au plus, convient-il d'apporter un soin particulier à la ventilation (présence éventuelle de radon) et à l'élimination des poussières.

Au fur et à mesure que les traitements livrent des produits radioactifs plus concentrés, les précautions doivent devenir plus strictes. Elles sont poussées au maximum au voisinage des piles atomiques. Leur servants s'en approchent le moins possible. Des murs de béton et des parois métalliques en plomb et en acier les séparent des points « chauds ». On appelle ainsi tout point de l'espace où règne une grande radioactivité, ou encore tout point par lequel passe un flux de radiations. Les manipulations se font à distance par câbles, tringles, pinces articulées, transporteurs pneumatiques, etc., et le servant ne suit les opérations qu'avec un périscope ou même avec la seule aide de lampes de signalisation.

Chaque membre du personnel porte constamment sur lui une chambre d'ionisation du type « stylographe », dont la décharge est mesurée en principe quotidiennement. Les travailleurs portent aussi un film photographique à émulsion spéciale, plus ou moins protégé par des écrans appropriés, et dont

le noircissement indique non seulement la dose de rayonnement intercepté, mais également sa nature. Ces films sont en principe développés toutes les semaines. A titre de contrôle, les travailleurs subissent, en outre, périodiquement (tous les deux mois aux Etats-Unis), des examens médicaux comportant la numération des globules sanguins.

D'autres détecteurs fonctionnent d'une manière instantanée, tels que des compteurs de Geiger-Muller ou des chambres d'ionisation qui sont utilisés pour donner l'alarme lorsque l'intensité du rayonnement atteint une valeur dangereuse dans un endroit donné. Certains analysent constamment l'air des locaux pour y déceler la présence de gaz ou de poussières radioactifs.

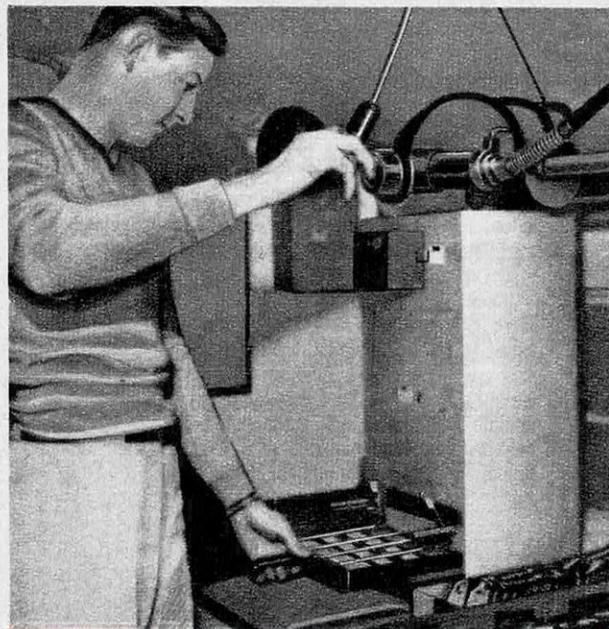
Les objets utilisés par les travailleurs, comme leurs blouses et leurs chaussures sont nettoyés avec des liquides que l'on conserve jusqu'à ce que les radioéléments en solution aient disparu. Si un objet est par trop contaminé, il est brûlé en vase clos et cendres et fumées sont stockées dans le même but. Si la contamination est due à des radioéléments à vie longue, les objets souillés sont mis dans des cylindres en acier ou en béton qui sont soit enfouis dans de profonds puits bétonnés, soit immergés en haute mer.

LA PROTECTION DANS LES LABORATOIRES

Des mesures de protection doivent également être prises dans tous les laboratoires où sont mis en œuvre des flux de particules



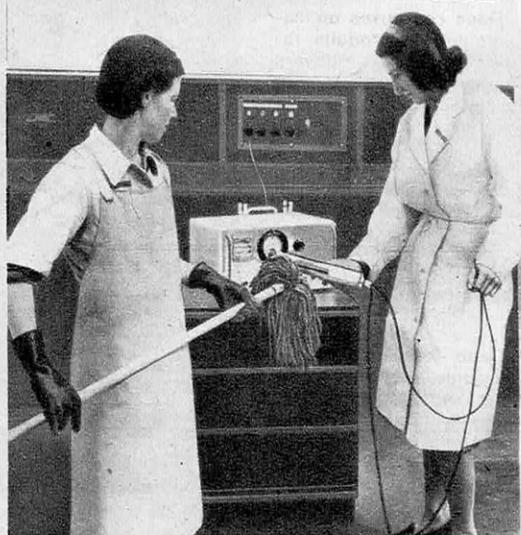
● A Hanford, chacun reçoit à l'entrée deux « stylos » et un film photographique qu'il doit rendre à la sortie.



● Chaque semaine, les films sont développés. Un numéro d'identification y est inscrit par rayons X.



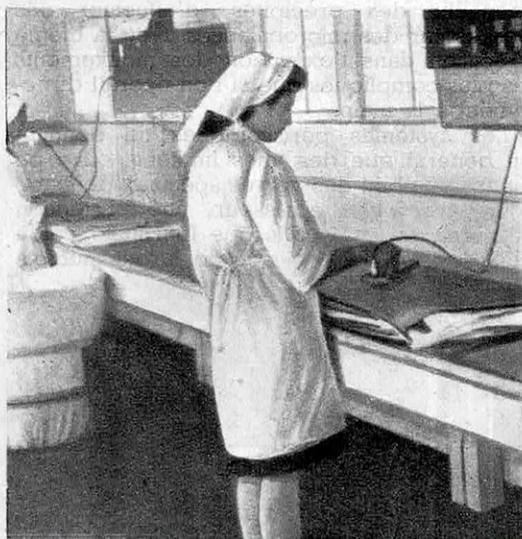
● A la fin de chaque journée de travail, les laboratoires sont très soigneusement examinés.



● Après le nettoyage des locaux, il faut contrôler chiffons et balais peut-être contaminés.



● A la blanchisserie, le personnel porte des masques contre les poussières radioactives.



● Après lavage des vêtements, il faut contrôler si la décontamination en a été assez poussée.

et où sont manipulés des produits radioactifs naturels ou artificiels. Nous parlerons dans le chapitre suivant des précautions prises lors de la fabrication des isotopes radioactifs dans les piles et nous nous bornerons à évoquer seulement ici l'équipement des laboratoires qui les utilisent.

Lorsqu'il s'agit d'éléments émettant uniquement des particules alpha ou bêta, ces rayonnements étant très facilement absorbés on peut, en général, les manipuler en toute sécurité en opérant dans des boîtes à paroi de verre où l'opérateur introduit les mains gantées de caoutchouc ; les gants sont sertis

dans des ouvertures circulaires et l'atmosphère de la boîte est constamment maintenue en dépression pour éviter que des gaz ou poussières radioactives se répandent dans le laboratoire ; l'air ainsi aspiré est rejeté après filtration dans l'atmosphère.

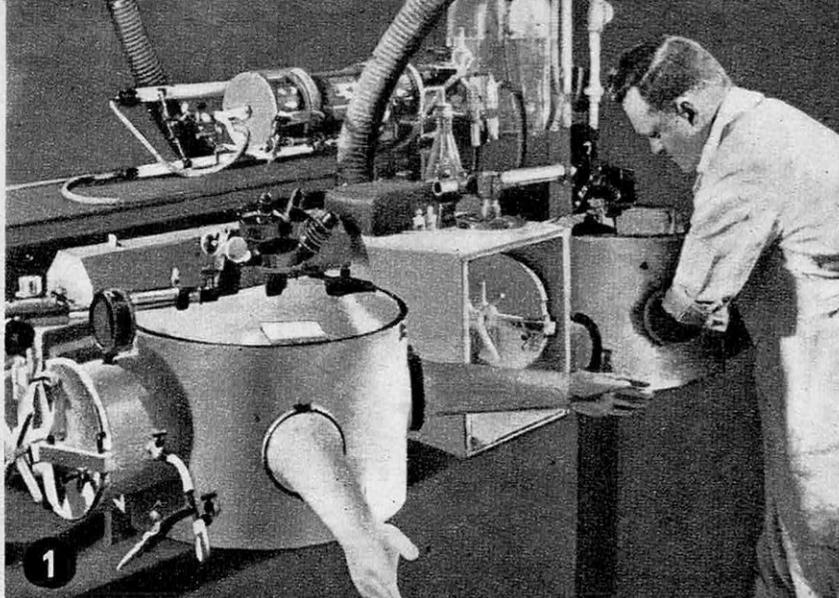
Le problème est plus ardu lorsqu'on a affaire à des substances contenant des éléments émetteurs de rayons gamma.

Il faut alors prévoir des blindages supplémentaires, opaques et, par conséquent, des jeux de miroirs plus ou moins compliqués pour diriger les manipulations. Ces dernières sont commandées à distance par des systèmes

1 Dans ces cuves on manipule des produits radioactifs observés à travers un couvercle transparent et introduits à travers des sas (visibles à gauche).

2 Il s'agit là d'un véritable laboratoire en miniature dans une caisse étanche à dépression. Les manipulations se font à travers les hublots portant des gants.

3 Cette troisième photographie montre l'expérimentateur en train de manipuler un produit radioactif émettant des particules alpha à l'intérieur d'une boîte laboratoire étanche.



de « mains mécaniques » dont plusieurs modèles très perfectionnés ont été réalisés. Ils permettent de transvaser des flacons, de recueillir des précipités, d'effectuer des pesées sur des microbalances avec la même précision dans l'exécution des mouvements les plus compliqués que si l'on opérait directement à la main.

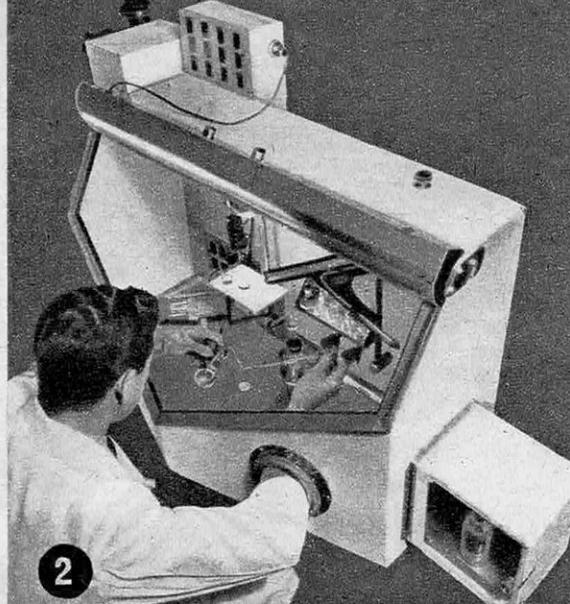
Les systèmes périscopiques ne donnant en général que des vues limitées, on a pu mettre au point des verres spéciaux donnant, sous une même épaisseur, une protection au moins égale à celle que fournit le béton et permettant de réaliser de larges hublots

pour « chambres chaudes ». Alors qu'autrefois tous les verres présentaient le grave défaut de se colorer rapidement sous l'action des rayonnements et de devenir inutilisables, on sait en fabriquer, aujourd'hui, dont la transparence demeure stable et est suffisante pour qu'on puisse les utiliser sous de très fortes épaisseurs. On a ainsi réalisé des panneaux de verre de 30 à 90 cm d'épaisseur et on achève actuellement les essais de fenêtres de plus de 2 mètres d'épaisseur destinées à prendre place dans les murailles de béton qui entourent un cyclotron, et qui pourront arrêter non seulement les rayons gamma,



● L'expérimentateur, protégé par des briques de plomb contre le rayonnement d'une source radioactive, manipule les produits avec un appareil articulé

en suivant l'opération dans un miroir. Un détecteur de rayonnement placé à droite contrôle constamment les radiations gamma qui ont pu traverser le blindage.



mais aussi les neutrons (1). On a aussi réalisé des fenêtres constituées par deux glaces de verre spécial avec un liquide interposé ; un tel liquide peut être une solution presque saturée de bromure de zinc qui absorbe les rayons gamma. Elle devient cependant assez rapidement trouble sous l'action des rayonnements et il faut la filtrer fréquemment.

Enfin, lorsque les expériences que l'on a en vue sont si dangereuses que les opérateurs doivent en être éloignés à tout prix, comme celles de Los Alamos sur les masses critiques, il faut recourir à la télévision. Comme cette dernière, sous la forme qui nous est maintenant familière, ne donne pas de sensation de profondeur et par suite rend maladroits les gestes des opérateurs qui opèrent à 300 m de distance par servomécanismes électriques, le laboratoire d'Argonne utilise la télévision stéréoscopique : une caméra à double objectif envoie simultanément les deux images qui apparaissent côte à côte sur le même écran ou sur deux écrans voisins et qui sont observées à l'aide de lunettes spéciales et de filtres polarisants.

LES DÉCHETS ATOMIQUES

Les réactions nucléaires qui se produisent dans une pile y donnent naissance à un grand nombre d'éléments radioactifs qui s'y accumulent et qui, si on ne les éliminait en purifiant les lingots d'uranium, finiraient par absorber assez de neutrons pour arrêter les réactions en chaîne.

Certains de ces éléments sont gazeux, comme le xénon 133 (période 5,5 jours) et le krypton 85 (période 10 ans). Ces gaz ne doivent pas quitter la pile, car ils contamineraient tout le voisinage, et c'est une des raisons pour lesquelles les blocs d'uranium sont contenus dans des enveloppes étanches

en aluminium. Lorsque les blocs sont extraits de la pile pour purification, les enveloppes sont ouvertes et les gaz sont aspirés dans des cylindres où ils sont stockés.

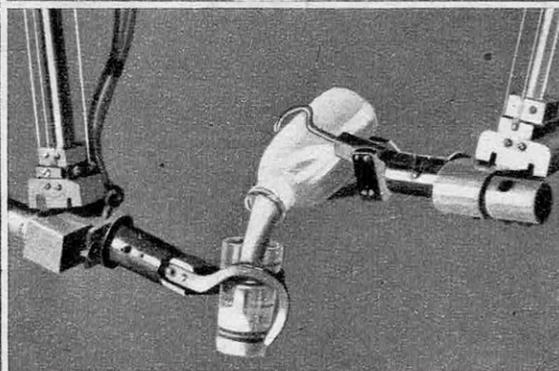
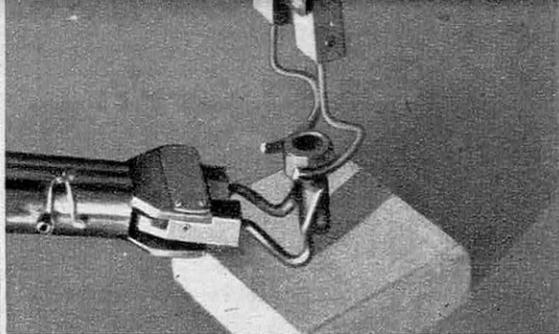
La plupart des produits de fission solides n'ont pas encore trouvé d'utilisation pour la recherche scientifique ou en thérapeutique et constituent, eux aussi, de véritables déchets dont il faut se débarrasser par un moyen ou par un autre. Leur élimination présente des difficultés très variables suivant leur période radioactive. Ces éléments, où qu'ils se trouvent, se détruisent d'eux-mêmes plus ou moins vite, mais ce « plus ou moins » va de quelques secondes à des milliers d'années. Au bout d'une durée égale à 6 fois la période, un élément radioactif a perdu 99 % de son activité, et au bout de 9 périodes, cette activité est réduite au millième de sa valeur primitive. On conçoit donc que l'élimination des radioéléments dont la période est de quelques heures ne présente absolument aucune difficulté ; il suffit de les stocker à l'écart et d'attendre qu'ils se soient détruits d'eux-mêmes. Dans d'autres cas, on pourra les rejeter dans une rivière, à condition qu'ils soient suffisamment dilués et que la radioactivité de l'eau soit constamment surveillée.

La dilution simple peut, dans certains cas, n'être pas suffisante, par suite du danger de reconcentration de l'élément par certains microorganismes. Tel est le cas, par exemple, de l'iode radioactif qui, si on le rejetait, même très dilué, dans l'eau d'un étang ou d'une rivière, risquerait de se fixer électivement sur certains microorganismes ou certaines algues où il pourrait atteindre une concentration inadmissible. On met alors à profit la propriété qu'ont les éléments radioactifs artificiels de se comporter vis-à-vis des êtres vivants de la même manière que les éléments stables naturels du même nom. On dit, comme les biologistes, qu'ils ont sensiblement le même « métabolisme » : leur assimilation

(1) Le verre pyrex contient du bore, et des lunettes épaisses en pyrex protègent les yeux contre les neutrons lents.



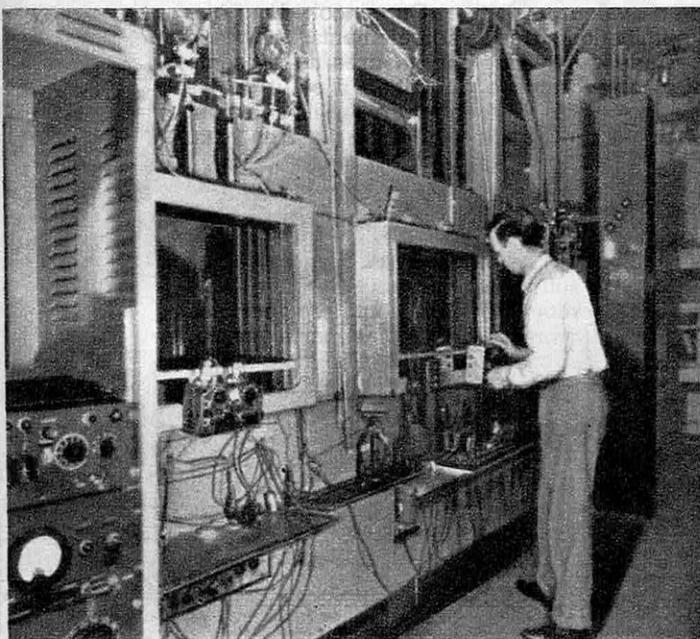
● Protégé contre les rayonnements, l'opérateur suit dans un miroir la manipulation des éprouvettes radioactives.



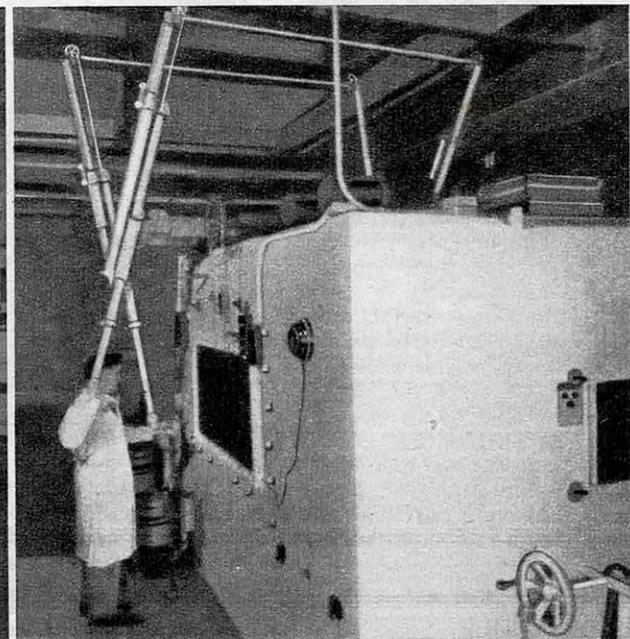
● Ses « mains mécaniques » articulées lui permettent d'effectuer à distance des actes très précis.

et leur élimination s'opèrent dans les mêmes proportions. On mélangera donc à l'iode radioactif, par exemple, cent fois son poids d'iode ordinaire, engagé dans une combinaison chimique identique ; des organismes vivants fixeront alors un produit cent fois moins radioactif que celui dont on voulait se débarrasser, donc beaucoup moins dangereux. Deux ingénieurs américains, Newell et Christenson ont proposé récemment une solu-

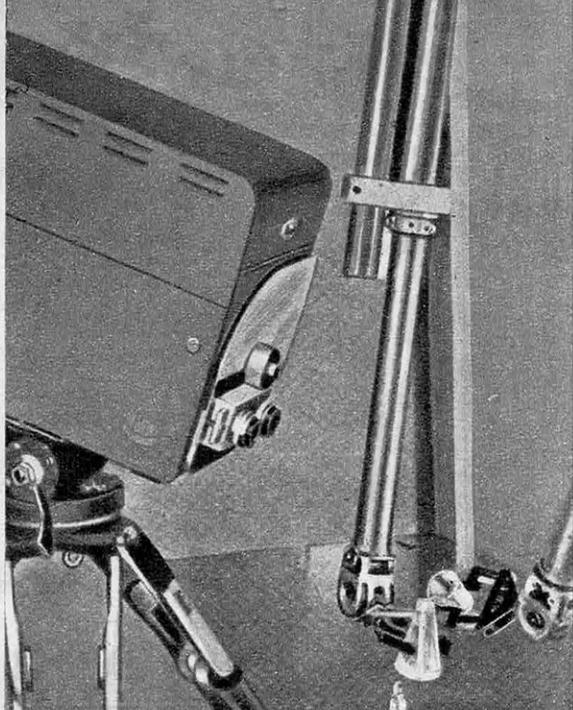
tion originale au problème de l'élimination des traces de plutonium présentes dans les eaux résiduaires des usines de traitement des lingots des piles. Ils ont montré que certaines bactéries, celles qui forment des masses gélatineuses dans les installations de traitement des boues d'épuration, fixent avidement le plutonium, dont la toxicité ne semble pas les affecter. Ces bactéries pourraient être cultivées dans des séries de bassins où séjourne-



● Ce laboratoire radiochimique du centre nucléaire d'Argonne où les manipulations sont commandées électriquement a coûté près de 25 millions de francs.



● L'opérateur observe, à travers une fenêtre épaisse de un mètre, les opérations commandées mécaniquement par l'intermédiaire de bras articulés.



● Caméra de télévision stéréoscopique dans une « chambre chaude » où on dose des radioisotopes.



● L'opérateur muni de lunettes à verres polarisants observe les écrans qui donnent la sensation de relief.

raient successivement les eaux résiduaires. A la sortie du dernier bassin la teneur en plutonium serait absolument infime. Périodiquement, les boues les plus contaminées seraient calcinées pour en réduire le volume et les cendres enfermées dans des récipients étanches pour enfouissement ou immersion après récupération du plutonium ainsi concentré.

On a étudié spécialement à Hanford la fixation du phosphore par la flore et la faune du fleuve Columbia. Le plancton peut l'accumuler à une concentration 200 000 fois supérieure à celle de l'eau ambiante, les algues 50 000 fois, et les poissons plus de 100 000 fois. Le phosphore peut se transmettre des algues aux larves d'insectes, des algues et des larves d'insectes aux alevins et de là aux poissons adultes, truites ou saumons, par exemple. Les mollusques et crustacés peuvent aussi être contaminés. Cependant, grâce aux mesures de dilution, il n'existe pratiquement aucun danger pour les consommateurs de poissons. On a calculé qu'un homme devrait manger à un seul repas 50 kg de poisson du fleuve Columbia, ou 5 kg quotidiennement pendant une longue période, pour accumuler dans ses organes une quantité décelable de radioéléments, décelable ne voulant pas dire dangereuse.

On peut se débarrasser d'autres éléments par enfouissement dans le sol. Certains présentent la propriété intéressante d'être fortement fixés par certaines roches ; mais des études géologiques préalables doivent permettre de s'assurer que l'on ne risque pas de contaminer les eaux souterraines et, par la suite, les sources. Enfin, lorsque la période

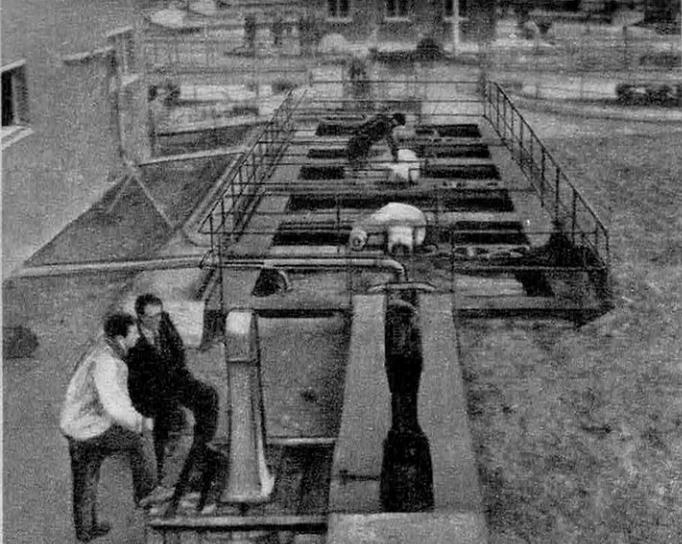
des radioéléments est de l'ordre de plusieurs années, voire même de milliers d'années, on n'a pas d'autre ressource que de les enfermer dans des blocs d'acier et de les enterrer profondément ou de les immerger à de grandes profondeurs dans l'océan.

Le prix de l'opération est loin d'être négligeable. La Commission de l'Energie Atomique américaine utilise actuellement des récipients spéciaux d'environ 5 mètres cubes dont l'enfouissement dans des puits bétonnés recouverts de terre revient, pour chacun, à près de 2 000 dollars, soit 700 000 francs environ. On a même proposé de se débarrasser de ces produits en les envoyant par fusée dans l'espace interplanétaire, mais cela demeure évidemment hors des possibilités actuelles.

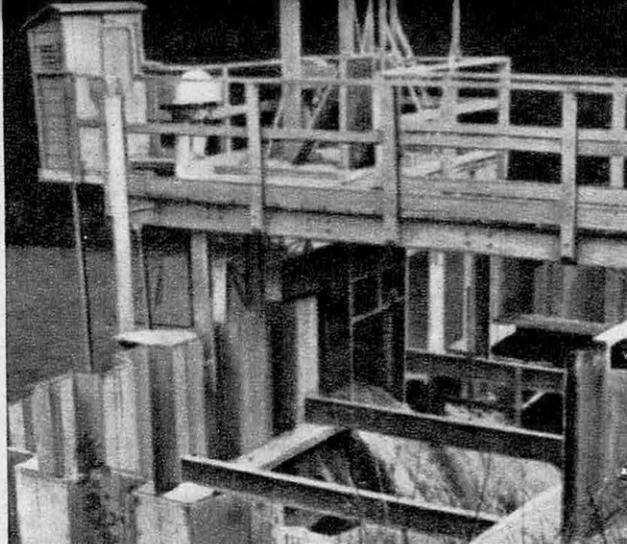
Au dehors de la pile, certains matériaux qui ont été souillés par des corps radioactifs pourront être contaminés. Les déchets de métaux comme le plomb, l'argent, etc., ayant servi dans une centrale atomique devront être écartés du marché car il est impossible d'en suivre la trace et d'en interdire certaines utilisations, notamment en pharmacie et dans l'art dentaire.

LA CONTAMINATION DE L'ATMOSPHERE

Lorsque le refroidissement d'une pile est fait en circuit ouvert avec de l'air pris et rejeté dans l'atmosphère, procédé le plus économique, un nouveau problème de sécurité se pose. L'air contient près de 1 % d'argon 40. En passant dans la pile, une fraction de cet argon 40 devient argon 41 par absorption d'un neutron. Cet élément est



● A Harwell, l'eau de refroidissement des piles et celle rejetée par les laboratoires est d'abord traitée chimiquement pour précipiter certains radioéléments.



● A Oak Ridge, l'eau contaminée par des produits de fission est stockée avant d'être rejetée dans la rivière jusqu'à ce que sa radioactivité soit négligeable.

radioactif et sa période est de cent dix minutes. Comme c'est un gaz « rare », inerte au point de vue chimique, il ne pourrait être fixé qu'avec de très grandes difficultés. Il faut, par conséquent, que la vitesse de l'air dans la pile soit aussi élevée que possible pour diluer l'argon 41 ainsi formé. Il faut ensuite une cheminée de hauteur appropriée qui conduise cet air à une altitude convenable qui sera fonction de la hauteur et de l'étendue des bâtiments environnants qui risqueraient d'être contaminés. Elle sera fonction aussi de la répartition des agglomérations urbaines environnantes, des accidents géographiques et enfin des conditions météorologiques habituelles dans la région.

Le centre atomique de Brookhaven a entrepris des recherches météorologiques systématiques dans les environs des usines. Des nuages de fumée artificielle ont été mis en œuvre pour étudier l'entraînement des couches atmosphériques en fonction de l'heure, de l'état hygrométrique de l'air, de l'intensité et de la direction des vents, de la hauteur et du diamètre de la cheminée, de la vitesse de l'air à la sortie de cette cheminée, etc.

Bien entendu, ces problèmes ne commencent à se poser qu'au stade des grandes centrales atomiques et sont inexistantes pour des piles « expérimentales » d'une énergie modeste, ne dépassant pas quelques kilowatts, du même ordre que celle que consomme un radiateur électrique domestique.

A Hanford, aux usines de traitement chimique des lingots extraits des piles, pour l'isolement du plutonium, on se trouvait en présence de dégagements gazeux d'iode radioactif 131 et de poussières radioactives qui, entraînées dans les cheminées risquaient, en retombant sur le sol, de contaminer la végétation, en particulier l'herbe que paissent les ruminants. On s'est efforcé, en augmentant le temps de « vieillissement » des lingots pour que le radioiode ait le temps de se désin-

tégrer, en améliorant les filtres, et aussi en réglant le fonctionnement des installations d'après les conditions météorologiques, de réduire considérablement la radioactivité, au point que, même au voisinage des usines, elle demeure malaisément décelable et absolument inoffensive.

LA SURVEILLANCE DE TOUT LE TERRITOIRE

Aux Etats-Unis et aussi en Angleterre, on étudie systématiquement l'ionisation de l'air en divers points du territoire. Les eaux des rivières qui alimentent les centrales font l'objet d'examen périodiques. L'eau de refroidissement des piles de Hanford séjourne plusieurs heures dans des bassins avant d'être envoyée dans le fleuve Columbia ; ainsi les éléments de vie courte qui représentent 95 % de la radioactivité ont le temps de se désintégrer presque complètement ; l'activité résiduelle est due au radiophosphore P32, dont la période est de 14,3 jours et à des traces de radiofer et de radiocalcium, de vie plus longue. Ces éléments sont très dilués de sorte qu'ils ne représentent plus qu'un risque négligeable à quelques kilomètres en aval des usines. L'eau du fleuve Columbia servant sur une grande échelle à l'irrigation, on a mis à l'étude l'action de la radioactivité de l'eau de refroidissement des piles sur la végétation dans des stations expérimentales (alfa, haricot, maïs, pomme de terre, avoine, carotte, arbres fruitiers). On n'a pu mettre en évidence aucun effet, au taux de dilution actuellement appliqué, ni sur le rendement, ni du point de vue radioactivité des récoltes. On signalait dernièrement que l'eau de la Tamise qui alimente l'établissement atomique anglais de Harwell était légèrement plus radioactive qu'elle ne l'était avant le fonctionnement de cette pile.

Les pâturages et les fourrages doivent être

également surveillés, et ceci est loin d'être superflu puisque des cartonnages ont été reconnus radioactifs par suite de l'inclusion dans la pâte à papier de fourrages contaminés par une centrale atomique très éloignée. Ces emballages peuvent causer de graves préjudices s'ils servent à protéger des plaques photographiques (le cas s'est produit pour une grande firme des Etats-Unis), des produits pharmaceutiques ou alimentaires.

Les bassins d'alimentation en eau potable ainsi que les piscines devront subir une surveillance encore plus rigoureuse.

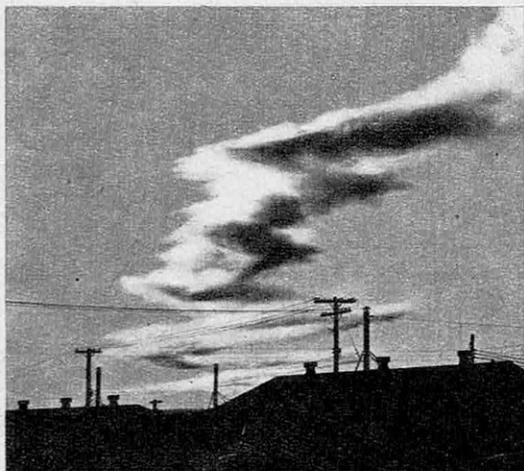
Enfin, on ne saurait passer entièrement sous silence un des dangers graves que représente l'exploitation de piles atomiques de grande puissance. Nous avons dit que si les dispositifs de sécurité provoquant l'arrêt automatique d'une pile en cas d'incident venaient à ne pas fonctionner, et si par conséquent le contrôle de la réaction échappait ainsi aux servants de la pile, il n'en résulterait pas pour autant une explosion analogue à celle d'une bombe. La température s'élevant, les matériaux fondraient et, la pile se disloquant, la réaction s'arrêterait d'elle-même. Mais l'effondrement de la pile lancerait dans l'atmosphère une masse importante de produits radioactifs ; le nuage, entraîné par les vents, rabattu éventuellement par les pluies, contaminerait des territoires parfois très éloignés. En fait, les multiples précautions prises rendent un tel accident tout à fait improbable. Le risque ne serait cependant pas négligeable en cas de bombardement aérien.

Nous avons seulement indiqué les grandes lignes des problèmes extrêmement vastes et totalement nouveaux que pose la sécurité des pays pourvus d'une grande industrie atomique. Jusqu'à présent les mesures prises aux Etats-Unis, première nation atomique du monde, se sont montrées d'une efficacité tout à fait satisfaisante.

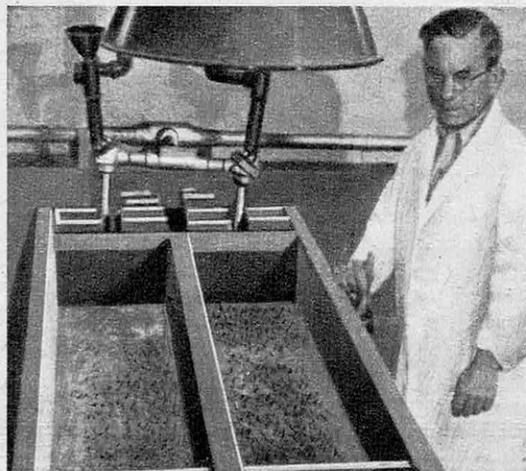
PROTECTION CHIMIQUE

La protection de l'organisme contre les neutrons et les radiations X et gamma, qui se fait, comme nous l'avons vu, au moyen d'écrans de plomb, de ciment, de paraffine, de cadmium, de bore, etc., a été récemment examinée sous un autre aspect. C'est celle de la protection par des substances chimiques. On a, en effet, observé que certaines substances organiques comme le carboxyolypeptidase, la cystéine, le glutathion, etc., pouvaient être protégés in-vitro contre les effets destructeurs des rayons X, par de nombreuses substances chimiques. Des expériences in vivo viennent de prouver (Mole, Philipot et Hodges à Harwell, Angleterre) que deux de ces substances : la thiourée et l'éthanodithiophosphonate de sodium, diminuent effectivement le pourcentage des souris tuées par une dose létale (habituellement mortelle) de rayons X (875 r) ou augmente considérablement la probabilité de guérison pour des irradiations sublétales (600 r). Il faut toutefois que ces substances soient administrées avant l'irradiation et non après. Autrement dit, si une extrapolation pour l'utilisation à la défense passive contre un danger atomique est possible, il faudra « vacciner, immuniser ou durcir » les organismes avant l'attaque!

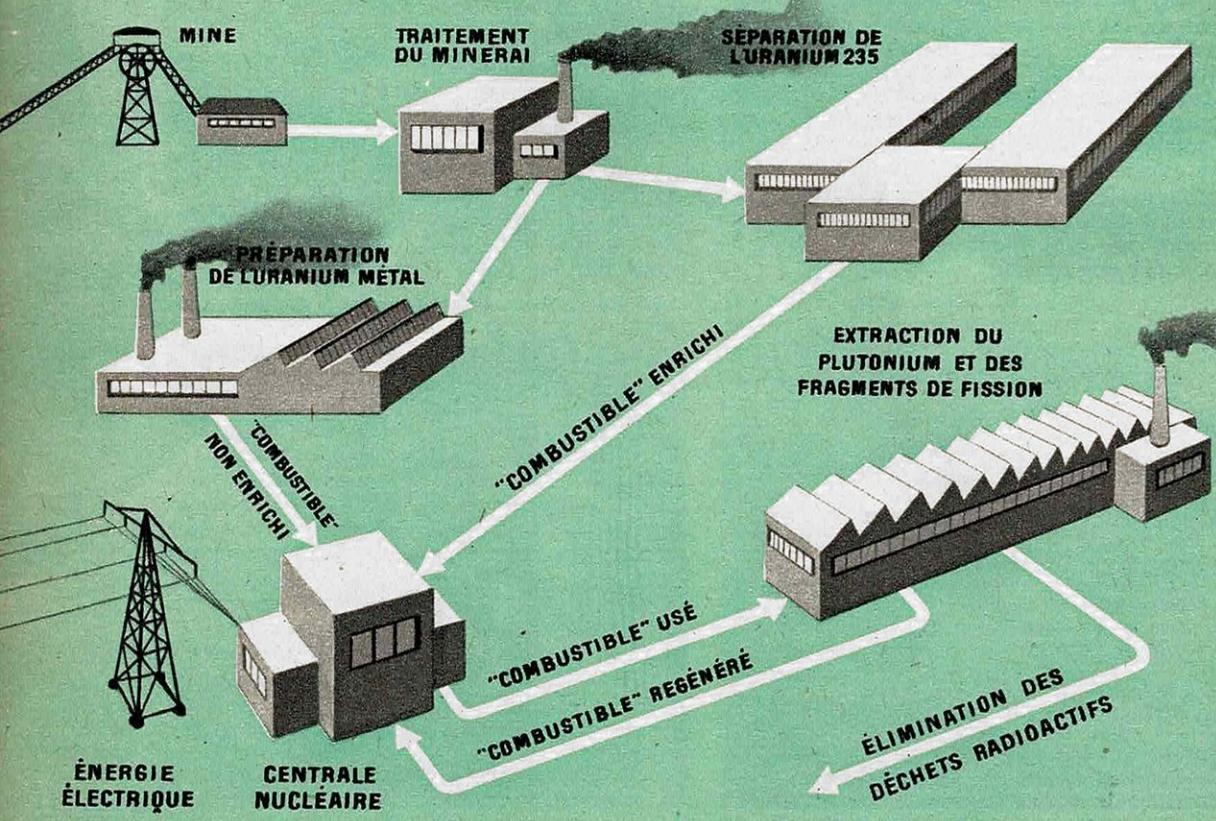
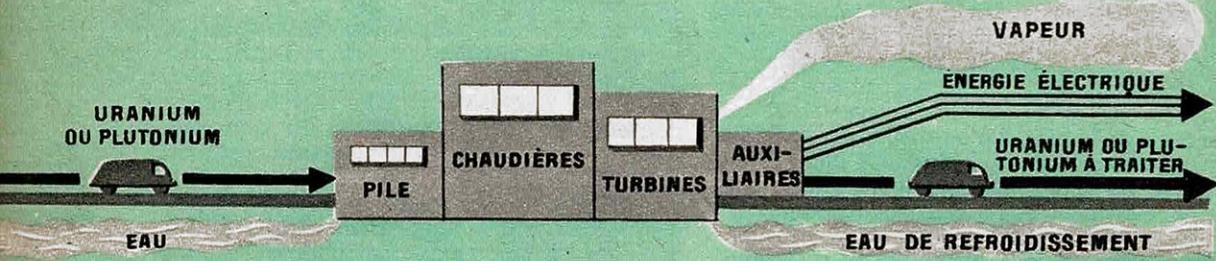
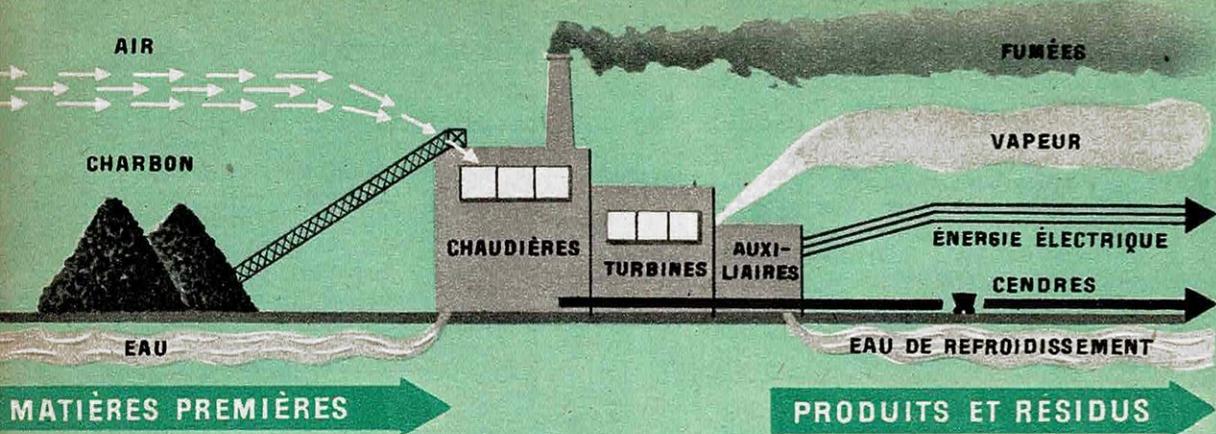
Rappelons également que les méfaits de l'absorption du plutonium, radioélément à rayons alpha qui reste en suspension dans l'air ou dans l'eau après une explosion atomique, peuvent être, dans certaines circonstances minimisés en forçant l'élimination de cette substance radioactive par un sel de zirconium qui prend sa place dans les cellules de l'organisme atteint. On n'a pas trouvé encore de remède contre un autre aléa des laboratoires atomiques : l'attaque des poumons par les poussières de beryllium.



● Ce nuage de fumée a servi à étudier la diffusion dans l'air des produits radioactifs gazeux qui seront rejetés par l'usine de Brookhaven près de New-York.



● On étudie à Hanford les effets biologiques des produits de fission en élevant des alevins dans de l'eau extraite des circuits de refroidissement des piles.



LES MOTEURS NUCLÉAIRES

Les sources d'énergie que l'homme a su mettre en exploitation à son profit sont extrêmement nombreuses : charbon, tourbe, bois, pétrole, gaz naturel, chutes d'eau, vent, huiles végétales et minérales, alcools. A cette liste évidemment incomplète, il faudrait encore ajouter d'autres sources dont, dans un avenir assez proche, la contribution pourrait être importante : marées et vagues, rayons solaires, différences de température entre les couches superficielles et les couches profondes, soit des océans, soit de l'écorce terrestre, etc. Il y a dix ans seulement qu'est apparue la possibilité d'accéder aux réserves d'énergie considérables enfermées au sein des noyaux atomiques. Jusqu'à aujourd'hui, physiciens et ingénieurs ne nous ont encore livré cette énergie en quantité importante que sous forme de bombes. Mais il est hors de doute que tous les éléments sont réunis pour passer aux applications pacifiques, à l'échelle industrielle. Il reste certes de nombreux problèmes à résoudre, mais ils ne diffèrent pas sensiblement de ceux que l'on rencontre dans la mise au point d'un procédé industriel nouveau et, pour la plupart d'entre eux, les solutions sont en vue. D'ici quelques années, cinq ou dix au maximum, des centrales nucléaires seront en fonctionnement. Sur ce point, les techniciens sont d'accord. Les pers-

pectives économiques, capitales pour l'industrie, sont cependant très controversées. Nous nous bornerons ici à quelques généralités.

La fission complète de 1 kg d'uranium 235 libère autant d'énergie que la combustion de 3 000 tonnes de charbon. Or, pour prendre un point de comparaison, il a été extrait dans le monde, en 1941, en chiffres ronds, 2 100 millions de tonnes de charbon. Pour les remplacer, il faudrait assurer la fission complète de 700 tonnes d'uranium 235, ce qui représente, l'uranium 235 n'étant présent que dans la proportion de 1/140 dans l'uranium naturel, près de 100 000 tonnes d'uranium naturel. Or, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, bien que l'uranium soit un constituant relativement abondant de la croûte terrestre, ses minerais exploitables sont rares et leur teneur est toujours faible, rarement supérieure de beaucoup à 1 % d'oxyde d'uranium. Pour obtenir 100 000 t d'uranium à partir de tels minerais, compte tenu du rendement des opérations de concentration, on a pu calculer qu'il faudrait extraire et traiter près de 20 millions de tonnes de minerais. Dans l'état actuel de la prospection, c'est évidemment impossible, de très loin.

Fort heureusement, l'uranium 235 n'est pas le seul combustible nucléaire utilisable. Le plutonium 239, issu de l'uranium 238, et l'uranium 233, issu du thorium, subissent la fission dans les mêmes conditions. Si la fabrication de ces deux éléments s'avère avantageuse (on sait qu'elle est actuellement à l'étude aux Etats-Unis avec les piles expérimentales autorégénératrices, dites « breeder »), l'industrie nucléaire disposera des réserves de matière première assez importantes, puisqu'elle pourra compter non seulement sur tout l'uranium naturel — et non plus seulement sur le seul isotope 235 — mais aussi sur le thorium. Ainsi sont calmées les appréhensions de ceux qui voient dans la construction de centrales nucléaires expérimentales un simple jeu de techniciens, sans utilité pratique puisque, disent-ils, on ne pourrait, faute de « combustible », passer au stade industriel.

Dans l'état actuel des recherches minières, il est certain que les réserves d'uranium et de thorium apparaissent assez limitées, si l'on s'en tient aux minerais riches. Bien que cela soit fort aléatoire, Clark Goodman, du Massachusetts Institute of Technology, a tenté de les évaluer pour les Etats-Unis (pour tenir compte des trouvailles futures des prospecteurs, il n'a pas hésité à doubler les chiffres actuels).

PRODUCTION D'ÉNERGIE DANS LES CENTRALES NUCLÉAIRES

Les deux figures de la page ci-contre sont inspirées de dessins de Clark Goodman (Science and Engineering of Nuclear Power). La première souligne les différences fondamentales dans l'exploitation d'une centrale thermique moderne brûlant du charbon et d'une centrale nucléaire qui n'exige ni stockage de combustible, ni air de combustion et ne produit ni cendres ni fumées. La seconde montre que la centrale nucléaire, elle-même relativement simple, ne peut être qu'une partie d'un système très complexe qui va de l'extraction du minerai d'uranium à l'élimination des déchets de fission. Tous les centres de traitement intermédiaires sont indispensables à l'exception peut-être de l'usine d'enrichissement en uranium 235. Le prix de revient de l'énergie nucléaire, à moins de nouvelles découvertes de la physique, restera donc assez élevé.

D'après lui, les minerais riches, d'une teneur moyenne de 10 %, représenteraient seulement 500 tonnes d'uranium et de thorium, de quoi satisfaire les besoins énergétiques des États-Unis pendant seulement un an. Mais en tenant compte des minerais de teneur supérieure à 0,1 %, techniquement exploitables et d'ailleurs exploités en partie, on arriverait déjà à un chiffre de l'ordre de 50 000 tonnes. Les minerais plus pauvres représentent des tonnages d'uranium et de thorium beaucoup plus considérables encore. Il est hors de doute qu'on en entreprendra l'exploitation quand le besoin s'en fera sentir ; de même qu'on trouve rentable d'extraire de l'or de minerais qui n'en contiennent que 300 mg à la tonne, de même on trouvera naturel d'extraire de l'uranium de minerai à 10 g d'uranium à la tonne, et on disposera alors de réserves de « combustibles » nucléaires pour plusieurs milliers d'années.

Reste la question du prix de revient de l'énergie d'origine nucléaire. Le problème est très complexe, et nous ne nous aventurerons pas à donner des chiffres qui ne reposeraient sur aucune base solide. On s'accorde généralement pour souligner que le prix que paye le consommateur d'électricité pour un kilowatt-heure représente pour la plus grande part les dépenses de distribution, d'administration, d'amortissement des installations, de rémunération du capital investi. Les dépenses de combustible représentent peu de chose ; elles sont même nulles dans le cas des centrales hydroélectriques. Le prix du « combustible » nucléaire est difficile à évaluer, étant donné les servitudes qu'entraîne la nécessité de le purifier périodiquement, mais serait-il nul qu'une centrale nucléaire aurait un prix de revient certainement supérieur à celui d'une centrale classique, car elle coûterait beaucoup plus cher à édifier. Le kilowatt-heure nucléaire ne peut pas concurrencer le kilowatt-heure thermique ou hydraulique, sauf dans des régions du globe très éloignées des centres hydroélectriques ou charbonniers.

LA CENTRALE NUCLÉAIRE

Une centrale nucléaire n'est qu'une espèce particulière de centrale thermique. La pile où est libérée l'énergie de fission du « combustible » nucléaire est l'analogue du foyer où s'effectue, dans les centrales classiques, la combustion du charbon. Tous les autres organes sont semblables. Un fluide convenable transporte l'énergie calorifique à une machine thermique, une turbine, par exemple, qui la transforme en énergie mécanique et entraîne éventuellement un générateur électrique.

Cependant, une centrale nucléaire est soumise à des sujétions particulières dues à la nature de son « combustible ». D'épais blindages doivent protéger le personnel contre le rayonnement de la pile et des précautions spéciales doivent être prises pour que le

fluide moteur ne transporte pas de produits radioactifs qui contamineraient tout l'appareillage. D'autre part, la construction est compliquée par le fait qu'il est indispensable de renouveler périodiquement, au moins en partie, le « combustible » pour le soumettre à un nouveau traitement afin de le débarrasser des produits de fission qui s'y accumulent et freinent la réaction en chaîne. L'extraction de portions de matière active de la pile exige des commandes à distance, car l'énorme radioactivité des produits de fission interdit à tout être vivant d'en approcher. Les matières ainsi extraites doivent être acheminées vers des centres de traitement spécialisés, qui, en général, pourront se trouver à des distances plus ou moins grandes de la centrale. Le transport ne soulève pas de difficultés majeures, si on prend la précaution de laisser « refroidir » ces matières, c'est-à-dire d'attendre un temps suffisant pour que les produits les plus radioactifs, de vie courte, se soient à peu près complètement désintégrés.

Le rendement théorique d'une machine thermique est régi par le principe de Carnot. Il est d'autant meilleur que la température de la source chaude est plus élevée et que la chute de température entre la source chaude et la source froide est plus grande. Les turbines à vapeur des centrales thermiques reçoivent de la vapeur à quelque 600° ; les turbines à gaz fonctionnent aux alentours de 750 à 800° et parfois plus. Rien ne s'oppose théoriquement à ce que les piles atteignent de telles températures ; il suffit de régler convenablement la vitesse de la réaction nucléaire et le débit du fluide chargé d'évacuer la chaleur pour atteindre le niveau désiré. Mais ces hautes températures posent des problèmes constructifs qui sont loin d'être tous résolus. Dans toutes les piles atomiques construites jusqu'ici, l'énergie calorifique est produite à basse température, de l'ordre de 100° au maximum lorsque la pile est refroidie par de l'eau, de 150° lorsqu'elle est refroidie par l'air. L'expérience acquise avec elles ne peut donc être de grande utilité. Les matériaux de construction de la pile devront pouvoir supporter de hautes températures sans que leur résistance mécanique soit affectée ; en même temps, ils devront être peu avides de neutrons pour ne pas ralentir la réaction ; ils devront aussi pouvoir supporter le bombardement intense de neutrons sans éprouver de modification de structure réduisant leur résistance mécanique. Pour toutes ces raisons, il semble que l'emploi de l'acier soit à écarter. Sans doute faudra-t-il faire appel à des métaux à point de fusion élevé, dont la métallurgie est encore peu développée, tels que le béryllium, le titane, le molybdène, le tantale, le tungstène ou le zirconium. Les produits céramiques sont aussi à l'étude et semblent ouvrir des perspectives intéressantes.

Le choix du fluide chargé d'évacuer les calories dans la pile est également difficile, car il doit satisfaire à de nombreuses condi-

PLUTONIUM 239 ET URANIUM 233

De même que l'uranium 238, en capturant un neutron, donne naissance à du plutonium 239, le thorium, exposé aux neutrons d'une pile, engendre de l'uranium 233. Ces deux éléments sont fissibles comme U 235.

tions : il doit interférer au minimum avec la réaction nucléaire, c'est-à-dire absorber peu les neutrons et pouvoir être employé en masse aussi faible que possible, donc avoir une chaleur spécifique élevée ; il doit être stable à haute température et supporter le bombardement de neutrons sans se décomposer ; sa circulation dans la pile ne doit pas exiger des pompes de grande puissance ; enfin il ne doit pas attaquer chimiquement les canalisations. Nous verrons plus loin quelles substances peuvent convenir suivant les divers types de piles (1).

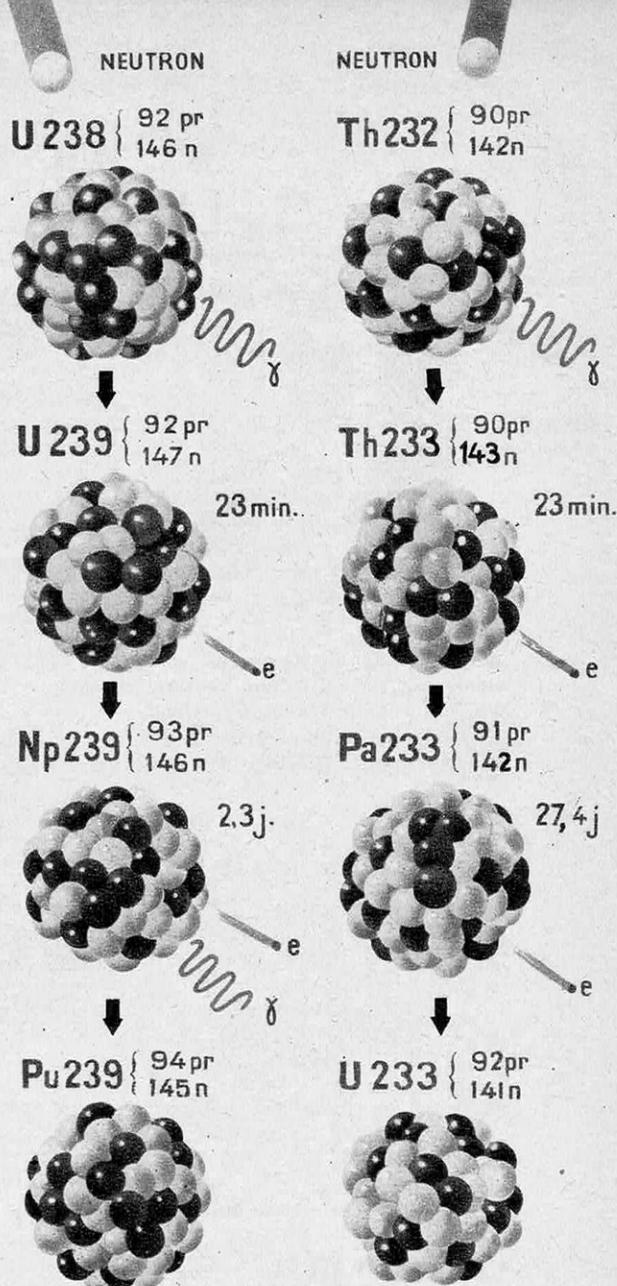
LES PILES INDUSTRIELLES

Suivant la vitesse des neutrons au moment où ils frappent les noyaux des éléments dont ils vont provoquer la fission, on peut distinguer les piles à neutrons rapides, à neutrons thermiques et à neutrons intermédiaires. Dans les premières, les neutrons, au moment où ils provoquent une fission nouvelle, possèdent encore l'énergie qui leur était impartie lors de leur émission. Ces piles ne comportent donc pas de modérateur ralentissant les neutrons. De ce fait, elles sont très peu volumineuses, mais, comme nous avons vu qu'une réaction en chaîne ne peut s'établir dans de l'uranium naturel même très pur, ce seront nécessairement des piles très fortement enrichies en éléments fissionnables. Et comme la probabilité pour qu'un neutron provoque la fission est moindre pour de grandes valeurs de son énergie, il faudra, pour atteindre la masse critique, rassembler plus de matière fissible, uranium 235 ou plutonium 239, que dans une pile à neutrons lents avec modérateur, dont le combustible fissible représente une faible fraction de la masse totale.

Dans les piles à neutrons thermiques, les neutrons provoquent les fissions après avoir été ralentis par leurs chocs successifs sur les atomes d'un modérateur approprié. La masse totale de ce modérateur est en général de beaucoup supérieure à celle de la matière fissionnable, de sorte que les piles de ce type seront toujours très volumineuses.

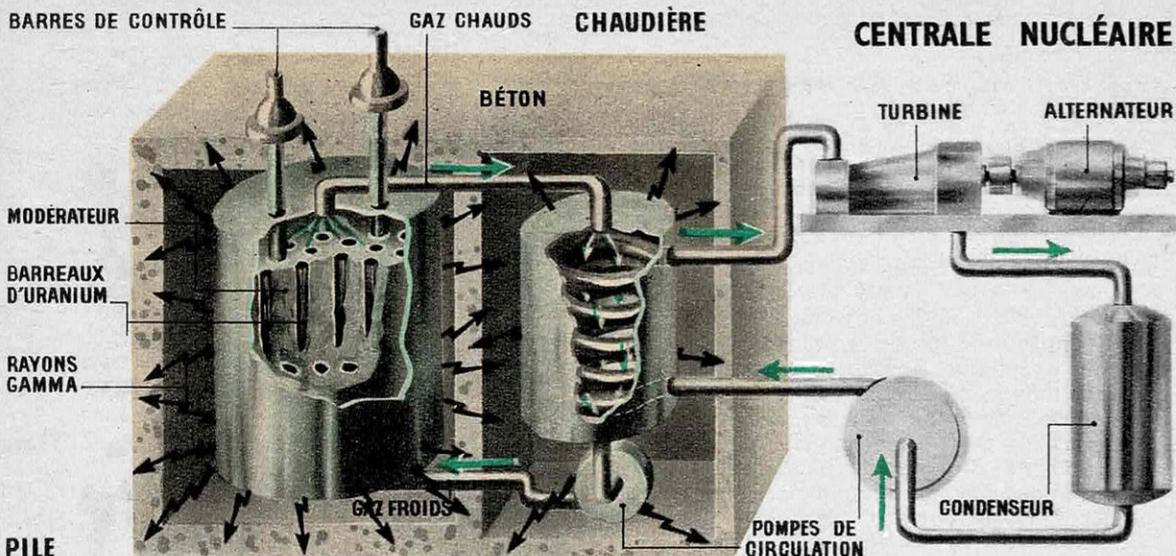
Les piles à neutrons intermédiaires comportent peu de modérateur. Leur volume sera donc en général supérieur à celui des piles à neutrons rapides et inférieur à celui des piles à neutrons lents ou thermiques.

D'un autre point de vue, on peut ranger les piles en deux catégories : les piles hétérogènes et les piles homogènes. Les piles hété-



rogènes sont caractérisées par le fait que les matières fissibles et le modérateur sont entièrement distincts. Dans les piles homogènes, au contraire, le « combustible » et le modérateur sont intimement mélangés. Les deux dispositions ont leurs avantages et leurs inconvénients de principe. En général, une disposition hétérogène exige une quantité moindre de matière fissible pour l'établissement de la réaction en chaîne. Bien souvent, un mélange homogène ne pourra fonctionner quelque grande que soit sa masse, alors qu'une disposition hétérogène des mêmes éléments permet à la réaction de s'établir. L'exemple le plus frappant, que nous avons déjà évoqué plusieurs fois, est celui de l'uranium naturel : il ne peut à lui seul constituer une pile ni une bombe, et le calcul montre qu'aucun mélange homogène d'uranium natu-

(1) Nous faisons dans ce chapitre de larges emprunts aux études de Clark Goodman et de L. A. Ohlinger.



● La centrale nucléaire doit comporter tous les éléments habituels d'une centrale thermique. La pile remplace le foyer de la chaudière; un fluide convenable, de l'hélium par exemple, transporte la chaleur qui y est libérée par les fissions à un

échangeur de température, produisant de la vapeur qui se détend dans une turbine et se condense dans un condenseur servant de source froide. La turbine entraîne un alternateur. La pile représentée ci-dessus est du type hétérogène

rel avec un autre corps quel qu'il soit, ne donne de réaction en chaîne, alors qu'on l'obtient très facilement en truffant convenablement un modérateur approprié, eau lourde ou graphite, par exemple, avec des blocs d'uranium naturel.

D'un autre côté, il est évident qu'une pile homogène est en général plus facile à construire. Il faut cependant considérer que la purification du « combustible », indispensable après un certain temps de fonctionnement, est plus compliquée parce qu'on est conduit à traiter un mélange très peu concentré, les matières fissibles étant noyées dans plusieurs fois leur volume de modérateur.

LES PILES HÉTÉROGÈNES

La pile à eau lourde d'Argonne et celles à graphite de Hanford sont des exemples caractéristiques de piles hétérogènes. Le « combustible », sous forme d'oxyde ou de métal, est enfermé dans des tubes d'aluminium qui sont plongés dans l'eau lourde ou bien logés dans des évidements de la masse de graphite servant de modérateur; ces évidements ont un diamètre légèrement supérieur au diamètre extérieur du tube et l'espace annulaire est parcouru par une canalisation d'eau assurant le refroidissement. Ces piles sont conçues pour fonctionner uniquement à basse température et on ne peut songer à leur faire dépasser une centaine de degrés, sous peine de provoquer la vaporisation soit de l'eau lourde, soit de l'eau. La formation de bulles, entraînant une diminution brusque de la densité, rendrait le fonctionnement de la pile instable. Pour l'empêcher, il faudrait opérer sous pression,

d'où la nécessité de prévoir des épaisseurs de canalisations plus fortes, qui absorberaient en pure perte les précieux neutrons. Encore le gain de température ne serait-il pas considérable.

Du fait que les piles industrielles doivent fonctionner à température élevée, elles ne peuvent utiliser, ni comme modérateur, ni comme agent de transport de la chaleur, aucun liquide à bas point d'ébullition. Cette sujétion entraîne la nécessité de prévoir un système d'évacuation des calories comportant deux circuits reliés par un échangeur de température. Dans un premier circuit, traversant la pile, se trouve un gaz ou un métal à bas point de fusion et point de vaporisation élevé. Il se charge de calories dans la pile et les cède, dans un échangeur de température, à de la vapeur qui emprunte un deuxième circuit relié à la turbine. Cette disposition présente l'avantage d'éviter toute contamination de la vapeur par les produits radioactifs qui auraient pu passer dans le premier circuit. Naturellement, lorsque ce premier circuit est contaminé, il convient d'étendre les blindages protecteurs qui entourent la pile pour leur faire englober les canalisations, jusqu'à l'échangeur compris.

Parmi les gaz susceptibles de convenir pour l'évacuation de la chaleur, les plus intéressants sont l'air, le gaz carbonique, l'hydrogène et l'hélium, surtout ce dernier. Son seul inconvénient est sa faible densité, qui oblige à construire un échangeur de températures de grandes dimensions. L'air, sous l'action des neutrons, devient radioactif (oxygène et argon radioactifs) et l'azote, qu'il contient en proportion importante, est très avide de

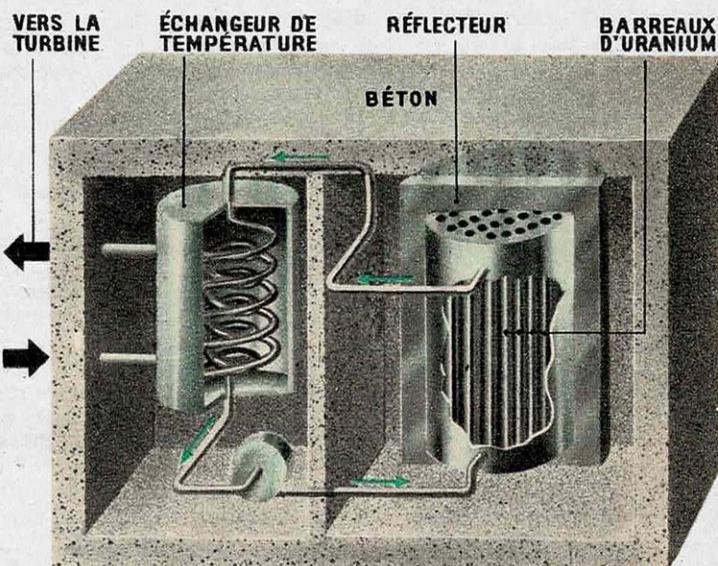
neutrons. Le gaz carbonique est dissocié par le bombardement neutronique, phénomène qui devient rapidement gênant, car le gaz circulant en circuit fermé traverse la pile un grand nombre de fois par heure. L'hydrogène, enfin, est capable d'absorber des neutrons.

De nombreux métaux conviennent, à l'état fondu, pour le transport des calories de la pile à l'échangeur : sodium, potassium et surtout plomb et bismuth. Il est nécessaire de prévoir un dispositif de chauffage auxiliaire pour assurer la fusion du métal dans les canalisations avant la mise en marche de la pile lorsqu'elle a été longtemps arrêtée. En ce qui concerne les modérateurs des piles indus-

trielles, les hautes températures imposent les matériaux réfractaires. Les plus avantageux pour les piles à neutrons thermiques sont l'oxyde ou le carbure de béryllium et le graphite (à condition d'opérer en atmosphère convenable). Le béryllium et le carbone sont des éléments de faible poids atomique et les neutrons y perdent rapidement leur énergie. D'autres matériaux dont les propriétés sont beaucoup moins favorables du point de vue ralentissement et absorption des neutrons peuvent être préférés dans les piles à neutrons intermédiaires en raison de leurs propriétés thermiques et de leur stabilité mécanique : par exemple le tungstène, le tantale, les

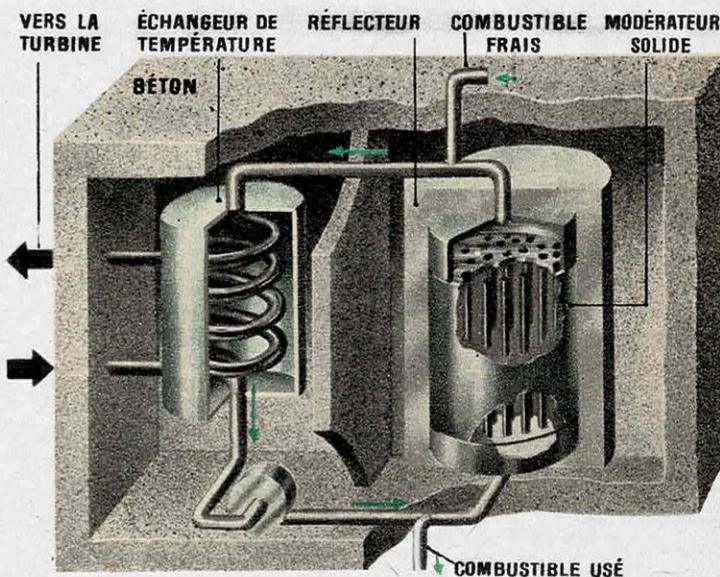
MODÉRATEUR EN CIRCUIT

● Cette pile, comme celle de la figure ci-après est du type hétérogène. Le « combustible » est constitué par des barres d'uranium naturel ou d'uranium enrichi en isotope fissible uranium 235 ou uranium 233, ou encore en plutonium 239. Le modérateur liquide doit pouvoir supporter une température élevée pour que le rendement thermique de l'installation soit acceptable : ce pourra être un métal fondu, plomb ou bismuth, par exemple. Dans ces conditions, il est nécessaire d'enfermer non seulement la pile mais aussi l'échangeur de température dans un épais blindage en béton, car le modérateur entraîne des éléments radioactifs engendrés par les neutrons et des produits de fission si les enveloppes des barres ne sont pas étanches.



COMBUSTIBLE EN CIRCUIT

● La pile, elle aussi du type hétérogène, est en quelque sorte l'inverse de la précédente. Au lieu que le combustible soit fixe et que le modérateur, qui sert en même temps d'agent de transport de la chaleur, circule autour de lui, c'est le modérateur qui est fixe et le combustible qui le traverse par des canaux ménagés dans sa masse et qui transporte la chaleur à l'échangeur de température. On peut utiliser soit un sel d'uranium naturel ou enrichi, soit une suspension de particules métalliques dans un liquide approprié, soit un alliage à point de fusion assez bas. Il faut comme précédemment prévoir un blindage étendu. On peut prélever sur le circuit une partie du combustible usé et le remplacer par du combustible frais sans qu'on soit obligé d'arrêter la marche de la pile.



oxydes, carbures ou nitrures d'éléments lourds. Il faudra racheter la perte de neutrons due à leur présence par un complément de matière fissible.

LES PILES HOMOGÈNES

Les piles homogènes sont, en général, comme nous l'avons dit, d'une construction plus simple que les piles hétérogènes, mais elles exigent un « combustible » fortement enrichi.

Le mélange intime de « combustible » et de modérateur peut être solide ou liquide.

Dans le premier cas, il pourra être constitué par de l'oxyde ou du carbure d'uranium dispersé dans de la poudre de graphite, d'oxyde de béryllium, de magnésie ou même de silice, ou encore par des alliages d'uranium ou de plutonium à point de fusion élevé. La métallurgie de ces alliages est encore mal connue, ou tout au moins rien n'a été publié à leur sujet. Il est probable que des alliages avec le béryllium ou le magnésium pourront être utilisés pour constituer des piles homogènes à neutrons thermiques, tandis que les piles à neutrons rapides ou intermédiaires peuvent faire appel à des métaux plus lourds, tels que le thorium, le cuivre, le tungstène.

Une pile homogène solide pourrait être constituée par un cylindre de métal actif, fortement comprimé s'il s'agit de poudres, entouré d'un réflecteur de neutrons. Le bloc cylindrique serait traversé par des canaux de faible diamètre où passerait le fluide d'évacuation de la chaleur, soit gazeux (air, gaz carbonique ou hélium), soit liquide (plomb ou bismuth fondus). Ce fluide céderait sa chaleur à de la vapeur dans un échangeur de température. La surface des canaux de refroidissement devrait être recouverte d'une substance convenable pour empêcher la contamination radioactive du fluide de refroidissement. En effet, lors de l'éclatement par fission des noyaux voisins de la surface, des fragments radioactifs pourraient être projetés dans le courant de refroidissement et contamineraient toutes les canalisations jusqu'à l'échangeur qu'il faudrait entourer d'un blindage protecteur.

Il faut remarquer que la chaleur n'est pas dégagée dans toute la masse cylindrique d'une manière uniforme. La région centrale, en particulier, tend à être plus chaude que la région périphérique, et si le composé n'a pas une conductibilité thermique élevée, il peut se développer dans la masse des efforts internes considérables, dus au « gradient » de température, et qui entraîneraient des ruptures. Le réseau des canalisations de refroidissement doit être étudié en conséquence.

Dans les piles homogènes à mélange actif liquide, on pourrait envisager d'utiliser des sels d'uranium ou de plutonium en solution, soit dans l'eau légère, soit dans l'eau lourde, à condition d'opérer sous pression pour éviter

toute vaporisation dans la pile aux hautes températures de fonctionnement. Il faut tenir compte cependant du fait que, sous l'action du bombardement par les neutrons, l'eau se trouve partiellement décomposée en ses éléments : hydrogène et oxygène pour l'eau légère, deutérium et oxygène pour l'eau lourde, qui tendent à se recombinaison d'une manière explosive. L'exploitation de la pile serait compliquée par la nécessité d'éliminer l'hydrogène et l'oxygène libres, dont il suffirait de se débarrasser car ils sont sans valeur, et de recombinaison le deutérium et l'oxygène pour récupérer la précieuse eau lourde. Aussi semble-t-il plus pratique d'utiliser soit des alliages d'uranium et de plutonium à bas point de fusion, encore malheureusement assez mal connus, ou des suspensions d'oxyde ou de carbure d'uranium dans du plomb, du bismuth ou de l'antimoine fondus. Il faudrait cependant veiller, dans ce dernier cas, qu'il ne se produise pas accidentellement de concentrations locales de matière fissible.

Pour l'évacuation des calories, il est naturellement possible d'employer un fluide auxiliaire traversant des canalisations plongées dans la masse liquide, mais on peut envisager aussi d'utiliser le mélange actif lui-même, puisqu'il est liquide. Dans une telle installation, le mélange actif circulerait en circuit fermé entre un récipient sphérique entouré d'un réflecteur de neutrons, et un échangeur de température. C'est dans le récipient sphérique que se maintiendrait la réaction en chaîne et que les calories seraient libérées, et le liquide même où elles sont apparues les transporterait à l'échangeur. Un des avantages de ce système serait la possibilité de retirer du circuit, par une simple dérivation, le « combustible » usé, afin de le purifier, et d'y introduire du combustible neuf. Mais il est évident qu'il faut une plus grande quantité de matière active, car elle remplit non seulement la pile sphérique, mais aussi les canalisations de l'échangeur et celles qui font communiquer les deux organes. En outre, toutes les canalisations et les pompes de circulation seraient contaminées par les produits de fission et il faudrait les inclure dans le volume protégé par les blindages. Ce qui est plus grave, c'est qu'il faudrait également isoler par des blindages le circuit secondaire de l'échangeur et en prévoir éventuellement un deuxième, ce qui abaisserait le rendement de l'installation. En effet, tous les neutrons provenant des fissions ne sont pas émis instantanément. Certains (1 % environ) n'apparaissent qu'avec un retard qui peut atteindre une minute. C'est d'ailleurs l'existence de ces neutrons retardés qui permet de maîtriser la réaction en chaîne dans les piles. Mais ici, comme les éléments fissibles quittent la pile, certains de ces neutrons retardés seront émis dans les canalisations de l'échangeur et traverseront le fluide qui circule dans le deuxième circuit de cet échangeur, y créant des éléments

radioactifs qui contamineront le circuit. D'ailleurs ces neutrons retardés soustraits à la réaction en chaîne obligeront à augmenter le volume de la sphère où elle s'effectue et rendront plus délicat le réglage de la réaction.

LE CONTROLE DES PILES

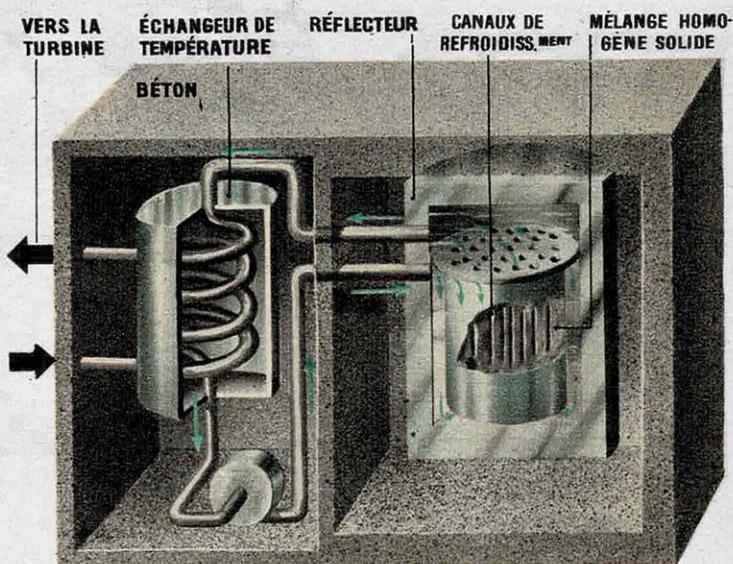
Le « niveau » de fonctionnement d'une pile nucléaire est déterminé par la valeur du nombre des neutrons libres qui s'y trouvent à un instant donné. Pour régler une pile, on doit agir sur ce nombre de neutrons, ce que l'on peut faire de différentes manières : modifier la forme de la pile ; faire varier la quantité de

matière fissible ou celle de modérateur (lorsque ce dernier est liquide) ; rendre plus facile ou plus difficile l'échappement des neutrons vers l'extérieur en modifiant le réflecteur qui l'entoure (pourrait convenir en particulier aux piles homogènes solides) ; introduire dans sa masse ou entre la pile et le réflecteur des substances qui absorbent plus ou moins les neutrons.

Le dernier procédé est pratiquement le seul mis en œuvre actuellement. Par des ouvertures convenablement ménagées, on introduit dans la pile, constituée pour dépasser la masse critique, des barres absorbantes qui sont généralement en acier au bore ou en

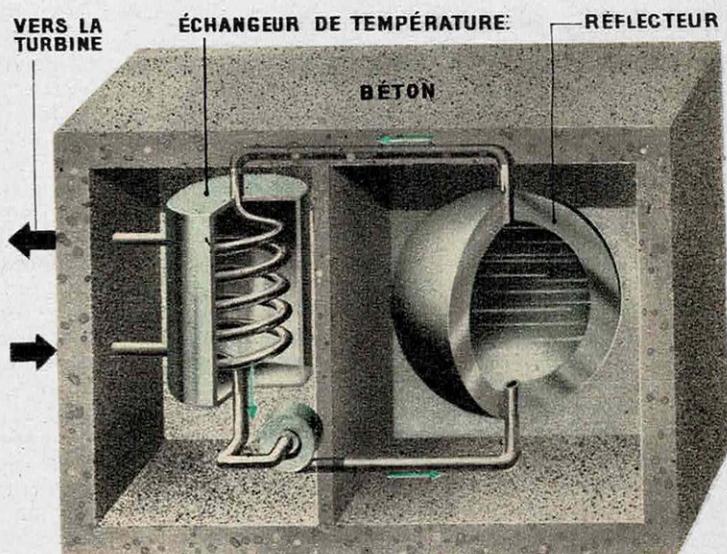
PILE HOMOGÈNE SOLIDE

● Cette pile est constituée d'un noyau solide où l'uranium ou le plutonium sont intimement mélangés à un corps choisi comme modérateur. Ce sera, par exemple, un alliage à point de fusion élevé ou un mélange de poudre métallique avec un produit réfractaire. Le noyau est percé de trous que traverse le fluide de refroidissement, qui peut être un liquide ou un gaz. On évitera qu'il se charge de produits de fission en garnissant les canaux d'un revêtement convenable. Il n'est plus besoin alors d'inclure l'échangeur de température sous un blindage aussi épais que celui de la pile. On utilisera avantageusement des métaux liquides lourds, comme le plomb, le bismuth ou le mercure. Il faut démonter l'installation pour traiter le combustible.



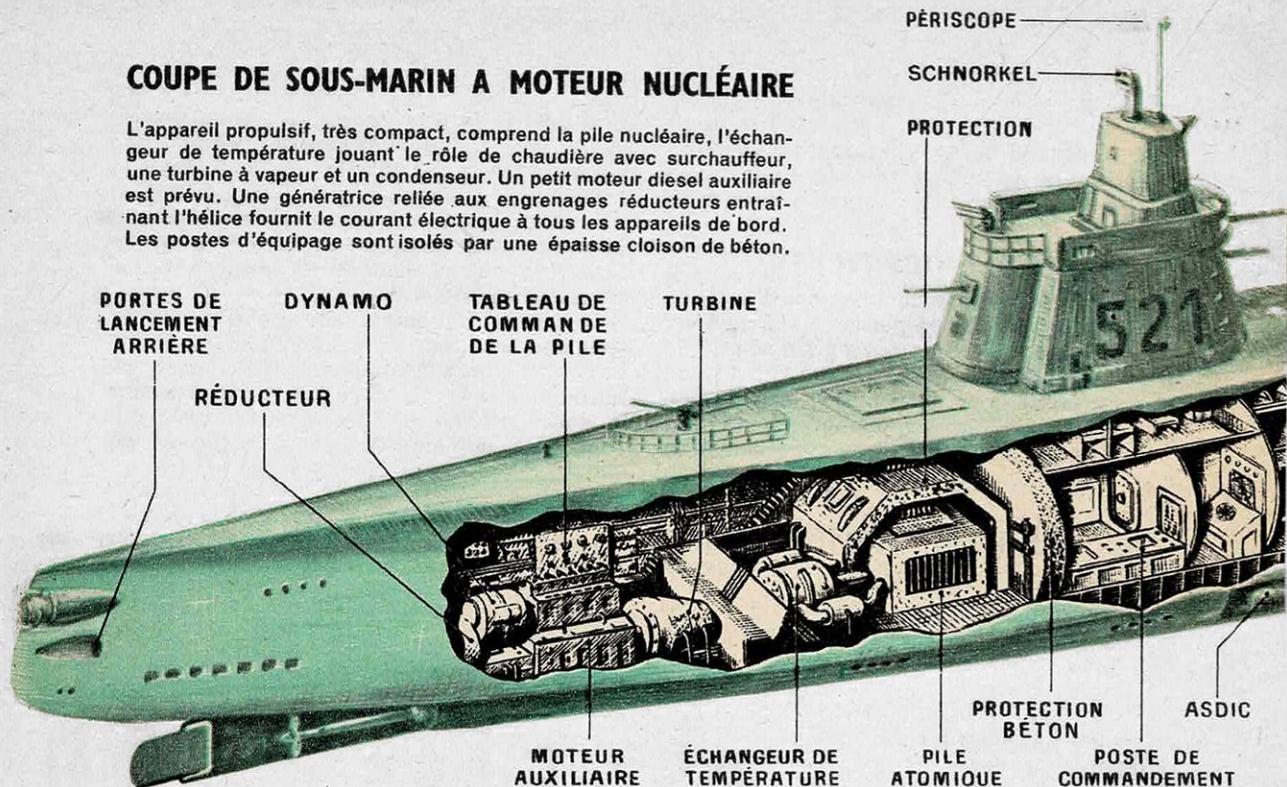
PILE HOMOGÈNE LIQUIDE

● Nous avons affaire ici à un mélange homogène de combustible nucléaire et de modérateur qui circule entre l'échangeur de température et un récipient sphérique. C'est dans ce dernier seulement que la masse critique est atteinte grâce au volume rassemblé et à la présence du réflecteur de neutrons. C'est là que les calories se dégagent. Il est nécessaire de prévoir un épais blindage de béton englobant l'échangeur de température. Les neutrons retardés émis par le combustible sur tout son circuit et non pas seulement dans la sphère rendront radioactif le liquide secondaire de l'échangeur, et il faudra protéger également le reste de l'installation et prévoir même un second échangeur. Ces schémas sont inspirés de croquis de C. Goodman.



COUPE DE SOUS-MARIN A MOTEUR NUCLÉAIRE

L'appareil propulsif, très compact, comprend la pile nucléaire, l'échangeur de température jouant le rôle de chaudière avec surchauffeur, une turbine à vapeur et un condenseur. Un petit moteur diesel auxiliaire est prévu. Une génératrice reliée aux engrenages réducteurs entraînant l'hélice fournit le courant électrique à tous les appareils de bord. Les postes d'équipage sont isolés par une épaisse cloison de béton.

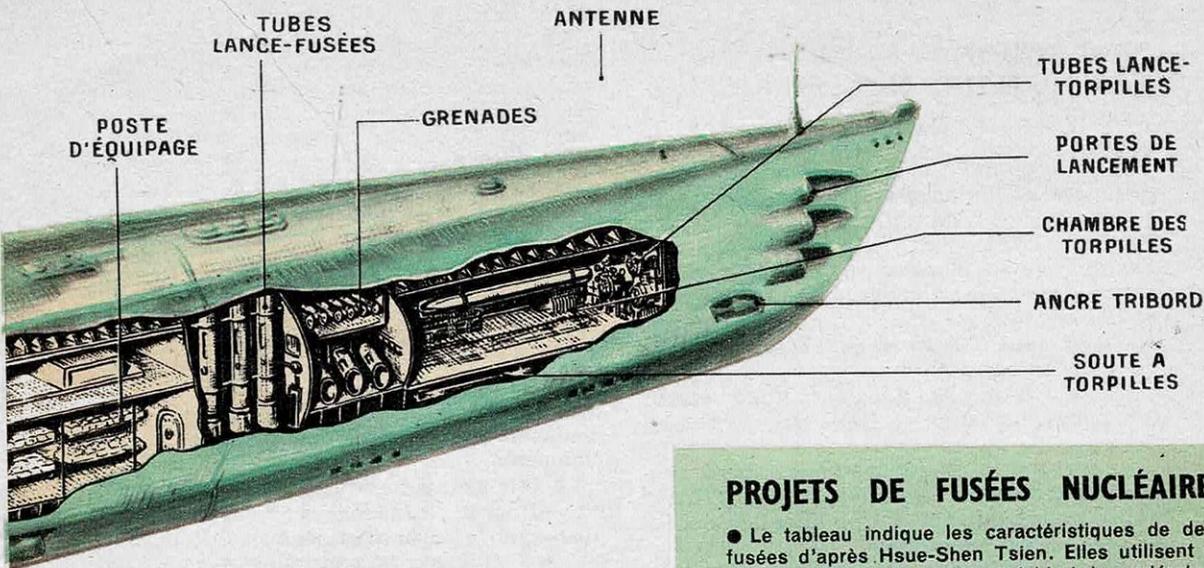


cadmium. Lorsque ces barres sont complètement enfoncées, la pile est à l'arrêt; on les retire progressivement jusqu'à ce que la réaction en chaîne s'établisse et se stabilise.

Il faut bien remarquer que la manœuvre des barres d'absorption n'offre aucune analogie avec celle de l'accélérateur d'un moteur d'automobile, par exemple. Quand on enfonce plus ou moins l'accélérateur, on ouvre plus ou moins le papillon d'admission du gaz carburé, et faisant ainsi varier le débit du combustible, on fait développer au moteur une puissance plus ou moins grande; à chaque position de l'accélérateur correspond une puissance déterminée. Au contraire, quand on tire une barre d'absorption à partir d'une position correspondant à un fonctionnement stable de la pile, on permet à la réaction en chaîne de se développer plus ou moins rapidement suivant la distance dont la barre est tirée. C'est dire que l'on règle seulement la vitesse avec laquelle la réaction se développe. Si on laissait la barre dans sa nouvelle position, la réaction continuerait à croître à un rythme exponentiel, la température s'élèverait jusqu'à destruction des matériaux les moins résistants à la chaleur, la pile serait mise hors de service et la réaction s'arrêterait alors d'elle-même. Il faut donc, lorsque le niveau désiré est atteint, remettre la barre en place, sensiblement à sa position primitive, pour le stabiliser. En fait, la plupart des piles (piles à neutrons thermiques) ont un coefficient de température négatif. On entend par là que lorsque la température s'élève, les neutrons, plus rapides par suite de l'agitation

thermique accrue, sont moins facilement captés par les noyaux d'uranium ou de plutonium, de sorte que la réaction se ralentit, et que la température tend à s'abaisser. Ce coefficient négatif est un élément de stabilisation important des piles thermiques; il amène à replacer la barre de réglage à une position légèrement différente suivant le niveau où on stabilise la réaction. D'autre part, le « combustible » s'empoisonnant progressivement avec ses propres produits de fission, on est amené, pour maintenir le niveau, à extraire de plus en plus les barres de réglage jusqu'au moment où il devient indispensable de renouveler le « combustible ».

Dans la pratique, on prévoit plusieurs jeux de barres, au moins deux: l'un pour le démarrage et l'arrêt, l'autre pour le réglage précis du niveau de fonctionnement. Le premier pourra servir en cas d'urgence à arrêter automatiquement la pile. Ces barres ne doivent pas être trop ajustées dans leur logement car, par suite des déformations thermiques des matériaux de la pile, elles pourraient se trouver coincées, et aussi parce qu'il faut que l'air présent dans leur logement puisse s'échapper rapidement quand elles s'enfoncent. Remarquons que cet air qui a été soumis au rayonnement de la pile est devenu radioactif et peut mettre en danger le personnel de service. Il est bon de prévoir l'emploi d'un gaz inerte tel que l'hélium, que l'on enverrait dans le logement des barres au moment où on les extrait. Enfin, l'absorption des neutrons dans les barres dégage de la chaleur, et il peut être utile de les refroidir,



L'AVENIR DES CENTRALES NUCLÉAIRES

Dans un pays bien pourvu en chutes d'eau comme la France, la construction de centrales nucléaires industrielles semble pour le moins prématurée.

Elles ne pourraient produire, dans l'état actuel de la technique, et sans doute avant longtemps, le kilowatt-heure à un prix suffisamment bas.

Dans les colonies et les pays de l'Union Française, la situation serait différente. Des régions non encore équipées d'un réseau de distribution électrique et très éloignées d'un barrage ou de gisements de charbon retireraient de grands avantages de l'installation d'une centrale nucléaire.

Mais il faudra disposer, d'une part, de matières premières en quantité suffisante, uranium et graphite en particulier, et aussi d'eau en abondance pour refroidir le condenseur de la machine thermique, source froide indispensable sans laquelle le rendement de la centrale serait déplorable.

Il est vraisemblable que le « combustible » nucléaire usé, c'est-à-dire chargé de plutonium et de produits de fission après un certain temps de fonctionnement de la centrale, ne pourrait être traité sur place.

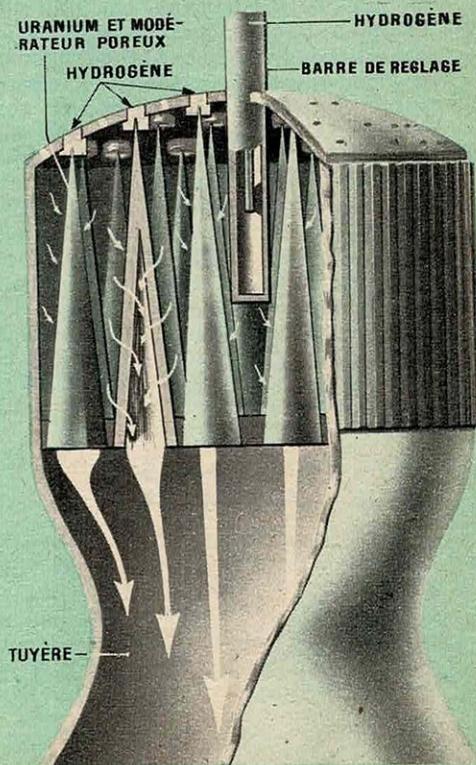
Une fois extrait de la pile, il devra être envoyé soit dans la métropole, soit dans un centre colonial industrialisé. Il faudra par conséquent stocker pendant des mois des lingots radioactifs avant de pouvoir les faire voyager sans protection prohibitive. Cette procédure nécessitera des lingots de remplacement en surnombre, et par suite un stock de matières premières au moins deux fois plus important que pour une pile métropolitaine.

Le problème du personnel compétent à exiler dans la brousse présentera sans doute aussi des difficultés majeures.

PROJETS DE FUSÉES NUCLÉAIRES

● Le tableau indique les caractéristiques de deux fusées d'après Hsue-Shen Tsien. Elles utilisent un mélange poreux d'uranium enrichi et de modérateur, en forme de cônes traversés par l'hydrogène éjecté.

Enrichissement	U235/U238 = 1/10 U235/U238 = 1	
Diamètre de la pile	5 m	3,75 m
Longueur de la pile	2,5 m	1,9 m
Poids de matière active	33 t	16 t
Poids d'uranium 235	3,3 t	8 t
Flux d'hydrogène	3 150 kg/s	1 500 kg/s
Poussée	2 600 t	1 250 t
Puissance	1,6.10 ⁹ kW	0,76.10 ⁹ kW
Poids initial	1 560 t	750 t
Poids d'hydrogène	1 246 t	601 t
Durée de fonctionnement	358 s	358 s
Vitesse maximum	8 145 m/s	8 145 m/s



PROPULSION PAR MOTEURS NUCLÉAIRES

Les principes généraux que nous avons développés à propos des centrales nucléaires fixes s'appliquent intégralement aux piles destinées à équiper des engins mobiles, qu'ils soient appelés à se déplacer sur terre, dans l'air, sur l'eau ou dans l'eau. Bien entendu, on donnera la préférence, pour ces applications, aux équipements les plus compacts, et par conséquent, sauf à bord des navires, on adoptera la plupart du temps des réacteurs homogènes enrichis.

On peut, d'un point de vue pratique, classer les piles nucléaires mobiles en trois catégories :

— celles pour lesquelles on n'a pas à prévoir de protection contre les radiations, c'est-à-dire celles qui doivent équiper les engins autoguidés ou téléguidés ;

— celles qu'il faut protéger par des centaines de tonnes de béton, telles que celles destinées aux navires transatlantiques et qui doivent être placées en un point de la coque tel que les passagers et l'équipage n'aient rien à craindre des radiations ;

— celles qui pourront n'être que partiellement protégées, par exemple celles que l'on pourrait monter sur les locomotives et les gros avions. Sur les avions, par exemple, seule une face de la pile doit être bien bétonnée, les cinq autres faces qui ne sont pas tournées vers la cabine n'ont besoin d'aucune protection spéciale. Il faudra, bien entendu, prévoir des emplacements bétonnés spéciaux sur les aérodromes, où les avions viendront se ranger après l'atterrissage.

On transposera facilement ces observations au cas des locomotives. On intercalera, par exemple, deux ou trois wagons de marchandises non activables par le rayonnement entre la locomotive et le poste de commande situé sur la troisième ou la quatrième voiture du convoi. Des tunnels spéciaux devraient être prévus pour les séjours dans les gares.

La propulsion des avions par des engins nucléaires est à l'étude aux Etats-Unis, où un comité mixte réunissant des physiciens atomiciens et des spécialistes de l'aéronautique a été constitué sous la présidence du Dr Wheeler Loomis de l'Université d'Illinois. D'autre part, des études préliminaires, subventionnées par l'aviation et la marine américaines, sont poursuivies par la Fairchild Engine and Airplane Corporation.

PILES NUCLÉAIRES POUR LA MARINE

Les premières applications des piles nucléaires mobiles intéresseront certainement la propulsion des navires, et tout d'abord des sous-marins. Le principal avantage que l'on en escompte est un rayon d'action pratiquement illimité sans ravitaillement en combustible et sans consommation d'oxygène. Un

sous-marin pourrait naviguer pendant très longtemps en plongée, sans faire jamais surface, à la seule condition de fournir à son équipage l'oxygène nécessaire à la respiration et de fixer l'excès de gaz carbonique exhalé, problèmes depuis longtemps résolus. D'ores et déjà la question est à l'étude dans plusieurs pays et des projets d'installations expérimentales ont été dressés. L'eau qui entoure la coque d'un sous-marin assure une protection naturelle très efficace contre les rayonnements. Seule la face de séparation entre la pile nucléaire et ses accessoires et le reste du bâtiment devra recevoir un blindage convenable. Au mouillage, le bâtiment devra disposer d'abris et de bassins spécialement aménagés.

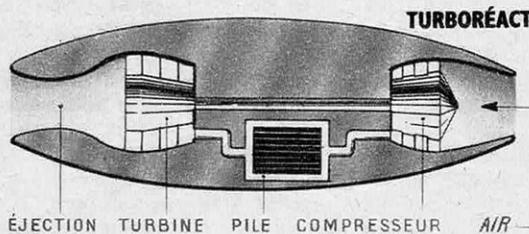
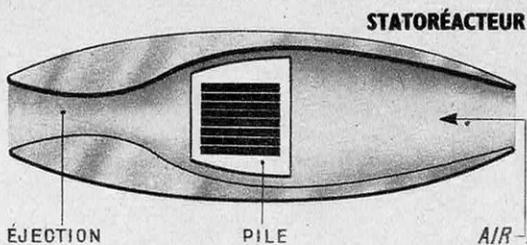
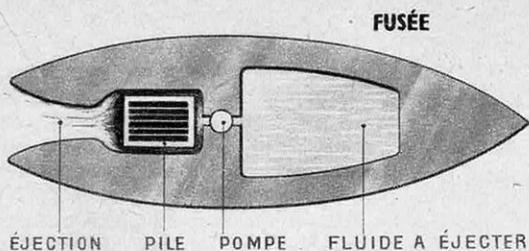
Le renouvellement du combustible partiellement brûlé sera facilité du fait qu'on pourra immerger les cylindres destinés à la purification soit dans des caissons dans les rades, soit en mer en certains points bien repérés où les services de récupération viendront les chercher.

Deux prototypes d'installations motrices pour sous-marins sont à l'étude aux Etats-Unis, l'un par la General Electric au Knolls Laboratory, l'autre par la Société Westinghouse en collaboration avec le Laboratoire National d'Argonne au centre d'Arco dans l'Idaho. Le premier doit utiliser une pile à neutrons intermédiaires avec refroidissement par un métal fondu, le second, dont la construction est commencée et sera terminée en 1952, utilisera des neutrons lents et probablement de l'hélium pour le refroidissement de la pile. On évalue les frais d'établissement de ce prototype à 26 millions de dollars.

LA PROPULSION DES FUSÉES

Bien qu'aucune réalisation, ni même aucune tentative de réalisation n'aient encore eu lieu quant à l'application de l'énergie nucléaire à la propulsion des fusées à très grand rayon d'action, il semble bien que, dans ce domaine, elle soit appelée à jouer un rôle de premier plan. En particulier, pour les futures fusées interplanétaires, quoi qu'on puisse en penser à la lecture des romans d'anticipation, le combustible nucléaire ne serait nullement un combustible fantaisiste. Il est même très probable que seul un réacteur nucléaire convenablement conçu permettra d'envisager sérieusement de quitter un jour, probablement encore lointain, la surface de notre planète et d'échapper à son attraction.

Le principe de la fusée est bien connu. Sa propulsion est assurée par l'éjection à grande vitesse, vers l'arrière, d'une partie de sa masse, en général sous forme de gaz. C'est le type le plus pur qu'on puisse concevoir d'engin à réaction. La masse de l'engin à l'arrivée est toujours plus petite que la masse au départ, et la principale difficulté rencontrée lorsqu'on étudie des fusées à très longue portée, est que si la vitesse d'éjection n'est pas très



PROPULSEURS NUCLÉAIRES A RÉACTION

La disposition générale de ces engins est la même que pour les propulseurs à réaction du type aujourd'hui classique. Seuls ont disparu les réservoirs à combustible et les chambres de combustion qui sont remplacées par une pile qui porte les gaz la traversant à très haute température pour leur éjection vers l'arrière.

élevée, il ne reste plus à l'arrivée qu'une fraction ridiculement petite de la masse initiale de la fusée. Or les réactions chimiques les plus énergiques fournissent une vitesse d'éjection qui ne dépasse guère 3 300 m/s. Comme une fusée interplanétaire doit, pour échapper à l'attraction terrestre, atteindre 11 000 m/s, un calcul très simple, mais dans le détail duquel nous ne pouvons entrer ici, montre que sa masse, à la fin de la période d'accélération, est réduite à 1/28^e de sa masse initiale. Une fusée pesant 56 tonnes au départ devrait emporter 54 tonnes de carburant ; comme les récipients pour ces 54 tonnes de carburant pèsent à eux seuls plus de 2 tonnes, le problème est insoluble. Encore ce calcul ne tient-il pas compte de la résistance de l'air. On a évidemment la ressource de larguer successivement en cours de route les récipients vides, pour ne pas avoir à les accélérer jusqu'à la vitesse finale : c'est le principe des fusées multiples. Mais ce n'est qu'un palliatif d'effet assez limité, et il est apparu assez clairement, dès qu'on a étudié d'un peu près les conditions des voyages interplanétaires, que la solution devra être cherchée dans le domaine du combustible, afin d'accroître sensiblement la vitesse d'éjection. Les « combustibles » nucléaires sont actuellement ceux qui, à masse égale, libèrent le plus d'énergie, et c'est sur eux que l'on fonde les plus grands espoirs. Inutile de préciser que les modalités d'application sont encore mal précisées et soulèvent des problèmes ardues que l'on ne fait qu'entrevoir.

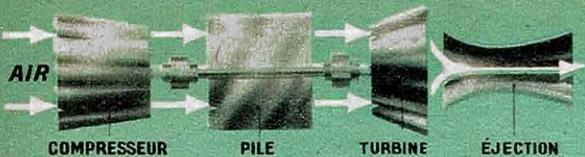
Dans une fusée telle que la V-2, le combustible est de l'alcool et le comburant de l'oxygène (stocké sous forme liquide). Ce sont les gaz de combustion qui, éjectés vers l'arrière, fournissent la poussée. Le « combustible » nucléaire dégage uniquement des calories, de sorte qu'une fusée à moteur nucléaire doit emporter en quantité importante un fluide auxiliaire dont la fonction sera d'emprunter sa chaleur à la « pile » pour accroître son énergie potentielle et de se détendre à travers une tuyère pour sortie de la fusée à grande

vitesse. Le fluide le plus convenable est l'hydrogène, le plus léger de tous les gaz, qu'il faut naturellement stocker à l'état liquéfié.

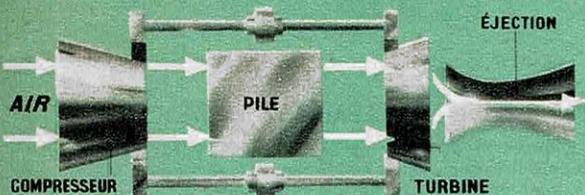
Voici comment des techniciens américains conçoivent une telle fusée. La « pile », si tant est qu'on puisse donner encore ce nom à un tel assemblage, serait formée par des tubes coniques dont les parois poreuses, de 3 à 4 mm d'épaisseur, seraient constituées d'un mélange d'uranium enrichi en isotope fissionnable et de carbone. L'hydrogène sous pression traverserait les parois en s'échauffant, passant de l'extérieur à l'intérieur des tubes. On réglerait la température, qui atteindrait environ 6 000°, à l'aide d'une tige axiale de cadmium poreux, elle aussi refroidie par le courant d'hydrogène. Le gaz emporterait l'énergie calorifique vers la tuyère d'échappement. On voit que le problème capital, qui est celui de l'évacuation de la chaleur développée dans la pile, serait ainsi résolu d'une manière particulièrement heureuse par l'emploi de matériaux poreux.

Sur ces bases, Hsue-Shen Tsien a calculé les caractéristiques générales d'une fusée nucléaire dont le « combustible » enrichi contiendrait le dixième de son poids d'uranium 235 (alors que l'uranium naturel contient 1/140 d'uranium 235). La vitesse d'éjection de l'hydrogène atteindrait 7 200 m/s. Les dimensions de l'engin seraient imposantes : le moteur nucléaire proprement dit aurait 9 m de diamètre et 2,5 m de long ; il renfermerait 33 t d'uranium enrichi, soit 3,3 tonnes d'uranium 235. Le poids total initial de l'engin serait de 1 560 t, sur lesquelles 1 246 t représenteraient le poids de l'hydrogène. Ce dernier serait éjecté à raison de 3 150 kg par seconde, développant une poussée de 2 600 t. La vitesse maximum, correspondant à une durée de fonctionnement de 358 secondes, pendant laquelle 1 % de l'uranium 235 serait « brûlé », serait de 8 145 m/s. Rappelons, à titre de comparaison, que la vitesse maximum de la V-2, l'engin le plus perfectionné existant actuellement, est seulement de 1 500 m/s.

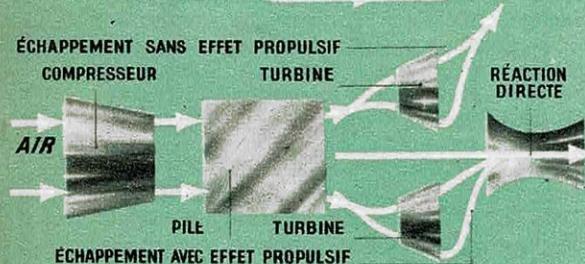
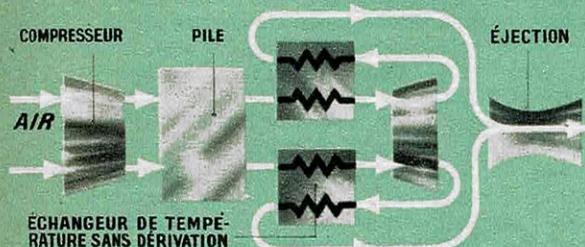
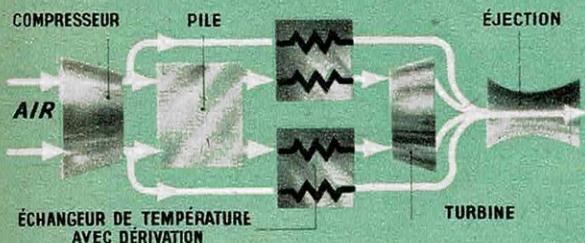
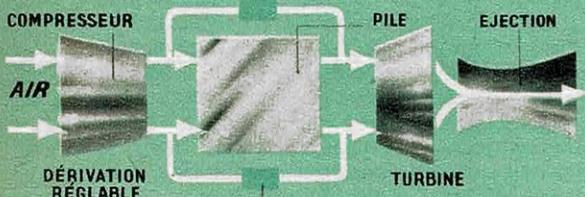
ENTRAÎNEMENT DIRECT



ENTRAÎNEMENT PAR ENGRENAGES



● De ces deux montages possibles d'une pile atomique dans un turboréacteur, le second est préférable car l'arbre de transmission ne traverse pas la pile.



● Quelques dispositions possibles des circuits d'air de turboréacteurs nucléaires pour régler leur puissance et réduire la température des ailettes de la turbine.

Une telle fusée sera d'autant plus légère que l'enrichissement du « combustible » en uranium 235 sera plus élevé. On voit sur le tableau page 137 traduisant les calculs de Hsue-Sien Tsien, que si l'uranium 235 entre dans sa composition à poids égal avec l'uranium 238, le poids total d'une fusée de même performance tombe à 751 tonnes, avec 16,3 tonnes de « combustible », dont plus de 8 tonnes d'uranium 235. Or si le kilogramme d'uranium naturel, non enrichi, revient seulement à quelques milliers de francs, le kilogramme d'uranium 235 revient à plusieurs dizaines de millions de francs. Il est peu probable que l'on consente à dépenser 100 ou 200 milliards pour une fusée.

Il est possible qu'on arrive à une solution plus acceptable en supprimant une partie sinon la totalité du modérateur, de façon à utiliser les neutrons intermédiaires ou rapides qui produisent aussi des fissions en chaîne dans un mélange très riche en uranium 235 ou en plutonium 239. On pourrait alors ramener le poids de la fusée au départ aux environs de 100 tonnes, avec un poids à l'arrivée supérieur à 10 tonnes.

STATORÉACTEURS, TURBORÉACTEURS, TURBOPROPULSEURS

La réalisation de propulseurs nucléaires à réaction destinés à équiper des avions, statoréacteurs ou turboréacteurs, peut s'inspirer des principes généraux qui viennent d'être exposés à propos des fusées. On retiendra en particulier l'emploi de mélanges poreux qui permettent un bon échange de chaleur entre les éléments où la fission libère les calories et le gaz qui les évacue. Les tubes capillaires à travers lesquels passe le gaz représentent une surface de contact considérable.

Dans les statoréacteurs et turboréacteurs, il n'est plus besoin d'emporter de réserve de gaz auxiliaire destiné à être éjecté. Ce gaz est simplement constitué par l'air ambiant qui pénètre dans l'engin par l'avant, s'échauffe en traversant la « pile » et est évacué par l'arrière.

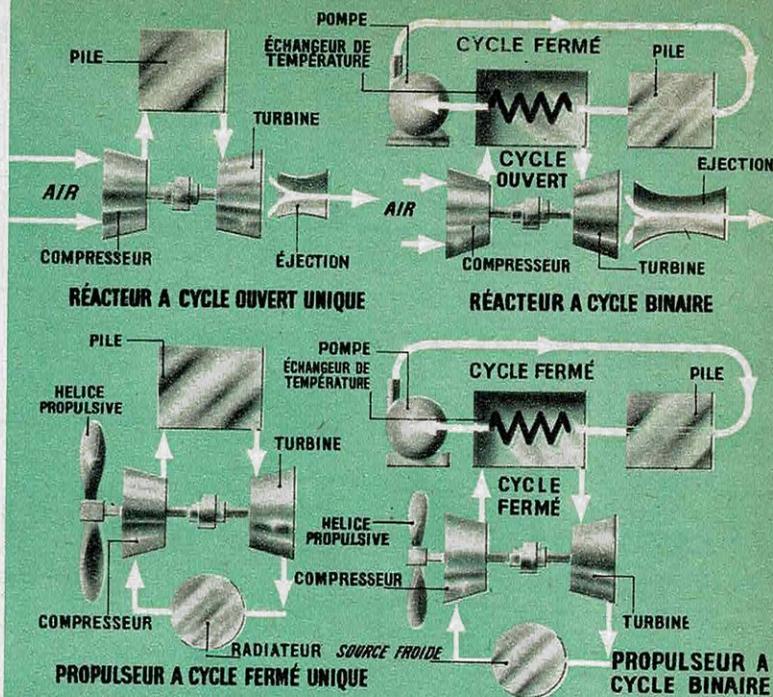
Le statoréacteur est l'engin le plus simple en principe. L'air est comprimé dans le diffuseur avant sous l'effet de la vitesse même et arrive directement au moteur nucléaire. La température qu'il y atteint est limitée seulement par les propriétés réfractaires des matériaux de construction de la « pile ». Ses parois et celles de la tuyère d'éjection peuvent être refroidies par des dérivations convenables de l'air capté à l'avant. Ce type d'engin ne peut être utilisé qu'aux très grandes vitesses, nettement supersoniques, de sorte qu'un système de propulsion auxiliaire doit être prévu pour le lancement, et aussi pour les reprises si la vitesse vient à tomber au-dessous du minimum admissible.

Dans un turboréacteur, l'air puisé dans

l'atmosphère est forcé à travers la « pile » par un compresseur, lui-même entraîné par une turbine à gaz actionnée par l'air échauffé qui pour suit sa détente à travers une tuyère d'éjection. Pour réduire au maximum la surface frontale, il serait avantageux de disposer la « pile » entre le compresseur et la turbine ; mais elle serait alors traversée par l'arbre d'entraînement, d'où une perte considérable de neutrons utiles par absorption, ce qui obligerait à accroître les dimensions de la « pile » et la masse de matériaux réagissants. Il sera sans doute plus avantageux de prévoir un système de transmission par pignons planétaires entre la turbine et le compresseur. La température maximum admissible pour l'air est déterminée non par les qualités réfractaires des matériaux de la « pile », dont le fonctionnement est statique, mais par la résistance mécanique des aubages de la turbine.

Dans le turbopropulseur, constitué en principe par une turbine à gaz entraînant une hélice ou un groupe de deux hélices contrarotatives, le fluide moteur peut parcourir un cycle ouvert, comme dans le turboréacteur ou le statoréacteur, c'est-à-dire, après avoir entraîné la turbine, être rejeté dans l'atmosphère en fournissant ou non un appoint de réaction, soit décrire un cycle fermé. Dans ce dernier cas, il pourrait être soit de l'hélium, soit du gaz carbonique, de la vapeur d'eau sous pression ou de la vapeur de mercure. Eau et gaz carbonique présenteraient l'inconvénient déjà signalé de se décomposer en partie sous l'action du bombardement par neutrons. Comme précédemment, la température maximum admissible est fixée par la résistance mécanique des aubages de la turbine.

Dans tous les engins à moteur nucléaire qui ne sont pas destinés à équiper des projectiles autoguidés ou téléguidés, la protection de l'équipage et des spécialistes chargés de l'entretien au sol contre la radioactivité des produits de fission exige que ceux-ci ne puissent passer dans le fluide moteur. On serait ainsi amené à renoncer à l'emploi de matériaux poreux malgré tous leurs avantages du point de vue du transfert des calories. Mais même si l'on envisage la circulation du fluide à travers des canaux pourvus d'un revêtement, le problème ne se trouve pas entièrement résolu, car certains des produits de fission sont gazeux. Aux très hautes températures, ils peuvent diffuser à travers les revé-



● Turboréacteurs et propulseurs nucléaires à cycle simple ou binaire, ce dernier permettant l'emploi d'hélium ou de métaux fondus pour refroidir la pile (les trois figures pages 140 et 141 d'après Ohliger).

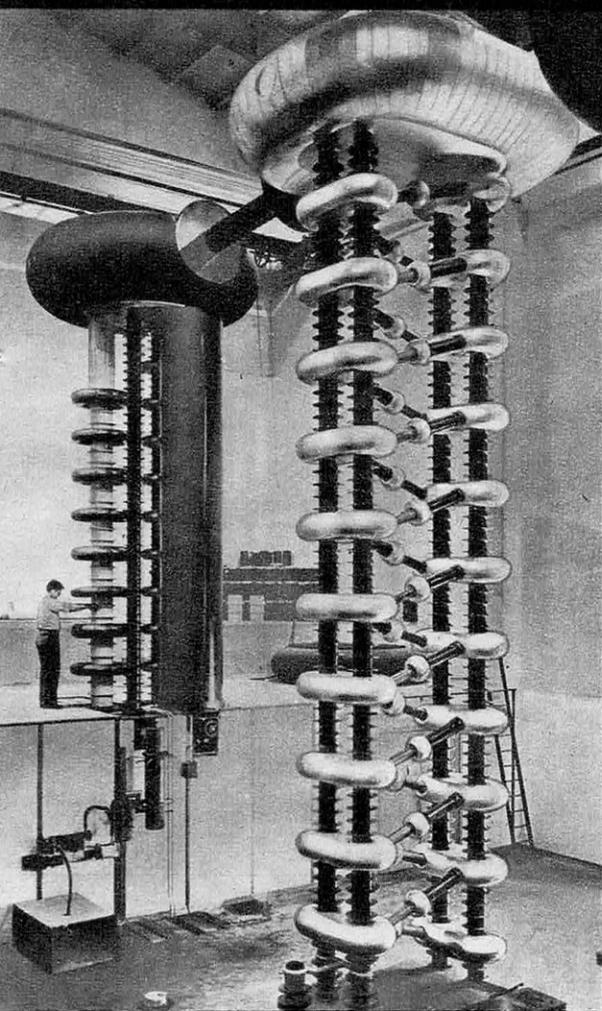
tements métalliques et aller contaminer la turbine, les pompes de circulation et le condenseur, dans le cas de fonctionnement en circuit fermé.

Le réglage de la puissance développée par les propulseurs à moteur nucléaire s'effectue d'autre part dans des conditions assez particulières. Les « piles », d'une manière générale, réagissent lentement lorsqu'on manœuvre les barres absorbantes de réglage ; cette inertie peut être gênante pour les changements rapides de régime que l'on exige des propulseurs d'avions. Il faut donc pouvoir agir directement sur les organes qui transmettent l'énergie libérée dans la « pile » soit à l'hélice, soit aux gaz éjectés, sans cependant interrompre le flux qui refroidit la « pile ».

On sera ainsi conduit à opérer en maintenant toujours constant le niveau de fonctionnement de la « pile », et en diluant convenablement le flux d'air chaud qui l'a traversée avec de l'air froid puisé à l'extérieur et amené par des dérivations réglables.

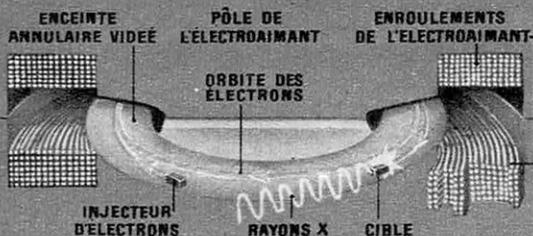
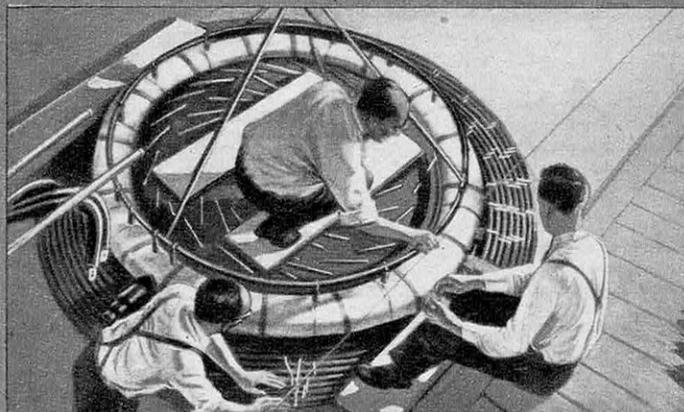
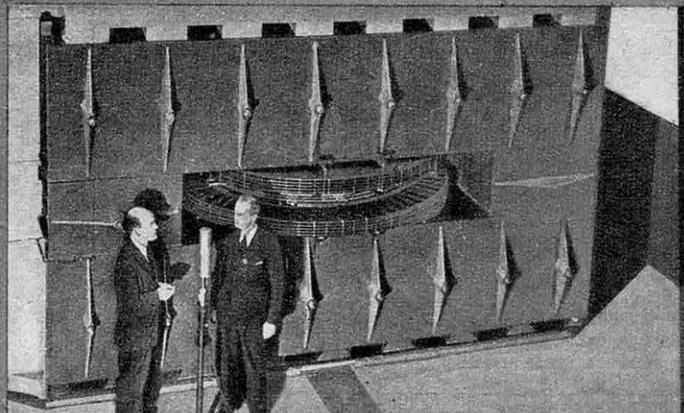
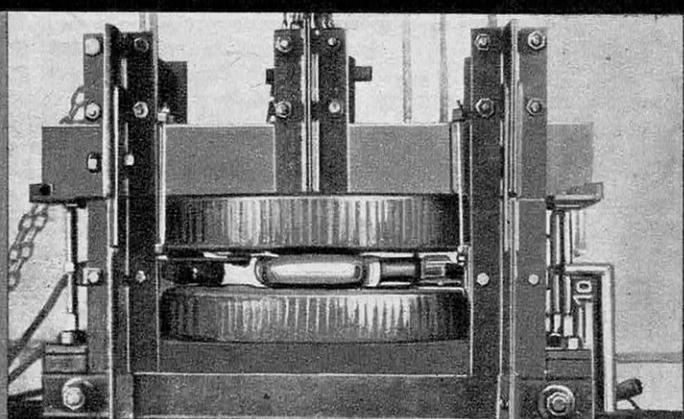
A l'arrêt, l'air chaud serait évacué directement dans l'atmosphère ou circulerait en circuit fermé sans passer par la turbine. Il en résulterait une complication sensible du réseau des canalisations, encore accrue par le fait que, même à l'arrêt, toutes barres absorbantes enfoncées au maximum, le refroidissement de la « pile » doit être maintenu pendant longtemps.

PRINCIPAUX ACCÉLÉRATEURS DE PARTICULES



MULTIPLIEUR DE TENSION DE 1,5 MV

Ce montage, suggéré par Grenacher vers 1900 et perfectionné par Cockcroft et Walton vers 1930 au Cavendish Laboratory, est construit actuellement par Philips à Eindhoven. A droite, le multiplicateur proprement dit avec, à chaque étage, des valves à gaz ionisé (kénotrons). A gauche, le tube accélérateur et la colonne de mesure de tension. La cible se trouve dans la chambre du bas.



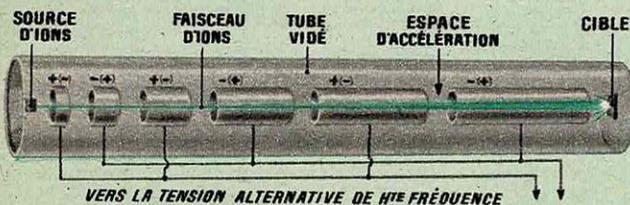
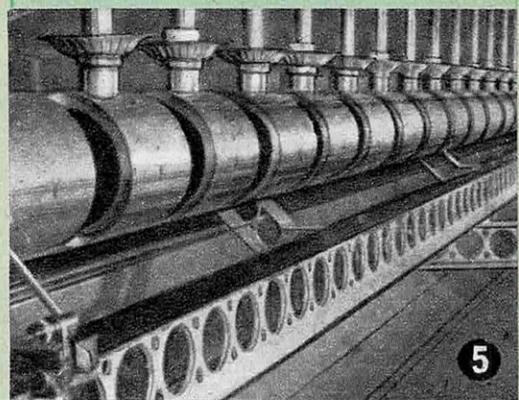
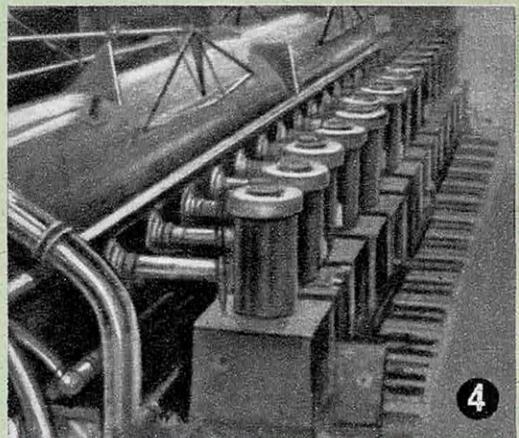
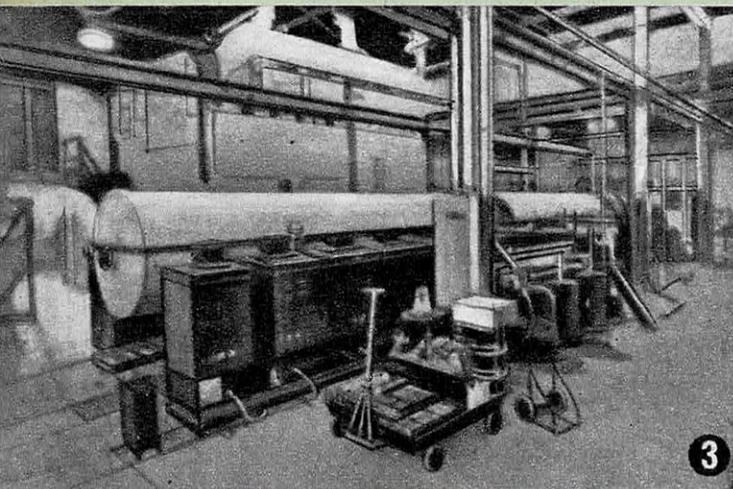
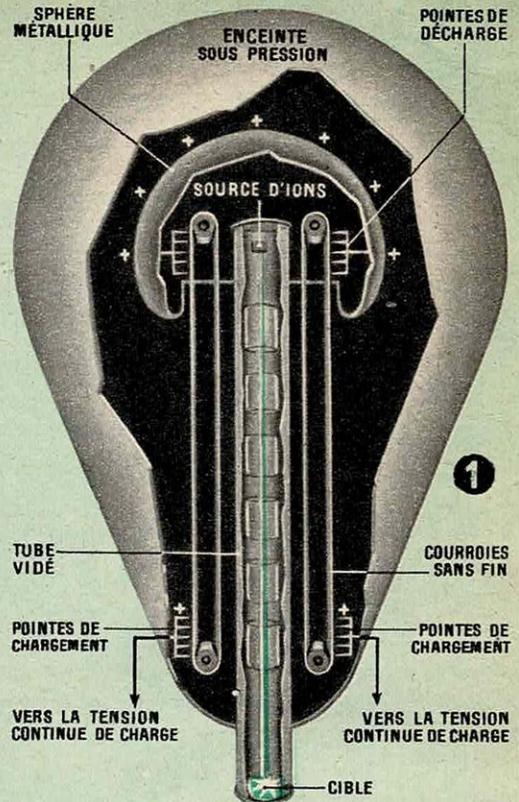
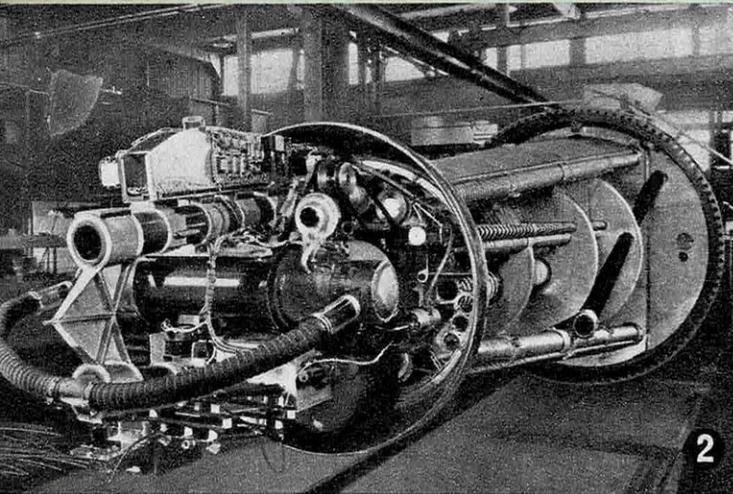
ACCÉLÉRATEUR DU TYPE BÉTRATON

Le bétatron accélère des électrons au moyen d'un champ magnétique alternatif. Il fonctionne à la manière d'un transformateur dont le secondaire est constitué par les électrons qui sont accélérés pendant un quart de période. Ils parcourent plusieurs milliers de kilomètres dans une enceinte annulaire. A gauche, schéma; en haut, un bétatron de 30 MeV; au centre, un de 300 MeV, au-dessous, la chambre annulaire où circulent les électrons.

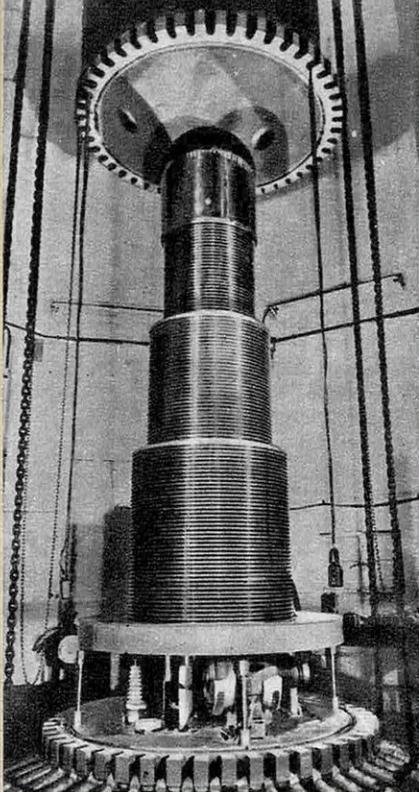


ACCÉLÉRATEURS DU TYPE ÉLECTROSTATIQUE

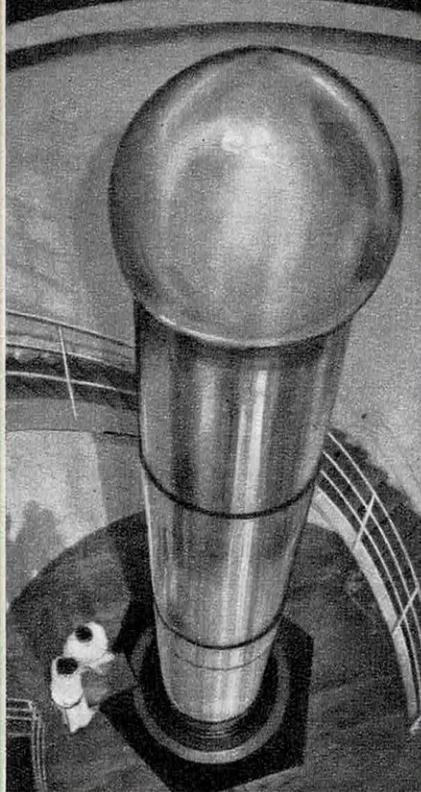
En 1, schéma d'un accélérateur Van de Graaff; la calotte supérieure est portée à haute tension par des charges amenées par courroies, et les ions sont accélérés dans le tube central. En 2, un modèle de 5 000 000 V sous pression (cylindre enlevé). Cet appareil sert à injecter des ions rapides dans un accélérateur linéaire dont on voit l'ensemble en 3 et les détails en 4 et 5. Un banc d'oscillateurs haute fréquence indépendants convenablement déphasés (en 4) alimente les électrodes cylindriques (en 5, cylindre enlevé).



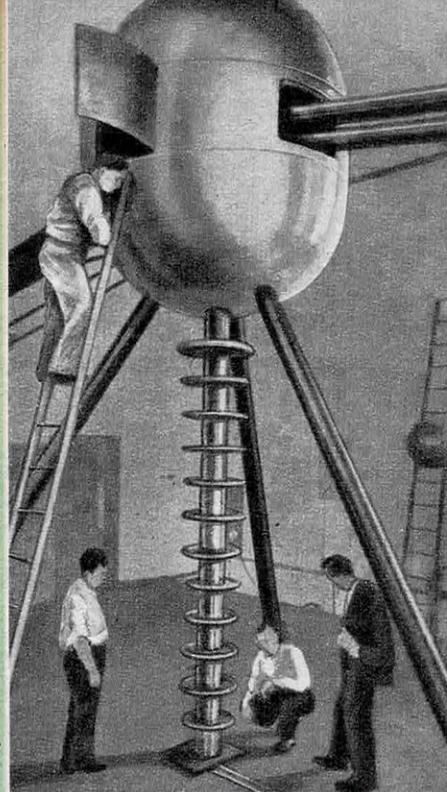
● Dans l'accélérateur linéaire, les ions reçoivent des impulsions en passant d'un cylindre au suivant. Sur ces cylindres est appliquée une tension élevée oscillante.



● Accélérateur type Van de Graaff sous pression, de 5 MeV. Harwell.



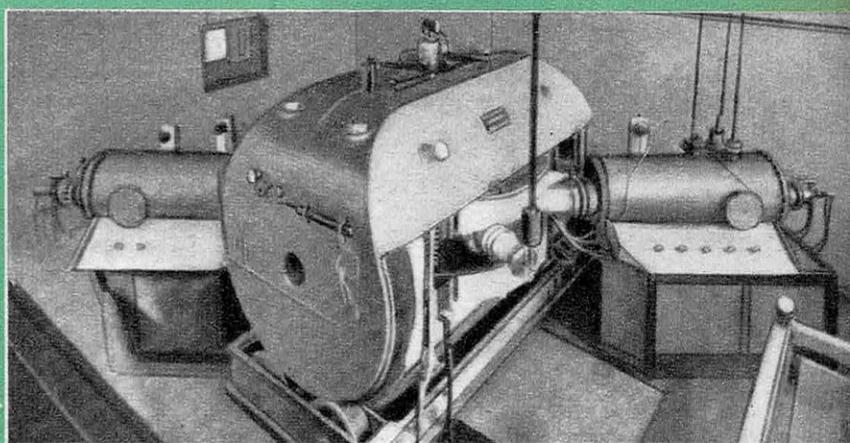
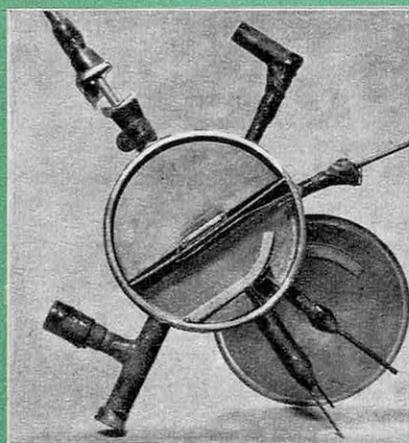
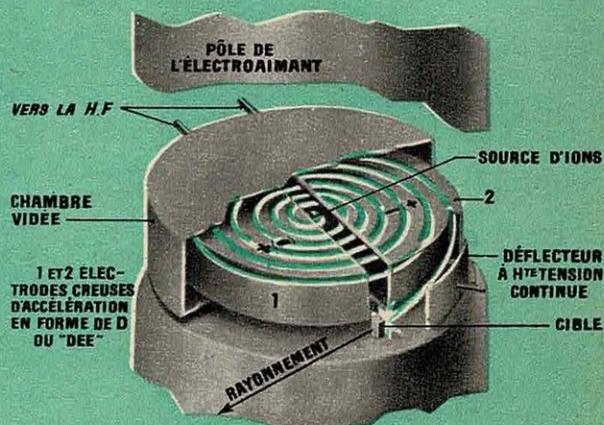
● « Tensator » de l'Ecole Polytechnique de Zurich pour 1 000 000 volts.

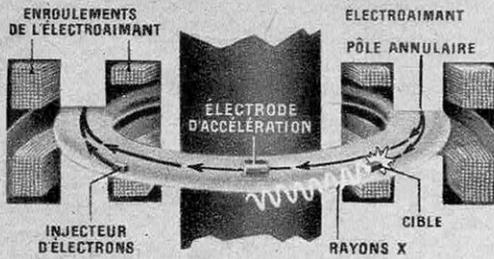


● Un des premiers accélérateurs Van de Graaff (Carnegie Inst.).

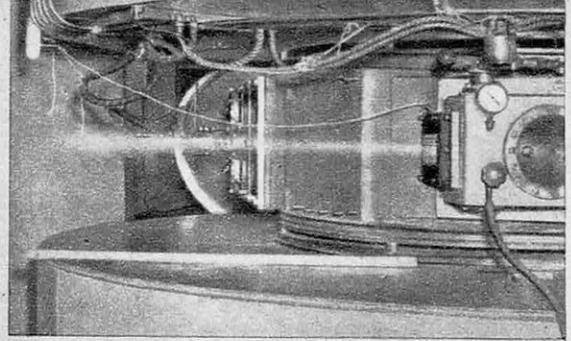
CYCLOTRON OU RÉSONATEUR MAGNÉTIQUE

Le cyclotron imaginé et réalisé par Lawrence à Berkeley, en Californie, vers 1930, comprend un champ magnétique intense qui courbe suivant des cercles les trajectoires des ions dans une boîte cylindrique vidée et placée dans l'entrefer de l'électroaimant. Dans la boîte, deux électrodes isolées portées à des potentiels de haute fréquence impriment des impulsions aux ions quand ils passent de l'une à l'autre. (voir le schéma de principe de l'appareil). En bas, à gauche, un des premiers modèles de Lawrence et Livingston. A droite, le cyclotron de Zurich qui donne des deutons de 8 MeV ou des particules alpha de 16 MeV.

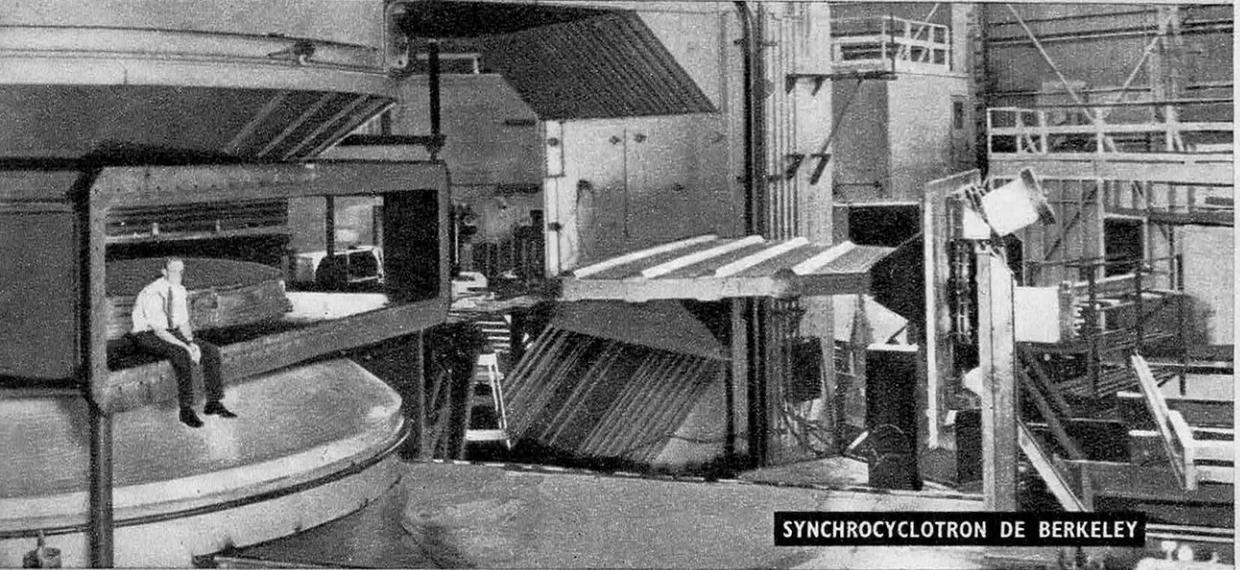




● Dans le synchrotron, un champ magnétique variable, puis une cavité HF accélèrent les électrons.



● Deutons de 15 MeV sortant d'un cyclotron de 1,5 m de diamètre et rendant l'air luminescent.

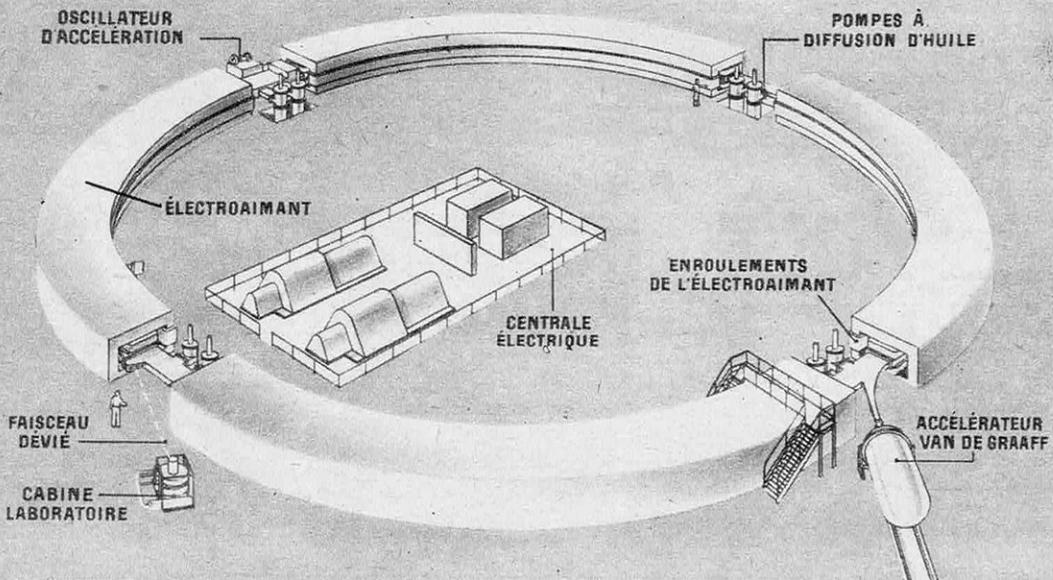


SYNCHROCYCLOTRON DE BERKELEY

MAQUETTE DU BEVATRON EN PROJET

Le bévatron dérivé du synchrotron, accélérera des ions à plus d'un billion (un milliard) d'eV. Les ions seront injectés, déjà accélérés sous

5 MeV, dans une enceinte annulaire de 35 m de diamètre. Le champ magnétique croît en même temps que la haute fréquence qui atteint 2 Mc/s en une seconde. Les ions, avant de sortir de l'appareil, auront parcouru plus de 200 000 km.



LES RADIOISOTOPES DANS L'INDUSTRIE

DEPUIS la découverte de la radioactivité, les chercheurs n'ont pas manqué de suggérer de nombreuses applications industrielles pour les produits radioactifs. Elles étaient cependant demeurées très limitées jusqu'en 1935 car le radium coûte très cher, est très toxique et se désintègre très lentement (période très longue : 1622 années), ce qui oblige à en rassembler des quantités relativement importantes pour constituer des sources de rayonnement de forte intensité.

La découverte de la radioactivité artificielle remit ces possibilités industrielles à l'ordre du jour.

Mais jusqu'à il y a seulement trois ou quatre ans, on ne pouvait fabriquer les radioisotopes qu'à l'aide d'accélérateurs de particules, principalement de cyclotrons; les quantités dont on disposait étaient si minimes qu'on les réservait pour les recherches dans les laboratoires nucléaires et pour quelques essais thérapeutiques particuliers.

On ne pouvait songer à les utiliser dans les laboratoires industriels et encore moins dans les usines.

La situation est aujourd'hui tout autre. Les piles atomiques livrent des radioéléments en quantités relativement très importantes et à bas prix.

Leur variété est telle que l'on peut choisir, en vue d'une application particulière, celui qui possède les caractéristiques physiques ou chimiques les plus appropriées et même souvent, parmi plusieurs isotopes du même élément chimique, celui qui possède la période radioactive que l'on estime la plus convenable.

Enfin, les centres de production, Chatillon en France, Harwell en Angleterre, Chalk River au Canada et surtout Oak Ridge aux Etats-Unis, peuvent souvent livrer un même radioisotope sous forme de combinaisons chimiques variées. Ainsi le carbone 14 est fourni par Oak Ridge incorporé dans des centaines de composés organiques.

Enfin, les expériences avec les radioéléments peuvent, de nos jours, être conduites avec des appareils très sensibles, robustes et bon marché que les physiciens, il y a seulement dix ans, tenaient pour capricieux et coûteux.

En fait, les choses semblent devenues si aisées que les imaginations se donnent libre cours.

Pourquoi ne pas « marquer » les spécialistes

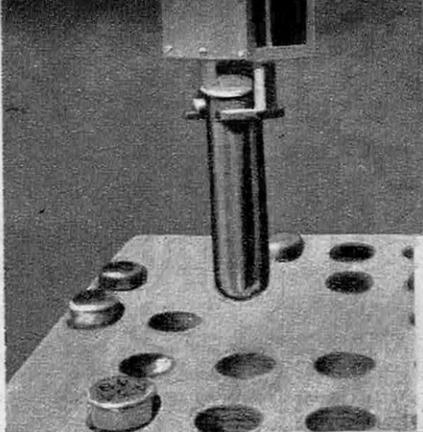
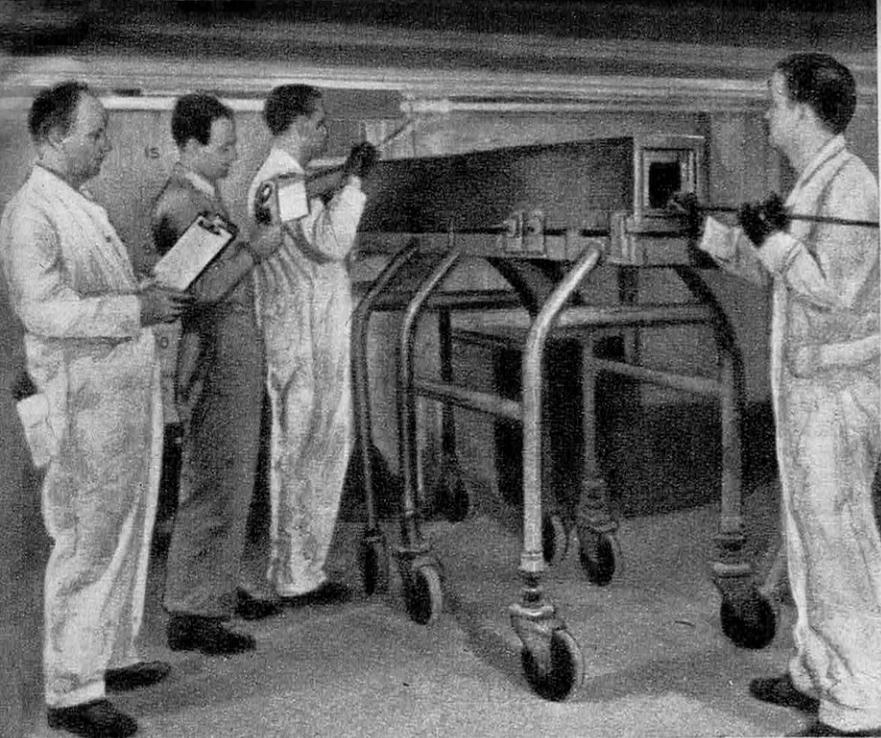
du vol à la tire avec un produit radioactif indélébile, ce qui permettrait à des agents « en bourgeois » équipés de compteurs de Geiger de les détecter dans la foule le jour du Grand Prix?

Pourquoi ne pas « radioactiver » les balles de golf, dont il se perd quelques dizaines de mille chaque année sur les links du monde entier, et munir les « caddies » de compteurs de Geiger pour qu'ils puissent les retrouver rapidement?

La balle de golf « marquée » existe déjà, créée par un ingénieur de Goodrich. Elle n'est pas encore sur le marché, mais l'idée était certainement plus acceptable, dans l'état actuel de la technique, que celle de l'avion à réaction nucléaire dont on parle pourtant fréquemment comme d'une réalisation prochaine.

PRINCIPAUX ISOTOPES D'EMPLOI INDUSTRIEL

ISOTOPE	ÉMISSION	PÉRIODE	EMPLOI
CARBONE 14...	β^-	5.100 ans	Chimie organique analytique, métallurgie du fer, détergents.
PHOSPHORE 32	β^-	14,3 jours	Métallurgie, chimie du phosphore.
SOUFRE 35 ...	β^-	87,1 jours	Chimie analytique, sidérurgie.
CHLORE 36 ...	γ	1 000 000 ans	Recherches sur les aciers inoxydables.
CALCIUM 45...	β^-, γ	180 jours	Chimie analytique, alliages, mesures d'épaisseur.
FER 55	β^-, γ	4 ans	Métallurgie du fer, aciers, alliages, corrosion, usure, lubrification.
FER 59	β^-, γ	44 jours	
COBALT 60....	β^-, γ	5,3 ans	Radiométagraphie.
STRONTIUM 90.	β^-	25 ans	Radiométagraphie.
RUTHÉNIUM 106	β^-	290 jours	Radiométagraphie.
IODE 131.....	β^-, γ	8 jours	Chimie de l'iode.
CÉRIUM 144...	β^-	290 jours	Radiométagraphie.
TANTALÉ 182..	β^-, γ	117 jours	Radiométagraphie.
IRIDIUM 192...	β^-, γ	275 jours	Radiométagraphie.
THALLIUM 204.	β^-	2,7 ans	Mesures d'épaisseur.



APRÈS L'IRRADIATION

Après un séjour dans la pile, un échantillon rendu radioactif par les neutrons est extrait à travers un tunnel de plomb, tandis que le rayonnement émis est soigneusement contrôlé. Ci-dessus, la capsule d'aluminium qui contient le radioisotope est déposée par une pince télécommandée dans la chambre blindée de stockage.

PRODUCTION DES RADIOISOTOPES DANS LES PILES ATOMIQUES

Toutes les piles atomiques existant actuellement dans le monde sont utilisées pour la fabrication des radioisotopes, à la seule exception des grandes piles de Hanford, spécialisées dans la production du plutonium. Les quantités les plus importantes, de beaucoup, sont livrées par la grande pile américaine de Oak Ridge. En trois ans et demi, ce centre a effectué plus de 11 000 expéditions à divers laboratoires et hôpitaux, tant américains qu'étrangers. Évaluées en radioactivité, ces livraisons ont représenté l'équivalent de 900 grammes de radium pur. De nouvelles installations pour la manutention et le conditionnement des produits radioactifs ont permis d'effectuer plus de 3 000 envois au cours des trois derniers mois.

Dans une pile atomique, les neutrons émis lors de la fission des noyaux d'uranium produisent des radioisotopes de trois manières :

- par transmutation d'atomes d'un élément en atomes radioactifs d'un élément différent;
- par transformation d'atomes stables d'un élément en atomes radioactifs du même élément, atomes plus lourds puisqu'ils résultent de la capture de neutrons par les atomes primitifs ;
- en provoquant la fission d'autres noyaux d'uranium 235, ce qui livre des fragments radioactifs d'éléments divers.

Voici comment on opère en pratique à Oak Ridge.

Les substances à irradier sont placées dans des tubes d'aluminium scellés, eux-mêmes

insérés dans des blocs de graphite. On arrête la pile en manœuvrant les barres de réglage et, après avoir placé un long tunnel de plomb devant l'orifice d'introduction choisi, on démasque ce dernier. Le bloc de graphite est alors poussé à travers ce tunnel jusqu'à l'intérieur de la pile. Les opérateurs sont ainsi protégés contre les rayonnements gamma et bêta qui sortent par l'orifice, et tant que celui-ci demeure ouvert, le niveau du rayonnement est contrôlé à l'aide de compteurs de Geiger. Puis la pile est remise en marche pendant le temps prévu pour l'irradiation. On l'arrête à nouveau pour l'extraction de l'échantillon, qui s'effectue avec les mêmes précautions. Après ce séjour dans la pile, le tube d'aluminium est devenu fortement radioactif, non seulement du fait des produits qu'il renferme, mais aussi parce que des radioéléments ont été formés dans ses parois. Ces derniers ont une vie courte, et il suffit d'attendre une heure environ pour que leur activité s'éteigne. A ce moment, les précautions prises différent suivant que l'isotope formé est un émetteur de rayons bêta ou gamma.

Supposons qu'il s'agisse d'un émetteur bêta tel que le phosphore P 32. On l'obtient en soumettant pendant 30 jours du soufre à l'action des neutrons de la pile. Une très faible fraction de ce soufre est transformée en phosphore : 30 microgrammes de phosphore 32 pour plus de 2 kg de soufre. On parvient, malgré cette teneur infime, à le séparer chimiquement. Les rayons bêta qu'il émet sont assez peu pénétrants, de sorte que le récipient peut être transporté sans danger à l'extrémité d'une perche de 2,5 m de long ; cette épaisseur d'air

suffit pour absorber complètement les rayons bêta qui n'auraient pas été arrêtés par l'aluminium, et à cette distance le rayonnement gamma dû au résidu de radioactivité dans l'aluminium et aux impuretés est inoffensif. Le traitement chimique s'effectue par commandes à distance sous une hotte où les vapeurs et poussières sont aspirées suivant le procédé signalé au chapitre précédent. L'expédition du radiophosphore se fera simplement dans une caisse en bois légèrement blindée.

Prenons au contraire le radiocobalt $\text{Co } 60$ qui émet à la fois des rayons bêta et gamma, ces derniers très pénétrants. On l'obtient en plaçant dans de petits tubes d'aluminium des aiguilles de cobalt 59 stable et en les irradiant comme précédemment dans la pile. Dès leur sortie du tunnel de plomb à travers lequel ils sont extraits de la pile, on peut les expédier directement sans traitement préalable, sans même ouvrir les tubes d'aluminium où ils ont été placés, mais en ayant soin de les insérer dans un lourd cylindre de plomb en opérant toujours par commandes à distance, derrière d'épais blindages.

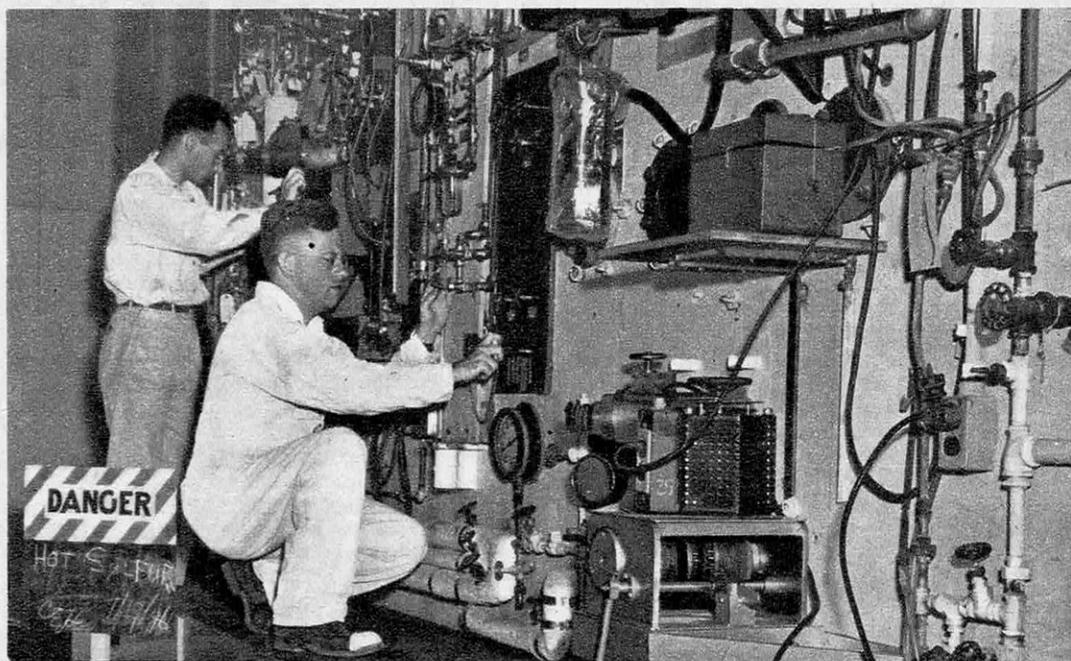
Un dernier exemple, concernant cette fois les produits de fission, sera celui de l'iode 131. En réalité, ce radioélément ne provient pas directement ou du moins ne provient qu'en faible proportion de l'uranium 235 ; il dérive par filiation radioactive d'un produit de fission, le tellure. Il s'agit de le séparer de quantité d'autres éléments, eux-mêmes noyés dans une masse considérablement plus

importante d'uranium, tous extrêmement radioactifs. Tout le travail s'effectue dans une « chambre chaude », derrière des épaisseurs de béton de plus d'un mètre, avec commandes à distance et observation indirecte par périscope.

DÉTECTION DES RADIOISOTOPES

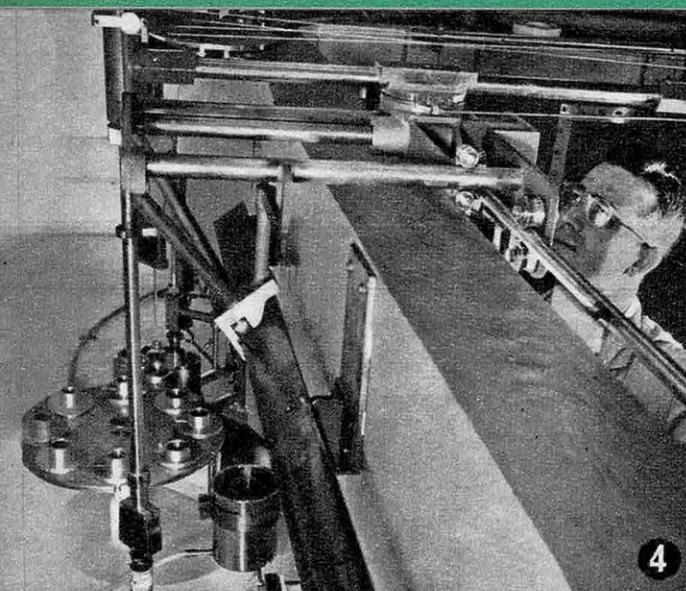
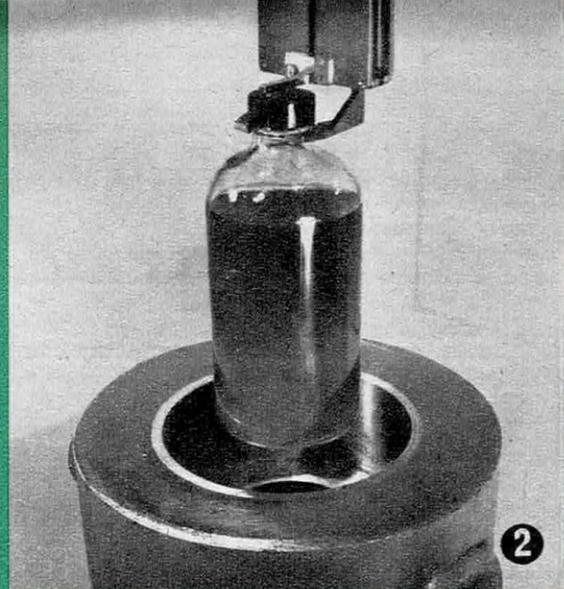
Nous avons déjà passé en revue, dans un chapitre précédent, les différents appareils qui servent à la détection des rayonnements : chambres d'ionisation, compteurs de Geiger-Muller, compteurs à scintillation. Ce sont les mêmes qui sont utilisés dans les applications des isotopes radioactifs, et nous n'y reviendrons pas. Le plus fréquemment employé est le compteur de Geiger-Muller dont on a réalisé des types très variés suivant la nature du rayonnement à mesurer et de l'état physique, solide, liquide ou gazeux, du produit à examiner. Comme le passage d'une seule particule déclenche le fonctionnement du tube, les intensités sont simplement évaluées en « coups » par minute.

Très souvent aussi on fait appel à la technique autoradiographique, où la substance à examiner est appliquée pendant un temps plus ou moins long, parfois plusieurs heures ou plusieurs jours, sur une plaque photographique. On peut ainsi mettre en évidence des intensités très faibles et surtout localiser avec précision, à l'échelle microscopique, l'emplacement des atomes radioactifs dans une structure complexe. On connaîtra ainsi, par exemple, en utilisant le carbone 14, la



● La séparation des radioisotopes des produits de fission de l'uranium ne peut s'opérer que dans des chambres entourées d'épaisses murailles de plomb

et de béton. La radioactivité gamma intense exige que toutes les manipulations soient effectuées à distance. On voit ici une phase de la préparation du radiosoufre.



répartition du carbone entre les microcristaux d'un acier. La technique autoradiographique rend de très grands services dans les recherches biologiques. Bien entendu, les rayons bêta ayant un pouvoir ionisant assez faible, surtout lorsqu'ils sont rapides, il faut utiliser des émulsions spéciales, dont il existe d'ailleurs toute une gamme dans le commerce.

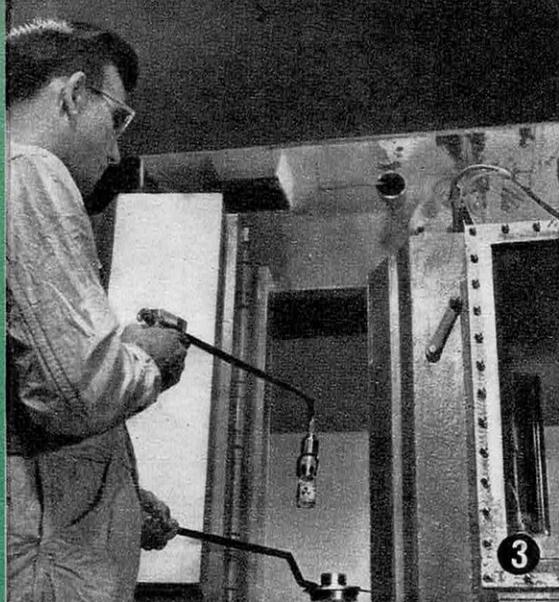
RADIOMÉTALLOGRAPHIE

Parmi le nombre considérable d'applications possibles des radioéléments, il est assez difficile d'établir un classement. On peut cependant, en gros, en distinguer de deux sortes : dans les unes, la nature chimique du radioélément est indifférente, l'intérêt portant exclusivement sur le fait qu'il est radioactif ; dans les autres, c'est la nature chimique qui importe avant tout, le rayonnement fournissant seulement un moyen particulièrement

commode et sensible pour détecter sa présence et le doser dans des mélanges parfois très complexes.

Nous nous efforcerons de suivre cet ordre dans l'énumération des applications qui vont suivre, énumération qui ne sera d'ailleurs nullement limitative.

La première application des radioéléments artificiels qui se présente à l'esprit est évidemment leur emploi comme succédané du radium pour les radiographies des pièces métalliques. La recherche des défauts dans leur masse et l'inspection des soudures peut se faire avec des rayons X, mais les hautes tensions nécessaires à leur production exigent des installations coûteuses et délicates. Les rayons gamma du radium, très pénétrants, ont également été utilisés. Aujourd'hui, le radium, dont le prix est très élevé, (10 millions de francs le gramme) peut être rem-



UN ENVOI D'ISOTOPE

1 Dans la chambre de stockage blindée d'Oak Ridge où sont conservés les divers radioisotopes, un flacon contenant le composé désiré est saisi par la pince commandée à distance.

2 Le flacon est déposé, toujours par commande à distance, dans un cylindre de plomb dont les parois sont épaisses de 7 cm. Il est amené, ainsi isolé, jusqu'au service des expéditions où son contenu sera transvasé.

3 Le petit flacon qui contiendra l'envoi est placé, vide et stérilisé, dans un support pour le remplissage qui va s'opérer à l'abri dans la chambre blindée dont la porte a été ouverte.

4 Remplissage, vissage du bouchon sont des opérations que des outils à commandes articulées permettent d'effectuer sans danger.

5 Quand il s'agit de substances émettant des rayons gamma pénétrants, on ne peut les faire voyager que dans des récipients en plomb ou en alliages spéciaux au tungstène.

placé avantageusement par toute une gamme d'éléments radioactifs artificiels, beaucoup plus économiques. Le cobalt 60 et le tantale 182, dont les périodes sont de 5 ans et de 4 mois respectivement, donnent des rayonnements dont la pénétration est du même ordre que celle des rayons gamma du radium. L'iridium 192, dont la période est de 2 mois et demi, a une pénétration environ deux fois moindre.

Pour des épaisseurs très faibles, correspondant à environ 1,3 mm d'acier, on peut faire appel avantageusement à des sources de rayons bêta, constituées, par exemple, de cérium 144 (période 9 mois), de ruthénium 106 (période 10 mois) ou de strontium 90 (période 25 ans).

On peut aujourd'hui se procurer des sources de rayonnement extrêmement compactes et ayant une très forte activité, ce qui permet

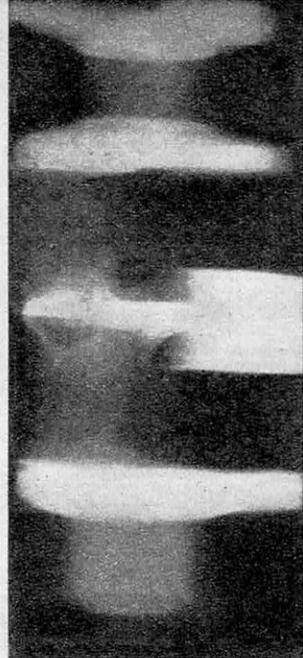
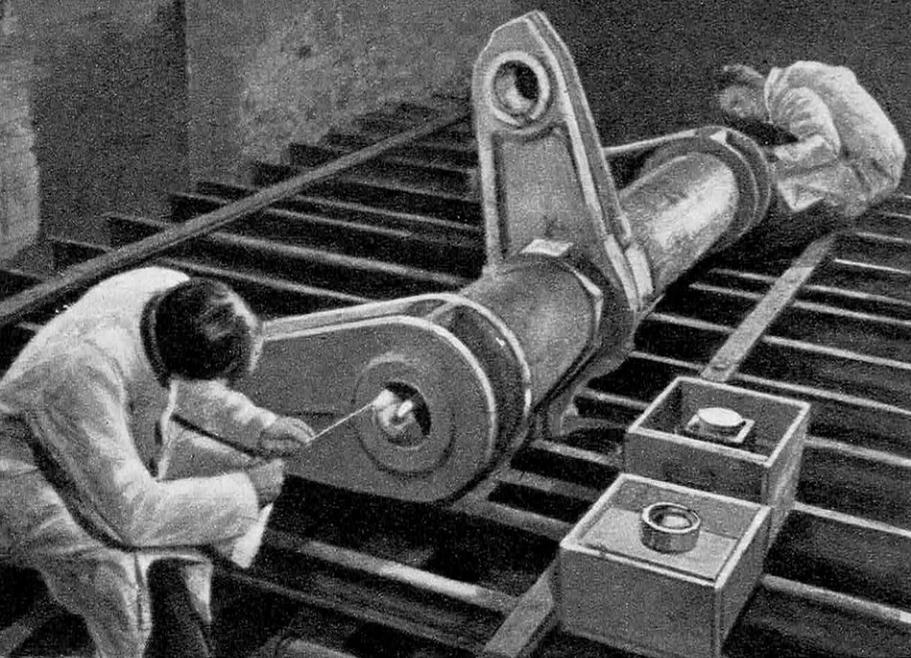
des temps de pose très courts. Leur manipulation est dangereuse, surtout pour les sources de rayons gamma et des précautions rigoureuses doivent être prises.

ÉLIMINATION DES CHARGES STATIQUES

Toutes les fois que l'on a affaire à des pièces de machines en mouvement isolées électriquement, à des produits isolants sous forme de fils, de films ou de bandes, il se produit des phénomènes d'électrisation par frottement fort gênants. Les charges statiques s'accumulent sur les surfaces, attirent les poussières et peuvent provoquer des décharges qui risquent d'engendrer des explosions lorsque des combustibles volatils sont présents dans l'atmosphère de l'usine ou de l'atelier. Elles obligent souvent, dans les fabriques de textile ou les imprimeries, à ralentir la cadence de production. Si les métiers à tisser devaient jadis se cantonner dans des régions humides (Manchester, Lyon, par exemple) c'est qu'ils ne peuvent pas fonctionner à haut rendement en atmosphère sèche. Les peignes électrisent par frottement les fils de coton ou de soie et le tissage est alors défectueux. On était même obligé, à certains moments, de pulvériser de l'eau dans les ateliers pour rendre l'air conducteur et décharger ainsi les fils. De nos jours, on peut tisser n'importe où, sans humidité naturelle ou artificielle, en utilisant des peignes portant des substances radioactives qui rendent l'air conducteur au voisinage des fils.

Le rayonnement alpha est, comme nous l'avons vu, fortement ionisant ; le rayonnement bêta est également utilisable, mais est moins efficace, par unité de longueur parcourue par les particules. La source radioactive, en pratique, lorsqu'il s'agit de bandes, est suspendue à quelques centimètres au-dessus ; pendant longtemps on a utilisé pour la constituer uniquement du radium ou du polonium. (On les emploie aussi dans les laboratoires pour dissiper les charges statiques qui tendent à s'accumuler dans les cages des balances de précision et qui faussent les mesures). Le premier cependant, en équilibre avec les produits de sa désintégration, émet, outre des rayons alpha et bêta, des rayons gamma contre lesquels il faut protéger le personnel par des écrans en plomb souvent difficiles à installer. Si le polonium, d'autre part, n'émet que des rayons alpha, sa période est seulement de 140 jours, de sorte qu'il faut le renouveler assez fréquemment, ce qui est fort onéreux. On a proposé de lui substituer l'isotope du plutonium de masse 238 qui émet un pur rayonnement alpha et a une période très longue, mais il est assez difficile de s'en procurer actuellement.

Des radioisotopes émetteurs bêta sont actuellement à l'étude. On a pu utiliser ainsi le thallium 204 dans les manufactures de papier



● Le radiocobalt émet des rayons gamma pénétrants que l'on peut utiliser pour radiographier des pièces métalliques massives, au même titre que les rayons

gamma du radium. A gauche, préparation d'une pièce pour son examen radiographique. A droite, un vilebrequin de moteur diesel radiographié au cobalt 60.

à cigarettes et dans les fabriques de disques de phonographe.

L'idée est venue tout naturellement de déposer des radioéléments sur les bords d'attaque des ailes des avions pour éviter la formation de charges statiques par frottement avec les molécules de l'air. Les peignes de décharge sur certains avions sont également radioactivés.

Sur les camions-citernes servant au transport de l'essence, des appendices de garde-boue en caoutchouc radioactif et dentelé pourront assurer une décharge convenable, évitant ainsi des étincelles catastrophiques sans qu'il soit besoin de faire traîner une chaîne de contact avec le sol.

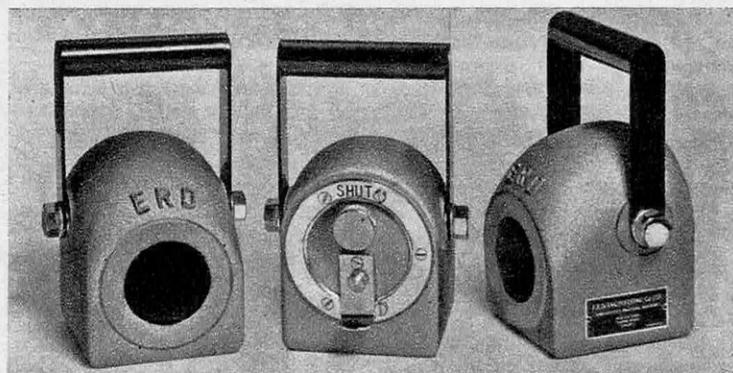
Signalons enfin que le radiophosphore 32 a été utilisé pour ioniser l'air entre les électrodes d'arc électrique dans les pistolets servant à la métallisation, afin de favoriser la formation de la décharge à toutes les alternances du courant.

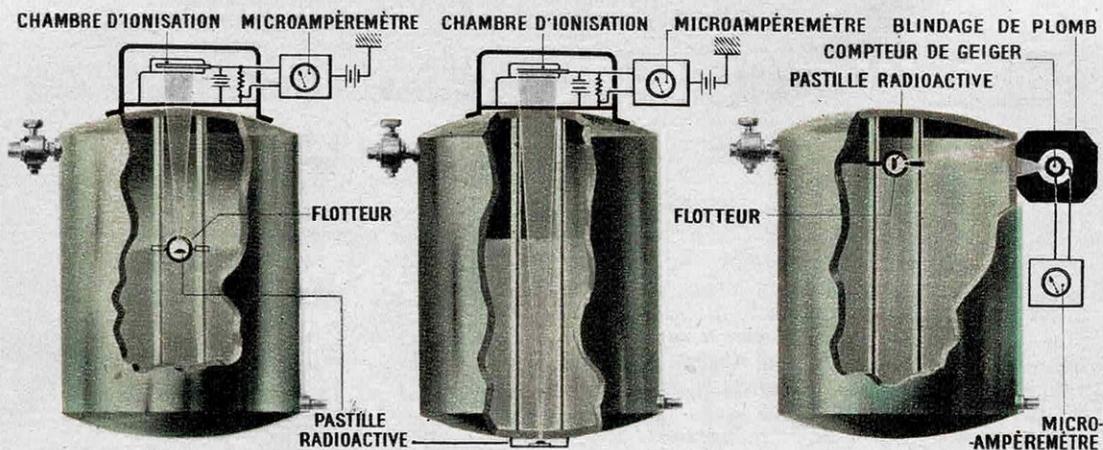
MESURES DE NIVEAU

Il n'est pas toujours aisé de menager des regards dans des cuves, des citernes, des fours, etc. Un moyen très commode pour connaître le niveau atteint dans un tank à haute pression ou contenant des liquides corrosifs est de placer à sa partie supérieure une chambre d'ionisation et à l'intérieur un flotteur portant un émetteur de rayons gamma. Les variations d'intensité observées sont alors dues aux différences d'éloignement du flotteur (le flux reçu varie en raison inverse du carré de la distance). Si au contraire la source de rayons est fixe au fond de la cuve, l'épaisseur du liquide qui la surmonte absorbe plus ou moins le rayonnement.

On peut aussi placer le détecteur latéralement, au niveau à repérer. Si le liquide a été contaminé intentionnellement avec un produit radioactif, ou si un flotteur radioactif nage à sa surface, le compteur sera actionné quand

● L'emploi dans la métallurgie de sources de rayons pénétrants risque de provoquer des accidents si les manipulations sont effectuées sans précaution. Voici un modèle de « bombe » à rayons gamma constituée par un récipient en acier rempli de plomb. On peut y loger indifféremment du cobalt 60 (70 millicuries au maximum), du tantale 182 (150 millicuries) ou de l'iridium 192 (jusqu'à 20 curies, car son rayonnement gamma est moins pénétrant). Ce dernier donne d'excellents contrastes (E. R. D.).





● De la mesure de l'intensité reçue au sommet d'une cuve fermée, on déduit la hauteur du liquide, soit que la pastille soit incluse dans un flotteur, soit qu'elle soit

fixée sous la cuve (c'est alors l'absorption par le liquide qui intervient). On peut sur le même principe fonder des systèmes d'alarme en cas de trop plein.

le niveau repéré sera atteint. On peut aussi placer de part et d'autre de la cuve et extérieurement une source de rayons gamma et un détecteur. Lorsque le liquide dépasse le niveau des appareils, les rayons sont plus absorbés, ce qu'indique immédiatement le compteur.

MESURES D'ÉPAISSEUR

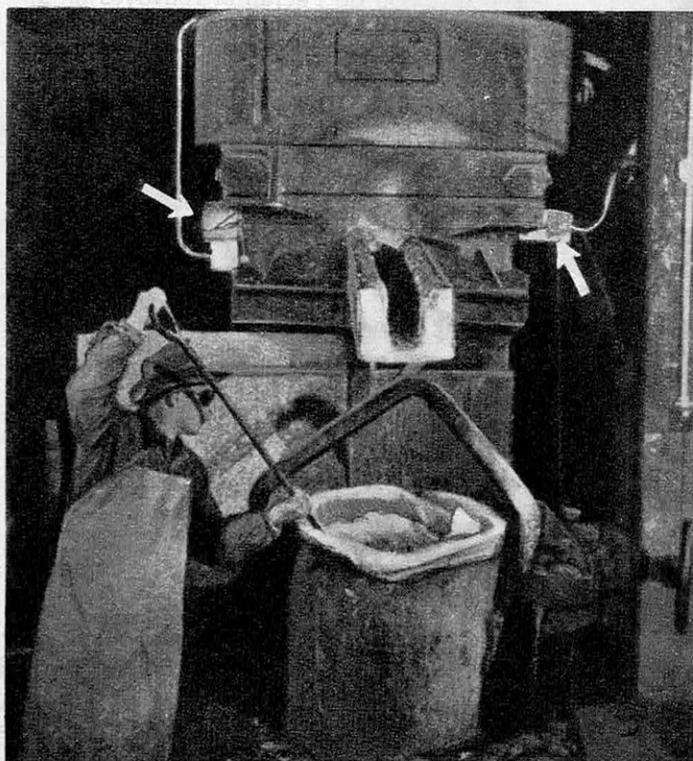
Il est bien évident que l'absorption des rayonnements par la matière fournit un moyen commode pour mesurer son épaisseur, bien que la précision soit assez faible et dépasse rarement 2 %. Elle est suffisante cependant industriellement dans nombre de cas où le tolérance est assez large et où on attache le plus grand intérêt à la rapidité de la mesure ou du contrôle, ou bien lorsqu'il est impossible d'opérer différemment.

Suivant les épaisseurs à mesurer ou à contrôler et la nature du produit, on utilisera des émetteurs bêta ou gamma (les rayons alpha sont sans intérêt, car ils sont intégralement arrêtés par des épaisseurs infimes de matière). L'échantillon à mesurer ou, s'il s'agit d'un contrôle continu, la bande à étudier passeront entre la source radioactive et le détecteur, généralement constitué par un compteur de Geiger qui donnera un nombre de « coups » inversement proportionnel à l'épaisseur.

Avec les matériaux tels que les tôles métalliques, les feuilles de verre, les films de matière plastique, le papier, etc., on utilise fréquemment les rayons bêta émis par le thallium 204, le calcium 45 ou le strontium 90. Avec ce dernier, on peut mesurer jusqu'à 6 mm de carton ou de matière plastique,

2 mm d'aluminium ou 0,75 mm d'acier. Il est employé dans l'industrie de la cellophane et des plastiques, dans la fabrication du caoutchouc pour pneumatiques, du carton, du cuir artificiel, des tôles d'acier pour carrosseries automobiles, etc.

Parmi les émetteurs de gamma, le cobalt 60 est particulièrement intéressant car il est très bon marché et sa période est de 5 ans, de sorte que l'intensité d'une source de cobalt 60 varie peu avec le temps. Ses rayons gamma sont très pénétrants, et on peut les utiliser pour l'acier jusqu'à des épaisseurs de 15 cm.



A la fonderie des usines Ford, aux Etats-Unis, une source de cobalt 60 (à gauche) fournissant des rayons gamma et un compteur de Geiger (à droite) signalent aux opérateurs le moment où le métal dans la corne tombe au niveau où il convient d'arrêter la coulée.

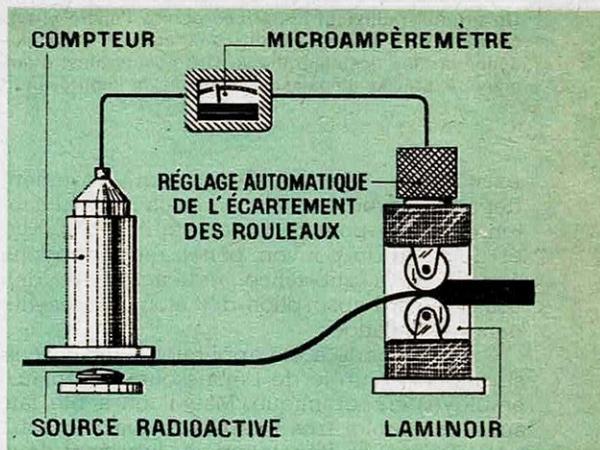
Les variations d'épaisseur de la tôle entraînent des variations dans l'absorption du rayonnement de la source. Le compteur peut être combiné avec un dispositif automatique corrigeant l'écart des cylindres.

Dans le laminage des tôles, on voit comment cette méthode d'absorption peut faciliter non seulement le classement des tôles, mais aussi surveiller leur fabrication. Le courant du compteur peut agir sur des relais qui actionnent divers mécanismes destinés à augmenter ou à diminuer l'épaisseur des tôles.

D'une manière générale les émetteurs gamma sont dangereux à manipuler, d'une part parce que les rayons gamma ne sont pas absorbés, et d'autre part parce que leur pouvoir ionisant étant relativement faible, on est obligé, pour les détecter, d'utiliser des sources plus intenses qu'avec les rayons bêta.

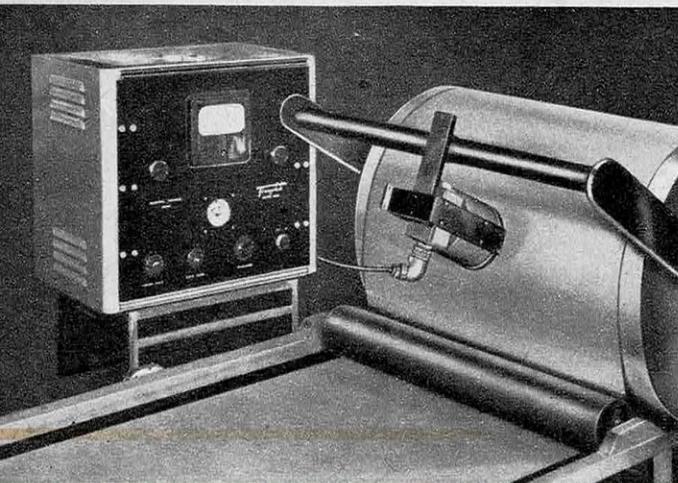
Signalons que le carbone 14 est utilisable pour des mesures très sensibles, de l'ordre du micron.

On peut utiliser pour la mesure des épaisseurs, en particulier lorsqu'une seule face d'une paroi est accessible, comme cela se présente fréquemment dans la pratique, le phénomène de diffusion du rayonnement vers l'arrière, appelé en anglais « back scattering ». Supposons que, sur le trajet du rayonnement émis par une source radioactive, on interpose un écran. Un détecteur placé du même côté que la source et protégé contre le rayonnement direct accuse la présence de rayons réfléchis ou plus exactement diffusés dans la masse de l'écran et renvoyés en arrière. L'intensité mesurée par le détecteur dépend du pouvoir diffusant, qui augmente avec l'épaisseur et avec le numéro atomique de l'élément qui constitue l'écran, et est indépendante de la température. Le « back scattering » des rayons bêta est utilisé pour la

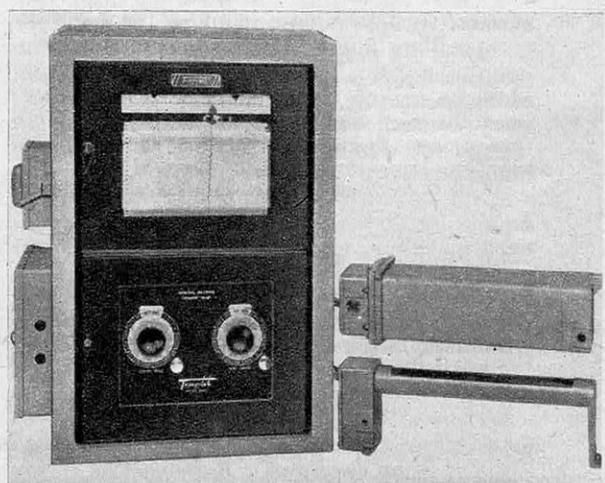


mesure de l'épaisseur de revêtements divers laques, vernis, étamage, émulsions photographiques, enduits sur porcelaine, films de caoutchouc ou de matière plastique sur des rouleaux de calandres, dépôts électrolytiques sur acier, etc. Celui des rayons gamma, plus pénétrants, convient à la mesure des épaisseurs des tôles des réservoirs métalliques, des coques de navires, des chaudières, etc. Ils permettent ainsi de suivre la marche de la corrosion sans avoir à vider le réservoir ou la chaudière, à condition qu'il s'agisse d'une corrosion entraînant des pertes de métal.

La mesure de l'épaisseur des revêtements peut également s'effectuer par une autre méthode qui consiste à incorporer au matériau de revêtement une substance radioactive. L'activité mesurée par un détecteur est proportionnelle à l'épaisseur, à condition toutefois qu'elle ne dépasse pas une certaine limite. Il est évident, en effet, qu'une couche profonde éloignée de la surface a son rayonnement absorbé par les couches intermédiaires. Il



● Contrôle de l'épaisseur d'une feuille de caoutchouc par « back scattering » de rayons bêta (Tracerlab).



● Appareillage pour le contrôle continu de l'épaisseur d'un produit en feuille par absorption bêta.

Un produit radioactif a été incorporé à l'encre en quantité très faible, et un compteur de particules dénombre les désintégrations. On mesure ainsi d'une manière précise l'épaisseur déposée à l'impression.

existe une épaisseur optimum, rarement dépassée avec les vernis, mais dont il faut tenir compte pour certaines applications. Elle est fonction du pouvoir pénétrant des rayons émis par la substance radioactive et des coefficients d'absorption des atomes présents dans le mélange.

Cette méthode a été appliquée avec succès surtout au contrôle de l'épaisseur des émaux employés en céramique. Mais il en a été fait aussi un emploi très intéressant dans le contrôle continu de l'épaisseur du lubrifiant dont sont enduits les fils de rayonne pour faciliter leur pliage et leur torsion au cours du tissage, et dont l'uniformité est une condition capitale pour l'obtention de produits de première qualité. Bien entendu, on incorpore au lubrifiant un radioélément de vie courte pour éviter tout risque d'irradiation des personnes qui porteront le linge ou les bas confectionnés à l'aide de ces fils. Ce procédé se prête à des montages automatiques de régulation. Il convient aussi aux opérations de teinture, en contrôlant la densité des pigments déposés sur une étoffe afin d'assurer la constance des nuances. Une application en a été faite à la détermination de l'épaisseur de l'encre d'imprimerie déposée par les presses sur le papier, et à celle des peintures, en y mélangeant du radiophosphore, sous forme de pentachlorure de phosphore. On mesure ainsi très facilement le pouvoir couvrant des encres et des peintures et la résistance des films déposés sur divers matériaux.

MESURES DE DENSITÉS

La mesure des densités s'apparente évidemment à celle des épaisseurs. Ainsi lorsqu'on voudra vérifier d'une manière continue la densité d'un liquide parcourant une canalisation, on placera d'un côté une source de rayons gamma, de l'autre un compteur : la moindre variation de densité du liquide, modifiant l'absorption des rayons, sera notée par le compteur qui actionnera un signal d'alarme ou bien, par l'intermédiaire d'un système de



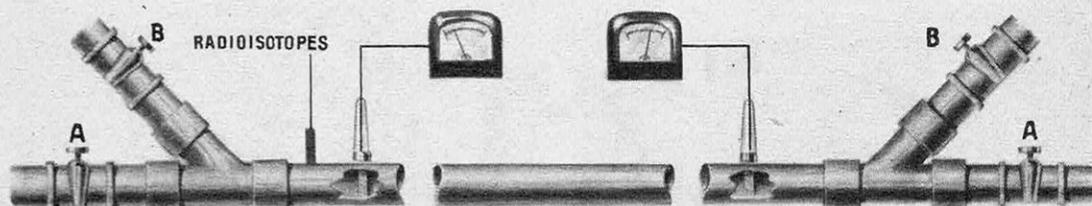
relais différentiels règlera l'ouverture de vannes appropriées. On pourra, comme précédemment, utiliser le « back scattering » en plaçant le détecteur et l'émetteur du même côté de la conduite. Dans les deux cas, l'appareil de détection pourra être gradué directement en valeurs de densité.

La méthode a été appliquée avantageusement aux mélanges hétérogènes, par exemple aux mélanges de latex et d'air, formés en vue de la fabrication du caoutchouc mousse.

Comme dans les applications précédentes, on pourra incorporer à l'un des constituants du mélange un produit radioactif dont on contrôlera la concentration.

LA TECHNIQUE DU « MARQUAGE »

Dans les travaux à la chaîne et la fabrication en série, des numérateurs automatiques notent le nombre de pièces qui sortent d'un atelier. Ces systèmes mécaniques peuvent avantageusement être remplacés par des compteurs



● Quand deux hydrocarbures différents sont envoyés successivement dans un pipe-line, on peut « marquer » la surface de séparation avec un produit radioactif.

L'expérience montre qu'il diffuse très peu, de sorte qu'à l'autre extrémité de la canalisation, un compteur préviendra du changement de nature du produit reçu

de Geiger qui n'ont pratiquement pas d'inertie. On peut, par exemple, compter avec un compteur associé à une « échelle de cent » qui enregistre mécaniquement les centaines et peut atteindre ainsi jusqu'à 10 000 événements par seconde sans correction ni omission.

Rien n'empêche d'ailleurs de rendre un tel système discriminateur. Une série de cigarettes froissées dont le papier est imbibé d'un radioélément à vie courte (toute radioactivité aura disparu avant même que le paquet quitte l'usine) sera repérée et éliminée du fait d'une cadence anormale dans le numérotage par le compteur.

L'encre servant à l'impression du papier monnaie peut être radioactivée au carbone 14 à une dose « homéopathique » sans aucun danger pour les usagers. La tâche des faussaires s'en trouvera plus compliquée. Les vols et les rançons peuvent être repérés grâce à un humectage invisible et préalable des billets. Des timbres postes précieux, des tableaux, des bijoux traités d'une façon analogue conserveront une marque invisible et indélébile.

On a imaginé, pour l'exploitation des pipelines servant au transport des produits pétroliers, de « marquer » à l'aide de produits radioactifs la surface de séparation entre deux variétés d'hydrocarbures (pétrole brut, gasoil, essence, pétrole lampant, etc.) qui y sont envoyés successivement. L'expérience a montré que les deux liquides diffusent peu l'un dans l'autre; à plusieurs centaines de kilomètres en aval, un détecteur de rayonnement mettra en évidence le passage de la zone de séparation; en manœuvrant les vannes au moment opportun, les techniciens pourront aiguiller les deux liquides successifs dans leurs réservoirs de stockage respectifs avec le minimum de perte. Ils détermineront en même temps la largeur de la zone de mélange. Cette méthode est mise en œuvre actuellement sur le pipeline qui relie Salt Lake City dans l'Utah à Paseo dans l'État de Washington et qui est exploité par la Standard Oil Company de Californie.

Ne quittons pas l'industrie du pétrole sans évoquer l'aide qu'apportent à la prospection les isotopes radioactifs en permettant d'étudier la perméabilité de couches géologiques, le déplacement des liquides à travers les roches poreuses et le profil des nappes d'eau souterraines.

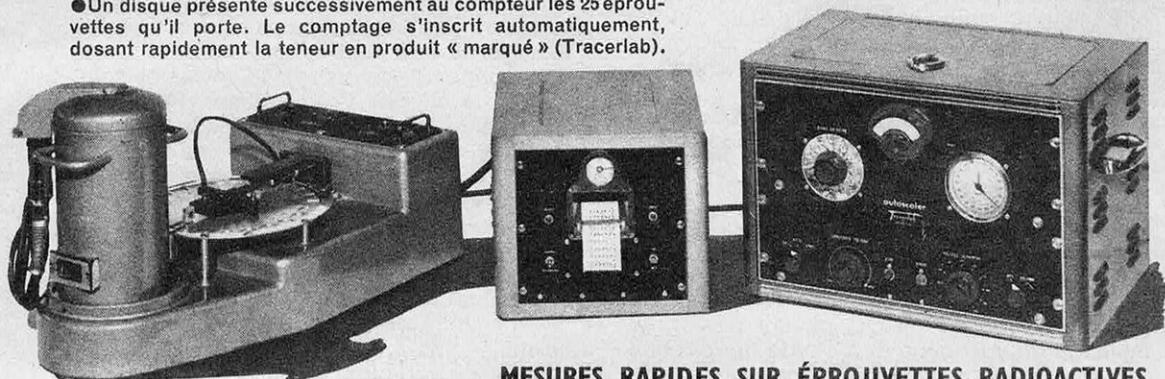
Il existe des procédés chimiques pour mettre en évidence des dégagements de vapeurs toxiques, principalement d'oxyde de carbone. La méthode radioactive les surpasse tous, en rapidité et en précision. L'inclusion de carbone 14 radioactif dans les produits traités dans une usine écarte tout danger d'intoxication par l'oxyde de carbone. Des compteurs placés en différents points donneront l'alarme sitôt que des traces de carbone 14 passeront dans l'air.

Ce procédé peut d'ailleurs servir pour éprouver l'étanchéité d'appareils tels que chambres à gaz, caissons de dépression en aéronautique, chambres d'expériences de souffleries, ainsi que les installations de ventilation et de climatisation dans les mines, sur les wagons, etc.

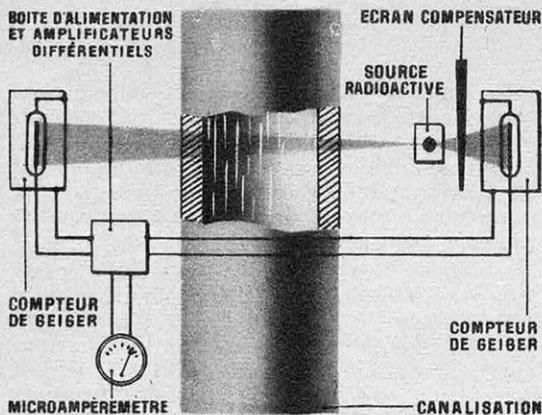
En mélangeant du radiostrontium aux substances qui servent à traiter le bois des poteaux télégraphiques par injection, on peut se rendre compte de l'efficacité du traitement. Des autoradiographies de poteaux en coupe montrent les zones où a pénétré le produit anticryptogamique.

D'une manière analogue, les essais de différents procédés de vaporisation ou de fumigation à l'aide d'insecticides se trouvent grandement facilités par l'emploi de produits radioactifs qui leur sont mélangés. La protection des fourrures et des lainages contre les mites, celle des stocks alimentaires contre les charançons, exigent une répartition convenable des insecticides. Des détecteurs permettront de vérifier qu'ils sont bien parvenus dans les moindres plis et les moindres recoins, à une concentration suffisante, et même, si l'élément radioactif y est incorporé chimiquement, s'il ne faut pas renouveler le traitement au bout d'un certain temps. Mais ici nous touchons à un domaine autant biologique qu'industriel.

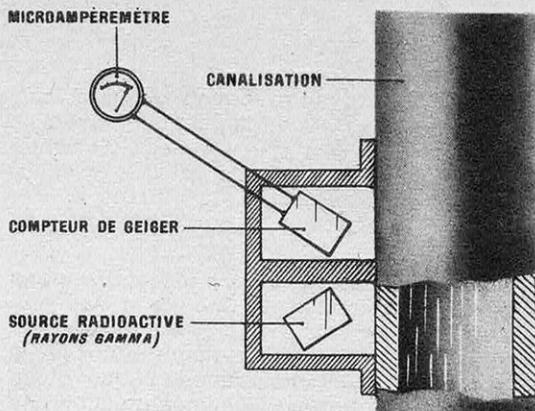
● Un disque présente successivement au compteur les 25 éprouvettes qu'il porte. Le comptage s'inscrit automatiquement, dosant rapidement la teneur en produit « marqué » (Tracerlab).



MESURES RAPIDES SUR ÉPROUVETTES RADIOACTIVES



● Le liquide qui parcourt la conduite absorbe plus ou moins le rayonnement suivant sa densité. Un montage différentiel détectera les moindres de ses variations.



● Le rayonnement diffuse en partie vers l'arrière (back scattering) suivant la densité. Ce montage convient lorsqu'un seul côté du tube est accessible.

INDICATEURS RADIOACTIFS

Les plus intéressantes parmi les applications industrielles des radioisotopes, encore que moins spectaculaires peut-être que les précédentes, sont celles où non seulement leur rayonnement, mais aussi leurs propriétés chimiques entrent en jeu. Les atomes radioactifs d'un élément chimique se comportent dans toutes les réactions comme les atomes stables du même élément, et de plus leur rayonnement permet de les différencier. Ainsi le soufre radioactif se comporte exactement comme le soufre normal, mais son rayonnement permet de le détecter et de le doser avec un simple compteur. Si on le fait entrer dans une combinaison chimique déterminée, on pourra suivre le sort de cette combinaison et de ses éléments au cours de toutes les réactions auxquelles elle prendra part, et on connaîtra par cela même le sort des combinaisons chimiques analogues, à base d'éléments stables. De même, en suivant par des autoradiographies la migration d'atomes radioactifs d'un métal à travers un métal différent, ou même à travers le même métal, mais composé d'atomes stables, on mettra en évidence les modalités de la diffusion des métaux les uns dans les autres, si importante pour la connaissance de la structure des alliages et de ses transformations en fonction de la température. Ces propriétés des radioisotopes sont extrêmement précieuses pour la recherche tant scientifique qu'industrielle, et on peut fonder sur elles de multiples procédés pour l'étude des processus de fabrication et aussi pour leur exploitation.

Les travaux à ce sujet sont déjà extrêmement nombreux et nous ne pouvons songer à les énumérer. Nous nous bornerons à quelques exemples caractéristiques.

SYNTHÈSE DES HYDROCARBURES

Dans la synthèse des hydrocarbures par le procédé Fischer-Tropsch, on fait passer un mélange d'hydrogène et d'oxyde de carbone sur du fer agissant comme catalyseur. On

pensait jusqu'ici qu'il se formait d'abord un carbure de fer que l'hydrogène réduisait ensuite. En utilisant du carbone 14, radioactif, d'abord pour carburer le fer avant d'y faire passer le mélange de gaz, puis, dans une deuxième expérience, pour constituer l'oxyde de carbone du mélange envoyé sur du carbure de fer non radioactif, on a pu constater que le carbone lié au fer ne se retrouvait qu'en très faible proportion dans les hydrocarbures synthétisés dont la radioactivité ne variait pratiquement pas. Le mécanisme de la synthèse était donc très différent de celui qui avait été proposé.

On a pu démontrer récemment, en utilisant de l'alcool radioactif comportant dans sa structure moléculaire des atomes de radiocarbone, que l'oxyde de carbone et l'hydrogène devaient se combiner à la surface du catalyseur pour donner des alcools de structure simple et que ces derniers étaient le point de départ, par fixation d'atomes de carbone additionnels à une extrémité de la molécule, de la formation des molécules d'hydrocarbures.

SIDÉRURGIE

Dans la fabrication de l'acier, l'élimination du phosphore s'obtient par addition au fer en fusion de chaux qui donne les scories de déphosphoration. On ne savait pas d'une manière précise, jusqu'à tout récemment, avec quelle vitesse le phosphore était transféré dans une scorie, c'est-à-dire, en pratique, au bout de combien de temps après une addition de chaux l'équilibre se rétablissait entre le phosphore restant dans le métal et celui fixé par la scorie. Ce problème fut résolu très simplement par l'emploi de radiophosphore P 32, en dénombrant au compteur de Geiger les désintégrations se produisant dans des échantillons prélevés à intervalles réguliers dans la masse. On trouva que l'équilibre était atteint au bout de 10 à 15 minutes suivant les températures. Les vitesses de transfert d'autres impuretés telles que le soufre et l'oxygène du métal en fusion à la scorie ont été déterminées de même par l'emploi de radio-soufre et de radiofer.

FROTTEMENT ET GRAISSAGE

Les radioisotopes se prêtent admirablement à l'étude du frottement et du pouvoir lubrifiant des huiles de graissage. Ils permettent en effet d'évaluer avec une très grande précision le transfert de quantités très minimes de matière d'une des pièces, soit sur celle qui frotte sur elle, soit dans l'huile de graissage.

Supposons, par exemple, que l'on ait incorporé à l'acier d'un vilebrequin ou d'un arbre de transmission du fer radioactif (fer 55 ou 59) lors de la coulée. Au bout d'un certain temps de fonctionnement de la machine, on appliquera sur le coussinet des paliers un film photographique qu'il faudra parfois maintenir en place plusieurs jours, et on observera et comptera dans l'émulsion les traces des particules provenant des atomes radioactifs que le frottement a transférés du tourillon aux coussinets.

On pourra aussi opérer différemment, en plaçant pendant plusieurs semaines les coussinets d'un palier ou les segments des pistons d'un moteur à explosion ou à combustion dans une pile atomique. Il se forme alors dans la masse du radiofer 55, dont la période est de 4 ans, du radiofer 59, dont la période est de 44 jours et divers radioisotopes de vie courte provenant des autres éléments présents dans l'acier. Après quelques jours d'attente, une fois les pièces sorties de la pile, les radioisotopes indésirables de vie courte ont perdu pratiquement toute activité et on peut procéder aux essais. La machine est mise en marche dans les conditions normales de fonctionnement et, après quelques heures, on recueille l'huile de graissage, on la brûle pour concentrer la radioactivité dans ses cendres. Le fer provenant de l'usure des pièces en frottement s'y retrouve sous forme d'oxyde, dont on mesurera l'activité soit à l'aide d'un compteur de Geiger, si elle est assez forte, soit en plaçant les cendres au contact d'un film photographique.

L'INDUSTRIE CHIMIQUE

Nous avons vu plus haut, à propos de la synthèse des hydrocarbures, comment les radioisotopes peuvent élucider le mécanisme de réactions complexes mettant en jeu des catalyseurs. Des procédés analogues peuvent être utilisés dans de très nombreuses branches de l'industrie chimique où les radioisotopes rendront ainsi des services inestimables.

Mais l'emploi des radioisotopes est susceptible de déborder largement le cadre des recherches de laboratoire pour s'étendre à l'exploitation même des usines.

Une des applications les plus évidentes dans l'industrie chimique est le contrôle continu de la fabrication. L'adjonction d'isotopes convenablement choisis aux matières premières doit permettre de suivre pas à pas leurs transformations, de mesurer le rendement des

réactions successives, de mettre en évidence tout dégagement éventuel de vapeurs délétères.

Les appareils détecteurs peuvent être combinés avec des dispositifs de régulation automatique qui simplifieraient considérablement la conduite de l'usine et permettraient de renoncer aux multiples contrôles qui doivent normalement intervenir aux différents stades de la fabrication et exigent de longues et minutieuses analyses.

L'AVENIR INDUSTRIEL DES RADIOISOTOPES

Nous avons à plusieurs reprises insisté sur le fait que la manipulation des substances radioactives est dangereuse. On ne saurait évidemment admettre qu'elles soient mises, dans les usines, entre les mains de techniciens inexpérimentés, ni qu'elles risquent de contaminer les produits destinés à la clientèle.

C'est une des raisons qui limitent actuellement le développement des applications des radioisotopes.

Une autre tient aux conditions dans lesquelles les centres de production des radioéléments les fournissent aux laboratoires de recherche, industriels ou autres. Ils exigent en général que les résultats soient intégralement publiés ou tout au moins communiqués aux centres atomiques. Or dans de multiples branches de l'industrie, en particulier dans l'industrie chimique, les procédés secrets de fabrication sont nombreux, beaucoup plus nombreux qu'on ne pense généralement. Les dirigeants répugnent souvent, pour des raisons de principe ou de concurrence, à entreprendre des travaux dont ils devraient dévoiler tous les détails.

La Commission de l'Energie Atomique américaine est d'ailleurs en voie d'assouplir son règlement quant aux publications et au secret des communications non publiées.

D'autre part, la législation sur les brevets est encore incertaine en matière de physique nucléaire. On ne sait pas encore avec certitude s'il est légitime d'assurer à un chercheur qui découvre, par exemple, une propriété nouvelle ou une méthode originale de fabrication d'un radioélément permettant son emploi industriel sur une grande échelle, le droit exclusif à l'exploitation directe ou indirecte de sa découverte, ou si celle-ci doit tomber immédiatement dans le domaine public au même titre que la loi de la chute des corps, pour prendre un exemple qui ne prête pas à discussion. Il y a là un domaine frontière à propos duquel les juristes échangent des arguments opposés, et sans doute seule une législation spéciale, déjà en vigueur dans l'industrie atomique aux Etats-Unis, associée à des accords internationaux et assise sur des décisions judiciaires résoudra le problème pour le plus grand profit du progrès technique.



● Au centre de recherches nucléaires de Brookhaven, aux Etats-Unis, on étudie l'action des rayonnements

sur les plantes cultivées. Une source intense de radio-cobalt est placée au milieu de ce champ d'expérience.

LES RADIOISOTOPES EN MÉDECINE

LES premières tentatives d'utilisation des radioisotopes pour les recherches biologiques remontent à 1923, lorsque le chimiste hongrois Hevesy utilisa un isotope radioactif du plomb, le radium D et, plus tard, un isotope radioactif du bismuth, le radium E, pour étudier le métabolisme de ces éléments chez les plantes. Ces recherches ne pouvaient avoir qu'une portée limitée, mais on ne connaissait à cette époque d'isotopes radioactifs que pour les éléments lourds. Par la suite, la découverte des radioisotopes artificiels et la mise en service de puissants cyclotrons étendit la gamme des éléments disponibles, fournis cependant en quantités encore très limitées ; c'est seulement depuis quelques années que les piles mettent vraiment les isotopes à la disposition des biologistes et des médecins, tant pour les recherches que pour les diagnostics et les traitements thérapeutiques.

Les travaux fondés sur l'emploi des radioisotopes ont pris aujourd'hui une énorme extension. De très nombreuses expériences ont été faites. Un nombre beaucoup plus grand encore ont été proposées que l'effectif assez réduit des chercheurs qualifiés empêche seul d'effectuer. D'ores et déjà les résultats acquis sont d'une importance théorique et pratique

considérable. Il n'est pas exagéré de dire que les radioisotopes apportent une véritable révolution dans un domaine où l'expérimentation, particulièrement délicate, joue un rôle capital.

LES « INDICATEURS » EN BIOLOGIE

La technique des « indicateurs » ou « traceurs » radioactifs s'est révélée extrêmement féconde dans les domaines les plus variés. Non seulement elle simplifie considérablement les expériences en permettant des analyses qualitatives et quantitatives précises et rapides de composés difficiles à isoler, mais encore, dans de nombreux cas, elle offre le seul moyen possible pour aborder certaines recherches particulièrement délicates. Une substance « marquée » fournie à l'organisme peut être suivie à travers toutes ses transformations ; il est possible à chaque instant d'analyser les produits intermédiaires, de reconnaître les transferts de fractions de molécules et même d'atomes d'un composé à l'autre, d'étudier les remaniements continuels des composés entrant dans la constitution des tissus vivants.

Illustrons ce genre d'application par un exemple. Supposons que l'on administre à un

malade un médicament à base de fer et que l'on veuille étudier la façon dont il l'assimile ou le rejette. Il sera très difficile sinon impossible de distinguer ce fer de celui déjà contenu dans l'organisme et de celui que le malade serait amené à ingérer dans son alimentation. Si nous incorporons au médicament du fer radioactif (fer 55 ou 59), par exemple dans une proportion de un microgramme de radiofer pour 1 g de fer total (un millionième), nous pourrions déceler et doser ce radiofer dans les excréments au moyen d'un compteur. En admettant que le rapport du fer radioactif au fer non-radioactif se conserve lors de l'assimilation et de l'excrétion, nous en déduirons immédiatement la quantité de fer médicamenteux rejeté, qui est, dans notre exemple, un million de fois celle mesurée au compteur.

On peut opérer aussi avec des isotopes stables, en enrichissant, par exemple, le fer naturel du médicament en isotope 58. La détection cette fois sera plus laborieuse qu'avec l'isotope radioactif pour lequel un simple compteur de Geiger suffisait. L'échantillon prélevé dans les excréments sera purifié, le contenu total en fer mesuré. Une fraction de ce contenu sera soumise ensuite à l'analyse spectrographique et les intensités des raies des isotopes du fer comparées entre elles. On en déduira la quantité de fer médicamenteux excrétée par l'organisme.

L'étude du métabolisme du fer a montré que l'organisme en élimine normalement très peu et en exige seulement un apport nouveau quotidien de l'ordre de un milligramme. L'organisme récupère 95 % du fer contenu dans les globules rouges qui arrivent au terme de leur vie et l'utilise pour élaborer de nouveaux globules.

Par des techniques analogues, on a reconnu que le zinc jouait un rôle important dans la formation de l'insuline ainsi que dans l'activité des globules blancs, et que le calcium intéressait non seulement les os mais les nerfs.

Avec du radiosodium et du radiopotassium, on a pu mettre en évidence l'élimination de sels par l'organisme dans les états de choc traumatique.

Avec du radiophosphore, on a entrepris l'étude des étapes de la formation des graisses phosphorées.

L'emploi du radiofer, qui se fixe sur l'hémoglobine, pigment des globules rouges du sang, permet d'obtenir des globules « marqués », qui pourront servir à étudier leur survie dans le sang stocké en vue des transfusions et à l'amélioration des conditions de conservation.

Nous ne citons que ces quelques exemples, mais on pourrait les multiplier aisément. Ils suffiront pour donner une idée de l'importance des problèmes abordés et de leur diversité.

L'expérimentateur dispose, grâce aux radioisotopes, de moyens d'étude d'une très grande précision. Le compteur de Geiger lui suffit généralement pour les doser à

l'échelle macroscopique dans un organe assez volumineux, comme, par exemple, dans l'étude du métabolisme de l'iode qui s'accumule principalement dans la glande thyroïde. Mais s'il désire connaître avec précision sur quelles cellules ou même sur quels éléments cellulaires se fixe tel ou tel produit, il recourra à des autoradiographies, soit qu'il applique une coupe plane d'un tissu sur une plaque photographique, soit qu'il coule une émulsion directement sur l'échantillon. Séché rapidement et détaché de son support, ce « stripping film », examiné au microscope, révélera, après développement et fixation à la manière ordinaire, tous les détails de la répartition du radioisotope dans la structure intime de l'échantillon.

PRÉPARATION DES RADIOISOTOPES ET DE LEURS COMPOSÉS

Jusqu'en 1949, la division de biologie et de médecine de la Commission de l'Energie atomique américaine fournissait gratuitement aux chercheurs qualifiés trois isotopes radioactifs seulement (iode, phosphore et sodium). Elle est à même maintenant d'en livrer plus de cinquante, sous forme de composés chimiques très variés.

Depuis la mise en fonctionnement de la pile de Harwell, en Grande-Bretagne, celle-ci constitue la source la plus importante de radioéléments pour les applications médicales. En France, le Commissariat à l'Energie atomique, sur une plus petite échelle, évidemment, livre régulièrement à divers centres de recherche des radioisotopes de sodium, de brome, d'iode, de phosphore, de baryum, etc.

Outre le cobalt 60, destiné à constituer des sources pour irradiations gamma susceptibles de remplacer celles à base de radium ou de radon, et dont nous parlerons plus loin, les quatre principaux radioisotopes utilisés en biologie et en médecine sont l'iode 131, le phosphore 32, le soufre 35 et le carbone 14.

L'iode 131 a une période de 8 jours et est obtenu, soit comme dérivé des produits de fission de l'uranium dans les piles, soit par irradiation de tellure 130 par des neutrons; le tellure 131 se désintègre en donnant de l'iode 131 que l'on sépare chimiquement.

Le phosphore 32, qui émet des rayons bêta très énergiques, a une période de 14,3 jours; il est obtenu en irradiant par les neutrons d'une pile soit du phosphore 31 ordinaire, soit du soufre 32 (l'absorption d'un neutron s'accompagne de l'émission d'un proton, de sorte que le nombre de masse se conserve). Il est généralement fourni aux chercheurs sous forme de phosphate.

Le soufre 35 a une période de 87 jours et résulte de l'irradiation du chlore 35 (par une réaction analogue à la précédente) ou du soufre 34 par des neutrons. Il émet des rayons

bêta peu énergiques et oblige à mettre en œuvre des techniques de mesure spéciales.

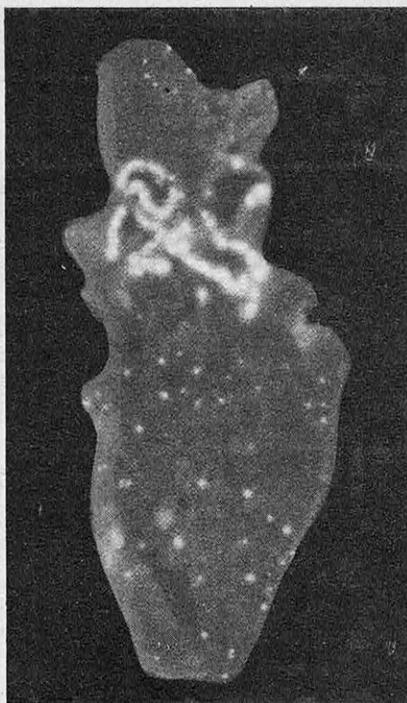
Le carbone 14, enfin, est préparé dans les piles en irradiant de l'azote 14, sous forme de nitrate. L'atome d'azote absorbe un neutron en émettant un proton, et sous l'effet du recul, la molécule de nitrate est dissociée et le carbone 14 apparaît sous forme d'un mélange d'oxyde de carbone et de gaz carbonique. Il est souvent livré sous forme de carbonate de baryum où 4% environ des atomes de carbone sont du carbone 14. Sa radioactivité est faible car sa période est longue, et comme les rayons bêta qu'il émet sont peu énergiques, il faut, là encore, des méthodes de mesure spéciales.

Lorsque, pour des études biologiques particulières, il est nécessaire d'utiliser des composés chimiques déterminés, on ne peut, en général, les préparer directement à partir d'atomes stables et les soumettre ensuite à l'action des neutrons d'une pile. Lors de la capture des neutrons, qui s'accompagne de l'émission d'une radiation, l'effet de recul des noyaux dissocie la combinaison. Nous avons vu un exemple de telle dissociation à propos du carbone 14. Il faut effectuer des synthèses à partir des éléments rendus au préalable radioactifs. C'est ainsi que l'on préparera, en partant du gaz carbonique radioactif, du cyanure de sodium, du méthanol, de l'iodure de méthyle, etc. et même des hormones, comme la testostérone, ou des produits cancérogènes, comme le dibenzanthracène.

Des composés plus complexes qu'on ne sait pas synthétiser au laboratoire ou dont la synthèse chimique est très laborieuse devront être fabriqués par synthèse biologique : on cultivera un organisme vivant ou un fragment d'organe en présence d'un composé radioactif convenable qui s'incorporera dans les substances élaborées.

Les produits qui ont été ainsi préparés sont presque innombrables. Par exemple, des plantes, des levures ou moisissures, cultivées dans une atmosphère contenant du gaz carbonique radioactif ont livré des sucres complexes, de l'amidon, de l'acide phosphoglycérique, des alcaloïdes, de l'acide ascorbique, etc., marqués par du radiocarbone. On a préparé de la vitamine B₁₂ marquée en radiocobalt, de la pénicilline marquée en soufre 35 et même de la cortisone marquée en tritium.

Les animaux ont été également mis à contri-



← Autoradiographie du cœur d'un rat, obtenue par A. Gorbman de l'Université de Columbia. L'animal avait reçu une injection de radioplomb qui s'est fixé dans les gros vaisseaux.

bution pour fournir, par exemple, du glycogène marqué en carbone 14, en leur injectant du bicarbonate de potassium radioactif, ou des phospholipides marqués en phosphore 32 en leur injectant des phosphates radioactifs. On a même pu obtenir de la soie naturelle contenant des protéines radioactives en injectant des acides aminés marqués en carbone 14 dans la cavité du corps de vers à soie.

ISOTOPES STABLES

Les isotopes stables présentent sur les radioisotopes divers avantages

et notamment de ne pas subir de transformation pendant la durée de l'expérience, même si celle-ci est de longue durée.

Ainsi, si l'on opère avec du carbone 11, radioélément dont la période est de 20 minutes, il faut effectuer les mesures très rapidement, car au bout de 3 ou 4 heures l'activité est si réduite que le comptage des désintégrations perd toute précision. Avec le carbone 13, stable, on pourra au contraire prolonger indéfiniment l'expérience qui ne sera limitée que par l'élimination physiologique.

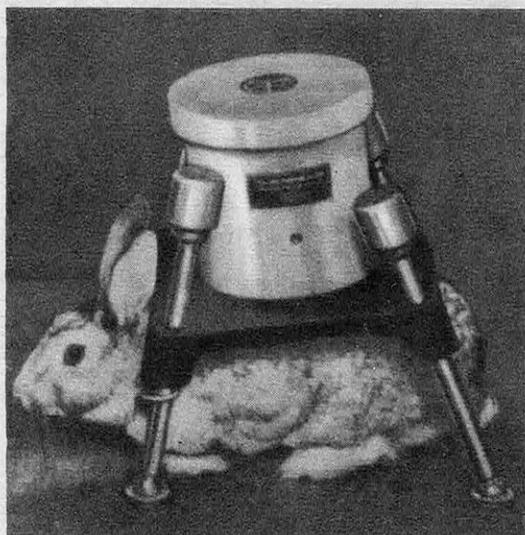
En pratique, si l'on expérimente avec des radioisotopes, on choisira de préférence ceux dont la période est de l'ordre de 10 heures, ce qui permettra de prolonger l'expérience pendant trois jours environ. On évitera les produits de période trop longue, car leur radioactivité est faible, surtout aux grandes dilutions.

Les isotopes stables n'exercent évidemment aucune action nocive du fait de leur rayonnement, alors que celui des radioisotopes peut être très gênant, surtout lorsqu'on expérimente directement sur des êtres humains. On est alors strictement limité à l'emploi d'éléments à vie courte. On ne peut, par exemple, utiliser le carbone 14, dont la période est de plus de 5 000 ans, car aussi longtemps que les substances dans lesquelles il passerait au cours des transformations métaboliques ne seraient pas éliminées, l'action de son rayonnement se ferait sentir et, même très faible, provoquerait à la longue des désordres graves.

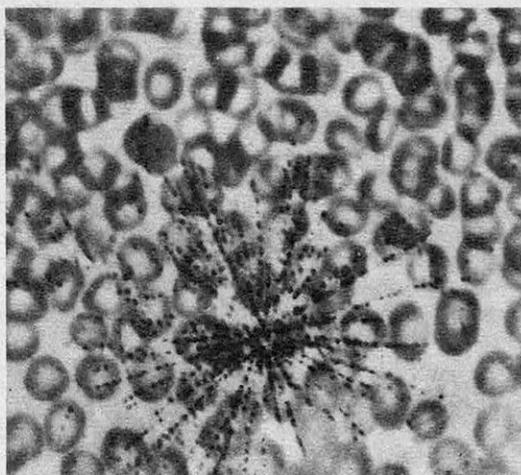
Cependant le dosage des isotopes stables est beaucoup plus compliqué et la précision

est moins grande que pour les isotopes radioactifs. Il faut faire appel, comme nous l'avons dit, à des procédés spectroscopiques qui ne peuvent fournir de mesure acceptable que si la dilution de l'isotope n'est pas trop poussée ; au delà de 1/400 les évaluations deviennent difficiles, et on ne peut pratiquement pas dépasser 1/2000. Les isotopes radioactifs, au contraire, peuvent supporter d'énormes dilutions : un millicurie d'un radioélément représente 37 millions de désintégrations par seconde ; avec un compteur de Geiger, on peut encore mesurer 4 émissions par seconde, ce qui représente une dilution de la solution primitive au millionième.

Parmi les isotopes stables, il faut faire une place à part au deutérium, ou hydrogène lourd, que l'on peut faire entrer dans de nombreux composés, dans l'eau en particulier, pour obtenir de l'eau lourde. Cette dernière a servi à étudier le métabolisme de l'eau chez différents êtres vivants : on a reconnu, par exemple, que toutes les molécules d'eau présentes dans le corps d'un petit poisson à un moment donné sont remplacées au bout de quelques heures par des molécules provenant de l'eau environnante. L'homme, au contraire, élimine très lentement par les urines les molécules ingérées. Au bout de 9 jours, il en reste encore près de la moitié et on peut en conclure que toute l'eau ingérée se mélange complètement avec celle déjà présente dans l'organisme et qu'elle n'est pas éliminée directement. D'après la dilution observée dans les urines, on peut évaluer le volume total d'eau présent dans le corps. Toujours avec de l'eau lourde, on pourra déterminer la vitesse de synthèse et de destruction des acides gras qui sont constamment en transformation dans l'organisme.



● Pour évaluer la vitesse d'élimination d'un radioisotope injecté à un animal d'expérience, un compteur spécialement agencé mesure sa radioactivité (E.R.D.).



● Autoradiographie de globules sanguins dont l'un au moins a fixé un élément radioactif émettant des particules alpha qui font apparaître une étoile. (G.A. Boyd.)

LES DIAGNOSTICS

De nombreux procédés de diagnostics utilisant des radioisotopes ont été proposés. Nous n'en citerons que quelques uns parmi ceux qui ont été expérimentés.

En injectant un produit contenant du sodium radioactif dans un membre et en mesurant le temps qui s'écoule entre l'injection et l'apparition de la radioactivité dans le membre opposé, détectée au compteur Geiger, on peut mesurer la vitesse de la circulation sanguine. On a trouvé qu'elle était moins rapide chez les arthritiques, et on a pu utiliser ce fait pour diagnostiquer l'arthritisme.

Par le même procédé on peut localiser, sans intervention chirurgicale, des inflammations internes, mesurer le volume sanguin dans les états de choc, mettre en évidence des troubles de la circulation dans les vaisseaux périphériques et contrôler l'efficacité des substances vasodilatatrices employées pour accroître le diamètre des capillaires sanguins.

La glande thyroïde accumule l'iode en forte proportion. L'ingestion de radioiode permet un diagnostic rapide de l'hyperthyroïdisme à l'aide d'un simple compteur de Geiger appliqué sur la peau à la hauteur de l'organe.

Le phosphore ingéré ou introduit dans l'organisme par voie intraveineuse se fixe très lentement dans les tissus normaux du cerveau, car cet organe a un métabolisme peu actif. Il en est différemment lorsqu'il s'y développe une tumeur ; les tissus néoplasiques fixent le phosphore en beaucoup plus grande proportion (dix à cent fois plus environ) de sorte qu'en utilisant du radiophosphore on pourra diagnostiquer l'existence d'une tumeur et même préciser sa position et son extension.

On a mis au point des compteurs spéciaux, extrêmement ténus, utilisables par les chirurgiens au cours de leurs interventions pour l'extraction d'une tumeur cérébrale, et qui leur permettent d'explorer le cerveau pour reconnaître, après injection de radiophosphore, si tous les tissus anormaux ont bien été enlevés.

Cette avidité pour le phosphore, qui caractérise certains tissus cancéreux, permet de mettre en évidence des localisations secondaires dans le système lymphatique ; pour localiser les métastases de certains cancers de la thyroïde, c'est l'iode que l'on utilise.

APPLICATIONS THÉRAPEUTIQUES

Les applications thérapeutiques des radioisotopes avaient suscité de grands espoirs qui ne semblent pas malheureusement avoir été pleinement confirmés. Le problème est en fait très ardu. Puisque certains éléments manifestent une tendance particulière à se fixer sur des tissus déterminés, on pensait qu'en employant des isotopes radioactifs de ces éléments on pourrait réaliser une irradiation très localisée intéressant exclusivement les tissus visés et épargner ainsi au malade les effets généraux d'une irradiation aux rayons X ou aux rayons gamma du radium. En fait, cette localisation est très imparfaite en général, de sorte que l'on risque de léser d'autres tissus ou simplement les parties saines des tissus visés, les cellules malades accusant souvent des métabolismes diffé-

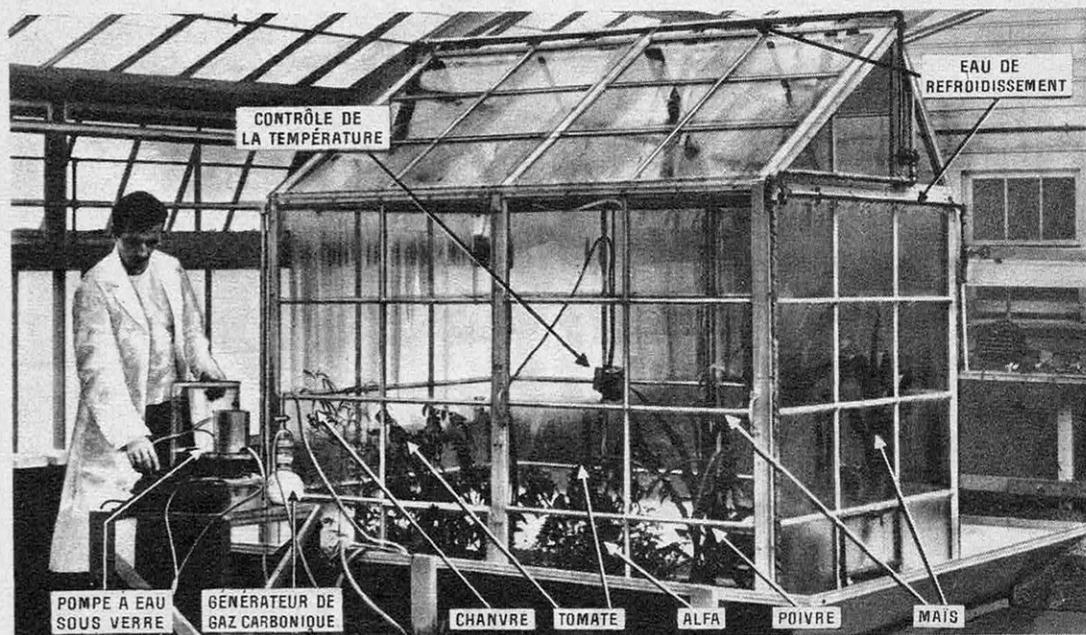
rents. L'iode, par exemple, qui tend à s'accumuler dans la thyroïde normale, est fixée en moins forte proportion dans les tissus cancéreux de cette même glande lorsqu'ils n'ont pas conservé les fonctions de la thyroïde.

L'emploi d'iode radioactif, par contre, pourra être indiqué dans le traitement du goître exophtalmique ou quand on voudra réduire l'hyperactivité de la glande thyroïde. Le calcium, d'autre part, s'accumule bien presque exclusivement dans les tissus osseux, et on a proposé d'utiliser du radiocalcium pour le traitement des cancers des os ; mais sa période est longue, de l'ordre de 180 jours et sa radioactivité est assez faible. On fonde plus d'espoir actuellement sur l'emploi du radiostrontium, qui se fixe rapidement sur le squelette et dont la période est de 55 jours.

Mais il y a toujours un danger d'irradiation de la moelle osseuse, essentielle pour la rénovation des globules rouges.

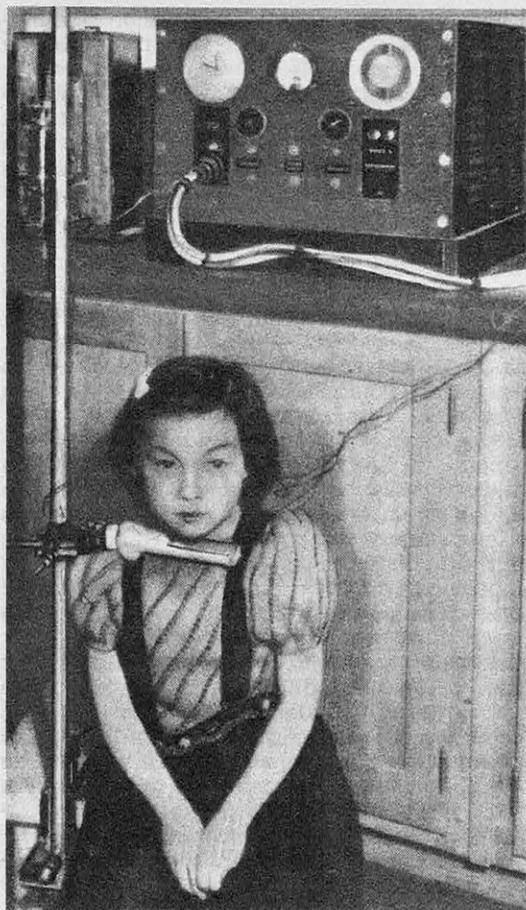
Le radiophosphore a été utilisé dans l'érythémie, maladie caractérisée par une augmentation anormale du nombre de globules rouges dans le sang. Il se fixe, en effet, sur la moelle des os qui élabore ces globules et, en lésant une partie des cellules-mères, freine leur production.

Pour favoriser le dépôt d'un radioélément dans les tissus d'un organe déterminé, on a cherché récemment à lier cet isotope à un « guide » spécial. Le principe de la méthode est le suivant : supposons que nous injectons des tissus de rein de souris à un rat. L'organisme de ce dernier réagira en formant des anticorps spécifiques du rein de souris. On



● Dans cette serre, dont l'atmosphère est additionnée de gaz carbonique contenant du radiocarbone, des plantes diverses élaborent des substances "mar-

quées". Ces composés, obtenus par synthèse biologique, serviront ensuite, sur des animaux, à étudier le métabolisme des produits stables semblables.



← Après injection d'une substance contenant de l'iode radioactif, on peut mesurer la quantité fixée par la glande thyroïde. Il suffit d'appliquer un compteur sur le cou pour doser le rayonnement gamma.

concentrera ces anticorps, on les rendra radioactifs au contact d'une solution contenant le radioélément, et quand on les injectera à une souris, ils se porteront sur le rein avec ce radioélément. On a pu ainsi fabriquer des anticorps de rein et de poumon. Des recherches sont en cours pour obtenir des anticorps spécifiques de divers types de tissus cancéreux.

Au centre d'Oak Ridge a été récemment installé un hôpital de trente lits pour l'étude des applications thérapeutiques des isotopes de vie courte, tels ceux du gallium, du ruthénium et du manganèse.

LE COBALT DÉTRÔNE LE RADIUM

Une application évidente des isotopes radioactifs est leur emploi comme succédanés du radium, comme nous l'avons déjà signalé dans le chapitre précédent. Parmi les radioéléments émetteurs de rayons gamma susceptibles d'entrer en ligne de compte, iridium 192, tantale 182 et cobalt 60, c'est ce dernier qui est le plus intéressant.

On peut l'obtenir à très bas prix, et par conséquent on pourra constituer avec lui

des sources de très grande intensité. Il a une vie relativement longue (période de 5 ans).

Sa toxicité est nulle, ce qui est loin d'être le cas pour le radium. Si, accidentellement, il passait du cobalt radioactif dans l'organisme, il n'aurait pas le temps d'y causer de dommages car il est très rapidement éliminé.

Enfin, son emploi pour le traitement des cancers est particulièrement commode. Beaucoup mieux que le radium il se prête à la confection d'applicateurs de grande surface et de forme compliquée. Comme on l'obtient en irradiant par les neutrons d'une pile du cobalt ordinaire, on peut donner à ce dernier la forme désirée avant de l'introduire dans la pile. On n'aura pas à lui faire subir de transformations après qu'il aura été rendu radioactif. Pour les applications thérapeutiques, on le fabrique souvent sous forme de fil en bobine que l'on n'a qu'à dérouler et à couper aux ciseaux quand le moment est venu d'en faire usage.

L'iridium 192, lui aussi bien meilleur marché que le radium, a un rayonnement beaucoup moins pénétrant. Il serait donc possible de traiter avec lui des cancers cutanés sans risquer de léser les organes sous-jacents.

Signalons qu'à côté du cobalt 60 et de l'iridium 192, on a pu utiliser avec quelque succès, pour le traitement des cancers cutanés, divers produits radioactifs appliqués en badigeonnage, par exemple du phosphore radioactif P 32 sous forme de phosphate de sodium.

On utilise aussi des sels de sodium ou de cobalt radioactifs en solution pour gonfler des sacs de caoutchouc introduits dans des cavités naturelles du corps ou des cavités ménagées chirurgicalement; ces produits sont ainsi portés directement au contact des organes malades.

RECHERCHES AGRONOMIQUES

Il y a déjà longtemps que l'on a signalé les services inappréciables que peut rendre la méthode des traceurs dans la recherche agronomique.

Elle permet, par exemple, d'évaluer d'une manière rapide et précise l'efficacité des engrais, en montrant sous quelle forme ils sont le plus rapidement et le plus opportunément assimilés par les plantes cultivées, quelles sont les doses de meilleur rendement et de quelle manière il faut faire varier leur composition suivant la nature des cultures et des terrains. Les études ont porté sur l'assimilation de divers éléments, tels que le calcium, le soufre, l'arsenic, mais les plus poussées ont concerné les engrais phosphatés. Évaluer par des méthodes purement chi-

miques la teneur d'un engrais en « phosphore assimilable » est souvent illusoire, car l'utilisation du phosphore par la plante est conditionnée par de nombreux facteurs tels que l'acidité du sol. On a pu, à l'aide de radiophosphore comparer directement les rendements des cultures suivant qu'on leur fournissait le phosphore sous forme d'engrais chimique ou de fumure organique. Cette dernière était réalisée en cultivant au préalable des plantes sur un sol enrichi en radiophosphore, puis en les enfouissant, après mesure de leur radioactivité, dans une parcelle vierge. Sur celle-ci et sur une parcelle voisine, additionnée de superphosphate radioactif, on a cultivé les mêmes plantes, comparé leurs rendements et mesuré la teneur des récoltes en radiophosphore. Les résultats ont été trouvés semblables, ce qui démontrait qu'engrais chimiques (superphosphate) et organiques (compost) avaient sensiblement la même action biologique.

Des autoradiographies ont révélé dans quelles parties des plantes va se fixer principalement le phosphore. Le radiophosphore, fourni aux racines sous forme de phosphate de sodium, laisse des traces très nettes dans les tiges des feuilles et, dans le cas des tomates par exemple, dans les pépins des fruits encore verts. Les fruits murs ne retiennent pratiquement pas de phosphore. En enduisant des feuilles de phosphate de sodium radioactif, on a pu mettre en évidence le mouve-

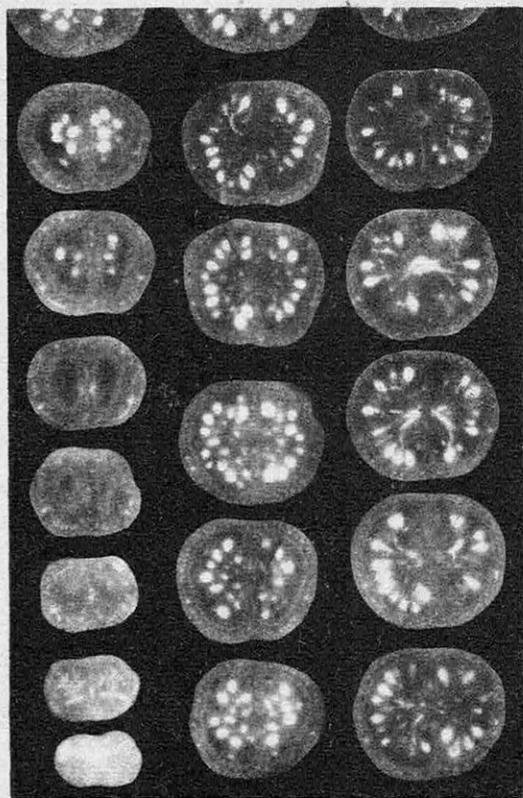
ment de la sève en suivant la diffusion du radiophosphore à travers les pédoncules et la tige.

Le radiocarbone permet d'étudier l'assimilation chlorophyllienne chez les plantes et le mécanisme de la photosynthèse. On a montré en particulier que les plantes et les algues contenant de la chlorophylle peuvent encore fixer du gaz carbonique dans l'obscurité ; mais, la réaction étant réversible, le nombre de molécules radioactivées qui quittent la plante est le même que celui des molécules qui y entrent. En pleine lumière, le phénomène n'est plus réversible. En outre, la forme chimique sous laquelle s'incorpore le gaz carbonique n'est pas la même dans l'obscurité et à la lumière.

Des recherches agronomiques très importantes ont été entreprises dans la station d'essais adjointe au centre nucléaire de Brookhaven. Elles portent sur l'influence des rayonnements émis par les radioéléments sur le rendement des cultures et sur les mutations qu'ils provoquent et qui sont susceptibles de donner de nouvelles races de plantes cultivables.

L'étude du métabolisme des insectes est particulièrement difficile par les méthodes classiques étant donné la petitesse de leurs organes. La technique des radioisotopes combinée avec l'autoradiographie y rendra les plus grands services. Une application évidente, d'un très grand intérêt pratique, est l'étude du mode d'action des insecticides.

Signalons enfin une très curieuse méthode de « marquage » des insectes utilisée pour l'étude de leur comportement. Elle est particulièrement utile pour suivre le déplacement des espèces qui vivent dans la terre à l'abri des regards des observateurs. On l'a appliquée avec succès aux larves de taupins, coléoptères de la famille des élatérides, en insérant un fil de cobalt radioactif dans la cavité de leur corps, et à des agriotes adultes en plaçant du sulfate de radium sous leurs élytres. Les insectes résistent bien à ce traitement et demeurent libres de circuler tandis qu'on les suit de la surface à l'aide d'un compteur de Geiger. Cette méthode, susceptible de nombreuses applications, est certainement appelée à un grand avenir. On a proposé de l'appliquer à la mesure de l'efficacité des traitements insecticides, car les insectes vivants préalablement « marqués » sont retrouvés facilement, même morts et enfouis sous des feuilles, dans les champs ou dans les forêts, à l'aide de détecteurs à compteurs de Geiger-Muller qui en permettent ainsi un dénombrement précis.



◀ A l'Université de Californie, Perry R. Stout a cultivé des plants de tomates sur des solutions contenant du zinc 65 radioactif. Ces autoradiographies révèlent que le radio-zinc s'est fixé principalement dans les graines et la peau, non dans la pulpe des fruits.

QUELQUES APPLICATIONS DES NEUTRONS

NOUS allons passer en revue dans ce chapitre quelques-unes des applications des neutrons autres que celles qui intéressent directement les recherches nucléaires. Elles n'ont guère dépassé aujourd'hui le stade expérimental, mais il est probable qu'elles ne tarderont pas à passer sur le plan pratique, tout au moins certaines d'entre elles.

NEUTRONS ET PRÉHISTOIRE

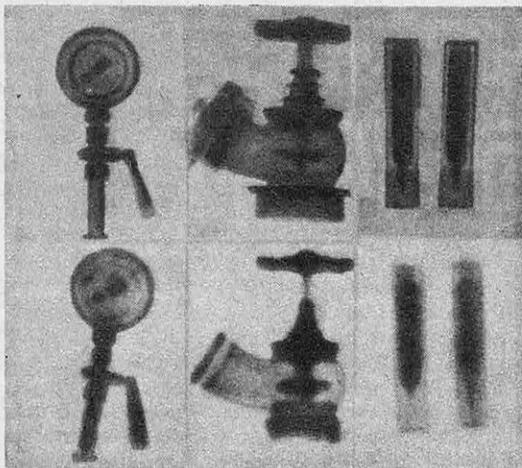
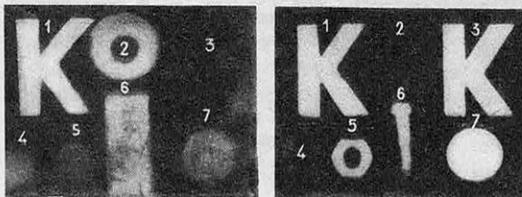
Une application inattendue des réactions nucléaires provoquées par les neutrons est la détermination de l'âge des vestiges préhistoriques.

Les neutrons du rayonnement cosmique bombardent constamment l'azote de l'atmosphère terrestre et forment des noyaux de carbone 14 radioactif. Depuis des millénaires, la concentration de ce radiocarbone dans notre atmosphère est pratiquement constante, car il se forme par unité de temps autant d'atomes de carbone 14 qu'il s'en détruit par radioactivité. Ce carbone se combine à l'oxygène sous forme de gaz carbonique que les plantes assimilent tant qu'elles demeurent vivantes.

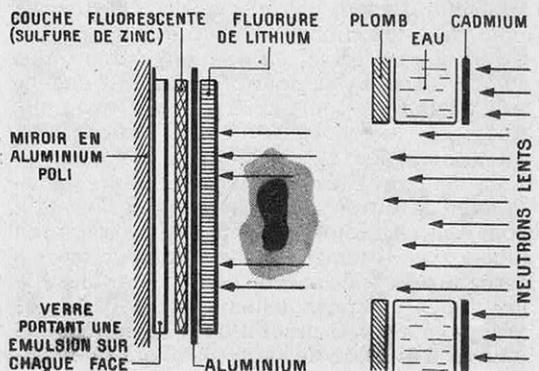
Quand un arbre meurt et cesse d'assimiler des composés où entre le carbone, la concentration en radiocarbone décroît progressivement avec une période de 5 000 ans. Supposons qu'on mesure dans un gramme de charbon de bois fraîchement préparé une radioactivité de 1 000 impulsions par heure, et dans un gramme de charbon de bois provenant de vestiges préhistoriques seulement 500 impulsions par heure. On en déduira que l'arbre à partir duquel ce dernier charbon a été préparé vivait il y a 5 000 ans.

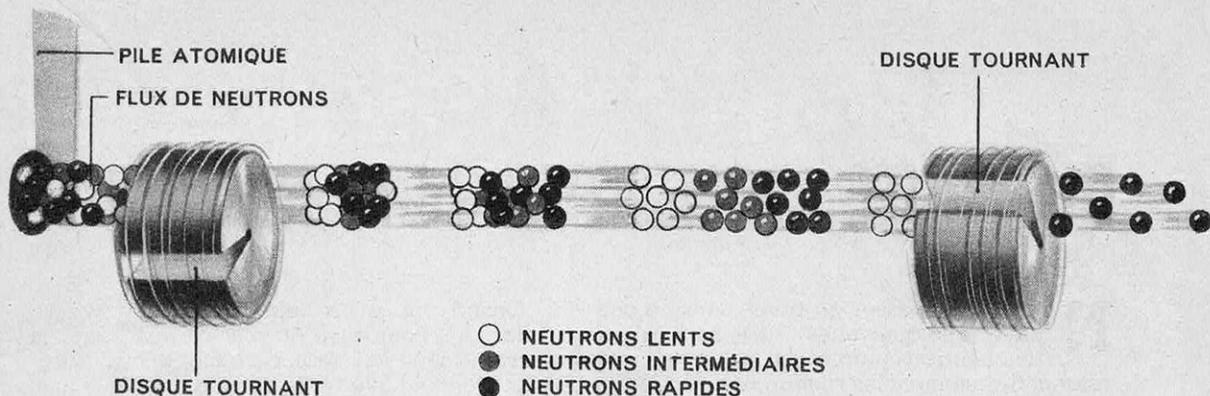
Libby et Arnold purent ainsi remonter jusqu'à 25 000 ans et préciser, depuis l'époque de Cro-Magnon, de nombreuses dates plus ou moins bien connues. Ils purent aussi démontrer, à l'aide de vestiges de feux de camps, que les Indiens habitaient l'Etat de New-York il y a 5 000 ans, alors que l'on admettait couramment que les Indiens n'avaient pas pénétré en Amérique du Nord avant le début de l'ère chrétienne.

Ils ont pu de même montrer, par l'étude de bouleaux fossiles, que la dernière avance glaciaire ne remontait pas à plus de 12 000 ans, contredisant les estimations des géologues qui la font remonter à 20 000 années.



● L'image neutronique (à gauche) diffère nettement de la radiographie (à droite) : 1. Plaque de cadmium, opaque aux neutrons et aux rayons X mous ; 2. Anneau de paraffine ; 3. Plaque de plomb ; 4. Feuille de bore ; 5. Erou de fer ; 6. Vis enrobée de paraffine ; 7. Pièce d'argent. Au-dessous : manomètre, vanne, ampoules d'eau légère et lourde. Le croquis indique un dispositif utilisable pour neutrographie par neutrons lents. Le lithium émet des particules alpha qui impressionnent la plaque fluorescente et par la lumière produite sur l'écran fluorescent. La plaque à double émulsion est placée entre deux feuilles réfléchissantes d'aluminium.





● Dans les recherches sur les neutrons, il est nécessaire de n'utiliser que ceux ayant une vitesse déterminée. Le « neutron chopper » (découpeur de neutrons) d'Argonne trie les neutrons d'un faisceau complexe. Un premier disque tournant laisse passer des paquets de neutrons, et un second disque convenable-

ment déphasé arrête tous ceux qui n'ont pas parcouru le trajet en un temps donné. Les disques d'acier comportent en réalité 6 fentes, au lieu d'une ci-dessus, mesurent 40 cm d'épaisseur pour arrêter les neutrons les plus rapides, 10 cm de diamètre et tournent à 40 000 tours par mn, mues par un moteur de 3 ch.

NEUTRONTHÉRAPIE

On a proposé à diverses reprises d'utiliser les neutrons pour irradier des tumeurs, mais les expériences à ce sujet, entreprises par quelques centres anticancéreux des Etats-Unis et de Grande-Bretagne, sont encore fragmentaires ; elles ont porté seulement sur des sujets gravement atteints où aucun autre traitement ne semblait offrir de chance de guérison. On ne saurait, dans ces conditions, porter de jugement d'ensemble sur l'efficacité du procédé.

Les tissus humains contiennent plus de 60 % d'eau et absorbent donc facilement les neutrons. Ces derniers y provoquent une ionisation intense due, d'une part, à la projection de noyaux d'hydrogène heurtés par les neutrons et d'autre part à l'émission de rayons gamma lors de la capture d'un neutron par un noyau d'hydrogène pour former du deutérium. Il était donc naturel de songer à utiliser les neutrons pour détruire les cellules cancéreuses en voie de prolifération. La grande difficulté réside dans la localisation de la destruction et dans la protection des tissus sains.

Deux procédés ont été proposés dans ce but. Le premier consisterait à envoyer au préalable dans l'organe visé, soit directement par injection, soit indirectement par absorption sélective, un élément stable qu'un bombardement par neutrons rendrait ensuite radioactif ; ce pourrait être, par exemple, l'iode ou le phosphore qui, radioactivés, émettraient des rayons bêta au siège même d'une tumeur. On pourrait ainsi réduire sensiblement la durée d'irradiation par les neutrons, dont la radioactivité induite prolongerait l'action dans le temps en la localisant en outre à l'organe désiré. Le second procédé, applicable aux tumeurs superficielles, consisterait à les badigeonner avec un sel d'un élément comme le bore, très avide de neutrons et qui se désin-

tègre sous leur action en émettant des rayons alpha. Ces derniers, très ionisants, agiraient sur les premières couches de la tumeur, des traitements successifs permettant d'atteindre des parties de plus en plus profondes.

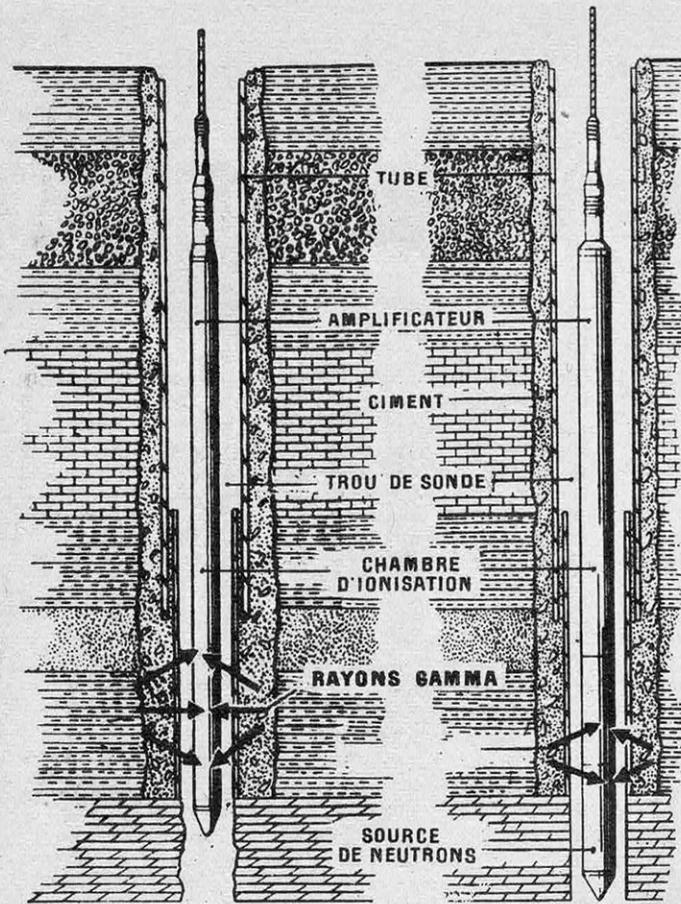
Bien des recherches seront nécessaires avant qu'on puisse se prononcer sur les mérites de la neutrothérapie. Les avis sont très partagés. On ne peut expérimentier que sur des cas désespérés, ce qui n'est pas pour faciliter les investigations.

NEUTROGRAPHIE

Les lois d'absorption des neutrons par la matière sont très différentes des lois d'absorption des rayons X ou gamma. Ainsi ils peuvent traverser des dizaines de centimètres d'acier et être au contraire arrêtés par des corps très transparents aux rayons X ou gamma. Les substances hydrogénées comme l'eau, le bois, le pétrole, les tissus des animaux, à l'exception du squelette, absorbent fortement les neutrons. Une neutrographie du corps humain montrerait, à l'inverse d'une radiographie, les chairs en blanc (peu de neutrons transmis) et les os en une teinte plus foncée.

Pour obtenir sur une plaque sensible une ombre portée de netteté suffisante, il faut utiliser une source de neutrons presque ponctuelle ou se placer à grande distance d'une source large, pour obtenir un faisceau de rayons pratiquement parallèles (ce sera, par exemple, celui qui s'échappe d'une pile atomique à travers une ouverture pratiquée dans son blindage).

Pour faire apparaître une image neutronique sur une plaque photographique, il faut recourir à divers artifices, car les neutrons, n'étant pas électrisés, n'agissent que sur les noyaux et pas sur les cortèges électroniques, et donc ne provoquent aucun phénomène photochimique entraînant la formation d'une



LE CAROTTAGE RADIOACTIF ET LA PROSPECTION NEUTRONIQUE

Les deux dessins de gauche montrent comment il est possible d'explorer géologiquement les terrains traversés par un forage sans y prélever de « carottes », c'est-à-dire d'échantillons de roches. Dans le premier cas, une chambre d'ionisation relève le profil radioactif des terres, tel qu'il résulte de leur teneur naturelle en radioéléments. Dans le second, une source de neutrons provoque des réactions nucléaires et les rayonnements détectés facilitent l'analyse des roches. Ci-dessus, disposition schématique de l'appareillage.

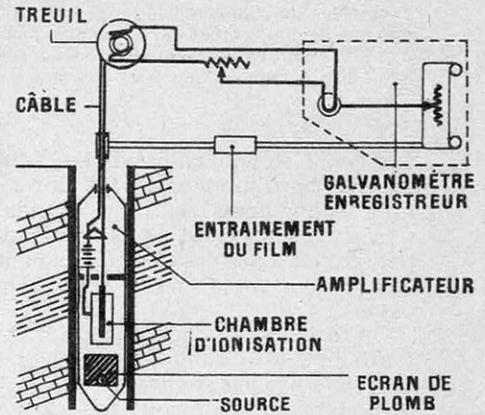


image photographique. Il faut placer au contact de l'émulsion ou lui incorporer un produit de réaction intermédiaire, absorbant les neutrons en émettant un rayonnement ionisant capable d'impressionner l'émulsion. Ce produit sera différent suivant qu'il s'agira de neutrons lents (lithium ou bore libérant des particules alpha) ou rapides (paraffine dont les noyaux d'hydrogène ou protons sont projetés par les neutrons qui les frappent à grande vitesse).

Il est encore trop tôt pour prétendre délimiter le domaine des applications possibles de la neutrographie. Contentons-nous d'en décrire une application qui intéresse les métallurgistes.

Si l'on veut mettre en évidence les défauts (craquelures, fentes étroites, etc.) d'une pièce métallique très épaisse, on pratiquera une neutrographie après avoir fait pénétrer dans les fentes une substance riche en hydrogène ; eau, essence ou pétrole. Le métal est relativement transparent aux neutrons alors que l'eau et le pétrole sont opaques ; les défauts apparaîtront en blanc sur la plaque.

Dans de nombreux cas, la neutrographie pourra ainsi fournir des renseignements complémentaires de ceux de la radiographie et améliorer nos méthodes d'exploration et de contrôle des produits industriels.

PROSPECTION PAR LES NEUTRONS

La recherche géophysique s'est enrichie depuis relativement peu de temps de méthodes nouvelles d'étude des formations géologiques et de prospection de gisements exploitables, qui font appel à des phénomènes magnétiques, électriques, thermiques et radioactifs. Nous n'envisageons ici que ces dernières.

La radioactivité des roches, naturelle ou provoquée, offre un moyen beaucoup plus commode que le procédé classique de prélèvement de « carottes » pour distinguer rapidement la nature et l'épaisseur des formations géologiques traversées par un sondage.

Le mode opératoire, dans le cas où on s'intéresse uniquement à la radioactivité naturelle des roches, est très simple. On loge dans la sonde, suspendue à un câble, une chambre d'ionisation très sensible aux rayons gamma (chambre remplie d'un gaz rare, argon ou xénon, sous pression) ; l'enregistrement s'effectue d'une manière continue sur un papier qui se déroule en synchronisme avec le câble.

L'étude de la radioactivité naturelle des roches fournit dans les sondages des renseignements de portée assez limitée, sauf natu-

Ensemble de l'appareillage pour la détection des radioisotopes créés dans le diamant par bombardement de neutrons. Le diamant lui-même sert à compter les radiations émises par les impuretés radioactivées.

rellement si l'on cherche des minerais très radioactifs, d'uranium ou de thorium. Cependant la méthode rend de grands services quand on veut contrôler la profondeur de la pénétration des injections de ciment dans les terrains qui entourent les cheminées de sondage.

On mélange au ciment un produit radioactif (carnotite) et il suffit de comparer les « profils » radioactifs avant et après l'injection pour en déduire l'épaisseur du revêtement cimenté.

Les neutrons sont utilisables dans les sondages de deux manières, soit que l'on étudie la décroissance du rayonnement des radioisotopes artificiels engendrés par les neutrons, soit que l'on observe les rayons gamma qu'émettent les atomes au moment où ils captent les neutrons.

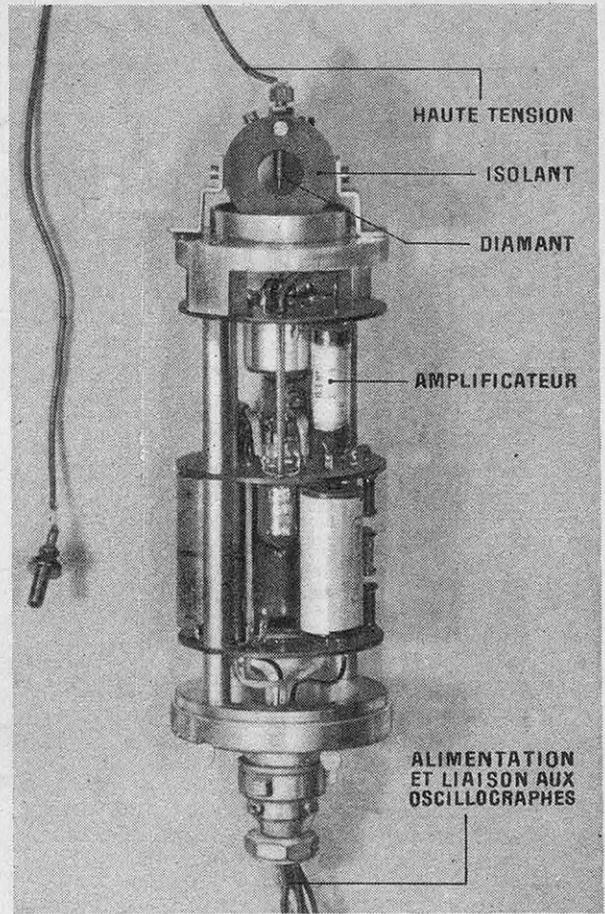
Dans les deux cas, on disposera dans la sonde une source puissante de neutrons, constituée simplement d'un mélange d'un émetteur de rayons alpha (radium ou polonium) et de béryllium ou, si l'on ne craint pas la complication de l'appareillage, d'un accélérateur miniature alimenté par câble sous quelques dizaines de milliers de volts et projetant des deutons sur une cible de béryllium. Cette source sera, dans les deux cas, isolée du compteur par un épais bloc de plomb.

On irradiera, dans la première technique, les parois du trou de sonde pendant un laps de temps déterminé, au bout duquel on arrêtera l'émission de la source, soit en l'entourant d'un cylindre de paraffine recouvert extérieurement de bore, soit en coupant l'alimentation de l'accélérateur. On enregistrera alors la radioactivité ambiante et on analysera sa courbe de décroissance pour en déduire la période et la nature des éléments bombardés.

La présence de tel ou tel élément, fer, silicium, calcium, etc., suffit souvent à l'expert pour déterminer la nature géologique de la couche étudiée.

La deuxième méthode sera particulièrement utile pour mettre en évidence des substances hydrogénées : eau, pétrole, gaz naturels, qui, après avoir ralenti les neutrons par chocs successifs sur les noyaux d'hydrogène, les captent en émettant des rayons gamma que le compteur décelera. On repérera ainsi les niveaux exploitables.

La méthode, appliquée à d'anciens puits de pétrole que l'on considérait épuisés, a pu révéler l'existence de niveaux intermédiaires qui avaient échappé lors de la prospection et qui ont fourni des tonnages appréciables après percement à leur hauteur du revêtement des puits.



NEUTRONS ET DIAMANT

Le diamant est du carbone cristallisé dans le système cubique. Son analyse spectroscopique révèle la présence de nombreuses impuretés, aluminium, silicium, calcium, magnésium, fer, titane, etc., qui jouent un rôle sans doute important, mais encore mal élucidé dans nombre de ses propriétés physiques, en particulier sa couleur.

Rappelons que pour expliquer les variations de teintes que manifestent le diamant et aussi d'autres cristaux, tels que les émeraudes, par exemple, deux théories ont été proposées. L'une, la théorie électronique, prétend que les teintes sont dues à la présence d'électrons ou d'ions prisonniers dans certains « trous » du réseau cristallin ; l'autre, la théorie pigmentaire, les attribue à des impuretés de nature et d'abondance diverses.

Il semble bien que l'une et l'autre contiennent une part de vérité. Ainsi des diamants soumis à des bombardements de particules chargées accélérées par des cyclotrons manifestent des variations de teintes dues à l'action de ces rayonnements sur les cortèges électroniques des atomes et au blocage de charges électriques dans les imperfections des édifices cristallins, ce qui donne naissance à des « centres colorants ». Mais de telles varia-

tions de teinte sont réversibles, car la chaleur ou même les rayons solaires ou ultraviolets libèrent les électrons prisonniers dans les « trous » et font apparaître la couleur initiale. Avec les neutrons, aucun effet visible n'avait pu être décelé. Nous soulignons le mot « visible », car il ne faut pas perdre de vue que les neutrons agissent exclusivement sur les noyaux des atomes et qu'il faudrait en mettre en œuvre des flux énormes pour transmuter une proportion appréciable d'impuretés. Or le meilleur cyclotron ne donne que des flux de l'ordre de 100 millions de neutrons par centimètre carré et par seconde. Plusieurs heures d'irradiation livreraient seulement quelques milliards de nouveaux « pigments » qui demeureraient invisibles. Que l'on songe que dans un millième de milligramme de chrome, par exemple, il y a dix millions de milliards d'atomes!

La radioactivité des atomes qui ont capté des neutrons peut être facilement mise en évidence, bien qu'elle soit très faible, par une méthode originale mise au point par M. Nahmias : le diamant lui-même est utilisé comme compteur des radiations qui prennent naissance dans son sein.

Nous avons vu en effet dans un chapitre précédent que certains cristaux, dont le diamant, peuvent être utilisés comme compteurs des radiations ionisantes qui les traversent ; si on les place entre des électrodes sous tension, on observe à chaque passage une impulsion de conductivité. Après avoir sélectionné un diamant bon compteur (tous ne conviennent pas pour cet emploi), on l'irradie avec des neutrons pendant un certain temps, puis on dépose deux microgouttes d'encre de Chine sur ses faces opposées pour constituer les électrodes auxquelles on applique une différence de potentiel convenable. On observe alors un nombre de « coups » par minute supérieur à celui noté avant l'irradiation. La différence décroît avec le temps suivant une loi complexe, car les radioéléments formés ont des périodes diverses, et, fait important, ne disparaît pas par chauffage ou par exposition aux rayons ultraviolets, qui sont sans action sur les noyaux.

Pour provoquer des changements de teinte visibles, il faut que le bombardement neutronique atteigne une proportion importante des impuretés présentes dans le diamant. Supposons que nous voulions transmuter intégralement toutes les impuretés incluses dans un diamant de 5 carats, soit un gramme, contenant 0,05 % d'impuretés. Le calcul montre qu'il faut, compte tenu du rendement des réactions nucléaires, un nombre de neutrons de l'ordre de 10^{21} , répartis sur la surface totale, égale, par exemple, à 1 cm^2 .

Il faudrait maintenir le diamant pendant un an dans une pile atomique de un million de kilowatts. L'opération n'a rien d'impossible et de telles piles existent aux usines de Hanford, aux Etats-Unis. En pratique, quelques semaines suffiraient pour que le changement

de teinte devienne appréciable à l'œil.

Le traitement simultané d'une grande quantité de diamants ne perturberait en rien le fonctionnement de la pile, car les ralentisseurs de neutrons sont souvent constitués par du carbone. Bien entendu, les rayons gamma, bêta et X présents dans la pile ou induits dans les diamants, provoquent aussi des modifications de teinte. Mais celles-ci auront un caractère transitoire et on les fera disparaître par chauffage à température convenable ou exposition au soleil. On attendra aussi que les radioéléments formés dans le diamant aient complètement disparu, ce qu'on vérifiera au compteur de Geiger ou par autoradiographie suivant les méthodes classiques. La teinte obtenue après ce traitement et ce délai sera définitive et ne pourra être modifiée qu'en faisant repasser le diamant dans la pile.

Ces prévisions ont été récemment confirmées en Angleterre. Des diamants insérés pendant quelques heures ou quelques jours dans la pile de Harwell ont accusé des variations de teinte très nette.

Il serait prématuré d'envisager les conséquences commerciales possibles d'un tel traitement appliqué au diamant-bijou, en vue de valoriser certaines pierres de teintes peu appréciées. Soulignons qu'il présenterait un intérêt non moins grand pour le diamant industriel dont on peut espérer accroître ainsi la dureté, celle-ci apparaissant souvent liée à la nature des impuretés, donc à la couleur.

Un dernier point enfin mérite d'être abordé. On sait que le carbone se présente dans la nature sous deux formes cristallines : diamant et graphite. Porté à haute température, le diamant se transforme en graphite, mais l'opération inverse n'a jamais pu être effectuée, bien que de nombreux savants se soient attelés au problème. Il est en effet d'importance considérable, non pas pour la production du diamant de bijouterie, mais pour celle du diamant industriel dont la consommation, en poids, est bien supérieure à celle du premier. Aux Etats-Unis, il fut déclaré en 1940 matière première stratégique, des crédits considérables furent affectés aux recherches sur sa synthèse, qui demeurèrent infructueuses. On connaît approximativement les conditions requises en ce qui concerne la pression et la température pour la transition graphite-diamant, mais on ignore la vitesse de transformation et l'influence éventuelle de catalyseurs.

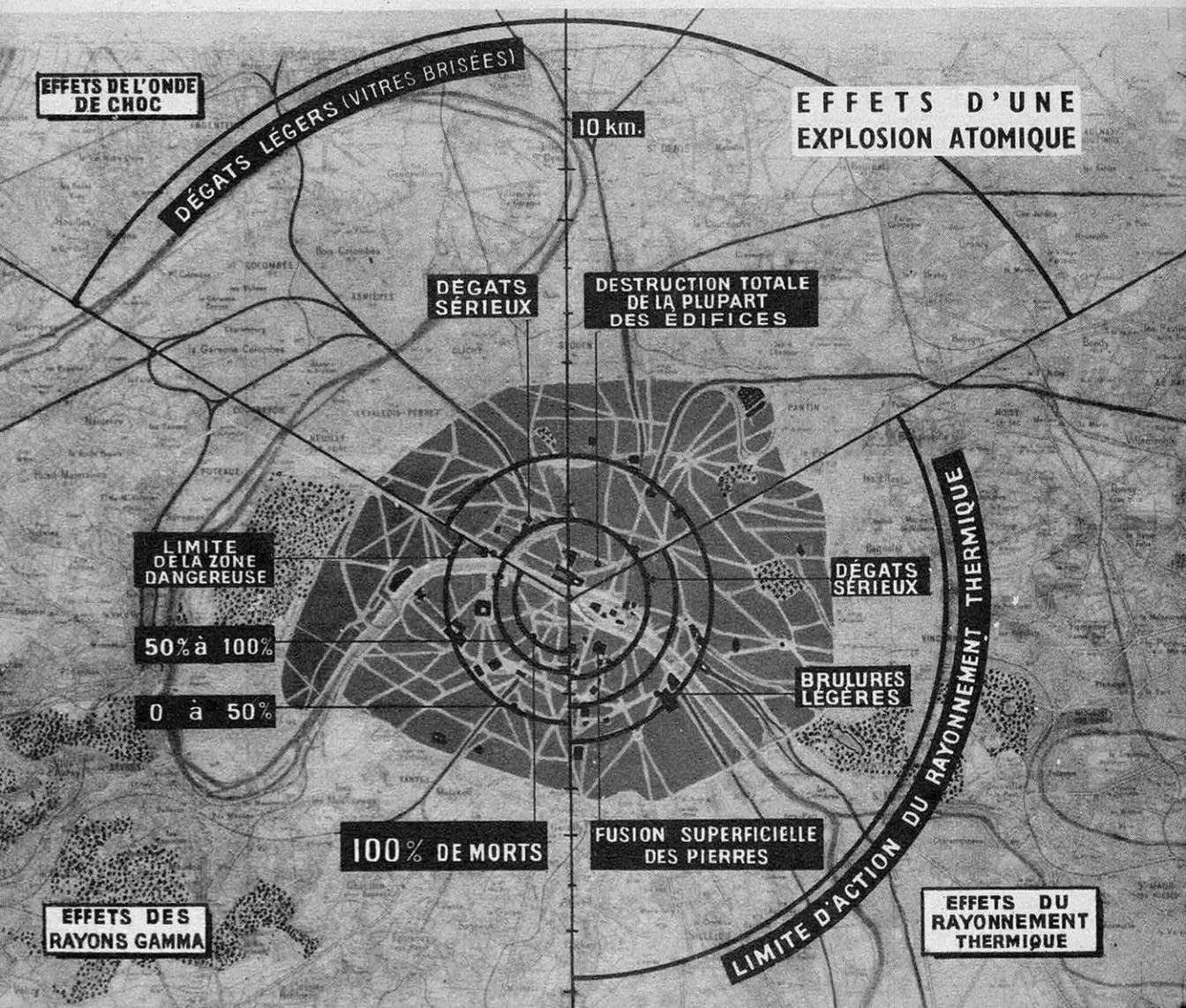
L'analyse des courbes de décroissance de la radioactivité de diamants soumis à des irradiations plus ou moins prolongées, doit permettre qualitativement et quantitativement de reconnaître quelles sont les impuretés communes à presque tous les diamants. Ce sont ces impuretés qui, très probablement, ont joué le rôle de catalyseurs dans la transformation graphite-diamant dans la nature, et on pourra s'inspirer de ces résultats pour les futures expériences de synthèse.

LA GUERRE ATOMIQUE

LA guerre atomique n'occupe que le quatrième rang dans le classement par ordre de puissance tel qu'il est généralement établi en Amérique. Le premier est réservé à la guerre biologique et à la guerre radioactive, qu'on place ex-æquo, faute de pouvoir juger, en l'absence de tout précédent, quel sera l'effet réel de chacune, l'une et l'autre ayant vraiment toutes les raisons de se disputer le premier rang. La troisième place est réservée à une arme dont la nature n'a pas été divulguée.

Cette estime modérée pour un engin qui a mis à son actif les 200 000 morts d'Hiroshima et de Nagasaki, et même beaucoup plus si l'on en croit les rectifications du maire de la

première ville, surprendra peut-être. Mais l'absence d'alerte dans ces deux villes explique le nombre élevé des victimes. Rarement abris ont mieux résisté et mieux protégé que ceux d'Hiroshima les quelques occupants qui s'y trouvaient accidentellement, et cela jusqu'au voisinage du centre d'explosion. En raison de l'altitude de celle-ci, indispensable si l'on voulait intéresser une surface bâtie en rapport avec la puissance de la bombe, la charpente des immeubles en béton, renforcés pour résister aux tremblements de terre, ne s'écroula pas à la verticale des bombes atomiques alors qu'elle ne résiste pas au souffle d'une grosse bombe tombant dans la rue voisine.



LA BOMBE ATOMIQUE ET SES EFFETS

Nous ne reviendrons pas sur les trois modes d'action de la bombe atomique, type Hiroshima ou Nagasaki : le souffle, l'émission de chaleur et de radiations.

A l'avenir, avec des engins variés dont les uns pourront être moins puissants et d'autres, comme la bombe à hydrogène, beaucoup plus puissants, les résultats pourraient être très différents.

Si l'on réalise des bombes allégées pour emploi tactique, il semble bien que l'effet de souffle jouera le rôle le plus important.

Au contraire, des bombes alourdies comme celle d'Eniwetok, qui équivaldrait à six bombes types Hiroshima, et surtout la bombe à hydrogène, qui serait mille fois plus puissante, devraient agir surtout par leur rayonnement. Aussi Hans Bethe attribue-t-il à l'émission lumineuse de la bombe à hydrogène la part principale de ses effets, sur l'homme d'abord dont elle pourrait provoquer la mort jusqu'à une trentaine de kilomètres, puis sur les immeubles et les richesses agricoles, forestières, etc., qu'elle pourrait détruire à distance beaucoup plus grande encore.

LE SOUFFLE

Des trois effets de la bombe, le souffle est celui contre lequel les combattants et les non combattants se protégeront le plus aisément, eux et leur matériel.

La tôle, même légère, présente une résistance remarquable au souffle si elle est établie à cette fin. Elle est particulièrement notable sur les charpentes soudées, qui se déforment sans se déchirer aux lignes de rivets. Elle est aisée à préciser : l'abri cylindrique individuel de 1 m de diamètre en tôle de 2 mm des meilleurs alliages légers, qu'on peut faire travailler à 50 kg/mm², supporte une pression de 20 kg/cm². C'est 200 m d'eau, ou 1 300 fois plus qu'on n'en impose aux grandes constructions en béton armé ; ce résultat est obtenu avec une trentaine de kilogrammes de métal.

La tôle est le matériau idéal pour protéger du souffle le combattant exposé à la bombe atomique.

Combinée avec le trou d'homme, la calotte sphérique de quelques kilogrammes qui le recouvrira mettra son occupant à l'abri de toute explosion autre qu'à très faible altitude et à proximité. Le char à blindage même mince assurera une protection semblable. La tôle qui permet à des sous-marins de poche de plonger à plusieurs centaines de mètres leur vaudra de tenir sous les explosions aériennes et même à la limite de la gerbe soulevée par les explosions sous-marines. Des trois armes, l'aviation sera la parente pauvre, qui n'établit ses fuselages allégés ou ses scaphandres aériens que pour résister à la surpression intérieure de quelques centaines de grammes

au centimètre carré ; l'aviateur se résignera, car il ne résisterait pas de toute façon aux rayons gamma. Il peut d'ailleurs se rassurer en pensant qu'il ne vaut pas une bombe atomique.

S'il a le loisir de s'abriter à l'alerte, le civil pourra utilement faire appel à une protection de ce genre. Les travailleurs des usines souterraines sont à l'épreuve de toutes les explosions aériennes, même de bombes à hydrogène ; ils n'ont pas à s'inquiéter des impacts directs, qui seraient un gaspillage de matière coûteuse.

LA CHALEUR

Contre la chaleur relativement modérée des bombes d'Hiroshima et de Nagasaki, la tôle mince suffisait aussi bien que les vêtements de couleur claire.

Le véritable danger, qui rend illusoire toute protection dans les grandes agglomérations, est l'incendie généralisé qui suit l'explosion. La maison japonaise est très inflammable, mais n'offre pas grand aliment au feu ; à surface bâtie égale, la grande ville européenne qui serait exactement à la mesure des bombes type Eniwetok recèle un volume très supérieur de matériaux combustibles. L'appel d'air, en raison directe de l'intensité et de l'extension du foyer, dépasserait de beaucoup celui qui a été observé au cours des plus grands incendies, à Hambourg notamment où le vent déracinait les arbres ; il doit atteindre la valeur où de nombreux immeubles sont abattus.

Au cas d'un emploi de la bombe à hydrogène, les dégâts du feu prendraient une importance particulière. Très au-delà de la zone où les incendies seraient allumés directement, le vent renverserait les constructions sur les nombreux foyers domestiques ou industriels qui y sont entretenus en permanence. Enfin l'appel d'air étendrait les destructions agricoles et forestières à des régions situées très au-delà de la zone directement dévastée par l'incendie.

Devant des phénomènes de cette ampleur, les méthodes habituelles de lutte contre l'incendie sont absolument inopérantes. Mais le sauvetage des personnes n'est pas exclu à condition de disposer d'abris souterrains de volume suffisant et d'étanchéité au moins approximative.

LES RADIATIONS

La protection contre les rayons gamma est celle qui pose les problèmes les plus délicats.

Si on veut la réaliser avec le minimum de poids, ce qui présente surtout de l'intérêt pour le combattant, les revêtements d'atomes lourds, dont le plomb est le type, sont préférables. Mais on se contentera vraisemblablement de l'acier, moins coûteux, et dont la résistance mécanique servira à d'autres usages.

LE PASSAGE DE L'ONDE DE CHOC →

Le souffle d'une bombe atomique provoque une surpression instantanée, beaucoup plus intense et durable que pour une bombe ordinaire, suivie d'une dépression plus faible mais plus prolongée (phase de succion).

Pour les installations fixes à l'usage du civil, n'importe quel matériau, béton, terre, eau, convient à condition d'être employé sous une épaisseur assez grande.

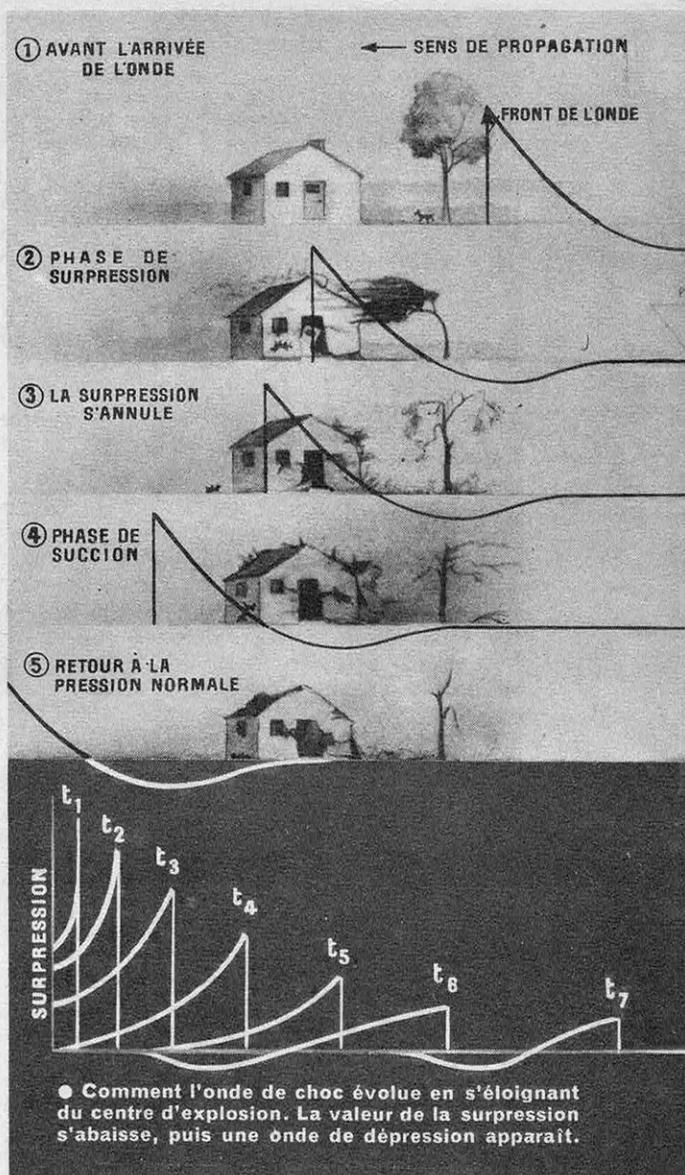
Pour le personnel en opérations de guerre, dans le cas du combattant en position défensive où la protection contre le souffle est combinée avec le trou d'homme, l'épaisseur de terre traversée obliquement par les rayons gamma les absorbe suffisamment, en dehors du voisinage immédiat de l'explosion, pour préserver la plus grande partie du corps de l'homme qui s'y abrite. Les rayons gamma agissant principalement par voie de lésions médullaires empêchant le remplacement des globules du sang, il restera suffisamment d'os non touchés pour cette fonction vitale essentielle.

Le combattant en situation offensive est moins favorisé. La protection absolue réclamerait le char à blindage uniformément réparti de 30 à 40 cm d'épaisseur, et encore ne serait-elle efficace que contre la bombe type Hiroshima. Il faudra adapter les formations à ce risque ; l'attaque massive de plusieurs divisions blindées, dont le personnel risquerait d'être mis hors de combat en totalité par une seule bombe, devra céder la place à des opérations plus méthodiques d'infiltration et de réduction progressive par des troupes s'enterrant avec leurs chars à mesure de leur avance.

BOMBES STRATÉGIQUES ET BOMBES TACTIQUES

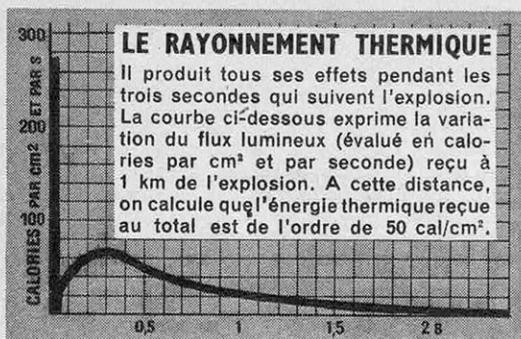
L'annonce de la « bombe de poche » a été accueillie avec quelque scepticisme, aux Etats-Unis mêmes, au printemps dernier. L'évolution de la bombe atomique s'est faite jusqu'ici dans le sens inverse, qui est celui de la puissance accrue. Peut-on alléger la bombe type Hiroshima pour l'adapter à une artillerie de campagne? Assurément, mais en consentant une réduction de rendement. Réserve faite d'une découverte qui bouleverserait entièrement les principes de la physique nucléaire, rien ne permet, à partir des 12 kg de plutonium d'une bombe ordinaire, de faire une douzaine de bombes de poche chargées chacune à 1 kg. L'engin pour aviation tactique ou pour artillerie de campagne peut être fait beaucoup plus léger et beaucoup moins puissant que celui d'Hiroshima, mais il consommera au moins autant de métal actif et coûtera aussi cher.

Ce n'est donc pas demain que le fantassin aura droit au tir d'arrêt de projectiles atomiques quand les chars auront franchi le bar-



rage des obus explosifs ordinaires. L'emploi tactique de la bombe atomique n'en interdira pas moins des opérations d'importance primordiale, sous la forme où on avait coutume de les exécuter en l'absence d'armes d'une telle efficacité. On ne débarquera plus quelques dizaines de milliers d'hommes sur une plage, ou on ne franchira plus une position fortifiée en y engageant quelques divisions blindées sur un front étroit, suivies de quelques divisions motorisées pour élargir la brèche.

C'est probablement dans le domaine naval que la bombe pour emploi tactique trouvera ses applications les plus intéressantes. Ni la DCA ni la chasse n'ont de chances sérieuses d'arrêter le chasseur emportant une bombe



de une tonne ou deux, piquant à 1 100 km/h et lançant en semi-piqué à 10 km du navire attaqué avec une précision surabondante pour un engin de cette puissance.

LA GUERRE SUR TERRE

Quelle que soit la valeur que l'on attache à l'annonce américaine de bombes atomiques « tactiques », des engins de cette nature entrèrent inévitablement dans l'armement terrestre.

La bombe type Eniwetok, dont la zone d'action aurait au moins 6 km de diamètre, si on attribue à celle d'Hiroshima un effet très sérieux sur le personnel et le matériel dans une zone de 3 km de diamètre, couvrirait largement le secteur d'attaque d'une à deux divisions mécanisées ou motorisées. Le tir d'arrêt de quelques engins de ce type met le défenseur, établi sur un terrain aménagé en prévision de leur emploi, à l'abri des grosses percées genre « Blitzkrieg » ; sur les fronts tenus à gros effectifs, il oblige l'attaque aux lentes progressions de la guerre de tranchées. La guerre de mouvement reste possible, mais dans les zones d'étendue suffisante pour que la densité des troupes ne justifie pas l'emploi d'engins aussi puissants.

L'intervention de la bombe atomique dans le combat ne se traduira pas par un bouleversement de l'art militaire. Le combattant adaptera certainement beaucoup mieux son équipement et sa tactique à la menace des explosions atomiques qu'aux formes d'attaque plus insidieuses de la guerre radioactive.

LA GUERRE SUR MER

Cette conclusion sur l'inefficacité relative de la guerre atomique dans les combats sur terre ne vaut certainement pas pour les combats sur mer, où la course au monstre est encore à la mode dans les grandes marines. La bombe atomique condamne entièrement le matériel naval et les installations portuaires des grandes puissances dans leur état actuel.

Il n'est plus possible d'admettre la réunion de grandes flottes, avec tous leurs approvisionnements et leurs moyens d'entretien, dans des ports ou des rades de dix à vingt kilomètres carrés. Il n'est même pas besoin d'un avion pour en venir à bout, le chalutier suffit.

Que resterait-il de la flotte française concentrée à Toulon si un de ces bâtiments, débarquant quelques tonnes de poisson au port de commerce voisin, déposait en passant au milieu de la rade une bombe type Eniwetok à amorçage retardé ?

De même que la menace d'une intervention atomique dans le combat terrestre condamne l'emploi des chars géants et les tentatives de percée en masse au profit des méthodes d'infiltration et des opérations où les effectifs seront dilués sur de vastes étendues, la même intervention dans le combat naval interdit à la marine sa ressource habituelle à toutes les difficultés, la course au tonnage, et le groupement serré des navires se prêtant un secours mutuel. Comme elle laisse subsister en particulier la menace du sous-marin ou de l'avion attaquant à la bombe ordinaire, elle ne supprime pas les excellentes raisons qui justifiaient ces concentrations, si l'on ne voulait pas qu'une partie du convoi et de l'escorte fût détruite avant que le reste ait pu intervenir.

La bombe atomique imposera un matériel naval assez économique, donc assez aisé à multiplier pour que son attaque à la bombe atomique ne soit pas payante. La vedette, le petit sous-marin en seront la part principale. Les flottes de transport de surface, privées de leur soutien habituel, s'orienteront vraisemblablement vers la même solution du sous-marin.

LA GUERRE DANS LES AIRS

La bombe atomique apporte à l'aviation stratégique une énorme augmentation de puissance et un allègement considérable de sa tâche.

L'aviation a désormais le moyen d'exécuter en quelques jours, dès le début des hostilités, des opérations de destruction qu'elle n'avait pas achevées à la signature des armistices allemand et japonais, après cinq ans d'un effort qui absorbait en Grande-Bretagne et aux Etats-Unis la plus grosse part de la production de guerre. Le coût du bombardement ordinaire ne devait pas s'évaluer au prix des bombes lancées. Perdre 4 % du nombre des avions engagés quand un appareil de 25 tonnes lançait une tonne de bombes, c'était lâcher sur l'ennemi le même poids d'avions en flammes et de bombes.

Si la DCA ne réussit pas à mettre au point des armes beaucoup plus efficaces qu'en 1945, les bombardiers risqueront même nettement moins qu'au cours de la dernière guerre. Les centaines de bombardiers ato-

miques qui attaqueraient isolément dès les premiers jours un ensemble d'objectifs répartis sur une zone plus étendue que celles de 1945, et dont la défense nécessairement serait assez peu dense, ne risquent que des pertes minimales.

Ce sont ces perspectives nouvelles ouvertes à l'attaque qui exposent dangereusement aux effets de la bombe atomique des territoires que leur étendue eût préservés des bombes ordinaires.

Le bombardement stratégique à l'aide de la bombe atomique devient même tellement facile qu'il peut se passer de l'aviation, et c'est bien ce qui inquiète les pays à qui leur supériorité aérienne donnait jusqu'ici le monopole de ce genre d'opérations.

Cinquièmes colonnes et guérillas peuvent assembler des éléments de bombes atomi-

ques, transportés par l'aviation ou par tout autre moyen, aussi aisément qu'ils organiseraient un attentat au « plastic ». A plusieurs centaines de kilomètres à l'arrière d'un front, cette artillerie à longue portée que sont devenus les engins genre V-1 et V-2 peut transporter aussi bien la bombe atomique que l'explosif ordinaire, et ce nouveau chargement serait même beaucoup plus en rapport avec le coût des V-2. La guerre sous-marine trouve même, dans sa combinaison avec de telles armes, une puissance qu'elle n'a jamais connue. Au lieu de pourchasser les bâtiments de commerce sous la riposte par grenades de leurs bâtiments d'escorte, le sous-marin pourra les attaquer groupés par dizaines dans cette « zone focale » du trafic qu'est le grand port, détruisant ou interdisant en même temps la ville voisine par la radioactivité des gerbes.

LA GUERRE RADIOACTIVE

La guerre radioactive repose sur l'emploi systématique des isotopes radioactifs pour la contamination de vastes zones qu'ils interdiraient à l'homme, sous peine d'accidents graves ou mortels, après un certain séjour, ou pour l'empoisonnement des aliments ou des boissons indispensables à sa subsistance, ou même de l'air exigé par sa respiration.

L'efficacité de la guerre radioactive a fait jusqu'à aujourd'hui l'objet des appréciations les plus divergentes.

Pendant longtemps, elle a été classée officiellement au premier rang des moyens de destruction massive, sur le même plan que la guerre biologique. L'annonce de la mise en production de la bombe dite à « hydrogène » a multiplié les déclarations alarmantes sur le danger d'un empoisonnement général des êtres vivants, qu'on expliquait par la dissémination des résidus, non utilisés au cours de l'explosion atomique, de cet isotope radioactif de l'hydrogène qu'est le « tritium », et qu'on jugeait devoir entrer sur la base de plusieurs centaines de kilogrammes dans la composition de la bombe. « L'empoisonnement de l'atmosphère par la radioactivité et par suite la destruction de toute vie sur la terre, déclara à l'époque Einstein, est entré dans le domaine des possibilités techniques. » Les professeurs Hans Bethe, Frederick Seitz, Leo Szilard et Harrison Brown, dont l'autorité en ces questions était difficilement récusable, confirmèrent presque aussitôt les vues du célèbre savant en affirmant que « l'explosion des bombes à hydrogène pouvait empoisonner la terre entière. » D'ailleurs, indépendamment de

la bombe à hydrogène, le rapport du 1er semestre 1950 de la Commission américaine de l'énergie atomique annonçait la réalisation d'une « bombe-poison » déversant sur de vastes étendues des substances radioactives qui obligeraient les occupants à évacuer rapidement la région.

Mais, simultanément, d'autres déclarations



Recouverts de vêtements et de masques protecteurs et armés de compteurs de Geiger-Muller, des marins britanniques montrent comment opérerait une équipe de défense passive dans une guerre atomique.

tout aussi autorisées démentaient que cet empoisonnement généralisé du sol et de l'atmosphère terrestre pût atteindre le degré de facilité qu'on lui attribuait. Des millions de bombes atomiques seraient nécessaires, affirmait-on, pour rendre la terre inhabitable ; les possibilités d'empoisonnement des plus importantes des piles américaines se réduiraient à quelques centaines de kilomètres carrés par mois.

Où la vérité se situe-t-elle entre ces affirmations contradictoires ?

LA POSITION OFFICIELLE AMÉRICAINE

Le rapport publié en août 1950 sur « The effects of atomic weapons », en collaboration par le Département américain de la Défense et la Commission de l'énergie atomique, est le premier document officiel traitant, de manière assez sommaire d'ailleurs, eu égard aux 456 pages qu'il comporte, des effets possibles de la guerre radioactive.

Cette position officielle mérite donc d'être connue. Elle a malheureusement un défaut très grave. Elle annonce bien que le tableau qu'elle brosse est établi « aussi exactement que possible à la lumière de nos connaissances présentes », ce qui est une limitation commune à la valeur de toutes les œuvres humaines, mais elle ajoute cette autre limitation qui est l'intérêt de la défense nationale américaine. Il ne faut donc pas compter sur elle pour nous présenter une mesure exacte de la menace radioactive ni même pour nous indiquer les moyens les plus dangereux, donc les plus probables, auxquels on aurait recours. L'interprétation individuelle des éléments fournis par le manuel officiel conserve, par suite, toute sa valeur.

D'après cette publication, deux méthodes peuvent être employées pour la production à l'échelle industrielle des matériaux réclamés par la conduite de la guerre radioactive.

La première est le recours aux produits de fission développés en abondance dans les piles servant à la fabrication du plutonium ou à la production d'énergie. Les éléments radioactifs ainsi récupérés deviennent un sous-produit de l'utilisation de la bombe ou des centrales atomiques.

La seconde méthode repose sur l'irradiation, par le flux intense de neutrons que produit la pile, de matériaux spécialement choisis pour donner naissance à des isotopes radioactifs, par capture des neutrons.

Mais, souligne le rapport, il ne faut pas oublier que la formation d'un isotope radio-

POUR TOMBER DE 13 000 M DES PARTICULES METTENT :

Diamètre des particules (en microns, $\mu = 1/1000$ mm)	Durée de chute (heures)
840	0,37
250	0,69
150	1,95
75	7,90
33	40
16	170
8	680
5	1700

actif dans la pile, par capture de neutrons, réduit d'autant les possibilités de production de matériaux utilisables dans les bombes : « En tout état de cause, il n'est pas facile de produire de grandes quantités d'isotopes radioactifs pour un emploi militaire ».

Sur le choix des produits radioactifs d'après la nature de l'élément nucléaire émis, rayon alpha, bêta, gamma ou neutrons, le document américain se prononce en faveur des émetteurs gamma, qui sont les plus convenables pour atteindre le degré d'intensité réclamé par les doses mortelles. Il ne cache d'ailleurs pas les difficultés qui se pré-

senteront pour arriver à ce résultat par une durée d'exposition nécessairement courte.

Il signale enfin la difficulté de principe d'une arme dont les effets décroissent naturellement avec le temps et d'autant plus vite qu'elle est plus efficace, ce qui réduit jusqu'à les interdire les possibilités de stockage.

PRODUCTION ET TONNAGE

D'après le professeur américain Ridenour, l'irradiation à la pile de grandes quantités de produits coûterait beaucoup trop cher. Le seul moyen d'arriver à un prix de revient acceptable serait de s'adresser au mélange grossièrement isolé des sous-produits de la fabrication du plutonium à la pile atomique. Selon lui, en ne retenant que les treize produits les plus intéressants, l'usine atomique de Hanford, dont les piles auraient une puissance totale de 3 000 000 kW, pourrait ainsi produire mensuellement des radioéléments équivalant à 750 tonnes de radium. Cette intensité serait nécessaire, affirme-t-il, pour l'empoisonnement d'environ 375 km², soit l'étendue de Paris et de sa proche banlieue. Ridenour en conclut que l'arme radioactive n'est pas aussi dangereuse qu'on veut bien le dire.

Si la production demande des usines importantes, Ridenour reconnaît par contre l'extrême facilité de dispersion des produits. La radioactivité d'un produit varie en raison inverse de sa période. Or, les éléments les plus intéressants pour la guerre radioactive, qui auraient une période de l'ordre du mois, sont, compte tenu de leurs poids atomiques, 40 000 fois plus efficaces que le radium, dont la période est de 1590 ans. Il suffirait donc de quelques kilogrammes pour remplacer les 750 tonnes de radium dont on admet que l'épandage serait nécessaire dans l'exemple de Paris et de sa banlieue.

Le tonnage à utiliser est donc tellement faible que sa répartition à une dose à peu

près uniforme exige sa dilution dans un produit inerte. Ce serait le « sable radioactif » dont quelques tonnes ou quelques dizaines de tonnes suffiraient à l'arrosage des plus grandes capitales. La guerre radioactive résout donc de toute façon le problème du tonnage. Quelques « Superfortress » suffiraient pour des interdictions prolongées de zones urbaines de très grande étendue dont la destruction demanderait cinq ou dix mille vols au chargement d'une dizaine de tonnes chaque.

Même, en admettant les chiffres avancés par Ridenour, son optimisme relatif est difficile à partager. Il semble que la production mensuelle par une seule usine de la dose nécessaire à l'interdiction de Paris et de sa banlieue soit une éventualité assez inquiétante. Il est probable que les éléments à période de l'ordre de l'année s'accumulent dans les arsenaux américains, car la Commission de l'énergie atomique est sans doute assez avisée pour n'avoir pas rejeté ces produits à la mer.

Mais d'autres objections beaucoup plus graves peuvent être présentées aux conclusions rassurantes de Ridenour et du rapport sur « The effects of atomic weapons », en dehors même du mode d'emploi préférable des produits nocifs, que l'on examinera dans le paragraphe suivant.

Rien n'est plus facile que d'échapper au dilemme « plutonium ou éléments radioactifs ».

La pile ordinaire, sous la forme de barres d'uranium enrobées dans un modérateur tel que le graphite ou l'eau lourde n'est qu'un des nombreux types de réacteurs nucléaires possibles.

D'autres types spécialisés seront bien plus

avantageux pour la fabrication de tonnages élevés de produits radioactifs. On pourra choisir par exemple, un modérateur donnant lui-même, par fission ou par capture, des produits radioactifs de la nature exacte désirée avec un rendement élevé. On pourra aussi adopter des formes de réacteurs à « combustible » très enrichi et de très grande puissance qui pourront « brûler » en quelques mois des réserves d'uranium 233, 235 et de plutonium 239 en fournissant des tonnages correspondants de produits de fission. Ainsi pourra être levée l'objection du stockage impossible des éléments à période faible, les plus actifs.

Enfin, il est évident que les navires à propulsion nucléaire et les centrales atomiques pourront devenir des sources d'éléments radioactifs aussi importantes que les piles destinées à la fabrication des bombes atomiques.

ACTION EXTERNE ET ACTION INTERNE

Le « sable radioactif » dispersé par avion est-il le mode d'emploi le plus efficace des produits radioactifs ?

La justification du numéro un, attribué à l'arme radioactive, repose sur la masse infime de produit à mettre en œuvre pour atteindre des effets dangereux ou mortels. Les grosses destructions de villes à la bombe explosive réclamaient plus de 1 000 kg à l'hectare ; il ne peut être question de consacrer à la destruction des pays entiers un tonnage de cet ordre, qui n'empêcherait d'ailleurs pas civils et militaires de continuer à y vivre et à s'y battre dès le lendemain du lancement.

Ce qui fait la puissance de la guerre biologique, c'est que les hormones synthétiques, à la dose mille fois moindre d'un kilogramme de produit actif à l'hectare, conviennent aussi bien pour la destruction des mauvaises herbes que pour celle des récoltes, suivant le but que l'on recherche ; que les toxines les plus actives empoisonnent l'homme à des doses infimes.

La supériorité de l'arme radioactive, c'est que les doses mortelles sont bien plus faibles encore.

Les calculs relativement optimistes de Ridenour se rapportent à l'action à distance par voie externe de produits radioactifs dispersés sur le sol ; l'effet est beaucoup plus grave si les radiations toxiques sont émises après absorption par l'organisme au contact même des cellules intéressées. La toxine botulinique, qui est le plus puissant des poisons biologiques, tue à la dose du



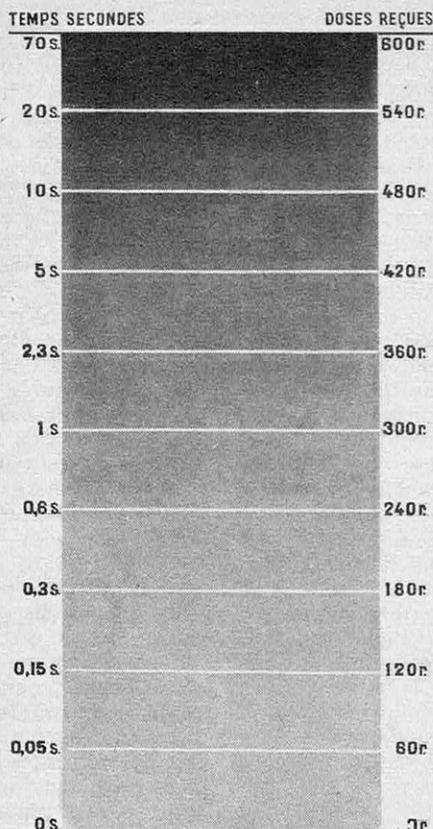
◀ Ces bovins avaient reçu sur l'échine des poussières radioactives produites lors de l'explosion du Nouveau-Mexique. Les parties du pelage exposées à l'action des radiations émises se sont mélangées de poils blancs.

L'émission des rayons gamma par une explosion atomique n'est pas instantanée. Très intense au début, le rayonnement s'affaiblit ensuite. Une seconde après avoir vu la boule de feu, un homme non protégé a déjà reçu la moitié de la dose totale qui doit l'atteindre. Mais s'il s'abrite rapidement, il pourra éviter une bonne part du reste. Dans l'exemple choisi, la dose 600 r est certainement mortelle, la dose 400 r laisse 50 % de chances de survie.

millième de milligramme ; le phosphore 32, inhalé ou ingéré, provoque la mort par localisation dans les os à une dose cent fois plus faible. La très grande différence d'efficacité entre l'action interne et externe des radiations nocives tient en général à la proximité immédiate de la source de radiations et des cellules atteintes. Elle permet l'emploi à la guerre radioactive non seulement d'émetteurs gamma, dont les radiations peuvent seules traverser la peau et les masses musculaires pour atteindre les organes, mais encore d'émetteurs alpha et bêta, dont les radiations sont absorbées par des épaisseurs très faibles de la plupart des matériaux. L'effet des émetteurs alpha, à grand pouvoir ionisant, est particulièrement dangereux ; c'est lui en particulier qui donne son pouvoir toxique très élevé au plutonium.

D'autre part, certains des produits radioactifs ingérés se concentrent naturellement dans des organes où leur action nocive est très sérieuse ; phosphore 32 dans les os dont la moelle joue un rôle essentiel dans la formation des globules du sang, iode 131 dans la glande thyroïde.

La plupart des produits radioactifs se comportent de manière très différente suivant que leur absorption a lieu par voie stomacale ou par voie pulmonaire. Par exemple, dans le cas du plutonium, on admet que sept millièmes seulement de la fraction ingérée par voie stomacale est fixée dans les tissus, alors que le rendement de l'absorption par voie pulmonaire peut être voisin de l'unité. Il est fort probable que ce sera là le mode d'action le plus dangereux des produits radioactifs répandus sur le sol, et qui seraient absorbés lors de la respiration dans des conditions où la formation de poussières pourra être favorisée de bien des manières, notamment par le bombardement explosif ou incendiaire.



LA CONDUITE DE LA GUERRE RADIOACTIVE

Ces distinctions, quant à l'effet nocif des éléments, suivant qu'ils sont utilisés par voie externe ou par voie interne, expliquent en partie les conclusions relativement optimistes de ceux qui envisagent la guerre radioactive sous la seule forme de la dispersion à grande altitude de produits dont la période de quelques semaines ou de quelques mois viserait à interdire temporairement des régions de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres carrés à leurs occupants.

En réalité, aucune guerre ne prendra des formes plus variées que celle-ci. Son domaine recouvre aussi bien les opérations militaires que l'activité industrielle et agricole. Elle peut être conduite indifféremment par les forces aériennes organisées et par la

guérilla. Elle fera planer sur l'existence des forces armées et sur la vie d'un peuple une menace dont la nature se rapproche assez de celle de la guerre biologique, et qui dépasse de beaucoup en gravité celle de la guerre chimique. C'est ce que quelques exemples suffiront à montrer.

La guerre radioactive, dit-on, en particulier, dans « The effects of atomic weapons », ne s'applique pas aux opérations tactiques. L'adversaire pourrait s'accrocher au terrain, qu'il accepte l'éventualité de pertes importantes mais non immédiates, ou qu'il remplace ses effectifs dans le secteur en cause avant qu'ils aient absorbé des radiations à dose dangereuse. C'est le même raisonnement qui servait à condamner le fusil de faible calibre à grande vitesse initiale, tel que le 6,5 mm accepté par quelques armées, qui avait l'avantage d'un poids moindre pour l'arme et les munitions, d'une tension accrue de trajectoire, etc. mais ne possédait pas la « puissance d'arrêt » voulue. Si la blessure mortelle correspond dans les deux cas à la même force vive de la balle à l'impact exprimée par le même nombre de kilogrammètres, la balle lourde à faible vitesse tue instantanément ; la balle légère à grande vitesse laisse pendant quelques secondes au mort en puissance la faculté dangereuse de vous tuer à son tour. La même objection est présentée contre ces projectiles infiniment plus légers et plus rapides que sont les

noyaux d'hélium, les électrons et les photons.

L'exigence de la mort instantanée paraît assez discutable. Si les vingt divisions de von Paulus, au lieu de tenir deux mois et demi dans Stalingrad sous des assauts fort coûteux pour l'assiégeant, avaient pu fondre en quinze jours sous une aspersions de produits radioactifs qui aurait consommé la production d'une semaine d'une usine américaine, le commandement soviétique se serait certainement estimé satisfait. Au surplus, dans le choix considérable de produits dont on disposera, il en est dont l'effet à dose infime est d'une puissance telle qu'ils se prêtent parfaitement à des opérations rapides.

On se bornera à l'une d'elles. L'étude du navire de guerre de l'ère atomique se poursuit évidemment dans toutes les marines. Dès qu'on limitera un peu moins leurs crédits, nous verrons apparaître des bâtiments de tous types à coque renforcée contre l'explosion sous-marine, sans aucune de ces superstructures qui s'écrasent sous l'effet du souffle ou de la retombée des gerbes géantes. Enfermé dans ses cylindres d'acier de tonnage modéré, qu'il dispersera à quelques kilomètres les uns des autres, le marin défiera l'aviateur et ses armes atomiques; celui-ci n'est pas assez riche pour consacrer à la destruction de chacun de ces bâtiments quelques bombes chargées à une douzaine de kilogrammes de plutonium.

Mais l'aviateur économe qui préférera utiliser le plutonium comme poison et non comme explosif en consommera beaucoup moins. La dose limite tolérable dans l'air,

à en croire « The effects of atomic weapons » est de $2,5 \times 10^{-5}$ microgramme au mètre cube. Pour être large et sûr d'un effet rapide, on multipliera la dose par mille. Avec moins d'un milligramme de plutonium convenablement pulvérisé — Ridenour recommande des particules d'un peu plus d'un micron qui sont retenues dans les poumons au rendement de 80 % quand les particules plus fines sont rejetées en trop grand nombre à l'expiration — il suffit d'un projectile dispersant son chargement dans le circuit fermé de ventilation d'un croiseur de 10 000 tonnes pour être débarrassé de son équipage en quelques heures. Le calibre de 30 mm des nouveaux chasseurs suffit largement à la perforation des ponts de croiseurs. Mais peut-être trouvera-t-on qu'il est dommage d'employer à cet usage un métal d'extraction aussi difficile que le plutonium 239 quand il suffit d'utiliser directement l'uranium qui s'est chargé de plutonium au cours de son séjour dans la pile.

La même dispersion sous forme de poussières ou de produits gazeux dans l'atmosphère confinée d'un abri ou d'un métro, ou l'addition dans les fleuves où l'on puise pour la fourniture d'eau aux grandes villes, provoquerait dans des délais très courts des pertes énormes en vies humaines. L'arme du parachutiste ou du travailleur forcé mécontent ne sera plus la mitrailleuse ou le plastic, mais les quelques centigrammes d'émetteurs alpha ou bêta indétectables et sans danger tant qu'ils seront dans la capsule métallique qu'on emportera avec soi.

L A D É F E N S E P A S S I V E

Aucune arme, si menaçante qu'elle apparaisse, ne reste sans parade. La guerre atomique et la guerre radioactive n'échapperont pas à cette loi. Le succès ne récompensera pas seulement celui qui saura fabriquer et semer chez l'adversaire le plus grand nombre de bombes au plutonium et le tonnage le plus élevé de produits radioactifs, mais celui qui saura s'organiser pour résister à cette aspersions.

Si l'aviation de bombardement était le seul moyen de transport possible des armes nouvelles, on pourrait songer à une parade par les méthodes actives de la DCA. Mais l'époque de la bombe explosive et incendiaire dont on pouvait se garder par une artillerie ou une chasse d'interception est largement dépassée. Les V-1 et les V-2 se substitueront à l'aviation défaillante tout comme le sous-marin d'où partiront, propulsés par fusée, les engins guidés à chargement varié qui atteindront une ville à des centaines de kilomètres. L'avion lui-même, lorsqu'on y aura recours, ne sera pas cet appareil contraint de venir exécuter son lancement

au-dessus de l'objectif, au milieu des tirs de barrage et des assauts de la chasse; il lâchera ses engins à la même distance que les bases terrestres et les sous-marins, ou même se bornera à disperser à son plafond des poussières que le vent portera à destination, aussi bien qu'il le faisait l'an dernier encore de la fumée des forêts canadiennes en flammes transportée jusque dans les Iles Britanniques.

Dans la plupart des cas, la seule défense efficace contre la guerre atomique et la guerre radioactive se réduira à une défense passive. Elle sera infiniment plus coûteuse qu'en 1939 et c'est probablement la raison pour laquelle seuls des pays de la richesse des Etats-Unis et de la Suisse ont commencé à étudier les problèmes qu'elle pose. Mais les principes de base de cette défense ne diffèrent pas de ceux qui se sont dégagés au cours de la dernière guerre pour lutter contre des armes beaucoup moins puissantes et qui sont la dispersion, l'éloignement et la protection.

LA DISPERSION

Entreprise en Angleterre, dès les premiers essais de « coventryisation », la dispersion aurait sauvé l'industrie de guerre britannique si le succès de la chasse de nuit n'avait pas contraint la « Luftwaffe », dès mai 1941, à se limiter à un harcèlement sans conséquences sérieuses. L'Allemagne appliqua rapidement cette même parade aux bombardements de la RAF ; les ateliers camouflés en maisons d'habitation dans les villages recueillaient l'outillage des usines effondrées sous les bombes soufflantes.

La dispersion est une parade aussi efficace de la bombe atomique que de la bombe explosive ; la production de plutonium est trop coûteuse pour qu'on puisse destiner à chaque petite ville ou village un engin aussi surabondant pour sa destruction ; l'existence d'une masse critique élevée pour la bombe atomique sauve tous les objectifs où ne sont pas réunis au moins quelques dizaines de milliers d'hommes. La dispersion est, pour cette raison, le moyen qu'envisagent principalement les Etats-Unis.

Son efficacité se maintiendrait en cas de guerre radioactive si la conduite de celle-ci réclame les tonnages élevés de produits coûteux que certains estiment nécessaires. On vient d'exposer les raisons d'en douter. Aussi la dispersion ne sera-t-elle alors qu'un palliatif qui devra fréquemment être complété par l'évacuation temporaire ou permanente de vastes zones en dehors des grandes villes. La mesure s'imposera spécialement dans les régions à grande densité de population comme l'Europe occidentale ou les deltas asiatiques. Cependant, dans la plupart des situations et surtout au début des opérations où l'on ne disposera pas d'un stock de produits radioactifs à faible période comparable au stock de bombes qu'on aura pu accumuler pendant des années de paix, la dispersion permettra d'éviter une catastrophe frappant l'ensemble de la population et des ressources économiques d'un pays.

Le degré extrême de dispersion, celui de l'industrie familiale dans les campagnes qui produit aussi bien les dentelles du Puy, les tapis africains ou les montres suisses, s'applique à quantité d'industries de guerre. La division du travail convient à l'échelle du village comme à celle de l'usine installée dans une grande ville. Sous la direction d'un contremaître et d'un régleur de machines automatiques, la fabrication, le contrôle et le montage seront répartis entre les travailleurs à domicile comme ils le sont entre les ouvriers d'un atelier.

Le degré le moins accentué de dispersion, celui du petit atelier groupant de vingt à cinquante ouvriers autour d'un outillage déjà puissant, s'applique à toute une série de fabrications civiles et militaires qu'on a l'habitude, sans raisons bien valables, de réunir dans des établissements d'effectif dix ou cent



● Vous êtes surpris par l'explosion en terrain découvert : jetez-vous à plat ventre, si possible dans un trou ou un fossé qui vous protégera contre les radiations.

fois plus élevé. La concentration actuelle date d'une époque où régnaient les chaufferies particulières, où les machines-outils étaient entraînées par un arbre de transmission commun à tout un atelier, où les voies ferrées raccordées au réseau général sillonnaient l'usine. On a inventé depuis l'énergie électrique, la commande individuelle et les transports automobiles, mais on a continué à entasser les ouvriers dans des villes tentaculaires où leur transport est beaucoup plus onéreux que celui des produits qu'ils fabriquent entre les différents ateliers dispersés dont le concours est nécessaire.

La principale difficulté de la dispersion, surtout à l'état d'industrie familiale, est la multiplication d'un outillage coûteux qui n'est pas utilisé à plein. Mais l'outillage de luxe surabondant que l'artisan des pays les plus civilisés peut réunir dans son atelier n'est pas plus un gaspillage que le tracteur avec charrue à douze socs et moissonneuse-batteuse qui permet au gentleman-farmer canadien de semer et récolter lui-même en quinze jours de travail de quoi vivre pendant un an. Le vrai gaspillage ne porte pas sur la mécanique, mais sur l'homme. C'est celui de l'ouvrier contraint à deux heures de marche et



● L'explosion a eu lieu sous l'eau ou au sol : Protégez vos poumons contre les poussières et les brouillards radioactifs soulevés par le souffle de l'explosion.



● Vous êtes près d'un mur. Couchez-vous contre lui pour éviter les chutes de débris. Couvrez la tête.



● Vous transportez un enfant dans sa voiture : abritez-vous sous un porche. Couvrez-le de votre corps.



● Chez vous, plongez sous la table avant que le souffle ait brisé les vitres et fait tomber le plafond.

huit heures de travail de nuit parce que son patron n'a qu'un tour archaïque à partager entre lui et deux de ses camarades ; c'est celui de la demi-douzaine de paysans qui suivent, en ayant l'air de s'occuper, l'unique tracteur de la ferme trop pauvre pour en offrir un à chacun.

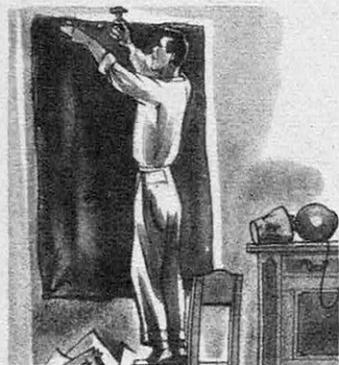
L'ÉLOIGNEMENT

Eloigner les centres de production des bases de départ d'attaques possibles est une ressource qui a manqué aux pays de l'Axe, et qui a puissamment servi les Alliés de 1939 à 1945.

Ni l'Allemagne, ni l'Italie, ni le Japon ne pouvaient transférer la majeure partie de leur industrie de guerre dans des régions assez éloignées pour leur protection. La Grande-Bretagne, au contraire, a largement fait appel au concours du Canada, de l'Afrique du Sud, des Indes, de l'Australie, toutes régions inaccessibles aux bombardiers qui atteignaient déjà difficilement les comtés industriels anglais. L'U.R.S.S. a été littéralement sauvée par le transfert de sa main-d'œuvre et de son outillage dans les centres à peine ébauchés de l'Oural et de la Sibérie.

Aussi bien contre la menace atomique que contre la menace radioactive, le seul degré d'éloignement acceptable est le transfert de la production de guerre au-delà des océans qui entourent le théâtre des opérations. Encore n'atteindra-t-on pas le degré d'efficacité total de 1939-45, où des belligérants comme les Etats-Unis se trouvaient, par leur position géographique, à l'abri complet du bombardement aérien. Le rayon d'action des avions s'est accru ; les engins destructeurs qu'ils auront à répandre se sont allégés ; le lancement par fusée à partir de sous-marins suppléera les expéditions aériennes. L'éloignement du théâtre des opérations n'en sera pas moins une difficulté sérieuse, surtout lorsqu'il se doublera de l'éloignement de l'objectif par rapport aux côtes.

L'éloignement n'est malheureusement pas une solution acceptable pour de nombreux éléments de la puissance économique. Ni l'industrie des Etats de l'Europe occidentale, ni leur agriculture ne sont susceptibles d'être transportés dans les vastes domaines que certains d'entre eux détiennent en Afrique tropicale. Les ports maritimes, fréquemment les grands ports fluviaux, tous les moyens



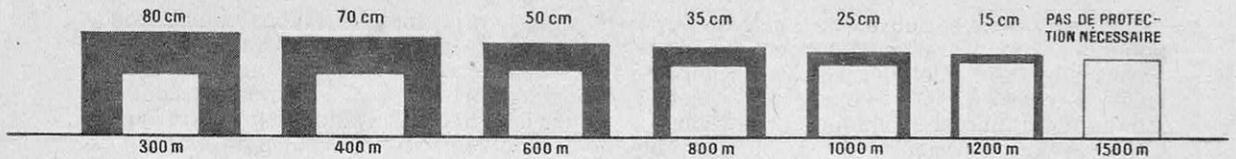
● Clouez un drap aux fenêtres brisées pour empêcher les brouillards radioactifs de pénétrer chez vous.



● Jusqu'à 2 km d'une explosion sous l'eau, vos vêtements sont probablement contaminés. Enterrez-les.



● Vous avez traversé une région contaminée. Douchez-vous. Insistez sur le nettoyage des cheveux.



● L'épaisseur de béton nécessaire pour protéger les occupants d'un abri ou d'une maison contre les rayons gamma a été déterminée d'après les effets observés

sur les habitants des différents étages dans les édifices japonais. Elle décroît assez rapidement à mesure qu'on s'éloigne de la verticale du point d'éclatement aérien.

de communication en général et, en particulier, les grandes voies fluviales à l'épreuve de la bombe ordinaire, ne peuvent pas être déplacés. Les centres industriels qui traitent sur place les matières extractives ne se prêtent pas davantage à l'éloignement. L'industrie métallurgique et chimique de l'Allemagne occidentale est restée liée pendant toute la guerre aux mines de charbon et de lignite de la Ruhr et de la Rhénanie, sans qu'on ait pu transporter dans des régions un peu moins exposées d'Europe centrale les usines écrasées périodiquement sous les bombes.

LA PROTECTION

La protection directe d'une installation industrielle contre les projectiles est une dernière méthode dont l'emploi commençait à se généraliser vers la fin de la dernière guerre.

Aux jours les plus durs du siège, les ateliers souterrains de Léninegrad et de Sébastopol livraient des munitions à leurs défenseurs. Plusieurs dizaines d'usines d'Allemagne occidentale avaient été transférées dans des galeries de mines désaffectées ou des tunnels spécialement forés. L'armée, la marine et l'aviation américaines ont fait prospector les grottes naturelles des Etats-Unis pour y abriter leurs usines de guerre et leurs stocks. Une grosse partie du programme de réarmement de la Suisse, qui ne peut compter sur l'éloignement pour s'abriter, est prévue pour des constructions souterraines à cette destination.

S'il n'y avait aucune difficulté à protéger les installations industrielles et les abris du personnel contre les bombes ordinaires, on peut se demander si la puissance de la bombe atomique ne compliquera pas exagérément les travaux de construction. Pour la bombe atomique type Hiroshima, Nagasaki et Bikini, aucune difficulté ne se présente ; on évalue à 30 mètres au plus la profondeur de l'entonnoir produit par une bombe éclatant à 15 mètres au-dessous du sol, distance qu'il semble difficile de dépasser au cours d'un lancement à grande vitesse initiale ; l'abri enterré à quelques centaines de mètres de profondeur au flanc d'une montagne est sûrement à l'épreuve. La question peut se poser pour la bombe type Eniwetok, six fois plus puissante, encore qu'il semble bien que la protection par l'épaisseur de rocher soit aisément réa-

lisable. Ce ne serait guère que pour la bombe à hydrogène, mille fois plus puissante, que se présenteraient de graves difficultés. Mais n'est-elle pas beaucoup trop coûteuse pour servir contre des usines à la fois enterrées et dispersées ?

L'enterrement des usines s'adapte fort bien aux créations d'industries nouvelles ; l'économie et la sécurité ne sont pas aussi inconciliables qu'il paraît. Si l'on consent à réduire le volume surabondant qu'on accorde à la plupart des installations de surface, on s'aperçoit que le rendement n'en est pas abaissé. L'expérience des usines souterraines suédoises où l'on n'a cependant pas cherché à réduire au minimum, comme en Allemagne, les frais de premier établissement confirme ce point de vue. Le coût d'entretien est faible : pas de revêtement extérieur, de toitures à réparer, de vitres à nettoyer ou à remplacer. En été, une simple ventilation réglable donne économiquement le même résultat que la climatisation de l'usine à l'air libre ; en hiver, la puissance du chauffage est très réduite. En terrain rocheux, le forage à la dynamite d'un tunnel ogival de 15 à 30 m de hauteur à la clef, où l'on peut d'ailleurs loger plusieurs étages, dispense de toute voûte ou pilier. On a estimé que les travaux d'excavation avaient relevé de 15 % le prix de revient de ces usines souterraines par rapport à celui des installations de même importance en surface, mais que les seules économies de chauffage et d'entretien rembourseraient cette avance.

La protection présente, sur l'éloignement et la dispersion, de très gros avantages, en maintenant l'industrie dans les régions où elle s'est naturellement installée en raison des facilités de transport et des ressources naturelles abondantes. Elle dispense de toute reconstruction d'immeubles d'habitation pour la main-d'œuvre. Elle fournit aussi bien à l'ouvrier qu'à sa famille cet abri provisoire qu'ils utiliseront en cas de recours à la guerre radioactive ou biologique.

LA PROTECTION INDIVIDUELLE

Les données les plus intéressantes publiées dans « The effects of atomic weapons » se rapportent à la protection individuelle par l'éducation de nos réflexes devant une explosion atomique. Il ne dépend pas de chacun de nous que cesse la concentration, le plus sou-

vent sans raison sérieuse, de l'activité économique, administrative, intellectuelle d'un pays entier dans quelques villes plus importantes d'année en année et qui seront l'objectif indiqué de la guerre atomique et radioactive. Combien de Parisiens, au surplus, ayant mesuré le risque de leur position et son agrément, accepteraient d'abandonner les Champs-Élysées pour exercer leur activité dans les Causses ou le Haut-Atlas. C'est à eux que s'adressent quelques conseils sur la conduite à tenir en cas d'explosion, qui auraient sauvé la moitié ou les trois-quarts des victimes d'Hiroshima et de Nagasaki.

Le gros danger reste le souffle, puisqu'on lui attribue officiellement aujourd'hui 50 à 60 % des morts japonais. Son classement en tête tient à ce qu'on y inclut non seulement l'effet direct sur l'homme, mais les blessures provenant de la chute des matériaux et les brûlures produites par les incendies qu'il allume. Or, le souffle se propage avec l'onde de choc à une vitesse qui est une fonction assez compliquée de la température et de la pression, mais qui se rapproche beaucoup de la vitesse du son dans l'air ambiant dès qu'on s'éloigne à quelques centaines de mètres du centre de l'explosion. Entre 1 000 m et 1 500 m on dispose de plusieurs secondes de l'instant de l'explosion, indiqué par un éclair aveuglant, à l'arrivée de l'onde de choc pour se préserver de ses effets. À l'extérieur, c'est un temps largement suffisant pour se jeter derrière un arbre à l'opposé de l'explosion, pour pénétrer sous un porche ; à l'intérieur, pour s'écarter d'une fenêtre dont les vitres vont voler en éclats, pour se glisser sous une table, pour retourner sur soi le fauteuil sur lequel on est assis. On avait déjà observé, lors des grosses explosions accidentelles où l'effet de souffle est seul en cause, navires chargés de munitions ou d'engrais, gazomètres... que le danger principal est celui d'une chute de matériaux qu'il est le plus souvent possible d'éviter.

Mais c'est surtout par les chiffres qu'elle donne sur la répartition dans le temps des radiations calorifiques émises que la publication officielle américaine est précieuse. Les infrarouges qui provoquent les brûlures ont leur maximum entre 0,3 et 3 secondes après l'explosion. On a calculé que si l'on parvient à se protéger des radiations calorifiques une seconde après l'explosion, on réduit des deux-tiers la quantité de chaleur reçue. Comme la moindre protection suffit, le journal qu'on lit dans son fauteuil, le col de veston qu'on ramène sur sa figure dans la rue, la préservation des brûlures est essentiellement affaire de réaction individuelle.

La grosse difficulté reste la protection contre ces radiations invisibles extra-courtes que sont les rayons gamma, et contre les neutrons simultanément émis.

L'effet des rayons gamma est nettement plus grave que celui des neutrons. On admet qu'à la distance de 1 280 m du centre de

l'explosion, la dose de rayons gamma reçue est mortelle pour une personne sur deux ; cette distance s'abaisse de moitié environ pour les neutrons. Mais, si l'émission des neutrons est trop rapide pour qu'on puisse tenter de leur échapper, il n'en est pas de même pour les rayons gamma, dont une grande partie sont émis par des substances radioactives produites par la fission, et qui mettent un temps non négligeable à se désintégrer. Par exemple, on a calculé que, des rayons gamma dangereux pendant la première minute au voisinage de la distance indiquée de 1 280 m, la moitié environ sont reçus pendant la première seconde. Il n'est pas impossible de trouver un abri pendant ce temps pour les autres.

La difficulté porte sur l'épaisseur de la protection exigée par les rayons gamma et les neutrons. Si le fantassin dans son trou peut y rentrer la tête en un dixième de seconde et s'y trouver aussi bien protégé contre les radiations gamma que contre les autres, le civil n'a pas à sa portée immédiate d'abri aussi efficace. Le journal ou le vêtement n'ont ici aucun effet. L'ombre d'un tronc d'arbre ou d'un mur seront le plus souvent les seules ressources, alors que pour réduire à 600 m la dose de rayons gamma à celle qui provoque une mort sur deux (1 280 m), il faudrait 0,50 m de béton.

Les effets des explosions au sol ou dans l'eau sont entièrement différents de ceux d'une explosion à quelques centaines de mètres d'altitude à cause de l'absorption rapide du souffle, de la chaleur et des radiations non calorifiques dans les obstacles voisins du sol qu'ils rencontreraient dans une grande ville. Leur effet principal résiderait dans la masse des produits radioactifs provenant de la fission qui retomberaient au sol avec l'eau de la gerbe si l'explosion est sous-marine, et qui seraient retenus et projetés dans les poussières des matériaux voisins si l'explosion a lieu au sol au voisinage d'immeubles. Les expériences de Bikini avaient appelé l'attention sur le premier danger. On nous signale aujourd'hui que le second serait du même ordre de grandeur.

Le problème est le même dans les deux cas : réduire au minimum la quantité de rayons gamma reçus en tenant compte à la fois de la durée de l'explosion et de la décroissance rapide de l'émission radioactive par les produits de fission à faible période.

La règle indiquée par le document officiel américain est la suivante : rester de deux à quatre heures dans un abri ou une cave, s'échapper en traversant aussi rapidement que possible la zone contaminée, se débarrasser des vêtements souillés et se laver soigneusement.

Peut-être de tels réflexes et de telles précautions seront-ils aussi naturels un jour qu'il l'est aujourd'hui, pour le fantassin, de s'aplatir dans le premier trou venu au sifflement d'une balle ou à l'arrivée d'un obus.

PETIT LEXIQUE NUCLÉAIRE

ALPHA. Particule de masse 4 et de charge +2, identique à un noyau d'hélium (hélium). Lorsque cette particule est émise par un noyau radioactif, elle est également appelée rayon alpha (α).

AMPLIFICATEUR. Equipement électrique composé de lampes à plusieurs électrodes et destiné à augmenter soit l'intensité d'une impulsion électrique, soit une différence de potentiel.

ANNIHILATION. Disparition de deux électrons, l'un positif l'autre négatif, et transformation de leur masse en radiation. C'est le phénomène inverse de la matérialisation.

ANTI-COINCIDENCES. Dispositif de compteurs destiné à bien délimiter un angle solide dans des expériences avec des rayons cosmiques ou avec des sources de particules au laboratoire.

ARRACHEMENT. Processus par lequel une particule de grande vitesse emporte un fragment d'un noyau. En anglais « spallation ».

ATOMES. Assemblages de particules élémentaires : neutrons et protons, autour desquels gravitent des électrons en nombre égal à celui des protons quand l'atome n'est pas ionisé.

AUTORADIOGRAPHIE. Empreinte photographique d'un objet contenant un produit radioactif.

AVOGADRO (nombre d'). Nombre de molécules d'un corps contenues dans une masse représentée, en grammes, par un nombre égal à sa masse moléculaire ($6,023 \times 10^{23}$).

BACKGROUND. Voir fond continu.

BACK SCATTERING. Diffusion d'un rayonnement vers l'arrière, c'est-à-dire dans la direction opposée à celle du faisceau incident.

BARN. Unité de section efficace utilisée principalement dans les pays anglo-saxons (10^{-24} cm²). C'est la cible géométrique offerte par un noyau de nombre de masse 8. En effet, la surface de la cible offerte par un noyau est égale à 4π multiplié par le carré du rayon et par la puissance $2/3$ du nombre A de particules, soit $4\pi r^2 A^{2/3}$. On prend $r = 1,4 \cdot 10^{-13}$ cm. Si $A = 8$ on a : $S = 10^{-24}$ cm².

BARRES DE CONTROLE. Tiges en acier au bore ou en cadmium qui servent à absorber une fraction des neutrons émis lors des fissions, et à contrôler ainsi le facteur de multiplication dans les piles atomiques.

BETA. Particule élémentaire de masse 1840 fois plus petite que celle d'un proton et de charge électrique unité,

soit $4,7 \cdot 10^{-10}$ u e s. Lorsque la charge est négative on la représente par β^- (ou électron), si la charge est positive on a un positon β^+ . On dit également rayon ou rayonnement β (électronique ou positonique). Voir aussi électron.

BETATRON. Accélérateur d'électrons utilisant un champ magnétique alternatif.

BÉTA-SYNCHROTRON. Synchrotron (voir plus loin) dont les électrons d'injection sont préalablement accélérés par un champ magnétique alternatif (bêatron).

BÉVATRON. Appareil accélérateur de particules pouvant atteindre le milliard (billion en anglais) d'électronvolts. $1 \text{ BeV} = 10^9 \text{ MeV} = 10^9 \text{ eV}$.

BIPARTITION. Fission d'un noyau en deux fragments.

BOSON. Particule qui obéit à la statistique de Bose — Einstein (exemple : les photons, les particules α).

BREEDERS. Se dit des piles atomiques dans lesquelles la disparition des noyaux fissibles est compensée par l'apparition d'autres noyaux fissibles formés à partir de noyaux non fissibles présents en plus grande quantité dans la pile.

c. Représente la vitesse de la lumière qui est de $300\,000 \text{ km/s}$ et que ne peut atteindre aucune particule (voir masses).

CALUTRON. Appareil fondé sur le principe du spectrographe de masse et utilisé tout d'abord à Berkeley pour la séparation des isotopes de l'uranium U 235 et U 238.

CHAMBRE D'IONISATION. Voir ionisation (chambre d').

CHAMBRE DE WILSON. Voir Wilson (chambre de).

CLASSIFICATION DE MENDELÉJEV. Tableau des éléments classifiés par le chimiste russe Mendéléjev suivant leurs analogies chimiques (1869).

COINCIDENCES. Assemblage de compteurs pour étudier la quasi-simultanéité de plusieurs phénomènes ou le passage d'une particule sur un certain trajet.

COLONNE THERMIQUE. Orifice pratiqué dans la protection d'une pile atomique pour utiliser les neutrons ralentis aux énergies thermiques.

COMPTEUR DE GEIGER-MULLER. Voir Geiger-Muller (compteur de).

CONSTANTE RADIOACTIVE. Régit la vitesse de désintégration des

éléments radioactifs. C'est la probabilité qu'un atome de se désintégrer dans l'intervalle d'une seconde (s'exprime en s⁻¹).

CONTAMINATION. Phénomène parasite qui provient de la pollution de l'air ou des parois d'un récipient servant comme appareil de mesure de radioactivité. Pollution d'un objet ou d'un local par des corps radioactifs.

CONVERSION INTERNE. Processus par lequel un rayon gamma (γ) émis par un noyau arrache un électron d'une couche périphérique de ce noyau (électron de conversion interne) et lui communique toute son énergie.

COSMOTRON. Accélérateur hypothétique de particules dans les espaces interstellaires.

COUCHES K, L, M, N, etc. Orbites des électrons qui entourent les noyaux atomiques.

CURIE. Quantité d'un élément radioactif naturel ou artificiel qui émet par seconde le même nombre de rayons que 1 gramme de radium en équilibre avec ses dérivés ($3,7 \times 10^{10}$ rayons/s dans tout l'espace et sans absorbant).

CYCLOTRON. Appareil permettant de communiquer des énergies considérables à des particules électrisées (ions) tournant à grande vitesse dans un champ magnétique fixe et entre des électrodes portées à un potentiel alternatif.

DÉFAUT DE MASSE. Différence entre les sommes des masses des neutrons et des protons qui forment un atome donné et la masse exacte de cet atome. Ce défaut de masse est à la base de l'énergie de liaison des particules élémentaires dans le noyau et du degré de stabilité de ce dernier.

DÉSINTÉGRATION. Transformation d'un noyau en un autre noyau avec émission de particules et de rayonnements.

DÉTECTEUR. Appareil destiné à mettre en évidence une radiation.

DEUTÉRIUM. Hydrogène lourd, isotope de l'hydrogène, de masse 2 (son noyau contient 1 proton et 1 neutron) : symbole D.

DEUTON. Particule de masse 2 et de charge +1, identique à un atome de deutérium ionisé et animé d'une certaine vitesse.

DIFFUSION. Trajets multiples parcourus par une radiation dans un certain milieu avant d'en sortir ou d'y être absorbée.

DOUBLE NEUTRON. Particule élémentaire obtenue à Los Alamos par bombardement de tritons (noyaux d'hydrogène de masse 3) par d'autres tritons de grande énergie; est radioactive avec une vie de 1 milliardième de milliardième de seconde en se scindant en 2 neutrons.

EAU Lourde. Oxyde de deutérium : D_2O .

ÉLECTRON. Particule élémentaire chargée négativement. Tourne autour des noyaux; le nombre d'électrons détermine le comportement chimique des éléments. La charge élémentaire est de $4,77 \cdot 10^{-10}$ U.E.S. = $1,6 \cdot 10^{-19}$ coulomb. Un électron Compton est un électron arraché à un atome par un rayon X ou γ .

ÉLECTRONVOLT. Unité d'énergie utilisée pour les divers rayonnements corpusculaires et par extension électromagnétiques, énergie acquise par un électron (charge unité) franchissant une différence de potentiel de 1 volt. $1 \text{ eV} = 1,59 \cdot 10^{-12}$ ergs.

ÉLECTROSCOPE. Appareil constitué par une feuille mince isolée que l'on peut porter à un certain potentiel. La perte de charge en fonction du temps est un indice de la conductibilité de l'air qui environne la feuille et, par tant, du nombre d'atomes radioactifs présents.

ÉLÉMENTS. Atomes déterminés, exemple : le Cuivre de symbole Cu; le Fer : Fe; l'Aluminium : Al, etc. Il existe une centaine d'éléments chimiques.

ÉMANATION. Gaz radioactif comme le radon, le thoron et l'actinon.

ÉNERGIE. L'énergie potentielle caractérise un corps au repos par rapport à un axe de coordonnées. Ainsi un rocher haut perché, les eaux d'un lac de montagne, etc., possèdent une énergie potentielle. L'énergie cinétique est due à la vitesse d'un corps en mouvement par rapport à un axe de coordonnées. Une balle tirée d'un fusil possède une énergie cinétique égale à la moitié du produit de sa masse par le carré de sa vitesse.

ÉNERGIE DE LIAISON. Voir défaut de masse.

ÉPAISSEUR DE MOITIÉ. Épaisseur d'écran qui intercepte la moitié d'un rayonnement donné.

ERG. Unité de travail ou d'énergie du système centimètre-gramme-seconde (c. g. s.).

ÉTOILE NUCLÉAIRE. Désintégration nucléaire au sein d'une émulsion photographique, visible uniquement au microscope.

EXPONENTIELLE. Croissance ou décroissance rapide en progression géométrique lorsque les temps ou les épaisseurs croissent en progression arithmétique.

FACTEUR DE MULTIPLICATION. Nombre effectif de neutrons secondaires produits lors de la fission d'un noyau par capture d'un neutron primaire.

FAMILLE RADIOACTIVE. Suite d'éléments radioactifs ayant tous le même ancêtre. Exemple : les familles de l'uranium, du thorium, du protactinium.

FERMION. Particule qui obéit à la statistique de Fermi-Pauli : électrons et positons, neutrons, protons, neutrinos.

FISSION. Rupture d'un noyau en deux fragments et plus rarement en trois fragments.

FISSIONNABLE OU FISSIBLE. Se dit d'un élément susceptible de se scinder en deux et plus rarement en trois, quatre, etc., fragments à la suite de la capture d'une particule, neutron, deuteron, etc.

FOND CONTINU. Se dit de la mesure d'un courant d'ionisation, faite par exemple avant de commencer une expérience. Voir aussi contamination. Le fond continu d'un appareil est dû à la contamination et aux rayonnements qui nous environnent : cosmiques, géologiques, organiques.

FRÉQUENCE. Périodicité. Pour un rayonnement ondulatoire, c'est le quotient de la vitesse de propagation (vitesse de la lumière pour un rayonnement électromagnétique) par la longueur d'onde. $\nu = c/\lambda$.

GAMMA (rayons γ). Rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde et très pénétrant.

GAZ RARES. Hélium, néon, argon, krypton et xénon. Gaz sans aucune affinité chimique ne donnant par conséquent aucun composé.

GEIGER - MULLER (compteur de). Appareil servant à dénombrer les particules ionisantes qui le traversent. Il est constitué par un cylindre métallique, deux bouchons isolants et un fil axial porté à un potentiel élevé.

GERBES. Ensemble de positons et d'électrons que l'on observe dans le rayonnement cosmique.

h. Constante de Planck égale à $6,55 \cdot 10^{-27}$ ergs. sec. Le produit de la constante h par la fréquence ν d'une radiation est un quantum; quantité « discontinue » d'énergie minimum : $W = h\nu$.

HÉLION. Particule alpha, noyau de l'atome d'hélium, se représente par α , He ou $\frac{4}{2}\text{He}$. Voir aussi alpha.

INDICATEUR RADIOACTIF. Les indicateurs radioactifs ou traceurs servent en biologie, en métallurgie, etc., pour suivre le « chemin », la position, l'élimination, etc., d'un élément radioactif.

ION. Atome ou groupe d'atomes ayant acquis une charge électrique positive ou négative.

IONISATION. Apparition d'une charge électrique sur un atome ou un groupe d'atomes due, soit à la perte d'un ou plusieurs électrons (apparition d'une charge positive) soit à la fixation d'un ou plusieurs électrons supplémentaires (apparition d'une charge négative).

IONISATION (chambre d'). Appareil servant à évaluer l'intensité d'un

rayonnement qui le traverse, d'après la mesure de la conductibilité provoquée dans un petit volume de gaz par l'ionisation de ses molécules sous l'action du rayonnement (mesure en réalité le pouvoir ionisant du rayonnement dans les conditions de l'expérience).

ISOBARES. Éléments différant par le nombre de protons mais ayant le même nombre de particules. Exemple H_3 (3 particules dont 1 proton et 2 neutrons) et He_3 (3 particules dont 2 protons et 1 neutron).

ISOMÈRES. Atomes de même numéro atomique et de même nombre de masse mais se désintégrant de façons différentes (ils diffèrent sans doute par leur niveau d'énergie). Exemple U_{234} qui existe sous deux formes isomères : UX_2 de 1,14 minutes de période et UZ de 6,7 heures de période.

ISOTOPE. Atome d'un élément ayant un nombre de masse particulier; pour un élément donné, de numéro atomique (nombre de protons du noyau) déterminé il y a en général de nombreux isotopes différant par le nombre de neutrons du noyau.

KÉVATRON. Accélérateur n'atteignant pas le million de volts. (1 keV = 1000 eV, et 1000 keV = 1 MeV).

LEPTONS. Nom donné parfois aux particules légères : électrons, positons, neutrinos.

MASSES. m_0 : masse au repos d'un électron $m_0 = 9,035 \cdot 10^{-28}$ g. m : sa masse relativiste est $m = m_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$ où v est la vitesse de l'électron et c la vitesse de la lumière

On voit que si $v = c$, la masse devient infinie, ce qui serait absurde, donc v est toujours plus petit que c .

M : masse du nucléon et plus précisément :

$M_{\text{proton}} = 1,6609 \cdot 10^{-24}$ g.
 $M_{\text{neutron}} = 1,6622 \cdot 10^{-24}$ g.

MASSE CRITIQUE. Masse minimum de matières fissibles et éventuellement de modérateur, d'absorbant, etc., qui doit être rassemblée pour que s'y établisse une réaction en chaîne.

MASSE MOLÉCULAIRE. Masse d'une molécule formée de plusieurs atomes. Exemple: $H_2 = 2$

$H_2O = 2 + 16 = 18$
 $CO_2 = 6 + 2 \times 16 = 38$
 $UO_2 = 238 + 32 = 270$

MATÉRIALISATION. Transformation d'un rayon γ en une paire d'électrons : positon + négaton. Phénomène inverse de l'annihilation.

MÉGA. Préfixe signifiant « millions de » et : 1 MeV ou mégaelectronvolt = 1 000 000 eV.

MESON. Particule élémentaire existant dans le rayonnement cosmique et que l'on a pu produire artificiellement au laboratoire; on en connaît toute une gamme (au moins 5) de charge positive ou négative, sans charge et de masses diverses (on dit aussi mésonon ou méson).

MICRO. Préfixe signifiant « millièmes de »; exemple : 1 μA ou microampère ou millièmes d'ampère.

MICROTRON. Appareil accélérateur de particules utilisant un champ magnétique fixe et un accélérateur alternatif à fréquence variable.

MILLI. Préfixe signifiant « millième de » exemple : 1 mA ou milliampère ou millième d'ampère.

MODÉRATEUR. Ou ralentisseur. Se dit d'une substance qui freine les neutrons secondaires produits dans une pile nucléaire.

MOLÉCULE. Ensemble cohérent et stable de divers atomes. Exemple : H_2 ; O_2 ; CH_4 ; SO_4H_2 , etc.

MOUVEMENT PROPRE. Voir fond continu.

NÉGATON. Ou e ou β . Voir bêta et électron.

NEUTRINO. Particule hypothétique sans charge et de masse voisine de zéro.

NEUTRON. Particule élémentaire neutre, de masse voisine de celle du proton. Est radioactif et se transforme, lorsqu'il est à l'état libre, en un proton plus un électron. Voir masses.

NEUTRONS INTERMÉDIAIRES. Neutrons dont l'énergie est supérieure à l'énergie d'agitation thermique (0,02 eV), mais inférieure à 1000 électronvolts.

NEUTRONS RAPIDES. Neutrons dont l'énergie est supérieure à 1000 eV.

NEUTRONS RETARDÉS. Se dit des neutrons émis après la fission par les fragments radioactifs.

NEUTRONS THERMIQUES. Neutrons dont l'énergie est voisine de l'agitation thermique, soit 0,02 électronvolt à la température ordinaire.

NOMBRE D'AVOGADRO ou N. Voir Avogadro (nombre d').

NOMBRE DE MASSE. Nombre total de protons et de neutrons dans un noyau atomique.

NOYAU. Partie centrale d'un atome, de l'ordre de 10^{-13} cm de diamètre, contient des particules chargées positivement (protons) et neutres (neutrons).

NUCLÉAIRE. Qui a rapport aux noyaux des atomes.

NUCLÉON. Particule élémentaire des noyaux atomiques. Existe sous deux formes : neutron et proton.

NUMÉRO ATOMIQUE. Nombre de protons dans un noyau atomique ou d'électrons autour d'un noyau non ionisé.

ONDE DE BROGLIE. Onde associée à une particule : sa longueur est h/mv où h est la constante de Planck, m et v la masse et la vitesse de la particule.

PARCOURS. Distance moyenne, maximum ou probable que parcourt une particule déterminée dans un milieu donné.

PÉRIODE RADIOACTIVE. Intervalle de temps au bout duquel la moitié des atomes présents dans une masse radioactive donnée se sont désintégrés. $T = 0,693/\lambda$ où λ est la constante radioactive.

PHOTON. « Grain » de lumière ou quantum électromagnétique. Voir constante de Planck.

PILE. Empilement convenable d'une matière fissionnable (uranium, plutonium) et d'un ralentisseur ou modérateur de neutrons de fission.

PILE ENRICHIE. Pile atomique dans laquelle le combustible nucléaire a été préalablement enrichi en isotope fisible.

PILE HÉTÉROGÈNE. Pile atomique dans laquelle la matière fisible et le ralentisseur se présentent sous des formes géométriques diverses et sont nettement séparés. L'un et l'autre peuvent être à l'état solide ou liquide.

PILE HOMOGÈNE. Pile atomique dans laquelle la matière première est mélangée au ralentisseur, formant ainsi un mélange homogène.

PHOTOMULTIPLICATEUR. Appareil combinant une couche photosensible avec un multiplicateur d'électrons.

PHOTO NEUTRONS. Neutrons issus d'une réaction nucléaire provoquée par des rayons X ou gamma.

POSITON. Electron positif (on dit aussi positron).

PROTON. Particule élémentaire chargée positivement (noyau d'hydrogène); voir masses.

PROTONIUM. Gaz d'hydrogène atomique de masse 1 débarrassé de son isotope deutérium de masse 2.

QUADRIPARTITION. Phénomène très rare de fission en quatre fragments.

QUANTITÉ DE MOUVEMENT. Produit de la masse par la vitesse = mv .

RADIOACTIVITÉ. Désintégration spontanée d'un noyau avec émission de particules chargées positivement (rayons alpha et positons) ou négativement (rayons bêta) et d'un rayonnement électromagnétique (rayons gamma).

RAIE SPECTRALE. Trace lumineuse observée dans l'étalement d'un rayonnement à l'aide d'un appareil dispersif (prisme, réseau, etc.), et qui est due à une émission d'énergie provoquée par des sauts d'électrons planétaires entre deux niveaux qu'ils peuvent occuper dans un atome.

RALENTISSEUR. Voir modérateur.

RAYONS ALPHA. Voir alpha.

RAYONS BETA. Voir bêta (rayons β).

RAYONS COSMIQUES. Rayonnement d'origine mal connue venant de toutes les directions de l'espace, formé de photons et de particules diverses dont certaines sont très pénétrantes.

RAYONS GAMMA. Voir gamma (rayons γ).

RAYONS X. Rayonnement électromagnétique de courte longueur d'onde produit lors du bombardement d'une cible par des électrons.

RÉACTION EN CHAÎNE. Réaction chimique ou nucléaire dont un des produits est susceptible d'engendrer une ou plusieurs réactions semblables; aboutit plus ou moins rapidement à une explosion si elle n'est pas arrêtée à un certain niveau, soit naturellement, soit par intervention humaine.

RÉFLECTEUR. Couche de graphite ou de béryllium entourant une pile

atomique et servant à réfléchir vers la pile une partie des neutrons qui s'en échappent.

ROENTGEN. Unité d'énergie utilisée pour la mesure du rayonnement X et gamma, désignée par la lettre r : quantité de rayons produisant dans 1 cm^3 d'air à 760 mm de pression de mercure et zéro degré C un tel degré de conductibilité qu'une unité électrostatique de charge soit mesurée sous courant de saturation, les électrons secondaires étant complètement utilisés et les effets de paroi de la chambre évités.

RUTHERFORD. Quantité de radioélément qui émet 10^8 particules par seconde dans tout l'espace.

SECTION EFFICACE. Surface conventionnelle qui traduit la probabilité plus ou moins grande qu'une particule, de caractéristiques données, de perturber un noyau et d'y provoquer une réaction déterminée.

SPALLATION. Voir arrachement.

SPECTRE. Ensemble de raies et de bandes lumineuses et obscures traduisant la répartition des radiations de diverses longueurs d'onde dans le rayonnement étudié. Spectre β : caractérise la répartition énergétique des particules (β^+ ou β^-) émises par un radio-élément.

SPECTROGRAPHE. Appareil servant à l'analyse des radiations lumineuses ou non dont il fournit un spectre.

SPECTROGRAPHE DE MASSE. Appareil mettant en œuvre des champs électriques et magnétiques pour la séparation des atomes de masses très voisines (isotopes).

SPIN. Chaque particule (et chaque groupe de particules) est caractérisée par un moment angulaire de rotation ou spin. Ce spin ne peut prendre que des valeurs discontinues multiples de $h/2\pi$, où h est la constante de Planck.

STATITRON. Appareil électrostatique du type Van de Graaff.

SYNCHROTRON. Appareil pour l'accélération des particules électrisées (ions) utilisant des champs magnétiques (fixe et variable) et une accélération électrique alternative à fréquence variable.

TRACEURS. Voir indicateurs radioactifs.

TRANSMUTATION. Transformation naturelle ou provoquée d'un noyau en un autre de charge différente.

TRITIUM. Aussi appelé tritérium, hydrogène très lourd, isotope de masse 3 (son noyau contient 1 proton et 2 neutrons); est radioactif.

VIE MOYENNE. Moyenne générale de la « vie » de tous les atomes présents dans une masse radioactive (à ne pas confondre avec la période radioactive, dont elle se déduit par multiplication par 1,44).

WILSON (Chambre de). Appareil à détente qui permet d'obtenir un brouillard mettant en évidence les trajectoires de particules ionisantes par condensation de vapeur d'eau sursaturée à leur passage.

Ceci intéresse

tous les jeunes gens et jeunes filles
tous les pères et mères de famille

L'ÉCOLE UNIVERSELLE, la plus importante du monde, vous met en mesure, par son **PRESTIGIEUX ENSEIGNEMENT PAR CORRESPONDANCE**, 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. Demandez l'envoi gratuit de la brochure qui vous intéresse.

- Br. 20.801 : **Toutes les classes, tous les examens : Second degré, de la sixième aux classes de Lettres Sup. et de Math. spéc., Baccalauréats, B.E.P.C., Bourses, entrée en sixième.** — Premier degré, de la section préparatoire (classe de onzième) aux classes de fin d'études et aux Cours complémentaires, C.E.P., Brevets, C.A.P.; classes des Collèges techniques, Brevet d'ens. industriel et commercial, Bacc. techn.
- Br. 20.807 : **Enseignement supérieur : Licences (Droit, Lettres, Sciences); Professorats.**
- Br. 20.812 : **Grandes Ecoles spéciales : Administration, Agriculture, Industrie, Travaux publics, Mines, Commerce, Armée, Marine, Enseignement, Beaux-Arts, Ecoles vétérinaires, France d'Outre-Mer.**
- Br. 20.816 : **Carrières de l'Agriculture, du Génie rural et des Industries agricoles.**
- Br. 20.803 : **Carrières de l'Industrie et des Travaux publics : Ingénieur (Diplôme d'Etat), Sous-Ingénieur, Dessinateur, Conducteur, Mètreur, Vérificateur, Chef de chantier, Contremaître, etc., dans toutes les spécialités; C.A.P., Brevets professionnels.**
- Br. 20.813 : **Carrières de la Comptabilité (Expert-Comptable, Chef-Comptable, Comptable, Aide-Comptable), du Commerce (Sténo-dactylo, Secrétaire, Représentant, etc.), de la Publicité, de la Banque, de l'Hôtellerie, etc. C.A.P. Brev. professionnels.**
- Br. 20.808 : **Pour devenir Fonctionnaire : Toutes les fonctions publiques, Ecole nationale d'Administration.**
- Br. 20.817 : **Orthographe, Rédaction, Versification, Calcul, Calcul mental, Dessin, Ecriture.**
- Br. 20.804 : **Carrières de la Marine Marchande : Long cours, Cabotage, Bornage, Pêche; Officier mécanicien de 1^{re}, 2^e ou 3^e classe! Certit. internat. de Radic (P.I.T.).**
- Br. 20.814 : **Carrières de la Marine de Guerre : Ecole Navale; Ecoles des Elèves Officiers, des Elèves Ingénieurs mécaniciens, de Maistrance, d'Apprentis marins, de Pupilles, etc.**
- Br. 20.809 : **Carrières de l'Aviation : Ecoles et carrières militaires : Elèves pilotes; Elèves radio-navigants; Mécaniciens et Télémécaniciens; Aéronautique civile; Fonctions administratives; Industrie aéronautique; Hôtesse de l'Air.**
- Br. 20.818 : **Radio, Brevets internationaux; Construction, dépannage.**
- Br. 20.805 : **Langues vivantes : Anglais, Allemand, Russe, Espagnol, Italien, Arabe; Tourisme.**
- Br. 20.815 : **Etudes musicales : Solfège, Harmonie, Composition, Direction d'orchestre, Piano, Violon, Flûte, Clarinette, Instruments de Jazz, Chant, Professorats publics et privés.**
- Br. 20.810 : **Dessin et Peinture : toutes les techniques, toutes les applications; Professorats.**
- Br. 20.819 : **La Couture, la Coupe, la Mode, la Lingerie : toutes fonctions, C.A.P., Professorats.**
- Br. 20.806 : **Secrétariats (Secrétaire de direction, Secrétaire particulier, Secrétaire de médecin, d'avocat, d'hommes de lettres, Secrétaire technique); Journalisme, Rédaction littéraire, Eloquence usuelle.**
- Br. 20.811 : **Cinéma : Technique générale, Prise de vues, Prise de sons, Décoration, Maquillage, Photographie.**
- Br. 20.802 : **L'Art de la coiffure et des Soins de beauté (Coiffeuse, Coiffeur, Manucure).**

Outre la brochure qui vous intéresse, demandez tous les renseignements et conseils spéciaux dont vous pouvez avoir besoin. Ils vous seront fournis à titre absolument gracieux et sans aucun engagement de votre part.

DES MILLIERS D'INÉGALABLES SUCCÈS

remportés chaque année dans les examens et concours officiels prouvent l'efficacité de l'enseignement par correspondance de

L'ÉCOLE UNIVERSELLE

59, boulevard Exelmans, Paris (XVI^e); Chemin de Fabron, Nice (A.-M.), 11, place Jules-Ferry, Lyon.

PYBELLE 1568



JIF SUPER-PANTA 4
à 4 mines de couleur
en plaqué or laminé.
5.575 Frs

WATERMAN
modèle luxe
à capuchon plaqué or laminé
5.400 Frs

Jif
Waterman
Préférés dans le monde entier